



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE
FONDO PLANO Y DIFUSOR
PARA FORMULA STUDENT

Autor: Jordi Nadal Estivill

Directores: Pablo Ayala Santamaría,
Jesús Ramón Jiménez Octavio

Madrid
Julio de 2020

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
DISEÑO Y SIMULACIÓN DE FONDO PLANO Y
DIFUSOR PARA FORMULA STUDENT
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2019-2020 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.: Jordi Nadal Estivill

Fecha: 26 / 07 / 2020



Autorizada la entrega del proyecto
LOS DIRECTORES DEL PROYECTO

Fdo.:

Fecha: / /



JESÚS R. JIMÉNEZ CEBALLOS
25/07/2020



PABLO AYALA SANTAMARÍA
27/07/2020



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE
FONDO PLANO Y DIFUSOR
PARA FORMULA STUDENT

Autor: Jordi Nadal Estivill

Directores: Pablo Ayala Santamaría,
Jesús Ramón Jiménez Octavio

Madrid
Julio de 2020

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE FONDO PLANO Y DIFUSOR PARA FORMULA STUDENT

Autor: Nadal Estivill, Jordi

Directores: Jiménez Octavio, Jesús Ramón; Ayala Santamaría, Pablo

Entidad Colaboradora: ICAI –Universidad Pontificia Comillas

Resumen del proyecto

1. Introducción

Este trabajo de Fin de Grado consiste en diseñar y simular el fondo plano y el difusor para el coche de ICAI Formula Student. Para ello se modelan diversas geometrías y se simulan para encontrar la que sea óptima para el coche.

La Formula Student es una competición internacional donde muchas universidades compiten por ver quién ha diseñado el mejor coche. Este proyecto es parte de la propuesta que el ICAI Formula Student (IFS) llevará a esta competición en el año 2021.

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es buscar un diseño de fondo plano y difusor con un buen compromiso de prestaciones aerodinámicas y comportamiento junto a otros elementos del monoplace como son el alerón delantero, los pontones, la suspensión, el chasis o la refrigeración.

Los modelos de fondo plano y difusor en el IFS siempre se habían diseñado para buscar el mejor rendimiento de estos, y aunque esto es sin duda muy importante, en este proyecto se han optimizado los diseños para obtener un mejor rendimiento global, aunque para ello se tenga que sacrificar algo de rendimiento en el fondo plano y el difusor.

2. Estructura y metodología

Primero se comentan soluciones al problema que distintos equipos han implementado y se marcan ciertas consideraciones iniciales que el diseño del fondo plano y difusor deben seguir para todo el proyecto. También se informa de cómo funciona la mecánica de fluidos computacional y se dan unas reglas básicas que todas las simulaciones deben seguir.

Una vez expuestas estas bases se comienza con una simulación de la geometría en 2D. En esta simulación se parametriza la distancia del coche al suelo y el ángulo del difusor. Esto da una idea sobre lo que se debería esperar a la hora de simular en 3D. Esta simulación en 2D trata de optimizar el valor de carga aerodinámica modificando los valores de entrada de la distancia del coche al suelo y el ángulo del difusor. Se

resuelve con el optimizador de ANSYS y se describen todos los parámetros utilizados en la simulación.

La primera simulación en 3D consta de un diseño lo más sencillo posible que cumpla las consideraciones iniciales. En esta simulación se explica detalladamente todas las funciones empleadas en el software de ANSYS en su módulo de FLUENT. También se estudia cómo realizar un volumen de control correcto.

En el apartado de mallado se estudia en detalle diferentes parámetros de mallado y como estos pueden afectar a la simulación. En el apartado de condiciones de procesamiento se justifica por qué se ha utilizado el k-epsilon como modelo de turbulencia viscosa. También se describen todas las condiciones de contorno creadas así como los métodos y controles elegidos para llevar a cabo la simulación.

Se realiza un análisis de sensibilidad de mallado para estudiar cuál es el tamaño de malla óptimo que proporcione un buen compromiso entre precisión y coste computacional. También se realiza un análisis de sensibilidad de “time steps” para determinar cuál es el número perfecto de tiempo que se debe dejar la simulación transitoria para que se estabilicen los vórtices y con ellos las presiones, flujos y fuerzas, entre otros.

Después se cambia la geometría de simulación añadiendo al fondo plano y al difusor un carenado extendido que modela todo el chasis del coche.

Con esta nueva geometría se realizan distintas iteraciones en los carriles del fondo y en el ángulo del difusor. Se eligen unos diseños u otros según sus coeficientes de sustentación y resistencia al avance.

3. Resultados

En el apartado de análisis de sensibilidades de concluye que el tamaño de malla óptimo se encuentra entre 7 y 8 millones de elementos. Mientras que en el análisis de sensibilidad de “time steps” se llega a la conclusión de que el número óptimo de “time steps” es 100 de 0,01 segundos cada uno, simulándose por tanto un tiempo de 1 segundo.

En cuanto al resultado del análisis de las iteraciones de los carriles, estas se basan en la geometría sin carriles y después se ha ido iterando con profundidades de 15, 20 y 25 mm. Se obtienen los siguientes resultados:

Tipo de carriles	C_L	C_D
Sin carriles	0.096	0.397
15 mm	0.134	0.289
20 mm	0.104	0,381
25 mm	0.045	0.371

Tabla 1: Resultados de iteraciones de carriles en el fondo

En cuanto a las iteraciones en el ángulo del difusor se iteran ángulos de 18°, 20° y 22° y también se simula un caso de difusor convexo. Estas simulaciones se realizan con la mejor configuración de carriles, es decir, la de 15 mm de profundidad. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Difusor	C_L	C_D
Con ángulo de 18°	0.086	0.383
Con ángulo de 20°	0.134	0.289
Con ángulo de 22°	0.084	0.404
Convexo	0.305	0.356

Tabla 2: Resultados de iteraciones del ángulo del difusor

El mejor diseño ha resultado el de los carriles de 15 mm de profundidad combinado con el difusor convexo, obteniendo un C_L de 0.305 y un C_D de 0.356.

Todas estas iteraciones se discriminan considerando exclusivamente los coeficientes de sustentación y resistencia al avance.

Se comparan los campos de presiones de las simulaciones de 15 mm y de 25 mm y se explica porque esta última arroja unos peores resultados.

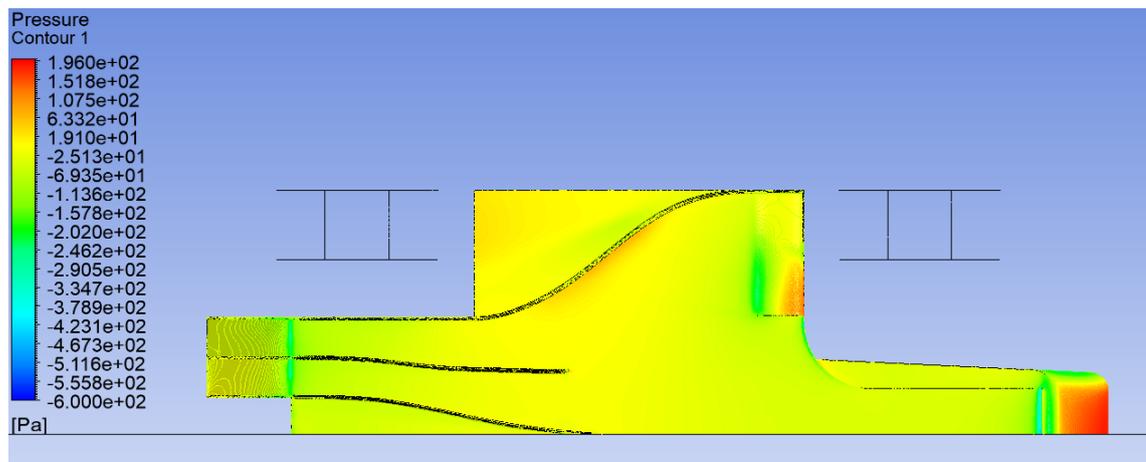


Figura 1: Campo de presiones en el fondo con carriles de 15 mm

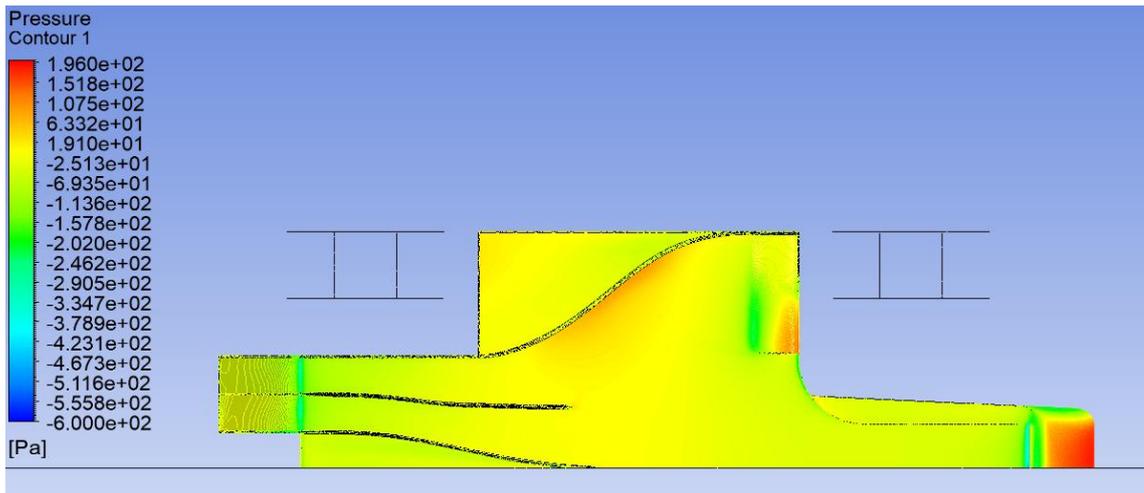


Figura 2: Campo de presiones en el fondo con carriles de 25mm

Donde más se aprecia la diferencia es en la zona de la pared del carril exterior. La presión en esta zona es considerablemente más alta en el diseño con carriles de 25 mm. Además, al ser más grandes los carriles de 25 mm aumenta la superficie donde el flujo choca y queda un poco estancado. A parte de la notable ganancia en resistencia al avance que supone esto, la carga aerodinámica también se ve afectada reduciéndose esta debido a que, al incrementarse la presión en una zona del fondo todavía lejana al difusor, se pierde parte de la depresión creada por el efecto suelo.

A continuación, se comparan las velocidades de salida del difusor del diseño de 22° y del diseño convexo. El campo de velocidades se muestra en un plano longitudinal que se corresponde a la sección del compartimento interior del difusor.

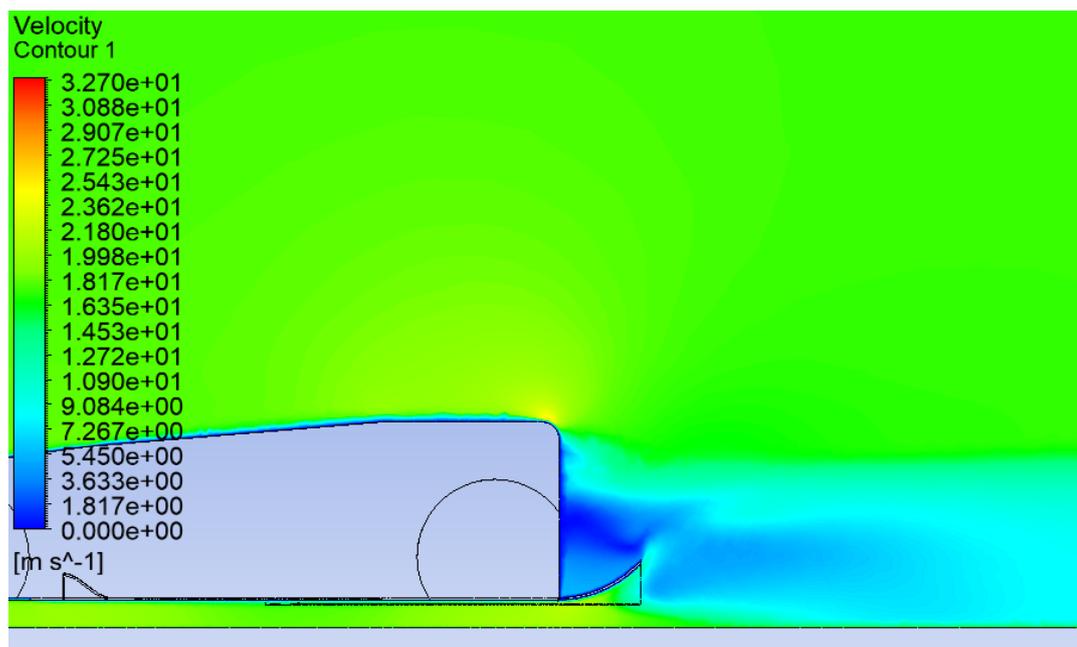


Figura 3: Campo de velocidades en el difusor convexo

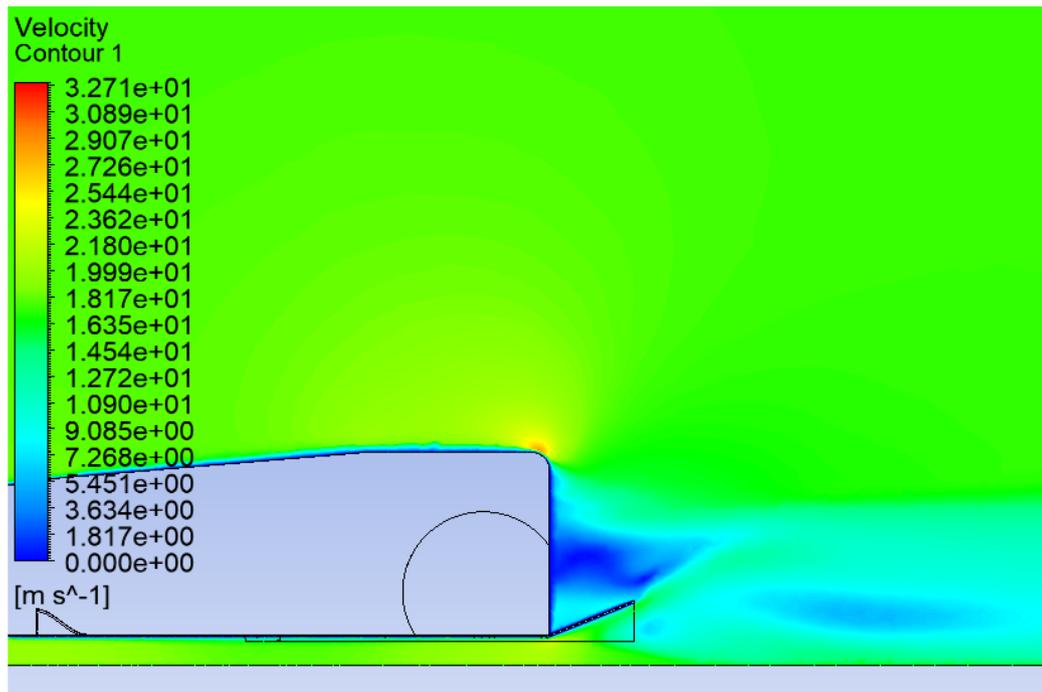


Figura 4: Campo de velocidades en el difusor de 22°

En las figuras anteriores se puede apreciar perfectamente que la iteración con difusor convexo logra disminuir la velocidad del fluido en la zona del difusor de forma más efectiva que la iteración con el difusor convexo. El motivo de que la capa límite no se ha desprendido en ninguna de las iteraciones, se justifica por la baja velocidad a la que circula el coche. Y por tanto, esto beneficia a iteraciones con el ángulo de salida más pronunciado, en este caso el difusor convexo.

4. Conclusiones

Se debe recordar que el proyecto desarrollado en este trabajo de fin de grado no es independiente, sino que se relaciona no solo con los demás elementos aerodinámicos sino con todo el monoplaza del IFS. Y es por esto por lo que el diseño final presentado aquí puede no ser definitivo.

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado era el de encontrar una geometría que tuviera unas buenas prestaciones aerodinámicas, pero que a la vez contara con un buen compromiso con los demás elementos aerodinámicos. Se considera que se ha cumplido con creces este objetivo, ya que como se ve en el apartado de resultados, los coeficientes de carga aerodinámica y de resistencia al avance son muy buenos. Y junto a las consideraciones iniciales que se marcaron para favorecer otros elementos del coche como son la suspensión o la refrigeración, hacen que este diseño tenga un buen compromiso entre rendimiento y apoyo al resto del monoplaza.

En la aerodinámica de un coche de competición, un pequeño cambio que parezca poco significativo en la pieza que se está simulando, puede que sea un gran cambio para otra pieza cuando estas se simulan juntas. Concretamente, el hecho de que no se

haya podido simular el fondo plano junto al alerón delantero, deja al proyecto con alguna duda sobre como hubieran afectado ciertos cambios en la geometría del fondo.

Dicho esto, todavía quedan por hacerse simulaciones con todo el paquete aerodinámico junto, y refinar este al máximo para conseguir los mejores resultados.

DESIGN AND SIMULATION OF UNDERTRAY AND DIFFUSER FOR FORMULA STUDENT

Author: Nadal Estivill, Jordi

Directors: Jiménez Octavio, Jesús Ramón; Ayala Santamaría, Pablo

Collaborating Entity: ICAI -Universidad Pontificia Comillas

Summary of the project

1. Introduction

This thesis consists in designing and simulating the undertray and the diffuser for the ICAI Formula Student car. To do this, several geometries are modelled and simulated to find the optimal one for the car.

The Formula Student is an international competition where many universities compete to see who has designed the best car. This project is part of the proposal that the ICAI Formula Student (IFS) will take to this competition in 2021.

The main objective of this thesis is to find an undertray and diffuser design with a good commitment to aerodynamic performance and behaviour together with other elements of the car such as the front wing, the pontoons, the suspension, the chassis and the cooling.

The undertray and diffuser models at the IFS had always been designed to seek the best performance from these, and although this is undoubtedly very important, in this project the designs have been optimised to obtain better overall performance, even if this means sacrificing some performance in the undertray and diffuser.

2. Structure and methodology

First, solutions to the problem that different teams have implemented will be discussed and certain initial considerations will be marked. These considerations must be followed by all undertray and diffuser designs for the whole project. It is also informed about how the computational fluid mechanics works and some basic rules that all the simulations must follow are given.

Once these basics have been explained, we will start with a simulation of the geometry in 2D. In this simulation the clearance and the angle of the diffuser will be parameterized. This will give an idea of what should be expected when simulating in 3D. This 2D simulation will try to optimize the lift value by modifying the input values of the clearance and the diffuser angle. It will be solved with the ANSYS optimizer and all parameters used in the simulation will be described.

The first 3D simulation will consist of a design that is as simple as possible and meets the initial considerations. In this simulation, all the functions used in the ANSYS

software in its FLUENT module will be explained in detail. You will see how to perform a correct control volume.

In the meshing section, different meshing parameters will be studied in detail and how they can affect the simulation. In the section on processing conditions it is justified why the k- ϵ has been used as a model of viscous turbulence. It also describes all the boundary conditions created and which methods and controls will be chosen to carry out the simulation.

A mesh sensitivity analysis will be performed to study which is the optimal mesh size that provides a good quality between precision and computational cost. A time step sensitivity analysis will also be carried out to determine what is the perfect time the transient simulation should be left to stabilize the vortices and with them the pressures, flows and forces, among others.

Then the simulation geometry will be changed by adding to the undertray and the diffuser an extended fairing that will model the whole chassis of the car.

With this new geometry different iterations will be made in the bottom rails and in the angle of the diffuser. The designs will be chosen according to their lift and drag coefficients.

3. Results

The sensitivity analysis section concludes that the optimal mesh size is between 7 and 8 million elements. While in the sensitivity analysis of time steps it is concluded that the optimal number of time steps are 100 of 0.01 seconds each, thus simulating a time of 1 second.

The iterations on the rails have been based on the geometry without rails and then iterated with depths of 15, 20 and 25 mm. The following results have been obtained:

Type of rails	C_L	C_D
Without carriles	0.096	0.397
15 mm	0.134	0.269
20 mm	0.104	0,381
25 mm	0.045	0.371

Table 3: Undertray rails iteration results

As for the iterations in the angle of the diffuser, angles of 18°, 20° and 22° have been iterated and a case of convex diffuser has also been simulated. These simulations have been carried out with the best rail configuration, i.e. 15 mm deep. The results obtained are as follows:

Diffuser	C_L	C_D
With 18° angle	0.086	0.383
With 20° angle	0.134	0.289
With 22° angle	0.084	0.404
Convex	0.305	0.356

Tabla 4: Diffuser angle iteration results

The best design has resulted from the 15 mm deep rails combined with the convex diffuser, obtaining a C_L of 0.305 and a C_D of 0.356.

All these iterations have been discriminated considering exclusively the lift and drag coefficients.

The pressure fields of the 15 mm and 25 mm simulations are compared and an attempt is made to explain why the latter gives worse results.

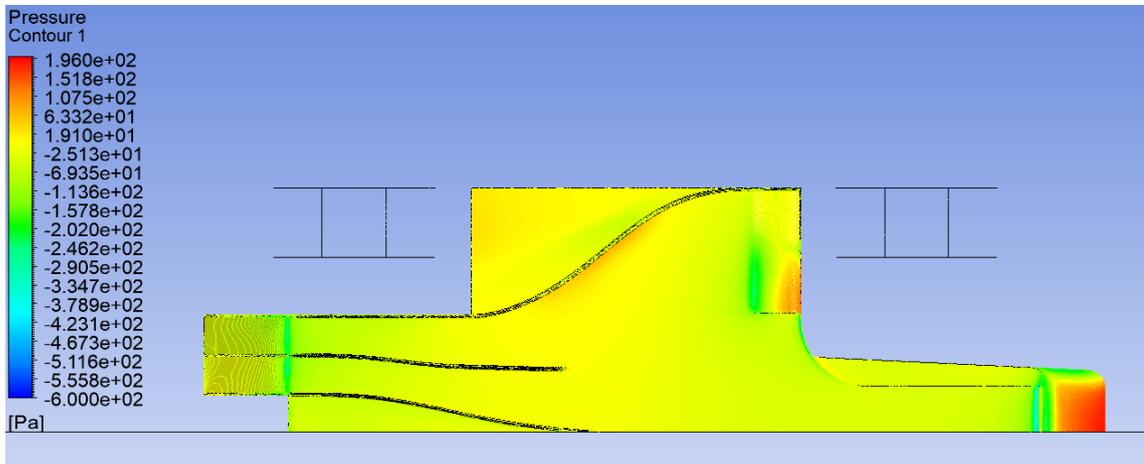


Figura 1: Pressure field on 15 mm rails

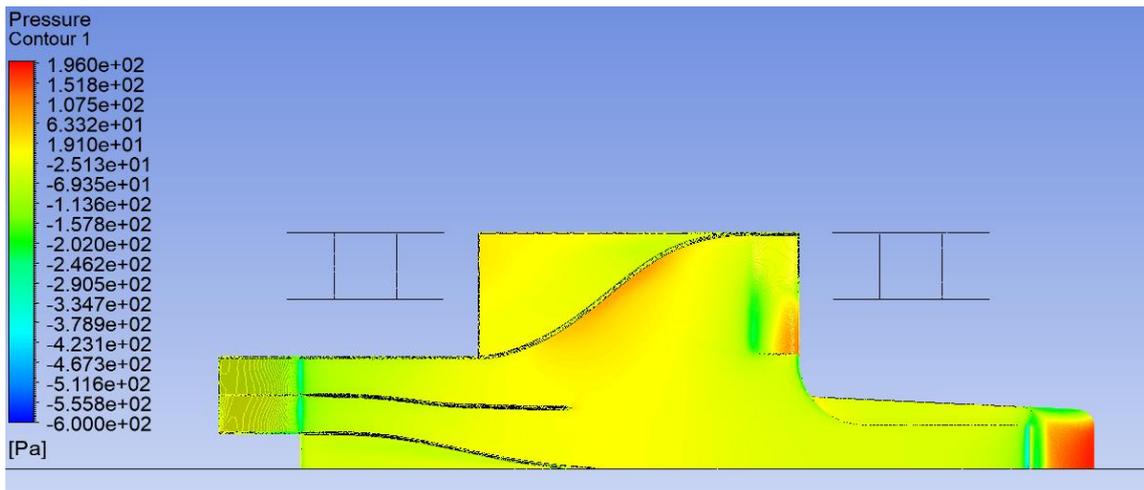


Figura 2: Pressure field on 25 mm rails

The difference is most noticeable in the wall area of the outer lane. The pressure in this area is considerably higher in the design with 25 mm rails. In addition, the larger

the 25 mm rails are, the larger the surface area where the flow collides and the fluid loses its speed. Apart from the significant gain in drag, the downforce is also affected and is reduced because, as the pressure increases in an area of the bottom still far from the diffuser, part of the depression created by the ground effect is lost.

The output speeds of the diffuser of the 22° design and the convex design are then compared. The velocity field is shown in a longitudinal plane corresponding to the section of the inner diffuser compartment.

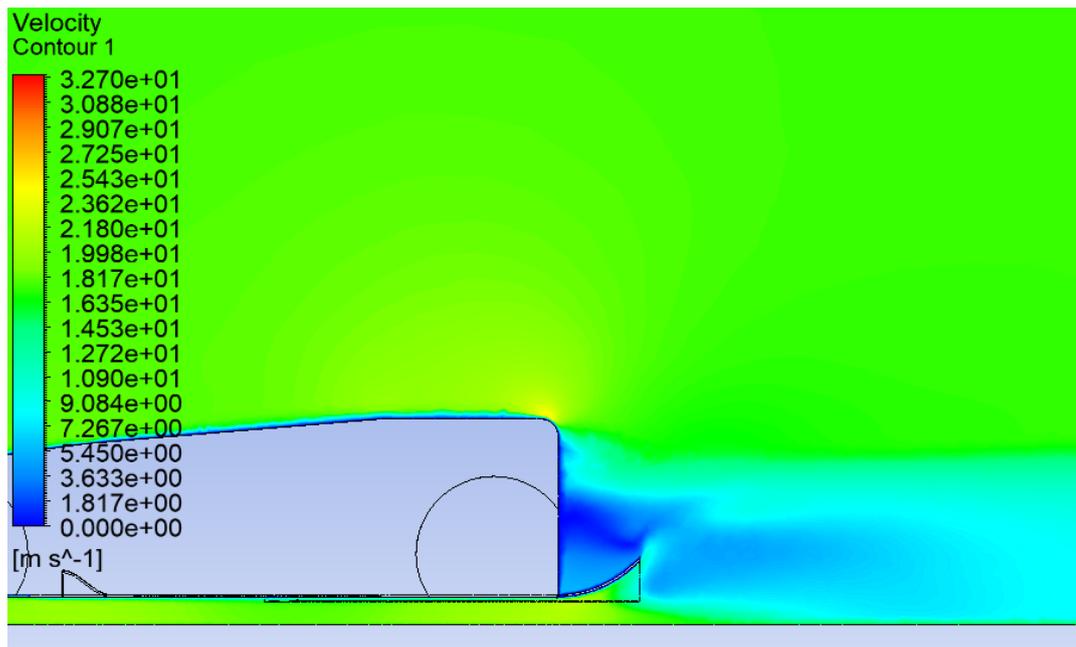


Figure 3: Velocity field in the convex diffuser

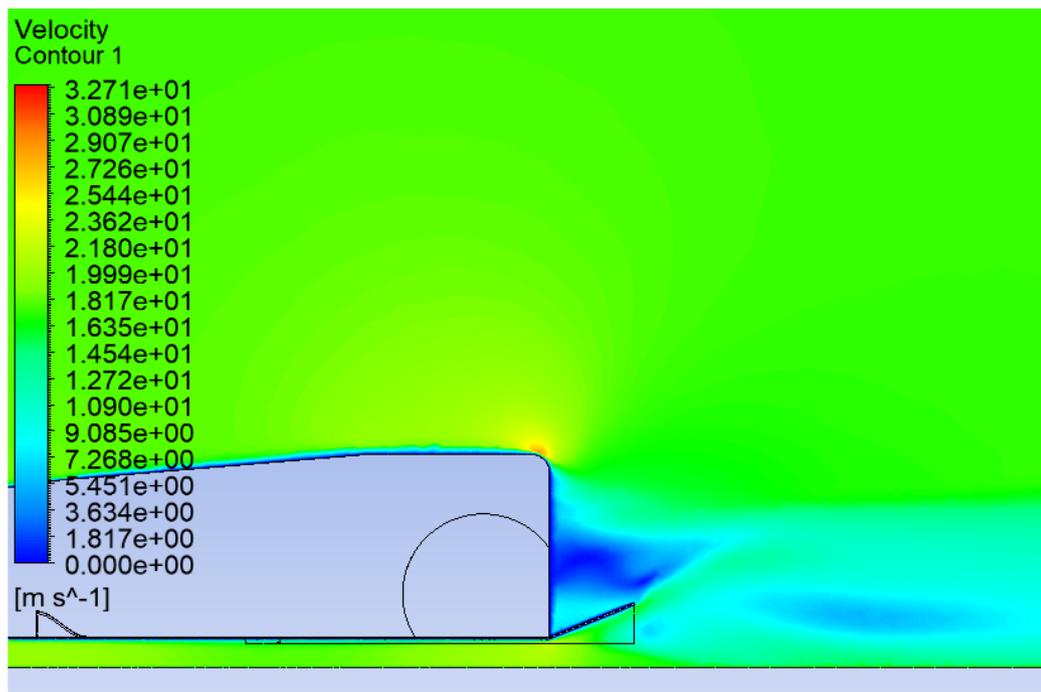


Figure 4: Velocity field in the diffuser of 22°

In the figures above it can be clearly seen that the iteration with convex diffuser manages to decrease the velocity of the fluid in the zone of the diffuser more effectively than the iteration with the convex diffuser. The reason that the boundary layer has not been detached in any of the iterations is justified by the low speed at which the car is driving. This therefore benefits iterations with the steepest exit angle, in this case the convex diffuser.

4. Conclusions

It should be remembered that the project developed in this thesis is not independent, but is related not only to the other aerodynamic elements but to the entire IFS single-seater. And therefore the final design presented here may not be definitive.

The main objective of this thesis project was to find a geometry that had good aerodynamic performance but also a good compromise with the other aerodynamic elements. It is considered that this objective has been more than fulfilled, since as can be seen in the results section, the aerodynamic load and drag coefficients are very good. And together with the initial considerations that were marked to favor other elements of the car such as suspension or cooling, make this design has a good compromise between performance and support to the rest of the car.

In the aerodynamics of a racing car, a small change that seems insignificant in the part being simulated, may be a big change for another part when these are simulated together. Specifically, the fact that it was not possible to simulate the flat bottom next to the front wing, leaves the project with some doubt about how certain changes in the geometry of the bottom would have affected it.

That said, simulations still need to be done with the whole aerodynamic package together and try to refine it as much as possible to achieve the best results.

Índice de la memoria

1. Introducción	18
2. Estado de la cuestión	20
2.1. Historia del fondo plano y el difusor en coches de competición	20
2.2. Aerodinámica en Formula Student	21
2.2.1. Soluciones al problema de distintos equipos	21
2.3. Principios básicos de mecánica de fluidos computacional (CFD).....	23
2.3.1. Etapas en una simulación CFD.....	23
2.3.2. Mallado.....	24
2.3.3. Modelos matemáticos de resolución de problemas viscosos	24
3. Diseño y simulación en 2D	26
4. Diseño y simulación en 3D	29
4.1. Consideraciones iniciales.....	29
4.1.1. Difusor partido.....	29
4.1.2. Entradas de aire laterales	29
4.1.3. Faldones laterales	29
4.1.4. Distancia al suelo.....	30
4.1.5. Carriles en el difusor y en el fondo plano.....	30
4.1.6. Ángulo del difusor.....	30
4.2. Diseño de la primera geometría	30
4.3. Simulación de la primera geometría	31
4.3.1. Geometría de simulación	31
4.3.2. Mallado.....	32
4.3.3. Condiciones de procesamiento	33
4.3.3.1. Modelo de turbulencia.....	33
4.3.3.2. Condiciones de contorno.....	34
4.3.3.3. Métodos y controles	35
4.3.4. Resultados de la simulación	36
4.4. Geometría completa.....	37
4.4.1. Cambios en el diseño.....	37
4.4.2. Cambios en la simulación.....	38
4.5. Análisis de sensibilidad	39
4.5.1. Análisis de sensibilidad de mallado	39
4.5.2. Análisis de sensibilidad de “time steps”.....	40

4.6.	Iteraciones de fondo plano y difusor.....	41
4.6.1.	Iteración de carriles en el fondo plano	42
4.6.1.1.	Geometría base sin carriles	42
4.6.1.2.	Iteraciones con carriles de 15, 20 y 25 mm.....	42
4.6.2.	Iteración del difusor con ángulos de 18°, 20° y 22°	43
5.	Análisis de resultados de las iteraciones	44
5.1.	Resultados de la iteración de los carriles	44
5.1.1.	Interpretación de los resultados de la iteración de los carriles	44
5.2.	Resultados de la iteración del ángulo del difusor	45
5.2.1.	Interpretación de los resultados de la iteración del ángulo del difusor	46
6.	Conclusiones y trabajo futuro	48
6.1.	Conclusiones	48
6.2.	Trabajo futuro	48
7.	Referencias	50
	ANEXO: Objetivo de desarrollo sostenible	51

Índice de figuras

Figura 1: Chaparral 2J	20
Figura 2: Lotus Type 78	21
Figura 3: Faldones laterales	22
Figura 4: Carriles en fondo plano	22
Figura 5: Difusor partido	22
Figura 6: Difusor convexo	23
Figura 7: Geometría en 2D	26
Figura 8: Campo de velocidades 2D	28
Figura 9: Campo de presiones 2D	28
Figura 10: Primera geometría	31
Figura 11: Primera geometría	31
Figura 12: Campo de velocidades en plano longitudinal	36
Figura 13: Campo de presiones sobre fondo plano	36
Figura 14: Líneas de corriente	37
Figura 15: Geometría completa	38
Figura 16: Cuerpo de influencia	38
Figura 17: Análisis de sensibilidad de malla	40
Figura 18: Análisis de sensibilidad de "time steps"	41
Figura 19: Fondo sin carriles	42
Figura 20: Fondo con carriles	43
Figura 21: Campo de presiones en el fondo con carriles de 15 mm	45
Figura 22: Campo de presiones en el fondo con carriles de 25mm	45
Figura 23: Campo de velocidades en el difusor convexo	46
Figura 24: Campo de velocidades en el difusor de 22°	47

1. Introducción

La aerodinámica es un aspecto esencial a la hora de diseñar un coche. Ya que dependen de ella factores clave que determinan el rendimiento de un coche como lo son: la velocidad máxima que puede alcanzar en recta, su velocidad de paso por curva o el consumo requerido. Y si se habla de coches de competición, la aerodinámica se convierte en imprescindible.

Hace 5 años, un grupo de alumnos de ICAI decidió emprender en este mundo de la automoción y formaron el ICAI Speed Club (ISC). Una asociación que ha ido evolucionando y dentro de la cual se encuentra el ICAI Formula Student (IFS). Cuyo objetivo es competir en la Formula Student, una competición de universidades internacional en la que todas ellas con su coche se enfrentan por ver quién destaca sobre el resto. Aquí se haya la motivación de este proyecto, que no es otra que continuar la evolución del diseño aerodinámico de años anteriores.

Este proyecto consiste en diseñar el fondo plano y el difusor para el coche de este año, el IFS-03. Para ello se modelan diversas geometrías y se simulan para encontrar la que sea óptima para el coche.

En años anteriores, los modelos de fondo plano y difusor en el IFS siempre se habían diseñado para buscar el mejor rendimiento de estos. Sin embargo, en este proyecto se han optimizado los diseños para obtener un mejor rendimiento global, aunque para ello se tenga que sacrificar algo de rendimiento en el fondo plano y el difusor.

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es, por tanto, buscar un diseño de fondo plano y difusor con un buen compromiso de prestaciones aerodinámicas y comportamiento junto a otros elementos del monoplace. Para lograr este objetivo, no solo se debe tener en cuenta la cantidad de carga aerodinámica o resistencia al avance producido por el conjunto de fondo plano y difusor, sino también como este paquete se implementa al resto de elementos del monoplace como son el alerón delantero, los pontones, la suspensión, el chasis o la refrigeración.

Otro objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es el de dejar un documento de buena calidad a los futuros compañeros que ingresen en el departamento de aerodinámica. Por ello se deja todo bien justificado y explicado para que tengan una base en la que apoyarse.

Se asumen ciertas hipótesis iniciales sobre el diseño y después se simulan los parámetros del ángulo del difusor y la profundidad de los carriles del fondo. Se analizan en profundidad todos los parámetros establecidos para realizar correctamente estas simulaciones. En estos parámetros se incluyen el tamaño de malla óptimo mediante un estudio de sensibilidad de mallado y la duración de la simulación para la que se realiza un análisis de “time steps”.

En cuanto a los recursos a emplear, para el modelado de la geometría se usará el CAD de DASSAULT SYSTÈMES SOLID WORKS en su versión de 2019. Mientras que para la parte de simulación numérica se usará el software de ANSYS en su versión 19.1 en su módulo de FLUENT. Debido a que las simulaciones de Ansys tendrán un costo computacional muy elevado, se hará uso del clúster de ICAI, un servidor con un gran número de núcleos de procesamiento ideal para este tipo de trabajos.

2. Estado de la cuestión

2.1. Historia del fondo plano y el difusor en coches de competición

Anteriormente, los diseñadores de coches no se centraban en la aerodinámica, de hecho, muy poco se sabía sobre esta. En los automóviles antiguos solo se tenía en cuenta el agarre mecánico, dejando a un lado los grandes beneficios que ofrecía el agarre aerodinámico, ideal para darle más estabilidad a los coches. En la actualidad, los coches fabricados son altamente aerodinámicos con el fin de mejorar el rendimiento de estos.

A finales de los años 70 se empezó a hablar del efecto suelo. Jim Hall, que fue conocido como el primer hombre en correr con alerones, mostró lo que podía hacerse con un automóvil que creaba bajas presiones en su parte inferior con su Chaparral 2. La intención era pegar al coche a la carretera, y Hall lo hizo utilizando unas grandes turbinas empujadas por motores auxiliares que succionaban el aire de la parte inferior del auto, mientras que unos “faldones” servían para sellar los laterales y permitir la creación de bajas presiones debajo del vehículo. Esta idea fue posteriormente utilizada en Formula 1 por el equipo Brabham BT46B y después prohibida por la normativa de la FIA.

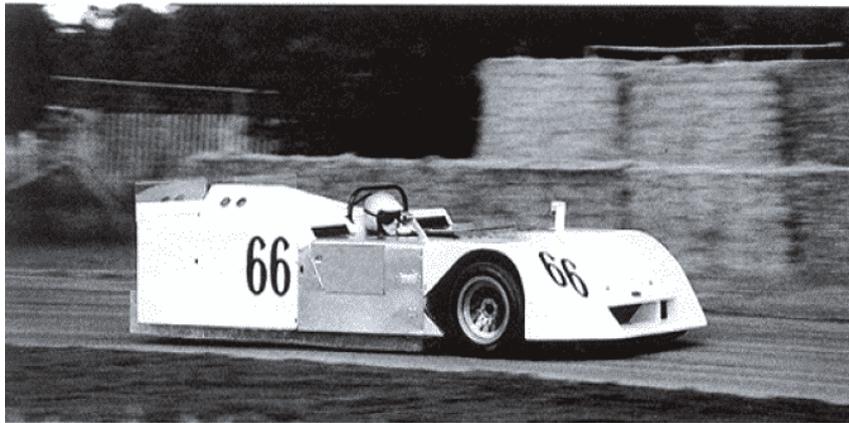


Figura 1: Chaparral 2J

Al ser el uso de turbinas para crear una zona de baja presión prohibido por la FIA, se comenzaron a usar perfiles alares invertidos como fue el caso del Lotus Type 78 de 1977. Los equipos introducían en el lateral del coche lo conocido como “sideskirts”, es decir, faldas que rozaban con el suelo para delimitar el flujo de aire exterior y el interior en el suelo del monoplaza. La FIA decidió prohibir este diseño también debido a que era muy peligroso a la hora de tomar baches, los cuales inestabilizaban demasiado el coche.



Figura 2: Lotus Type 78

A raíz de esto se impuso la condición de tener un fondo radicalmente plano en la mayor parte del suelo y los equipos se desarrollaron los difusores. En la actualidad, el trabajo sobre el fondo plano es inmenso debido a la gran cantidad de carga aerodinámica que es capaz de generar con muy poca cantidad de resistencia al avance.

En estos últimos años la aerodinámica ha ido evolucionando, llegando a los complejíssimos diseños como los que se puede observar en los monoplazas de Formula 1 actuales. Estas nuevas tecnologías se apoyan en pruebas en túneles de viento y en mecánica de fluidos computacional, siendo este último campo el centro del desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado.

2.2. Aerodinámica en Formula Student

Los coches de esta competición son tipo fórmula, es decir, son monoplazas con ruedas abiertas. Se han de diseñar teniendo en cuenta la normativa de la competición y su único objetivo es el de tener un alto rendimiento. Aunque luego entren en juego otros factores como el coste económico. La aerodinámica en estos monoplazas es una parte muy importante, y tiene que coordinarse con otros aspectos del coche como el chasis o las suspensiones.

Los elementos aerodinámicos más importantes son el alerón delantero, el alerón trasero, el carenado, el fondo plano y el difusor. Se puede estudiar cada elemento por separado con el objetivo de comparar distintas geometrías, pero el rendimiento siempre será local. Para obtener una eficacia mayor y poder discutir con más argumentos si un diseño es válido o no, este se debe simular junto al resto de elementos aerodinámicos y demás partes del coche.

2.2.1. Soluciones al problema de distintos equipos

La parte aerodinámica es en la que más difieren los monoplazas de los equipos ya que hay muchas soluciones para el mismo problema y estas pueden no parecerse la una a la otra. En este apartado se realiza una selección de los parámetros más importantes a la hora de diseñar un buen fondo plano y difusor.

- Entradas laterales: Detrás de las ruedas delanteras se suele incluir una toma de aire para desplazar más caudal a la zona baja del coche y conseguir acelerar este flujo aumentando así la carga aerodinámica.
- Faldones laterales: Se pueden considerar “bargeboards” y su misión es dividir el flujo aire hacia arriba y hacia abajo para que no choque directamente con la rueda trasera lo cual generaría mucha resistencia al avance.



Figura 3: Faldones laterales

- Carriles: El uso de carriles en el difusor para guiar el flujo y aumentar su eficacia es muy común. Además, también es posible alargar estos carriles para que empiecen al principio del fondo plano.

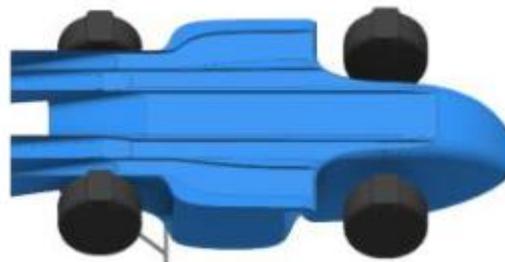


Figura 4: Carriles en fondo plano

- Difusor partido: Se trata de segmentar el difusor formando compartimentos. Esto se realiza para que el flujo salga con menor turbulencia consiguiendo así una mayor eficacia en el difusor.

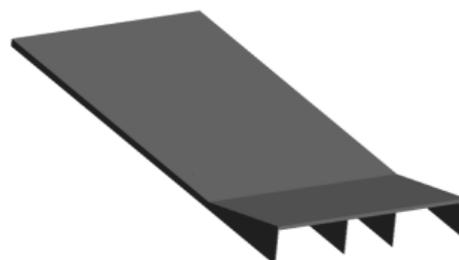


Figura 5: Difusor partido

- **Difusor convexo:** Se diseña un difusor con un ángulo de salida variable en toda su longitud. Esto puede ayudar a la capa límite, y es una forma de agrandar el área para lograr un mayor efecto difusor sin alargar longitudinalmente el mismo.



Figura 6: Difusor convexo

- **Difusor ensanchado:** Esta es otra forma de incrementar el área del difusor. Consiste en ensanchar el área de salida según se avanza en la longitud del difusor.

2.3. Principios básicos de mecánica de fluidos computacional (CFD)

Se define Mecánica de Fluidos Computacional como el uso de sistemas informáticos y de métodos numéricos para solucionar problemas que tratan el flujo de un fluido determinado. La mecánica de fluidos computacional ha sido aplicada en muchos campos de la mecánica de fluidos como puede ser la aerodinámica de vehículos o aviones, la hidrodinámica de barcos y submarinos, flujo a través de instalaciones de bombeo, turbinas, intercambio de calor, etc.

Para la simulación del comportamiento de un fluido se utiliza la técnica conocida como discretización, que consiste en la aproximación de un sistema continuo mediante la representación en términos de un conjunto con un número finito de elementos. Por lo tanto, las ecuaciones de movimiento también son discretizadas, convirtiendo así las ecuaciones con derivadas continuas en expresiones algebraicas discretas.

2.3.1. Etapas en una simulación CFD

1. **Preprocesamiento:** En esta primera etapa, se diseña la geometría del modelo a estudiar. A continuación, se genera la malla del modelo por medio de la elección del tipo de elemento y se analiza su calidad.
2. **Solución:** Se definen las condiciones de contorno y se eligen los modelos matemáticos a utilizar. Posteriormente se ejecuta la simulación.

3. Postprocesamiento: Se analizan los resultados obtenidos y se obtienen valores de presiones, caudales, fuerzas, coeficientes, etc. Se visualizan las líneas de fluido y demás gráficas de interés.

2.3.2. Mallado

Se denomina mallado a la discretización de la geometría del problema. La discretización de una geometría en elementos 2D son triángulos o mientras que los de 3D son (tetraedros, hexaedros o el prisma más adecuado a la geometría que formen parte de un volumen).

Existen dos tipos de mallas, las estructuradas y las no estructuradas:

- Las mallas estructuradas tienen una geometría simple y es la que mejores resultados consigue ya que todos sus elementos se colocan formando un patrón; se realizan de forma manual, siendo imposible usarlas para objetos complejos.
- Las mallas no estructuradas tienen geometrías más complejas y no dan resultados tan exactos, pero son perfectas para diseños complejos, ya que se pueden generar automáticamente empleando poco tiempo.

Cada elemento que forma parte de la malla realizada está caracterizado por sus nodos, caras, aristas y centro, donde se estudian las propiedades físicas deseadas del fluido a considerar (velocidad, presión...). Una vez está realizado ese cálculo, se integra entre todos los nodos que forman parte de la malla para obtener un resultado global.

Cuanto más grandes sean los elementos de la malla, más impreciso será el cálculo en caso de tener geometrías complejas, puesto que estos elementos no son capaces de adaptarse a las formas reales del objeto. Un menor tamaño de los elementos y por tanto una mayor cantidad de estos arroja un resultado más fiable. No obstante, hay que tener en cuenta que existe un compromiso entre número de elementos y los recursos informáticos disponibles para realizar la simulación ya que si el número de elementos es muy elevado puede que no sea posible ejecutar la simulación.

2.3.3. Modelos matemáticos de resolución de problemas viscosos

Estos modelos son los llamados de turbulencia en los cuales se obtiene un promedio de las tensiones de Reynolds para solucionar el comportamiento del fluido a través del uso de las ecuaciones de Navier-Stokes. Dentro de los modelos de viscosidad, se pueden encontrar distintos modelos lineales en función del número de ecuaciones o leyes utilizadas a la hora de resolver el problema. Los más populares son:

- K-épsilon: Resuelve con dos variables. La variable k, que representa la energía cinética turbulenta, y épsilon, que representa el ratio de disipación de la energía cinética. Es el más utilizado en aerodinámica, ya que

proporciona resultados muy buenos en flujos externos con geometrías complejas utilizando un requerimiento de memoria relativamente bajo.

- K-omega: El modelo de k-omega es similar al k-epsilon, aunque este resuelve para omega (Ratio específico de disipación de energía cinética). Es más difícil de converger que el k-epsilon y arroja buenos resultados en flujo interno.
- Spallart-Allmaras: Este modelo añade una variable adicional para la viscosidad “Spalart-Allmaras”. Requiere poca memoria, pero no es muy preciso en problemas de desprendimiento de capa límite.

3. Diseño y simulación en 2D

Antes de realizar el diseño en 3D se diseña y simula una geometría en 2D. Esta consiste en una sección longitudinal del diseño en 3D. Por tanto, incluye el carenado y una aproximación de lo que es el resto del coche. El difusor se modela como una lámina de 5mm de espesor situada al final del fondo plano. Se ha optado por usar este tipo de geometría en lugar de una simple lámina ya que representa de forma más fiel una sección del modelo final; y para obtener resultados más realistas en cuanto a resistencia al avance, pero sobre todo carga aerodinámica que tiene una gran dependencia de la geometría que se sitúa encima del fondo.

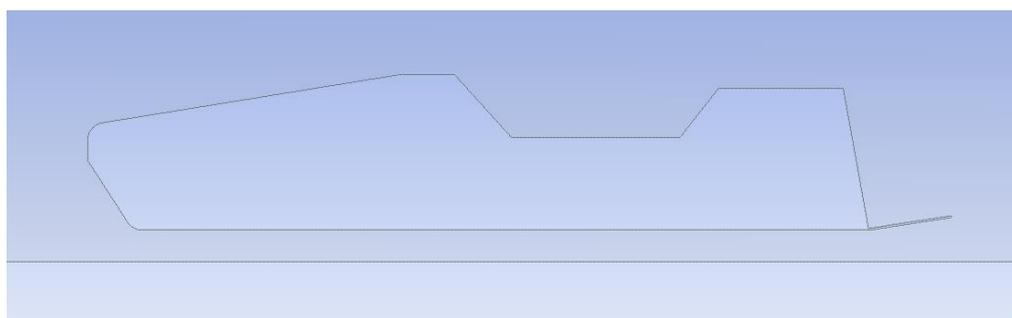


Figura 7: Geometría en 2D

Una vez realizada la geometría se procede a simularla. Esta simulación es distinta a las que se realizan en 3D ya que se simula parametrizando ciertas variables y se obtienen los resultados optimizando directamente, en lugar de ir realizando iteraciones. Para ello se utiliza el optimizador de ANSYS y a continuación se indica cómo se ha realizado.

La geometría se ha diseñado en la aplicación DESIGN MODELER de ANSYS, ya que para que sea posible parametrizar partes de la geometría esta tiene que estar creada en ANSYS, no pudiendo exportarla desde otros softwares de diseño. Los parámetros a optimizar son el “clearance”, es decir la distancia del fondo plano al suelo y el ángulo del difusor. Para parametrizar la primera se parametriza la coordenada -Y del “enclosure” lo que es equivalente a la distancia entre el coche y la carretera.

En cuanto al mallado, este es muy sencillo, se trata de una malla de 30.000 elementos donde se han utilizado las opciones de “capture proximity” y “capture curvature” al igual que la herramienta de “inflation”. Estas opciones de mallado se ven más en profundidad en el capítulo de mallado en 3D.

En el apartado de condiciones de procesamiento, se elige el modelo de turbulencia con el cual se va a realizar la simulación, en todo el proyecto se usa el k-épsilon y más adelante se ve en detalle y se justifica su uso. También se seleccionan las condiciones de contorno: se tiene una entrada de velocidad delante del coche y una presión a la salida, la parte inferior del volumen de control es una pared que se mueve

con el fluido y que simula la carretera. Mientras que la superior tiene condición de simetría.

Por último, una vez se tiene el caso listo para simular, se debe iniciar el optimizador de ANSYS. El parámetro a optimizar es la carga aerodinámica (sustentación negativa) generado por el conjunto fondo plano más difusor sobre todo el coche. Y para lograrlo, el optimizador varía las variables de distancia al suelo y ángulo del difusor indicadas anteriormente. El algoritmo utilizado para optimizar esta simulación ha sido el “adaptive single-objective” cuyo uso se recomienda para optimizaciones donde solo existe una variable a optimizar. Este método iterativo escoge ciertos valores de los parámetros de entrada y los combina guardando el resultado de los que mejor resultado se ha obtenido.

Después se realizó una segunda simulación con otro algoritmo más preciso y potente llamado MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm). El cual tuvo un tiempo de simulación más de 5 veces mayor y arrojó los mismos resultados, dando validez por tanto al primer algoritmo.

Los resultados de esta simulación han sido una distancia al suelo de 89 mm y un ángulo de 8.6° los cuales proporcionan una carga aerodinámica de 250.1 N. Teniendo en cuenta la velocidad del fluido (17 m/s) y la longitud proyectada del coche en esta simulación (unos 400 mm) se obtiene un coeficiente de sustentación de 3.53. Este coeficiente es muy alto y no se ajusta al obtenido en los modelos 3D. Esto se debe principalmente a que un modelo en 3D tiene muchas pérdidas en la dirección transversal. También afecta el hecho de que la simulación este en régimen estacionario y no transitorio, ya que los vórtices que se generan afectan negativamente a este. El tema de los vórtices y el régimen transitorio se trata más en profundidad en las simulaciones en 3D.

Como se puede ver en la siguiente figura, el ángulo del difusor es el óptimo para el cual no se desprende la capa límite hasta el último tramo de este, lo cual provoca la máxima desaceleración del fluido que viene con alta velocidad por debajo del coche. Siendo este el mejor escenario posible para obtener una carga aerodinámica elevada.

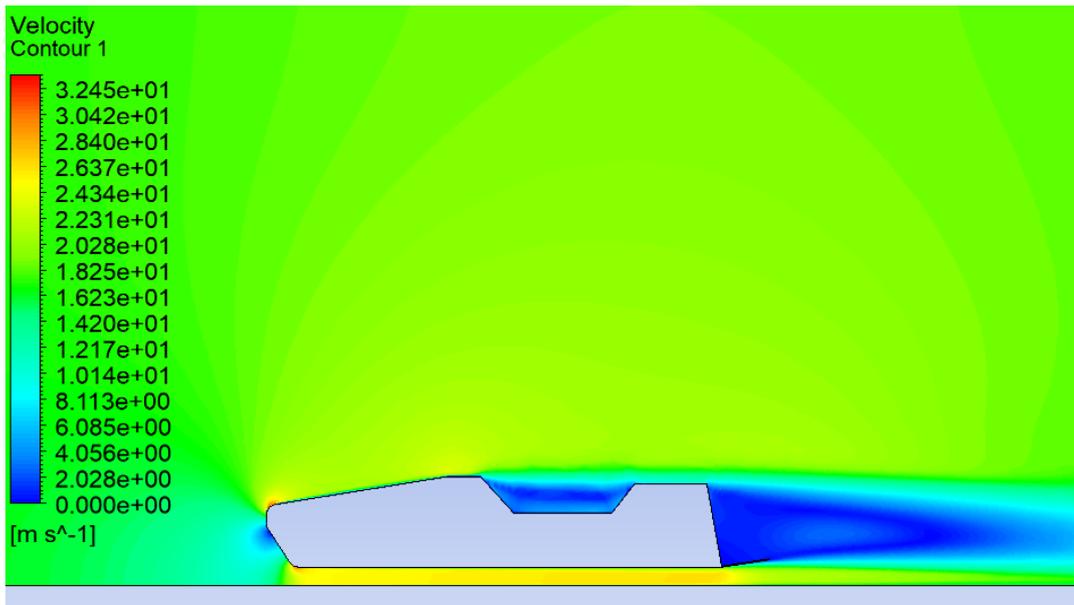


Figura 8: Campo de velocidades 2D

También resulta interesante observar el campo de presión generado para comprender bien cómo se comporta el flujo de aire en simulaciones aerodinámicas. El aire que choca directamente con el carenado genera una alta presión al estancarse en esa zona el flujo. Debajo del monoplaza hay una zona de baja presión que se encarga de adherir este al suelo. Y a medida que va avanzando en el fondo el aire cada vez circula a más velocidad hasta llegar al difusor, cuya función es desacelerar el fluido para aumentar su presión ya que una presión baja en la parte trasera provocaría una resistencia al avance excesiva.

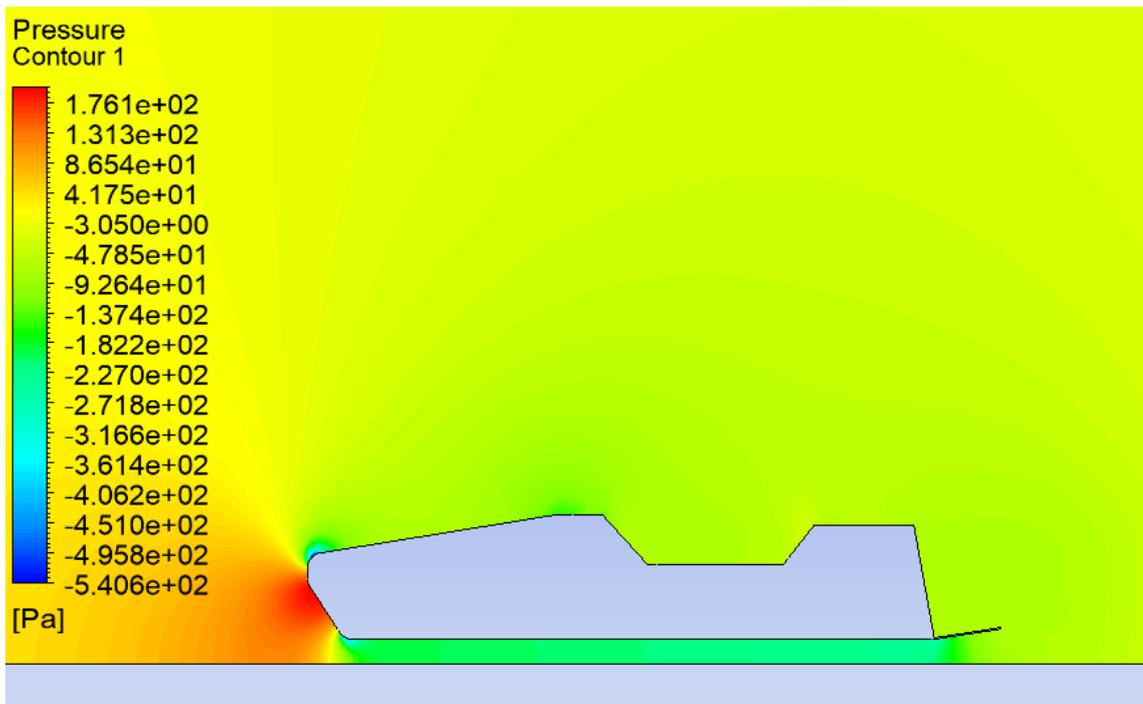


Figura 9: Campo de presiones 2D

4. Diseño y simulación en 3D

4.1. Consideraciones iniciales

A la hora de realizar el primer diseño del fondo plano y del difusor se llevaron a cabo ciertas hipótesis expuestas en las siguientes subsecciones.

4.1.1. Difusor partido

El difusor se debe dividirse en dos dejando la parte central libre. Esto se tiene que hacer debido a que en esta zona del coche el chasis debe llevar una barra llamada “quick-jack” que sirve para levantar el coche. La longitud de este espacio dejado es de 200 mm. Cabe destacar que esto resta eficacia al difusor, pero no hay ninguna otra manera viable de incluir este elemento del chasis sin prescindir de la parte central del difusor.

4.1.2. Entradas de aire laterales

Este es un elemento aerodinámico que se encarga de recoger aire de la parte de arriba del coche y llevarlo al fondo. En diseños de años anteriores estas entradas eran demasiado pequeñas para que se notara un efecto real en el rendimiento así que en este nuevo diseño su tamaño se ve incrementado.

A la hora de discutir su posición, lo más óptimo sería colocarlas entre el lateral del chasis y las ruedas ya que es la zona donde llega más aire limpio, pero esto es inviable debido a la refrigeración. La refrigeración se coloca pegada al lateral del chasis en la parte trasera y es fundamental que a esta le llegue un flujo de aire lo más limpio posible. Por tanto, la posición de estas entradas se abre y se coloca detrás de las ruedas delanteras.

4.1.3. Faldones laterales

El monoplaza de la temporada pasada contaba con unos faldones laterales muy marcados cuya función era la de apartar el flujo de aire que les llega a las ruedas traseras para reducir la resistencia al avance. Esto tiene sentido en primera instancia, pero pasa a no ser tan importante si se tiene en cuenta el camino que sigue el aire desde el principio del coche. La resistencia al avance generada por las ruedas traseras no es tanto como la generada por las delanteras, además este año el monoplaza cuenta con un alerón delantero que aprovecha el flujo limpio de aire y dirige parte de este a la parte exterior disminuyendo el que llega a las ruedas.

A pesar de la inclusión de este alerón, el uso de faldones laterales podría justificarse ya que su efecto no es nada pequeño. Aun así, en el diseño de este coche se ha optado por no incluirlos y sustituirlos por pontones laterales que no forman parte del fondo plano, pero se sitúan encima de este. Y cuya función es la de canalizar el aire hacia el radiador de la refrigeración.

4.1.4. Distancia al suelo

La normativa de la competición de Formula Student marca que la distancia mínima del fondo plano al suelo ha de ser de 30 mm (medida con el piloto incluido). Se tiende a pensar que a menor área transversal debajo del coche mayor es el efecto suelo generado, pero esto no tiene por qué ser así, sino que influyen más factores.

En un principio esta distancia iba a ser un parámetro más y así se tomó en las primeras iteraciones. pero a medida que fue avanzando el diseño del monoplaza el departamento de suspensión concluyó que la mejor distancia para el óptimo uso de las suspensiones era de 80 mm. Es obvio que la suspensión es un parámetro mucho más crítico para el diseño general del coche que la aerodinámica del fondo plano, por lo tanto, a partir de que se conociera ese dato este parámetro se fijó al valor de 80 mm para todas las simulaciones.

4.1.5. Carriles en el difusor y en el fondo plano

Está más que demostrado que el uso de carriles en el difusor es la mejor manera de aumentar la eficacia de este, como se explica en el trabajo de Fernández Gascón ([Fernández Gascón, 2018](#)). Al incluir compartimentos para guiar todavía más el flujo se reducen las turbulencias de este y se permite una salida del aire óptima. La discusión en este elemento se encontraría en si vale la pena o no incluir esos carriles en el fondo y si es que sí que forma tendrían y cuál sería la profundidad óptima. Por tanto, los carriles son una variable de diseño donde se examinan e iteran distintas opciones.

4.1.6. Ángulo del difusor

Este es otro elemento cuya variabilidad puede afectar fuertemente al rendimiento del difusor. Al igual que con los carriles se simulan varios valores de ángulos para encontrar el óptimo. Por normativa de la Formula Student, la distancia máxima de cualquier elemento aerodinámico colocada en la parte trasera del vehículo no puede exceder 250 mm del final de las ruedas. Como es lógico, a mayor longitud del difusor, mayor es la eficacia de este. Por tanto, se ha optado por fijar una medida longitudinal del difusor de 230 mm dejando algo de margen con el valor establecido. Al variar el ángulo, se mantiene esta distancia siempre constante.

4.2. Diseño de la primera geometría

A la hora de diseñar el primer prototipo, el criterio fue realizar un modelo lo más sencillo posible que cumpliera con las condiciones consideradas en el capítulo anterior. Por tanto, destaca la introducción de entradas laterales, un difusor partido y se divide cada uno de los lados en dos compartimentos. En el diseño se tienen como referencia las dimensiones del monoplaza del año pasado ya que las del próximo año aún son desconocidas.

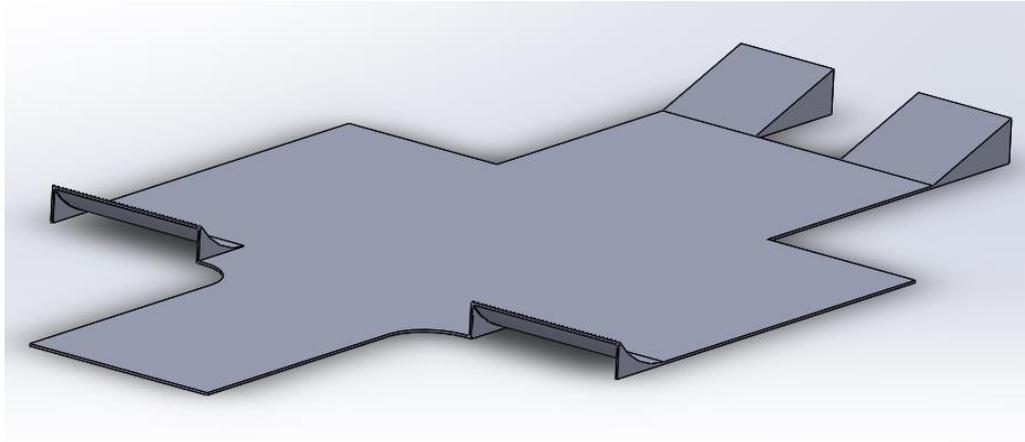


Figura 10: Primera geometría

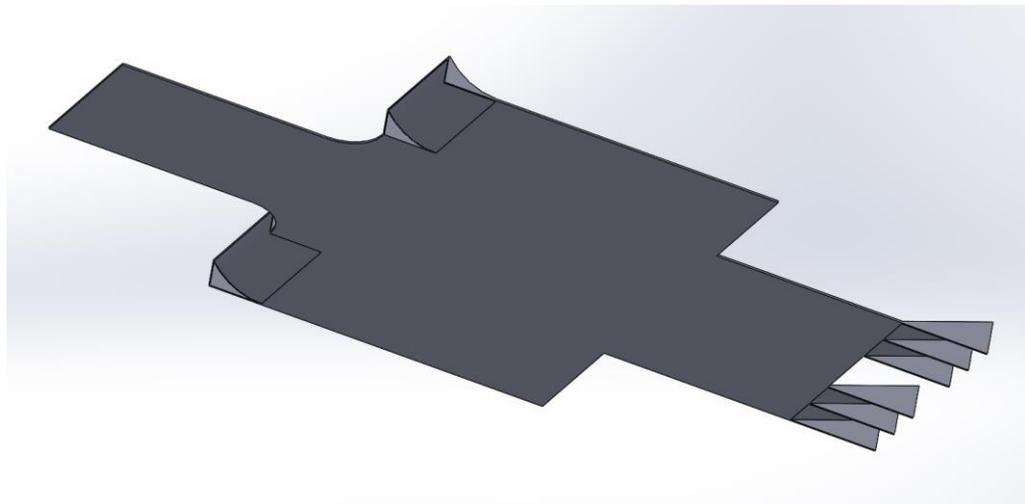


Figura 11: Primera geometría

4.3. Simulación de la primera geometría

En este capítulo se tratan todas las condiciones para realizar una correcta simulación de un elemento aerodinámico como son el fondo plano y el difusor. Se trata de una guía dónde se describen y explican todos los pasos realizados en la simulación. El software utilizado es ANSYS y se analizan opciones y valores concretos de este programa.

4.3.1. Geometría de simulación

El primer paso a la hora de simular es el de crear el volumen de control, que será donde circule el fluido. Para ello se necesita la geometría del elemento aerodinámico a estudiar. Se puede crear esta geometría directamente en ANSYS, pero aquí se ha optado por diseñarla en SolidWorks para luego importarla a ANSYS.

Las simulaciones aerodinámicas se tratan de problemas de flujo externo, por lo tanto, el volumen de control debe ser lo suficientemente grande para que las condiciones de contorno del ambiente no influyan en los resultados obtenidos. Esto se crea a partir de la herramienta “enclosure”, que no es más que un octaedro donde circula el fluido. En esta operación se selecciona un plano de simetría (un plano longitudinal a la mitad de la geometría), que se utiliza para reducir el coste computacional, ya que, al ser simétrica la geometría y las condiciones de contorno, es suficiente con simular uno de los dos lados.

Después se hace uso de la herramienta “boolean” que permite crear, a partir del “enclosure” y de la geometría del fondo, el volumen de control.

Se crea también un volumen que más adelante en el mallado se usa para refinar la malla en la parte posterior de la geometría.

4.3.2. Mallado

La malla es un factor crítico en cualquier simulación aerodinámica, ya que esta determina la exactitud de los resultados. A la hora de mallar hay que considerar tanto el tamaño de los elementos de la malla como la calidad de esta.

Al tratarse de un flujo externo, en las simulaciones aerodinámicas se hace esencial el tener buena precisión en la parte del volumen de control que se encuentra cerca de la geometría. Esto es porque en estas zonas es donde se producen mayores gradientes de velocidades y presiones, incluyendo aquí el desprendimiento de capa límite. Por lo tanto, toman especial importancia las funciones de “capture curvature” y “capture proximity”. Estos comandos tienen en cuenta la cercanía de geometrías en la zona del volumen de control y la curvatura de estas, y la función que realizan es la de refinar la malla de tal manera que esta sea capaz de proporcionar la calidad necesaria a estas zonas más críticas del modelo.

También se ha optado por incluir un cuerpo cuya función sea la de obtener más precisión de mallado en la zona de salida del difusor. Este cuerpo se utiliza en el mallado para conseguir un elemento de malla más pequeño donde se encuentre. Es necesario incluir este cuerpo ya que en la zona de salida del difusor se crean muchos vórtices que se observan mejor si la malla es más detallada en este punto. Esto solo se puede conseguir con este cuerpo porque al tratarse de una zona sobre la que no hay geometría cerca, el parámetro que adecúa los elementos de malla a la proximidad con la geometría no actúa y los elementos por defecto serían demasiado grandes para detectar tales movimientos en el fluido con una precisión aceptable.

Otra herramienta importante se trata de la “inflation”, esta consiste en crear una serie de capas con elementos hexaédricos en lugar de tetraédricos que simulan realmente bien el desprendimiento de la capa límite del fluido en cuestión. La “inflation” solo se usa en aquellas superficies donde conocer con exactitud cómo se comporta la capa límite es determinante, y en este caso, esta superficie se trata del difusor. Se podría plantear el poner esta función en toda la parte inferior del fondo plano, pero siendo

coherentes, el fluido va a permanecer pegado a toda esta superficie, con lo cual no es imprescindible que esta sea simulada con la funcionalidad de la “inflation”.

Para encontrar el número de elementos óptimo para tener un resultado preciso, y que este tarde lo menos posible en simularse, se realiza un análisis de sensibilidad de mallado. Este análisis se explica en el capítulo 4.5.1. Análisis de sensibilidad de mallado

Para juzgar si una malla es adecuada o no para el modelo se pueden usar distintos parámetros de medida. Según (de Oliveira Samel Moraes, Laranjeira da Cunha Lage, Coelho Cunha, & Lopes Rodrigues da Silva, 2013) se demuestra que el más importante a la hora de hacer el tipo de simulaciones que se ocupan aquí es el “skewness”. Es un parámetro que indica la complejidad en forma de los elementos tetragonales o hexagonales del mallado, va de 0 a 1 siendo 0 un elemento correcto en cuanto a geometría y 1 un elemento demasiado complejo y que podría causar problemas en la simulación. Por lo tanto, se procurará que los elementos de la malla no superen un valor de “skewness” de 0,9. Otro parámetro imprescindible es la calidad ortogonal de los elementos, que indica en resumen lo fácil que es aplicar las ecuaciones de los modelos matemáticos sobre estos. Este parámetro está en parte relacionado con el “skewness” y también va de 0 a 1, siendo en este caso el 1 para elementos en perfectas condiciones y el 0 para los que podrían dar problemas a la simulación.

4.3.3. Condiciones de procesamiento

4.3.3.1. Modelo de turbulencia

En el módulo de SET UP se encuentran distintas opciones para incluir en la simulación. Lo primero a tener en cuenta es el modelo de turbulencia, como ya se ha visto en el estado de la cuestión, existen varios modelos de turbulencia válidos para un estudio aerodinámico. En este proyecto se ha optado por utilizar el modelo k- ϵ realizable dado que es el que mejor resultados arroja en simulaciones aerodinámicas (Rogowski, 2018). El tratamiento de las paredes es el de paredes no equilibradas, dejando por defecto los demás valores del modelo.

En cuanto al fluido en cuestión se ha dejado el modelo de aire por defecto con una densidad no variable de $1,225 \text{ kg/m}^3$.

Las simulaciones aerodinámicas tienen una gran dependencia a la trayectoria que el fluido haya seguido en instantes anteriores debido a los vórtices. Estos vórtices son flujos circulares que se forman por la viscosidad del fluido y su inercia e interacciones con la geometría. Este fenómeno obliga a que todas las simulaciones aerodinámicas se realicen en régimen transitorio en lugar de estacionario, a pesar de que la velocidad del fluido sea constante. Para determinar el tiempo ideal que debe durar este transitorio se desarrolla un análisis de sensibilidad de iteraciones en el capítulo 4.5.2. Análisis de sensibilidad de “time steps”.

4.3.3.2. Condiciones de contorno

Es importante mencionar que en la simulación lo que se está moviendo es el aire, estando el monoplaza parado. Esto es exactamente equivalente en cuanto a flujos, presiones, fuerzas y cualquier otro parámetro físico a lo que ocurre en la realidad. Se simula así dado que es infinitamente más sencillo considerar el aire moviéndose sobre el coche y no al revés (en contexto de mallado, sobre todo). Por lo tanto, se deben integrar unas condiciones de contorno que coincidan con el modelo. A continuación, se describe una lista con todas las zonas creadas y sus respectivas condiciones de contorno:

- **Entrada de aire:** Es la cara del volumen de control donde entra el fluido. Se le ha dado la condición de entrada de velocidad. Esta velocidad tiene una dirección perpendicular a dicha cara de modo que simule el avance del vehículo. Su magnitud es de 17 m/s ya que representa la velocidad en la cual el monoplaza está durante más tiempo en el circuito de las pruebas de Formula Student. La turbulencia de entrada se ha reducido al 1% de su valor por defecto de 5% ya que este aire está prácticamente parado y no llegaría con ninguna oscilación al monoplaza.
- **Salida de aire:** En la cara trasera del volumen de control se impone una condición de presión de salida. Esta presión es la de ambiente (0 Pa relativos). De tal manera que el aire fluye de delante hacia atrás simulando perfectamente el avance del monoplaza.
- **Simetría:** Se trata de la superficie que ha dividido la geometría en dos. Se le aplica la condición de simetría porque se admite que en el lado contrario se observan los mismos fenómenos aerodinámicos.
- **Fondo plano y difusor:** Esta zona es referida a toda la geometría y recibe la condición de pared. Todas las paredes en simulaciones de fluidos se comportan como una superficie donde la velocidad del fluido en esta es nula. La rugosidad de la pared tiene valores por defecto ya que estos valores se adecúan a la mayoría de materiales.
- **Carretera:** Para modelar la carretera se utiliza una condición de pared. Pero al contrario que en la pared de la geometría, que es estática, esta es una pared en movimiento. Debido a que en la simulación es el fluido el que se mueve y el coche permanece estático, la carretera se debe moverse también con el fluido teniendo la misma velocidad que este, es decir la velocidad de avance del coche de 17 m/s.
- **Exterior:** Quedan 2 superficies más en el volumen de control, y estas pertenecen a la parte superior y lateral de este. Se modelan con una condición de simetría. Esto es debido a que al estar tan lejos de la

geometría se acepta que el fluido que entra contacto con estas superficies no se ve afectado por la geometría.

4.3.3.3. Métodos y controles

En el apartado de métodos se eligen algunos parámetros referidos a las ecuaciones matemáticas que rigen el modelo de turbulencia elegido, en este caso el k- ϵ . Aunque se disponen de más opciones, las más utilizadas y precisas son las de primer y segundo orden. La diferencia de seleccionar la opción de primer orden sobre la de segundo orden es que resulta en ecuaciones con una convergencia más rápida y sencilla, pero dando peor precisión. Pero esta pérdida de precisión podría ser determinante a la hora de comparar los resultados finales, por tanto, se ha optado por realizar una simulación que combine ambos métodos. Esto es posible porque el caso se simula en el clúster de ICAI y mediante un script que se incluye para ordenar la simulación es posible cambiar algunos parámetros de esta entre iteraciones o entre “time steps”.

En el apartado de controles se tiene que definir el “courant number”. Este es un parámetro complejo cuya interpretación se describe a continuación. Este relaciona el paso de tiempo en la simulación con el mallado de la misma. Para que la simulación converja sin problemas, esta requiere de un “courant number” bajo, pero el valor introducido no es el que luego la simulación toma, sino que este se adapta según la simulación y siempre es mayor a este. Por tanto, aquí se ha optado por elegir un “courant number” de 1 y dejar al programa decidir cuál es el valor que corresponde.

También en el apartado de controles se encuentran los “explicit relaxation factors” y los “under-relaxation factors”. Estos controles hacen referencia a la relación precisión-convergencia que toman ciertos parámetros en la simulación. Toman valores del 0 al 1, siendo el 1 el máximo de precisión posible y a medida que este disminuye, más fácil se realiza la convergencia de la simulación.

Teniendo en cuenta todo esto, se realizan 20 “time steps” con las ecuaciones de momentos, energía cinética turbulenta y ratio de disipación turbulenta con el método de primer orden y el control de viscosidad turbulenta a 0,8. Después, para los restantes “time steps” (cuyo número exacto se justifica en el apartado [4.5.2. Análisis de sensibilidad de “time steps”](#)), se cambian estos valores al método de segundo orden y se establece el control de viscosidad turbulenta a 0,95.

Dentro de las condiciones de procesamiento se elige la opción de “reports”. Estos son valores en forma de gráficas que se podrán ver mientras se esté simulando el caso. Aquí se incluyen los valores de las fuerzas de carga aerodinámica y resistencia al avance y sus coeficientes.

Una vez se tengan configuradas todas las condiciones de procesamiento se inicializa el caso. Se ha optado por la inicialización híbrida ya que es la que aporta mejores resultados. Una vez la inicialización arroja los ficheros de datos, estos son llevados al clúster para que se simule el caso.

4.3.4. Resultados de la simulación

Una vez se ha terminado la simulación, se descargan los resultados del clúster y se procede a analizarlos. Para esto se tienen varias herramientas en el apartado de resultados. Las más importantes y las que se utilizan son:

- “Contour”: Se trata de una representación del valor del parámetro elegido (velocidad, presión, fuerza) sobre una superficie cualquiera. Solo se muestra la parte escalar del parámetro elegido en caso de que este fuera un parámetro vectorial. Como ejemplo se representa la velocidad en un plano longitudinal por la mitad del compartimento interior del difusor



Figura 12: Campo de velocidades en plano longitudinal

También se podría representar la presión existente en todos los puntos del fondo plano para deducir donde se encontrarían las mayores fuerzas aerodinámicas

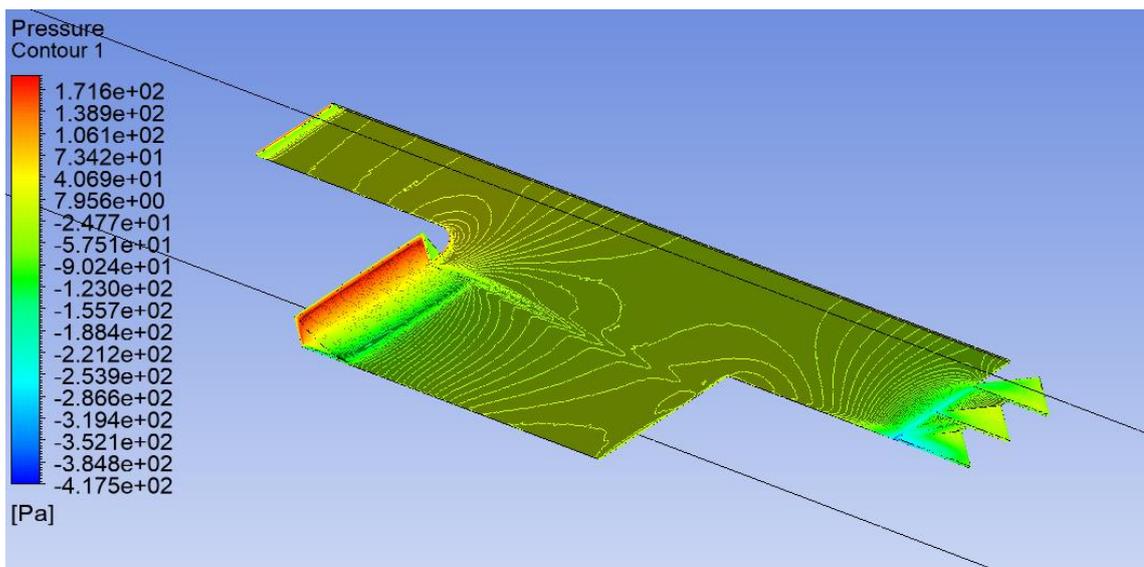


Figura 13: Campo de presiones sobre fondo plano

- “Streamlines”: Son las líneas de corriente que sigue el fluido a medida que este avanza por el volumen de control. Es muy útil para visualizar caudales y líneas de flujo:

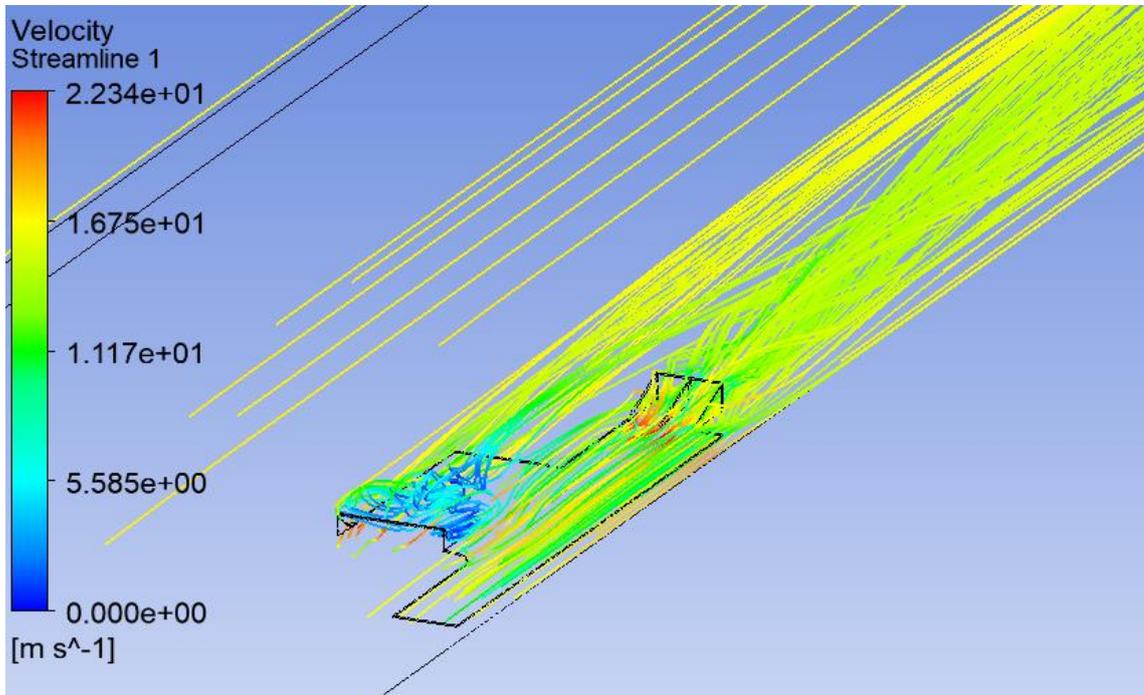


Figura 14: Líneas de corriente

4.4. Geometría completa

4.4.1. Cambios en el diseño

En el apartado anterior se ha visto todo lo que hay que considerar para simular el fondo plano y el difusor. Sin embargo, para que esta simulación sea lo más realista posible, se tiene que simular este conjunto de piezas aerodinámicas junto al monoplaza donde se implementarán en un futuro. Por lo tanto, a partir de este punto, el fondo plano y el difusor son acompañados por otros elementos que acercan el modelo al coche final. Se incluye un carenado y una prolongación de este que hace la función de chasis. También se incluyen las cuatro ruedas ya que estas influyen al flujo que puede llegar al fondo plano, y por esta razón se ha decidido no incluir la cabeza del piloto. El carenado es lo más importante ya que si no estuviera, el modelo únicamente con la lámina del fondo plano no sería capaz de dar al aire un camino más lento por encima y no se conseguiría efecto suelo. Cabe destacar que lo óptimo hubiese sido contar también con el alerón delantero. Pero debido a que el año pasado no se implementó este elemento y que el de este año todavía está en una temprana fase de desarrollo, no ha sido posible incluirlo en la simulación.

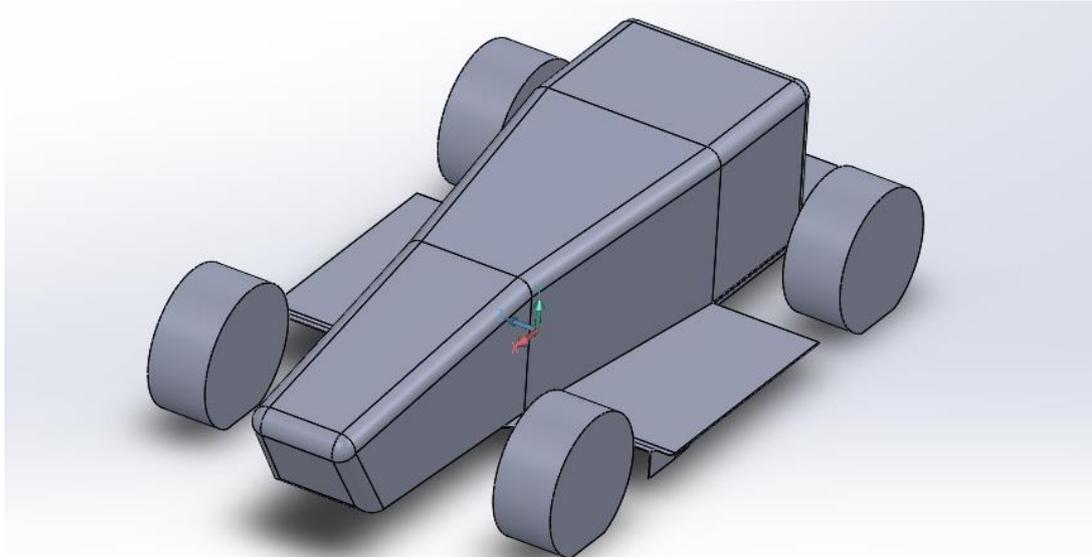


Figura 15: Geometría completa

4.4.2. Cambios en la simulación

Al tratarse de una geometría distinta, la simulación tiene algunos parámetros que se deben cambiar para adaptarse a esta nueva geometría. A la hora de realizar la geometría para la simulación, se incluye una zona rectangular que engloba al vehículo y tiene un coche de longitud en la parte de atrás. Esta zona se conoce como cuerpo de influencia y se utiliza en el mallado para refinar más la malla en la zona posterior del vehículo ya que se ha visto que es donde los vórtices se forman y se necesita una mayor precisión.

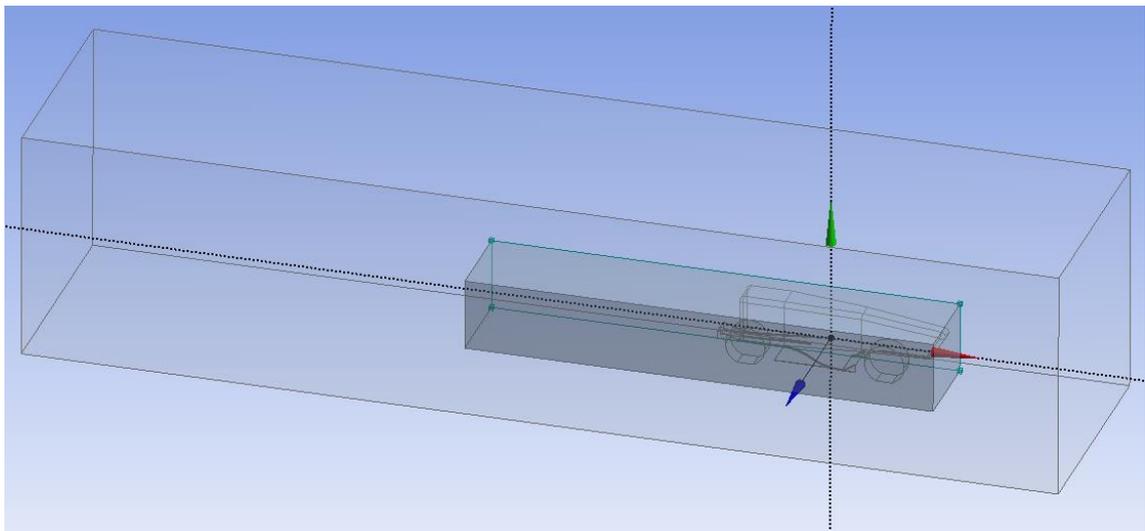


Figura 16: Cuerpo de influencia

En el mallado se han añadido ciertas opciones que no se implementaron en la simulación anterior. Una de ellas es que el orden de los elementos se ha configurado a cuadrático en lugar de dejarlo en lineal como está por defecto. Esta función permite

que los elementos de malla tengan más puntos de unión entre sí donde poder calcular las ecuaciones del modelo de turbulencia. (Owen, 1998)

En el apartado de condiciones de procesamiento se crean dos nuevas zonas a las que se les impondrá la condición de pared: la rueda delantera y la rueda trasera. Esta condición tiene la opción de pared en movimiento, pero al contrario que la carretera esta es una pared en movimiento rotativa. La velocidad angular de esta se calcula suponiendo la condición de rodadura $v=w*r$, sabiendo que la velocidad es de 17 m/s y el radio de la rueda de 220 mm. El eje de giro es el eje zeta, su sentido el horario para que la rueda gire hacia adelante simulando el avance del vehículo, y su posición la coordenada en X e Y que corresponda al eje de cada rueda.

4.5. Análisis de sensibilidad

Para realizar una simulación computacional hay parámetros que dependen fuertemente de qué geometría se esté simulando y de qué manera. En este apartado se estudian dos parámetros clave para realizar una correcta simulación aerodinámica: El tamaño de la malla y la cantidad de tiempo simulado a partir de los “time steps”.

4.5.1. Análisis de sensibilidad de mallado

Cómo ya se ha comentado anteriormente la cantidad de elementos que posee una malla es totalmente determinante pues de estos depende la precisión de los resultados y el gasto computacional empleado en resolverla. Para cada simulación se dice que existe un número de elementos de malla que garantizan una malla óptima. Esta malla se define cómo la malla que produzca un gasto computacional mínimo dando al mismo tiempo un resultado muy exacto. Aunque el término de exactitud sea relativo, se busca la malla más pequeña que de los mismos resultados que una malla de infinito número de elementos.

Para encontrar el tamaño de malla óptimo se cambian los parámetros del mallado y se contrastan con los resultados obtenidos. En este análisis de mallado se ha usado como parámetro de salida las fuerzas de sustentación y resistencia al avance generadas por el monoplaza. Se ha obtenido la siguiente gráfica:

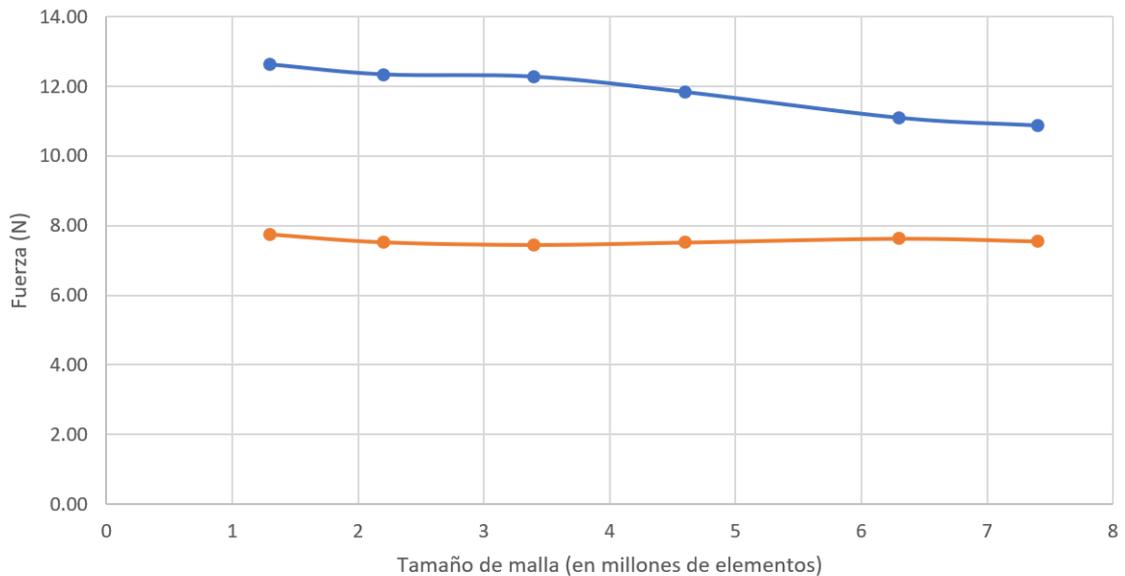


Figura 17: Análisis de sensibilidad de malla

Como se puede apreciar a partir de los 6-7 millones de elementos en la malla, el resultado de ambas fuerzas ya no varía. Por lo tanto, este es el número de elementos utilizado para todas las simulaciones a realizar.

4.5.2. Análisis de sensibilidad de “time steps”

En las simulaciones transitorias hay un parámetro determinante que es el “time step” o paso de tiempo. Este paso de tiempo es el que se utiliza en las ecuaciones de comportamiento viscoso para calcular el avance del fluido (k- ϵ en este caso). Las simulaciones transitorias, desde el punto de vista computacional, son muchas simulaciones estacionarias una detrás de otras conectadas por este parámetro de paso de tiempo. El hecho de que todas las simulaciones aerodinámicas sean transitorias, a pesar de que las condiciones de contorno no cambien (misma velocidad incidente, misma presión ambiente, etc), se debe a que, por la viscosidad del fluido, en este aparecen vórtices a su paso por la geometría que modifican las líneas de flujo. Líneas de flujo, que distan demasiado de las obtenidas en una simulación estacionaria y por tanto, cambian por completo los valores de carga aerodinámica y resistencia al avance.

En este análisis de sensibilidad de iteraciones se busca el tiempo necesario para que se estabilicen estos vórtices. El valor del paso de tiempo es de 0,01 segundos y en este caso, el parámetro de salida es la carga aerodinámica:

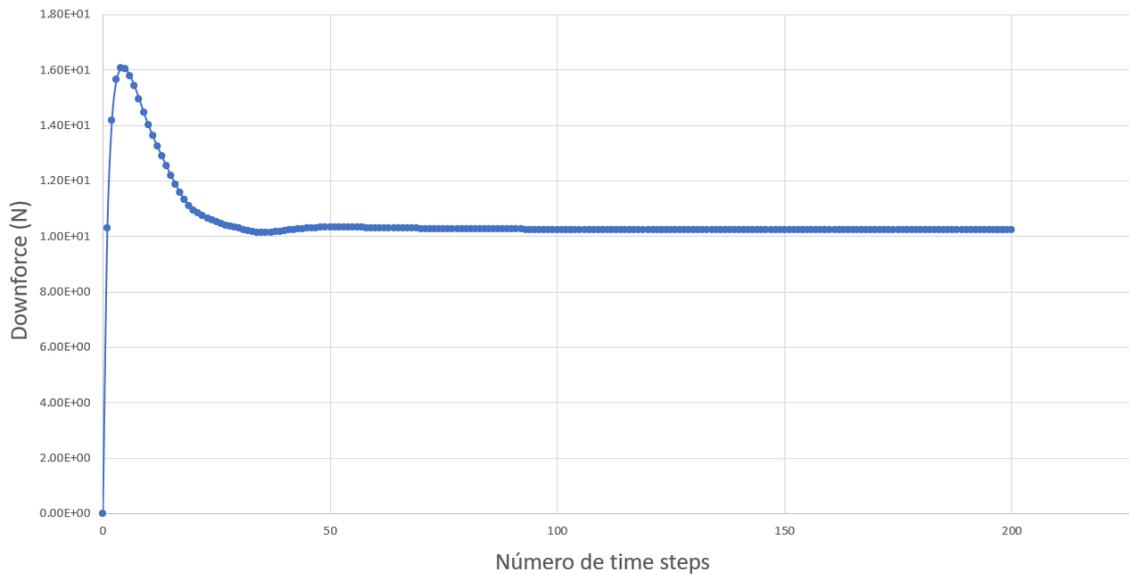


Figura 18: Análisis de sensibilidad de "time steps"

Como se ve en la gráfica anterior, a partir de los 75 "time steps" la fuerza de carga aerodinámica comienza a estabilizarse. En las próximas simulaciones se ha decidido dejar algo de margen y, por tanto, estas simulaciones se realizan con 100 "time steps", es decir la simulación transitoria dura 1 segundo.

4.6. Iteraciones de fondo plano y difusor

Este apartado se centra en distintas iteraciones sobre los carriles del fondo plano y el ángulo del difusor. Para distinguir un modelo de otro se tiene en cuenta solamente su aportación en cuanto a sustentación y resistencia al avance. Cabe destacar que para llegar a la geometría simulada en este apartado de iteraciones se han llevado a cabo ciertas consideraciones generales del efecto del fondo plano y difusor sobre todo el coche. Ya que se considera que la función principal de estos elementos no es la de generar carga aerodinámica (Mateos Corona, 2017). Esta suposición se fundamenta en que el fondo plano es un elemento aerodinámico que necesita de una velocidad de flujo mucho mayor a la que un monoplaza de Formula Student acostumbra a circular para poder exprimir todo el potencial de este. Sin embargo, a la hora de evaluar estas iteraciones se considera que el diseño general está cerrado y se busca perfeccionar este para ganar carga aerodinámica y reducir resistencia al avance.

Por tanto, los resultados de las simulaciones son el coeficiente de sustentación negativa (C_L) y el coeficiente de resistencia al avance (C_D). Aunque se valoran también ciertos campos de presiones o de velocidades que podrían influir o no en la decisión del diseño final. Se recuerda que cuando se trabaja con sustentación en aerodinámica esta se refiere realmente a la sustentación negativa, llamada carga aerodinámica. Por tanto, los valores positivos de este parámetro indican que las presiones en el cuerpo del monoplaza ejercen una fuerza resultante hacia abajo.

4.6.1. Iteración de carriles en el fondo plano

4.6.1.1. Geometría base sin carriles

Primero se estudia el resultado base que nos proporciona el fondo plano sin ningún tipo de carriles. Cabe destacar que el ángulo en el difusor tiene un valor de 20° para todas las iteraciones de los carriles. Aunque no se hayan incluido carriles en el fondo plano, sí se usa el difusor partido y todas las consideraciones realizadas anteriormente en el diseño. La geometría para simular en esta iteración vista desde la parte inferior es la siguiente:

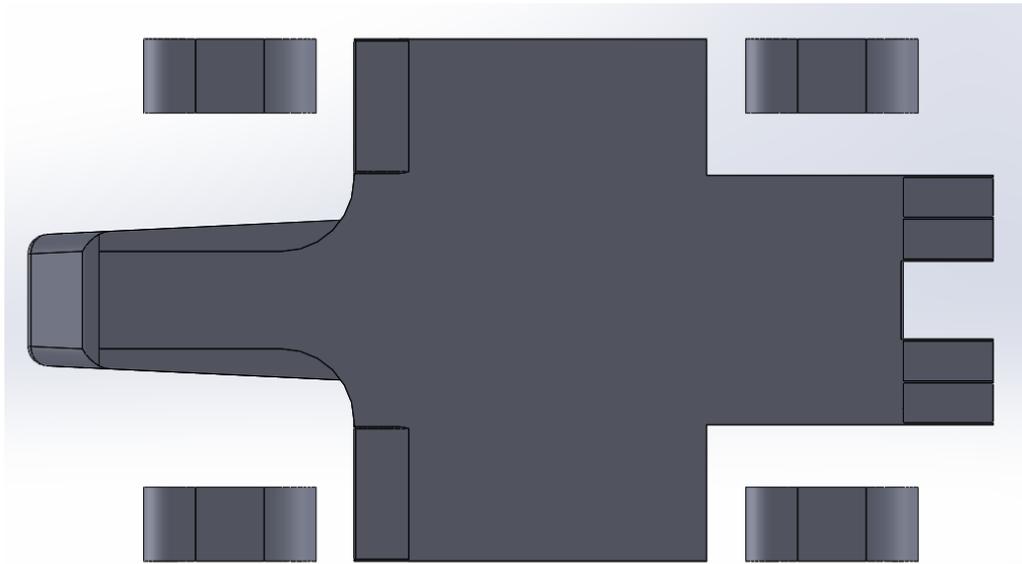


Figura 19: Fondo sin carriles

4.6.1.2. Iteraciones con carriles de 15, 20 y 25 mm

La función de los carriles es la de guiar el fluido desde la parte delantera hasta la trasera mediante su propia geometría. Realmente el carril sería el espacio que queda entre las superficies extruidas para formar la pared de este. Al implementarlos se reduce la turbulencia del fluido a medida que avanza por el fondo y se mejora por tanto la efectividad del difusor. Los carriles han de ser diseñados con el objetivo de guiar el aire, y por tanto su geometría no es recta y se adapta a la dirección que llevaría el fluido a su paso por estos. Se ha optado por el diseño de la siguiente figura:

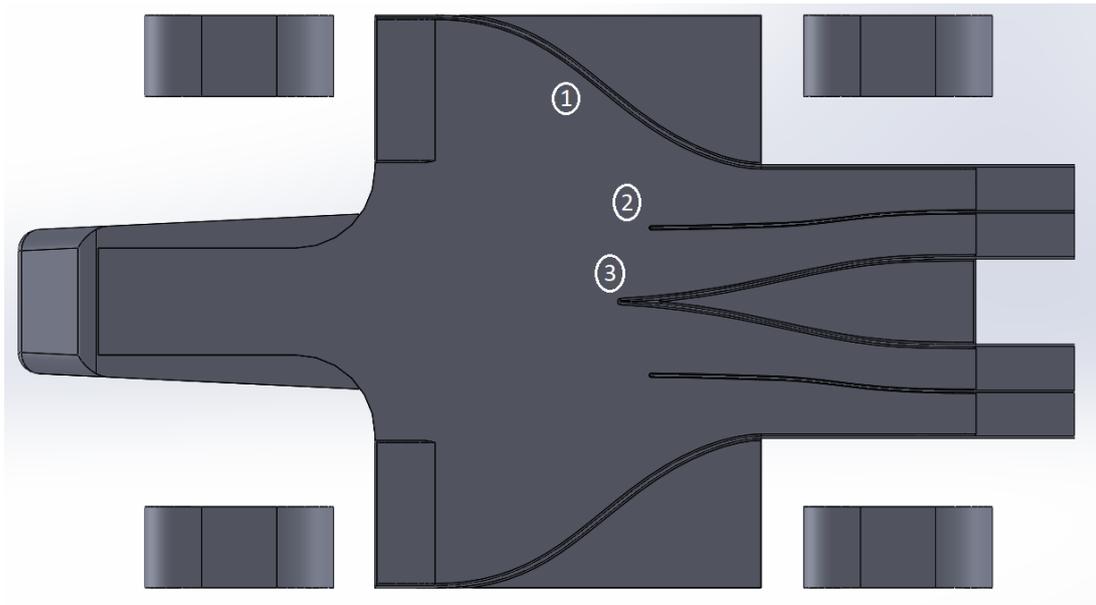


Figura 20: Fondo con carriles

En cada lado del fondo, mediante las tres paredes señaladas en la figura, se forman dos carriles que desembocan en los dos compartimentos del difusor partido. La pared exterior (número 1) está diseñada para guiar el aire que entra de las entradas laterales, estas entradas tienen la función de recoger el aire de la parte lateral del coche y con la ayuda del carril este llega al difusor. La pared interior (número 3) tiene la función de dividir el flujo de aire central a un lado u otro del difusor y que este no se pierda por la parte central, aumentando así el efecto del difusor. La pared del medio (número 2) se coloca para que puedan existir dos carriles y conseguir que el flujo tenga la menor turbulencia posible, y en general guiar este hacia el difusor de forma más sencilla.

4.6.2. Iteración del difusor con ángulos de 18°, 20° y 22°

La función del difusor es la de ralentizar el aire que sale de la parte baja del coche después de pasar por el fondo plano. Esto lo consigue ensanchando su sección a medida que el aire lo atraviesa. Se tendería a pensar que a mayor área más se frena el fluido y mejores son las fuerzas de sustentación y resistencia al avance generados por este. Sin embargo, si la capa límite se desprende por tener un ángulo en el difusor demasiado alto el rendimiento del difusor empeora.

En estas simulaciones simplemente se cambia el ángulo del difusor y se examinan los resultados obtenidos. Cabe destacar que la proyección longitudinal del difusor no varía, sino que permanece constante a un valor de 230 mm (20 mm menor que el límite establecido por el reglamento de Formula Student). También es importante comentar que la profundidad elegida de los carriles para realizar estas simulaciones es de 15 mm debido a que estas iteraciones se realizaron después que las de los carriles y se ha cogido la solución que mejor resultado ha dado como se presenta en el apartado siguiente.

5. Análisis de resultados de las iteraciones

5.1. Resultados de la iteración de los carriles

Los resultados de las iteraciones de los carriles son los siguientes:

Tipo de carriles	C_L	C_D
Sin carriles	0.096	0.397
15 mm	0.134	0.289
20 mm	0.104	0.381
25 mm	0.045	0.371

Tabla 5: Resultados de iteraciones de carriles en el fondo

Claramente la mejor iteración es la de los carriles de 15 mm puesto que es la que tiene mayor carga aerodinámica y menor resistencia al avance.

5.1.1. Interpretación de los resultados de la iteración de los carriles

A priori, uno podría esperar que, con todas las ventajas anteriormente descritas, a mayor tamaño de carriles mayor rendimiento de estos. Esto ha quedado demostrado que no es correcto y se debe a que existe un compromiso en la profundidad de los carriles. Con carriles se logra guiar el flujo de aire hasta el difusor, pero si estos carriles son demasiado grandes se pueden llegar a formar turbulencias dentro de estos carriles, lo que supone que el aire circulando a gran velocidad se frene y no se produzca esa depresión en el fondo.

El hecho de que el coeficiente de resistencia al avance sea considerablemente más grande que el de carga aerodinámica se debe a la geometría utilizada. La aproximación del carenado que se ha utilizado no es una pieza muy aerodinámica y se ve reflejado en los resultados. Aún así esto no nos impide poder discriminar el efecto de los elementos iterados debido a que todos cuentan con el mismo chasis y este no debería beneficiar ni perjudicar a ningún caso en concreto.

A continuación, se comparan los campos de presiones de las simulaciones de 15 mm y de 25 mm y se explica porque esta última arroja unos peores resultados.

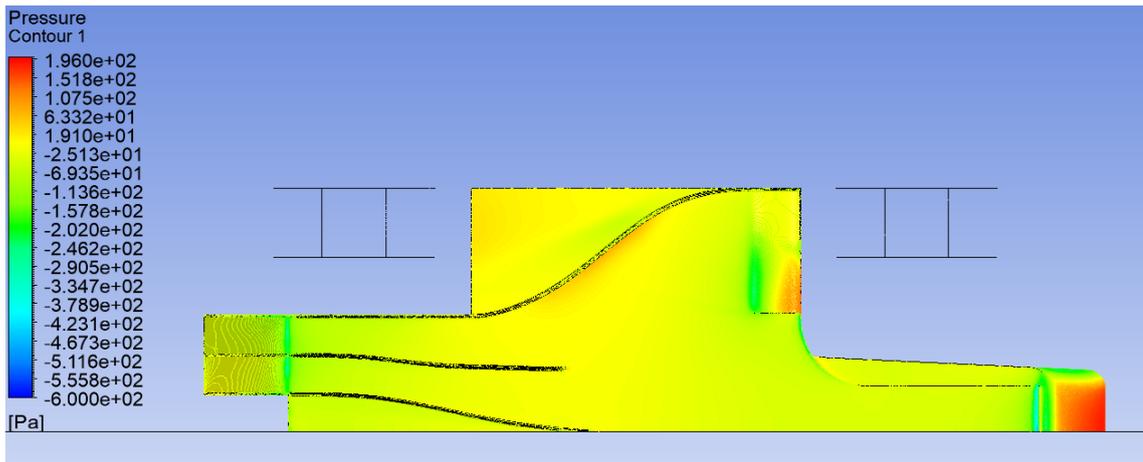


Figura 21: Campo de presiones en el fondo con carriles de 15 mm

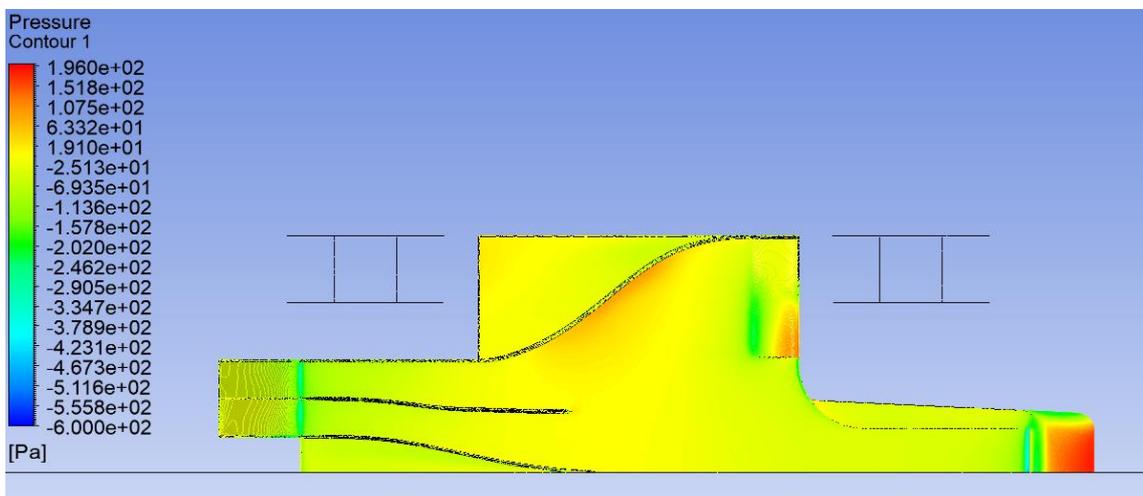


Figura 22: Campo de presiones en el fondo con carriles de 25mm

Donde más se aprecia la diferencia es en la zona de la pared del carril exterior. La presión en esta zona es considerablemente más alta en el diseño con carriles de 25 mm, Además al ser más grandes los carriles de 25 mm aumenta la superficie donde el flujo choca y queda un poco estancado. A parte de la notable ganancia en resistencia al avance que supone esto, la carga aerodinámica también se ve afectada reduciéndose esta debido a que, al incrementarse la presión en una zona del fondo todavía lejana al difusor, se pierde parte de la depresión creada por el efecto suelo.

En cuanto a las líneas de corriente, comparando estos dos diseños son muy parecidas y se observa que no existe estancación del fluido en la zona de los carriles, pero sí que es cierto, como ya se ha comentado, que la velocidad disminuye algo en estas zonas para las profundidades de carriles más grandes.

5.2. Resultados de la iteración del ángulo del difusor

Los resultados de las iteraciones del ángulo del difusor son los siguientes:

Difusor	C_L	C_D
Con ángulo de 18°	0.086	0.383
Con ángulo de 20°	0.134	0.289
Con ángulo de 22°	0.084	0.404
Convexo	0.305	0.356

Tabla 6: Resultados de iteraciones del ángulo del difusor

Se puede apreciar que claramente la mejor iteración es la del difusor convexo, ya que es la que arroja una carga aerodinámica mayor con una resistencia al avance menor.

5.2.1. Interpretación de los resultados de la iteración del ángulo del difusor

El porqué de que la forma de difusor convexo resulta tan efectiva reside en que esta geometría hace cambiar su ángulo a medida que el fluido circula por este, generando el efecto Coandă. Este efecto hace que el desprendimiento de capa límite se produzca lo más tarde posible. También por la propia geometría, la sección de salida es mucho mayor y esto consigue que el fluido se pueda frenar todavía más mientras este atraviesa el difusor.

A continuación, se comparan las velocidades de salida del difusor del diseño de 22° y del diseño convexo. El campo de velocidades se muestra en un plano longitudinal que se corresponde a la sección del compartimento interior del difusor.

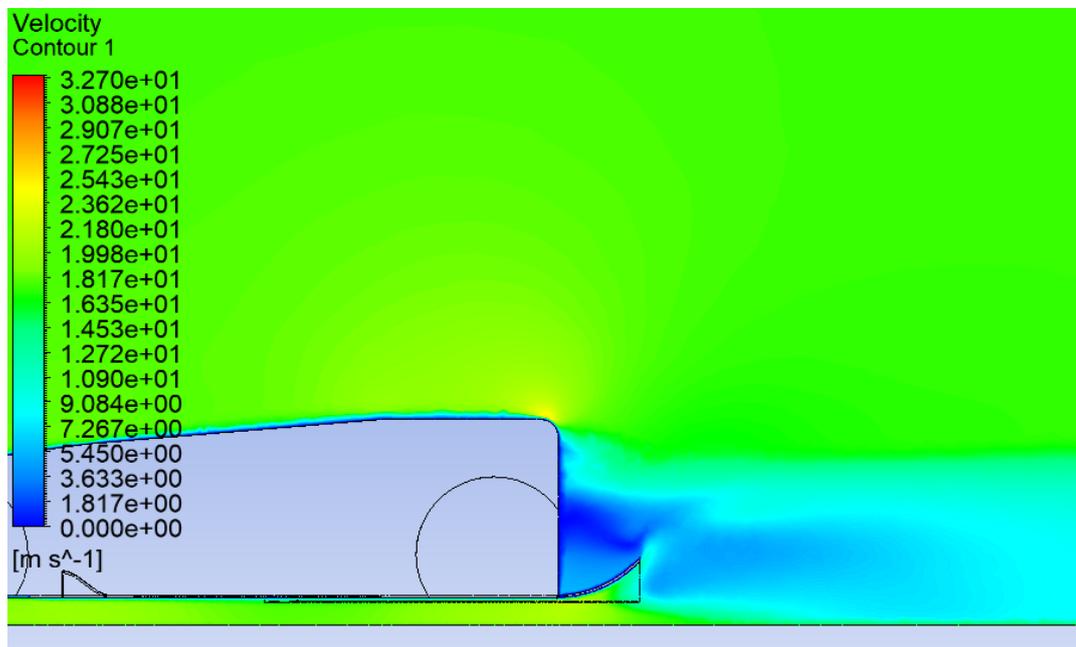


Figura 23: Campo de velocidades en el difusor convexo

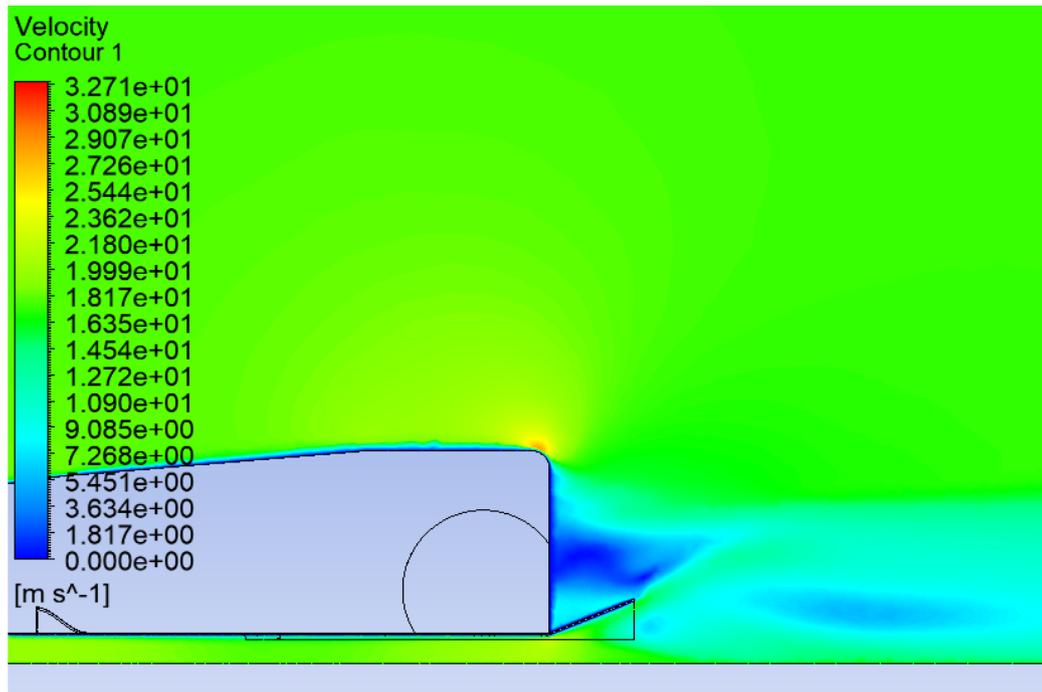


Figura 24: Campo de velocidades en el difusor de 22°

En las figuras anteriores se puede apreciar perfectamente que la iteración con difusor convexo logra disminuir la velocidad del fluido en la zona del difusor de forma más efectiva que la iteración con el difusor convexo. El motivo de que la capa límite no se ha desprendido en ninguna de las iteraciones, se justifica por la baja velocidad a la que circula el coche. Y por tanto esto beneficia a iteraciones con el ángulo de salida más pronunciado, en este caso el difusor convexo.

6. Conclusiones y trabajo futuro

6.1. Conclusiones

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado era diseñar un fondo plano y un difusor competitivos para el coche IFS-03. Este objetivo se ha cumplido como bien avalan las simulaciones realizadas. Primero se tomaron ciertas consideraciones iniciales sobre el diseño, y sobre esas consideraciones se ha ido formado lo que finalmente es el fondo plano y difusor final.

Como se ha visto en el apartado de resultados, finalmente se ha elegido la combinación de implementar carriles en el fondo de 15 mm de profundidad junto con un difusor convexo. Los valores del coeficiente de sustentación y resistencia al avance han sido de 0.305 y 0.356 respectivamente. Aunque como se ha ido diciendo durante todo el documento, el difusor pero sobre todo el fondo plano, no son elementos aerodinámicos de los que dependa gran parte de la carga de carga aerodinámica generada, sino que son más bien elementos que actúan de apoyo para ayudar a los alerones a estabilizar el coche o conseguir que el sistema de refrigeración funcione de forma óptima. Los resultados obtenidos han sido satisfactorios, pero cuando se simulan el fondo plano y el difusor junto al resto del monoplaza se verán realmente los avances que se han conseguido respecto a monoplazas de años anteriores.

Otro objetivo que se describía es el de hacer valer este Trabajo de Fin de Grado como un documento en el cual puedan apoyarse los futuros miembros del ISC. Este se ha logrado puesto que el trabajo cuenta con todos y cada uno de los apartados explicados de la mejor manera para que estos puedan ser comprendidos por alguien que busque indagar más sobre este tema en un futuro.

6.2. Trabajo futuro

Se debe recordar que el proyecto desarrollado en este trabajo de fin de grado no es independiente, sino que se relaciona no solo con los demás elementos aerodinámicos sino con todo el monoplaza del IFS. Y es por esto por lo que el diseño final presentado aquí puede no ser definitivo.

En la aerodinámica de un coche de competición, un pequeño cambio que parezca poco significativo en la pieza que se está simulando, puede que sea un gran cambio para otra pieza cuando estas se simulan juntas. Concretamente, el hecho de que no se haya podido simular el fondo plano junto al alerón delantero, deja al proyecto con alguna duda sobre como hubieran afectado ciertos cambios en la geometría del fondo. Ya que, si el aire no hubiera sido completamente limpio, sino que haya pasado previamente por el alerón delantero, quizá algunos valores podrían haber sido distintos.

Dicho esto, todavía quedan por hacerse simulaciones con todo el paquete aerodinámico junto, y refinar este al máximo para conseguir los mejores resultados.

Un tema que no se ha tratado en este Trabajo de Fin de Grado es el de los momentos aerodinámicos, esto se debe a que es algo más complejo que obtener simplemente una fuerza. Ya que para hallar estos momentos se necesitaría de todo el paquete aerodinámico completo e incluso conocer parámetros de suspensión. Una vez se tenga esto, se podrían hacer simulaciones en frenada para estudiar como la aerodinámica ayuda a frenar el coche. Para simular esto se debería imponer una velocidad de entrada al volumen de control decreciente.

Un ámbito que no ha englobado este Trabajo de Fin de Grado es el de la fabricación. Todavía quedan estudios por hacer sobre la mejor forma de fabricar estas piezas. Aunque todo indica que la manera más óptima es con la ayuda de moldes de madera, realizando una laminación de la fibra de carbono con la ayuda de una bomba de vacío.

7. Referencias

- [1] Bangalore Jalappa, G. (2015). *Design and optimization of undertray for Formula SAE*. Arlinton.
- [2] Dahlberg, H. (s.f.). *Aero dynamic development of Formula Student race car*.
- [3] de Oliveira Samel Moraes, A., Laranjeira da Cunha Lage, P., Coelho Cunha, G., & Lopes Rodrigues da Silva, L. F. (2013). *Analysis of the non-orthogonality correction of finite volume discretization on unstructured meshes*. Rio de Janeiro.
- [4] Fernández Gascón, J. A. (2018). *Diseño y fabricación de paquete aerodinámico para Formula Student*. Madrid.
- [5] Gómez Lendínez, D. (2013). *Aerodynamic Design of Formula Student Car*. Madrid.
- [6] González Ochoa, N. (2019). *Diseño y fabricación del fondo plano para Formula Student*. Madrid.
- [7] Mateos Corona, J. L. (2017). *Estudio y diseño aerodinámico de un fondo plano*. Sevilla.
- [8] Owen, S. J. (1998). *A Survey of Unstructured Mesh Generation Technology*.
- [9] Rogowski, K. (2018). *Numerical studies on two turbulence models and a laminar model for aerodynamics of a vertical-axis wind turbine*.
- [10] Tecmovia. (2013). *La aerodinámica y la eficiencia: un vistazo a la historia*. *Diario Motor*.

ANEXO: Objetivo de desarrollo sostenible

En un proyecto centrado en la simulación computacional resulta difícil el encontrar una relación clara con un objetivo de desarrollo sostenible. Por eso se va a apoyar el proyecto del diseño de elementos aerodinámicos en el hecho de que estos son implementados en un coche eléctrico. El objetivo de desarrollo sostenible número 7 indica que se debe garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todas y todos. Esto incluye sin duda a las energías renovables.

A pesar de que el diseño aerodinámico no cambie por el hecho de que el coche sea eléctrico, sí que es cierto que es mejor para todos que el monoplaza sea 100% eléctrico. La competición de Formula Student tiene una categoría de coches de combustión y otra de coches eléctricos y gracias al esfuerzo de todos se está consiguiendo que esta última gane cada vez más y más terreno. Esto es debido a que el coche eléctrico va tomando cada vez más importancia, no solo en coches particulares sino también en coches de competición como pueden ser los Fórmula E.

Otro objetivo de desarrollo sostenible en el que este proyecto se apoya es en el número 9 que trata sobre innovación. El reglamento de Formula Student es muy abierto, y más en el departamento de aerodinámica, donde todos los equipos que compiten tienen una solución distinta a un problema común. Además, por normativa, todos los años se debe incluir en el diseño del coche algún elemento único que no se haya visto antes en monoplazas de este estilo. Sin duda, esto favorece mucho el lado creativo de los ingenieros y buscan la innovación sobre cualquier cosa.