



MÁSTER EN INGENIERÍA PARA LA MOVILIDAD Y SEGURIDAD

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS AERODINÁMICO Y PROPUESTA DE MEJORAS DEL COCHE DE COMPETICIÓN ELÉCTRICO DEL ISC

Autor: Diego Álvarez Coedo

Directores: José Rubén Pérez Domínguez

Luis Manuel Mochón Castro

Madrid, agosto de 2022

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título **Análisis aerodinámico y propuesta de mejoras del coche de competición eléctrico del ISC** en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2º del M2S es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Diego Álvarez Coedo

Fecha: 25/08/2022



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: José Rubén Pérez Domínguez

Fecha: 25/08/2022

Luis Manuel Mochón Castro

Fecha: 25/08/2022



MÁSTER EN INGENIERÍA PARA LA MOVILIDAD Y SEGURIDAD

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS AERODINÁMICO Y PROPUESTA DE MEJORAS DEL COCHE DE COMPETICIÓN ELÉCTRICO DEL ISC

Autor: Diego Álvarez Coedo

Directores: José Rubén Pérez Domínguez

Luis Manuel Mochón Castro

Madrid, agosto de 2022

ANÁLISIS AERODINÁMICO Y PROPUESTA DE MEJORAS DEL COCHE DE COMPETICIÓN ELÉCTRICO DEL ISC

Autor: Álvarez Coedo, Diego.

Directores: Pérez Domínguez, José Rubén.

Manuel Castro, Luis Mochón.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

En este proyecto se realiza un análisis aerodinámico del coche de competición eléctrico del ISC Formula Student a través de simulaciones CFD empleando el Software Ansys Fluent. Por una parte, se simula un modelo de medio coche correspondiente al modelo del año 2020-2021 (modelo IFS-03). A continuación, se simula el monoplaza de este año, exponiendo los avances respecto al coche del año pasado. Finalmente, a partir de las simulaciones de ambos modelos, se proponen mejoras para su aplicación en años posteriores.

El proyecto se centra en un análisis de los elementos aerodinámicos de monoplaza a nivel de conjunto, puesto que, aunque previamente cada elemento se realizó a través de una optimización, en dicha optimización no se consideró la influencia e interacción entre todos los elementos aerodinámicos del monoplaza.

1. Palabras clave: CFD, Ansys Fluent, simulación, aerodinámica, ISC, Formula Student.

2. Introducción

La aerodinámica consiste en el estudio de un fluido, especialmente cuando interactúa y es afectado por un cuerpo sólido [1]. Su papel en áreas como la aeronáutica, aviación o automoción es muy importante. Concretamente, en el área de la automoción, con las nuevas normativas de consumo y contaminación su papel es básico para lograr los objetivos de emisiones y consumo propuestos para los años futuros. A pesar de ello, es en el campo del MotorSport donde su análisis es más exhaustivo, puesto que tiene una gran importancia en la velocidad máxima que puede alcanzar el monoplaza, su paso por curva, su manejabilidad e incluso afecta a la capacidad de frenada del coche.

La asociación del ICAI Speed Club fue creada en el año 2015 con el fin de realizar proyectos en el ámbito del mundo del motor [2]. Inicialmente estaba constituido por un total de 20 alumnos que decidieron realizar una moto de gasolina para la competición de MotoStudent. En 2016, el equipo participó por primera vez en esta competición y este mismo año surge la iniciativa del Formula Student Electric, consistente en la construcción de un monoplaza totalmente eléctrico que cumpla la normativa referente a Formula SAE. Para la realización del monoplaza eléctrico, hay un total de 11 departamentos entre los

que se encuentra el departamento de aerodinámica. En dicho departamento se analizan las fuerzas aerodinámicas que aparecen en el monoplaza, como son el “downforce” y el “drag”. Para determinar dichas fuerzas, se realizan simulaciones CFD a través del Software Ansys Fluent, el cual es un software CFD utilizado para el modelado de flujo de fluidos, la transferencia de calor y reacciones químicas. Surgió a través de la adquisición de Fluent en 2006 por parte de ANSYS [3], [4].

En el proyecto se realizarán las simulaciones CFD con todos los elementos aerodinámicos para analizar los 2 últimos monoplazas realizados en el ISC y proponer mejoras para el monoplaza del próximo año.

3. Estado del arte

En lo que respecta al sector automovilístico, en las décadas de los 50 y los 60, en las principales competiciones de automóviles se entendieron las importantes ventajas que ofrece mejorar la aerodinámica de los coches. Concretamente, en F1, el principal avance a nivel aerodinámico fue introducido en el año 1968 en el Lotus 49, el cual incorporó alerones al monoplaza directamente acoplados a la suspensión. Los alerones permitieron aumentar notablemente el “downforce” del coche, haciendo posible un paso por curva más rápido. Esto se debe a que el flujo circula a mayor velocidad por la parte inferior del perfil alar, haciendo que la presión sea menor y creando una fuerza resultante descendente. Además, la importancia de los alerones fue tan notable que su análisis y estudio para seguir mejorándolos se continúa haciendo en la actualidad. Principalmente, se modifican el ángulo de ataque del alerón, que incrementa el “downforce” generado, pero también el “drag”, por lo que los equipos lo adaptan en función de las características del circuito. Por otra parte, otra variable de gran importancia en el diseño del perfil es el “camber” del alerón, relacionado con su curvatura, como se muestra en la Figura 1 [5].

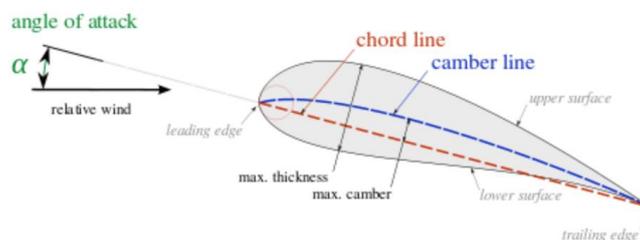


Figura 1. Principales variables que influyen en el “lift” y “drag” de un perfil alar de un avión [5].

Jim Hall, introdujo el concepto de efecto suelo en los coches de Formula 1 a través del Chaparral 2J. El concepto consistió en un monoplaza con faldones laterales que aislaban el suelo del coche, empleando además motores auxiliares para retirar el aire de debajo del coche y aumentar así el “downforce” creado. El concepto fue evolucionado mediante la eliminación de los motores auxiliares para extraer el aire y modificando la

forma de debajo del coche a un perfil alar invertido, aprovechando la reducida distancia al suelo para reducir la sección transversal de paso del aire y disminuyendo así la presión [6], [7]. Sin embargo, fue prohibido por parte de la FIA a principios de la década de los 80, como consecuencia de los problemas de seguridad causados por el efecto “porpoising” que originó graves accidentes. Este efecto, ha vuelto a aparecer actualmente en F1 con el cambio de normativa de 2022, en el que los equipos están trabajando para resolverlo, de momento a través de fijaciones para disminuir las deformaciones del fondo del monoplaza y a través del uso de suspensiones más rígidas [8].

La pérdida de “downforce” generada por la prohibición del efecto suelo fue en gran parte compensada por la incorporación de los difusores, que, aunque producían menos “downforce” que con el efecto suelo, tenían una mayor eficiencia al reducir notablemente el “drag” respecto al efecto suelo. El difusor acelera el aire que abandona el monoplaza, creando un área de baja presión debajo del coche que incrementa la producción de “downforce”. Actualmente es responsable de aproximadamente un 50% del “downforce” total de los monoplazas de F1 [9],[10],[11],[12].

Actualmente, los equipos emplean diferentes métodos para evaluar la actuación aerodinámica de los monoplazas. Por una parte, métodos computacionales a través de simulaciones CFD, donde se resuelven las ecuaciones del fluido numéricamente a través de la discretización del dominio. De esta forma, se obtienen resultados muy orientativos de cómo puede ser la actuación del monoplaza y a partir de un análisis de los resultados obtenidos se puede optimizar el diseño. Por otra parte, también se puede evaluar la actuación aerodinámica a través de ensayos en túneles de viento. El presupuesto necesario para la realización de este tipo de evaluación es muy superior y aunque es realizada por los equipos de Fórmula 1, no es empleada por el ISC. Finalmente, también se realizan pruebas en pista a fin de probar el diseño en condiciones reales.

4. Métodos

En el proyecto se simulan 2 monoplazas distintos: el IFS-03, correspondiente al coche eléctrico de competición diseñado para el año 2021 y el IFS-04, correspondiente para el coche eléctrico de competición para el año actual.

A fin de simular ambos monoplazas, se ha comenzado adaptando la geometría del chasis a un único elemento sólido, cuyas dimensiones coinciden con las del chasis. A este elemento se le han añadido los distintos componentes aerodinámicos manteniendo las relaciones de posición correspondientes entre ellos. Además, se ha verificado que en ningún caso se den interferencias entre los elementos del ensamblaje.

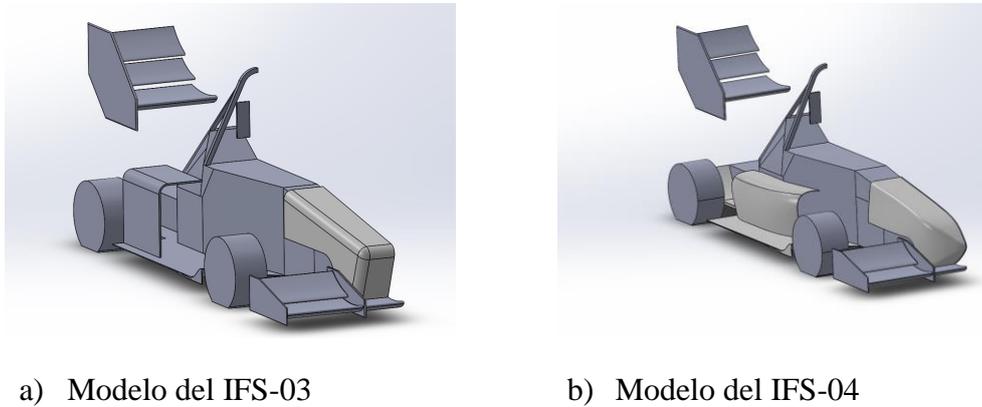


Figura 2. Modelos de los monoplazas simulados. a) IFS-03; b) IFS-04.

A partir de los modelos de cada monoplaza, se ha generado un “enclosure” que es el dominio en el que se resolverán las ecuaciones del flujo. Dicho dominio tiene unas dimensiones totales de 14,05 m (L) x 3,35 m (W) x 5,86 m (H), establecidas de acuerdo con lo mostrado en la Figura 3.

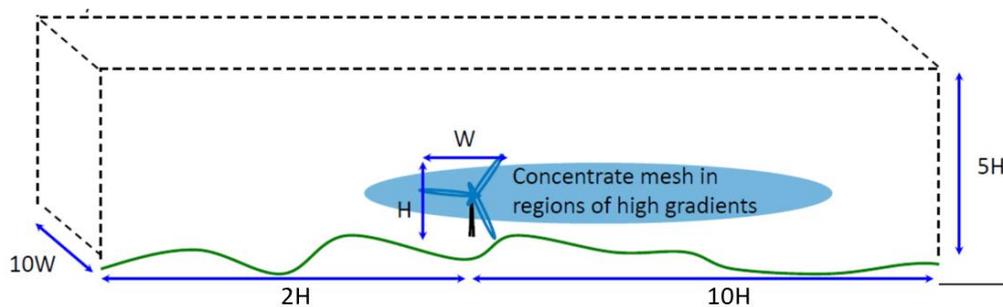


Figura 3. Dimensiones del dominio [3].

Debido a la complejidad geométrica del modelo, la malla empleada tiene elementos tetraédricos y, a través de un análisis de sensibilidad de malla y considerando las limitaciones computacionales con las cuales se han realizado las simulaciones, se ha determinado que el número de elementos debe ser de alrededor de 10 millones de elementos, a partir del cual se comienzan hacer independientes los valores de las fuerzas aerodinámicas calculadas de arrastre y de “downforce” del tamaño de malla empleado. Además, se han empleado “inflations” de 4 capas con una ratio de crecimiento de 1,2 en las superficies del monoplaza en contacto con el aire. Se ha generado una operación de “inflation” por separado por cada elemento aerodinámico, incluyendo además un refinado de la malla en cada superficie en la que la “inflation” es necesaria (excepto en el suelo de la carretera). El tamaño de malla general corresponde a un tamaño de elemento de 0,3m y los tamaños de cada refinado son descritos a lo largo del presente documento.

Tabla 1. Análisis de sensibilidad de malla.

Malla	Número de elementos	Drag [N]	Lift[N]	Presión a la entrada del dominio [Pa]	Coste computacional [mins]
1	311100	140.11	249.21	18	53
2	4312130	133.21	253.1	17.9	70
3	5903980	142.13	231.12	18.1	140
4	8214141	162.21	278.12	18.73	210
5	9720190	169.49	287.07	18.91	311

Para la resolución de las simulaciones se ha empleado el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST y los métodos de solución por defecto. Sin embargo, dichos métodos han sido modificados para la resolución del IFS-04 para facilitar la convergencia, como se expone a lo largo del proyecto.

Las condiciones de contorno establecidas han sido de velocidad de entrada de 22.22 m/s, presión atmosférica a la salida, pared con velocidad traslacional con velocidad de 22.22 m/s para la carretera, velocidad rotacional de 111.11 rad/s para cada rueda, pared para las caras del monoplaza y simetría para las caras restantes del dominio.

Finalmente, a fin de verificar la convergencia se han establecido monitores para las fuerzas de arrastre, el “dowforce”, la diferencia de flujo másico entre la entrada y salida del dominio, la presión a la entrada del dominio y la velocidad a la salida del dominio.

5. Resultados

Las simulaciones se han ejecutado hasta que la convergencia se ha alcanzado. Dicha convergencia se ha determinado a través de los residuos y de la estabilización de los monitores establecidos para las simulaciones. Dicha convergencia ha sido alcanzada aproximadamente a las 1000 iteraciones en la simulación del IFS-03 y de las 200 iteraciones en la del IFS-04. Una vez verificada la convergencia y cumplimiento de las condiciones de contorno establecidas se ha procedido al análisis de los resultados.

En el caso del IFS-03, se observa cómo el alerón delantero funciona correctamente, generando zonas de altas presiones (bajas velocidades) en la zona superior de los perfiles y de baja presión (altas velocidades) en la región inferior, sin embargo, el morro del monoplaza, al ser demasiado recto genera una zona de presiones elevadas en la parte delantera del monoplaza que genera una fuerza resultante en oposición a su avance (“drag”).

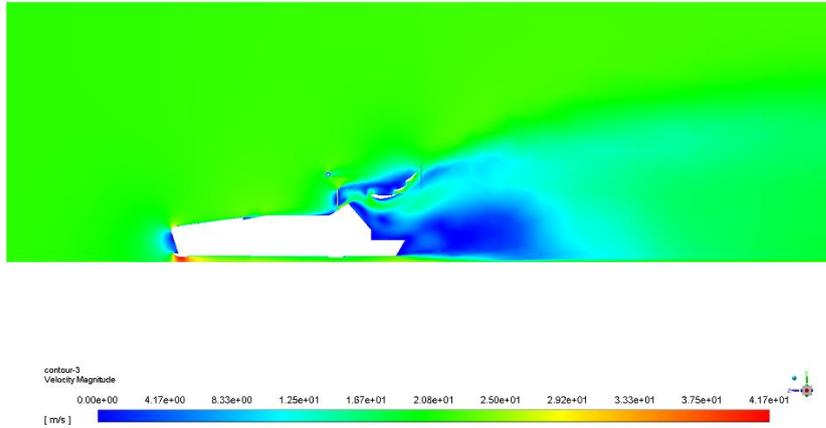


Figura 4. Velocidades en la simulación del IFS-03.

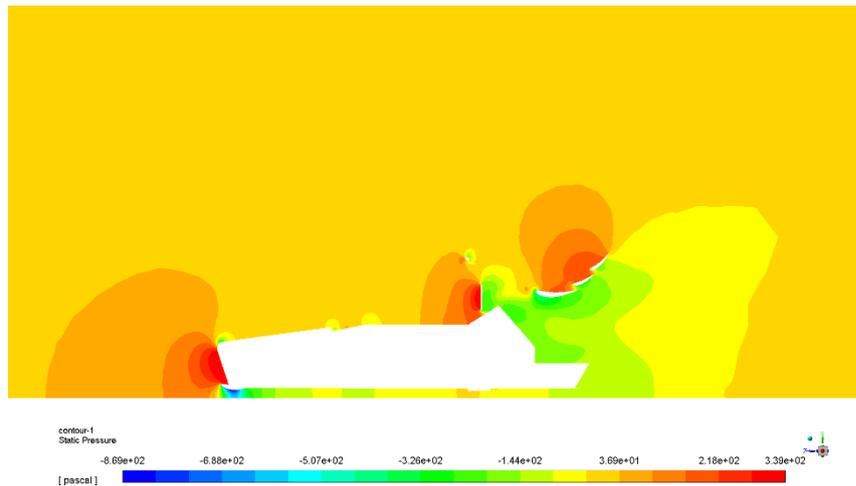


Figura 5. Presiones en la simulación del IFS-03.

El alerón trasero se encuentra altamente afectado por la turbulencia generada por el apoyacabeza del monoplaza. Sin embargo, la energía turbulenta en posiciones ligeramente inferiores en la dirección de Y es menor (Figura 6). De esta forma, se puede concluir que para mejorar el “downforce” generado por el alerón trasero se debe reducir ligeramente su cota.

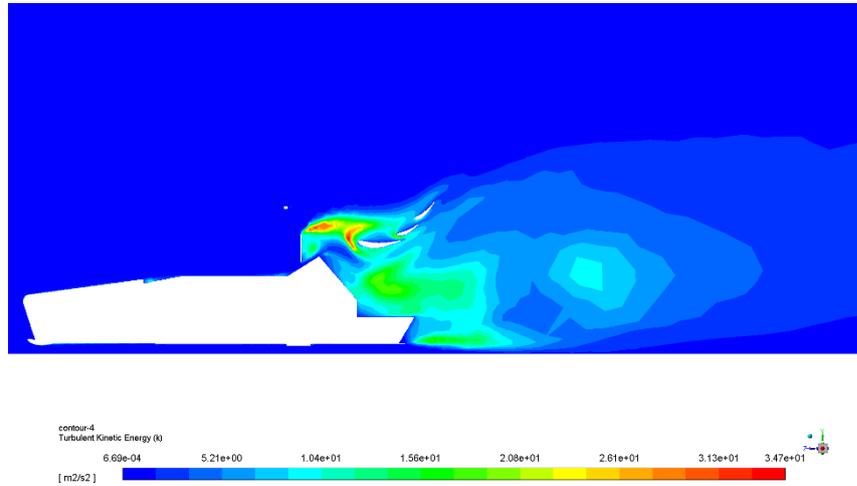


Figura 6. Turbulencia en la simulación del IFS-03.

En el caso del IFS-04, la región de altas presiones obtenidas en la región del morro es menor que en las simulaciones obtenidas en el IFS-03. Esto se debe principalmente a la modificación de la forma del morro, que pasa a ser más redondeada. Sin embargo, en el alerón trasero el flujo llega con mayor turbulencia al alerón trasero, reduciendo su rendimiento.

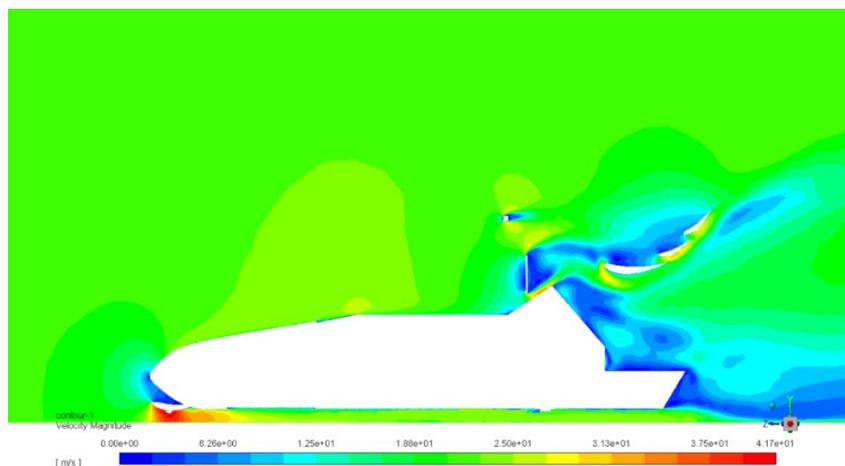


Figura 7. Velocidades en la simulación del IFS-04.

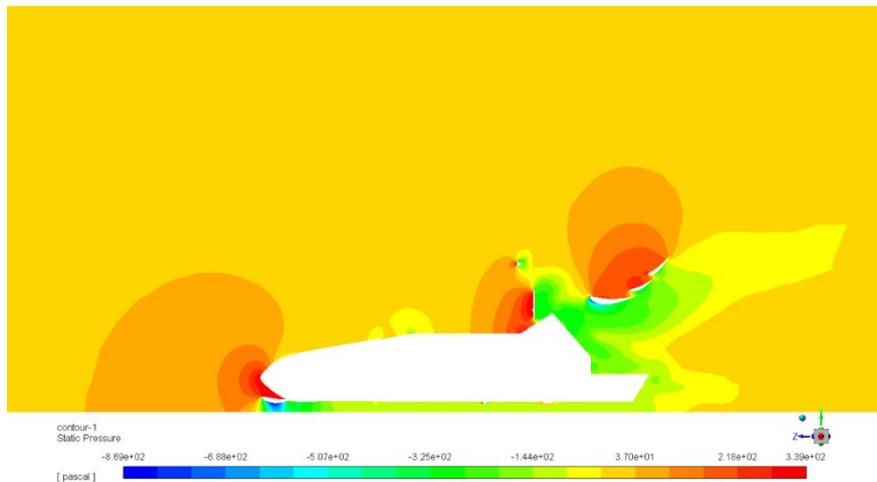


Figura 8. Presiones en la simulación del IFS-04.

Finalmente, en lo que respecta a las fuerzas aerodinámicas se ha conseguido mantener la fuerza de arrastre a pesar del aumento de la sección del chasis gracias a la mejora del morro del monoplaza. Por otra parte, el “downforce” se ha mejorado gracias a un incremento del flujo que pasa por el fondo plano al mejorar la forma del morro del monoplaza.

6. Propuesta de mejoras

Teniendo en cuenta las simulaciones y los resultados obtenidos, se proponen las siguientes mejoras de cara al monoplaza de años futuros.

- Desplazamiento del alerón trasero: a fin de evitar la turbulencia procedente del apoyacabeza y del “cockpit”, se ha bajado la posición del alerón trasero y se ha desplazado hacia atrás. De esta forma, considerando los resultados de las simulaciones, el flujo llegará más ordenado a los perfiles del alerón.
- Incrementar el tamaño de los endplates traseros a fin de evitar que el flujo de altas presiones de la parte superior del alerón pase a la parte inferior, reduciendo el “downforce” generado.
- Reducir la altura y la anchura del morro. A pesar de que ha sido mejorada notablemente entre el IFS-03 y el IFS-04, se observa en las simulaciones una amplia región de altas presiones. A fin de reducir la altura del morro, se debe trabajar en una reducción de la altura del chasis del monoplaza.
- Reducir el número de elementos de los alerones a 2 elementos y hacer dichos elementos con un tamaño mayor. Actualmente, hay un total de 3 elementos. Sin embargo, se observa que el último elemento tiene un alto ángulo de ataque, haciendo que el “drag” generado sea elevado. Además, se observa que el “downforce” generado es más reducido que en los otros dos elementos.

La mejora del nuevo posicionamiento del alerón trasero hace que el “drag” se mantenga a la vez que el “downforce” se incrementa aproximadamente un 7% respecto al modelo del IFS-04.

7. Conclusiones

Además de realizar una optimización de cada uno de los elementos aerodinámicos de un monoplaza, es necesario realizar un análisis del monoplaza en su conjunto, puesto que, especialmente en las partes traseras, como se ha observado en las simulaciones realizadas, el flujo llega con turbulencia y en unas condiciones no ideales.

En el caso del IFS-03, en la simulación se ha podido verificar la necesidad de modificar el morro del monoplaza y también se ha observado el bajo rendimiento del alerón trasero por cómo le llega la corriente de aire, especialmente del reposacabezas.

Por otra parte, a través de las simulaciones del IFS-04 se ha cuantificado la mejoría a nivel de “downforce” del monoplaza, al igual que se ha observado que el “drag” se ha mantenido igual que en el IFS-03 a pesar del incremento del tamaño del chasis principalmente.

Respecto al posicionamiento del alerón trasero, se concluye tanto en el IFS-03 como en el IFS-04, que la posición debe ser retrasada y reducida en altura para evitar el alto grado de turbulencia procedente del apoyacabeza.

La nueva simulación realizada con la modificación de la posición relativa del alerón trasera respecto al resto de elementos del monoplaza verifica la mejoría obtenida en el “drag” y en el “downforce”. Concretamente, se ha obtenido un incremento de aproximadamente un 7% respecto al “downforce” medido en el IFS-04 y se ha mantenido el valor del “drag”.

Por otra parte, se concluye que, aunque la mejoría en el morro entre el IFS-03 y IFS-04 es sustancial, la región de altas presiones en el morro del IFS-04 puede ser todavía mejorada reduciendo su anchura y altura. Sin embargo, para ello será necesario realizar modificaciones en las dimensiones del chasis.

Además, se observa cómo el último elemento del alerón trasero no produce un significativo incremento del “downforce” generado, y su elevado ángulo de ataque provoca un alto nivel de “drag”. Por ello, se propone reducir de 3 a 2 elementos el alerón trasero.

Finalmente, a fin de reducir la circulación de flujo hacia las zonas de baja presión de los perfiles del alerón trasero, se propone incrementar las dimensiones de los “endplates” para aislar la región de bajas presiones localizada por debajo de los perfiles, mejorándose así el rendimiento del alerón trasero.

8. Referencias

- [1] Joseph Katz. *Race Car Aerodynamics Designing for Speed Engineering and Performance (Chapter 1)*. 2003.
- [2] Icai Speed Club | Página oficial
- [3] Apuntes de Simulación Multifísica, 2021.
- [4] I. Sadrehaghighi, «Error & Uncertainty Quantification within CFD». 2022.
- [5] Formula 1 Aerodynamics - Introduction - F1technical.net
- [6] McBeath, S. *Competition Car Aerodynamics*; Veloce Publishing Limited: Dorset, UK. 2015.
- [7] Petrone, G.; Hill, C.; Biancolini, M. *Track by track robust optimization of a F1 front wing using adjoint solutions and radial basis functions*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2014.
- [8] X. Castro, Z. Rana. *Aerodynamic and Structural Design of a 2022 Formula One Front Wing Assembly*. 2020.
- [9] Gorostidi, N.; Lecourt, D.; Castro, X.; Maigler, M. *Optimisation of Aerofoil Design*. Cranfield University. 2020.
- [10] <https://www.f1technical.net/>
- [11] Formula 1's Porpoising Problem - Racecar Engineering (racecar-engineering.com)
- [12] Lau, C.S.; Srigrarom, S. *Flow field around the front wing of Formula One racing car model: BAR Honda 003 and MP4-21 under ground effect*. 2010.

AERODYNAMIC ANALYSIS AND PROPOSED IMPROVEMENTS OF THE ISC ELECTRIC RACING CAR

Author: Álvarez Coedo, Diego.

Directors: Pérez Domínguez, José Rubén.

Manuel Castro, Luis Mochón.

Collaborating entity: ICAI – Comillas Pontifical University

PROJECT SUMMARY

In this project an aerodynamic analysis of the ISC Formula Student electric racing car is carried out through CFD simulations using Ansys Fluent software. On the one hand, a half-car model corresponding to the 2020-2021 model year (model IFS-03) is simulated. Then, this year's single-seater car is simulated, showing the improvements with respect to last year's car. Finally, based on the simulations of both models, improvements are proposed for implementation in subsequent years.

The project focuses on an analysis of the aerodynamic elements of the single seater car at the overall level. Although each element was previously optimized, the influence and interaction between all the aerodynamic elements of the single-seater car was not considered in this optimization.

1. Key words: CFD, Ansys Fluent, simulation, aerodynamics, ISC, Formula Student.

2. Introduction

Aerodynamics is the study of a fluid, especially when it interacts with and is affected by a solid body [1]. Its role in areas such as aeronautics, aviation or automotive is very important. Specifically, in the automotive area, with the new consumption and pollution regulations, it is essential to achieve the emission and consumption targets proposed for future years. However, it is in the field of MotorSport where its analysis is more exhaustive, since it has a great importance in the maximum speed that the car can reach, its cornering, its handling and even affects the braking ability of the car.

The ICAI Speed Club association was created in 2015 with the aim of carrying out projects in the field of motorsport [2]. Initially, it consisted of a total of 20 students who decided to make a gasoline-powered motorcycle for the MotoStudent competition. In 2016, the team participated for the first time in this competition and this same year the Formula Student Electric initiative arose, consisting of the construction of an all-electric single-seater car that complies with the regulations concerning Formula SAE. For the realization of the electric single-seater car, there are a total of 11 departments, including the aerodynamics department. This department analyzes the aerodynamic forces that appear in the car, such as downforce and drag. To determine these forces, CFD

simulations are performed using Ansys Fluent software. Ansys Fluent is CFD software used for modeling fluid flow, heat transfer and chemical reactions. It emerged through the acquisition of Fluent in 2006 by ANSYS [3], [4].

In the project, CFD simulations will be performed with all the aerodynamic elements and considering the geometry of the problem to analyze the last 2 single-seaters made at ISC and propose improvements for next year's single-seater car.

3. State of the art

As far as the automobile sector is concerned, in the 50s and 60s, the main automobile competitions understood the important advantages offered by improving the aerodynamics of the cars. Specifically, in F1, the main advance in aerodynamics was introduced in 1968 in the Lotus 49, which incorporated spoilers to the single-seater car directly coupled to the suspension. The spoilers made it possible to significantly increase the car's downforce, making it possible to go through corners faster. This is due to the fact that the flow circulates at a higher speed through the lower part of the airfoil, making the pressure lower and creating a resulting downward force. In addition, the importance of the wings was so remarkable that their analysis and study to continue improving them is still being done today. Mainly, the angle of attack of the aileron is modified, which increases the downforce generated, but also the drag, so the teams adapt it according to the characteristics of the circuit. On the other hand, another variable of great importance in the design of the profile is the camber of the spoiler, related to its curvature, as it is shown in Figure 1 [5].

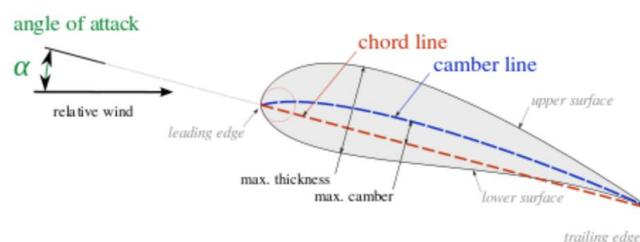


Figure 1. Main variables influencing the "lift" and "drag" of an aircraft airfoil [5]

Jim Hall introduced the concept of ground effect to Formula 1 cars through the Chaparral 2J. The concept consisted of a racing car with side skirts that isolated the ground from the car, also employing auxiliary engines to remove air from under the car to increase the downforce created. The concept was evolved by eliminating the auxiliary engines to remove the air and modifying the shape of the undercarriage to an inverted airfoil, taking advantage of the reduced ground clearance to reduce the air passage cross-section and thus decreasing downforce [6], [7], [8]. However, it was banned by the FIA in the early 1980s, due to safety problems caused by the porpoising effect, which led to

serious accidents. This effect has now reappeared in F1 with the change of regulations in 2022, in which the teams are working to solve it, for the time being through fixings to reduce the deformations of the bottom of the car and through the use of stiffer suspensions [8].

The loss of downforce generated by the ground effect ban was largely compensated by the introduction of diffusers, which, although they produced less downforce than with ground effect, were more efficient by significantly reducing drag with respect to ground effect. The diffuser accelerates the air leaving the car, creating an area of low pressure under the car that increases downforce production. It is currently responsible for approximately 50% of the total downforce of F1 cars [9], [10], [11], [12].

Currently, teams use different methods to evaluate the aerodynamic performance of racing cars. On the one hand, computational methods through CFD simulations, where the fluid equations are solved numerically through the discretization of the domain. In this way, very indicative results are obtained of how the half car model may perform and, based on an analysis of the results obtained, the design can be optimized. On the other hand, the aerodynamic performance can also be evaluated through wind tunnel tests. The budget required for this type of evaluation is much higher and although it is carried out by Formula 1 teams, it is not used by the ISC. Finally, track tests are also performed in order to test the design in real conditions.

4. Methods

The project simulates 2 different single-seaters: the IFS-03, corresponding to the electric racing car designed for the year 2021 and the IFS-04, corresponding to the electric racing car for the current year.

In order to simulate both half car models, we started by adapting the chassis geometry to a single solid element, whose dimensions match those of the chassis. To this element, the different aerodynamic components have been added, maintaining the corresponding position relationships between them. In addition, it has been verified that in no case there are interferences between the elements of the assembly.

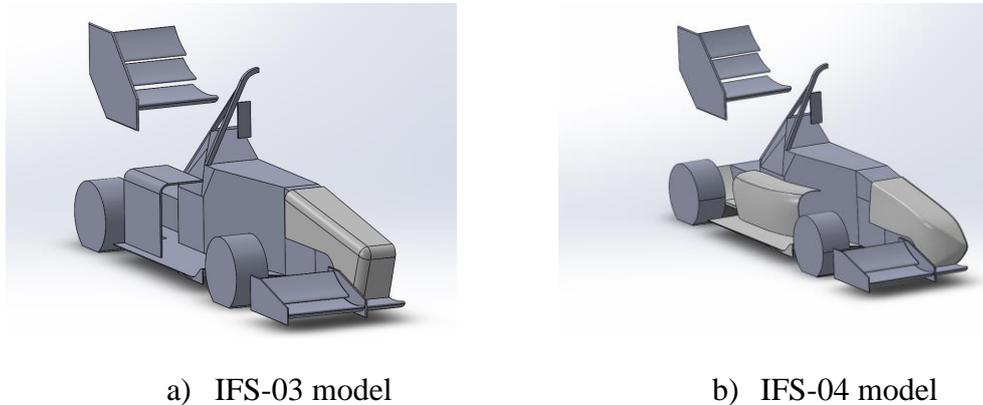


Figure 2. a) IFS-03 model; b) IFS-04 model.

From the models of each half car model, an enclosure has been generated, which is the domain in which the flow equations will be solved. This domain has overall dimensions of 14.05 m (L) x 3.35 m (W) x 5.86 m (H), established as shown in the Figure 3.

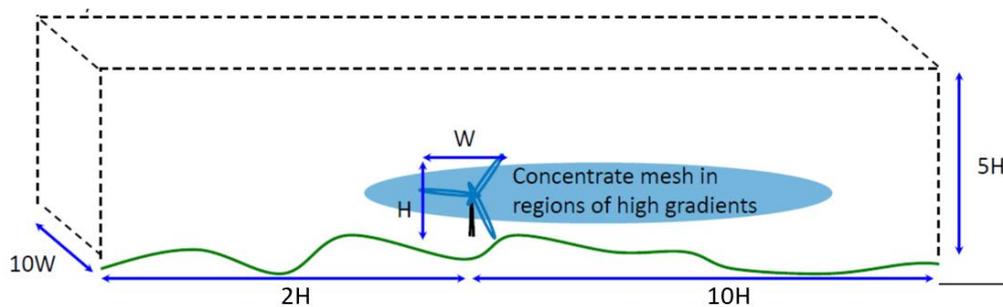


Figure 3. Dimensions of the domain.

Due to the geometric complexity of the model, the mesh used has tetrahedral elements and, through a mesh sensitivity analysis and considering the computational limitations with which the simulations have been carried out, it has been determined that the number of elements should be around 10 million elements, from which the calculated aerodynamic drag and downforce values begin to stabilize. In addition, 4-layer inflations with a growth ratio of 1.2 have been used on the surfaces of the single-seater car in contact with the air. A separate inflation operation has been generated for each aerodynamic element, including further mesh refinement on each surface where inflation is required (except for the road surface). The overall mesh size corresponds to an element size of 0.3m and the sizes of each refinement are described throughout this document.

Table 1. Sensitivity analysis.

Mesh	Number of elements	Drag [N]	Lift[N]	Inlet pressure [Pa]	Computational cost [mins]
1	311100	140.11	249.21	18	53
2	4312130	133.21	253.1	17.9	70
3	5903980	142.13	231.12	18.1	140
4	8214141	162.21	278.12	18.73	210
5	9720190	169.49	287.07	18.91	311

For the resolution of the simulations, the $k-\omega$ SST turbulence model and the default solution methods have been used. However, these methods have been modified for the resolution of the IFS-04 to facilitate convergence, as discussed throughout the project.

The boundary conditions established have been input velocity of 22.22 m/s, atmospheric pressure at the exit, wall with translational velocity with velocity of 22.22 m/s for the road, rotational velocity of 111.11 rad/s for each wheel, wall for the faces of the single-seater and symmetry for the remaining faces of the domain.

Finally, in order to verify convergence, monitors have been set up for drag forces, downforce, mass flow difference between the inlet and outlet of the domain, pressure at the inlet of the domain and velocity at the outlet of the domain.

5. Results

The simulations were run until convergence was reached. This convergence was determined through the residuals and the stabilization of the monitors set for the simulations. This convergence was reached at approximately 1000 iterations in the IFS-03 simulation and at 200 iterations in the IFS-04 simulation. Once the convergence and compliance with the established boundary conditions had been verified, the results were analyzed.

In the case of IFS-03, it is observed that the front wing works correctly, generating high pressure zones (low speeds) in the upper area of the profiles and low pressure (high speeds) in the lower region. However, the nose of the single-seater, being too straight, generates a high-pressure zone in the front part of the single-seater which generates a resultant force in opposition to its advance (drag).

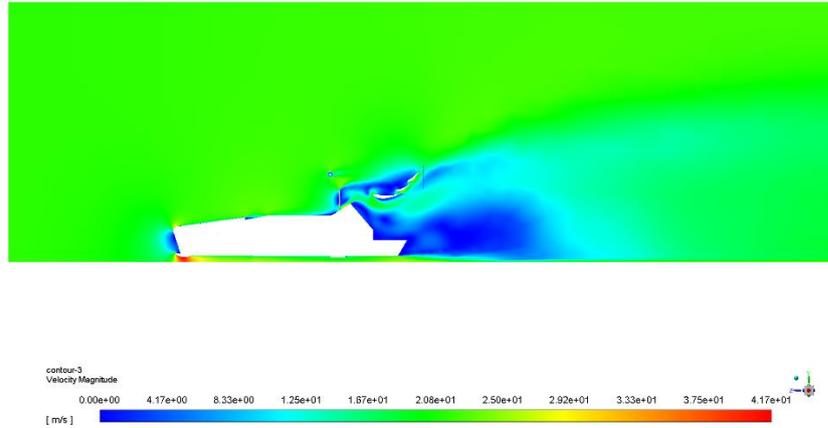


Figure 4. Velocities in the simulation of the IFS-03.

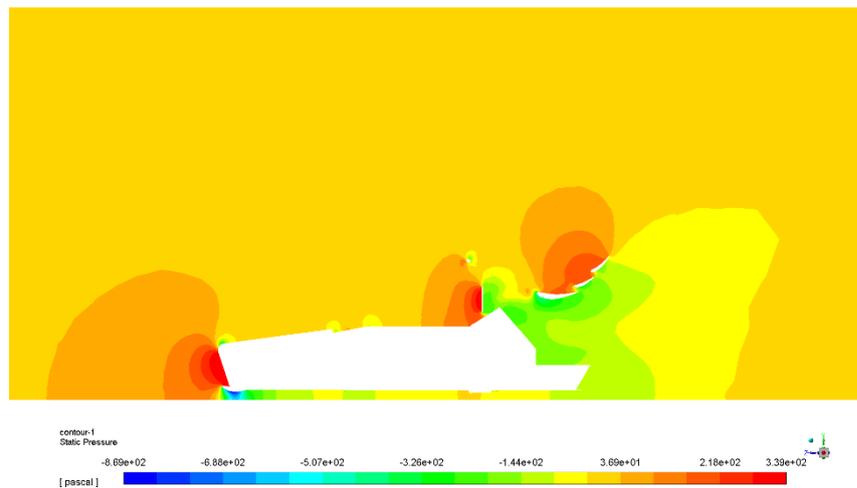


Figure 5. Pressures in the simulation of the IFS-03.

The rear wing is highly affected by the turbulence generated by the single-seater head restraint. However, the turbulent energy at slightly lower positions in the Y-direction is lower. Thus, it can be concluded that in order to improve the downforce generated by the rear wing, its height must be slightly reduced.

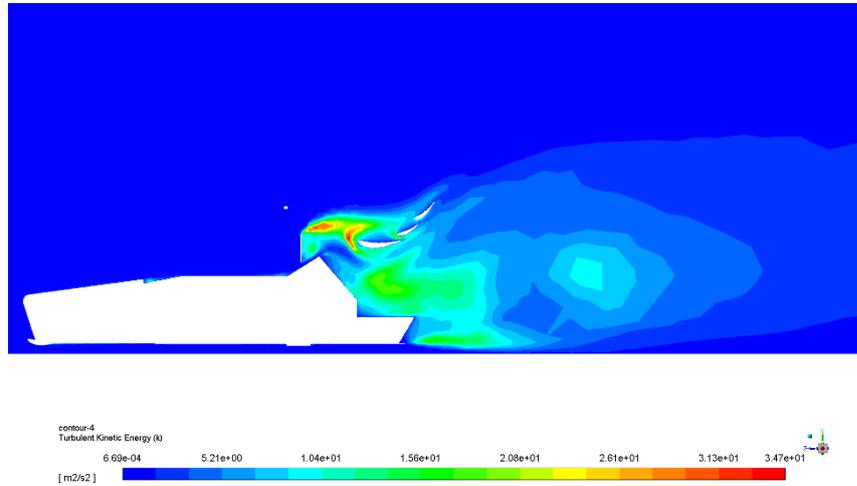


Figure 6. Turbulence in the simulation of the IFS-03.

In the case of IFS-04, the region of high pressures obtained in the nose region is smaller than in the simulations obtained in IFS-03. This is mainly due to the modification of the shape of the nose, which becomes more rounded. However, in the rear wing the flow arrives with higher turbulence at the rear wing, reducing the rear wing performance.

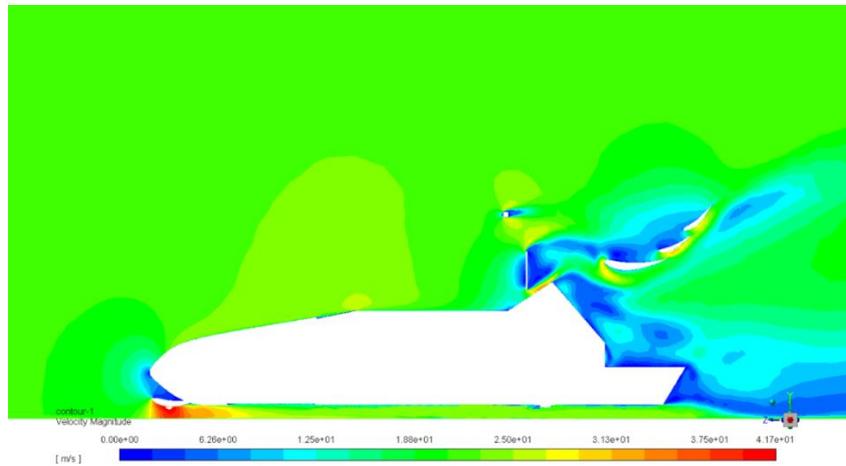


Figure 7. Velocities in the simulation of the IFS-04.

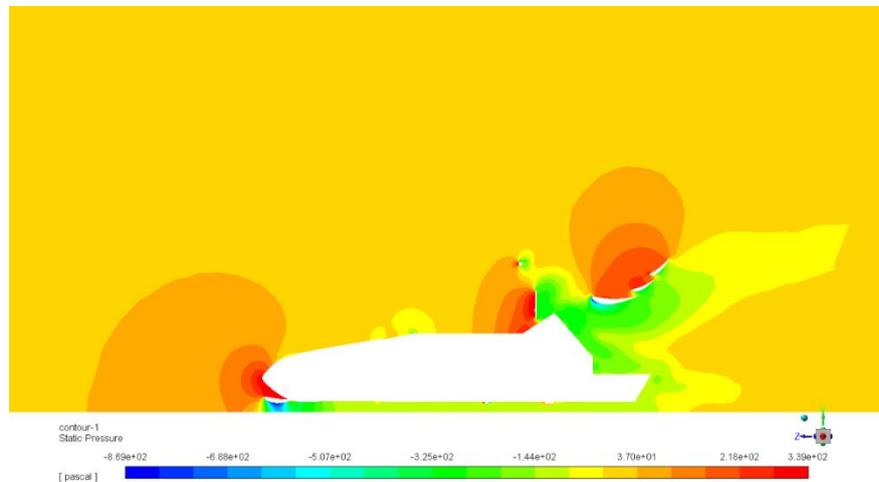


Figure 8. Pressures in the simulation of the IFS-04.

Finally, in terms of aerodynamic forces, drag force has been maintained despite the increased chassis section thanks to the improved nose of the half car model. On the other hand, the downforce has been improved thanks to an increase in the flow through the car underneath by improving the shape of the nose of the half car model.

6. Proposal for improvements

Based on the simulations and the results obtained, the following improvements are proposed for future years' cars.

- Rear wing displacement: in order to avoid turbulence coming from the headrest and the cockpit, the position of the rear wing has been lowered and moved backwards. In this way, considering the results of the simulations, the flow will reach the spoiler profiles in a more orderly way.
- Increasing the size of the rear endplates in order to prevent the high-pressure flow from the top of the aileron to the bottom, reducing the downforce generated.
- Reducing the height and width of the nose. Although it has been significantly improved between IFS-03 and IFS-04, a wide region of high pressures is observed in the simulations. In order to reduce the nose height, work must be done to reduce the height of the single-seater chassis.
- Reduce the number of airfoil elements to 2 elements and make these elements larger in size. Currently, there are a total of 3 elements. However, it is noted that the last element has a high angle of attack, causing the drag generated to be high. In addition, it is noted that the downforce generated is smaller than the other two elements.

The improved rear wing positioning means that drag is maintained while downforce is increased by approximately 7% over the IFS-04 model.

7. Conclusions

In addition to optimizing each of the aerodynamic elements of a single-seater car, it is necessary to perform an analysis of the single-seater car as a whole, since as it is observed in the simulations carried out, the flow arrives with turbulence and in not conditions.

In the case of the IFS-03, with the simulation it has been verified the need to modify the nose of the single-seater, and it has also been observed the low performance of the rear wing due to the way the air flow reaches it, especially from the headrest.

On the other hand, through the IFS-04 simulations, the improvement in the downforce of the car has been quantified, as well as it has been observed that the drag has remained the same as in the IFS-03 despite the increase in the size of the chassis mainly.

Regarding the positioning of the rear wing, it was concluded, as with the IFS-03, that the position should be set back and reduced in height to avoid the high degree of turbulence coming from the headrest.

The new simulation carried out with the modification of the relative position of the rear wing with respect to the other elements of the car verifies the improvement obtained in drag and downforce. The improved rear wing positioning means that drag is maintained while downforce is increased by approximately 7% over the IFS-04 model.

On the other hand, it is concluded that, although the improvement in the nose between IFS-03 and IFS-04 is substantial, the high-pressure region in the nose of IFS-04 can still be improved by reducing its width and height. However, this will require modifications to the chassis dimensions.

In addition, it is noted how the last element of the rear wing does not produce a significant increase in the downforce generated, and its high angle of attack causes a high level of drag. Therefore, it is proposed to reduce the rear wing from 3 to 2 elements.

Finally, in order to reduce the flow circulation towards the low-pressure areas of the rear wing airfoils, it is proposed to increase the dimensions of the endplates to isolate the low-pressure region located below the airfoils, thus improving the performance of the rear wing.

8. References

- [1] Joseph Katz. *Race Car Aerodynamics Designing for Speed Engineering and Performance (Chapter 1)*. 2003.
- [2] Icai Speed Club | Página oficial
- [3] Apuntes de Simulación Multifísica, 2021.
- [4] I. Sadrehighi, «Error & Uncertainty Quantification within CFD». 2022.
- [5] Formula 1 Aerodynamics - Introduction - F1technical.net
- [6] McBeath, S. *Competition Car Aerodynamics*; Veloce Publishing Limited: Dorset, UK. 2015.
- [7] Petrone, G.; Hill, C.; Biancolini, M. *Track by track robust optimization of a F1 front wing using adjoint solutions and radial basis functions*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2014.
- [8] X. Castro, Z. Rana. *Aerodynamic and Structural Design of a 2022 Formula One Front Wing Assembly*. 2020.
- [9] Gorostidi, N.; Lecourt, D.; Castro, X.; Maigler, M. *Optimisation of Aerofoil Design*. Cranfield University. 2020.
- [10] <https://www.f1technical.net/>
- [11] Formula 1's Porpoising Problem - Racecar Engineering (racecar-engineering.com)
- [12] Lau, C.S.; Srigrarom, S. *Flow field around the front wing of Formula One racing car model: BAR Honda 003 and MP4-21 under ground effect*. 2010.

Índice de la memoria

<i>Índice de la memoria</i>	2
<i>Índice de Figuras</i>	4
<i>Índice de tablas</i>	7
1. Introducción	8
1.1 Asociación del ICAI Speed Club	8
1.2 Normativa Aerodinámica	9
1.3 Mecánica de fluidos	11
1.4 Fuerzas aerodinámicas	14
1.5 Elementos aerodinámicos	16
1.6 Simulaciones CFD	22
1.7 Ansys Fluent	24
2. Estado de la cuestión	27
3. Métodos	30
3.1 Modelado del IFS-03	30
3.1.1 Geometría	30
3.1.2 Mallado	33
3.1.3 Condiciones de contorno	40
3.2 Modelado del IFS-04	42
3.2.1 Geometría	42
3.2.2 Mallado	45
3.2.3 Condiciones de contorno	49
4. Resultados	51
4.1 Resultados del modelo del IFS-03	51
4.1.1 Velocidades	52
4.1.2 Presiones	58
4.1.3 Fuerzas aerodinámicas	61
4.2 Resultados del modelo del IFS-04	63
4.2.1 Velocidades	66
4.2.2 Presiones	71

4.2.3	Fuerzas aerodinámicas	74
5.	Propuesta de mejoras para años futuros	76
6.	Conclusiones.....	79
7.	Bibliografía	80
Anexo I.....		82

Índice de Figuras

Figura 1. Principales variables que influyen en el “lift” y “drag” de un perfil alar de un avión [5].	5
Figura 2. Modelos de los monoplazas simulados. a) IFS-03; b) IFS-04.....	7
Figura 3. Dimensiones del dominio [3].	7
Figura 4. Velocidades en la simulación del IFS-03.....	9
Figura 5. Presiones en la simulación del IFS-03.....	9
Figura 6. Turbulencia en la simulación del IFS-03.	10
Figura 7. Velocidades en la simulación del IFS-03.....	10
Figura 8. Presiones en la simulación del IFS-03.....	11
Figura 1. Monoplaza y moto construidos en la temporada 2020-2021 [2].	9
Figura 2. Restricciones de los elementos aerodinámicos [3].	11
Figura 3. Regiones de la capa límite [4].	12
Figura 4. Coeficiente del Drag en función de la forma del sólido para Re elevados [2].	15
Figura 5. Vórtice creado en los “endplates”.	16
Figura 6. Alerón delantero [9].	17
Figura 7. Alerón trasero [10].	18
Figura 8. Fondo plano [10]	19
Figura 9. Difusor [12].	19
Figura 10. Nariz (elemento del carenado) [13].	20
Figura 11. Pontón [14].	21
Figura 12. “Bargeboards” [15].	22
Figura 13. Reparto aproximado del “downforce” y “drag” generados por los principales elementos aerodinámicos en un F1 [16].	22
Figura 14. Simulación CFD para la evaluación aerodinámica de un F1 [10].	28
Figura 15. Modelo del chasis para las simulaciones aerodinámicas del IFS-03.	30
Figura 16. Resolución de la interferencia entre el elemento principal del alerón delantero y el chasis.	31
Figura 17. Modelo del IFS-03.	32
Figura 18. Dimensiones mínimas recomendadas del dominio de la simulación.	32
Figura 19. Dominio del IFS-03.	33
Figura 20. Mallado por defecto del IFS-03.	34
Figura 21. Elementos con mayor Skewness (localizados entre chasis y fondo plano).....	34
Figura 22. Detalle de los refinados de la malla en las proximidades del monoplaza.	35
Figura 23. Detalle de la “inflation” realizada en el alerón trasero.....	36
Figura 24. Detalle de la inflation realizada en el alerón delantero, suelo, morro y cuerpo del monoplaza.....	36
Figura 25. Elementos de la malla con Skewness superior a 0.95.....	37
Figura 26. “Drag” obtenidos para los distintos mallados realizados.	38
Figura 27. Lift obtenido para los distintos mallados realizados.....	38
Figura 28. Presión de entrada para los distintos mallados realizados.....	39

Figura 29. Coste computacional para los distintos mallados realizados.....	39
Figura 30. Longitud del IFS-03.....	43
Figura 31. Longitud del IFS-04.....	43
Figura 32. Altura del "fronthead" del IFS-03.....	44
Figura 33. Altura del "fronthead" del IFS-04.....	44
Figura 34. Geometría del modelo del IFS-04.....	45
Figura 35. Refinados realizados en la malla del IFS-04.....	46
Figura 36. Mallado IFS-04.....	47
Figura 37. Detalle del mallado en el alerón delantero del IFS-04.....	47
Figura 38. Detalle en el alerón trasero del IFS-04.....	48
Figura 39. Elementos con un "skewness" más elevado.....	48
Figura 40. Residuos simulación IFS-03.....	52
Figura 41. Velocidad en la entrada del dominio.....	53
Figura 42. Velocidad a la salida del dominio.....	53
Figura 43. Velocidades en el plano de la carretera.....	54
Figura 44. Velocidades en el plano de simetría del dominio.....	56
Figura 45. Detalle alerón delantero y rueda delantera.....	56
Figura 46. Pathlines plano de simetría.....	57
Figura 47. Turbulencia en el plano de simetría.....	57
Figura 48. Presión a la entrada del dominio.....	58
Figura 49. Presión a la salida del dominio.....	59
Figura 50. Presiones en el plano de simetría.....	60
Figura 51. Detalle de las presiones del alerón delantero.....	60
Figura 52. Detalle de las presiones del alerón trasero.....	61
Figura 53. Fuerza de arrastre del monoplaza.....	62
Figura 54. Fuerza de sustentación del monoplaza.....	63
Figura 55. Residuos simulación IFS-04.....	64
Figura 56. Diferencia del flujo másico entre los portales de entrada y salida del dominio.....	64
Figura 57. Drag del IFS-04.....	65
Figura 58. Lift del IFS-04.....	65
Figura 59. Presión en el portal de entrada.....	66
Figura 60. Velocidad en el portal de salida del dominio.....	66
Figura 61. Velocidad de entrada en la simulación del IFS-04.....	67
Figura 62. Velocidad a la salida en la simulación del IFS-04.....	67
Figura 63. Velocidades en el plano de la carretera en la simulación del IFS-04.....	68
Figura 64. Velocidades en el plano de simetría.....	69
Figura 65. Detalles de las velocidades en el alerón delantero en el plano de simetría.....	69
Figura 66. Detalles de las velocidades en el alerón trasero en el plano de simetría.....	70
Figura 67. Líneas de corriente en la simulación del IFS-04.....	71
Figura 68. Presión a la entrada del dominio.....	72
Figura 69. Presión a la salida del dominio.....	72
Figura 70. Presiones en el plano de simetría de la simulación del IFS-04.....	73
Figura 71. Detalle de las presiones de la simulación del IFS-04 en el alerón delantero.....	73
Figura 72. Presiones en la parte posterior del monoplaza.....	74

Figura 73. Mallado para el IFS-04 mejorado.....	77
Figura 74. Velocidades del modelo mejorado del IFS-04.....	77
Figura 75. Presiones del modelo mejorado del IFS-04.....	78

Índice de tablas

Tabla 1. Análisis de sensibilidad de malla.	8
Tabla 1. Análisis de sensibilidad de malla.	37

1. Introducción

La aerodinámica consiste en el estudio de un fluido, especialmente cuando interacciona y es afectado por un cuerpo sólido [1]. Su papel en áreas como la aeronáutica, aviación o automoción es muy importante. Concretamente, en el área de la automoción, con las nuevas normativas de consumo y contaminación su papel es básico para lograr los objetivos de emisiones y consumo propuestos para los años futuros. A pesar de ello, es en el campo del MotorSport donde su análisis es más exhaustivo, puesto que tiene una gran importancia en la velocidad máxima que puede alcanzar el monoplaza, su paso por curva, su manejabilidad e incluso afecta a la capacidad de frenada del coche.

En este trabajo se realizará un análisis aerodinámico del coche de competición eléctrico del ISC Formula Student a través de simulaciones CFD empleando el Software Ansys Fluent. Por una parte, se simulará un modelo de medio coche correspondiente al modelo del año 2020-2021. A continuación, se simulará el de este año, exponiendo los avances respecto al coche del año pasado. Finalmente, a partir de las simulaciones del modelo de este año se propondrán posibles mejoras de cara a años futuros.

1.1 Asociación del ICAI Speed Club

La asociación del ICAI Speed Club fue creada en el año 2015 con el fin de realizar proyectos en el ámbito del mundo del motor. Inicialmente estaba constituido por un total de 20 alumnos que decidieron realizar una moto de gasolina para la competición de MotoStudent [3]. En 2016, el equipo participó por primera vez en esta competición y este mismo año surge la iniciativa del Formula Student Electric, consistente en la construcción de un monoplaza totalmente eléctrico que cumpla la normativa referente a Formula SAE.

La asociación ha ido creciendo hasta tener actualmente más de 50 alumnos. Además, actualmente la asociación está dividida en 2 grupos: MotoStudent y Formula Student, cada uno de ellos con sus departamentos diferenciados. En el caso del proyecto del Formula Student, que en el que se centrará este proyecto, hay un total de 11 departamentos: baterías, electrónica de control, subsistemas electrónicos, motor e inversor, chasis y estructural, suspensión y dinámica, transmisión, frenos y dirección, refrigeración, aerodinámica y telemetría; siendo el de aerodinámica en el que se centrará este proyecto. Cada departamento cuenta con un coordinador y además actualmente hay un director técnico eléctrico, uno electrónico y dos directores técnicos mecánicos. Finalmente, hay un “team leader” para la gestión de todo el proyecto del Formula Student. La asociación además cuenta con un director que gestiona los 2 proyectos actuales: el MotoStudent y el Formula Student Electric. Además, la asociación cuenta con un

departamento de marketing y gestión a fin de conseguir patrocinadores que son los que financian los proyectos y de gestionar los gastos en el equipo.

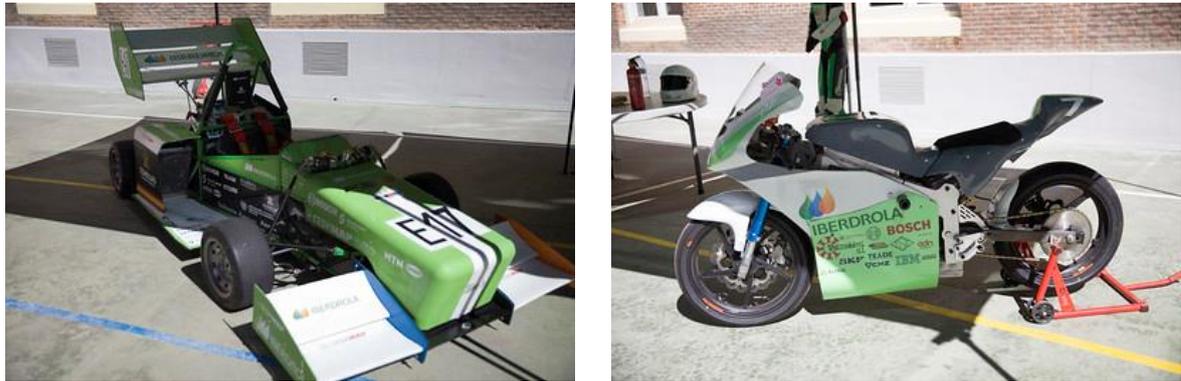


Figura 1. Monoplaza y moto construidos en la temporada 2020-2021 [3].

1.2 Normativa Aerodinámica

El monoplaza se ha diseñado de acuerdo con las reglas de Formula SAE. En lo que respecta a la aerodinámica las normas a cumplir son las siguientes [4]:

- Elementos aerodinámicos:
 - Se considera un elemento aerodinámico a aquella parte que guía el aire generando “downforce” y cambio del “drag”.
 - Ningún elemento con alimentación puede ser utilizado para retirar aire de debajo del vehículo.
 - Los elementos de montaje aerodinámicos deben proporcionar una rigidez suficiente en condiciones estáticas. Además, los elementos no oscilarán excesivamente cuando el vehículo se mueve.
 - Todos los bordes delanteros que podrían estar en contacto con un peatón deben tener al menos un radio de 5 mm para los bordes horizontales y 3 mm para los verticales. Además, dicho radio puede ser el del elemento directamente o se pueden acoplar algún elemento adicional para que se cumple el requerimiento.
 - Todos los bordes que una persona puede tocar no deben ser afilados.
- Carenado:
 - Un carenado convencional o nariz del coche no es considerado un dispositivo aerodinámico a no ser que produzca efectos aerodinámicos.

- El carenado no debe contener aperturas en el “cockpit” desde el “main hoop” hasta el “Firewall”. La apertura del “cockpit” y las aperturas mínimas alrededor de la parte delantera de la suspensión están permitidas.
- Todos los bordes delanteros del carenado que podrían estar en contacto con la gente, incluyendo la nariz deben tener un radio de borde mínimo de 38 mm. Además, este radio debe extenderse 45° o más con respecto a la dirección de avance a lo largo de la parte superior, lateral e inferior de todos los bordes afectados.
- Medidas
 - Todas las limitaciones de los dispositivos aerodinámicos son medidas: con las ruedas apuntando hacia adelante y sin conductor en el vehículo.
- Longitud
 - Los elementos aerodinámicos no deben sobrepasar más de 700 mm hacia delante de las ruedas delanteras, ni tampoco 250 mm hacia detrás de las ruedas traseras.
 - Se debe reservar un espacio de 75 mm por delante y por detrás de las ruedas delantera y trasera. Además, ningún elemento cubrirá las ruedas por encima ni por la parte lateral exterior.
- Anchura
 - Por delante del eje de las ruedas delanteras, los elementos aerodinámicos deben estar dentro de dos planos verticales paralelos al centro del chasis, tocando la parte externa de las ruedas en la altura del buje.
 - Entre los ejes de las ruedas delanteras y traseras, los elementos aerodinámicos deben estar dentro de una línea que conecte las superficies externas de las ruedas delantera y trasera a la altura del centro de las ruedas.
 - Por detrás del plano de restricción de la cabeza, los elementos aerodinámicos deberán estar entre dos planos verticales paralelos al centro del chasis, tocando la parte interna de las ruedas traseras a la altura del buje.
- Altura
 - El plano de restricción de la cabeza no debe estar a más de 1200 mm sobre el suelo.
 - La parte delantera del plano de restricción de la cabeza debe estar a menos de 500 mm sobre el suelo.
 - Cualquier elemento aerodinámico delante de la línea central de los ejes de las ruedas delanteras y por fuera de dos planos verticales paralelos a la línea central del chasis tocando el interior de los neumáticos delanteros a la altura de los bujes no deben estar a más de 250 mm del suelo.
 - La altura del carenado no está restringida cuando este se encuentra: entre planos transversales y verticales posicionados en las líneas centrales de los

ejes de las ruedas delantera y trasera o en el interior de dos planos localizados 400 mm fuera de la línea central del chasis.

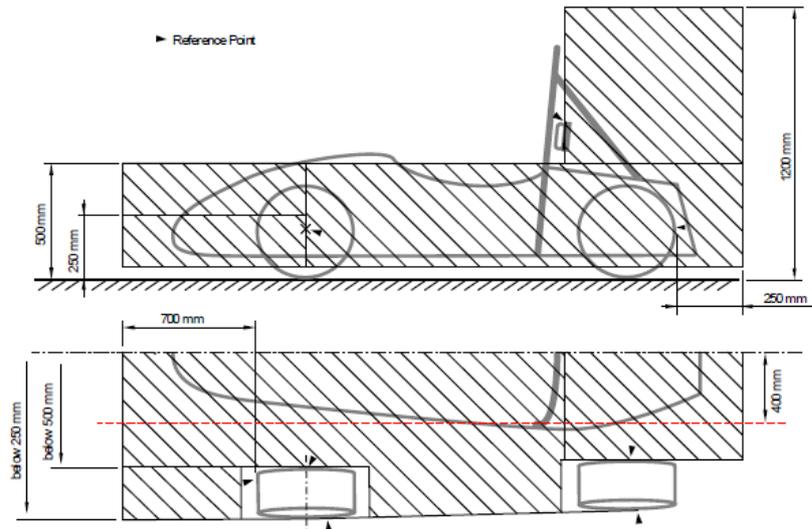


Figura 2. Restricciones de los elementos aerodinámicos [4].

1.3 Mecánica de fluidos

La mecánica de fluidos estudia el comportamiento de fluidos en reposo o en movimiento, así como su interacción con sólidos o con otros fluidos. Los fluidos están definidos por propiedades intensivas, si dependen de la masa del sistema o extensivas en caso contrario. Las principales propiedades y variables que se emplearán para los cálculos aerodinámicos en este proyecto serán la densidad, la presión, la viscosidad y la velocidad del fluido [5].

Además, a partir de estas magnitudes, se pueden obtener números adimensionales que ayudan a entender y clasificar el comportamiento del fluido. Una de las magnitudes adimensionales en la mecánica de fluidos es el número de Reynolds, que permite distinguir entre flujo laminar y turbulento. El número de Reynolds se calcula como:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Donde ρ es la densidad del fluido, v es la velocidad del fluido, D la longitud característica y μ su viscosidad.

- Flujo laminar: está caracterizado porque las líneas de corriente siguen trayectorias ordenadas y no necesariamente paralelas. Para flujo externo, el flujo laminar se

da para números de Reynolds inferiores a $5 \cdot 10^5$. Las fuerzas viscosas predominan en el comportamiento de fluido sobre las fuerzas inerciales.

- Flujo turbulento: sobre la velocidad media de las partículas se superpone una velocidad de perturbación. Se da para números de Reynolds superiores aproximadamente a $5 \cdot 10^5$, aunque esta cifra depende de la rugosidad de la superficie. Las fuerzas inerciales predominan en el comportamiento de fluido sobre las fuerzas viscosas.

Otro concepto de la mecánica de fluidos que tiene gran importancia es la capa límite, que se define como la zona en la cual existe un fuerte gradiente de velocidad y, por tanto, elevado esfuerzo cortante, por la presencia de un sólido con el cual interacciona. El espesor de la capa límite comprende aquella región que va desde el punto de contacto con el sólido hasta aquella zona donde la velocidad del fluido es un 99% la del fluido sin perturbar. Esta capa puede ser laminar, turbulenta o una combinación de ambas, como se muestra en la Figura 3.

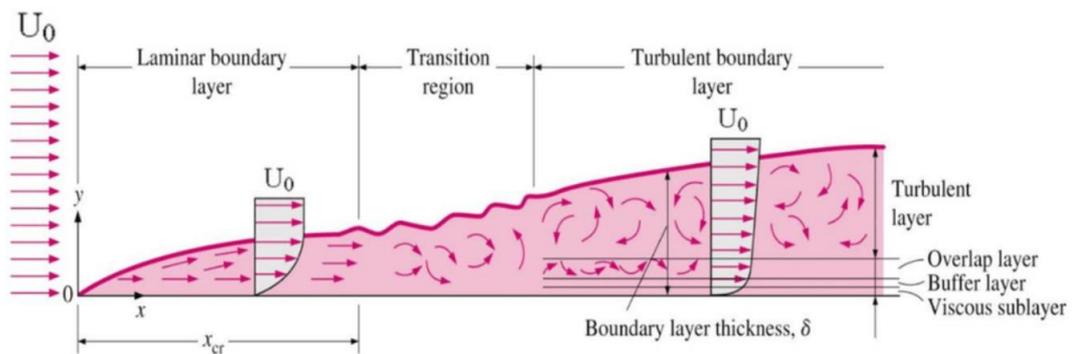


Figura 3. Regiones de la capa límite [5].

El espesor de la capa límite depende de si el fluido es laminar o turbulento y se define como:

$$\delta \approx \frac{5}{\sqrt{Re_x}} x \rightarrow \text{Para flujo laminar}$$

$$\delta \approx \frac{0.37}{\sqrt{Re_x^{1/5}}} x \rightarrow \text{Para flujo turbulento}$$

Para la obtención de la fórmula del grosor de la capa límite en régimen turbulento se supone que el fluido en todo el espesor es turbulento y que los perfiles de velocidad son geoméricamente similares en la dirección de x , cuando no es así como se observa en la Figura 3.

En caso de que existan curvas muy acentuadas en la superficie del sólido, es posible que el fluido no pueda seguir su contorno. Esto da lugar a una expansión del fluido en la dirección longitudinal de avance del flujo, produciéndose una disminución de su

velocidad y un aumento de la presión (gradiente de presión adverso). Este gradiente de presión adverso produce que la capa límite se separe del sólido y que se produzcan recirculaciones del fluido, incrementándose el “drag” y reduciéndose el “downforce”. Además, en el caso del flujo turbulento, debido a que hay una transferencia de cantidad de movimiento entre las capas respecto al flujo laminar, se consigue retrasar el desprendimiento de la capa límite.

Respecto a las principales ecuaciones por las que se guía el comportamiento del fluido son:

- La conservación de la masa [6]:

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

Donde \vec{v} es el vector velocidad, ρ es la densidad del fluido, y S_m hace referencia a lo aportado por una posible fuente o sumidero de masa.

- Conservación de la cantidad de movimiento [7]:

$$\rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} = \rho \frac{d\vec{V}}{dt}$$

Donde ρ es la densidad del fluido, V la velocidad, μ el coeficiente de viscosidad, ∇p el gradiente de presiones y g la aceleración de la gravedad.

- Conservación de la energía [1]:

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi - p(\nabla \cdot \vec{V})$$

Donde además de las mismas variables definidas para la ecuación de la conservación de la masa, entran en juego las temperaturas, capacidades específicas y coeficiente de conducción. Esta ecuación se puede simplificar para fluidos incompresibles, con flujo estacionario y sin considerar las fuerzas viscosas ni ningún aporte o consumo de energía. La ecuación resultante se conoce como Ecuación de Bernoulli y se define como [7]:

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

Teniendo en cuenta que $h_1 - h_2$ es la diferencia de alturas entre los dos puntos evaluados con la ecuación. El resto de las variables son las mismas que las definidas en las anteriores ecuaciones.

1.4 Fuerzas aerodinámicas

Principalmente, se distingue 2 fuerzas aerodinámicas distintas como consecuencia de la interacción entre el fluido y el cuerpo sólido: el “drag” y el “downforce”.

- El **drag** es una fuerza que se opone al avance del cuerpo sólido y su sentido es por lo tanto opuesto al movimiento del monoplaza. Hay principalmente 3 fuentes distintas de generación de drag [7]:
 - Fricción del fluido: como consecuencia de que el aire es un fluido viscoso, aparecen en el sólido fuerzas tangenciales que se oponen a su avance. La fuerza debido al “drag” de fricción viene definido por:

$$D_{\tau} = C_{Dfricción} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \cdot A$$

Teniendo en cuenta que $C_{Dfricción}$ depende del número de Reynolds y de la relación entre la rugosidad de la superficie y su longitud característica. Por otra parte, v es la velocidad del fluido, ρ la densidad y A el área de la parte del sólido por la que circula el fluido.

- Drag de forma: se produce debido a la diferencia de presión que existe entre la parte frontal del monoplaza y la parte trasera. En la zona frontal de coche donde se produce el impacto del fluido con el morro se crea una sobrepresión. Por otra parte, en la parte trasera aparece una depresión, que se ve acentuada cuanto antes se produzca el desprendimiento de la capa límite. Es para disminuir principalmente este tipo de drag, la razón por la cual se deben evitar cambios de sección muy bruscos en la aerodinámica del monoplaza e intentar el flujo, por efecto Coanda siga el contorno del coche lo máximo posible. Esta fuente de drag, por lo tanto, depende de la forma del cuerpo y del Re , como se muestra en la Figura 4.

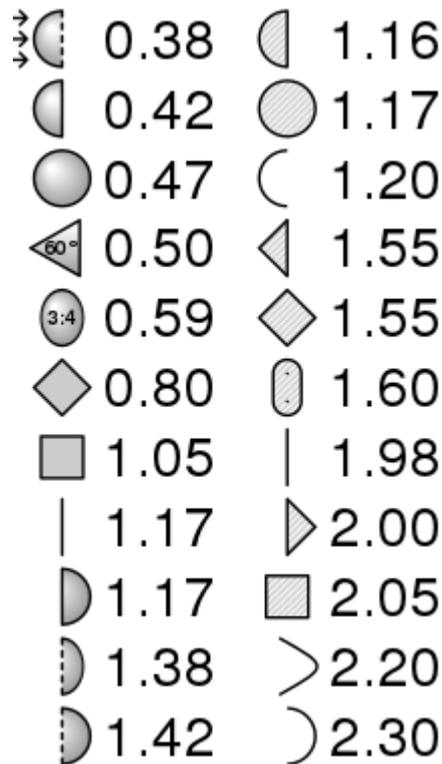


Figura 4. Coeficiente del Drag en función de la forma del sólido para Re elevados [2].

A partir de los coeficientes de forma anteriores se puede obtener el Drag de forma como:

$$D_f = C_{Dforma} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \cdot A$$

- **Drag inducido:** aparece como consecuencia de los vórtices generados por la circulación del aire de las zonas de alta presión a las de baja presión, típicamente en los alerones. Este movimiento afecta al fluido circundante haciendo que el flujo no llegue en las condiciones óptimas al resto de elementos aerodinámicos y reduciendo de esta forma la eficiencia. A diferencia de los dos anteriores tipos de “drag”, el drag inducido disminuye al aumentar la velocidad del monoplaza. A fin de reducir este tipo de drag en F1 se han implementado los “endplates”, que establecen una separación entre las partes superior e inferior de los alerones. Sin embargo, la implementación de los “endplates” no consigue eliminar completamente este tipo de drag, puesto que la presión de la zona exterior de los “endplates” es menor que la parte superior interior del ala, creándose un vórtice como el que se observa en la Figura 5.

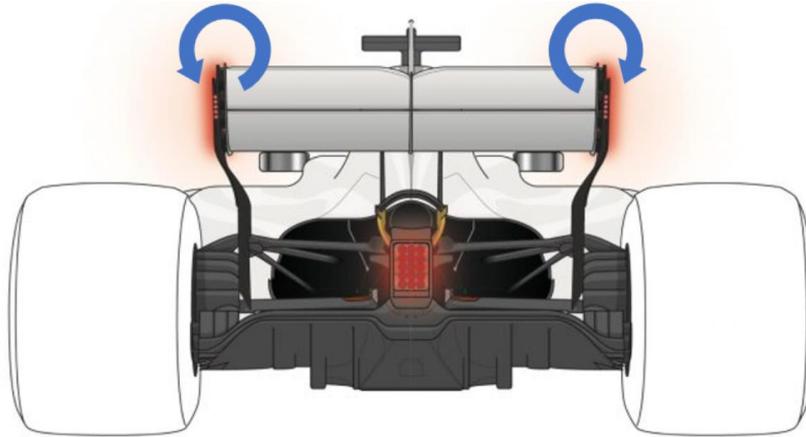


Figura 5. Vórtice creado en los “endplates”.

- El “downforce”: es una fuerza vertical descendente que aparece como consecuencia del campo de presiones creado por el fluido sobre el cuerpo sólido [3]. En ciertos elementos aerodinámicos como los alerones, el fluido circula a mayor velocidad por la parte inferior (en caso de ser el de un monoplaza) que por la superior. Considerando la ecuación de Bernoulli, esto hace que las presiones en la parte inferior del alerón sean inferiores que en la parte superior generando la fuerza descendente mencionada. De esta forma, esto permite que el vehículo tenga un mayor peso virtual, lo que favorece el paso por curva al incrementar la normal del neumático con el suelo. Además, al no cambiar la masa del vehículo no se requerirá un notable incremento de potencia ni reducirá la aceleración del mismo. El “downforce” se puede obtener como:

$$F_{downforce} = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

Donde ρ es la densidad del fluido, A la sección longitudinal proyectada de incidencia del fluido, v la velocidad del fluido y C_d el coeficiente de “downforce”, que en el caso de un Formula 1 alcanza valores de hasta 2.5 [4].

En el caso del cálculo del “downforce” para un perfil alar, este se puede calcular como:

$$F_{downforce} = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot W \cdot H \cdot v^2$$

Donde ρ es la densidad del fluido, H es la cuerda del perfil, W es la envergadura del alerón (distancia entre los extremos del alerón), v la velocidad del fluido y C_d el coeficiente de “downforce”.

1.5 Elementos aerodinámicos

La mayor parte posible de las piezas del coche tienen que ser tenidas en cuenta a la hora de evaluar la aerodinámica del monoplace. Sin embargo, los componentes aerodinámicos serán los que tengan un mayor impacto en las fuerzas aerodinámicas generadas sobre el monoplace. A continuación, se mencionan y explican los principales componentes aerodinámicos con los que cuenta el IFS-04.

- Alerón delantero: es el primer elemento del monoplace con el cual el flujo entra en contacto, teniendo por lo tanto una gran importancia en cómo afecta el flujo al resto del coche. Genera alrededor del 25% del “downforce” en un F1. Consta de un elemento principal y de “spoilers”, siendo todos ellos perfiles alares invertidos para generar “downforce”. Además, en los extremos cuenta con “endplates” para reducir la generación de vórtices debido a la diferencia de presiones entre las partes superior e inferior de los perfiles.

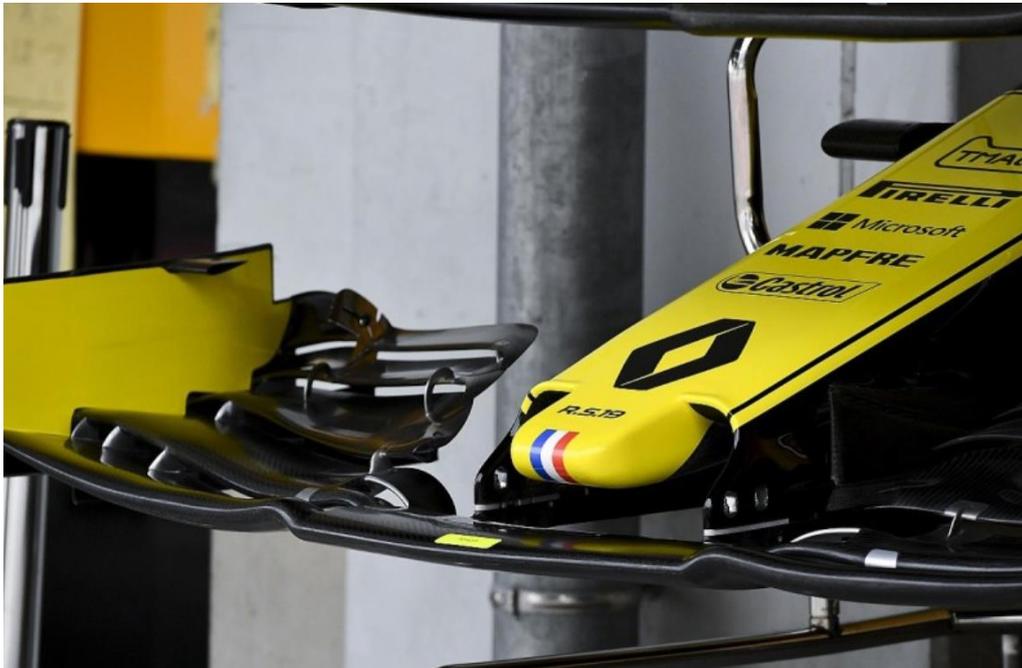


Figura 6. Alerón delantero [10].

- Alerón trasero: su principio de funcionamiento es el mismo que en el caso del alerón delantero. Sin embargo, el flujo que llega al alerón se encuentra influenciado por el resto de los elementos aerodinámicos por los que ha pasado anteriormente. Por ello, el rendimiento aerodinámico del alerón trasero suele ser inferior al del delantero. A la hora de diseñar este elemento, es fundamental considerar el modelo de coche completo puesto que la condición de velocidad para evaluar el alerón trasero es dependiente del resto de elementos aerodinámicos del coche. Genera alrededor de una 20/25% del “downforce” en un F1 donde además cuentan con un sistema de spoilers móviles (DRS) que les permite reducir

el “drag” generado en las rectas. Además, al igual que en el alerón delantero, en los extremos cuenta con “endplates” para reducir la generación de vórtices debido a la diferencia de presiones entre las partes superior e inferior de los perfiles.



Figura 7. Alerón trasero [11].

- Fondo plano: es junto con el difusor el elemento que más carga aerodinámica genera. Se trata de un elemento que se encuentra debajo del monoplaza y que se encuentra muy próximo al asfalto. De esta forma, debido a que a números de Mach bajos el aire se puede considerar un fluido incompresible, cuanto menor sea la sección transversal mayor será la velocidad, y considerando la ecuación de Bernoulli, menor será la presión. Por ello, el fondo plano funciona como un conducto convergente-divergente. El aumento de la distancia entre el fondo plano y el asfalto se da para expandir el flujo gradualmente y que la diferencia de presiones entre el fondo plano y el exterior del monoplaza no presente un salto demasiado elevado, lo cual reduciría el “downforce” generado. Esta expansión del flujo se logra a través del “rake”, que normalmente presenta una inclinación de 1° o 2° para evitar que la capa límite se desprenda del fondo plano; y por otro lado a través del difusor.

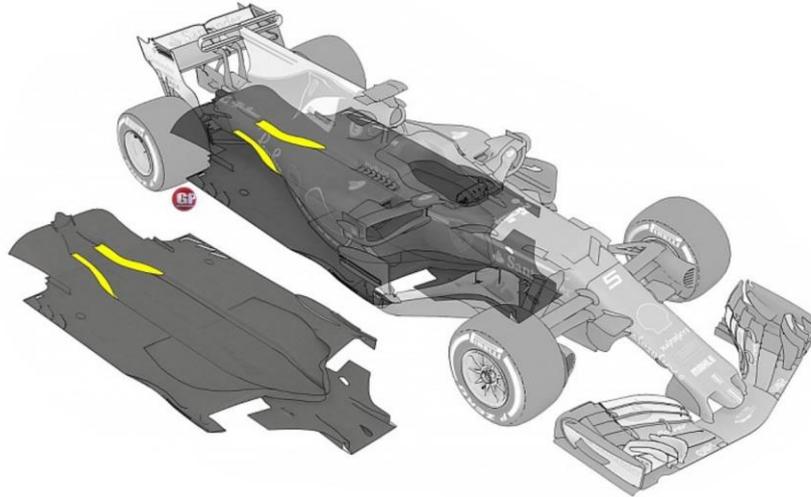


Figura 8. Fondo plano [11]

- **Difusor:** se encuentra en la parte trasera del monoplaza, a continuación del fondo plano. El difusor es un elemento que sirve de transición entre la rápida velocidad del flujo en el fondo plano y la velocidad del flujo ambiental, que rodea al automóvil. Además, su forma debe garantizar que no haya separación de la capa límite del flujo que pasa por la parte inferior del automóvil, lo cual reduciría el “downforce” generado y aumentaría el “drag” [12].



Figura 9. Difusor [13].

- **Carenado:** es un elemento aerodinámico que cubre el chasis del monoplaza. Con este elemento se consigue reducir el “drag” y además se diseña con el fin de que la capa límite no se desprenda y que el flujo siga todo el contorno del monoplaza.

Su forma está altamente restringida por normativa y por los requerimientos del chasis. Uno de los elementos principales del carenado es la nariz del monoplaza, al ser uno de los puntos iniciales donde el flujo interacciona con el coche, afectando a la actuación del resto de elementos. En el diseño de la nariz se debe asegurar que no se desprenda la capa límite debido a una curvatura excesiva.



Figura 10. Nariz (elemento del carenado) [14].

- Pontones: son elementos aerodinámicos donde se encuentran los radiadores y colectores. Su forma se diseña a fin de reducir al máximo el drag generado. Por ello, se busca que los radiadores y colectores se alojen en su interior de la forma más compacta posible. Las entradas de los pontones deben ser suficientemente grandes para que llegue el aire suficiente al motor y a los elementos de refrigeración de este, así como los “intercoolers”. Sin embargo, se busca minimizar todo lo posible estas entradas para generar el menor “drag” posible. Por otra parte, cuentan con la estructura protectora contra impactos laterales. Finalmente, también cuentan con la capacidad de generar “downforce”, aunque en menor medida que el fondo plano, difusor y los alerones.



Figura 11. Pontón [15].

- “Bargeboards”: son elementos aerodinámicos que dirigen el flujo proveniente del eje delantero hacia el fondo plano, los pontones y el difusor. Se localizan entre las ruedas delanteras y los pontones. También tienen la función de evitar que parte de los vórtices generados en las ruedas delanteras afecte al resto de elementos aerodinámicos. Esto lo logran a través de los generadores de vórtices, los cuales consiguen desviar el flujo hacia los laterales del monoplaza.

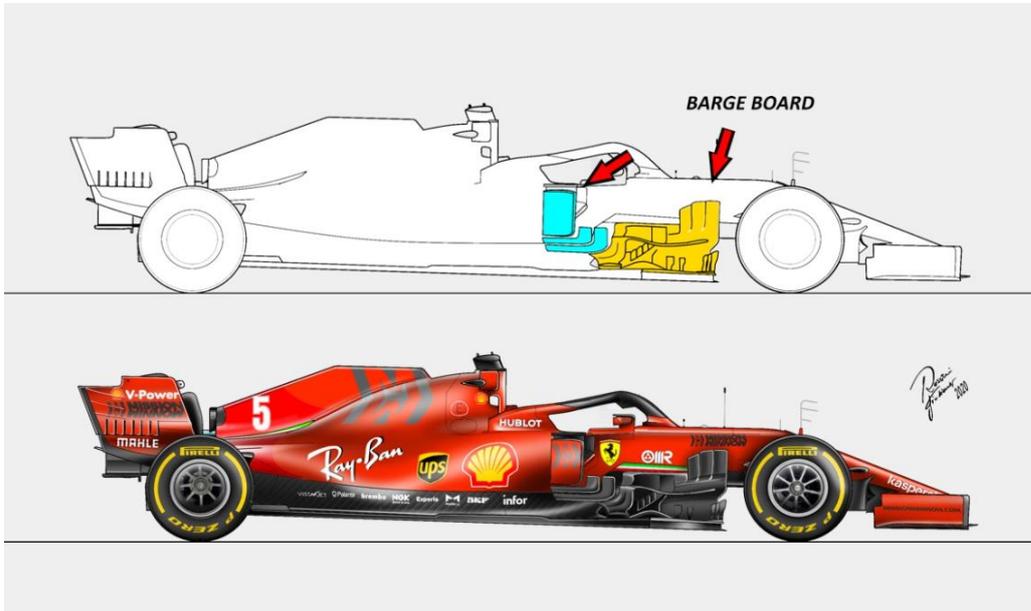


Figura 12. “Bargeboards” [16].

A continuación, se muestra una distribución aproximada del reparto del “downforce” y “drag” generado por los principales elementos aerodinámicos de un F1.

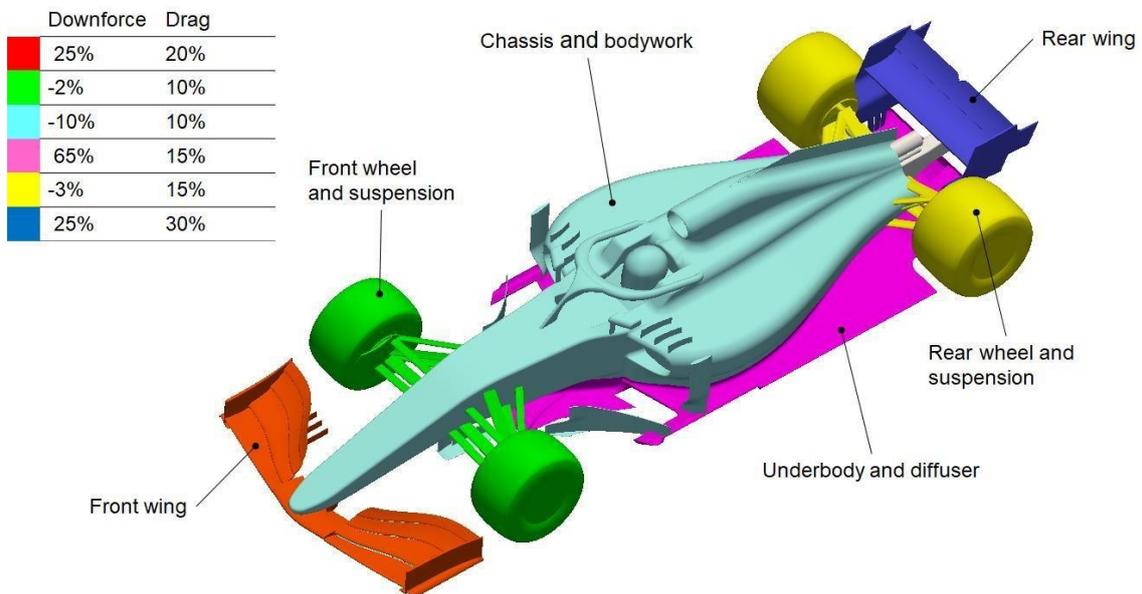


Figura 13. Reparto aproximado del “downforce” y “drag” generados por los principales elementos aerodinámicos en un F1 [17].

1.6 Simulaciones CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD) es la ciencia de predicción del flujo másico de un fluido, calor, transferencia de la masa, reacciones químicas, campos de velocidad, presión, temperatura y otros fenómenos relacionados. Por ello, las simulaciones CFD se tratan de algoritmos de resolución de las ecuaciones de conservación de la masa, momento, energía, reacciones químicas, turbulencia...

La mecánica de fluidos computacional se aplica en numerosos campos actualmente, como la aviación, industria aeroespacial, automoción, en la industria naval o de ventilación. Además, su aplicación ya no solo se reduce a la investigación, sino que se emplea ya como una herramienta de diseño. A pesar de ello, requiere de validación experimental para verificar la calidad del modelo. En el caso concreto de la aerodinámica, los vehículos de F1, se someten a pruebas en los túneles de viento a fin de corroborar el diseño realizado a través de las simulaciones.

Las simulaciones CFD se basan en una discretización del dominio, el cual se divide en elementos geométricos de mayor o menor sencillez denominado mallado. Cada elemento de una malla contiene una serie de nodos, en los cuales se resuelven las ecuaciones del fluido. Las mallas pueden ser estructuradas, que presentan la ventaja que todos los elementos están ordenados y se pueden numerar fácilmente, aunque no son adecuadas para geometrías complejas. Y por otro lado las mallas no estructuradas, en las cuales las celdas dispuestas de forma arbitraria, aunque este tipo de mallas se puede generar automáticamente y son mejores para geometrías de gran complejidad. Este tipo de mallados se puede combinar para dar lugar a los mallados multibloque, donde cada uno de los bloques puede ser un mallado estructurado o no estructurado; o los mallados híbridos que son una combinación de todos los anteriores. Además, la elección del tipo de elemento en las mallas también tiene una gran relevancia en la obtención de una solución representativa de la realidad con un coste adecuado. Los principales tipos de elementos son: triángulos y cuadrados para mallas bidimensionales y tetraédricos, piramidales, poliédricos, hexaédricos y tipo “wedge” para mallas tridimensionales. La calidad de la malla, finalmente se puede evaluar a través de diferentes indicadores como son el “skewness” que representa la oblicuidad de los elementos, la calidad ortogonal o el “aspect ratio”.

Además del dominio, las ecuaciones también se discretizan, pasando de ecuaciones diferenciales a algebraicas. En cada uno de los nodos se deben resolver las ecuaciones del fluido, por lo que cuanto mayor sea el número de elementos, más elevada es la precisión de los cálculos y mayor también el coste computacional del modelo. Una parte fundamental de las simulaciones CFD, es encontrar un equilibrio entre una malla suficientemente fina para asemejarse a la resolución de las ecuaciones diferenciales, sin requerir un número demasiado elevado de horas de computación para la resolución del modelo. Además, los elementos del mallado pueden ser bidimensionales o tridimensionales, en función del tipo del problema a resolver, suponiendo la resolución del dominio con elementos tridimensionales un mayor coste computacional.

El proceso de resolución de una simulación CFD consta de los siguientes pasos [19]:

1. Identificación del problema
 - a. Definir los objetivos
 - b. Identificar el problema
2. Pre-procesado
 - a. Geometría
 - b. Mallado
 - c. Física del problema
 - d. Ajustes del solucionador
3. Resolución de los sistemas de ecuaciones
 - a. Cómputo de la solución
4. Postprocesado
 - a. Examinar los resultados

Además, las simulaciones CFD tienen principalmente 3 fuentes distintas de error [20]:

1. Errores de modelado: como consecuencia a errores en el modelado de la física del problema o de las simplificaciones realizadas en la geometría.
2. Errores de discretización: como consecuencia de que se está resolviendo un dominio discreto en lugar del verdadero dominio continuo del problema. Esto mismo aplica a la discretización temporal, donde las ecuaciones son calculadas no de forma continua en el tiempo, sino en cada “time step”.
3. Errores de aproximación: debido al número finito de decimales en los cálculos. Este tipo de errores, se pueden extender a lo largo de la malla y del tiempo pudiendo llegar a ser representativos.

1.7 Ansys Fluent

Ansys Fluent es software CFD utilizado para el modelado de flujo de fluidos, la transferencia de calor y reacciones químicas. Surgió a través de la adquisición de Fluent en 2006 por parte de ANSYS [21].

ANSYS Fluent se encuentra totalmente integrado dentro de ANSYS Workbench, lo que permite modificar fácilmente la geometría, malla y configuración del solucionador sin necesidad de emplear otros Softwares externos a ANSYS.

En lo que respecta a la geometría, ANSYS Fluent permite crear modelos bidimensionales o tridimensionales. Estos modelos se pueden importar a través de Softwares CADs como SOLIDWORKS o SOLIDEDGE o directamente pueden realizarse a través de herramientas de Ansys como Design Modeler o SpaceClaim. En

caso de importar la geometría desde Softwares externos a Ansys, es necesario que el formato sea .stp.

Por otra parte, en lo que al mallado respecta, Ansys proporciona un software de mallado de generación automática. Dicho mallado puede ser estructurado, donde los elementos tienen geometrías simples, y donde normalmente los resultados son mejores. Sin embargo, en caso de simular geometrías complejas, como es el caso de un monoplaza, es necesario emplear las mallas no estructuradas de Ansys, que se pueden generar automáticamente. Además, existen otras opciones de mallado que combinan regiones de mallado estructurado y no estructurado como son las mallas multibloque y las híbridas. Ansys Meshing, que es el componente de Ansys Workbench con el que se realizará el mallado de las simulaciones permite la realización de mallas en 2D y 3D. Para el caso de las mallas en 3D, los elementos pueden ser: tetraedros, primas, hexaedros, una combinación de ambos o poliedros. Ansys Meshing permite también realizar refinados e “inflation” a fin de calcular correctamente las regiones en la capa límite, donde los gradientes son mayores y donde se requiere por lo tanto elementos de menor tamaño. Una vez realizada la malla desde Ansys Meshing, esta es importada a Fluent. Además, tanto Fluent como Ansys Meshing dan información acerca de la calidad del mallado, con parámetros como la calidad ortogonal, el “skewness” de los elementos e indican si hay elementos problemáticos que pueden afectar a los cálculos, como por ejemplo es la presencia de escalones en las capas de la “inflation”.

En lo que respecta a los modelos de turbulencia, Ansys Fluent cuenta con modelos de turbulencia basados en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas (RANS) [19], [21]:

- Modelos 0 ecuaciones: modelo de la mezcla de longitudes.
- Modelos de 1 ecuación: Spalart-Almaras.
- Modelos con 2 ecuaciones: modelo $k-\epsilon$ (standard, RNG y realizable), modelo $k-\omega$ (standard y SST).
- Modelos de 4 ecuaciones: como el de transición SST.

Por otra parte, también ofrece la posibilidad de emplear modelos de turbulencia LES, donde las ecuaciones son filtradas en el espacio, considerándose el efecto de los elementos de menor tamaño (filtrados) a través de su modelado. Y finalmente, también ofrece la posibilidad de resolver la turbulencia completa (DNS), pero a cambio de requerirse un coste computacional mucho mayor.

En lo que respecta al solucionador, Ansys Fluent cuenta con 3 “solvers” principales [19]:

- Solucionador basado en la presión segregado: donde la corrección de la presión y las ecuaciones del momento (para obtener la velocidad) se hacen de forma secuencialmente, no estando la velocidad y la presión totalmente acopladas.

- Ofrece la posibilidad de resolver las ecuaciones de energía y especies de forma secuencial después de resolver el momento, la masa y la corrección de la presión.
- Solucionador basado en la presión acoplado: donde la corrección de la presión y las ecuaciones del momento (para obtener la velocidad) se hacen de forma simultánea, estando la velocidad y la presión totalmente acopladas. Además, ofrece la posibilidad de resolver las ecuaciones de energía y especies de forma secuencial después de resolver el momento, la masa y la corrección de la presión.
 - Solucionador basado en la densidad acoplado: donde la corrección de la presión y las ecuaciones del momento (para obtener la velocidad) se hacen de forma simultánea, estando la velocidad y la presión totalmente acopladas. Además, las ecuaciones de energía y especies se resuelven también de forma simultánea con la ecuación de la masa, el momento y la corrección de la presión.

Por otra parte, en lo que a las ecuaciones se refiere, en el siguiente trabajo el software resolverá las siguientes ecuaciones mostradas a continuación, las cuales se muestran en la guía teórica de Fluent [2]:

- Ecuación de la masa:

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

- Ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

Donde:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - \frac{2}{3} \nabla \vec{V} I \right]$$

- Modelo de turbulencia $k\omega$ SST: en el cual las ecuaciones de transporte se definen como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega$$

Donde aparecen Γ_ω y Γ_k que representan el efecto de la difusividad de k y ω , Y_k e Y_ω que representan el efecto de la disipación de k y ω , G_k y G_ω que representan la generación de k y ω ; y finalmente se encuentran los términos D_ω para representar el término de difusión cruzada y S_k y S_ω que son término de generación definidos por el usuario. Para obtener más información del cálculo de los términos expuestos se debe consultar [2].

2. Estado de la cuestión

La utilización de las fuerzas aerodinámicas por parte de los humanos se remonta a hace miles de años, por ejemplo, con el empleo de molinos de viento. Sin embargo, la concepción de la aerodinámica moderna se remonta a hace aproximadamente 4 siglos. En el siglo XVIII, Isaac Newton comenzó a referirse al aire como una causa de resistencia al avance de los cuerpos sólidos [22]. Más adelante, Bernoulli estableció una relación entre la presión, flujo, altura y velocidad de los fluidos incompresibles. Esta teoría fue extendida 19 años más tarde también a fluidos compresibles por Euler, a través de las ecuaciones de Euler. Sin embargo, la consideración de la viscosidad de los fluidos en las ecuaciones no fue incorporada hasta el siglo XIX, cuando se publicaron las ecuaciones de Navier-Stokes, cuya resolución es mucho más compleja.

En lo que respecta al sector automovilístico, en las décadas de los 50 y los 60, en las principales competiciones de automóviles se entendieron las importantes ventajas que ofrece mejorar la aerodinámica de los coches. Concretamente, en F1, el principal avance a nivel aerodinámico fue introducido en el año 1968 en el Lotus 49, el cual incorporó alerones al monoplaza directamente acoplados a la suspensión. Los alerones permitieron aumentar notablemente el “downforce” del coche, haciendo posible un paso por curva más rápido. Esto se debe a que el flujo circula a mayor velocidad por la parte inferior del perfil alar, haciendo que la presión sea menor y creando una fuerza resultante descendente. Además, la importancia de los alerones fue tan notable que su análisis y estudio para seguir mejorándolos se continúa haciendo en la actualidad. Principalmente, se modifican el ángulo de ataque del alerón, que incrementa el “downforce” generado, pero también el “drag”, por lo que los equipos lo adaptan en función de las características del circuito. Por otra parte, otra variable de gran importancia en el diseño del perfil es el “camber” del alerón, relacionado con su curvatura, como se muestra en la Figura 1 [23].

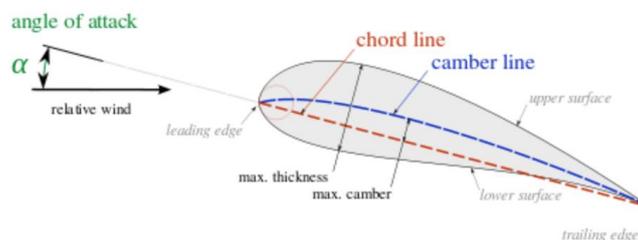


Figure 9. Principales variables que influyen en el “lift” y “drag” de un perfil alar de un avión [23].

Jim Hall, introdujo el concepto de efecto suelo en los coches de Formula 1 a través del Chaparral 2J. El concepto consistió en un monoplaza con faldones laterales que aislaban el suelo del coche, empleando además motores auxiliares para retirar el aire de debajo del coche y aumentar así el “downforce” creado. El concepto fue evolucionado

mediante la eliminación de los motores auxiliares para extraer el aire y modificando la forma de debajo del coche a un perfil alar invertido, aprovechando la reducida distancia al suelo para reducir la sección transversal de paso del aire y disminuyendo así la presión [10], [24]. Sin embargo, fue prohibido por parte de la FIA a principios de la década de los 80, como consecuencia de los problemas de seguridad causados por el efecto “porpoising” que originó graves accidentes. Este efecto, ha vuelto a aparecer actualmente en F1 con el cambio de normativa de 2022, en el que los equipos están trabajando para resolverlo, de momento a través de fijaciones para disminuir las deformaciones del fondo del monoplaza y a través del uso de suspensiones más rígidas [25].

La pérdida de “downforce” generada por la prohibición del efecto suelo fue en gran parte compensada por la incorporación de los difusores, que, aunque producían menos “downforce” que con el efecto suelo, tenían una mayor eficiencia al reducir notablemente el “drag” respecto al efecto suelo. El difusor acelera el aire que abandona el monoplaza, creando un área de baja presión debajo del coche que incrementa la producción de “downforce”. Actualmente es responsable de aproximadamente un 50% del “downforce” total de los monoplazas de F1 [10], [26], [27], [28].

Actualmente, los equipos emplean diferentes métodos para evaluar la actuación aerodinámica de los monoplazas. Por una parte, se emplean métodos computacionales a través de simulaciones CFD. Donde se resuelven las ecuaciones del fluido numéricamente a través de la discretización del dominio. De esta forma, se obtienen resultados muy orientativos de cómo puede ser la actuación del monoplaza y a partir de un análisis de los resultados obtenidos se puede optimizar el diseño. Además, presentan la ventaja de ser una alternativa de evaluación aerodinámica de reducido costo, pudiéndose de esta forma valorar muchas geometrías distintas en paralelo. Sin embargo, el número total de horas disponibles de los cuales dispone cada equipo en F1 para realizar simulaciones CFD o valorar sus coches en túneles de viento depende además de los recursos con los que cuenta, de sus gastos y del puesto en el que quedaron el año previo en la competición.

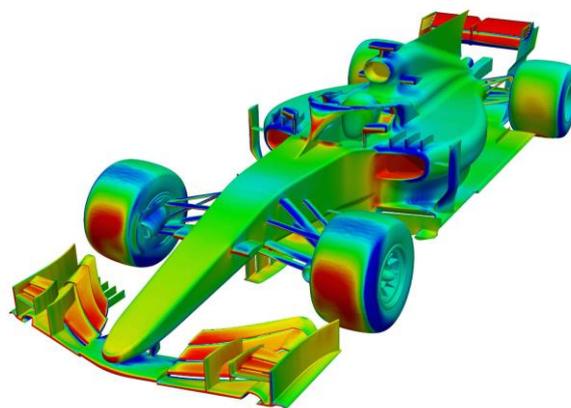


Figura 14. Simulación CFD para la evaluación aerodinámica de un F1 [11].

Por otra parte, también se puede evaluar la actuación aerodinámica a través de ensayos en túneles de viento. El presupuesto necesario para la realización de este tipo de evaluación es muy superior y aunque es realizada por los equipos de Fórmula 1, no es empleada por el ISC. Finalmente, también se realizan pruebas en pista a fin de probar el diseño en condiciones reales. En dichas pruebas, se montan diversos sensores en el coche y se aplican parafinas sobre este. Uno de los tipos de prueba más habituales consiste en la prueba aerodinámica en línea recta, donde el piloto realiza tandas en las que circula en línea recta a velocidad constante a velocidades equivalentes a las simulaciones CFD y de las pruebas de los túneles de viento a fin de validar los resultados obtenidos. Por otra parte, otro tipo de test realizado en las pruebas en pista son la realización de tandas de vuelta para evaluar el paso por curva del monoplaza.

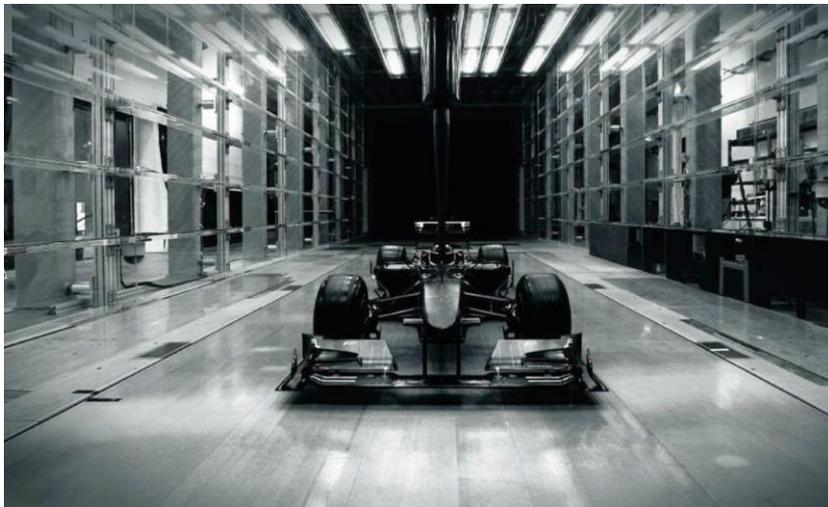


Figure 10. Monoplaza evaluado en un túnel de viento [16].



Figure 11. Pruebas aerodinámicas realizadas en circuito [15].

3. Métodos

3.1 Modelado del IFS-03

El IFS-03 es el monoplaza eléctrico realizado por el equipo para competir en las competiciones de Formula Student en el año 2021. Su realización se llevó a cabo entre 2020 y 2022, habiéndose empleado 2 años en lugar de 1 para su realización como consecuencia del inicio de la pandemia del COVID19. En esta sección se justificará la geometría, mallado, condiciones de contorno y ecuaciones necesarias para la obtención de los resultados.

3.1.1 Geometría

Se trata de uno de los pasos de mayor importancia en el modelado del monoplaza. El modelado geométrico se ha realizado a través del Software SolidWorks. Debido a la complejidad del monoplaza, no es posible simular todos los elementos del vehículo conservando un coste computacional razonable. Es por ello, que se han eliminado todos aquellos elementos que tienen un menor impacto desde el punto de vista aerodinámico. Se han modelado por una parte todos los elementos aerodinámicos, conservando su forma y dimensiones reales. Por otra parte, el chasis del monoplaza, el cual es tubular, se ha adaptado realizándose un cuerpo sólido conservando las dimensiones generales (longitud, altura máxima y anchura máxima).

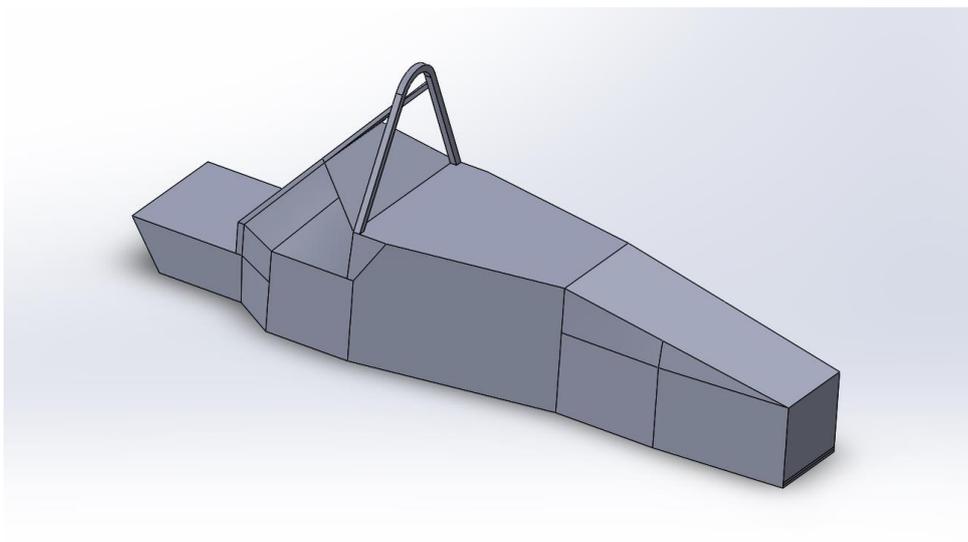


Figura 15. Modelo del chasis para las simulaciones aerodinámicas del IFS-03.

Debido a que el elemento principal del alerón delantero interfiere con el chasis, a fin de evitar problemas en la realización del mallado es necesario eliminar la interferencia. Esto se ha realizado a través de la herramienta combinar/agregar de SolidWorks. De esta forma, el elemento principal junto con el modelo del chasis constituye un único elemento como se puede observar en la Figura 16.

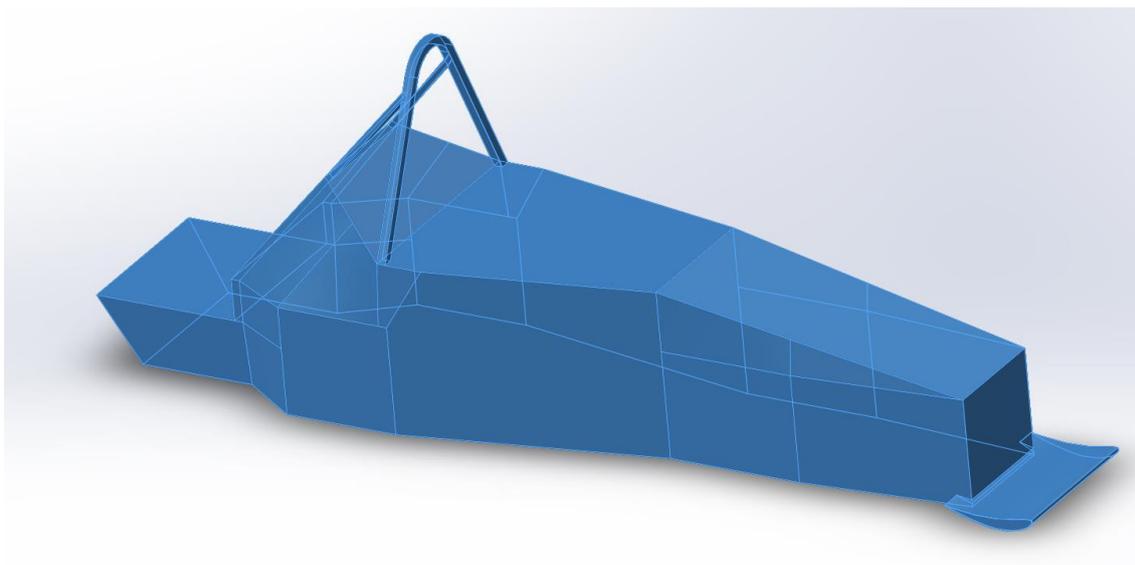


Figura 16. Resolución de la interferencia entre el elemento principal del alerón delantero y el chasis.

El resto de los elementos aerodinámicos se han localizado respetando las posiciones del modelo original. Además, en el caso particular del morro del coche, debido a que presenta un pequeño juego respecto al chasis, se ha empleado la relación de posición de ancho respecto al chasis a fin de que esté centrada respecto a este. A continuación, es también necesario eliminar la interferencia entre el morro y el elemento principal del alerón delantero con la herramienta combinar.

Finalmente, por un lado, se han añadido las ruedas del monoplace, debido a la turbulencia generada por su rotación, que tiene una gran influencia en cómo llega el flujo de aire tanto a los pontones, influyendo por lo tanto en la eficiencia de la refrigeración y también en el flujo que entra en el fondo plano, el cual tienen un peso importante en la generación de “downforce”. Por otra parte, se ha considerado también el elemento apoyacabezas del coche puesto que su sección transversal no es despreciable y por lo tanto su papel en la generación de “drag” es importante.

A fin de reducir el coste computacional del modelo, se considerará la simetría longitudinal del monoplace. Para ello, se ha realizado un corte del modelo en la dirección del eje longitudinal. A continuación, se muestra el modelo que se simulará en Fluent, considerando todos los elementos hasta ahora mencionados.

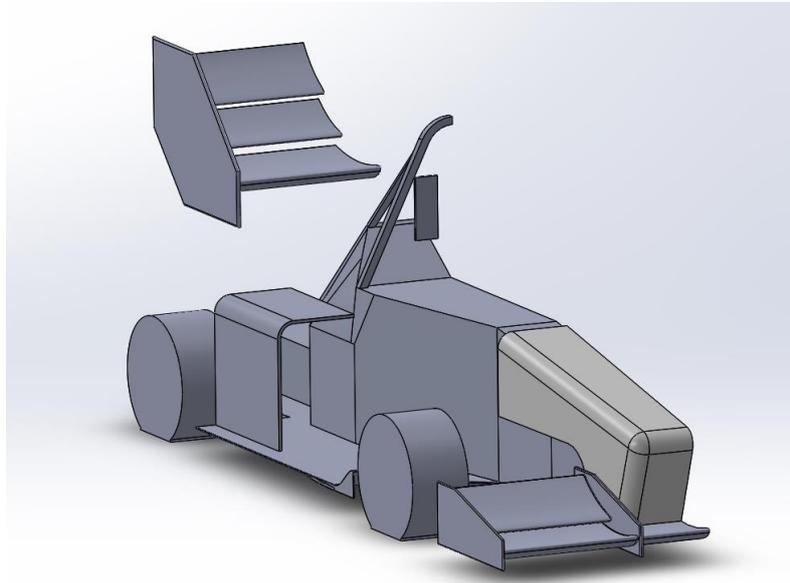


Figura 17. Modelo del IFS-03.

A continuación, a fin de definir el dominio en el cual se va a resolver el flujo mediante Fluent se ha empleado Design Modeller. El dominio realizado ha consistido en un prisma cuadrangular, realizado a través de un “enclosure” de dimensiones (14,05 m (L) x 3,35 m (W) x 5,86 m (H)). Estas dimensiones se han obtenido de acuerdo con las pautas indicadas en la Figura 18.

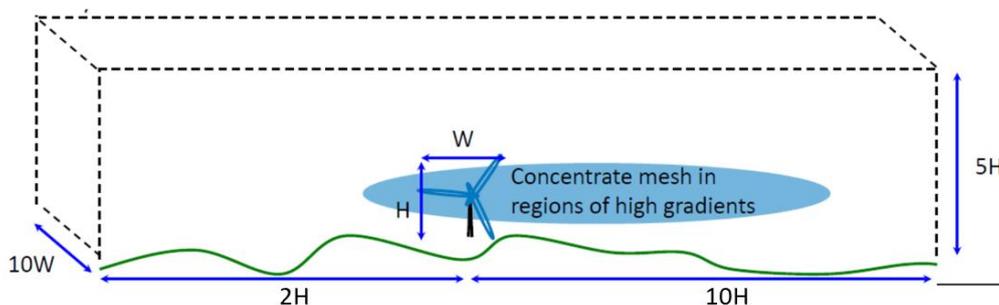


Figura 18. Dimensiones mínimas recomendadas del dominio de la simulación.

Finalmente, es necesario realizar una operación booleana entre el prisma creado y el modelo del vehículo, sustrayendo al prisma el volumen del monoplaça. Esto es debido a que no será necesario resolver las ecuaciones del flujo en el volumen del monoplaça, solamente en su superficie. Por ello, el volumen del vehículo no se necesita mallar y es necesario restarlo al volumen total del prisma donde sí se resolverán las ecuaciones del flujo. El resultado de la operación booleana se muestra en la Figura 19. Todos los elementos del monoplaça han sido suprimidos después de la operación booleana.

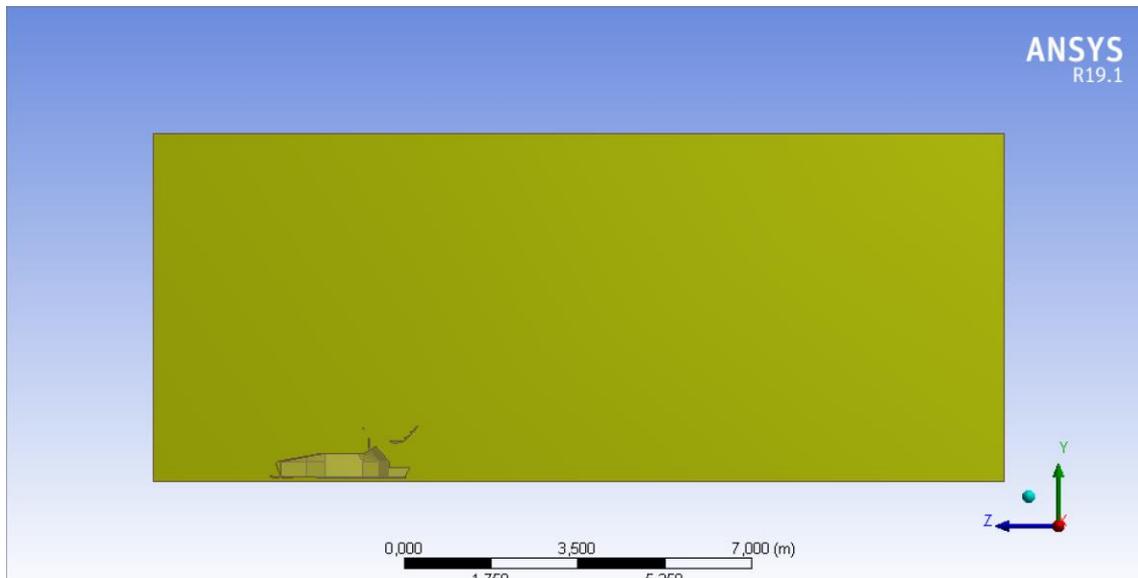


Figura 19. Dominio del IFS-03.

3.1.2 Mallado

A fin de obtener una malla óptima en términos de coste computacional y exactitud de la solución obtenida, se ha comenzado realizando la malla por defecto del Meshing the Ansys con algunas modificaciones de la configuración para que la calidad de los elementos sea suficiente para poder importarla a Fluent. Por una parte, se ha seleccionado elementos cuadráticos, los cuales, a pesar de conllevar un coste computacional mayor, permiten una mejor adaptación de la malla a la geometría, especialmente en las partes que nos son rectilíneas. Por otro lado, se ha reducido el tamaño de los elementos a 0,2m. No se ha incluido ni la “inflation”, necesaria para considerar posteriormente los cálculos referentes a las ecuaciones del flujo en la capa límite; ni tampoco se ha añadido ningún refinado en alguna zona particular del modelo. Con esta primera malla, que tiene un total de 5903980 elementos, se ha obtenido un Skewness máximo de 0.995, localizado principalmente entre el chasis y el fondo plano. Sin embargo, se trata exclusivamente de 26 elementos de tamaño reducido por lo que no se considerará necesario realizar ningún refinado en dicha zona hasta después de evaluar la malla con la “inflation” (Figura 21). Además, como se puede observar, entre el morro y el modelo hay elementos, puesto que se trata de una zona hueca. Sin embargo, a fin de evitar problemas de convergencia, finalmente se ha decidido rellenar este hueco para que sea un conjunto sólido y por lo tanto no haya ningún elemento del mallado en dicha región.

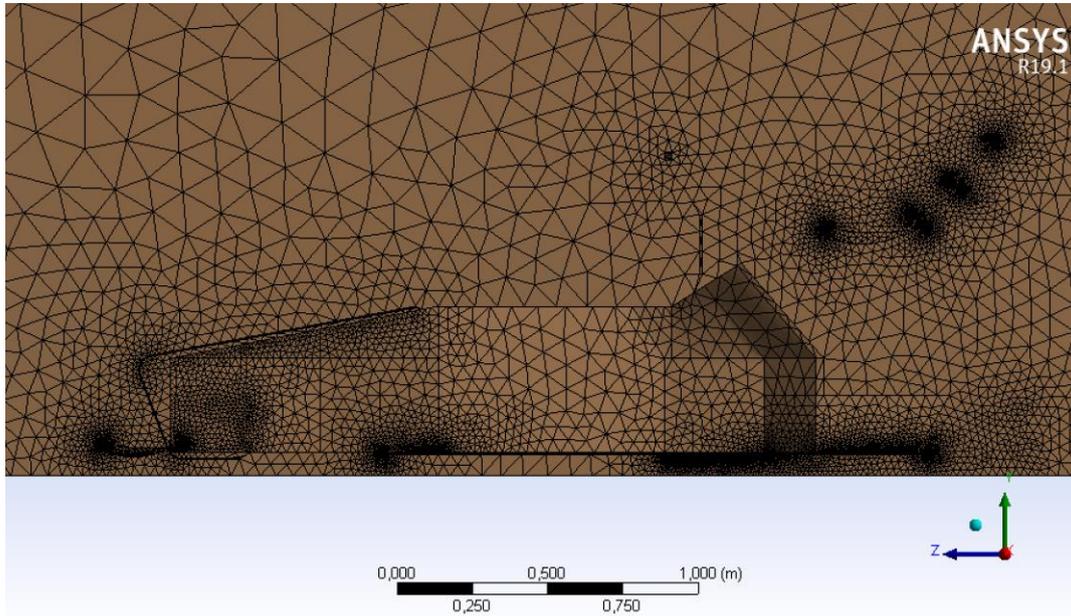


Figura 20. Mallado por defecto del IFS-03.

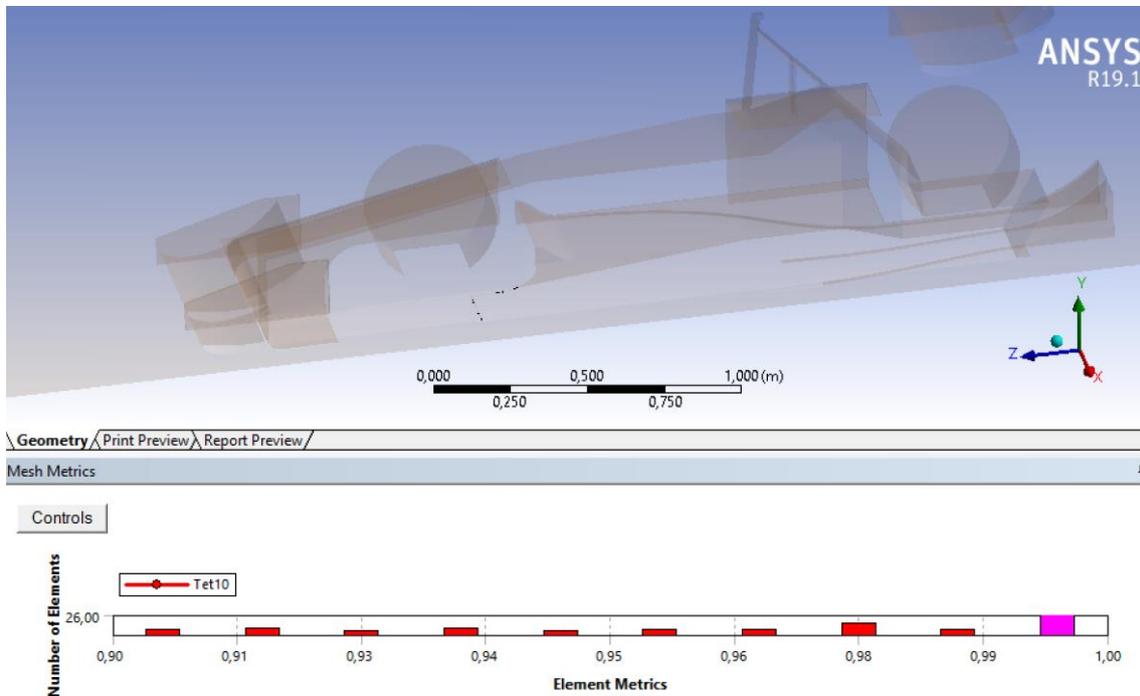


Figura 21. Elementos con mayor Skewness (localizados entre chasis y fondo plano).

La segunda malla realizada (que será con la que se comenzará para simular) se ha llevado a cabo con un “sizing” general en todas las superficies del monoplaza. Dicho “sizing” se ha realizado con un tamaño de malla de 5 mm y su finalidad es que la posterior operación de “inflation” que se va a realizar se adapte correctamente a la geometría del vehículo. Otro “sizing” específico para el alerón delantero y fondo plano con un tamaño de malla de 4 mm ha sido necesario para poder generar la “inflation”. Los refinados se han realizado como operaciones separadas en cada uno de los elementos en los que posteriormente se aplicará la “inflation” excepto en la carretera (cuerpo del chasis, apoyacabezas, endplates, perfiles del alerón delantero, perfiles del alerón trasero, fondo plano, difusor, pontón, morro, ruedas).

Por otra parte, para facilitar la generación de la “inflation”, en lugar de generarla con una única operación se ha dividido en 10 operaciones distintas en función de la sección del dominio: cuerpo del chasis, apoyacabezas, “endplates”, perfiles del alerón delantero, perfiles del alerón trasero, fondo plano, difusor, pontón, morro, ruedas y carretera.

Las operaciones de “inflation” presentan un total de 5 capas y una ratio de crecimiento de 1.2, puesto que se trata de un primer modelo para obtener unos resultados orientativos. Además, respecto a la primera malla realizada, que no se simulará debido a que no cuenta con ninguna operación de “inflation” necesaria para resolver correctamente las regiones cercanas al monoplaza, esta segunda malla presenta un tamaño de malla general de 0.3 m en lugar de 0.2 m, a fin de evitar sobrepasar los 10 M de elementos, a partir de los cuales la simulación era demasiado compleja computacionalmente para ser simulada con los medios disponibles. Considerando todo lo mencionado, la malla cuenta con un total de 9720190 elementos (los cuales son menos que con la primera malla realizada). A continuación, se muestran detalles del nuevo mallado en las regiones cercanas al monoplaza.

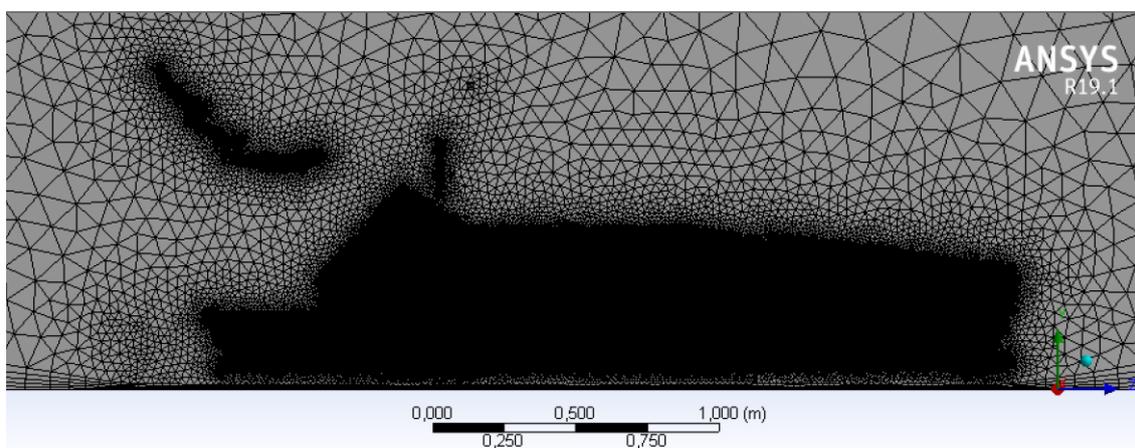


Figura 22. Detalle de los refinados de la malla en las proximidades del monoplaza.

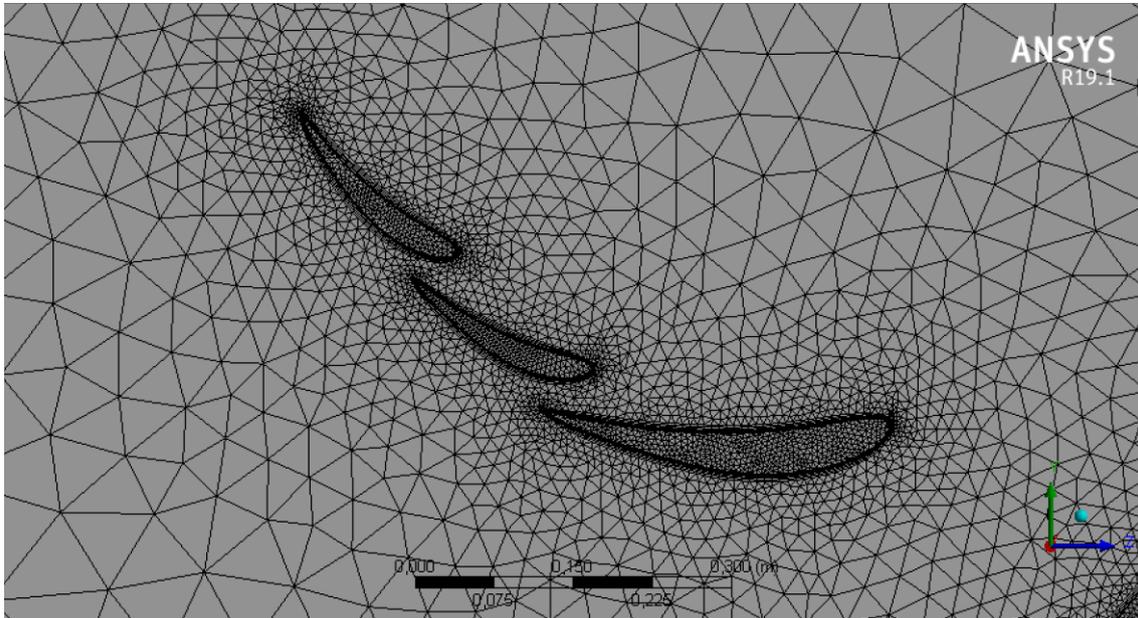


Figura 23. Detalle de la “inflation” realizada en el alerón trasero.

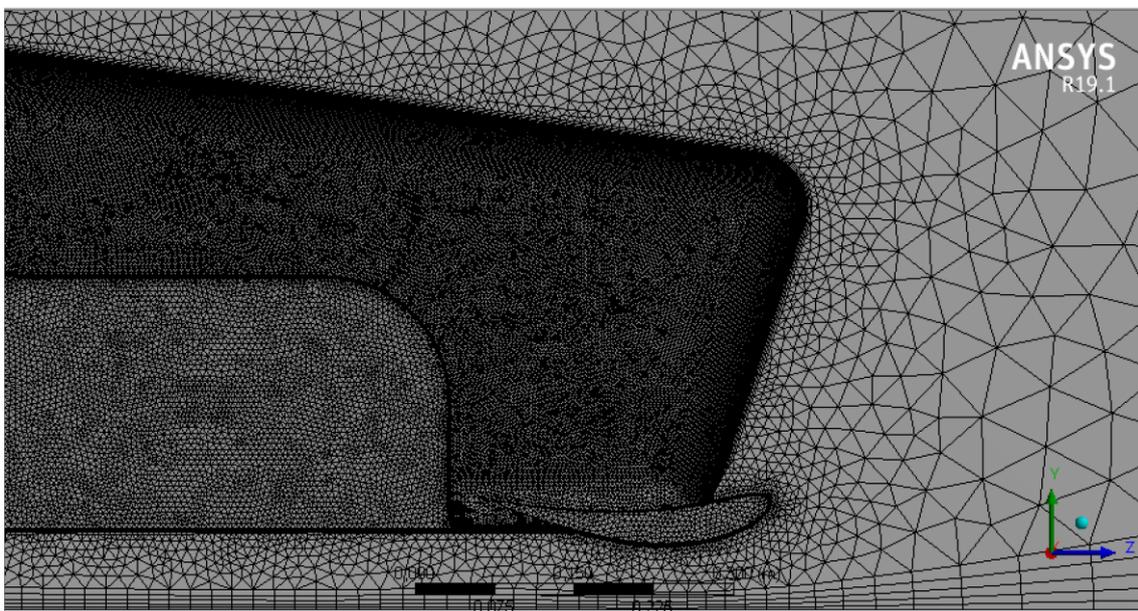


Figura 24. Detalle de la inflation realizada en el alerón delantero, suelo, morro y cuerpo del monoplace.

Respecto a la calidad del mallado, el modelo presenta un “Skewness” medio de 0,22. Sin embargo, presenta elementos con “Skewness” próximos a 1 que necesitan ser analizados. Debido a que dichos elementos no se encuentran focalizados en una región en concreto, que son elementos de tamaño reducido y teniendo en cuenta las limitaciones

computacionales, se puede considerar la calidad de malla suficientemente buena. A continuación, se muestran el número de elementos con un “skewness” superior a 0.95.

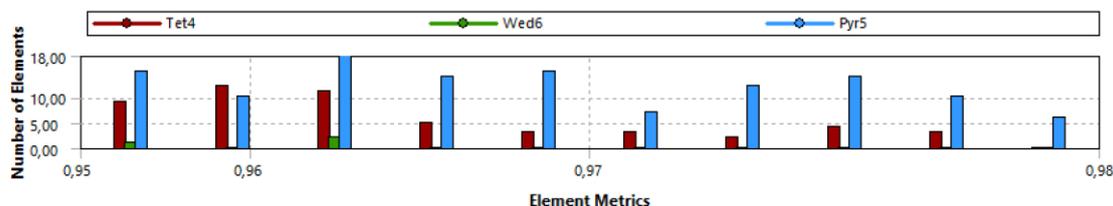


Figura 25. Elementos de la malla con Skewness superior a 0.95.

Como se puede observar, se trata de un número muy reducido, considerando que el número total de elementos del modelo se encuentra próximo a los 10 millones de elementos. Además, a fin de verificar la malla realizada, se ha realizado un análisis de sensibilidad de malla con elementos más grandes, debido a la limitación de recursos computacionales. En el análisis de sensibilidad de malla se han monitorizado las fuerzas aerodinámicas y la presión en la entrada del dominio. Se han realizado 4 mallas distintas además de la expuesta anteriormente, todas ellas con la misma “inflation”, pero modificando el tamaño de elemento de los refinados:

- Malla 1: refinados de 10 mm en todos los elementos.
- Malla 2: refinados de 9 mm excepto en el fondo plano, donde el refinado se realiza con elementos de 8 mm.
- Malla 3: refinados de 7 mm en todos los elementos.
- Malla 4: refinados de 5 mm en todos los elementos excepto de 4 mm en el fondo plano.
- Malla 5: refinados de 5 mm en todos los elementos excepto 4 mm en el fondo plano y en el alerón delantero.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada de las variables monitorizadas, así como el coste computacional de las simulaciones.

Tabla 1. Análisis de sensibilidad de malla.

Malla	Número de elementos	Drag [N]	Lift[N]	Presión a la entrada del dominio [Pa]	Coste computacional [mins]
1	311100	140.11	249.21	18	53
2	4312130	133.21	253.1	17.9	70
3	5903980	142.13	231.12	18.1	140
4	8214141	162.21	278.12	18.73	210
5	9720190	169.49	287.07	18.91	311

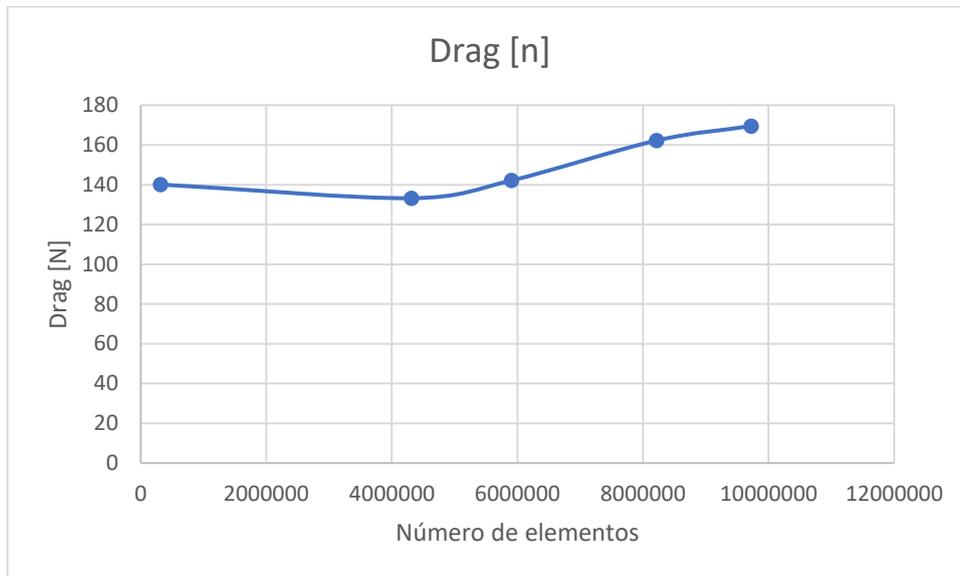


Figura 26. "Drag" obtenidos para los distintos mallados realizados.

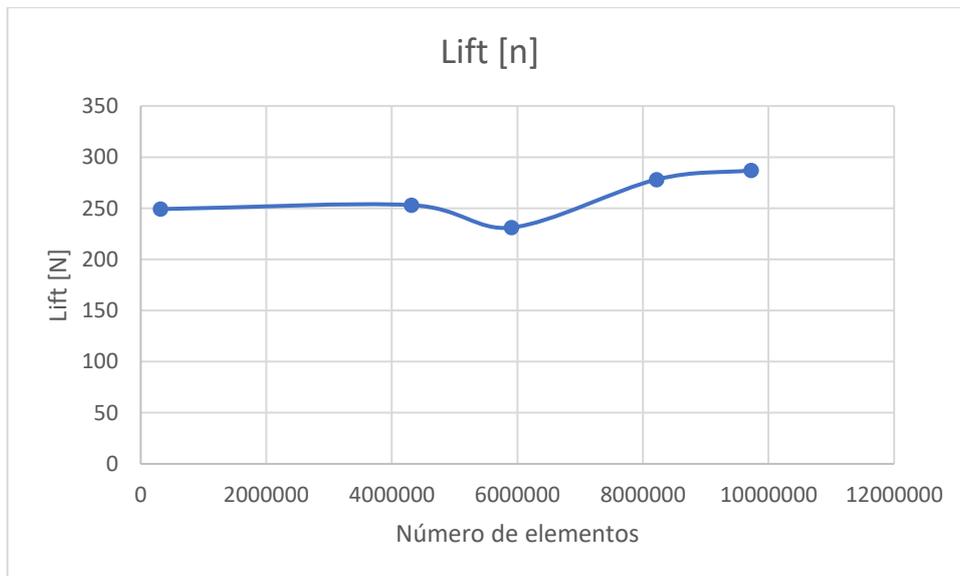


Figura 27. Lift obtenido para los distintos mallados realizados.

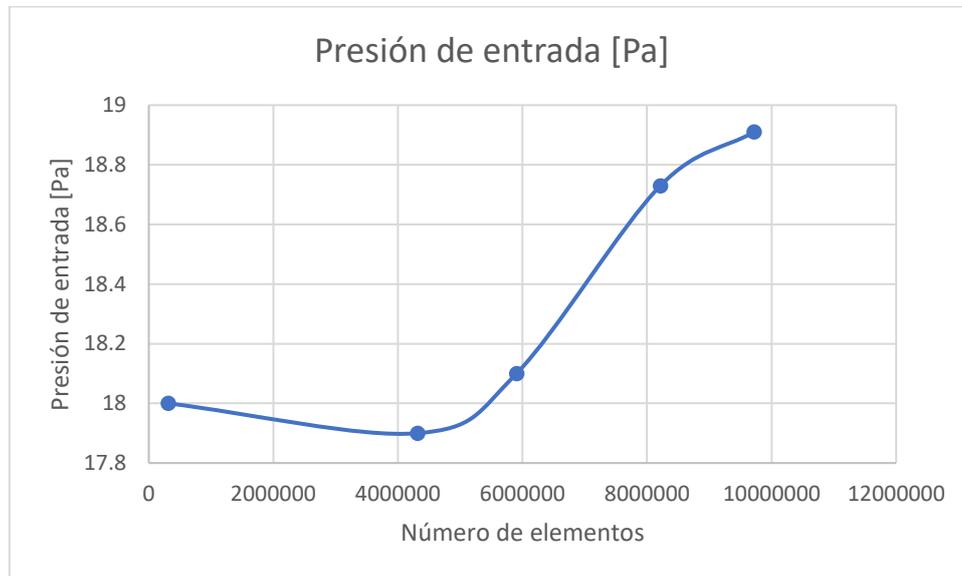


Figura 28. Presión de entrada para los distintos mallados realizados.



Figura 29. Coste computacional para los distintos mallados realizados.

A la vista de los resultados obtenidos, se observa cierta estabilización de los resultados a partir de los 8 millones de elementos. Dicha estabilización se debería corroborar realizando simulaciones con mayor número de elementos, pero debido a las restricciones computacionales no ha sido posible. A pesar de ello, se puede observar que, especialmente con las fuerzas aerodinámicas, los resultados varían en menos de un 5% respecto al mallado anterior en número de elementos. Por ello, se puede concluir que en las simulaciones debe emplearse la malla con mayor número de elementos simulada

(malla 5). Esta será la malla con la cual se analizarán todos los resultados obtenidos en el IFS-03.

3.1.3 Condiciones de contorno

Debido a que las condiciones de contorno serán idénticas en todos los modelos aplicados, solo se ejemplificará con el primer modelo simulado, siguiéndose en el resto de los casos el mismo procedimiento.

Las condiciones de contorno aplicadas, así como la configuración del solucionador de Ansys tiene un papel fundamental en la convergencia de la solución. En el caso de las simulaciones aerodinámicas, la configuración que mejor resultados de convergencia aporta es con condición de velocidad a la entrada y condición de presión atmosférica a la salida.

En Fluent, el primer paso para poder establecer correctamente las condiciones de contorno consiste en configurar las “name selections” para cada elemento del modelo donde se desee establecer una condición diferente. En el caso del monoplaza la división será:

- Monoplaza excepto las ruedas
- Ruedas: donde será necesario establecer una condición de velocidad rotacional.
- Suelo: donde será necesario establecer una condición de velocidad lineal.
- Caras de simetría: donde será necesario establecer la condición de simetría. No solo incluye la cara de simetría geométrica del monoplaza, sino también todas las caras exteriores del dominio excepto el suelo, la entrada y salida. En caso de no incluir la simetría para estas caras mencionadas, Fluent lo asignará como una condición de tipo “wall”.
- Entrada del dominio: donde será necesario establecer la condición de velocidad del flujo.
- Salida del dominio: donde será necesario establecer la condición de presión atmosférica.

Una vez establecidas las “name selections”, es necesario establecer las condiciones de contorno desde Ansys Fluent, descritas a continuación:

- Entrada de aire: que se dará como una condición de velocidad. La velocidad tendrá dirección perpendicular a la superficie en la cual se define y representará el avance del vehículo. La velocidad de entrada se definirá en 22.22 m/s puesto que es la velocidad a la cual el monoplaza se desplazará la mayor parte del tiempo en el circuito.
- Presión de salida: es la cara de la cual sale el flujo del dominio y se definirá como una condición de presión atmosférica (0 Pa de presión relativa).

- Simetría: por un lado, aplicará a la cara que representa el plano de geometría del modelo. Por otra parte, también aplicará a las caras exteriores una condición de simetría. Al aplicar esta condición se supone que el fluido, en las caras de aplicación de la simetría, será paralelo a dichas caras. Por ello, las caras deben estar suficientemente alejadas del monoplaza para que la suposición sea correcta y que el fluido no se vea influenciado por el coche.
- Suelo: también se debe simular con una condición de tipo “wall”. Sin embargo, debido a que en las simulaciones es el fluido el que se mueve en lugar del monoplaza y ya que en el punto de contacto entre el suelo y el fluido no debe haber velocidad relativa entre ellos, es necesario modelarlo como una pared con movimiento traslacional. Debido a que como anteriormente se ha mencionado, no debe haber movimiento relativo entre el fluido y el suelo la velocidad debe ser de también 22.22 m/s.
- Monoplaza: se definirá como una condición de tipo “wall” estática puesto que en lugar de ser el coche el que se desplaza en la simulación es el fluido.
- Ruedas: se definirán como condiciones de tipo “wall” con movimiento rotacional. El sentido de rotación de la rueda debe ser el contrario al movimiento real al ser el fluido el que se mueve en lugar del monoplaza. La velocidad rotacional se definirá como $\omega = \frac{V}{R}$, donde V es la velocidad del flujo, a la que se considera que se desplazará el monoplaza (22.22 m/s) y R es el radio de las ruedas (202 mm). De esta forma $\omega = 110 \frac{rad}{s}$. Además, es necesario fijar el centro de rotación de cada una de las ruedas. Para ello, las coordenadas se han determinado desde el Meshing the Ansys, añadiendo un eje de coordenadas auxiliar a cada una de ellas. De esta forma, viendo las coordenadas de dichos ejes creados respecto al eje de coordenadas absoluto se puede determinar la posición de cada uno de los centros de las ruedas. En el caso del IFS-03 el eje de coordenadas de la rueda delantera es: (-0.60026, 3.0077e-2, 0.2332) y el de la rueda trasera es: (-0.58378, 3.0077e-2, -1.4978).

En lo que al modelo de turbulencia empleado respecta, se ha empleado el modelo K- ω SST, que es el más habitual para la aplicación de cálculos aerodinámicos. Para ello se han mantenido los valores de las constantes del modelo por defecto. Además, debido a que se trata exclusivamente de resolver el flujo y no se considera ningún tipo de transferencia de calor, las ecuaciones de radiación, intercambio de calor, especies y energía se han mantenido desactivadas a fin de reducir el coste computacional del modelo.

Por otra parte, se han establecido diferentes monitores a fin de verificar la convergencia del modelo:

- Fuerza de arrastre (“drag”): se ha definido en la dirección de z , por lo que su valor tiene que ser negativo.
- Fuerza de sustentación (“lift”): se ha definido en la dirección de y , por lo que su valor tiene que ser negativo para indicar que se trata de una fuerza que genera “downforce”.
- Presión de entrada: el resultado debe ser una presión relativa positiva, puesto que el flujo se dirige hacia el portal de salida, donde la presión absoluta es la atmosférica.
- Velocidad de salida: debe ser aproximadamente la velocidad de entrada puesto que el portal de salida debe estar lo suficientemente alejado del monoplaza para que no se vea influenciado por este.
- Diferencia de flujo másico entre la entrada y salida del dominio: debe ser aproximadamente cero, teniendo en cuenta la ley de conservación de la masa.
- Residuos de continuidad, turbulencia (k , ω) y velocidad (en x , y , z).

3.2 Modelado del IFS-04

Considerando las similitudes entre el IFS-03 y el IFS-04, el modelado de ambos monoplazas ha sido similar. A continuación, se expondrá cómo se ha realizado la geometría, mallado y las condiciones de contorno aplicadas, destacando especialmente las diferencias respecto al IFS-03.

3.2.1 Geometría

Para la realización del modelo del chasis del IFS-04 se ha partido del chasis del monoplaza anterior. La modificación en el chasis del IFS-04 respecto al del IFS-03 consiste principalmente en un incremento de la anchura total del monoplaza y de su altura en la parte localizada por delante del volante. Además, también se ha acortado ligeramente la parte del chasis localizada por delante del volante. A continuación, se muestran los chasis del IFS-03 e IFS-04, donde pueden observarse las ligeras diferencias geométricas entre ellos.

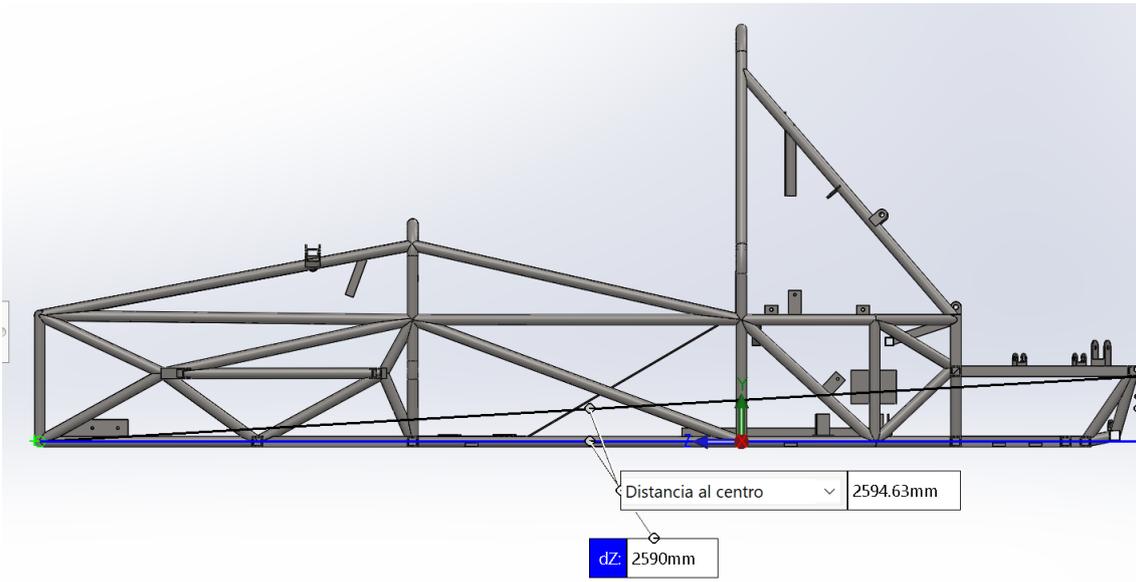


Figura 30. Longitud del IFS-03.

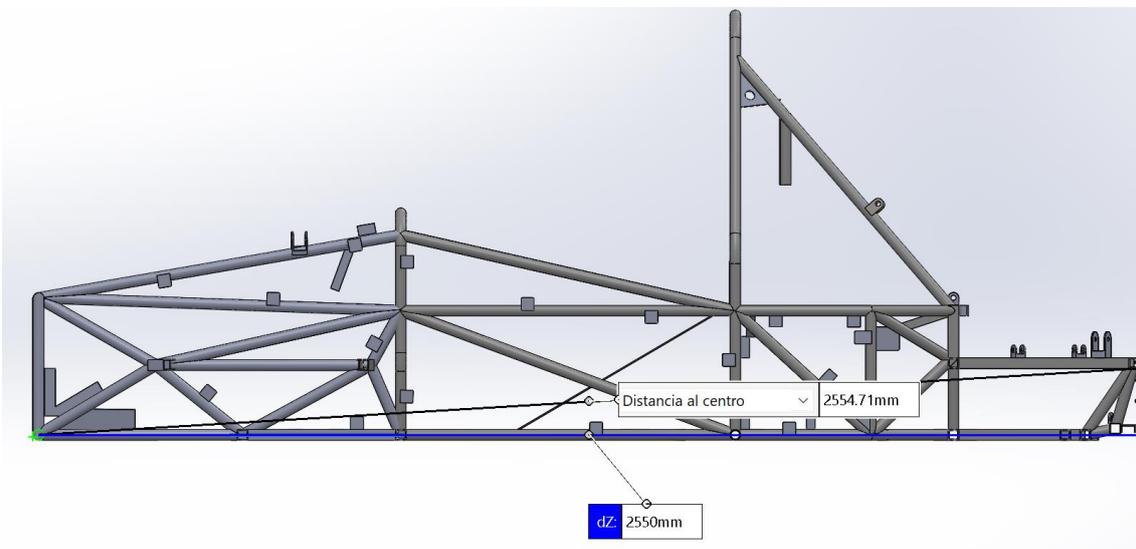


Figura 31. Longitud del IFS-04.

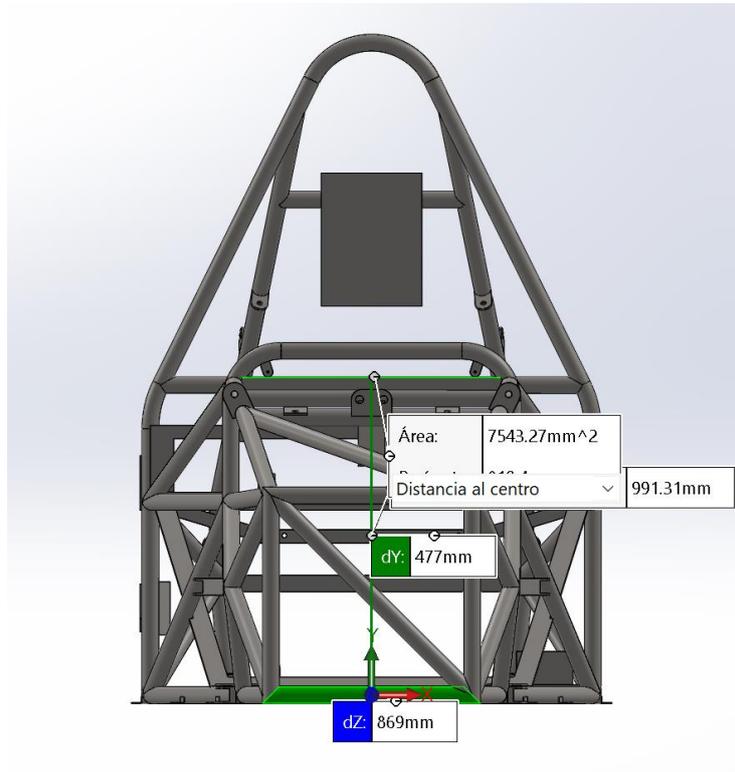


Figura 32. Altura del "fronthoop" del IFS-03.

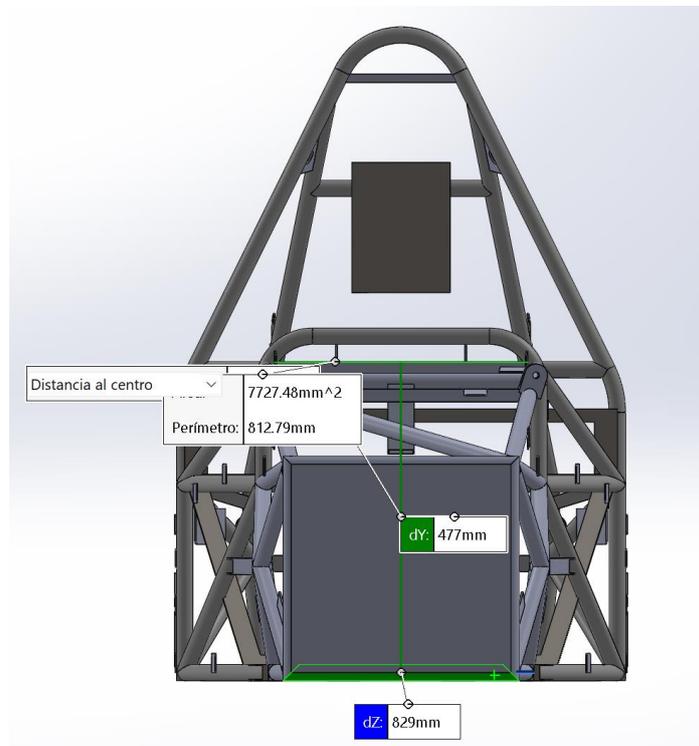


Figura 33 Altura del "fronthoop" del IFS-04.

Por una parte, la longitud total del IFS-04 se ha reducido con respecto a la del IFS-03, como puede observarse en la Figura 30 y Figura 31. Esta reducción se ha producido en la parte del “fronthoop”, donde el chasis se ha incrementado ligeramente en altura y anchura.

En lo que respecta al modelado del chasis, se ha partido del modelo del IFS-03 y se han modificado las cotas geométricas exteriores del chasis. Por otra parte, se ha añadido el nuevo morro y pontón al modelo en sustitución de los empleados en el IFS-03. A fin de resolver todas las posibles interferencias del modelo, se ha empleado la operación combinar/agregar de SolidWorks. El modelo se ha importado en Design Modeller como un .step y al igual que en el IFS-03 se ha realizado un “enclosure” con un plano de simetría, con el fin de simular medio coche y ahorrar coste computacional. Las dimensiones del “enclosure” realizado han sido las mismas que con el IFS-03 al ser las dimensiones del nuevo modelo muy similares al del anterior (14,05 m (L) x 3,35 m (W) x 5,86 m (H)).

Finalmente, es necesario realizar una operación booleana entre el prisma creado y el modelo del vehículo, sustrayendo al prisma el vehículo el volumen del monoplaza. Esto es debido a que no será necesario resolver las ecuaciones del flujo en el volumen del monoplaza, solamente en su superficie. Por ello, el volumen del vehículo no se necesita mallar y es necesario restarlo al volumen total del prisma donde sí se resolverán las ecuaciones del flujo. El resultado de la operación booleana se muestra en la Figura 34. Todos los elementos del monoplaza han sido suprimidos después de la operación booleana.

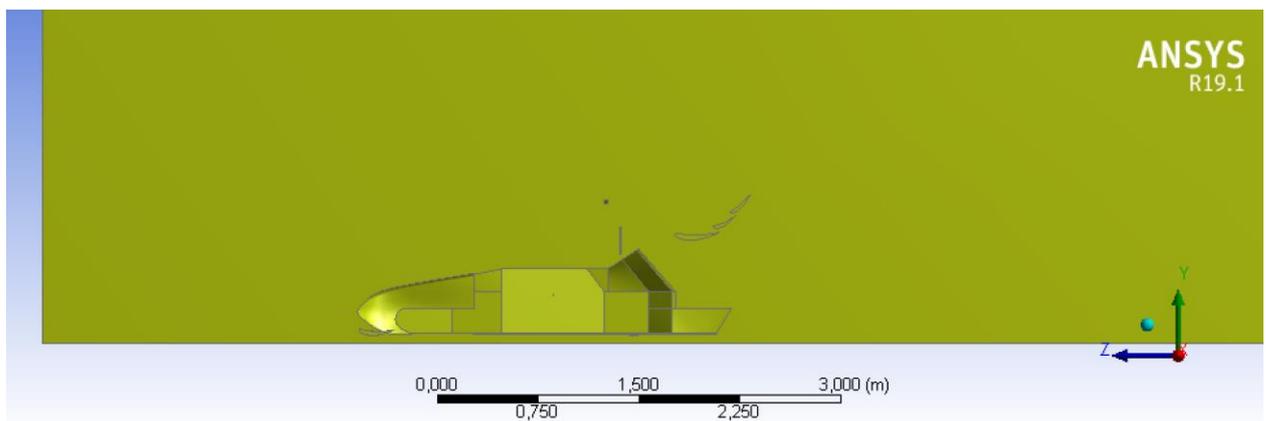


Figura 34. Geometría del modelo del IFS-04.

3.2.2 Mallado

Para la realización de la malla del IFS-04 se ha partido de la del IFS-03. Las modificaciones realizadas se han realizado en el pontón y en el morro del monoplaza, que son las principales diferencias respecto al coche anterior.

El tamaño de malla general se ha mantenido en 0.3 m y los refinados se han realizado en todas las superficies del monoplaza. Dichos refinados han sido de 4 mm excepto el del fondo plano y de los pontones junto con el modelo de chasis que se ha realizado de 3 mm para mejorar el “skewness” obtenido. La “inflation” se ha introducido en todas las superficies del monoplaza que están en contacto con el fluido. Finalmente, en el modelo del IFS-04 la generación de la “inflation” se ha dividido en las siguientes operaciones:

- “Inflation” en el alerón delantero.
- “Inflation” en el fondo plano y difusor.
- “Inflation” en el chasis, apoyacabezas y pontones.
- “Inflation” en el alerón trasero.
- “Inflation” en el morro del monoplaza.
- “Inflation” en la carretera.

Todas las operaciones de “inflation” se han realizado con un total de 4 capas y con una ratio de crecimiento de 1.2.

Las operaciones realizadas en la malla junto con el resultado obtenido se observan a continuación:

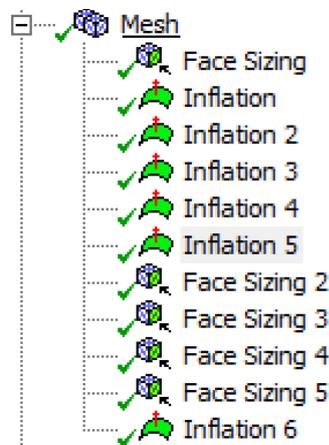


Figura 35. Refinados realizados en la malla del IFS-04.

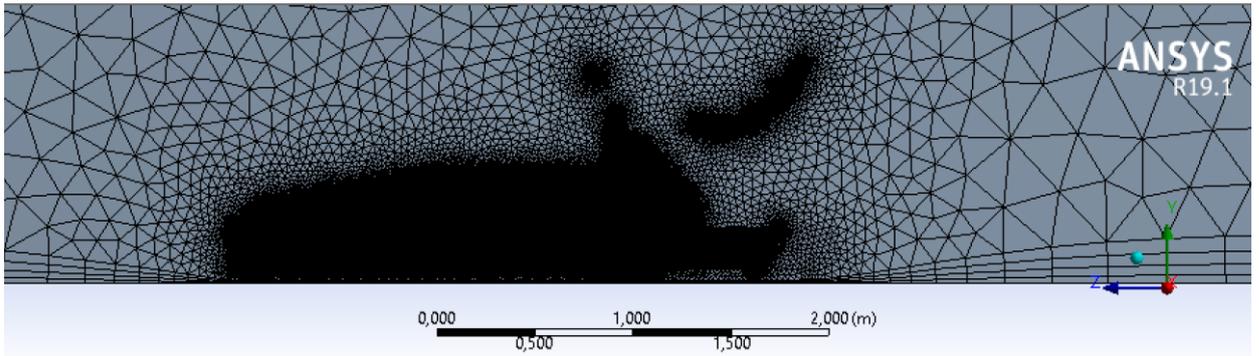


Figura 36. Mallado IFS-04.

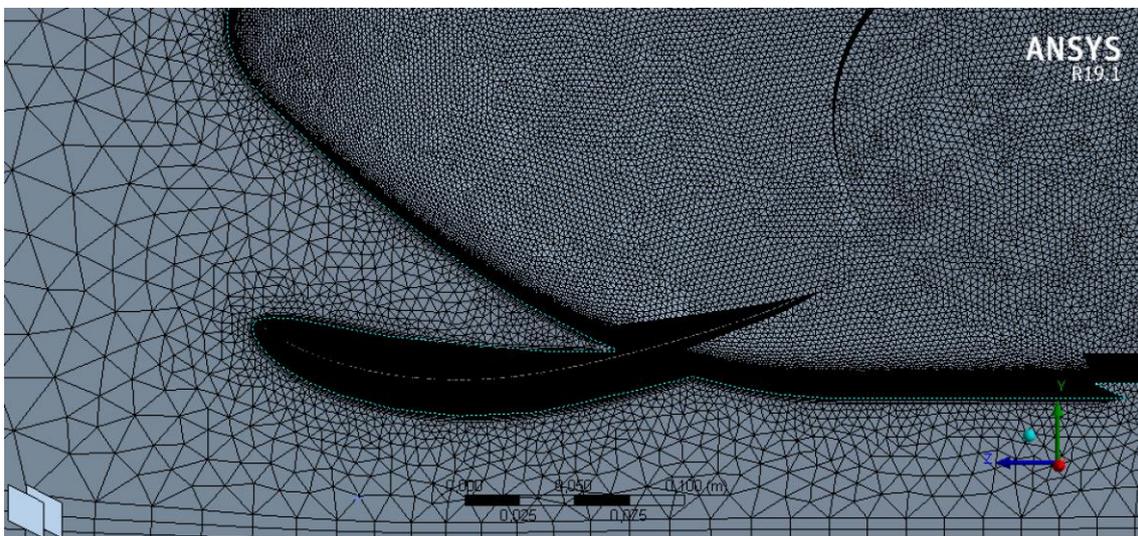


Figura 37. Detalle del mallado en el alerón delantero del IFS-04.

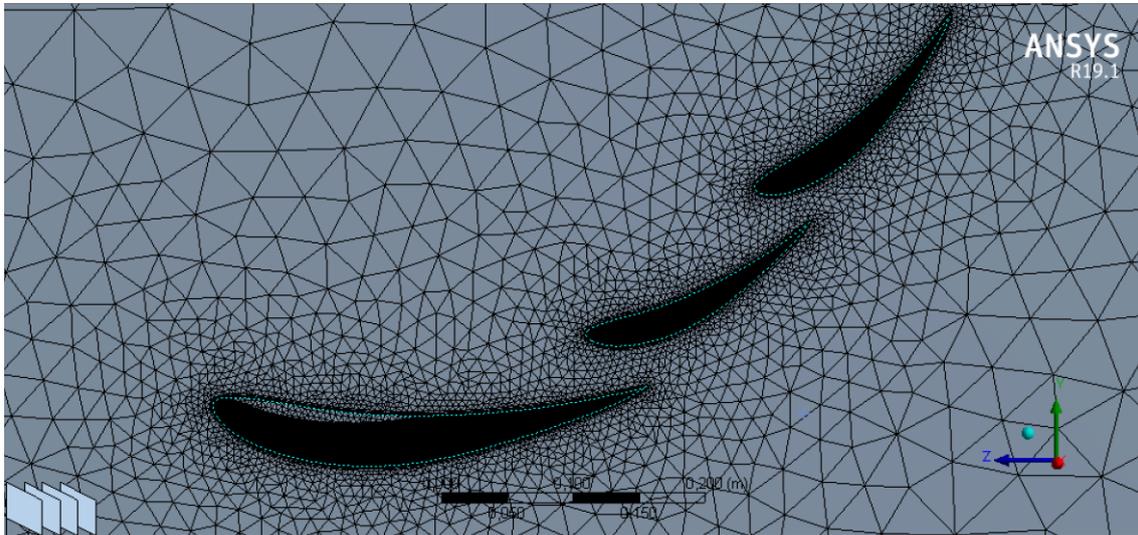


Figura 38. Detalle en el alerón trasero del IFS-04.

Con la malla realizada, el número de elementos totales, al igual que con el IFS-03, es de aproximadamente 10 millones. Además, se ha analizado la calidad del malla a través del “skewness” obtenido, que presenta un valor medio de 0.22. Además, al igual que en el modelo del IFS-03, los elementos con un “skewness” superior se encuentran dispersos, son de tamaño reducido y la cantidad no es elevada, como se puede observar en la Figura 39.

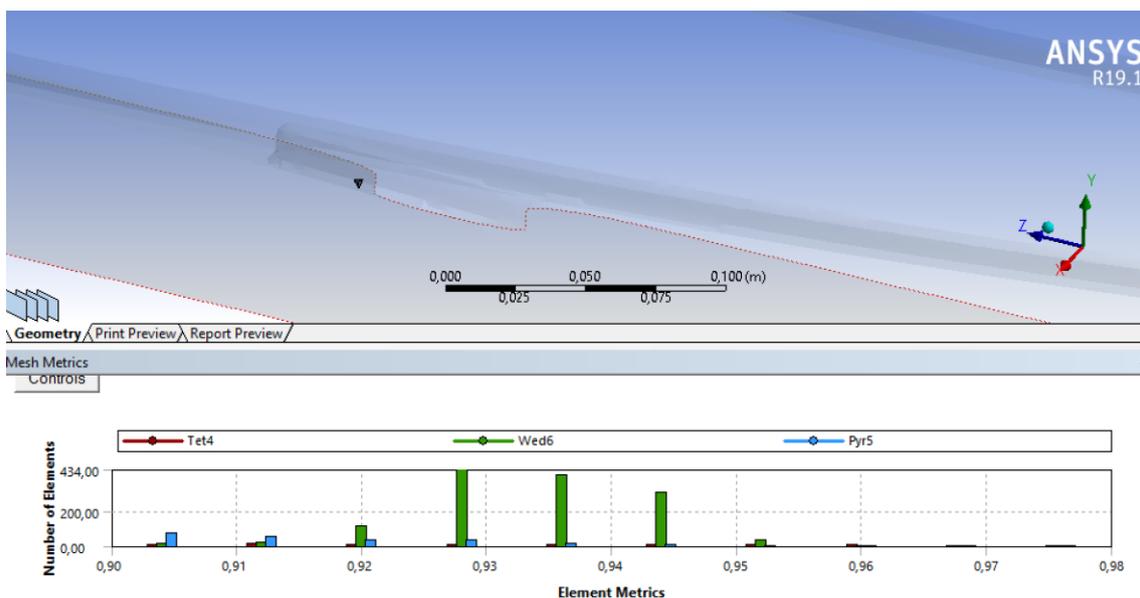


Figura 39. Elementos con un “skewness” más elevado.

Finalmente, se ha verificado que la malla obtenida se importa correctamente en Ansys Fluent y que su inicialización y convergencia son correctas.

3.2.3 *Condiciones de contorno*

Las condiciones de contorno aplicadas en el IFS-04 son las mismas que las aplicadas en el IFS-03. La única modificación que se ha realizado ha sido la del establecimiento del origen de rotación de las ruedas delantera y trasera del monoplaza al haberse modificado ligeramente las dimensiones generales del modelo.

- Entrada de aire: que se dará como una condición de velocidad. La velocidad tendrá dirección perpendicular a la superficie en la cual se define y representará el avance del vehículo. La velocidad de entrada se definirá en 22.22 m/s puesto que es la velocidad a la cual el monoplaza se desplazará la mayor parte del tiempo en el circuito.
- Presión de salida: es la cara de la cual sale el flujo del dominio y se definirá como una condición de presión atmosférica (0 Pa de presión relativa).
- Simetría: por un lado, aplicará a la cara que representa el plano de geometría del modelo. Por otra parte, también aplicará a las caras exteriores una condición de simetría. Al aplicar esta condición se supone que el fluido, en las caras de aplicación de la simetría, será paralelo a dichas caras. Por ello, las caras deben estar suficientemente alejadas del monoplaza para que la suposición sea correcta y que el fluido no se vea influenciado por el coche.
- Suelo: también se debe simular con una condición de tipo “wall”. Sin embargo, debido a que en las simulaciones es el fluido el que se mueve en lugar del monoplaza y ya que en el punto de contacto entre el suelo y el fluido no debe haber velocidad relativa entre ellos, es necesario modelarlo como una pared con movimiento traslacional. Debido a que como anteriormente se ha mencionado, no debe haber movimiento relativo entre el fluido y el suelo la velocidad debe ser de también 22.22 m/s.
- Monoplaza: se definirá como una condición de tipo “wall” estática puesto que en lugar de ser el coche el que se desplaza en la simulación es el fluido.
- Ruedas: se definirán como condiciones de tipo “wall” con movimiento rotacional. El sentido de rotación de la rueda debe ser el contrario al movimiento real al ser el fluido el que se mueve en lugar del monoplaza. La velocidad rotacional se definirá como $\omega = \frac{V}{R}$, donde V es la velocidad del flujo, a la que se considera que se desplazará el

monoplaza (22.22 m/s) y R es el radio de las ruedas (202 mm). De esta forma $\omega = 110 \frac{rad}{s}$. Además, es necesario fijar el centro de rotación de cada una de las ruedas. Para ello, las coordenadas se han determinado desde el Meshing the Ansys, añadiendo un eje de coordenadas auxiliar a cada una de ellas. De esta forma, viendo las coordenadas de dichos ejes creados respecto al eje de coordenadas absoluto se puede determinar la posición de cada uno de los centros de las ruedas. En el caso del IFS-03 el eje de coordenadas de la rueda delantera es: (-0.60026, 9.915e-2, 0.22167) y el de la rueda trasera es: (-0.58378, 9.915e-2, -1.4278).

Respecto al modelo de turbulencia aplicado, se ha comenzado con el modelo K- ω SST, sin embargo, debido a problemas de convergencia, se ha modificado al modelo k- ϵ (aproximadamente a partir de las 25 iteraciones). Además, también se ha modificado el método de resolución a presión lineal, una aproximación de primer orden en la resolución del momento lineal y energía cinética.

Finalmente, a partir de las 70 iteraciones, donde los resultados comenzaron a converger, se ha vuelto al modelo K- ω SST y a un modelo de presión cuadrático y aproximaciones de segundo orden en la resolución de las ecuaciones del momento y energía cinética turbulenta, consiguiéndose la convergencia total del modelo a partir de las 200 iteraciones.

Por otra parte, se han establecido los mismos monitores que en el IFS-03 a fin de verificar la convergencia del modelo:

- Fuerza de arrastre (“drag”): se ha definido en la dirección de z, por lo que su valor tiene que ser negativo.
- Fuerza de sustentación (“lift”): se ha definido en la dirección de y, por lo que su valor tiene que ser negativo para indicar que se trata de una fuerza que genera “downforce”.
- Presión de entrada: el resultado debe ser una presión relativa positiva, puesto que el flujo se dirige hacia el portal de salida, donde la presión absoluta es la atmosférica.
- Velocidad de salida: debe ser aproximadamente la velocidad de entrada puesto que el portal de salida debe estar lo suficientemente alejado del monoplaza para que no se vea influenciado por este.
- Diferencia de flujo másico entre la entrada y salida del dominio: debe ser aproximadamente cero, teniendo en cuenta la ley de conservación de la masa.
- Residuos de continuidad, turbulencia (k, ω) y velocidad (en x, y, z).

4. Resultados

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos para cada uno de los modelos realizados, no solo para los modelos definitivos sino también los primeros modelos utilizados para obtener resultados orientativos. Además, también se analizarán dichos resultados comparando las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos, costes computacionales y convergencia de los resultados.

4.1 Resultados del modelo del IFS-03

Utilizando la malla definitiva, obtenida a través del análisis de sensibilidad de malla, se ha realizado la simulación a fin de verificar correctamente la convergencia de todas las variables y de los residuos. En total se han simulado unas 1000 iteraciones. Se han analizado los residuos de la continuidad, de la velocidad en las 3 direcciones del flujo y las 2 ecuaciones de turbulencia. Idealmente, los residuos deben alcanzar valores inferiores a 10^{-3} para las ecuaciones de la continuidad, velocidad y turbulencia y de 10^{-5} para la ecuación de la energía, no utilizada en este análisis. Sin embargo, a través de la monitorización de las variables de interés, como son la fuerza de arrastre, el “downforce”, las presiones de entrada y de salida y las velocidades de entrada y de salida al dominio, puede comprobarse que la convergencia se consigue con valores de residuos algo superiores a 10^{-3} y dada la complejidad del modelo y el alto coste computacional que supone, la simulación se ha parado con valores de residuos correspondientes a la continuidad de aproximadamente 10^{-2} .

Las aproximadamente 1000 iteraciones realizadas se han ejecutado con dos procesadores en paralelo, y han requerido de unas 6 horas de computación. Debido a ello, la simulación se ha pausado y reanudado en varias ocasiones. Esta es la razón por la que los residuos correspondientes a la turbulencia presentan ciertos saltos en algunas iteraciones, como se observa en la Figura 40. Sin embargo, se observa que el sistema no es inestable, ya que ciertas iteraciones después de reanudar la simulación los valores comienzan a decrecer nuevamente.

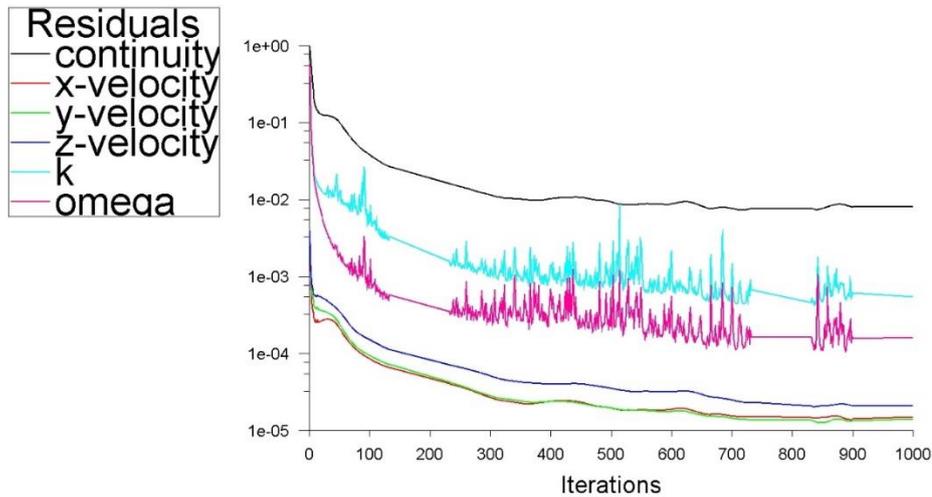


Figura 40. Residuos simulación IFS-03

Dado que los residuos correspondientes a la continuidad son los mayores, se ha monitorizado también la diferencia de flujo másico entre los portales de entrada y de salida del dominio. Los valores de dicha diferencia se situaron a partir de las 500 iteraciones en valores entre 0.0004 kg/s y -0.0004 kg/s cumpliéndose de esta forma la conservación de la continuidad.

4.1.1 Velocidades

Una vez verificada la convergencia del modelo, se ha pasado a analizar las velocidades obtenidas. Por una parte, se ha verificado que los resultados y magnitudes de dichas velocidades son coherentes con los resultados esperados. Para ello, se ha comprobado las velocidades en los portales de entrada y de salida, teniendo que ser las velocidades aproximadamente iguales y, dado que el dominio es suficientemente grande, no deberían encontrarse afectadas por la influencia de la turbulencia generada por el monoplaza. Además, el valor en ambos casos debe ser aproximadamente igual a la condición de velocidad impuesta a la entrada del modelo (22.22 m/s), que será la velocidad de diseño de la aerodinámica del coche. En la Figura 41 y Figura 42 se observa como los portales de entrada y salida del modelo cumplen con todos los puntos anteriormente mencionados.

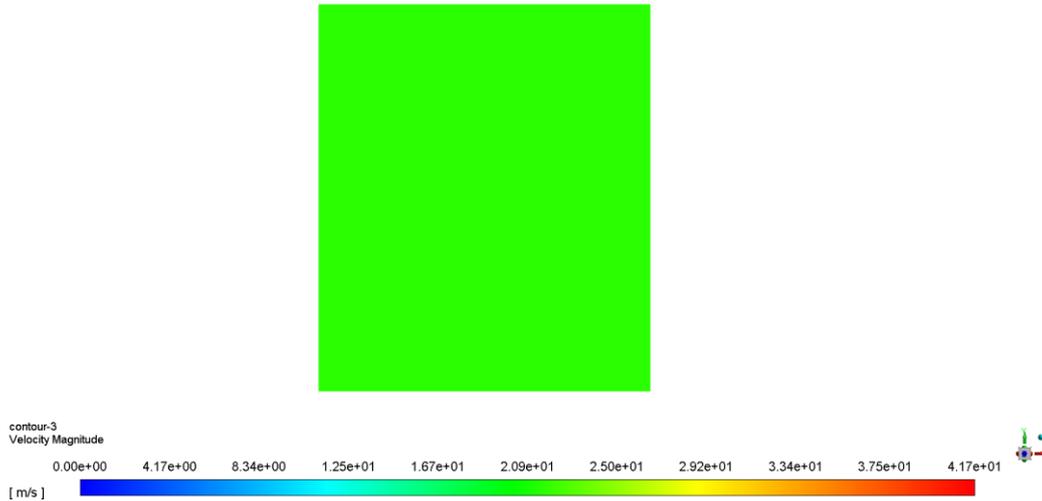


Figura 41. Velocidad en la entrada del dominio.

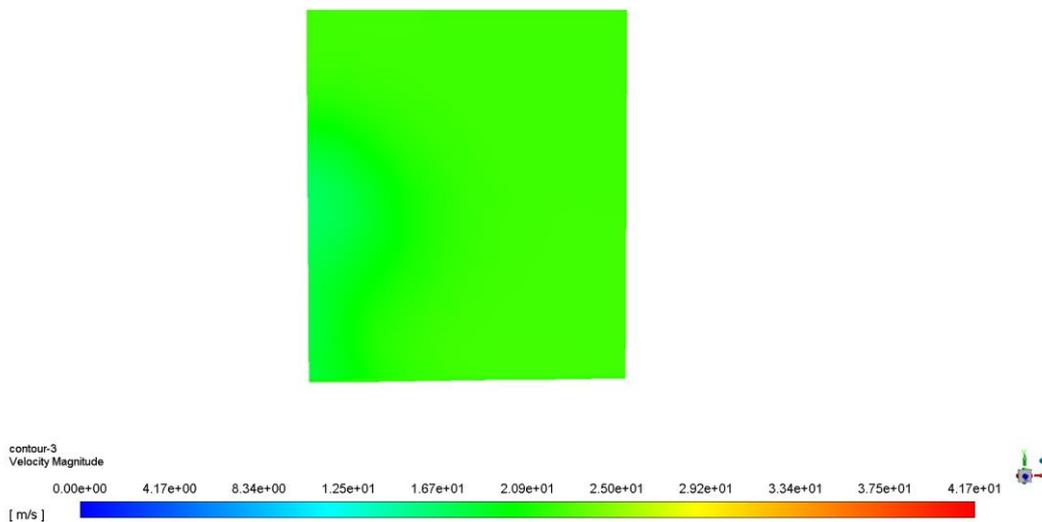


Figura 42. Velocidad a la salida del dominio.

Por otra parte, otra magnitud que debe ser analizada es la condición de velocidad impuesta en el suelo, a fin de que no haya velocidad relativa entre el flujo y la carretera. Esto es debido a que, en la simulación, en lugar de ser el vehículo el que se desplaza, la condición de velocidad se impone en el flujo. En caso de no imponer la velocidad de 22.22 m/s en el mismo sentido que la condición de velocidad de entrada en el dominio, a fin de asegurar la condición de no deslizamiento en el punto de contacto entre el aire y el

suelo, el software crearía una turbulencia en las proximidades de la carretera, para asegurar la velocidad nula en el punto de contacto con el suelo. Por lo tanto, este efecto podría verificarse en el plano de simetría, apareciendo vórtices en las proximidades del suelo a lo largo de todo el dominio. Por otra parte, en caso de haber definido incorrectamente la velocidad de la carretera, el vórtice creado afectaría a la homogeneidad de la condición de velocidad en los portales de entrada y salida del dominio.

En la simulación realizada, se cumple con todos los puntos mencionados, como se observa en la Figura 41, Figura 42 y Figura 43.

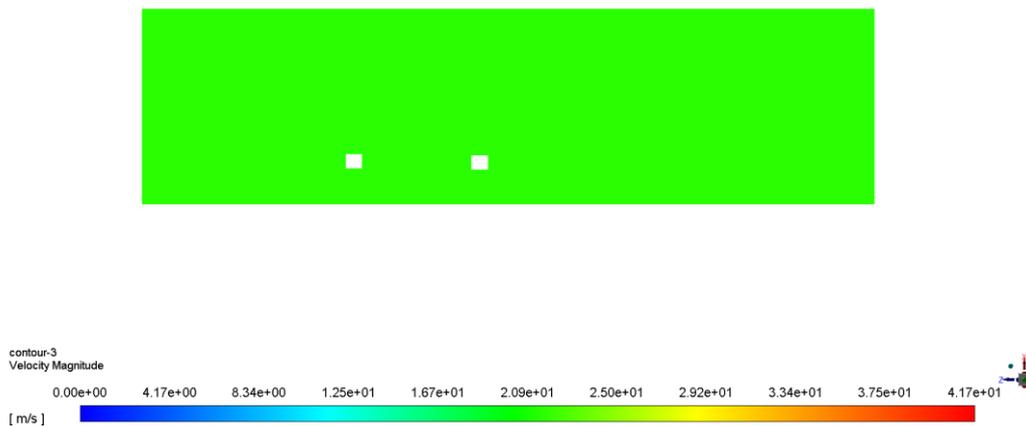


Figura 43. Velocidades en el plano de la carretera.

Una vez verificada que las condiciones de velocidad se han aplicado correctamente en el modelo, se analizarán las velocidades obtenidas en las proximidades del vehículo. Es importante destacar, que teniendo en cuenta el principio de Bernoulli, en aquellas zonas donde se desea conseguir bajas presiones para la generación de “downforce” es importante alcanzar altas velocidades.

En la Figura 44, se muestra un “contour” en el plano de simetría del dominio. A través de este “contour”, por una parte, se observa como una parte importante del flujo se frena en el morro del monoplaza, donde la velocidad es aproximadamente nula. Este efecto será una importante causa de “drag” puesto que como se analizará posteriormente este flujo que incide contra el morro del coche generará una zona de altas presiones, producido una fuerza resultante en el sentido contrario al avance del monoplaza. Este mismo efecto, se observa en el detalle de la Figura 45. De esta forma, a fin de mejorar la aerodinámica de este modelo, y como se observará con el IFS-04, se necesita realizar un

morro con una sección más redondeada, para que el volumen de flujo frenado cuando este impacta contra el monoplaza no sea tan elevado.

Por otra parte, se observa cómo el alerón delantero del monoplaza funciona correctamente, generando una región de mayor velocidad por la parte inferior del perfil. Esto producirá una reducción de las presiones que incrementará notablemente el “downforce” generado por el coche. El efecto del alerón se encuentra mejorado gracias a la presencia del difusor, que favorece a que un mayor flujo de aire pase, no solo por debajo del alerón sino también por la parte inferior del monoplaza (fondo plano), incrementándose el “downforce”.

Respecto al desprendimiento de la capa límite, se observa cómo el flujo permanece correctamente en contacto con el monoplaza a lo largo de prácticamente todo su recorrido. Se desprende a partir de las proximidades de la sección en la que se encuentra el conductor. A partir del compartimento del piloto, se genera una estela importante detrás del monoplaza, lo que constituirá una fuente importante de generación de “drag”. Por lo tanto, se debería modificar la geometría tras el compartimento del piloto a fin de realizar una transición más suave para reducir la estela generada por el monoplaza.

Finalmente, el apoyacabeza del monoplaza genera una importante turbulencia, afectando notablemente a la actuación del alerón trasero. Como se puede observar, la velocidad por debajo del perfil del alerón es baja, siendo por lo tanto el “downforce” muy inferior al máximo que podría generar el perfil. Puesto que subir la altura del alerón trasero se encuentra restringido por normativa y que además la turbulencia generada por el apoyacabeza se desplaza hacia cotas superiores a medida que avanza a lo largo del dominio, una forma de aumentar la eficiencia del alerón trasero sería bajando ligeramente su posición. Sin embargo, el desplazamiento del alerón deberá no ser demasiado elevado para evitar que sea demasiado afectado por la estela generada por el chasis del monoplaza.

En la Figura 45, además se muestra el detalle de la rueda delantera, para verificar que la condición de contorno de velocidad angular se ha introducido correctamente. Este giro angular produce también turbulencias que afectan al “downforce” y “drag” generados. Sin embargo, se ha verificado que dicha turbulencia prácticamente no llega al alerón trasero por lo que en este caso su impacto se encuentra en un segundo plano.

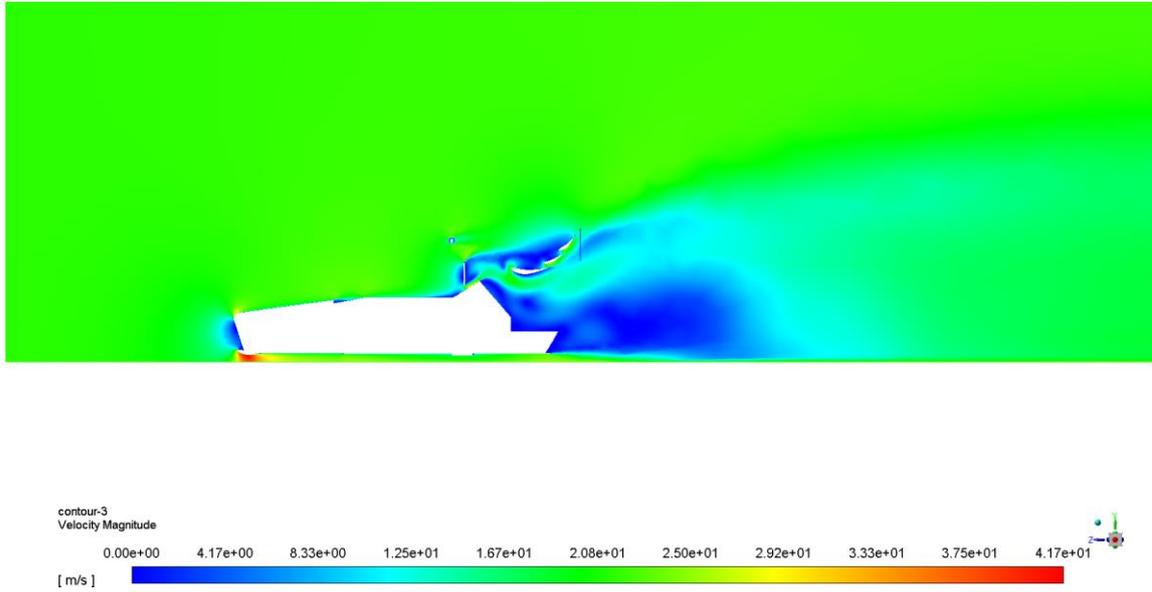


Figura 44. Velocidades en el plano de simetría del dominio.

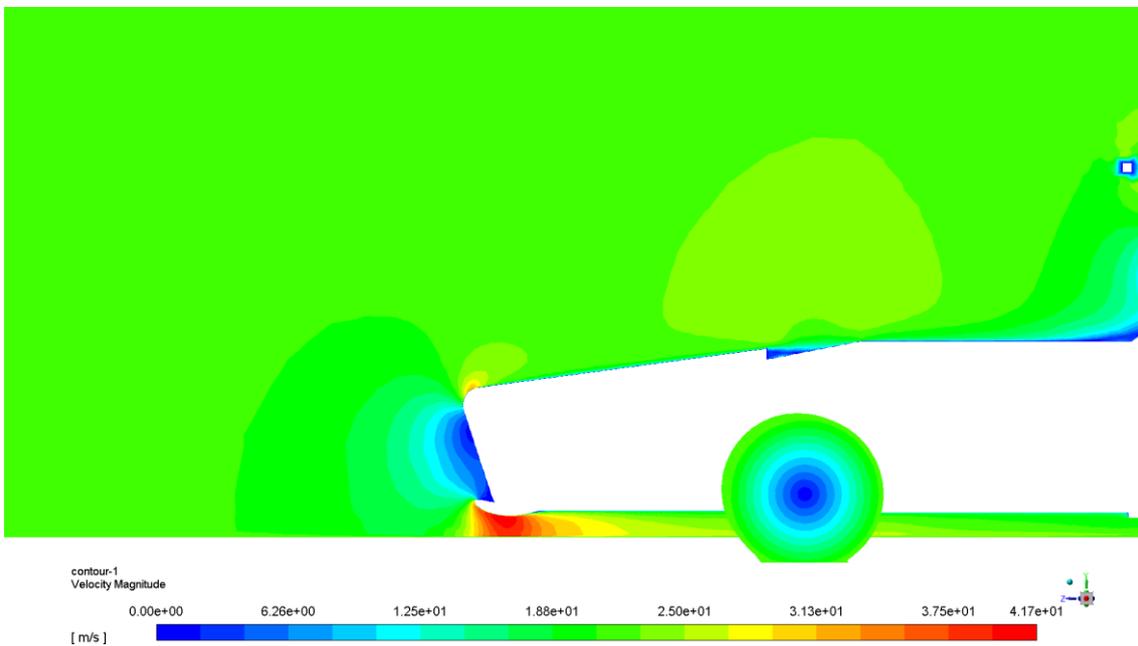


Figura 45. Detalle alerón delantero y rueda delantera.

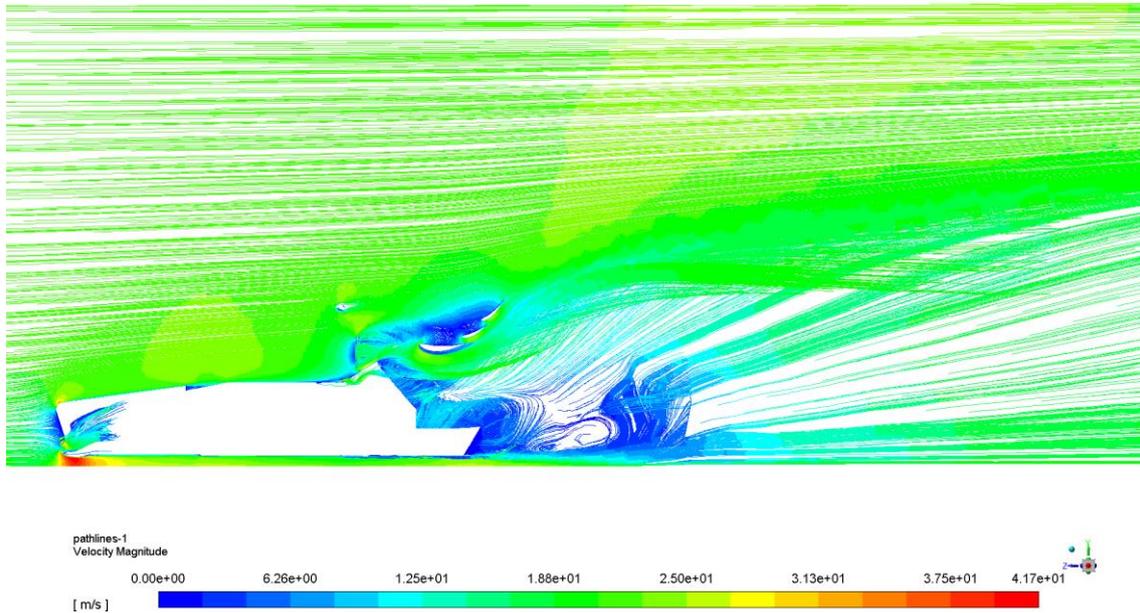


Figura 46. Pathlines plano de simetría.

Como se puede observar en la Figura 47, el alerón trasero se encuentra altamente afectado por la turbulencia generada por el apoyacabeza del monoplaza. Sin embargo, la energía turbulenta en posiciones ligeramente inferiores en la dirección de Y es menor. De esta forma, se puede concluir que para mejorar el “downforce” generado por el alerón trasero se debe reducir ligeramente su cota.

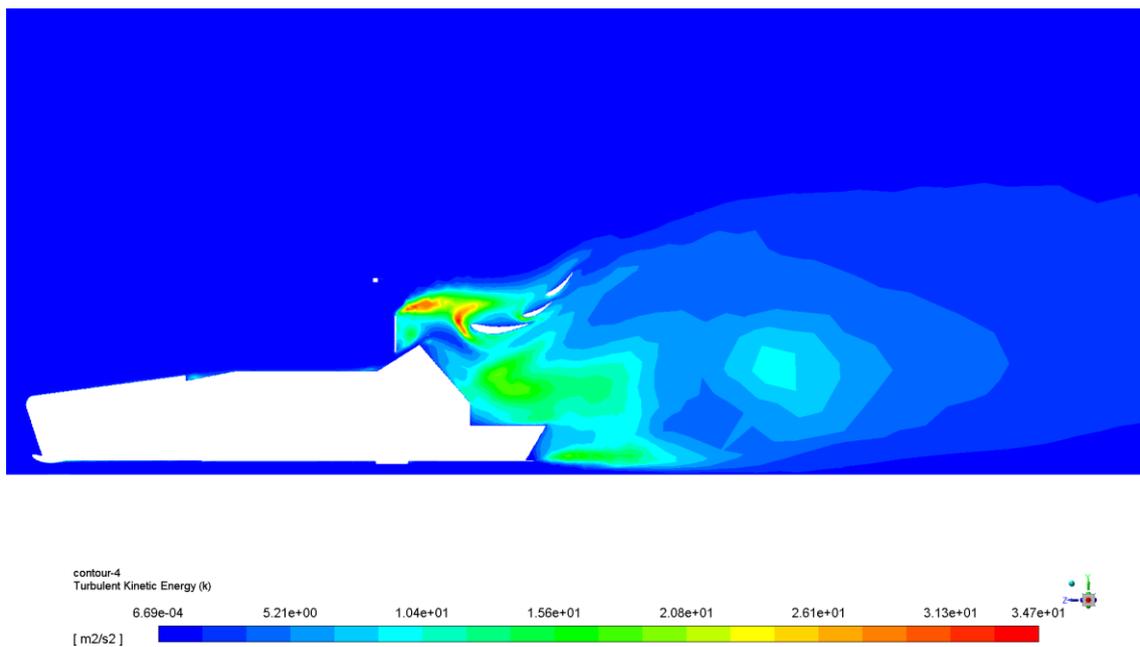


Figura 47. Turbulencia en el plano de simetría.

4.1.2 Presiones

En esta sección se analizarán la distribución de presiones obtenida a lo largo del dominio, relacionando sus valores con las fuerzas de arrastre y de “downforce” que generan. Estos valores, como se ha expuesto anteriormente deben ser coherentes con los resultados de velocidades anteriormente obtenidos al encontrarse las presiones y velocidades relacionadas por la ecuación de Bernoulli.

Por una parte, en la Figura 48 y Figura 49 se ha verificado que las presiones a la entrada y salida del dominio no se ven afectadas por la influencia del monoplaza, por lo que el dominio es suficientemente grande y las condiciones de contorno se encuentran correctamente aplicadas. Por otra parte, en términos cuantitativos, debido a que se está forzando un flujo en la dirección negativa del eje Z, esto es, desde el portal de entrada del dominio al portal de salida, para que dicha condición se cumpla, las presiones obtenidas en el portal de entrada deben ser superiores a las impuestas en el portal de salida (condiciones ambientales). En la Figura 49 se observa el cumplimiento de la presión atmosférica impuesta a la salida del dominio y en la Figura 48 se observa que la presión a la entrada del dominio es ligeramente superior que a la salida (para mostrar este efecto se han representado los mismos límites de presiones en ambas leyendas).

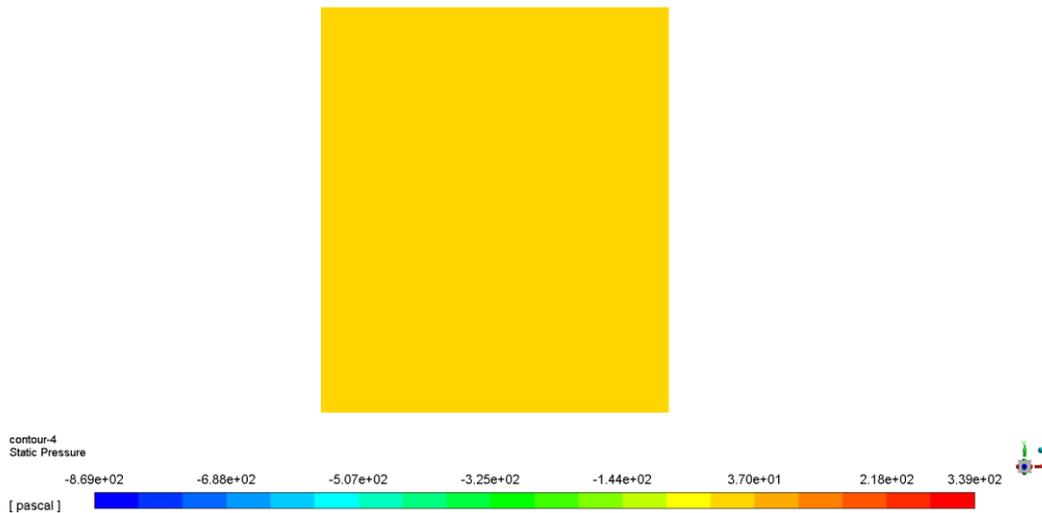


Figura 48. Presión a la entrada del dominio.

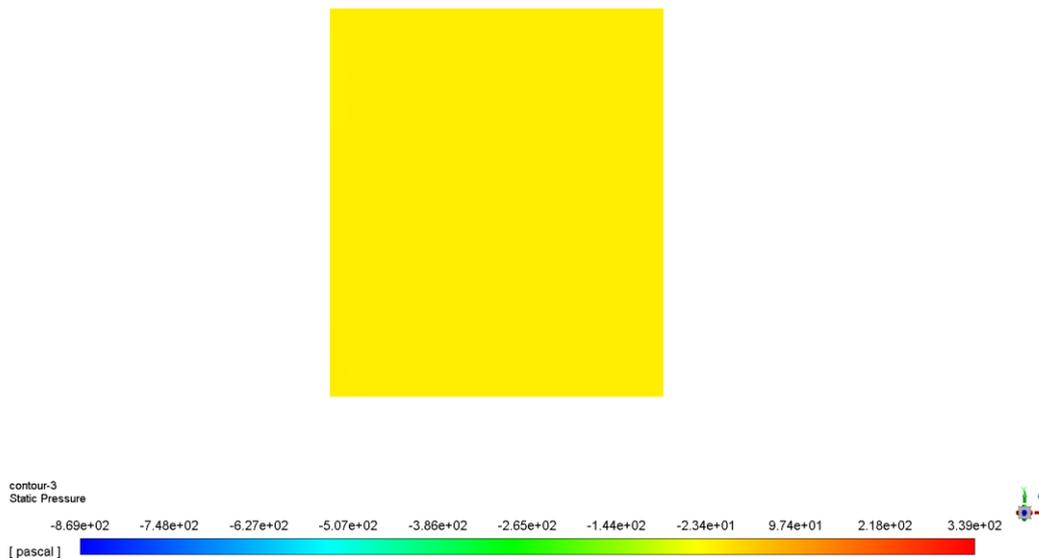


Figura 49. Presión a la salida del dominio.

Como se puede observar en la Figura 50, el morro del monoplaza genera una importante región de altas presiones en la parte delantera, lo cual se traduce en un incremento significativo del “drag” del coche. Estas altas presiones también se localizan en el reposacabezas del monoplaza que además de ser una alta fuente de “downforce” se observa cómo afecta notablemente a los perfiles de presión aguas abajo del mismo. Esto influye negativamente al alerón trasero, donde se observa que, aunque las presiones encima del alerón son bastante elevadas, la presión por la parte inferior del perfil es notablemente superiores a la del alerón delantero. Por otra parte, debido a la gran estela generada por el monoplaza, se observa una zona importante de bajas presiones detrás del coche que también supondrá una fuente importante de “drag”. Finalmente, en lo que respecta a las presiones a lo largo del fondo plano, se observa como las presiones son inferiores a las del contorno superior del monoplaza, por lo que el fondo plano también supone una fuente de generación de “downforce”. En el plano de simetría comienza uno de los canales guía del flujo del fondo plano, este canal frena ligeramente al flujo cuando entra en contacto con él generando un ligero incremento de presiones y reduciendo ligeramente el “downforce” generado por el fondo plano. Este ligero aumento de presiones se encuentra probablemente sobredimensionado en la simulación, puesto que al ser tan reducidas las dimensiones de los canales guías del fondo plano, sería necesario emplear un tamaño de malla muy reducido. Sin embargo, debido a las restricciones computacionales con las que se han realizado las simulaciones, no se ha podido reducir más el tamaño de malla de este elemento. El ligero incremento de presión que puede producir el canal guía del fondo plano es, sin embargo, como se muestra en otros estudios compensado con las ventajas que ofrece la obtención de un flujo ordenado a través del difusor para generar “downforce”.

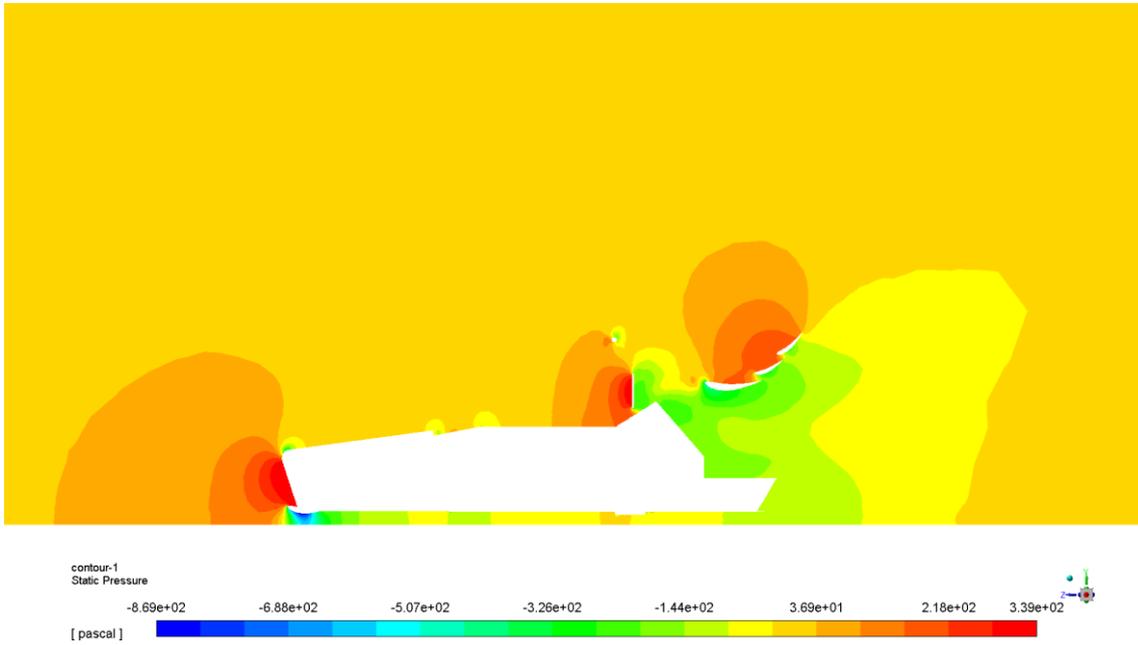


Figura 50. Presiones en el plano de simetría.

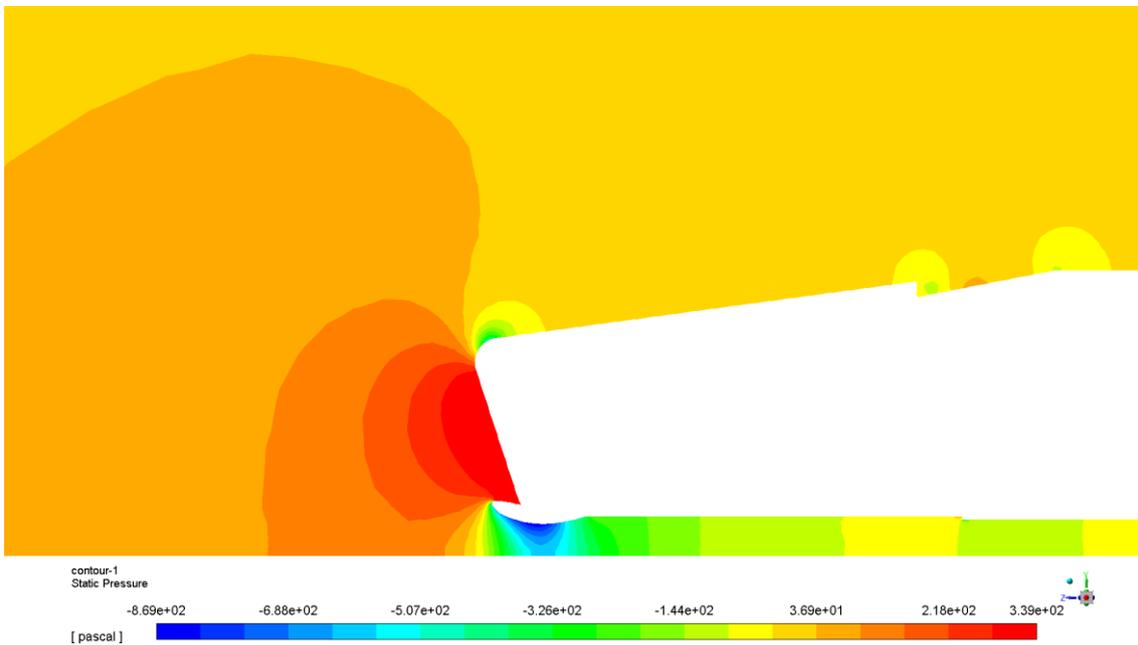


Figura 51. Detalle de las presiones del alerón delantero.

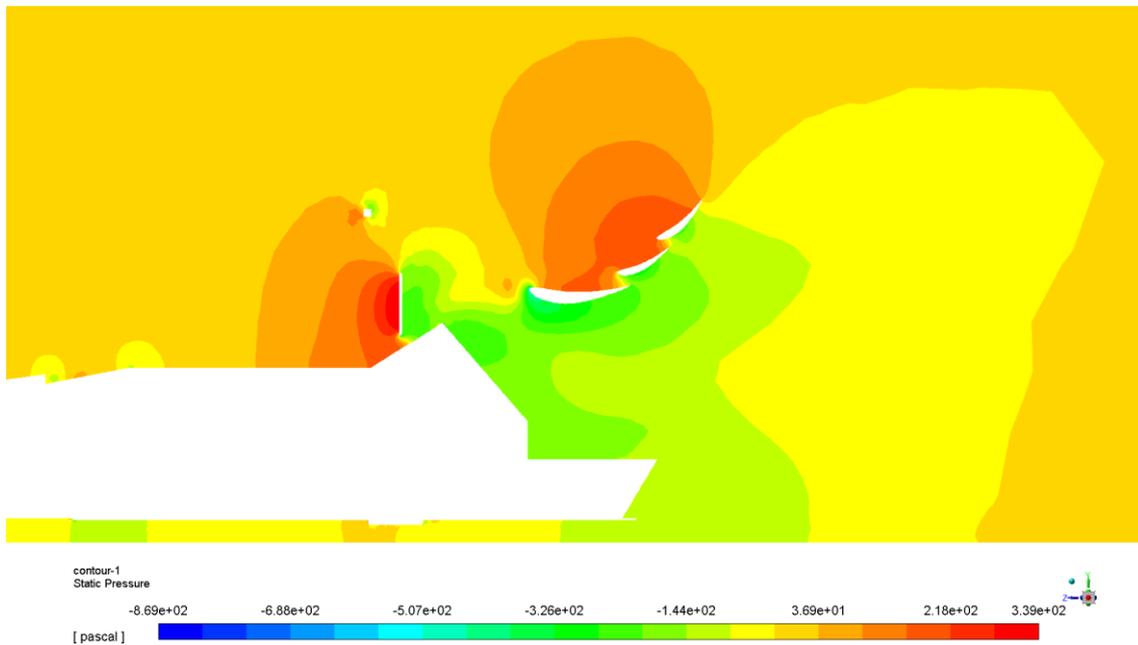


Figura 52. Detalle de las presiones del alerón trasero.

4.1.3 Fuerzas aerodinámicas

Finalmente, una vez analizadas las velocidades y presiones del fluido, en esta sección se cuantificarán las fuerzas que producen sobre él. Debido a que se está simulando únicamente medio monoplaza, las fuerzas obtenidas tanto para el “drag” como para el “downforce” tendrán que ser duplicadas.

Ansys Fluent, ofrece la posibilidad de calcular las fuerzas sobre cada uno de los cuerpos sólidos localizados en el dominio. En este caso, debido a que se pretende analizar el monoplaza en su conjunto, no ha sido necesario tener por separado cada uno de los elementos del coche. En caso de desear analizar las fuerzas en cada uno de los elementos por separado, es necesario a la hora de definir cada una de las “name selections” las diferentes partes de las cuales se desean realizar los cálculos (alerón delantero, alerón trasero, pontones...). Por lo tanto, en el caso de estudio, simplemente ha sido necesario seleccionar las paredes sólidas del coche, correspondiente a todos los elementos aerodinámicos y al chasis del monoplaza y por otra parte las dos ruedas, que han sido definidas de forma independiente al realizar las “name selections” para ofrecer la posibilidad de configurar una condición de contorno de velocidad angular en cada una de ellas.

Además de seleccionar la geometría, es necesario indicar el sentido en el que se desea obtener la fuerza. En el caso de la fuerza de arrastre o “drag”, se da en el sentido opuesto al sentido de avance del monoplaza, que al no desplazarse y ser el fluido el que

se mueve se dará en el sentido de avance del flujo. Por ello, el cálculo de la fuerza de arrastre se ha realizado en el sentido positivo del eje z, teniendo que obtenerse valores negativos de fuerza (el flujo se desplaza hacia valores negativos de z). La fuerza total de “drag” obtenida es de unos 170 N aproximadamente para medio coche. Considerando la simetría empleada en el modelo, el “drag” total será de aproximadamente 340 N. Además, como se puede observar, la mayor parte de esta fuerza de arrastre es producida por las fuerzas de presión (alrededor de un 96%). Es por ello, que la modificación de elementos como el morro del monoplaza, o la reducción de la estela producida por el vehículo pueden dar lugar a mejoras significativas en la reducción del “drag” total. Cabe mencionar también el importante impacto que suponen las ruedas del vehículo en la producción del drag (alrededor de un 16%) como consecuencia del alto nivel de turbulencia que estos elementos producen. En la Figura 53, se muestran los valores de “drag” y los coeficientes de presión referentes a las fuerzas de arrastre obtenidos en la simulación.

Forces - Direction Vector (0 0 1)						
Zone	Forces (n)			Coefficients		
	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
front_wheel	-10.000406	-0.3045086	-10.304915	-16.327194	-0.49715689	-16.824351
rear_wheel	-17.244291	-0.19940288	-17.443694	-28.153945	-0.32555573	-28.479501
wall-solid	-134.74741	-6.3181925	-141.0656	-219.99576	-10.315416	-230.31118
wall-solid.1	-0.67209297	-0.0057103243	-0.6778033	-1.0972947	-0.0093229784	-1.1066176
Net	-162.6642	-6.8278143	-169.49201	-265.5742	-11.147452	-276.72165

Figura 53. Fuerza de arrastre del monoplaza.

Por otra parte, en lo que respecta al cálculo del “downforce” generado por todos los elementos aerodinámicos del monoplaza, el procedimiento para su obtención es similar al de la fuerza de arrastre. Sin embargo, en lugar de indicar que el cálculo se debe realizar en el sentido el eje z, se realizará en el sentido del eje y. Como se puede observar en la Figura 54, las fuerzas han sido definidas en el sentido positivo del eje y. Por lo tanto, un valor negativo de fuerza indicará la generación de “downforce” y un valor positivo la generación de “lift”. Además, los valores de “downforce” obtenidos deberán ser duplicados a fin de considerar que únicamente se está simulando medio coche. De esta forma, el “downforce” total generado por todos los elementos aerodinámicos es de aproximadamente de 574 N. Es importante destacar, que este valor es notablemente inferior a los elementos evaluados por separado, donde el alerón delantero generaba alrededor de 35 kg, el alerón trasero generaba 25 kg y el fondo plano sobre 10N. Esto es debido a que especialmente los elementos aerodinámicos situados en la parte trasera del monoplaza se ven considerablemente afectados por la turbulencia generada por la parte delantera del coche. Por otra parte, es destacable la reducción de “downforce” generada por las ruedas tanto delantera como trasera. En la Figura 54, se muestran los valores de “drag” y los coeficientes de presión referentes a las fuerzas de sustentación obtenidos en la simulación.

Forces - Direction Vector (0 1 0)						
Zone	Forces (n)			Coefficients		
	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
front_wheel	10.280284	0.1836362	10.46392	16.784137	0.29981421	17.083951
rear_wheel	17.039907	-0.01642856	17.023479	27.820257	-0.026822139	27.793435
wall-solid	-314.39197	0.85615557	-313.53581	-513.29301	1.397805	-511.8952
wall-solid.1	0.0015600208	0.0040265596	0.0055865805	0.0025469728	0.0065739749	0.0091209477
Net	-287.07022	1.0273898	-286.04283	-468.68607	1.6773711	-467.0087

Figura 54. Fuerza de sustentación del monoplaça.

4.2 Resultados del modelo del IFS-04

Como se ha comentado anteriormente, el IFS-04 presenta pequeñas diferencias respecto al IFS-03. A nivel aerodinámico, las diferencias más significativas del monoplaça son: el acortamiento de la parte delantera del chasis (40 mm). El incremento de la altura del chasis, así como de su anchura. La modificación de los pontones y del morro del monoplaça y finalmente, la modificación del apoyacabeza, que ha pasado de 325 mm de ancho y alto a 360 mm de ancho y 345 mm de alto. Debido a que las modificaciones son muy ligeras, y debido al alto coste computacional de las simulaciones, se han empleado los costes computacionales del análisis de sensibilidad de malla del IFS-03 para definir el mallado del nuevo modelo. Sin embargo, como consecuencia de los nuevos pontones finalmente ha sido necesario reducir ligeramente (hasta 3 mm) el tamaño de malla para evitar problemas en la generación de la “inflation” a lo largo del contorno del chasis. De esta forma, el mallado del IFS-04 cuenta con un total de 9831212 elementos.

Al igual que con el anterior modelo, se han monitorizado: los residuos de la continuidad, velocidad y ecuaciones de la turbulencia, las fuerzas de arrastre y sustentación, la diferencia entre el flujo másico que entra y sale del dominio, la velocidad a la salida del dominio y la presión a la entrada del dominio. En este caso, debido a que todas las iteraciones se han ejecutado sin salir de Fluent, ha sido posible también mostrar la evolución en cada iteración de cada uno de los monitores (Figura 55, Figura 56, Figura 57, Figura 58, Figura 59 y Figura 60). Como se puede observar en todos los monitores, los resultados estaban haciéndose inestables, por ello, se modificó el modelo de turbulencia de $k-\omega$ SST a $k-\epsilon$ realizable y los métodos de solución de presión y momento a primer orden. Una vez alcanzadas las 70 iteraciones, donde el sistema parecía volver a converger, se volvió a modificar el modelo de turbulencia al $k-\omega$ SST y los métodos de solución a segundo orden.

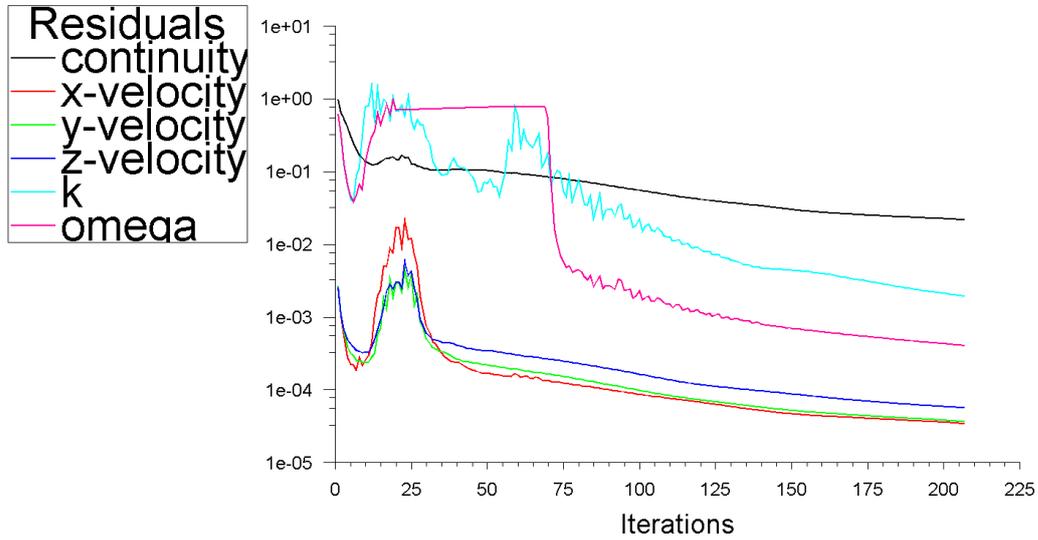


Figura 55. Residuos simulación IFS-04.

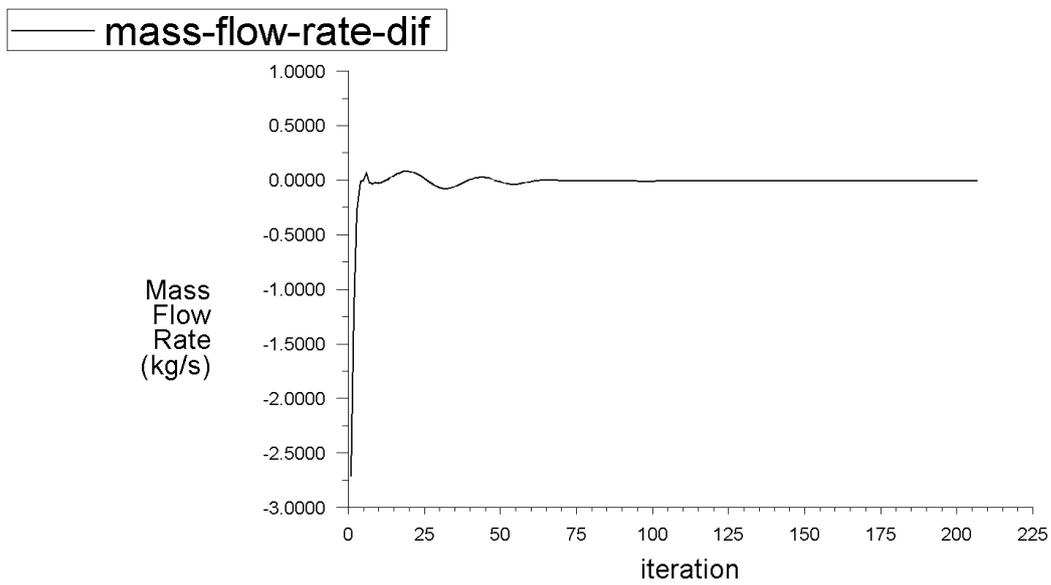


Figura 56. Diferencia del flujo másico entre los portales de entrada y salida del dominio.

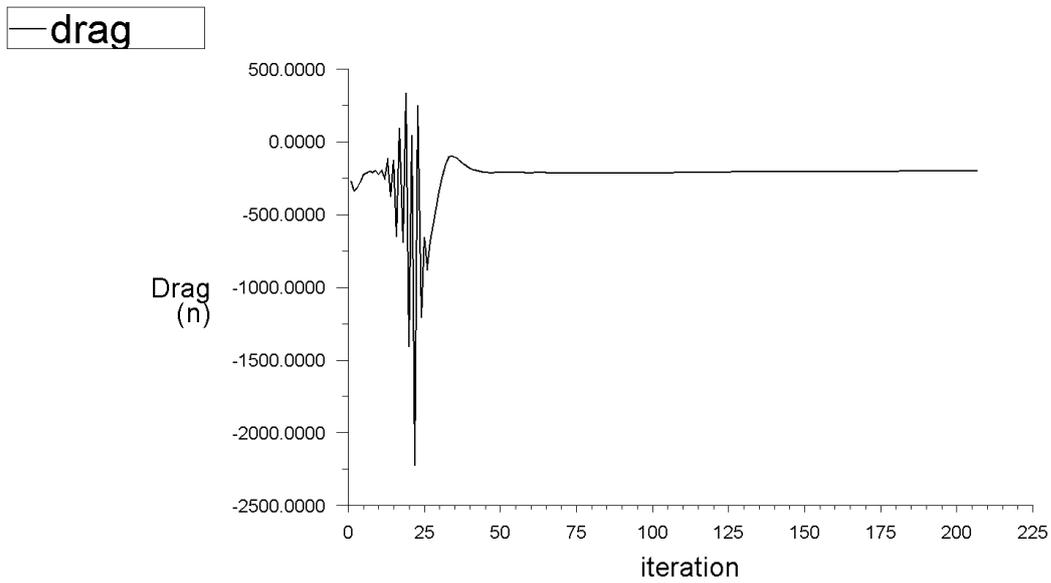


Figura 57. Drag del IFS-04.

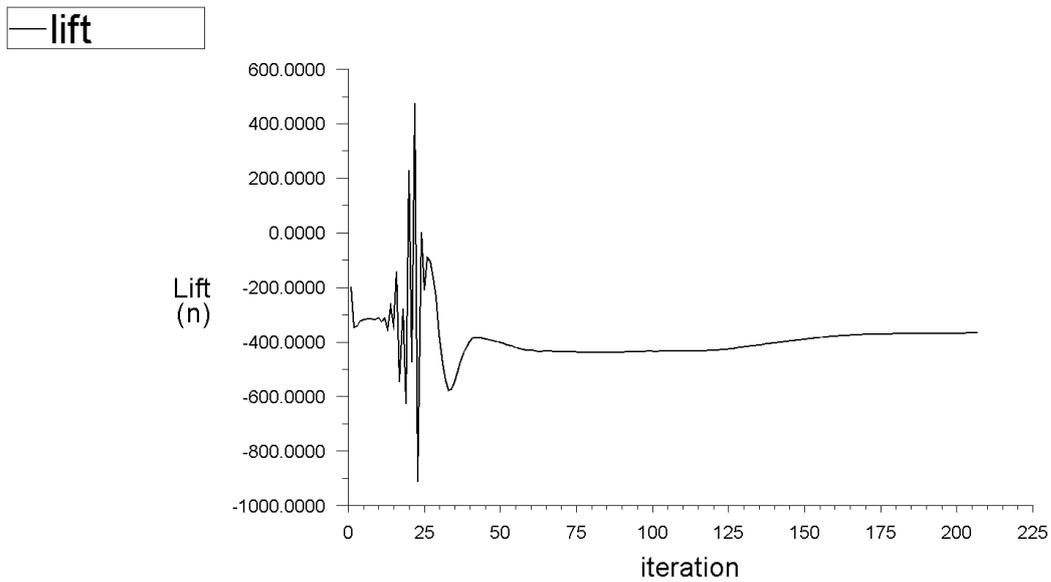


Figura 58. Lift del IFS-04.

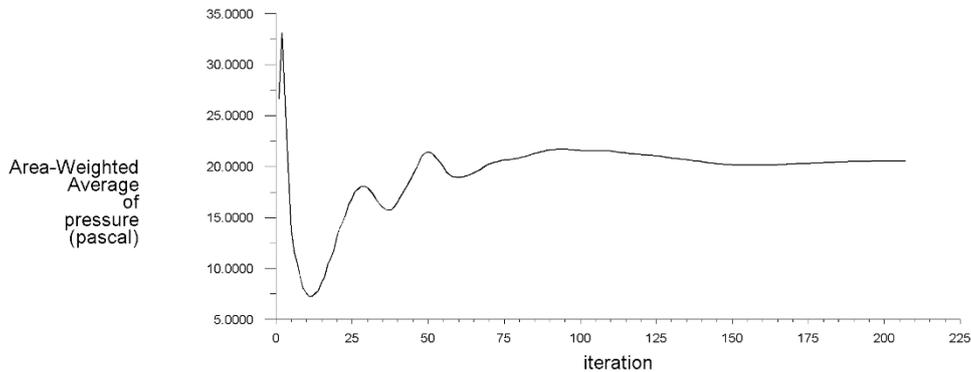


Figura 59. Presión en el portal de entrada.

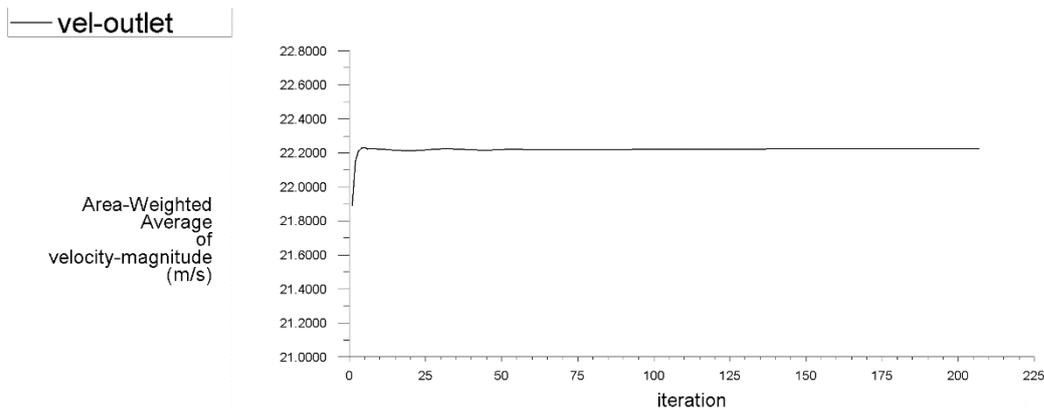


Figura 60. Velocidad en el portal de salida del dominio.

En este caso, se observa que a partir de las 200 iteraciones todos los resultados de interés convergen siendo además todos los residuos del orden o inferiores a 10^{-3} , excepto el de la continuidad que es de 10^{-2} . A pesar de ello, se comprueba fácilmente la condición de continuidad a través del monitor que indica la diferencia de caudal másico entre la entrada y salida del dominio cuyo valor es aproximadamente del orden de 10^{-4} kg/s.

4.2.1 Velocidades

Al igual que con el IFS-03, se ha comenzado verificando que las condiciones de contorno introducidas en el modelo cumplen con las variables de salida obtenidas en la simulación. Como se muestra en la Figura 61, Figura 62 y Figura 63, la condición de velocidad impuesta a la entrada del dominio (constante en toda la superficie de entrada, la condición de velocidad impuesta en la carretera (constante en toda la superficie) coinciden con los parámetros de entrada configurados (22,22 m/s). Por otra parte, la

velocidad a la salida del dominio, como es de esperar es prácticamente igual a la velocidad a la entrada del dominio, siendo también su valor constante al encontrarse lo suficientemente alejada de la turbulencia generada por el monoplaza. De esta forma, se verifica que las condiciones de velocidad han sido correctamente aplicadas en el modelo.

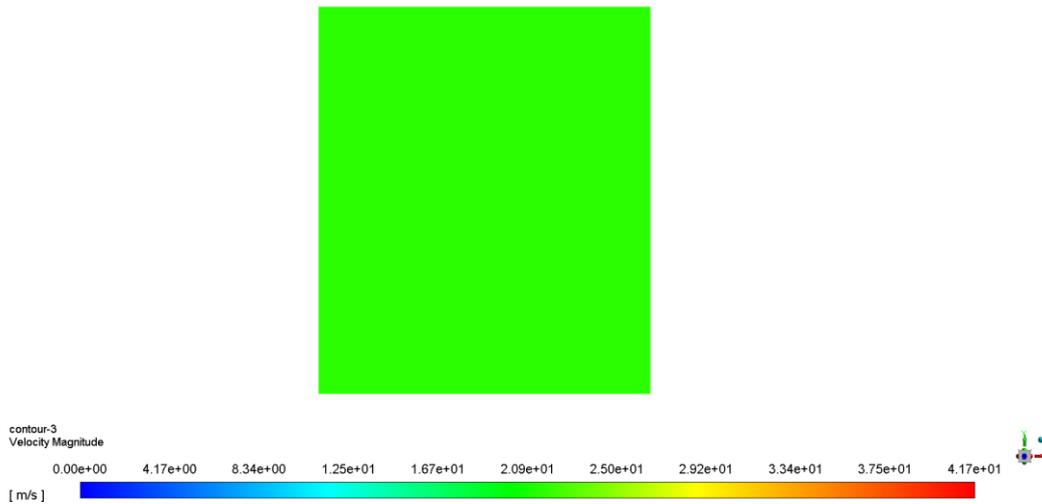


Figura 61. Velocidad de entrada en la simulación del IFS-04.

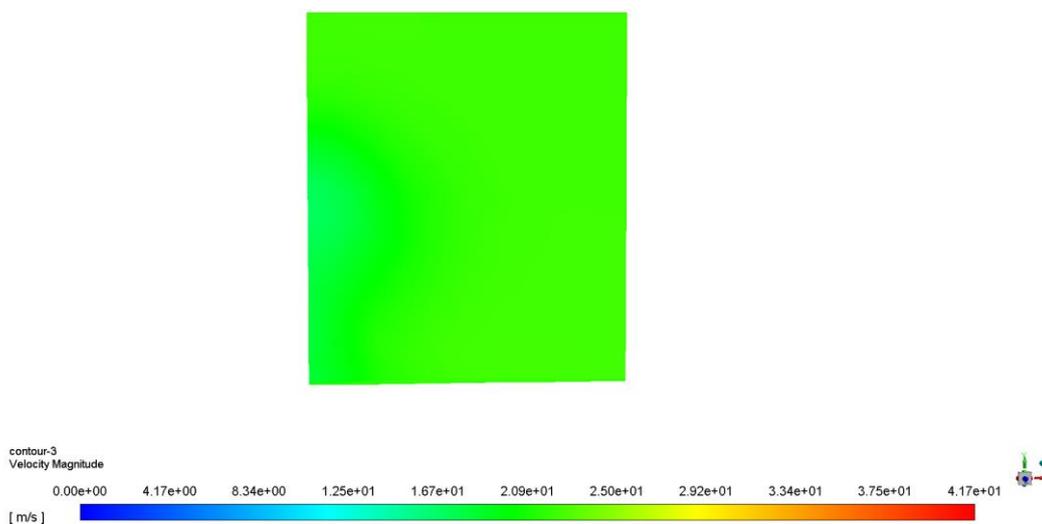


Figura 62. Velocidad a la salida en la simulación del IFS-04.

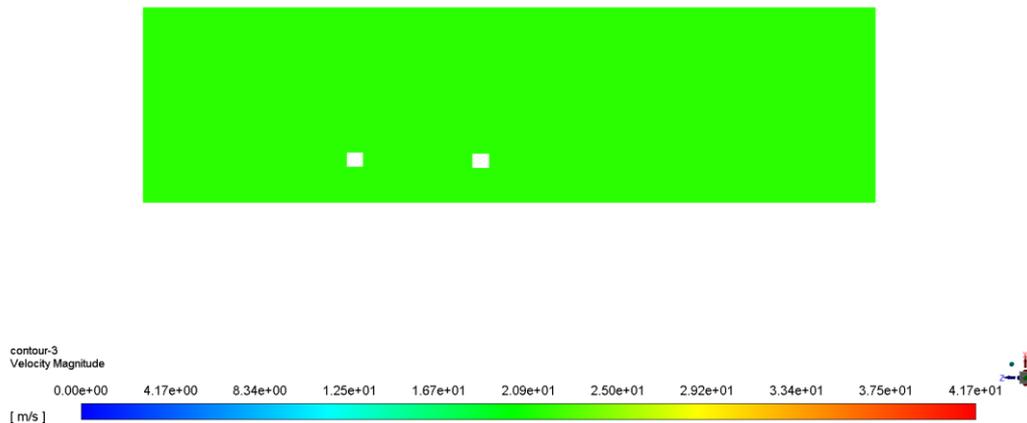


Figura 63. Velocidades en el plano de la carretera en la simulación del IFS-04.

En lo que a las velocidades respecta, como se puede observar en la Figura 68, Figura 69 y Figura 66 las velocidades obtenidas en el modelo son similares a las obtenidas con el IFS-03. Por una parte, se observan altas velocidades por la parte inferior del perfil del alerón delantero, que darán lugar a bajas presiones generando “downforce”. Además, en este caso, el modelo presenta una gran diferencia en lo que respecta a las velocidades en el morro del monoplaza. Como se puede observar, en este caso, aunque el morro frena el flujo al entrar en contacto con él, la región que se encuentra frenada por el morro es mucho menor en el caso del IFS-04 respecto al IFS-03. Esto tendrá un impacto positivo en la actuación aerodinámica del monoplaza, puesto que la fuerza de arrastre generada será menor. Sin embargo, el aumento de la altura del chasis y las diferencias en las dimensiones y altura del apoyacabeza en el IFS-04 respecto al IFS-03 hacen que la turbulencia tras el monoplaza sea ligeramente distinta. Esto provoca que en el primer elemento (elemento principal) del alerón trasero se desprenda la capa límite, lo cual producirá un incremento del “drag” y una reducción del “downforce” creado. Por otra parte, el incremento de la sección transversal del monoplaza al incrementar la altura y anchura del chasis y el aumento del tamaño del apoyacabeza también tendrán un impacto proporcional en el “drag” total del monoplaza.

A la vista de los resultados obtenidos, por lo tanto, se debería reducir la altura del chasis nuevamente para reducir la sección transversal del monoplaza y reducir la fuerza de arrastre sobre el coche. Por otra parte, a fin de evitar el desprendimiento de la capa límite en el alerón trasero, se debería modificar la forma de la región del monoplaza localizada tras el apoyacabeza a fin de modificar la turbulencia generada. Como se puede

observar en la Figura 66, una región importante de la zona de bajas velocidades generada tras la parte trasera del monoplaza se encuentra creada por la zona del monoplaza indicada. Además, esta parte del monoplaza hace que el flujo se dirija en sentido ascendente, pero la zona de bajas presiones creada tras el coche genera una fuerza descendente, que generará el vórtice causante de que se desprenda la capa límite en el elemento principal del alerón trasero. Por ello, en el IFS-04, a fin de mejorar la aerodinámica se debería modificar la forma posterior del coche y reducir la altura del alerón trasero para que se encuentre menos afectado por la turbulencia generada por el apoyacabeza.

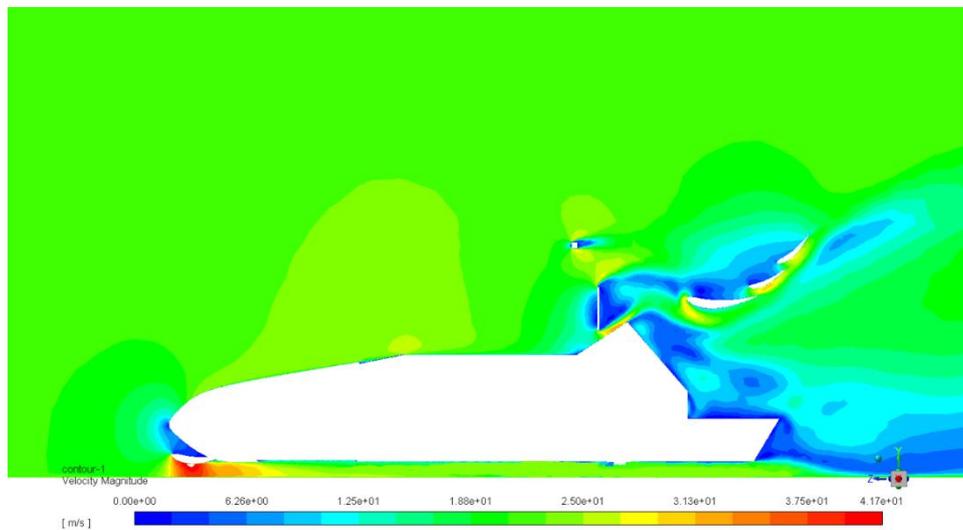


Figura 64. Velocidades en el plano de simetría.

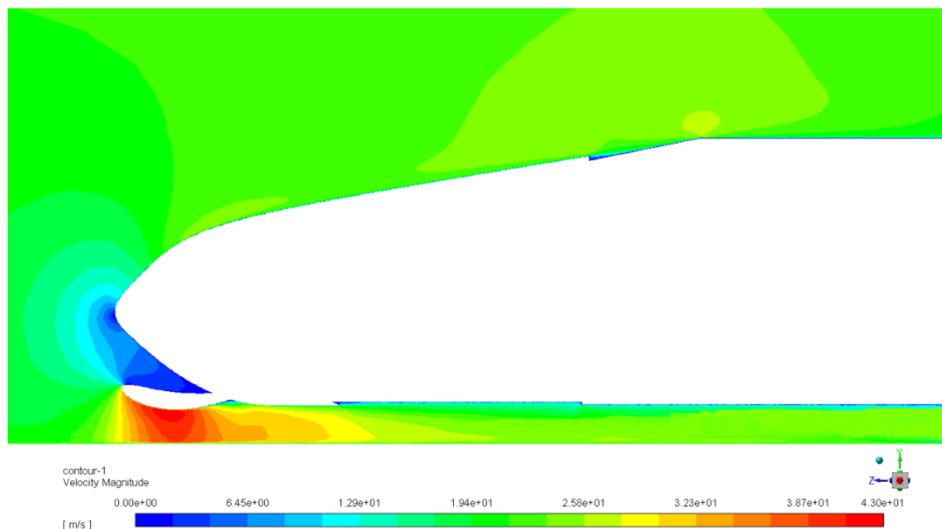


Figura 65. Detalles de las velocidades en el alerón delantero en el plano de simetría.

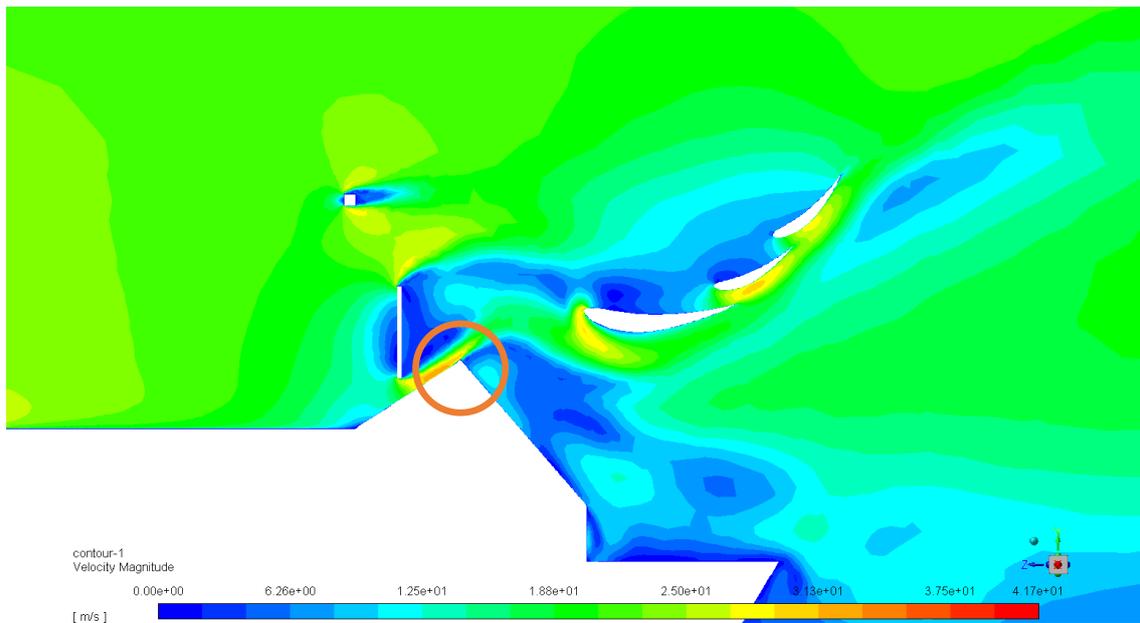


Figura 66. Detalles de las velocidades en el alerón trasero en el plano de simetría.

Al igual que en la simulación del IFS-03, en la Figura 67, además se muestra el detalle de las líneas de corriente del coche con las ruedas, para verificar que la condición de contorno de velocidad angular se ha introducido correctamente. Este giro angular produce también turbulencias que afectan al “downforce” y “drag” generados. Sin embargo, se ha verificado que dicha turbulencia prácticamente no llega al alerón trasero por lo que en este caso su impacto se encuentra en un segundo plano.

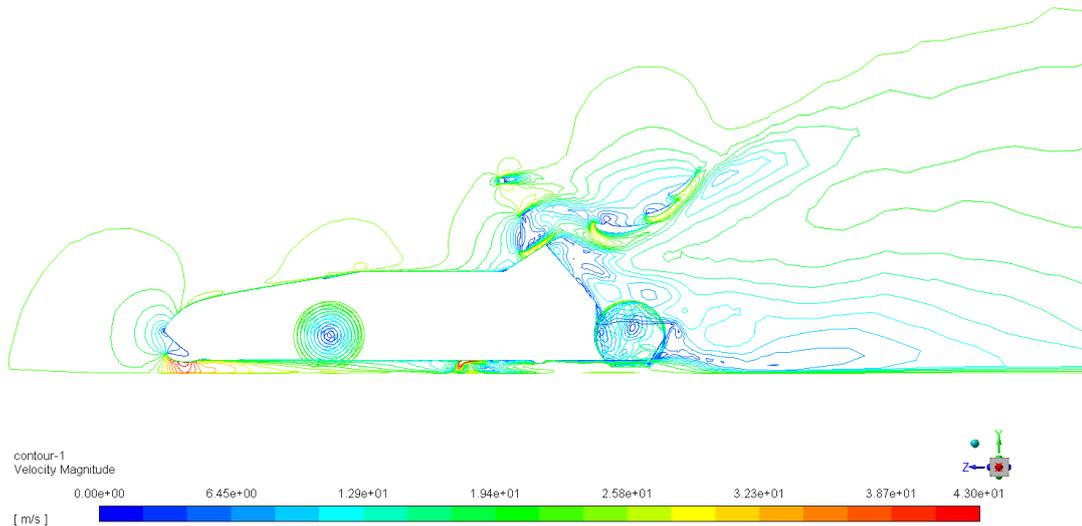


Figura 67. Líneas de corriente en la simulación del IFS-04.

4.2.2 Presiones

Siguiendo la metodología de los anteriores casos, se ha comenzado verificando que las condiciones de contorno de presión han sido aplicadas correctamente.

Debido a que se está forzando un flujo en la dirección negativa del eje Z, esto es, desde el portal de entrada del dominio al portal de salida, para que dicha condición se cumpla, las presiones obtenidas en el portal de entrada deben ser superiores a las impuestas en el portal de salida (condiciones ambientales). En la Figura 68, se observa el cumplimiento de la presión atmosférica impuesta a la salida del dominio y en la Figura 69 se observa que la presión a la entrada del dominio es ligeramente superior que a la salida (para mostrar este efecto se han representado los mismos límites de presiones en ambas leyendas).

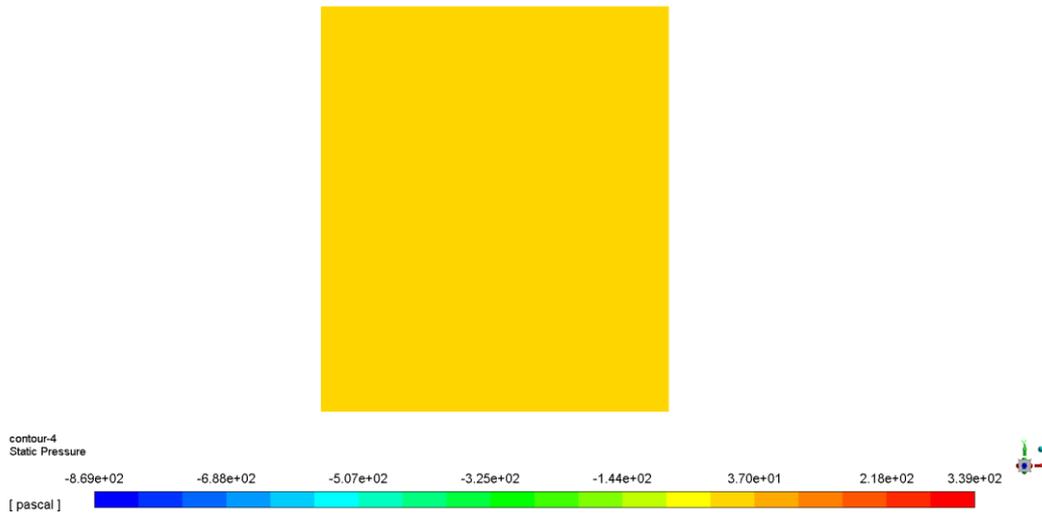


Figura 68. Presión a la entrada del dominio.

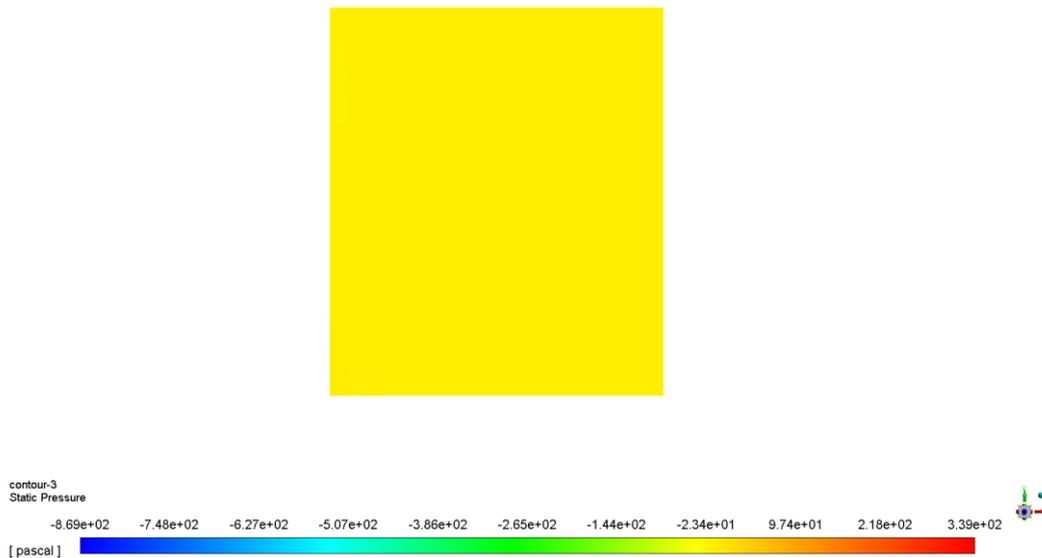


Figura 69. Presión a la salida del dominio.

En la Figura 70 y Figura 71 se observa cómo la región de altas presiones en la parte delantera del monoplaza es menor que en el IFS-03. Esto por lo tanto tendrá un impacto positivo en el valor del “drag” total del monoplaza. Por otra parte, en el inferior del monoplaza se observa la región de bajas presiones. Esta región es similar a la simulación del IFS-03 donde el fondo plano empleado fue el mismo.

Por otra parte, se observa como las presiones en la parte inferior de los perfiles del monoplaza son superior al del IFS-03 debido al vórtice creado y expuesto en la sección 4.2.1.

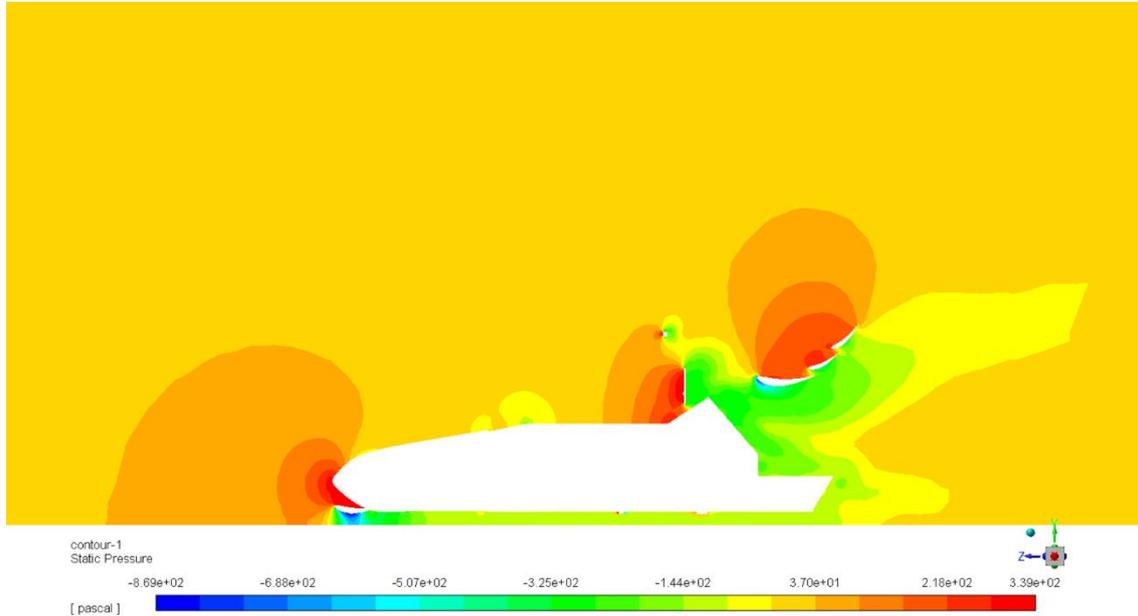


Figura 70. Presiones en el plano de simetría de la simulación del IFS-04.

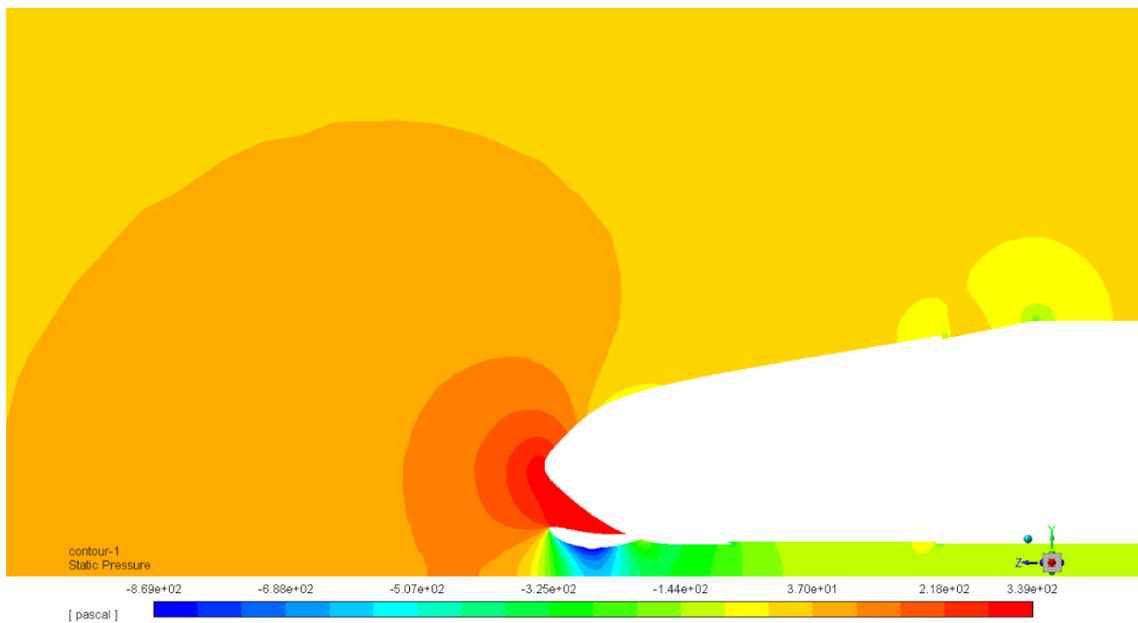


Figura 71. Detalle de las presiones de la simulación del IFS-04 en el alerón delantero.

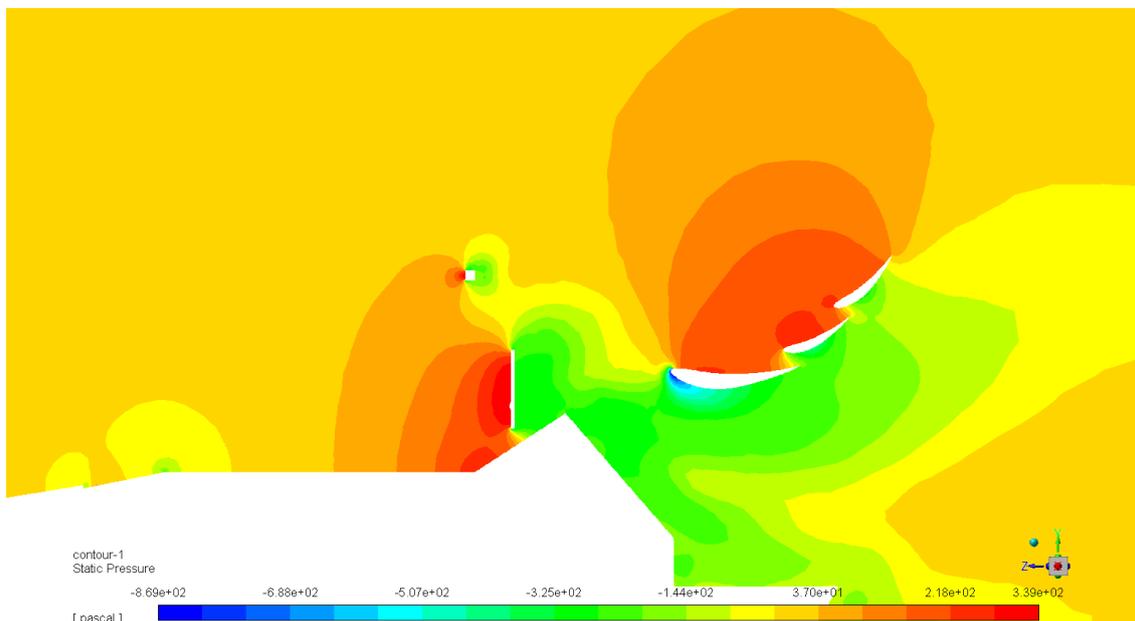


Figura 72. Presiones en la parte posterior del monoplaza.

4.2.3 Fuerzas aerodinámicas

Al igual que con el IFS-03, los elementos aerodinámicos han sido seleccionados conjuntamente en la misma “name selections” puesto que se desea evaluar el “drag” y “downforce” total a nivel de conjunto.

Tanto la fuerza de arrastre como el “downforce” se han definido en el sentido positivo de los ejes z e y respectivamente. Por ello, los valores obtenidos serán negativos (el flujo avanza en el sentido negativo del eje z).

El valor total del “drag” obtenido en el monoplaza es de aproximadamente 170 N para la simulación realizada (medio coche) por lo que será de 340 N para el monoplaza entero. Por otra parte, el “downforce” ha sido de aproximadamente 350N para medio monoplaza, por lo que para el monoplaza entero es de aproximadamente 700 N.

A la vista de los resultados obtenidos, a pesar de que el morro del monoplaza tiene una actuación superior a la del IFS-03, el valor de la fuerza de arrastre es aproximadamente igual a la obtenida en el IFS-03, pero el valor de “downforce” es superior. Por una parte, el “drag” se ha mantenido, puesto que, aunque la sección transversal del monoplaza es superior y hay desprendimiento en la capa límite en el elemento principal del alerón trasero, la mejora del morro permite compensar estos factores. Por otra parte, el “downforce” se ha visto incrementado (alrededor de un 22%), visiblemente por una mejora en el funcionamiento del fondo plano en la simulación. Esto puede deberse a dos factores: que se requiere una malla más fina para el fondo plano y la

diferencia de actuación del fondo plano es una cuestión puramente numérica, o debido a la mejora en el funcionamiento del difusor en el IFS-04, que favorece a la entrada de un mayor caudal a través del fondo plano y mejora el “downforce” generado. Por otra parte, la mejoría también se debe a la mejor actuación del alerón delantero con el nuevo morro.

5. Propuesta de mejoras para años futuros

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, en esta sección se propondrá las mejoras que se deben realizar en la aerodinámica del monoplaza. Se trata de mejoras para mejorar el comportamiento a nivel de conjunto, quedando la optimización de elementos particulares fuera del alcance del proyecto.

- Desplazamiento del alerón trasero: a fin de evitar la turbulencia procedente del apoyacabeza y del “cockpit”, se ha bajado la posición del alerón trasero y se ha desplazado hacia atrás. De esta forma, considerando los resultados de las simulaciones, el flujo llegará más ordenado a los perfiles del alerón.
- Incrementar el tamaño de los “endplates” traseros a fin de evitar que el flujo de altas presiones de la parte superior del alerón pase a la parte inferior, reduciendo el “downforce” generado.
- Reducir la altura y la anchura del morro. A pesar de que ha sido mejorada notablemente entre el IFS-03 y el IFS-04, se observa en las simulaciones una amplia región de altas presiones. A fin de reducir la altura del morro, se debe trabajar en una reducción de la altura del chasis del monoplaza.
- Reducir el número de elementos de los alerones a 2 elementos y hacer dichos elementos con un tamaño mayor. Actualmente, hay un total de 3 elementos. Sin embargo, se observa que el último elemento tiene un alto ángulo de ataque, haciendo que el “drag” generado sea elevado. Además, se observa que el “downforce” generado es más reducido que en los otros dos elementos.

Debido a que la anchura del morro se encuentra influenciada por las dimensiones finales que se requieran para la elaboración del chasis y que la reducción del número de elementos del alerón y modificación del tamaño de los “endplates” requiere de un nuevo diseño y optimización específico del alerón delantero no se evaluarán en el proyecto ya que se centra en la evaluación del monoplaza a nivel de conjunto. Sin embargo, sí se simulará y cuantificará el modelo con el nuevo posicionamiento del alerón trasero. A fin de continuar cumpliendo con la normativa, el alerón trasero se ha desplazado 70 mm en sentido descendente y 20 mm hacia atrás.

Debido a que únicamente varía el posicionamiento relativo entre elementos, el mallado empleado en la simulación es el mismo que con el IFS-04. Lo mismo ocurre con el procedimiento de resolución, en el que se comenzará resolviendo con el modelo de turbulencia a $k-\epsilon$ realizable y aproximaciones de primer orden para presión y se pasará a $k-\omega$ y aproximaciones cuadráticas cuando el modelo comience a converger.

A continuación, se muestran a malla empleada para la simulación del IFS-04 mejorado (mismas operaciones que para el modelo del IFS-04).

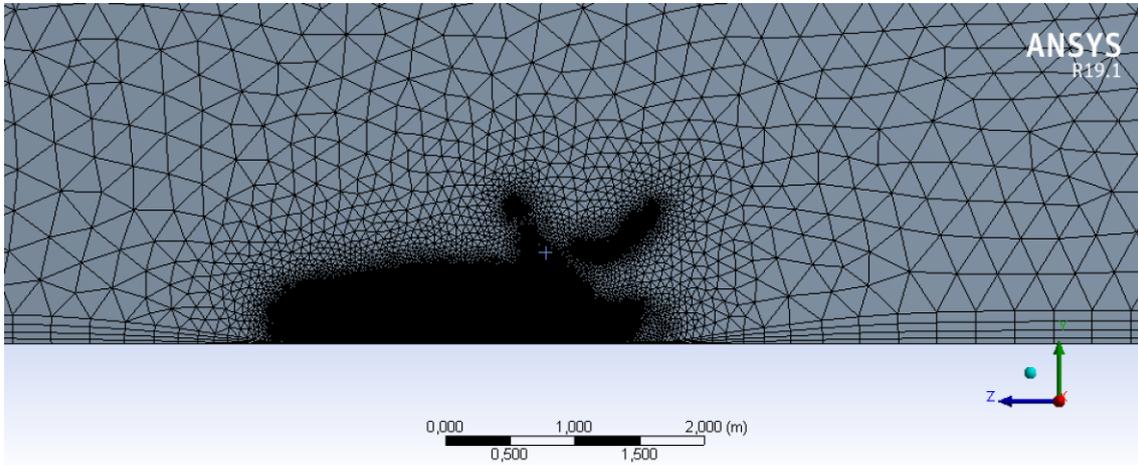


Figura 73. Mallado para el IFS-04 mejorado.

La configuración de las condiciones de contorno y procedimiento de resolución, estableciendo inicialmente métodos de resolución lineal y primer orden para facilitar la convergencia, y finalmente métodos de resolución cuadráticos y de segundo orden para obtener la solución definitiva han sido aplicados de la misma forma que con el IFS-04. La convergencia, también ha sido obtenida a partir de las 200 iteraciones.

A continuación, se muestran los nuevos resultados de velocidad y presión obtenidos con la modificación del posicionamiento del alerón trasero.

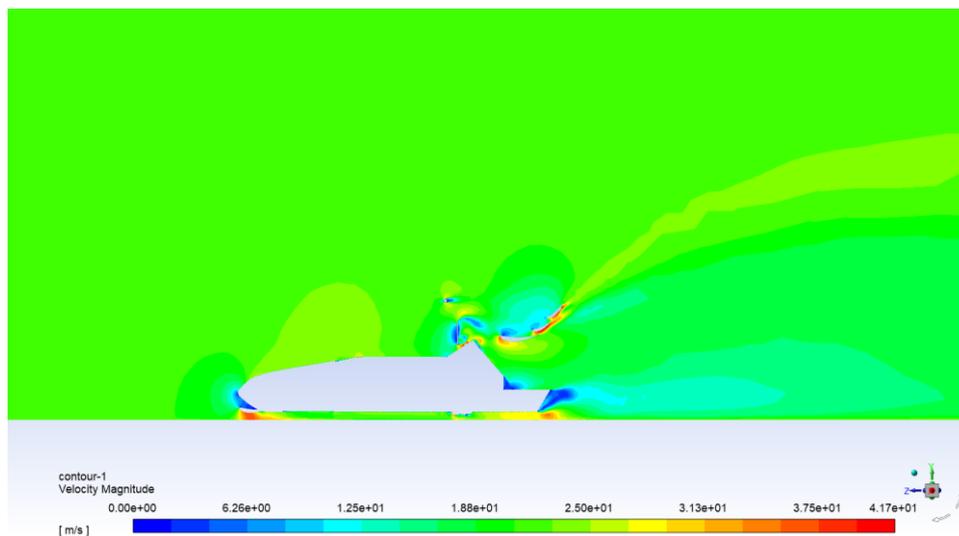


Figura 74. Velocidades del modelo mejorado del IFS-04.

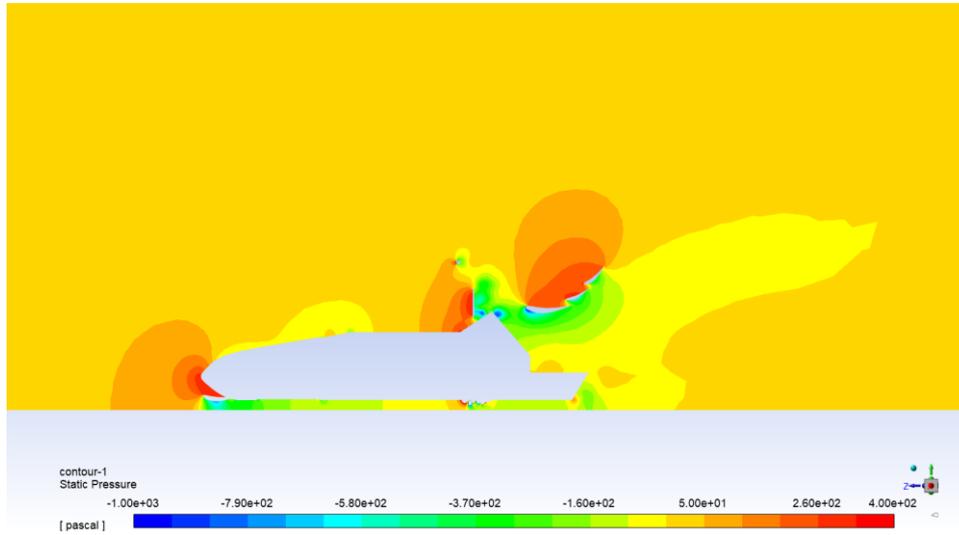


Figura 75. Presiones del modelo mejorado del IFS-04.

El nuevo posicionamiento, permite que el flujo que llega al alerón trasero siga mejor los perfiles del alerón. Esto se traduce en una reducción del “downforce”, que pasa a un valor de 375N para la simulación de medio coche (mejora superior al 7%) manteniéndose el “drag” en su valor anterior.

6. Conclusiones

Además de realizar una optimización de cada uno de los elementos aerodinámicos de un monoplaza, es necesario realizar un análisis del monoplaza en su conjunto, puesto que, especialmente en las partes traseras, como se ha observado en las simulaciones realizadas, el flujo llega con turbulencia y en unas condiciones no ideales. De esta forma, el análisis de los resultados de la simulación de medio monoplaza permite observar las causas y qué elementos se ven afectados negativamente por la interacción del flujo con el resto del monoplaza, pudiendo establecer medidas para mejorar esta situación.

En el caso del IFS-03, en la simulación se ha podido verificar la necesidad de modificar el morro del monoplaza y también se ha observado el bajo rendimiento del alerón trasero por cómo le llega la corriente de aire, especialmente del reposacabezas. Por otra parte, a través de las simulaciones del IFS-04 se ha cuantificado la mejoría a nivel de “downforce” del monoplaza, al igual que se ha observado que el “drag” se ha mantenido igual que en el IFS-03 a pesar del incremento del tamaño del chasis principalmente. Esto se debe a que se ha reducido la región de altas presiones creada por el morro, reduciéndose el “drag” creado por este. Respecto al posicionamiento del alerón trasero, se concluye, al igual que con el IFS-03, que la posición debe ser retrasada y reducida en altura para evitar el alto grado de turbulencia procedente del apoyacabeza.

La nueva simulación realizada con la modificación de la posición relativa del alerón trasera respecto al resto de elementos del monoplaza verifica la mejoría obtenida en el “drag” y en el “downforce”. Concretamente, se ha obtenido un incremento de aproximadamente un 7% respecto al “downforce” medido en el IFS-04, manteniéndose el “drag” aproximadamente igual al valor obtenido en el IFS-04. Se puede observar cómo estas mejoras responden al hecho de que la nueva región en la que se localiza el alerón trasero está menos afectada por la energía turbulenta del fluido, y las líneas de corriente llegan a los perfiles de forma más ordenada. La posición del alerón trasero debe ser nuevamente estudiada en caso de que se realicen modificaciones en el resto de los elementos del monoplaza, como puede ser la altura del chasis o el morro.

Por otra parte, se concluye que, aunque la mejoría en el morro entre el IFS-03 y IFS-04 es sustancial, la región de altas presiones en el morro del IFS-04 puede ser todavía mejorada reduciendo su anchura y altura. Sin embargo, para ello será necesario realizar modificaciones en las dimensiones del chasis. Además, se observa como el último elemento del alerón trasero no produce un significativo incremento del “downforce” generado, y su elevado ángulo de ataque provoca un alto nivel de “drag”. Por ello, se propone reducir de 3 a 2 elementos el alerón trasero. Finalmente, a fin de reducir la circulación de flujo hacia las zonas de baja presión de los perfiles del alerón trasero, se propone incrementar las dimensiones de los “endplates” para aislar la región de bajas presiones localizada por debajo de los perfiles, mejorándose así el rendimiento del alerón trasero.

7. Bibliografía

- [1] Joseph Katz. *Race Car Aerodynamics Designing for Speed Engineering and Performance (Chapter 1)*. 2003.
- [2] Fluent Theory Guide. 2019
- [3] Icai Speed Club | Página oficial
- [4] <https://www.sae.org/students>
- [5] «Velocity Boundary Layer - Thermal Boundary Layer,» Nuclear Power
- [6] A. Berrada, «Mass Conservation Equation,» Gravity Energy Storage, 2019
- [7] R. Gupta, Handbook of Fluids and, 1983.
- [8] F. Hoerner, Fluid-Dynamic Drag: Practical Information on Aerodynamic Drag and Hydronamic Resistance, 1965.
- [9] F. Pereira, «High downforce race car vertical dynamics: aerodynamic index,» International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 2017.
- [10] «Technical F1- Dictionary,» 2018. Available: <https://www.formula1-dictionary.net>.
- [11] «Autosport» 2020. Available: <https://www.autosport.com>.
- [12] «Salamtresntuu» 2021. Available: <https://salamtresntuu.blogspot.com>.
- [13] «Motor.es» 2015. Available: <https://www.motor.es>.
- [14] «ScuderiaFans» 2022. Available: <https://scuderiafans.com>.
- [15] «Givemesport» 2022. Available: <https://www.givemesport.com>.
- [16] «Motorsportweek» 2022. Available: <https://www.motorsportweek.com>.
- [17] N. Brier, «The Formula 1 Edition» 2019.

- [18] J. Anderson, *Computational Fluid Dynamics*, 2009.
- [19] *Apuntes de Simulación multifísica*. 2021.
- [20] I. Sadrehighi, «*Error & Uncertainty Quantification within CFD*» 2022.
- [21] Ansys Fluent | Fluid Simulation Software.
- [22] Alan E. Shapiro. *La “Filosofía experimental” de Newton*. Universidad de Minnesota. 2006.
- [23] McBeath, S. *Competition Car Aerodynamics*; Veloce Publishing Limited: Dorset, UK. 2015.
- [24] Petrone, G.; Hill, C.; Biancolini, M. *Track by track robust optimization of a F1 front wing using adjoint solutions and radial basis functions*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2014.
- [25] X. Castro, Z. Rana. *Aerodynamic and Structural Design of a 2022 Formula One Front Wing Assembly*. 2020.
- [26] Gorostidi, N.; Lecourt, D.; Castro, X.; Maigler, M. *Optimisation of Aerofoil Design*. Cranfield University. 2020.
- [27] Formula 1's Porpoising Problem - Racecar Engineering (racecar-engineering.com)
- [28] Lau, C.S.; Srigrarom, S. *Flow field around the front wing of Formula One racing car model: BAR Honda 003 and MP4-21 under ground effect*. 2010.
- [29] THE 17 GOALS | Sustainable Development (un.org)

Anexo I

Objetivos de Desarrollo Sostenible

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible fue adoptada por los miembros de las Naciones Unidas en el año 2015 [29]. Se compone de un total de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que son una serie de acciones que deben cumplir todos los países a nivel global y que están destinados a conseguir prosperidad para la gente del planeta. Reconocen acciones como el fin de la pobreza, reducción de las diferencias o desarrollo de los países menos avanzados. Además, también tratan los temas del cambio climático y cuidado de los océanos y bosques.

Estos objetivos son [29]:

1. Poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo.
2. Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria, mejorar la nutrición y lograr una agricultura sostenible.
3. Salud y bienestar.
4. Educación de calidad, equitativa e inclusiva.
5. Igualdad de género.
6. Agua limpia y saneamiento con una gestión sostenible.
7. Energía asequible y no contaminante para todos.
8. Trabajo decente y crecimiento económico.
9. Industria, innovación e infraestructura.
10. Reducción de las desigualdades en y entre los países.
11. Ciudades y comunidades sostenibles, inclusivas, seguras y resilientes.
12. Garantizar una producción y un consumo sostenible.
13. Acción por el clima, adoptando medidas para combatir el cambio climático y sus consecuencias.
14. Conservar y utilizar de forma sostenible los mares, océanos y recursos marinos.
15. Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de ecosistemas terrestres, luchando contra la desertización y degradación de tierras, además de frenar la pérdida de diversidad biológica.
16. Promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible, asegurando la justicia a todos los ciudadanos.
17. Alianzas para lograr los objetivos, fortaleciendo además los medios de ejecución.

En este Proyecto, los principales Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) tratados se presentan a continuación:

- **Objetivo 12: Producción y consumo responsables.** El monoplaza diseñado es eléctrico. Además, en este proyecto se pretende mejorar la aerodinámica del

coche, reduciendo su consumo y mejorando la eficiencia en lo que respecta al consumo. Esto se encuentra alineado con la meta referente a que de aquí a 2030, se debe lograr una gestión sostenible y eficiente de los recursos.

- **Objetivo 13. Acción por el clima.** Alineado con el anterior objetivo, el diseño de un coche de competición que sea eléctrico, y el hecho de reducir su consumo ligeramente mejorando su aerodinámica tendrá un efecto positivo de cara a las emisiones resultantes de la producción de electricidad. De esta forma, al conseguirse reducir las emisiones resultantes de la producción de la electricidad el impacto sobre el efecto invernadero será positivo.