



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

## TRABAJO FIN DE GRADO ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DEL ALERÓN DELANTERO DE UN MONOPLAZA DE FORMULA STUDENT

Autor: Juan Gordillo Abengózar

Directores: Luis Manuel Mochón Castro y José Rubén Pérez  
Domínguez

Madrid

Agosto de 2022



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
*Estudio y Optimización del Alerón Delantero de un Monoplaza de Formula Student*  
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2021/22 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.: Juan Gordillo Abengózar

Fecha: 23/ 08/ 2022

Autorizada la entrega del proyecto

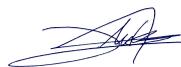
LOS DIRECTORES DEL PROYECTO

**LUIS MANUEL  
MOCHON CASTRO**

Firmado digitalmente por LUIS MANUEL MOCHON  
CASTRO  
Nombre de reconocimiento (DN): c=ES, sn=MOCHON  
CASTRO, givenName=LUIS MANUEL,  
serialNumber=IDCES-29080555E, cn=LUIS MANUEL  
MOCHON CASTRO  
Fecha: 2022.08.29 09:07:16 +02'00'

Fdo.: Luis Manuel Mochón Castro

Fecha: ...../ ...../ .....



Firmado digitalmente  
por José Rubén Pérez  
Domínguez  
Fecha: 2022.08.26  
23:23:50 +02'00'

Fdo.: José Rubén Pérez Domínguez

Fecha: ...../ ...../ .....





# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

## TRABAJO FIN DE GRADO ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DEL ALERÓN DELANTERO DE UN MONOPLAZA DE FORMULA STUDENT

Autor: Juan Gordillo Abengózar

Directores: Luis Manuel Mochón Castro y José Rubén Pérez  
Domínguez

Madrid

Agosto de 2022



# Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres. No solo la oportunidad que me dieron al poder estudiar en el ICAI, sino el apoyo que me han dado desde siempre para alcanzar mis objetivos y todo lo que me han enseñado, y me seguirán enseñando, a lo largo de mi vida. Sin ellos nada de esto hubiera sido posible.

En segundo lugar, quisiera agradecer al resto de mi familia todo lo que han hecho siempre por mí. A mis abuelos, paternos y maternos, que siempre han complementado de la mejor forma posible la educación de mis padres. En especial a mi abuelo Eugenio, de quien he heredado el perfeccionismo y el querer hacer las cosas de la mejor forma posible. También a mis tíos, en especial a Eugenio, con quien comparto la vocación tecnológica y quien me ha ayudado más de una vez en más de una asignatura a lo largo de la carrera. Y no me puedo olvidar de mi querida hermana Mariví, que siempre ha estado conmigo, mientras crecíamos juntos y que me ha ayudado en innumerables ocasiones.

En tercer lugar, me gustaría agradecer a todos mis amigos el apoyo que siempre me han dado, en especial a los que he conocido en estos últimos cuatro maravillosos años y con quienes he compartido penas y alegrías: David, Lucas, Pedro, Jorge, ... y de un modo muy muy especial a Teresa. Siempre has sido un pilar donde apoyarme en los peores momentos y un motor que me ha empujado a dar todo lo mejor de mí. Siempre te estaré agradecido por todo lo que has hecho por mí.

Finalmente, agradecer a todos los profesores que he tenido desde que entré en los Salesianos de Mérida con tres años. Gracias por educarme y enseñarme no solo lo que estaba en los libros, sino por brindarme una educación integral. Y de un modo especial a Luis y Rubén por aceptar dirigirme este Trabajo Fin de Grado.







# ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DEL ALERÓN DELANTERO DE UN MONOPLAZA DE FORMULA STUDENT

**Autor: Gordillo Abengózar, Juan**

Directores: Mochón Castro, Luis Manuel y Pérez Domínguez, José Rubén

Entidad Colaboradora: *ISC Formula Student Racing Team*

## RESUMEN DEL PROYECTO

En el presente Trabajo Fin de Grado se realiza el estudio aerodinámico mediante el paquete CFD *ANSYS-FLUENT* del alerón delantero de un monoplaça de *Formula Student*, así como una serie de propuestas para mejorar el guiado del flujo que realiza.

**Palabras clave:** Mecánica de Fluidos, CFD, aerodinámica, *Formula Student*

### 1. Introducción

El alerón delantero de un monoplaça de competición es un dispositivo aerodinámico de vital importancia para su rendimiento. Esto se debe a que es el primer elemento en entrar en contacto con la corriente de aire incidente y, por tanto, la interacción de esta con su geometría determinará la forma en que es guiada a lo largo del vehículo.

Los primeros alerones aparecieron en competición en la década de 1960 y tenían como objetivo aumentar la fricción del vehículo con el suelo para conseguir aumentar la velocidad de paso por curva, lo que se conoce como carga aerodinámica. Pero no fue hasta los años 90 y principios de los 2000 que se empezaron a utilizar también para guiar el flujo de aire incidente. Hoy en día, todos los alerones que se usan en competición tienen estas dos funciones.

En el presente Trabajo Fin de Grado se analizará el alerón delantero de un monoplaça de *Formula Student*, competición automovilística universitaria surgida en Estados Unidos a finales de la década de 1960.

### 2. Objetivos

Partiendo de una geometría diseñada maximizando la carga aerodinámica generada, se analizará el alerón delantero del monoplaça de *Formula Student* del *ISC Formula Student Racing Team* correspondiente a la temporada 2022 para conseguir satisfacer los siguientes objetivos:

- 1) Maximizar el caudal de aire que alimenta la refrigeración del monoplaça.
- 2) Estudiar la interacción del alerón con la corriente incidente y la evolución de su estela.
- 3) Tratar de energizar la estela con la aparición de vórtices que la guíen para que permanezca adherida a la carrocería del vehículo.

### 3. Material y Método

El presente Trabajo Fin de Grado se enmarca dentro de la Mecánica de Fluidos, al tratarse de un análisis de flujo externo. Para resolver las ecuaciones de la dinámica de fluidos que rigen el comportamiento del aire alrededor del monoplaza, se empleará el paquete CFD *ANSYS-FLUENT*.

Como en cualquier análisis CFD, se deben seguir una serie de pasos para la resolución del caso. Estos serán: descripción de la geometría de estudio, creación de la malla, configuración de la simulación y análisis de los resultados.

En primer lugar, a la hora de definir la geometría de estudio, se decide estudiar simplemente la mitad delantera del vehículo, ya que es la más relevante para los objetivos marcados. A continuación, debido a la simetría longitudinal que presenta el vehículo, se decide simplificar el modelo tomando solo una mitad. Una vez hecho esto, se debe definir el volumen de control, ya que este será el que habrá que mallar para resolver el caso. Este se tomará con unas medidas que garanticen que las paredes no interfieren en el flujo.

A continuación, se crea la malla. Para determinar la malla óptima, se realizarán tres *body of influence* de tamaños crecientes alrededor de la geometría de estudio, que se configurarán de forma que el tamaño de elemento de cada uno sea el doble del anterior. Una vez hecho esto, se realizarán tres iteraciones, con tamaños de elementos decrecientes en los *body of influence* para ver cómo cambian las variables de estudio al ajustar la malla.

Una vez obtenida la malla, se configurará la simulación seleccionando aire como fluido de trabajo, tomando el modelo  $k-\varepsilon$  como modelo de turbulencia, asignando las condiciones de contorno y fijando el criterio de convergencia. En cuanto a las condiciones de contorno asignadas, se impondrá una velocidad lineal al vehículo de 17 m/s y se garantizará una presión atmosférica a la salida del volumen de control.

#### **4. Resultados**

Una vez simulados los cuatro casos (la malla base más las tres iteraciones variando los tamaños de los tres *body of influence*), se obtienen los resultados presentados en el Gráfico 1. Analizándolo, se observa que las variaciones en las variables de estudio son pequeñas (menores que el 5%), por lo que se tomará el criterio de tiempo de cálculo para elegir la malla óptima. Basándose en este criterio, se decide utilizar una malla de alrededor de 4 millones de elementos.

Realizando un análisis del flujo en el caso estudiado, se observa la aparición de recirculación de flujo en la estela de la rueda, lo que aumenta considerablemente el término de la fuerza de arrastre asociado a la presión.

Una vez analizado el flujo en la geometría de referencia, se propone una nueva geometría del alerón formada por una zona de tres elementos en cascada entre el morro y la parte interior de la rueda. Para su diseño, se simularán tres configuraciones, una con el tercer elemento con un ángulo de ataque de 30°, otra con un ángulo de 40° y otra con uno de 45°, para determinar el ángulo óptimo en función de los objetivos del proyecto.

Al simular las tres configuraciones, se observa que en las tres disminuye la velocidad del flujo que llega a la refrigeración y que aumenta la turbulencia en la estela del alerón.

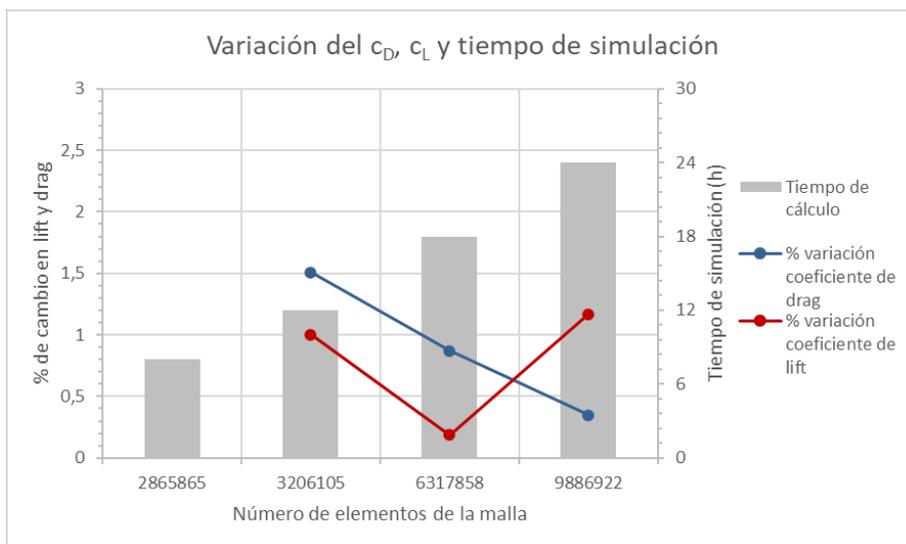


Gráfico 1. Representación de las variaciones porcentuales de sustentación y arrastre entre las diferentes iteraciones del análisis de sensibilidad de malla, así como del tiempo de cálculo de cada una.

## 5. Conclusiones

Del estudio realizado en este Trabajo Fin de Grado se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Con las mejoras propuestas no se han conseguido aumentar el caudal de aire de la refrigeración ni energizar la estela del alerón.
- Se ha estudiado la aparición de vórtices en los *endplates* del alerón y cómo estos guían la estela turbulenta de la rueda.
- Se ha conseguido aumentar ligeramente la carga aerodinámica generada por el alerón para un ángulo de  $37^\circ$ , como se puede ver en la Gráfica 2. Estas mejoras se deberán cuantificar en forma de tiempo por vuelta para determinar si son aplicables a futuros diseños o no.

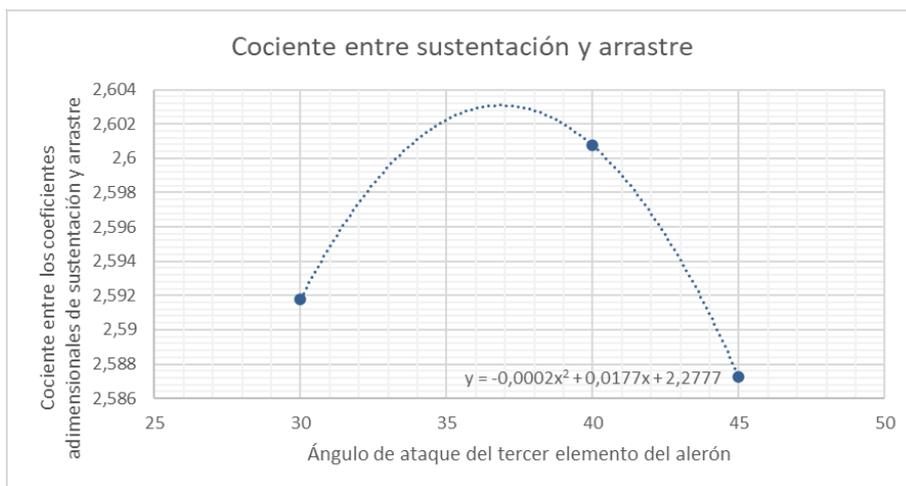


Gráfico 2. Representación del cociente entre los coeficientes adimensionales de sustentación y fuerza de arrastre para cada ángulo de ataque del tercer elemento analizado. En el gráfico se ha representado también la curva de regresión que ajusta los puntos obtenidos, así como su fórmula.

# STUDY AND OPTIMIZATION OF THE FRONT WING OF A FORMULA STUDENT CAR

**Author: Gordillo Abengózar, Juan**

Supervisors: Mochón Castro, Luis Manuel y Pérez Domínguez, José Rubén

Collaborating Entity: *ISC Formula Student Racing Team*

## ABSTRACT

In this Final Degree Project, the aerodynamic study of the front wing of a Formula Student car is carried out using the CFD package *ANSYS-FLUENT*. A series of proposals to improve the flow guidance it performs will also be studied.

**Keywords:** Fluid Mechanics, CFD, aerodynamics, *Formula Student*

### 1. Introduction

The front wing of a single-seater racing car is an aerodynamic device of vital importance to its performance. This is because it is the first element to encounter the incident airflow and, therefore, the interaction of the flow with its geometry will determine how it is guided along the vehicle.

The first wings appeared in motorsport in the 1960s. They were invented to increase the vehicle's friction with the ground to increase cornering speed, known as downforce. But it was not until the 1990s and early 2000s that they were also used to guide the airflow. Today, all wings used in motorsport have both functions.

This Final Degree Project will analyze the front wing of a Formula Student car. Formula Student is a university motor racing competition that emerged in the United States at the end of the 1960s.

### 2. Objectives

Starting from a geometry designed to maximize the downforce, the front wing of the *ISC Formula Student Racing Team* car of the 2022 season will be analyzed to achieve the following objectives:

- 1) Maximize the airflow that enters the cooling systems of the car.
- 2) Study the interaction of the wing with the airflow and the evolution of its wake.
- 3) Try to energise the wake so that it remains attached to the vehicle body. This will be done by creating vortices.

### 3. Materials and methods

This Final Degree Project is framed within Fluid Mechanics, as it is an analysis of external flow. To solve the fluid dynamics equations governing the behavior of the air around the car, the CFD package *ANSYS-FLUENT* will be used.

As in any CFD analysis, a series of steps must be followed to solve the case. These will be description of the geometry, mesh creation, simulation setup and analysis of the results.

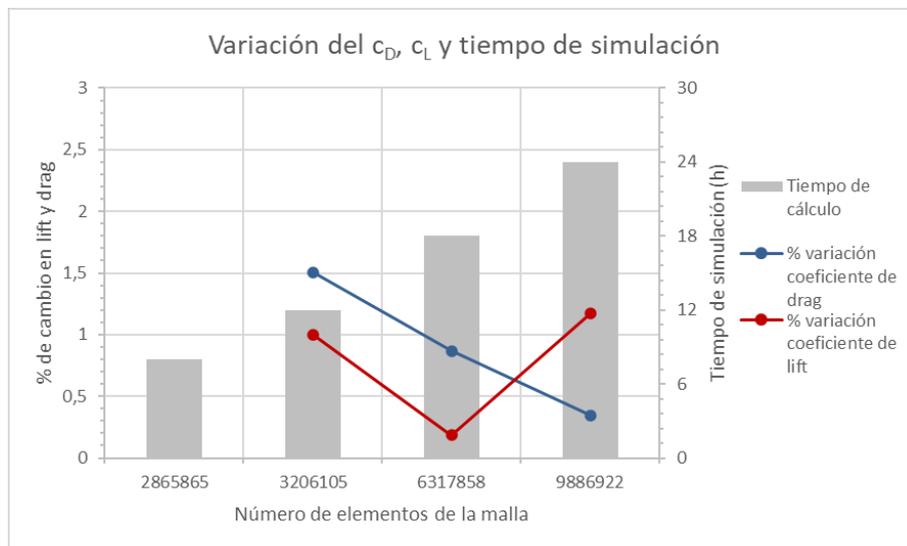
Firstly, when defining the study geometry, it was decided to study only the front half of the vehicle, as this is the most relevant for the objectives set. Then, due to the longitudinal symmetry of the vehicle, it was decided to simplify the model by taking only one half. Once this has been done, the control volume must be defined, as this will be the one that will have to be meshed to solve the case. This will be taken with those measurements that guarantee that the walls do not interfere with the flow.

Then, the mesh is created. To determine the optimal mesh, three body of influence of increasing sizes will be made around the study geometry. They will be configured so that the element size of each one is twice the size of the previous one. Once this is done, three iterations will be performed, with decreasing element sizes in each body of influence to see how the study variables change as the mesh is adjusted.

Once the mesh has been obtained, the simulation will be configured. First, air will be selected as the working fluid. Then, the  $k-\varepsilon$  model will be used as the turbulence model. And finally, boundary conditions will be assigned, and the convergence criterion will be settled. Regarding the assigned boundary conditions, a linear velocity of 17 m/s will be imposed on the vehicle and an atmospheric pressure will be guaranteed at the outlet of the control volume.

#### 4. Results

Once all four cases have been simulated (the base mesh plus the three iterations), the results presented in Graph 1 are obtained. When they are analyzed, it is observed that the variations in the study variables are small (less than 5%), so the calculation time criterion will be used to choose the optimal mesh. Based on this criterion, it is decided to use a mesh of around 4 million elements.



Graph 1. Representation of the percentage variations of lift and drag between the different iterations of the mesh sensitivity analysis, as well as the calculation time of each iteration.

Flow analysis in the case studied shows the occurrence of flow recirculation in the wing's wake of the wheel, which considerably increases the drag force term associated with pressure.

After analyzing the flow in the reference geometry, a new front wing geometry is proposed. This consists of a three-element cascading area between the nose and the inside of the wheel. For its

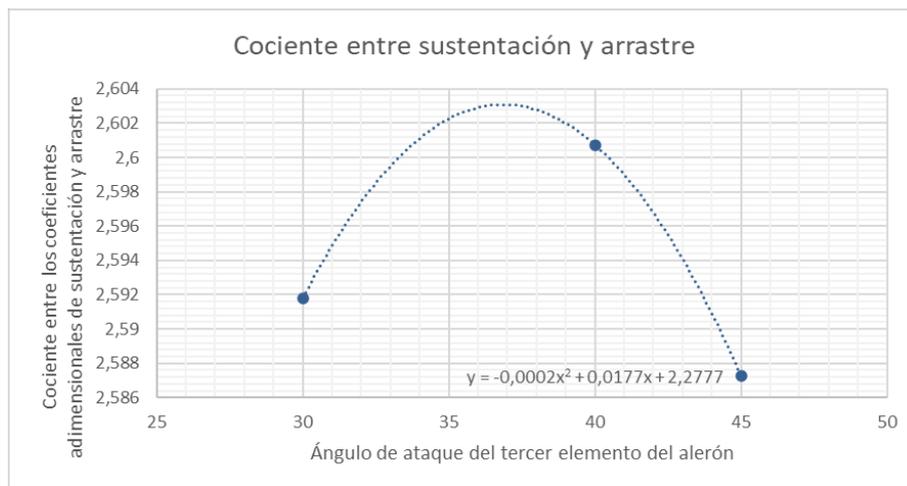
design, three configurations will be simulated to determine the optimum angle according to the project's objectives. One with the third element with an angle of attack of 30°. Another with an angle of 40°. And finally, another with an angle of 45°.

When the simulation of the three configurations is finished, it is observed that in all three configurations the flow velocity entering the cooling system decreases and the turbulence in the wing's wake increases.

## 5. Conclusiones

The following conclusions can be drawn from the study carried out in this Final Degree Project:

- The proposed improvements have not succeeded neither increasing the cooling airflow nor energizing the front wing's wake.
- The appearance of vortices in the aileron endplates and how they guide the turbulent wake of the wheel has been studied.
- The downforce generated by the wing has been increased very little for an angle of 37°, as can be seen in Graph 2. These will have to be quantified in terms of lap time to determine whether they are applicable to future designs or not.



Graph 2. Representation of the quotient between the dimensionless lift and drag force coefficients for each angle of attack of the third element analysed. The graph also shows the regression curve that adjusts the points obtained, as well as its formula.





## *Índice de la memoria*

<b>Capítulo 1. Contextualización del Trabajo Fin de Grado.....</b>	<b>29</b>
1.1 El Alerón Delantero de un Monoplaza de Competición [2] .....	30
1.2 La Formula Student .....	31
<b>Capítulo 2. Estado del Arte.....</b>	<b>35</b>
2.1 Los Alerones en la Historia de la Aerodinámica del Automóvil de Competición .....	35
2.2 El ISC y su Trayectoria en la Formula Student .....	39
2.3 Motivación del proyecto.....	41
<b>Capítulo 3. Objetivos del Trabajo Fin de Grado.....</b>	<b>43</b>
<b>Capítulo 4. Resumen de la Mecánica de Fluidos .....</b>	<b>45</b>
4.1 Definición de Fluido y Conceptos Básicos [14] .....	45
4.2 Propiedades de los Fluidos .....	46
4.3 Flujos de Fluido.....	49
4.4 Ecuaciones Fundamentales de la Dinámica de Fluidos.....	52
4.5 Flujo Externo.....	58
4.6 Introducción a los CFD [19] .....	61
<b>Capítulo 5. Metodología .....</b>	<b>65</b>
5.1 Método de Trabajo .....	65
5.2 Descripción de las Tecnologías .....	66
<b>Capítulo 6. Definición del Modelo de Estudio.....</b>	<b>67</b>
6.1 Definición de la Geometría de Estudio.....	67
6.2 Definición de la Malla de Trabajo. Análisis de Sensibilidad de Malla .....	68
6.3 Configuración de la Simulación .....	73
<b>Capítulo 7. Análisis del Alerón Delantero del IFS-04 .....</b>	<b>77</b>
7.1 Análisis de Sensibilidad de Malla .....	77
7.2 Estudio aerodinámico del Alerón del IFS-04 .....	80
<b>Capítulo 8. Análisis de las Mejoras Propuestas.....</b>	<b>85</b>
8.1 Descripción de las Geometrías Propuestas.....	85
8.2 Análisis de las Geometrías Propuestas .....	87



<b>Capítulo 9. Conclusiones y Trabajos Futuros .....</b>	<b>91</b>
9.1 Conclusiones extraídas del Análisis de las Geometrías Propuestas .....	91
9.2 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	94
<b>Anexos .....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXO I. Parámetros para Configurar la Simulación Realizada en Ansys-Fluent. 97</b>	
Models .....	97
Material Properties.....	97
Cell Zone Conditions .....	98
Boundary Conditions .....	98
Solver Settings.....	100
<b>ANEXO II. Mapas de Presión y Velocidad de la Geometría Base..... 103</b>	
Mapas de Presión Transversales a la Geometría.....	103
Mapas de Velocidad Transversales.....	107
Mapas de Presión Longitudinales .....	111
Mapas de Velocidad Longitudinales.....	114
<b>ANEXO III Mapas de velocidad de la sección de entrada en los pontones para todas las geometrías estudiadas..... 117</b>	
<b>ANEXO IV Mapas de Velocidad, Presión y Turbulencia de las Geometrías Propuestas .....</b>	<b>123</b>
Mapas de Velocidad, Presión e Intensidad de Turbulencia de la estela del Alerón de la Geometría de 30°.....	123
Mapas de Velocidad, Presión e Intensidad de Turbulencia de la estela del Alerón de la Geometría de 40°.....	127
Mapas de Velocidad, Presión e Intensidad de Turbulencia de la estela del Alerón de la Geometría de 45° .....	131
Mapas de Velocidad y Presión donde se Aprecia la Aparición de Vórtices.....	135
<b>ANEXO V Representación del Flujo Alrededor de la Geometría de Estudio .....</b>	<b>143</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>147</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>149</b>



## *Índice de figuras*

Imagen 1. Monoplaza de <i>Formula 1</i> del equipo Oracle Red Bull Racing correspondiente a la temporada 2022. En él se puede apreciar el alerón delantero que montan este año los monoplazas de la categoría. [1] .....	30
Imagen 2. Ilustración de un alerón delantero de un monoplaza de F1 con los elementos citados anteriormente. [3] .....	31
Imagen 3. Monoplaza de <i>Formula SAE</i> de la <i>University of Texas at Arlington</i> en 1986, cinco años después de la primera edición de la competición. [4].....	32
Imagen 4. Dimensiones máximas y posicionamiento de los elementos aerodinámicos de un monoplaza de <i>Formula Student</i> . [5].....	34
Imagen 5. Portada del 6 de agosto de 1894 del periódico francés <i>Le Petit Journal</i> que hace referencia a la carrera de « <i>Coches sin Caballos</i> » <i>París-Rouen</i> . Esta carrera está considerada como la primera prueba automovilística de la historia. [7] .....	35
Imagen 6. Imagen del <i>Benz Tropfenwagen</i> de 1923. [8] .....	36
Imagen 7. Imagen del <i>Chaparral 2E</i> de 1966. Primer coche de competición en montar un alerón sobre las manguetas del eje trasero. [9] .....	37
Imagen 8. Imagen del <i>Lotus 49B</i> con <i>Graham Hill</i> al volante después de ganar el <i>Gran Premio de Mónaco</i> de 1969.. Presenta los primeros alerones montados en un monoplaza de <i>Formula 1</i> . [10].....	38
Imagen 9. Imagen del <i>Ferrari SF71H</i> de <i>Formula 1</i> de la temporada 2018. En él se puede ver un claro ejemplo de los alerones delanteros que montaban los equipos en aquel año, estos han sido, hasta la fecha, los más sofisticados en la historia de la categoría. [11].....	39
Imagen 10. Alerón delantero del IFS-03, monoplaza de la temporada 2019/2021 del ISC Formula Student Racing Team de la Universidad Pontificia Comillas.....	42
Imagen 11. Vista del volumen de control construido con los tres <i>body of influence</i> . .....	71
Imagen 12. Vista en detalle de los tres <i>body of influence</i> utilizados. ....	71
Imagen 13. Mapa de presión estática sobre la geometría de estudio y el suelo. ....	81



Imagen 14. Representación de una intersección de dos mapas de energía cinética de la turbulencia donde se pueden apreciar las turbulencias generadas por los desprendimientos de capa límite en la estela del alerón. El plano que contiene la geometría del alerón se encuentra cerca del <i>endplate</i> exterior. ....	82
Imagen 15. Representación de los vectores velocidad sobre la geometría de estudio y el suelo del volumen de control. Se puede apreciar cómo en la estela de la rueda la velocidad disminuye considerablemente, llegando a producirse recirculaciones de flujo. Esto es efecto de la turbulencia que genera la rueda. ....	83
Imagen 16. Detalle de la Imagen 15 donde se pueden ver la mayoría de vectores velocidad representados en la parte superior del fondo plano y la parte inferior del pontón apuntando aguas arriba. Estas son las recirculaciones de flujo que aparecen en la estela de la rueda. ....	83
Imagen 17. Representación del mapa de energía cinética de la turbulencia en la estela de la rueda. Se puede ver cómo esta es mayor que en la corriente libre (parte derecha de la imagen). ....	84
Imagen 18. Imagen de diseño de alerón con el tercer elemento con un ángulo de ataque de 30°. <i>SolidWorks</i> . ....	86
Imagen 19. Imagen de diseño de alerón con el tercer elemento con un ángulo de ataque de 40°. <i>SolidWorks</i> . ....	86
Imagen 20. Imagen de diseño de alerón con el tercer elemento con un ángulo de ataque de 45°. <i>SolidWorks</i> . ....	87
Imagen 21. Representación de los vectores velocidad en la estela del alerón con la configuración de 30°. Se observa una fuerte recirculación de flujo proveniente tanto del borde de fuga del primer como del segundo elemento del alerón. ....	88
Imagen 22. Representación de los vectores velocidad en la estela del alerón con la configuración de 40°. Se observa que en este caso la recirculación de flujo aparece en el borde de fuga del segundo elemento del alerón y es menos fuerte que en el caso anterior. ....	89
Imagen 23. Representación de los vectores velocidad en la estela del alerón con la configuración de 45°. Al igual que en la geometría de 40°, las reirculaciones que se observan son menores que en la geometría de 30°. ....	89



Imagen 24. Mapa de presión estática en un plano transversal a la geometría situado en la parte trasera del alerón. Se puede apreciar la aparición de un vórtice en el extremo superior del <i>endplate</i> externo.....	104
Imagen 25. Mapa de presión estática en un plano transversal a la geometría situado en la rueda del modelo. Se aprecia la depresión causada por el desprendimiento de capa límite alrededor de la rueda.....	105
Imagen 26. Mapa de presión estática en un plano transversal a la geometría situado al inicio del fondo plano. Se aprecia la depresión de la estela de la rueda.....	106
Imagen 27. Mapa de velocidad en un plano transversal a la geometría situado en la parte trasera del alerón. Se puede apreciar la aparición de un vórtice en el extremo superior del <i>endplate</i> externo. Así como la aparición de zonas donde se ralentiza el flujo cerca de la parte inferior de los <i>endplates</i> . .....	108
Imagen 28. Mapa de en un plano transversal a la geometría situado en la rueda del modelo. Se aprecia la depresión causada por el desprendimiento de capa límite alrededor de la rueda. ....	109
Imagen 29. Mapa de velocidad en un plano transversal a la geometría situado al inicio del fondo plano. Se aprecia la depresión de la estela de la rueda.....	110
Imagen 30. Mapa de presión estática en un plano transversal a la geometría de estudio que corta a los dos elementos del alerón delantero. Se puede apreciar cómo las presión es constante en la corriente incidente. ....	112
Imagen 31. Detalle cerca de la geometría del monoplaza del mapa de presión estática anterior. Se pueden apreciar las diferencias de presiones generadas en cada elemento del alerón, así como las depresiones de las estelas del alerón y la rueda.....	113
Imagen 32. Mapa de velocidad en un plano transversal a la geometría de estudio que corta a los dos elementos del alerón delantero. Se puede apreciar cómo las velocidad es constante en la corriente incidente.....	115
Imagen 33. Detalle cerca de la geometría del monoplaza del mapa de velocidad anterior. Se pueden apreciar las diferencias de presiones generadas en cada elemento del alerón, así como las depresiones de las estelas del alerón y la rueda. ....	116
Imagen 34. Mapa de velocidad en la sección de entrada del pontón de la geometría base. ....	118



Imagen 35. Mapa de velocidad en la sección de entrada del pontón de la geometría con ángulo de 30°.	119
Imagen 36. Mapa de velocidad en la sección de entrada del pontón de la geometría con ángulo de 40°.	120
Imagen 37. Mapa de velocidad en la sección de entrada del pontón de la geometría con ángulo de 45°.	121
Imagen 38. Mapa de velocidad en un plano longitudinal que corta al alerón por la parte de tres elementos correspondiente a la geometría de 30°. Se aprecian los efectos de la estela del alerón y la estela de la rueda.	124
Imagen 39. Mapa de presión estática en un plano longitudinal que corta al alerón por la parte de tres elementos correspondiente a la geometría de 30°. Se aprecian los efectos de la estela del alerón y la estela de la rueda.	125
Imagen 40. Mapa de energía cinética de turbulencia en un plano longitudinal que corta al alerón por la parte de tres elementos correspondiente a la geometría de 30°. Se aprecian los efectos de la estela del alerón y la estela de la rueda.	126
Imagen 41. Mapa de velocidad en un plano longitudinal que corta al alerón por la parte de tres elementos correspondiente a la geometría de 40°. Se aprecian los efectos de la estela del alerón y la estela de la rueda.	128
Imagen 42. Mapa de presión estática en un plano longitudinal que corta al alerón por la parte de tres elementos correspondiente a la geometría de 40°. Se aprecian los efectos de la estela del alerón y la estela de la rueda.	129
Imagen 43. Mapa de energía cinética de turbulencia en un plano longitudinal que corta al alerón por la parte de tres elementos correspondiente a la geometría de 40°. Se aprecian los efectos de la estela del alerón y la estela de la rueda.	130
Imagen 44. Mapa de velocidad en un plano longitudinal que corta al alerón por la parte de tres elementos correspondiente a la geometría de 45°. Se aprecian los efectos de la estela del alerón y la estela de la rueda.	132
Imagen 45. Mapa de presión estática en un plano longitudinal que corta al alerón por la parte de tres elementos correspondiente a la geometría de 45°. Se aprecian los efectos de la estela del alerón y la estela de la rueda.	133



Imagen 46. Mapa de energía cinética de turbulencia en un plano longitudinal que corta al alerón por la parte de tres elementos correspondiente a la geometría de 45°. Se aprecian los efectos de la estela del alerón y la estela de la rueda. ....	134
Imagen 47. Mapa de presión estática en un plano transversal a la geometría de estudio situado en la estela del alerón perteneciente a la configuración de 30°. Se pueden apreciar dos vórtices que han surgido en los bordes superiores de los <i>endplates</i> .....	136
Imagen 48. Mapa de velocidad en un plano transversal a la geometría de estudio situado en la estela del alerón perteneciente a la configuración de 30°. Se pueden apreciar dos vórtices que han surgido en los bordes superiores de los <i>endplates</i> . ....	137
Imagen 49. Mapa de presión estática en un plano transversal a la geometría de estudio situado en la estela del alerón perteneciente a la configuración de 40°. Se pueden apreciar dos vórtices que han surgido en los bordes superiores de los <i>endplates</i> .....	138
Imagen 50. Mapa de velocidad en un plano transversal a la geometría de estudio situado en la estela del alerón perteneciente a la configuración de 40°. Se pueden apreciar dos vórtices que han surgido en los bordes superiores de los <i>endplates</i> . ....	139
Imagen 51. Mapa de presión estática en un plano transversal a la geometría de estudio situado en la estela del alerón perteneciente a la configuración de 45°. Se pueden apreciar dos vórtices que han surgido en los bordes superiores de los <i>endplates</i> .....	140
Imagen 52. Mapa de velocidad en un plano transversal a la geometría de estudio situado en la estela del alerón perteneciente a la configuración de 45°. Se pueden apreciar dos vórtices que han surgido en los bordes superiores de los <i>endplates</i> . ....	141
Imagen 53. Representación de los vectores velocidad alrededor de la geometría de estudio con la configuración de 30°. ....	144
Imagen 54. Representación de los vectores velocidad alrededor de la geometría de estudio con la configuración de 40°. ....	145
Imagen 55. Representación de los vectores velocidad alrededor de la geometría de estudio con la configuración de 45°. ....	146





## *Índice de tablas*

Tabla 1. Restricciones en las medidas de los elementos aerodinámicos según la normativa de Formula Student 2022. [5].....	34
Tabla 2. Medidas recomendadas <sup>[15]</sup> para el volumen de control del estudio y medidas elegidas. ....	68
Tabla 3. Parámetros de la configuración del <i>capture curvature</i> .....	69
Tabla 4. Parámetros de la configuración del <i>capture proximity</i> .....	70
Tabla 5. Dimensiones de los tres <i>body of influence</i> que se utilizarán en la malla del caso de estudio.....	70
Tabla 6. Tamaños máximos de elemento para cada <i>body of influence</i> en cada una de las tres iteraciones realizadas.....	72
Tabla 7. Valores del sesgo ( <i>skewness</i> ) global y máximo obtenidos para cada una de las cuatro mallas utilizadas en el análisis de sensibilidad.....	73
Tabla 8. Condiciones de contorno del problema. ....	74
Tabla 9. Valores límite de las propiedades de trabajo para garantizar la convergencia del caso. ....	75
Tabla 10. Tamaños máximos de elemento para los <i>body of influence</i> de la malla final....	80
Tabla 11. Valores de carga aerodinámica y fuerza de arrastre para cada una de las geometrías estudiadas. ....	92
Tabla 12. Porcentajes de aumento de la carga aerodinámica y la fuerza de arrastre con respecto al caso base.....	92





# **Capítulo 1. CONTEXTUALIZACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO**

Una de las áreas más influyentes hoy en día en el rendimiento de un coche de competición es la aerodinámica. Esta se centra en el estudio de la interacción de la corriente de aire incidente en el coche con la carrocería de este y trata de aprovechar esta interacción para mejorar la adherencia del coche al circuito principalmente, pero también para mejorar la velocidad punta de este. Para ello, se han ido desarrollando a lo largo de los años diferentes dispositivos y soluciones con el fin de conseguir este propósito.

Una de las soluciones más empleadas es la utilización de alerones. Estos son alas de perfiles aerodinámicos como los utilizados en la aviación, pero orientados al revés que en un avión. En el presente Trabajo de Fin de Grado se estudiará y optimizará el diseño de un alerón delantero de un monoplaza de competición de Formula Student.



Imagen 1. Monoplaza de *Formula 1* del equipo Oracle Red Bull Racing correspondiente a la temporada 2022. En él se puede apreciar el alerón delantero que montan este año los monoplazas de la categoría. [1]

## ***1.1 EL ALERÓN DELANTERO DE UN MONOPLAZA DE COMPETICIÓN [2]***

Un alerón delantero es uno de los varios dispositivos aerodinámicos presentes hoy en día en un monoplaza de competición. Es, además, de vital importancia para el rendimiento aerodinámico global del vehículo al ser el primer elemento en entrar en contacto con la corriente de aire incidente, por lo que la interacción de esta con su geometría determinará la forma en que es guiada a lo largo del monoplaza. Por esta razón, se podría decir que el alerón delantero de un monoplaza tiene una doble función: por un lado, la de generar carga aerodinámica en el tren delantero, que es el principal objetivo de todos los elementos aerodinámicos presentes en un coche de carreras; por otro lado, el alerón delantero tiene la función de guiar el aire alrededor del vehículo para conseguir la mejor interacción posible de este con el resto de los elementos aerodinámicos presentes.

Las partes principales que componen un alerón delantero de un monoplaza de competición son:

- Plano principal: elemento con perfil de ala de mayor tamaño del alerón. Aparte de generar carga aerodinámica aporta integridad estructural al conjunto.

- Elementos secundarios o *flaps*: elementos con perfil de ala de menor tamaño que ayudan a aumentar el ángulo de ataque total del alerón.
- *Endplates*: situados a los lados de los elementos del alerón, sirven para estabilizar el flujo a la salida del monoplaza. También impiden la formación de vórtices de punta de ala, que aumentan el drag del vehículo. Los situados a los extremos del alerón suelen llevar adherido a ellos un *footplate*, que sirve para generar un vórtice controlado que selle, aerodinámicamente hablando, el lateral del fondo plano.
- *T-Wings* y otros elementos: sirven para generar vórtices controlados o para aumentar la carga aerodinámica generada en ciertas zonas del alerón.

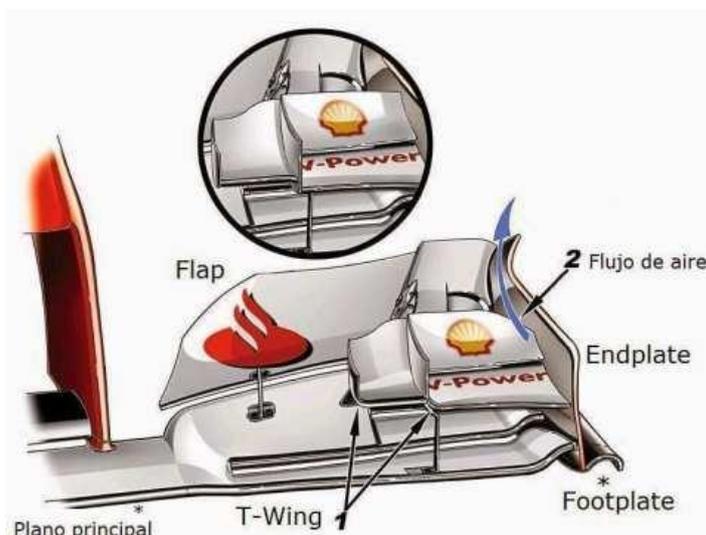


Imagen 2. Ilustración de un alerón delantero de un monoplaza de F1 con los elementos citados anteriormente.

[3]

## 1.2 LA FORMULA STUDENT

La *Formula Student* es una competición automovilística universitaria que promueve la excelencia en la ingeniería. En ella y a diferencia de otras categorías automovilísticas, no solo se valora la velocidad, sino que existen una serie de pruebas llamadas *estáticas* donde se valoran el diseño, la viabilidad económica y el modelo de negocios del proyecto entre otros.



La *Formula Student* surge en Estados Unidos a finales de los años 70 y principios de los años 80, bajo el amparo de la *Sociedad de Ingenieros de Automoción* (*SAE* por sus siglas en inglés). Actualmente, existen competiciones en numerosos países, en su mayoría europeos, donde universidades de todo el mundo compiten fabricando sus propios monoplazas. Estos están regulados por la normativa de *Formula SAE* y *FSG* (*Formula Student Alemania* por sus siglas en inglés).



Imagen 3. Monoplaza de *Formula SAE* de la *University of Texas at Arlington* en 1986, cinco años después de la primera edición de la competición. [4]

### 1.2.1 CATEGORÍAS

Los equipos participantes se dividen en tres categorías [4] según el estado de su proyecto, existiendo así:

- Clase 3: es la categoría de acceso. En ella compiten aquellos equipos que simplemente cuenten con un diseño del monoplaza, por lo que simplemente participarán en algunas de las denominadas *pruebas estáticas*.
- Clase 2: en esta categoría compiten aquellos equipos que tengan un monoplaza construido o medio construido (el requisito es tener un chasis) pero no listo para rodar.

- Clase 1: es la categoría principal. En ella compiten los monoplazas totalmente diseñados en todas las pruebas *estáticas* y *dinámicas* de la competición.

Cabe destacar que la normativa de *Formula Student* impide a un mismo equipo participar dos años seguidos en la misma categoría si esta es inferior a la Clase 1.

Existe otra clasificación en función del tipo de propulsión de los monoplazas, distinguiendo: monoplazas de combustión interna, monoplazas eléctricos y monoplazas autónomos.

### 1.2.2 PRUEBAS [5]

Como se ha bosquejado anteriormente, las pruebas que se celebran en cualquier competición de *Formula Student* se dividen en *estáticas* y *dinámicas*.

Las pruebas *estáticas* se basan en un análisis económico y técnico del vehículo. Se dividen en: análisis de costes, presentación del modelo de negocios y diseño. Las pruebas *dinámicas* son la competición propiamente dicha. En ellas los monoplazas compiten por el mejor tiempo en las pruebas de: *skidpad*, aceleración, *autocross* y resistencia. Para más información sobre las pruebas de la competición consultar los capítulos *S* y *D* de [5].

Las puntuaciones de todas las pruebas *dinámicas* se otorgan con una serie de fórmulas que define la competición en función del tiempo en que se han realizado y las penalizaciones (también definidas por la competición) que hayan podido recibir los equipos.

Finalmente, se establece una clasificación de los monoplazas con los resultados de todas las pruebas y se determina a la universidad ganadora.

### 1.2.3 RESUMEN DE LA NORMATIVA AERODINÁMICA [5]

En la sección *T8* de la normativa de *Formula Student* [5] se recogen las regulaciones que impone la competición a los dispositivos aerodinámicos presentes en el coche. A continuación, se resumen aquellas regulaciones que influyen directamente en el diseño del alerón delantero. Estas son principalmente regulaciones en las dimensiones de los elementos del alerón. Se presentan en la Tabla 1 y se ilustran en la Imagen 4.

Tabla 1. Restricciones en las medidas de los elementos aerodinámicos según la normativa de Formula Student 2022. [5]

<b>RESTRICCIONES DE ALTURA</b>	Dispositivos situados por delante del plano vertical del reposacabezas	Altura inferior a 500 mm
	Dispositivos situados por delante de las ruedas y que se sitúan en una parte exterior de la cara interna del neumático	Altura inferior a 250 mm
<b>RESTRICCIONES DE ANCHO</b>	Dispositivos con una altura superior a los 500 mm	No deben extenderse fuera del plano de la cara interna del neumático trasero
<b>RESTRICCIONES DE LONGITUD</b>	Dispositivos situados por delante del eje de las ruedas	No deben extenderse más allá de 700 mm del plano tangente a la parte frontal de la rueda delanteras

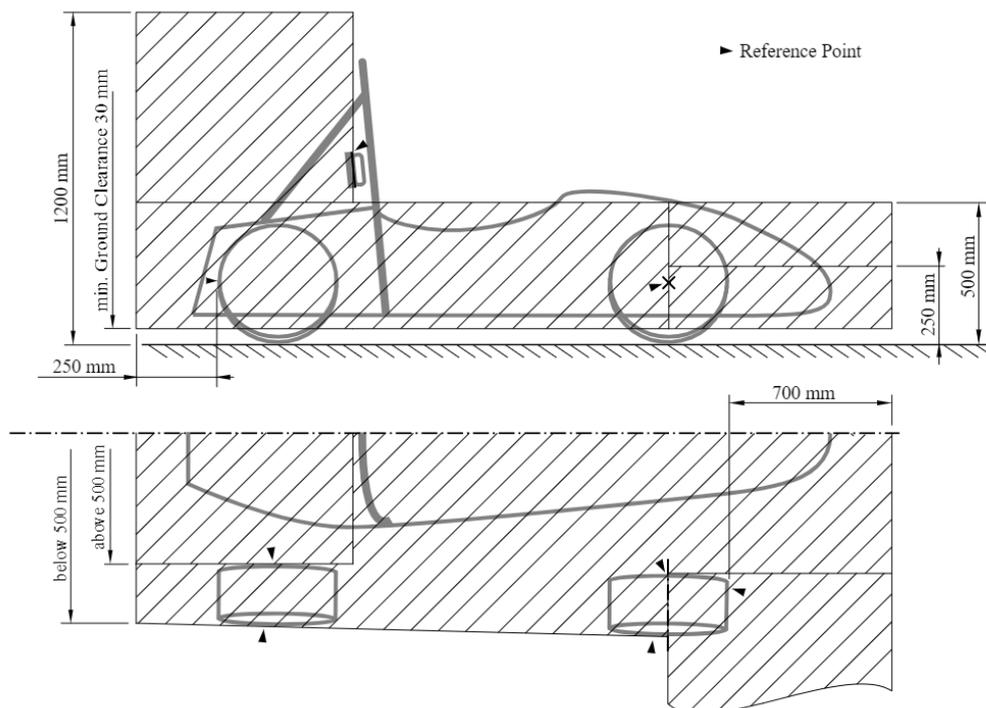


Imagen 4. Dimensiones máximas y posicionamiento de los elementos aerodinámicos de un monoplaza de *Formula Student*. [5]

## Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1 LOS ALERONES EN LA HISTORIA DE LA AERODINÁMICA DEL AUTOMÓVIL DE COMPETICIÓN

Desde la aparición de los primeros vehículos a finales del siglo XIX surgió el espíritu de competir por ver quién era el hombre y cuál era el coche más rápido. Así surgieron las primeras carreras de la historia del automóvil, como la *París-Rouen* de 1894 o la *Burdeos-París* de 1895. Durante la primera mitad del siglo XIX estas carreras proliferaron hasta la creación del *Campeonato Europeo de Pilotos* en 1931 (precursor del *Mundial de Formula 1* en 1950) y el *Campeonato Europeo de Rally* y el *Campeonato Mundial de Resistencia* en 1953. [6]

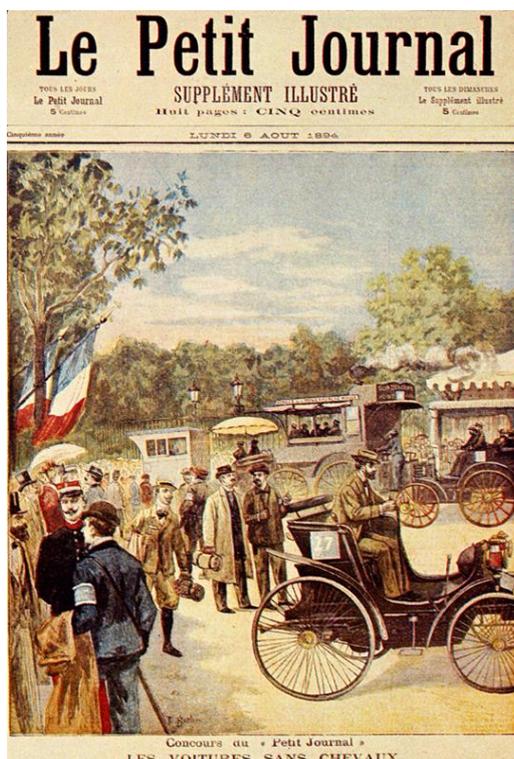


Imagen 5. Portada del 6 de agosto de 1894 del periódico francés *Le Petit Journal* que hace referencia a la carrera de «*Coches sin Caballos*» *París-Rouen*. Esta carrera está considerada como la primera prueba automovilística de la historia. [7]



En todos ellos, al igual que en las carreras que se habían ido celebrando año tras año hasta la creación de dichos campeonatos, los fabricantes trataban de mejorar sus coches para que estos pudieran ir más rápido. Para ello, uno de los objetivos que se persiguió desde el principio fue el de minimizar la resistencia al avance. Para ello, se aplicaron los conocimientos aerodinámicos que se tenían hasta entonces, estudiando peces y aves y buscando formas lo más similares posibles a gotas de agua. Así surgieron modelos como el *Tropfenwagen* de *Benz* (1923) cuyo nombre, igual al de un modelo de 1914 de la marca austriaca *Rumpler*, significa «Gota de Agua».

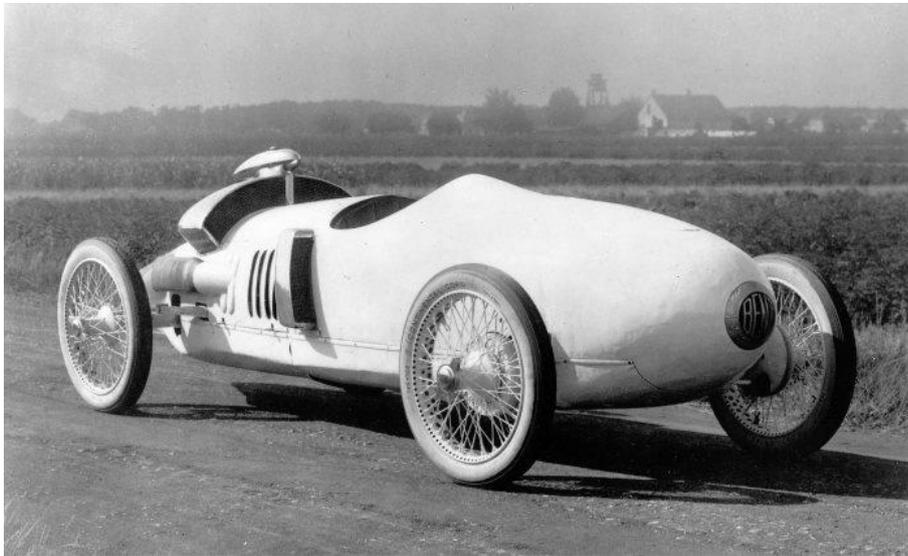


Imagen 6. Imagen del *Benz Tropfenwagen* de 1923. [8]

Esta idea de diseñar vehículos con forma de gota de agua para reducir la fuerza de arrastre se mantiene vigente hasta finales de los años 60, cuando se empieza a experimentar para aumentar la velocidad de los vehículos de competición aumentando la adherencia. Es entonces cuando se empiezan a emplear los primeros alerones (o alas invertidas como se les conocía en un principio). El principio detrás de esta idea es sencillo: un automóvil tiene limitada su velocidad en el paso por curva debido al límite de adherencia (relacionado con la fricción de las ruedas con el suelo), por lo que, si se consigue aumentar este límite, la velocidad de paso por curva también lo hará. Para ello, una forma fácil es aumentar la presión que ejerce el coche sobre el suelo. Esto se puede conseguir aumentando la masa simplemente, sin embargo, un aumento de la masa aumentará también la aceleración lateral del vehículo y, por tanto, el riesgo a volcar. La solución que se adopta finalmente es la de

utilizar alas igual que en los aviones, pero invertidas, para generar la fuerza de sustentación hacia el suelo.

Así, apareció en el año 1965 el *Chaparral 2C*, el primer vehículo de competición en usar un alerón trasero. Al año siguiente aparecieron el *Chaparral 2E*, evolución del anterior, pero modificando la posición del alerón para facilitar la conducción, y el *Peugeot CD* de las *24 Horas de Le Mans*, que presentaba dos aletas en la parte trasera para estabilizar el vehículo a altas velocidades. En la misma década, en *Formula 1*, *Colin Chapman*, ingeniero y fundador de *Lotus*, empezó a experimentar con esta idea, montando en el *Gran Premio de Mónaco* de 1968 los primeros alerones en un coche de Fórmula 1 en su *Lotus 49B*. El resultado fue un éxito total y pronto todos los monoplazas del campeonato utilizarían un alerón delantero y uno trasero.



Imagen 7. Imagen del *Chaparral 2E* de 1966. Primer coche de competición en montar un alerón sobre las manguetas del eje trasero. [9]



Imagen 8. Imagen del Lotus 49B con Graham Hill al volante después de ganar el Gran Premio de Mónaco de 1969.. Presenta los primeros alerones montados en un monoplaza de *Formula 1*. [10]

En los años posteriores los diseños se fueron mejorando con la implementación de *endplates* para estabilizar el aire en el borde de los alerones y el desarrollo de alerones en cascada para aumentar el ángulo de ataque sin que se produzca un desprendimiento de la capa límite. Pero a partir de los años 90 se empezó a experimentar con diseños de alerones delanteros que no solo consiguieran generar la fuerza descendente (o carga aerodinámica como ya se le conocía) necesaria para aumentar la velocidad de paso por curva, si no que se buscaba que estos «guiaran» el flujo de aire alrededor del coche. Así, el Tyrrell 019 de 1990 presentaba un morro más elevado para aumentar el flujo de aire debajo del coche y los *endplates* estaban diseñados para guiar el flujo alrededor de las ruedas. Durante las décadas siguientes los diseños de los alerones se complicaron en gran medida con la aparición de más elementos y aletas capaz de generar flujos rotacionales que desviarán las turbulencias de las ruedas delanteras, hasta que, en 2018, la *Federación Internacional del Automóvil* decidió simplificar por normativa los diseños, ya que estos flujos rotacionales que se creaban en el alerón delantero afectaban a la capacidad de un coche de seguir a otro.



Imagen 9. Imagen del *Ferrari SF71H* de *Formula 1* de la temporada 2018. En él se puede ver un claro ejemplo de los alerones delanteros que montaban los equipos en aquel año, estos han sido, hasta la fecha, los más sofisticados en la historia de la categoría. [11]

Actualmente, los diseños de alerones delanteros en los monoplazas de *Formula 1* constan de cuatro elementos unidos al morro y que se curvan en los extremos formando una sola pieza [12], con el fin de simplificar los diseños y minimizar los flujos rotacionales que aparecen al interactuar el alerón con la corriente incidente.

## ***2.2 EL ISC Y SU TRAYECTORIA EN LA FORMULA STUDENT***

El ISC, *Club de Velocidad del ICAI* (ISC por sus siglas en inglés) en un origen y actualmente *ISC Racing Team*, surge en el año 2015 en la *Escuela Superior de Ingeniería (ICAI)* de la *Universidad Pontificia Comillas* de Madrid, como una asociación de estudiantes apasionados del mundo del motor, para así recoger todos los proyectos que se pudieran dar dentro de la universidad relacionadas con este sector.

La primera participación de la asociación en una competición estudiantil tiene lugar en el año 2017 en la competición de *MotoStudent* (análoga a la anteriormente expuesta *Formula Student*, pero con prototipos de ciclomotores).

El equipo de *Formula Student*, el *ISC Formula Student Electric* en un principio y actualmente *ISC Formula Student Racing Team* surge en el otoño de 2016 y compite por



primera vez en la edición de *Formula Student Spain* de 2018 con el monoplaza *IFS-01*. Desde entonces y hasta la fecha de este Trabajo Fin de Grado, han competido un total de cuatro monoplazas en las ediciones de la misma competición de 2018, 2019, 2021 y 2022, coincidiendo este último año con la participación del equipo en la competición de *Formula Student Italy*. De todos los prototipos diseñados y fabricados, el primero en poder llegar a las pruebas dinámicas fue el *IFS-04* en la edición de *Formula Student Italy* de 2022.

### 2.2.1 LA AERODINÁMICA EN EL ISC FORMULA STUDENT RACING TEAM

El primer monoplaza del equipo, el *IFS-01* contó con un paquete aerodinámico formado por carenado delantero y lateral, fondo plano y alerón trasero (el alerón delantero se diseñó, pero no llegó a fabricarse), pero participó en la Clase 2 de la competición. Al año siguiente, la dirección del equipo decidió centrar todos sus esfuerzos en los sistemas de propulsión, transmisión y tracción del coche, por lo que la aerodinámica pasó a un segundo plano. Es por ello que se decidieron eliminar los alerones del *IFS-02* y se decidió que la pieza fundamental del paquete aerodinámico del monoplaza sería una versión optimizada del fondo plano. Ese año se consiguió un monoplaza mucho más optimizado, pero que, al igual que su predecesor, no participó en las pruebas dinámicas.

El monoplaza siguiente, el *IFS-03* se diseñó con un proyecto a dos años que consistiría en una evolución del *IFS-02*. Por ello, se decidió diseñar y fabricar el primer paquete aerodinámico del equipo con alerones delantero y trasero y fondo plano. Los diseños se realizaron optimizando la carga aerodinámica generada por cada uno de ellos y buscando cierta armonía aerodinámica en su conjunto. El resultado fue un paquete aerodinámico bastante avanzado (en comparación con los anteriores), aunque contaba con algunas carencias, especialmente en el morro y los pontones.

El último monoplaza hasta la fecha del equipo, el *IFS-04* contó con el mismo paquete aerodinámico de su predecesor, al tratarse del mismo monoplaza, aunque con cambios menores en la parte frontal del chasis. Por ello, se aprovechó para mejorar en aquellas áreas en las que se había visto el año anterior que suponían puntos débiles para el monoplaza desde el punto de vista aerodinámico. Así, se diseñó un nuevo morro minimizando la fuerza de arrastre que este generaba, se diseñaron unos pontones buscando conseguir una mayor



adherencia del flujo de aire a estos y se carenó todo el monoplaza para eliminar algunas turbulencias que aparecían al interactuar el aire con algunas partes descubiertas.

### **2.3 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO**

Aunque se consiguió una evolución bastante buena del paquete aerodinámico del *IFS-03*, el diseño del monoplaza seguía siendo bastante sencillo desde el punto de vista aerodinámico comparado con los principales equipos de la competición, y el alerón delantero se erigía como la principal área de mejora.

Como se ha indicado anteriormente, el alerón delantero que montaron tanto el *IFS-03* como el *IFS-04* se diseñaron buscando maximizar la carga aerodinámica generada en la parte frontal del monoplaza. Sin embargo, no se buscó usar este dispositivo aerodinámico para guiar la corriente de aire hacia las zonas de interés. Es por ello que en este Trabajo Fin de Grado se va a proponer una optimización del modelo existente buscando conseguir ese guiado de la corriente incidente alrededor del monoplaza.

#### **2.3.1 DESCRIPCIÓN DEL ALERÓN DELANTERO DEL *IFS-04***

El alerón delantero montado en los monoplazas *IFS-03* e *IFS-04*, estaba formado por un plano principal y dos elementos laterales a ambos lados del morro. Así, se creaba una geometría de dos elementos en cascada que ayudaba a aumentar el ángulo global del alerón para conseguir una mayor carga aerodinámica. Los perfiles empleados para su diseño y fabricación se eligieron dentro de la serie de perfiles normalizados *naca* [13] y se eligió un perfil *e423*, al ser este un perfil para generar carga aerodinámica a bajas velocidades (la velocidad media de un monoplaza de *Formula Student* es de 17 m/s).

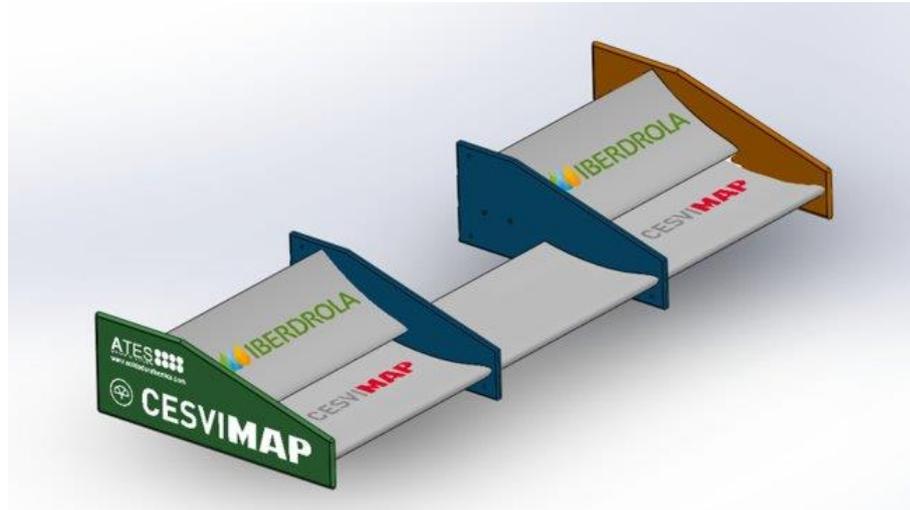


Imagen 10. Alerón delantero del IFS-03, monoplace de la temporada 2019/2021 del ISC Formula Student Racing Team de la Universidad Pontificia Comillas.



## Capítulo 3. OBJETIVOS DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Según las necesidades de mejora del alerón delantero existente que motivan a realizar este Trabajo Fin de Grado, se va a desarrollar una evolución del alerón delantero del monoplaça *IFS-04* con los siguientes objetivos:

1. Maximizar la corriente de aire que llega a los sistemas de refrigeración del monoplaça. Para ello se buscará dirigir la corriente incidente hacia los pontones.
2. Estudiar el flujo de aire de la estela del alerón y la posibilidad de que este interactúe con la turbulencia generada en la rueda alejándola del resto de la carrocería del monoplaça.
3. Energizar la corriente de aire que incide sobre el vehículo para conseguir que permanezca adherida a la superficie del mismo sin que se produzca un desprendimiento de la capa límite.



## Capítulo 4. RESUMEN DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS

El estudio del alerón delantero de un monoplaça se basa, como se ha indicado anteriormente, en un estudio aerodinámico. La aerodinámica es una de las ramas de la Mecánica de Fluidos que se centra en el estudio del aire como fluido. En el presente capítulo se van a resumir los conceptos clave de la Mecánica de Fluidos y la aerodinámica para entender el estudio realizado en el Trabajo Fin de Grado.

### 4.1 DEFINICIÓN DE FLUIDO Y CONCEPTOS BÁSICOS [14]

Un fluido es aquella sustancia que, bajo la influencia de un esfuerzo cortante, por pequeño que sea, sufre una deformación continua. Cuando esta deformación es proporcional al esfuerzo cortante aplicado se dice que el fluido es Newtoniano y sigue la Ecuación I.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad [Pa] \quad (I)$$

Un fluido se puede definir, al igual que un sólido, como un medio continuo. Esto quiere decir que su estudio se puede realizar con el cálculo diferencial debido a que la variación de sus propiedades es suave.

#### 4.1.1 CONDICIÓN DE NO-DESLIZAMIENTO

En la Ecuación I, la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la deformación del fluido es la viscosidad dinámica. Esta propiedad es también la responsable de la adherencia que ocurre entre un fluido y una superficie sólida, conocida como condición de no-deslizamiento.

La condición de no-deslizamiento es responsable de que al entrar en contacto un fluido en movimiento con un sólido, las capas de fluido más cercanas a la superficie se vayan desacelerando a medida que nos acercamos de forma normal (y perpendicularmente a la



corriente) a la superficie del sólido, lo que genera el perfil de velocidad del flujo incidente. Este fenómeno propicia la aparición de la llamada capa límite, esta es la región en la que la corriente fluida experimenta una variación en la velocidad desde un valor cero en la superficie de contacto hasta un 90% de la velocidad de la corriente libre.

## 4.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

A la hora de analizar un fluido, aparecen una serie de propiedades de los fluidos que se definen a continuación.

### 4.2.1 DENSIDAD [15]

Los fluidos se caracterizan por tener fuerzas de cohesión moleculares menores que un sólido. Esto permite a las moléculas moverse libremente. Por esta razón, a la hora de definir la densidad de un fluido se recurre a un límite.

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow \delta V^*} \left( \frac{dm}{dV} \right) \quad [kg/m^3] \quad (II)$$

La variación o no de la densidad dentro de un campo fluido sirve para diferenciar dos grandes tipos de fluidos: los incompresibles, en los que la densidad permanece prácticamente constante en todo el campo fluido; y los compresibles, donde la densidad experimenta grandes variaciones de unas regiones a otras.

También se puede hacer otra diferenciación, en este caso entre líquidos y gases. En los primeros (fluidos de carácter incompresibles normalmente) se puede decir que la densidad varía simplemente con la temperatura. Mientras que en los segundos, aparte de variar con la temperatura, varía de forma casi proporcional en algunos casos con la presión.

Muchas veces, por comodidad, se trabaja con densidades relativas. Esta es la relación entre la densidad del fluido de trabajo y la del agua (en el caso de los líquidos) o la del aire (en el caso de los gases).



En algunas aplicaciones o estudios, en vez de trabajar con la densidad se trabaja con su inversa, el volumen específico.

$$\nu = \lim_{\delta V \rightarrow \delta V^*} \left( \frac{dV}{dm} \right) \quad [m^3/kg] \quad (\text{III})$$

#### 4.2.2 PRESIÓN [15]

La presión es el cociente de la fuerza normal ejercida por unidad de área por un fluido sobre una superficie. También se puede interpretar como el esfuerzo de compresión en un punto de un fluido en reposo. Cabe destacar que la presión no es una magnitud vectorial, sino que es una magnitud escalar que aplica a todo el campo fluido en todas las direcciones del espacio.

La unidad de presión en el Sistema Internacional es el Pascal (Pa), que equivale a 1 Newton de fuerza por metro cuadrado de área. Sin embargo, es común trabajar con otra escala, como los bares ( $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ ) o las atmósferas ( $1 \text{ atm} = 1,01396 \text{ bar}$ ).

A la hora de trabajar con presiones, se puede hacer de forma absoluta o relativa, siendo la diferencia de ambas igual a la presión atmosférica.

$$p_{abs} = p_{atm} + p_{rel} \quad (\text{IV})$$

#### 4.2.3 VISCOSIDAD [15]

La viscosidad, como se ha definido anteriormente para explicar la condición de no-deslizamiento, es una medida de la resistencia de un fluido al movimiento. Esta depende sobre todo de la temperatura del fluido y es mayor en líquidos que en gases. Las unidades de la viscosidad dinámica ( $\mu$ ) son kilogramos por metros por segundo [ $kg/(ms)$ ].

En multitud de aplicaciones, se trabaja con el valor de la viscosidad dinámica dividido por la densidad del fluido. A este cociente se le conoce como viscosidad cinemática ( $\nu$ ) y sus unidades son metros al cuadrado por segundo [ $m^2/s$ ].



#### 4.2.4 TENSIÓN SUPERFICIAL [15]

La tensión superficial hace referencia al ángulo de contacto que aparece en la interacción entre un fluido y un sólido y está relacionada con la energía o trabajo necesario para aumentar el área de contacto en una cantidad unitaria.

#### 4.2.5 MÓDULO DE ELASTICIDAD VOLUMÉTRICA [16]

Al igual que los sólidos, los fluidos presentan resistencia a la compresión (no así a los esfuerzos cortantes como se ha explicado anteriormente). Esta resistencia se cuantifica mediante el módulo de elasticidad volumétrica o coeficiente de compresibilidad.

$$\kappa = \rho \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T = -\nu \left( \frac{\partial \nu}{\partial P} \right)_T \quad [Pa] \quad (V)$$

De la Ecuación IV se puede deducir también que el coeficiente de compresibilidad representa el cambio en la presión correspondiente a un cambio de densidad (o volumen) en el fluido a temperatura constante y viceversa. Este efecto se acentúa en gases a altas presiones, donde un pequeño cambio de volumen puede generar una gran variación de la presión. Estas relaciones a menudo se representan con el coeficiente de compresibilidad isotérmica, el inverso del coeficiente de compresibilidad.

$$\alpha = \frac{1}{\kappa} = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T = -\frac{1}{\nu} \left( \frac{\partial \nu}{\partial P} \right)_T \quad [1/Pa] \quad (VI)$$

#### 4.2.6 COEFICIENTE DE EXPANSIÓN VOLUMÉTRICA [16]

El coeficiente de expansión volumétrica es una medida de la variación de la densidad en un fluido al producirse cambios de temperatura a presión constante.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P = \frac{1}{\nu} \left( \frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_P \quad [1/K] \quad (VII)$$



## 4.2.7 OTRAS PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE LOS FLUIDOS [16]

En numerosos análisis de fluidos intervienen una serie de propiedades termodinámicas que tienen que ver con la energía del fluido.

### 4.2.7.1 *Energía Interna*

Es la suma de todas las energías de carácter microscópico presentes en el fluido. Su variación se puede relacionar con la variación de temperatura del fluido a través del calor específico a volumen constante del fluido.

$$du = c_v dT \quad [J] \quad \text{(VIII)}$$

### 4.2.7.2 *Entalpía*

Al analizar un flujo de fluido, muchas veces aparece en las ecuaciones la combinación de la energía interna con el trabajo de flujo. Por convenio, a esta combinación se le conoce como entalpía.

$$h = u + P\mathcal{V} = u + \frac{P}{\rho} \quad [J/kg] \quad \text{(IX)}$$

Al igual que la energía interna, la variación de entalpía se puede relacionar con la variación de temperatura a través del calor específico a presión constante.

$$dh = c_p dT \quad [J] \quad \text{(X)}$$

## 4.3 *FLUJOS DE FLUIDO*

El estudio del movimiento e interacción de un fluido con los sólidos que lo rodean se basa en la determinación del campo de velocidades y del campo de presiones del flujo. No obstante, existen gran variedad de flujos que se pueden clasificar de diversas formas. A continuación, se exponen las clasificaciones más comunes



### 4.3.1 CAMPO DE VELOCIDADES [15]

Antes de determinar las clasificaciones más usadas de flujos, se va a exponer la formulación matemática de la variable más importante en el análisis de un flujo de fluido, el campo de velocidades.

$$\vec{v} = u(x, y, z, t)\vec{i} + v(x, y, z, t)\vec{j} + w(x, y, z, t)\vec{k} \quad (\text{XI})$$

Dependiendo de en cuantas dimensiones varíe la velocidad del fluido, el flujo puede ser unidimensional, bidimensional o tridimensional. Normalmente, cuando la variación de la velocidad en una o varias direcciones es significativamente mayor al de otra u otras, estas últimas se desprecian. Por esta razón, es común encontrar la mayoría de los análisis de flujo de forma unidimensional o bidimensional.

### 4.3.2 REGÍMENES DE FLUJO [15]

La primera clasificación de flujos que se va a hacer tiene que ver con la naturaleza ordenada en capas o caótica del mismo. Así se puede distinguir el flujo laminar del turbulento. El primero está relacionado con fluidos más viscosos o a bajas velocidades, mientras que el régimen turbulento se suele dar a altas velocidades o con fluidos poco viscosos. Para determinar la transición de laminar a turbulento, se utiliza el número adimensional de Reynolds (Ecuación XI).

$$\text{Re} = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu} \quad (\text{XII})$$

El Reynolds crítico de transición de laminar a turbulento no depende del fluido y cambia con la geometría del cuerpo. A grandes rasgos se puede suponer, y de forma muy aproximada, que el Reynolds crítico está en torno a 2000 o 2300 para flujo interno y entre  $5 \cdot 10^5$  y  $3 \cdot 10^6$  en flujo externo.

### 4.3.3 FLUJO ESTACIONARIO Y FLUJO NO-ESTACIONARIO [14]

Otra diferenciación muy común al estudiar un flujo de fluido es la de flujo estacionario o no estacionario. Estacionario hace referencia a que las propiedades no cambian con el tiempo



(no se debe confundir con uniforme, que quiere decir que las propiedades no cambian en el espacio).

Los flujos no estacionarios no se deben confundir con los transitorios (flujos en desarrollo), ya que, siendo los flujos transitorios no estacionarios, el recíproco no se cumple.

Esta diferenciación será necesaria para el análisis integral de la dinámica de fluidos que se hará más adelante.

#### **4.3.4 FLUJO COMPRESIBLE Y FLUJO INCOMPRESIBLE [14]**

Un flujo se considera compresible o incompresible en función de si su densidad es no constante o constante (respectivamente) en todo el dominio fluido. En la práctica se considerará fluido incompresible si las variaciones de densidad son muy pequeñas, como por ejemplo en el caso de los líquidos o el aire hasta 100 m/s.

Para medir la compresibilidad de un fluido se suele emplear el número adimensional de Mach (Ecuación XIII) este es la relación entre la velocidad del fluido y la velocidad del sonido en dicho medio. Según si el número de Mach es menor que uno, igual a uno o mayor que uno, el flujo será subsónico, sónico y supersónico respectivamente.

$$\text{Ma} = \frac{v}{c} \quad (\text{XIII})$$

#### **4.3.5 OTRAS CLASIFICACIONES [14]**

Otras clasificaciones que se pueden hacer a la hora de estudiar los flujos de fluido son:

- Atendiendo a cómo se inicia el movimiento tenemos flujos naturales y flujos forzados.
- Dependiendo de si el flujo está confinado o no tenemos flujo interno o flujo externo (el análisis aerodinámico es un análisis de flujo externo de aire).



#### ***4.4 ECUACIONES FUNDAMENTALES DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS***

La dinámica de fluidos, como toda la dinámica en general, se puede estudiar desde dos puntos de vista. Uno haciendo una descripción detallada de cada punto (descripción Lagrangiana) y otro tomando una región del espacio llamada volumen de control (descripción Euleriana). Aunque el estudio euleriano está más extendido (debido a su mayor comodidad) en el análisis de los fluidos, existen numerosas aplicaciones que requieren de un estudio más detallado, para el que se usa la descripción Lagrangiana.

A la hora de estudiar un fluido existen diversos planteamientos: diferencial, integral, experimental y dimensional. Los dos primeros hacen referencia a un estudio de las ecuaciones que rigen la dinámica de fluidos. El estudio experimental está muy extendido en el análisis de la Mecánica de Fluidos, ya que en numerosas ocasiones las ecuaciones a resolver por alguno de los dos métodos anteriores son muy complejas. Dentro del estudio experimental encontramos los ensayos de laboratorio y el análisis CFD (Dinámica de Fluidos Computacional según sus siglas en inglés) que se expondrá más adelante. Por último, el análisis dimensional se incluye en el contexto experimental y permite reducir el número de variables presentes en un problema mediante un proceso de adimensionalización de las ecuaciones que rigen el problema.

A continuación, se exponen las ecuaciones fundamentales de los análisis integral y diferencial de la Mecánica de Fluidos.

##### **4.4.1 ANÁLISIS INTEGRAL**

Como se ha expuesto anteriormente, en el estudio de los fluidos se suele adoptar un planteamiento euleriano y se trabaja con volúmenes de control. Estos son regiones abiertas del espacio, delimitadas por una superficie de control por las que puede entrar y salir materia. Los volúmenes de control pueden ser fijos o móviles y deformables o indeformables según la aplicación.



#### 4.4.1.1 Caudal y Flujo Másico [15]

Al estudiar el movimiento del fluido a través de un volumen de control aparecen los conceptos de flujo volumétrico o caudal (Ecuación (XIV)) y flujo másico (Ecuación (XV)).

$$Q = \iint (\vec{v} \circ \vec{n}) dA = \vec{v} \cdot A \quad (\text{XIV})$$

$$\dot{m} = \iint \rho(\vec{v} \circ \vec{n}) dA = \rho Q \quad (\text{XV})$$

#### 4.4.1.2 Teorema del Transporte de Reynolds [15]

Para relacionar el cambio de las propiedades del fluido a lo largo del tiempo en el volumen de control con la variación de esta en todo el sistema de estudio se utiliza el Teorema del Transporte de Reynolds (RTT por sus siglas en inglés). Este relaciona la variación en el tiempo de la propiedad fluida de estudio del sistema con la variación en el volumen de control y en sus fronteras.

$$\frac{dB}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint_{VC} \beta \rho dV + \iint_{SC} \beta \rho (\vec{v} \circ \vec{n}) dA \quad (\text{XVI})$$

Donde en la Ecuación XVI,  $B$  es una propiedad cualquiera y  $\beta$  su variación por unidad de masa. Cabe destacar que, si el volumen de control es fijo y no deformable, la derivada del término referido al volumen de control entra en la integral en forma de derivada parcial.

#### 4.4.1.3 Ecuaciones de Conservación [15]

Aplicando el RTT a las principales ecuaciones de conservación de la mecánica, se obtienen las ecuaciones de la dinámica de fluidos en forma integral: ecuación de conservación de la masa (Ecuación (XVII)), ecuación de conservación del momento lineal (Ecuación (XVIII)), ecuación de conservación del momento cinético (Ecuación (XIX)) y ecuación de conservación de la energía (XX).



$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint_{VC} \rho dV + \iint_{SC} \rho(\vec{v} \circ \vec{n}) dA = 0 \quad (\text{XVII})$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint_{VC} \rho \vec{v} dV + \iint_{SC} \rho \vec{v}(\vec{v} \circ \vec{n}) dA = \sum \vec{F} \quad (\text{XVIII})$$

$$\frac{dL}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint_{VC} \rho(\vec{r} \times \vec{v}) dV + \iint_{SC} \rho(\vec{r} \times \vec{v})(\vec{v} \circ \vec{n}) dA = \sum \vec{M} \quad (\text{XIX})$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint_{VC} \rho e dV + \iint_{SC} \rho e(\vec{v} \circ \vec{n}) dA \quad (\text{XX})$$

Partiendo de la ecuación de conservación de la energía, y si se cumple una serie de condiciones<sup>1</sup>, se obtiene la ecuación de Bernoulli (Ecuación (XXI)).

$$\left( \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} + z \right)_1 + h_{neta} - h_{pérdidas} = \left( \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} + z \right)_2 \quad (\text{XXI})$$

#### 4.4.2 ANÁLISIS DIFERENCIAL

El estudio integral, determina la interacción del fluido con el volumen de control, sin embargo, no permite determinar qué ocurre en el flujo dentro del mismo. Cuando se quieren conocer con detalle las interacciones del flujo dentro del volumen de control se utiliza el análisis diferencial.

##### 4.4.2.1 Ecuación de Continuidad [15]

Partiendo de la ecuación de conservación de la masa (Ecuación (XVII)), aplicando el Teorema de la Divergencia se obtiene la ecuación de continuidad (Ecuación (XXII)).

$$0 = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \circ (\rho \vec{v}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \quad (\text{XXII})$$

---

<sup>1</sup> Estas condiciones y los pasos necesarios para llegar a la ecuación de Bernoulli se pueden encontrar en cualquier libro de Mecánica de Fluidos, como por ejemplo el [19].



#### 4.4.2.2 Ecuaciones de Navier-Stokes [15]

Las ecuaciones de Navier-Stokes son las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos diferencial. Se deducen a partir de la ecuación de conservación del momento lineal, al igual que en la ecuación de continuidad, aplicando el Teorema de la Divergencia al término de las integrales (Ecuación (XXIII)) y desarrollando el término de las fuerzas aplicadas mediante el cálculo tensorial (Ecuación (XXIV)).

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \circ \vec{\nabla})\vec{v} = \rho \frac{D\vec{v}}{Dt} \quad (\text{XXIII})$$

$$\frac{\Sigma d\vec{F}}{dV} = \rho \vec{f}_m - \vec{\nabla}p + \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \quad (\text{XXIV})$$

Juntando ambos términos se obtiene la ecuación de Cauchy (Ecuación (XXV)).

$$\rho \vec{f}_m - \vec{\nabla}p + \vec{\nabla} \cdot \vec{T} = \rho \frac{D\vec{v}}{Dt} \quad (\text{XXV})$$

Para un fluido newtoniano y de propiedades constantes, los esfuerzos viscosos se pueden separar los términos referentes a los esfuerzos viscosos (proporcionales a la velocidad de deformación y a la viscosidad).

$$\rho \vec{f}_m - \vec{\nabla}p + \mu \nabla^2 \vec{v} = \rho \frac{D\vec{v}}{Dt} \quad (\text{XXVI})$$

La ecuación anterior se conoce como Ecuación de Navier-Stokes. Desarrollándola en los tres ejes cartesianos se obtienen las Ecuaciones de Navier-Stokes en formato expandido.

$$\begin{aligned} \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) &= \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} u + \frac{\partial u}{\partial y} v + \frac{\partial u}{\partial z} w \right) \vec{i} \\ \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) &= \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} u + \frac{\partial v}{\partial y} v + \frac{\partial v}{\partial z} w \right) \vec{j} \\ \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) &= \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial x} u + \frac{\partial w}{\partial y} v + \frac{\partial w}{\partial z} w \right) \vec{k} \end{aligned} \quad (\text{XXVII})$$



#### 4.4.2.3 Ley de Conservación de la Energía [15]

La última ecuación necesaria para resolver el campo de velocidades y presiones es la Ley de Conservación de la Energía. Esta se deduce, al igual que las anteriores, aplicando el Teorema de la Divergencia a los términos de la ecuación integral de conservación de la energía.

$$\vec{\nabla} \circ (k\vec{\nabla}T) + \vec{v} \circ (\vec{\nabla} \cdot \vec{T}) + \Phi - \vec{\nabla} \circ (p\vec{v}) = \rho \frac{De}{Dt} \quad (\text{XXVIII})$$

Donde aparece el término de la función de disipación viscosa  $\Phi$ . Esta hace referencia al trabajo que ejercen los esfuerzos cortantes al deformar la partícula.

$$\Phi = \mu \left[ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (\text{XXIX})$$

Realizando algunos ajustes se obtiene la forma más empleada de la ecuación diferencial de conservación de la energía.

$$\rho \frac{D\tilde{u}}{Dt} + p(\vec{\nabla} \circ \vec{v}) = \vec{\nabla} \circ (k\vec{\nabla}T) + \Phi \quad (\text{XXX})$$

$$\rho C \frac{DT}{Dt} = k\nabla^2 T + \Phi \quad (\text{XXXI})$$

La Ecuación (XXXI) es la particularización de la Ecuación (XXX) para flujo incompresible y de propiedades constantes. Esta es la ecuación que se suele resolver junto con las ecuaciones de continuidad y Navier-Stokes (añadiendo también al sistema las ecuaciones de estado y leyes de comportamiento necesarias para que se cumpla el Teorema de Rouché-Frobenius).



### 4.4.3 LÍNEAS DE CORRIENTE

#### 4.4.3.1 Función Corriente [17]

La función corriente ( $\psi$ ) es aquella función  $\psi(x, y)$  que satisface el cambio de variables de la Ecuación (XXXII)<sup>2</sup>.

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \qquad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \qquad \text{(XXXII)}$$

La importancia de la función potencial radica en dos aspectos. El primero no es otro que la simplificación de la ecuación de continuidad (XXII) al pasar de dos a una única variable (como se puede apreciar en la Ecuación (XXXIII)).

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial y \partial x} = 0 \qquad \text{(XXXIII)}$$

La segunda tiene que ver con su continuidad a lo largo de una línea de corriente. En condiciones de flujo incompresible, a lo largo de una línea de corriente se cumple:

$$-v \, dx + u \, dy = 0 \qquad \text{(XXXIV)}$$

Aplicando el concepto de función corriente, queda:

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} \, dx + \frac{\partial \psi}{\partial y} \, dy = 0 \qquad \text{(XXXV)}$$

El interés de este resultado reside en el hecho de que el primer término de la Ecuación (XXXV) representa el cambio infinitesimal de la función potencial en una línea de corriente, y, puesto que este es cero, se deduce que la función potencial es constante a lo largo de una línea de corriente.

Otra consideración importante a tener en cuenta acerca de las líneas de corriente es que la razón de flujo volumétrico por unidad de ancho en una sección cualquiera, perpendicular

---

<sup>2</sup> En coordenadas cartesianas y condiciones de flujo bidimensional e incompresible.



a dos líneas de corriente contiguas, es siempre constante e igual a la diferencia del valor de las funciones corriente en los puntos de intersección de la sección de estudio con las líneas de corriente. Esto implica que el fluido confinado entre dos líneas de corriente contiguas permanece siempre confinado entre ellas al no poder traspasarlas.

#### 4.4.3.2 Vorticidad [15]

Matemáticamente, se define vorticidad como el rotacional del campo de velocidad de un fluido. También, desde el punto de vista matemático, la vorticidad representa el doble de la velocidad angular de un fluido.

$$\vec{\zeta} = \vec{\nabla} \times \vec{v} = \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \vec{i} + \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \vec{j} + \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (\text{XXXVI})$$

Físicamente, la vorticidad representa el giro de las partículas de una corriente fluida a la que se denominará rotacional. Es importante destacar que el hecho de que una corriente fluida sea rotacional no implica que sus líneas de corriente describan trayectorias circulares ni viceversa.

## 4.5 FLUJO EXTERNO

Al aplicar las ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos a cuerpos sumergidos, es de vital importancia el estudio del flujo externo. En este apartado se van a exponer los resultados teóricos más importantes que se han obtenido de este estudio y que conforman los modelos que se utilizan en la práctica para estudiar los diseños aerodinámicos.

### 4.5.1 ESTUDIO DE LA CAPA LÍMITE [18]

La capa límite es el resultado de la viscosidad y la condición de no-deslizamiento de todos los fluidos. Debido a estas, según la Ley de Newton (Ecuación I) el fluido disminuye su velocidad en las regiones próximas a un cuerpo sumergido. Sin embargo, lejos de este, la velocidad del fluido es la de la corriente incidente. Esto provoca la aparición de una región en la que existe un gradiente de velocidad a la que se denomina capa límite.



En la práctica, se considera que el espesor de la capa límite  $\delta$  es aquel en el que se produce una variación en la velocidad desde un valor cero (en la superficie del cuerpo sumergido) hasta un 99% de la velocidad de la corriente libre incidente.

La capa límite, sin embargo, no siempre se encuentra completamente adherida a la superficie del cuerpo sumergido. Existen ocasiones en las que, debido a la geometría del cuerpo en cuestión, el fluido puede sufrir una desaceleración según la Ecuación de Bernoulli (Ecuación (XXI)), lo que provoca la aparición de gradientes adversos, es decir, gradientes de velocidad en sentido opuesto a la corriente incidente. Esto provoca una separación de la capa límite en esas zonas, apareciendo en ellas torbellinos y recirculaciones del flujo que, como se verá más adelante, aumentan la fuerza de arrastre.

## 4.5.2 FUERZAS AERODINÁMICAS [15]

De la interacción de un cuerpo sumergido con una corriente de fluido incidente, surgen una fuerza y un momento resultantes. Estos son resultado de la distribución de presiones alrededor del cuerpo y de los esfuerzos cortantes que aparecen en la capa límite.

### 4.5.2.1 Fuerzas de Sustentación

La fuerza de sustentación es la componente normal a la corriente de flujo incidente de la fuerza resultante de la interacción de dicha corriente con el cuerpo sumergido. Esta se genera debido a la diferencia de presiones entre la parte superior y la inferior del cuerpo. En un ala, por ejemplo, la parte cóncava o intradós tiene una longitud algo menor que la parte convexa o extradós, debido a la continuidad del flujo incidente, las partículas de fluido se acelerarán por el extradós y se decelerarán por el intradós (para así recorrer ambas partes del ala en el mismo tiempo). Debido a la ecuación de Bernoulli (Ecuación (XXI)) la presión aumentará en el intradós y disminuirá en el extradós. Esta diferencia de presiones que se crea produce una fuerza que empuja al ala.

En la práctica, para el cálculo de la fuerza de sustentación, se recurre al empleo de coeficientes adimensionales ( $c_L$ ). Así, la expresión de la fuerza de sustentación en forma integral será:



$$F_L = \iint c_L \frac{1}{2} \rho v^2 dA \quad (\text{XXXVII})$$

Estos coeficientes generalmente están tabulados, aunque en el caso de geometrías más complejas se obtienen mediante el uso de la Mecánica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés).

#### 4.5.2.2 Fuerzas de Arrastre

La fuerza de arrastre es la componente paralela a al corriente incidente de la fuerza resultante de la interacción de esta con el cuerpo sumergido. Esta fuerza se opone al avance del cuerpo (si este está en movimiento), por lo que se le conoce también como fuerza de resistencia.

Al igual que en el caso de la fuerza de sustentación, se calcula empleando un coeficiente adimensional ( $c_D$ ). En este caso, resulta de interés separar en dicho coeficiente la parte de la fuerza de arrastre que tiene que ver con la fricción de la que tiene que ver con la presión. Siendo esta última generada por la diferencia entre las altas presiones en la región frontal del objeto (conocida también como región de remanso) y las bajas presiones en la región posterior, donde se producen con frecuencia desprendimientos de capa límite. Es por ello que los cuerpos más aerodinámicos tienden a parecerse a una gota de agua y para ello se suelen carenar (redondear) las partes de incidencia y fuselar las partes de fuga (conseguir un efecto difusor en la parte trasera). Estos coeficientes se calculan de igual forma que el de sustentación.

La expresión de la fuerza de arrastre será análoga a la de sustentación, pero con el cambio del coeficiente correspondiente:

$$F_D = \iint (c_{D,pres} + c_{D,fric}) \frac{1}{2} \rho v^2 dA \quad (\text{XXXVIII})$$

Así pues, la expresión de la fuerza resultante de la interacción de la corriente fluida con un cuerpo sumergido será:



$$\vec{R} = F_L \vec{u}_n + F_D \vec{u}_{tg} = \iint c_L \frac{1}{2} \rho v^2 dA \vec{u}_n + \iint (c_{D,pres} + c_{D,fric}) \frac{1}{2} \rho v^2 dA \vec{u}_{tg} \quad (XXXIX)$$

## 4.6 INTRODUCCIÓN A LOS CFD [19]

La Mecánica de Fluidos Computacional (CFD según sus siglas en inglés) engloba una serie de métodos computacionales que simulan el comportamiento de un fluido mediante una serie de cálculos algebraicos. Los CFD surgen de la necesidad de resolver complejas ecuaciones diferenciales para el estudio de un fluido, ya que, gracias a la discretización que realizan estos métodos, se consigue convertir el problema en uno algebraico.

La base de la Mecánica de Fluidos Computacional es lo que se conoce como discretización, esto es, aproximar sistemas continuos mediante un conjunto finito de elementos. Para ello, existen tres métodos fundamentales: el método de las diferencias finitas, el método del volumen de control finito y el método de elementos finitos.

- Método de las diferencias finitas: su fundamento consiste en sustituir las derivadas por diferencias finitas. Para aplicarlo, el medio de estudio se divide en una red uniforme de puntos nodales.
- Método del volumen de control finito: se basan en la aplicación del fundamento teórico del Teorema del Transporte de Reynolds (Ecuación 53). Definen un volumen de control que posteriormente se discretiza en volúmenes de control más pequeños en los que se resuelven las ecuaciones de conservación y transporte.
- Método de elementos finitos: se basan en la discretización en lo que se conoce como grados de libertad para expresar la solución del problema como una suma ponderada de la propiedad de estudio en cada punto, ponderada por el grado de libertad correspondiente.

El método más empleado en los CFD es el del volumen de control finito y es el que, como se expondrá más adelante, se empleará al generar lo que se conoce como *malla*.



#### 4.6.1 PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN EN CFD [20]

Para resolver un problema CFD se distinguen tres etapas fundamentales:

1. Pre-procesado: en ella se elige el *dominio computacional*, es decir, la geometría de estudio y el volumen de control correspondiente y se genera una *mall*a. Una *mall*a es una división del volumen de control en pequeños elementos llamados *celdas*. Estas pueden ser de diversa geometría y varían según el estudio sea en dos o tres dimensiones. En cada una, como se ha indicado anteriormente, se resolverán las ecuaciones correspondientes para, posteriormente, integrar los resultados de todas en el resultado final. Es por ello que se trata del paso más importante, ya que, si se generara una malla errónea, los resultados finales serían completamente incorrectos. Es importante, también, elegir un tamaño de malla adecuado, ya que este es directamente proporcional al tiempo de simulación.
2. Solución: se eligen las condiciones de contorno del problema, se eligen el tipo de fluido (y sus propiedades), los parámetros numéricos y los algoritmos de solución y se especifican las condiciones iniciales. Posteriormente el algoritmo discretiza las ecuaciones del problema y resuelve las ecuaciones algebraicas resultantes por iteración. Al hacerlo, aparecen lo que se conoce como *residuos*, esta es la diferencia del valor de la ecuación algebraica para la solución que se ha encontrado en dicha iteración y el valor cero que esta debería tener si la solución fuera exacta. El problema se considera que ha convergido cuando los residuos son lo suficientemente pequeños y los valores de las variables de interés del problema son estables para sucesivas iteraciones.
3. Post-procesado: una vez convergido el problema, las variables del campo fluido se pueden representar gráficamente, así como los conocidos como *mapas* de velocidad o presión y las líneas de corriente. También se pueden calcular otras propiedades *globales* como pueden ser la caída de presión y las *integrales* como las fuerzas y momentos resultantes sobre la geometría de estudio.

#### 4.6.2 MODELOS DE TURBULENCIA [20]

A la hora de resolver un problema de CFD se suelen añadir una serie de ecuaciones a las de conservación y transporte citadas anteriormente. Estas varían según la naturaleza del problema y pueden ser desde la ecuación de la energía o una ecuación de estado, hasta complejos modelos matemáticos.

A la hora de resolver flujos laminares, los resultados suelen ser bastante exactos al resolver las ecuaciones de las que se dispone. Sin embargo, el problema se plantea al resolver flujos turbulentos, ya que, en ellos, para poder estudiar al detalle las fluctuaciones y remolinos que se producen, se necesitarían mallas extremadamente finas, lo que aumentaría desmesuradamente el tiempo de simulación y requeriría una alta potencia de cálculo. Es por ello que existen diferentes modelos matemáticos para simular la turbulencia.

El modelo más sencillo es el conocido como *simulación numérica directa* (SND o DNS en inglés). En él, se intenta resolver el movimiento no estacionario de los flujos turbulentos directamente. El principal problema que plantea es que, en un flujo turbulento, aparecen diferentes remolinos de diferentes tamaños y diferentes escalas de tiempo y estas diferencias se acrecientan al aumentar el número de Reynolds, por lo que los cálculos pueden llegar a ser muy complicados. Con el objetivo de simplificar este modelo, surgió el modelo de *simulación de remolinos grandes* (SRG o LES en inglés) que supone isotrópicos los remolinos de menor tamaño, por lo que se comportarán de la misma forma, desde el punto de vista estadístico, con independencia del campo fluido.

Los modelos anteriores tienen la limitación del gran tiempo de computación necesario. Por ello, se han ido desarrollando con el tiempo los llamados *modelos de turbulencia*. Estos se basan en la resolución de la *ecuación de Navier-Stokes de número de Reynolds promedio*, que añade a las ya citadas Ecuaciones de Navier-Stokes un término que modela las fluctuaciones propias de la turbulencia, mediante el conocido como *tensor de esfuerzo específico de Reynolds*. Estos modelos se pueden agrupar en tres grandes grupos: modelos algebraicos, modelos de una ecuación (añaden una ecuación al problema, por lo general la *ley de conservación del momento cinético*) y modelos de dos ecuaciones. Estos últimos son los que actualmente tienen una mayor relevancia, por lo que se expondrán a continuación.



#### 4.6.2.1 Modelos de turbulencia de dos ecuaciones [19]

Los modelos de turbulencia de dos ecuaciones añaden al problema dos ecuaciones adicionales a las de conservación de la masa y cantidad de movimiento. Por ello, será necesario añadir dos condiciones de contorno al problema que hagan referencia a las variables que añaden las dos ecuaciones adicionales. En los modelos más empleados hoy en día, estas ecuaciones adicionales suelen estar relacionadas con la viscosidad cinemática de los remolinos.

Los modelos más comunes son los conocidos como *k-epsilon* (modela la viscosidad cinemática de los remolinos según la (XL)) y *k-omega* (modela la viscosidad cinemática de los remolinos según la (XLI)). En estos modelos las variables añadidas son la energía cinética turbulenta del fluido de estudio ( $k$ ) y la disipación turbulenta ( $\varepsilon$ ) o la velocidad de disipación turbulenta ( $\omega$ ).

$$\nu_t = C_\mu \frac{k}{\varepsilon} \quad (\text{XL})$$

$$\nu_t = \frac{k}{\omega} \quad (\text{XLI})$$

Para más información acerca de ambos modelos, consultar [19].



## Capítulo 5. METODOLOGÍA

### 5.1 MÉTODO DE TRABAJO

Para conseguir alcanzar los objetivos expuestos más atrás, se va a seguir una metodología basada en el *método científico*. Así se definirán las siguientes etapas del proyecto.

#### 5.1.1 DEFINICIÓN DEL MODELO

El primer paso para realizar el estudio que se propone en el presente Trabajo Fin de Grado es definir un modelo de estudio que represente con fidelidad la realidad que se quiere observar. Una vez definida la geometría y dado que el estudio se va a realizar con un software CFD, se deberá determinar el tamaño óptimo de malla. Para ello se realizará un *análisis de sensibilidad de malla*.

#### 5.1.2 ANÁLISIS PREVIO

Una vez establecidos el modelo y la malla y después de un análisis preliminar de las necesidades de las que surge el proyecto, se debe estudiar la geometría existente, para así determinar las principales áreas de mejora del proyecto. Para ello se realizarán una serie de simulaciones CFD con el fin de establecer los medidores en los que se basarán los análisis posteriores y obtener una serie de parámetros de referencia que posteriormente serán comparados con los obtenidos con las nuevas geometrías diseñadas.

#### 5.1.3 ESTUDIO DE LA POSIBLES SOLUCIONES

Con los datos obtenidos en la etapa anterior, se realizarán una serie de propuestas de mejora. Estas se analizarán con las mismas simulaciones CFD que se utilizaron para las geometrías existentes y, posteriormente, se realizará un análisis estadístico de sus resultados.

#### 5.1.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Finalmente, se compararán los resultados obtenidos de las mejoras propuestas con los valores de referencia obtenidos de la geometría existente y se determinará el grado de mejora



aportado. En base a esto, se formularán las conclusiones que se pueden extraer del estudio y se bosquejarán los posibles desarrollos futuros basados en este estudio.

## **5.2 DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS**

Para realizar los estudios descritos en el método de trabajo expuesto, será necesario contar con una serie de recursos tecnológicos. Estos serán:

- Software de diseño CAD. Para realizar el modelo de estudio, así como las diversas soluciones propuestas, se empleará el software de diseño CAD *SolidWorks* de *Dassault Systèmes*.
- Software de simulación CFD. Para realizar los análisis aerodinámicos tanto de la geometría existente, como de las mejoras propuestas, se utilizará el software de simulación CFD *ANSYS-FLUENT*.

Aparte de los recursos tecnológicos aquí expuestos, se utilizarán a lo largo de la realización de este Trabajo Fin de Grado numerosos recursos bibliográficos para documentar los estudios a realizar. Estos se pueden consultar en las Referencias del trabajo.



## Capítulo 6. DEFINICIÓN DEL MODELO DE ESTUDIO

### 6.1 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DE ESTUDIO

El primer paso, como se ha descrito anteriormente, consiste en definir el modelo objeto de estudio. Se decide trabajar con un modelo y no con la geometría real existente con el fin de simplificar los cálculos y disminuir el tiempo computacional. Si bien, la elección de un modelo puede llevar a resultados alejados de la realidad, si este no se ajusta lo suficientemente bien a la geometría existente.

El modelo en cuestión con el que se va a trabajar consiste en una versión simplificada del diseño CAD del *IFS-04*. Este ha sido realizado dentro del equipo *ISC Formula Student Racing Team* y consiste en una geometría con las mismas dimensiones y aspecto exterior que la original, pero carente de detalles. Así pues, se ha eliminado en su mayoría la geometría tubular del chasis del vehículo y los elementos que se encuentran en su interior, sustituyéndolos por prismas macizos con las mismas dimensiones exteriores. Esta simplificación se ha realizado a sabiendas de que algunos de los detalles que han sido eliminados de la geometría del vehículo pueden influir en el flujo de aire circundante. No obstante, se considera que su influencia es despreciable en comparación con la del conjunto del vehículo y los elementos del paquete aerodinámico (que si se han mantenido al detalle). Otros de los elementos eliminados que pueden tener una mayor relevancia en la interacción del vehículo con la corriente incidente, como el piloto o las suspensiones, han sido eliminados dado que el análisis de estas interacciones excede de los objetivos del presente Trabajo Fin de Grado.

Debido al intento de ahorrar esfuerzos computacionales, se ha decidido estudiar simplemente la mitad delantera del vehículo. Esta decisión tiene también que ver con los objetivos del presente proyecto. Dado que los principales puntos de interés de la estela del alerón delantero para este Trabajo Fin de Grado se encuentran en la parte delantera, una simulación del modelo del vehículo completo no influiría en los resultados que se persiguen, pero sí aumentaría el tiempo hasta su consecución.



Finalmente, y dada la simetría longitudinal del vehículo, se decide simular una mitad del vehículo, con el mismo fin de ahorrar esfuerzos y tiempo computacional, por lo que los resultados obtenidos en una mitad se pueden suponer idénticos a los de la otra mitad.

### 6.1.1 DEFINICIÓN DEL VOLUMEN DE CONTROL

Una vez obtenida la geometría de estudio, se define el volumen de control para la simulación CFD. Este será el campo fluido confinado en un supuesto túnel de viento rectangular. Para que las paredes del túnel no afecten al flujo, este debe tener unas dimensiones determinadas en función de las dimensiones del modelo. Estas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Medidas recomendadas [21] para el volumen de control del estudio y medidas elegidas.

	<b>MEDIDA RECOMENDADA</b>	<b>MEDIDA DEL VOLUMEN DE CONTROL</b>
<b>DELANTE DEL MODELO</b>	Mínimo dos veces el largo del modelo	3179,4 mm
<b>DETRÁS DEL MODELO</b>	Diez veces el largo del modelo	15897 mm
<b>ALTO</b>	Cinco veces la altura del modelo	2860 mm
<b>ANCHO</b>	Diez veces el ancho del modelo	6952,6 mm

## 6.2 DEFINICIÓN DE LA MALLA DE TRABAJO. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE MALLA

Como se ha detallado en la descripción del Procedimiento de Solución en CFD, el primer paso para resolver el problema de CFD es definir la malla de trabajo. En este caso, dado que



la geometría del volumen de control está diseñada en tres dimensiones, los elementos de la malla tendrán forma de tetraedros (elemento de mallado no estructurado fundamental en tres dimensiones de *ANSYS-FLUENT*). Para conseguir determinar el tamaño óptimo de malla, se realizará un *análisis de sensibilidad de malla*. Este consiste en realizar sucesivas simulaciones con tamaños de malla cada vez menores hasta encontrar el punto en el que disminuir el tamaño de malla no afecte al cálculo de las variables de estudio. Para ello, se tomarán la fuerza de arrastre o *drag* y la carga aerodinámica o *lift*<sup>3</sup>.

La primera malla, o malla base, tendrá un tamaño máximo de malla de *500 mm*, con una ratio de crecimiento de *1,1*, lo que significa que el crecimiento de los elementos en las sucesivas capas de la malla será de un *10%*. El tamaño mínimo de los elementos que se quieren mallar se fija a *0,5 mm*, así pues, el programa eliminará automáticamente aquellos elementos (agujeros, pequeños cortes, filos...) con un tamaño inferior a este. Otra serie de parámetros a configurar son lo que el programa llama *capture curvature* y *capture proximity*. El primero hace referencia a la configuración del ángulo máximo que el borde de un elemento puede solapar al borde de un elemento adyacente. Se configurará según los parámetros de la Tabla 3, extraídos de resultados de simulaciones anteriores del Departamento de Aerodinámica del *ISC Formula Student Racing Team*. El segundo, *capture proximity*, hace referencia a cuántas celdas debe colocar el programa en espacios pequeños entre elementos cercanos. Este se configurará según los parámetros de la Tabla 4, extraídos también de simulaciones anteriores del equipo.

Tabla 3. Parámetros de la configuración del *capture curvature*.

<i>Curvature Minimum Size</i>	<i>5 mm</i>
<i>Curvature Normal Angle</i>	<i>12°</i>

---

<sup>3</sup> En realidad, *lift* hace referencia a la fuerza de sustentación. El término adecuado sería *downforce*. Sin embargo y debido a que uno es el opuesto del otro, el programa asigna el nombre de *lift* a esta fuerza, siendo el usuario el que define su sentido.

Tabla 4. Parámetros de la configuración del *capture proximity*.

<i>Proximity Minimum Size</i>	<i>5 mm</i>
<i>Number of Cells Across Gap</i>	<i>5</i>

Con esta configuración, se obtiene una malla de 2.879.494 elementos.

### 6.2.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE MALLA

Para las sucesivas iteraciones del análisis de sensibilidad de malla, se añadirán tres cuerpos o volúmenes de control artificiales (*body of influence*) para ajustar con mayor precisión el tamaño de los elementos de la malla dentro de ellos. Estos se encontrarán alrededor de la geometría del coche y tendrán, como se puede observar en la Tabla 5 y en la Imagen 12, geometrías crecientes.

Tabla 5. Dimensiones de los tres *body of influence* que se utilizarán en la malla del caso de estudio.

<b>BODY OF INFLUENCE</b>	<b>MEDIDA</b>	<b>VALOR</b>
<b>1</b>	Alto	<i>0,6 m</i>
	Largo	<i>1,45 m</i>
	Ancho	<i>0,8 m</i>
<b>2</b>	Alto	<i>0,8 m</i>
	Largo	<i>2,5 m</i>
	Ancho	<i>1,375 m</i>
<b>3</b>	Alto	<i>1 m</i>
	Largo	<i>4 m</i>
	Ancho	<i>2 m</i>

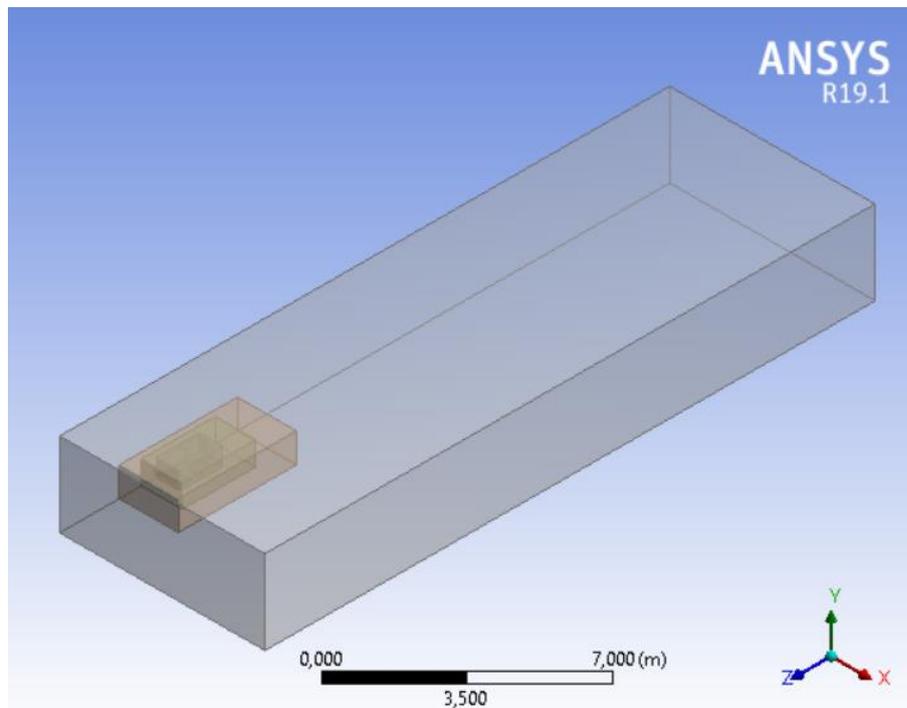


Imagen 11. Vista del volumen de control construido con los tres *body of influence*.

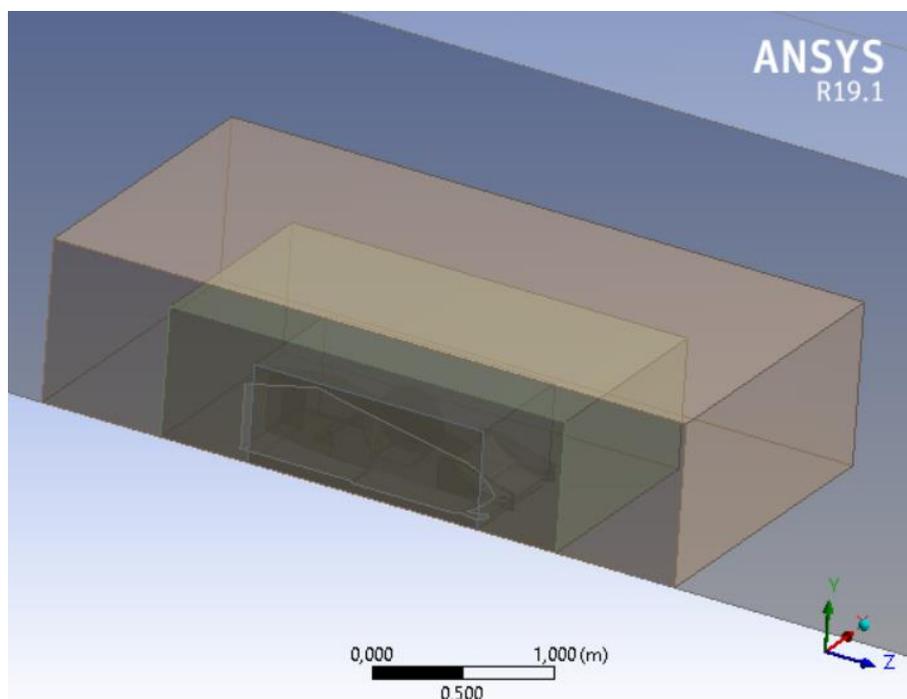


Imagen 12. Vista en detalle de los tres *body of influence* utilizados.



En cuanto al tamaño de elemento máximo en cada uno, será el doble del tamaño máximo de elemento del *body of influence* anterior. Los tamaños de elementos de estos cuerpos en cada iteración del análisis de sensibilidad de malla se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6. Tamaños máximos de elemento para cada *body of influence* en cada una de las tres iteraciones realizadas.

ITERACIÓN	BODY OF INFLUENCE	TAMAÑO DE ELEMENTO
1	1	25 mm
	2	50 mm
	3	100 mm
2	1	12,5 mm
	2	25 mm
	3	50 mm
3	1	10 mm
	2	20 mm
	3	40 mm

En cada iteración que se haga para determinar el tamaño óptimo es importante medir la calidad de los elementos de la malla. Para ello se estudiará el sesgo equiángulo (*skewness* del inglés) de los elementos de la malla. Este mide cómo se deforman los elementos de la malla con respecto a un tetraedro perfecto (equiángulo). El criterio de aceptación de este análisis de calidad de malla se basa en una escala de cero (tetraedro perfecto) a uno (prisma completamente deformado). Por convenio, se intenta obtener un *skewness* máximo inferior a 0,9 y un *skewness* global inferior a 0,5. Los valores de *skewness* global y máximo obtenidos en cada una de las mallas utilizadas en el análisis de sensibilidad se detallan en la Tabla 7.



Tabla 7. Valores del sesgo (*skewness*) global y máximo obtenidos para cada una de las cuatro mallas utilizadas en el análisis de sensibilidad.

<b>MALLA</b>	<b><i>SKEWNESS</i> GLOBAL</b>	<b><i>SKEWNESS</i> MÁXIMO</b>
Base	0,21397	0,89883
Iteración 1	0,21283	0,89851
Iteración 2	0,2072	0,89852
Iteración 3	0,20497	0,89852

Por último, se debe indicar que, aunque sea lo común en muchos problemas de flujo externo resueltos con CFD, en este proyecto no se ha optado por una malla híbrida. Una malla híbrida consta de partes compuestas por una malla estructurada y otras por una malla no estructurada. Esto se suele hacer ya que las mallas estructuradas ofrecen una mayor resolución a la hora de estudiar fenómenos como la capa límite. En este Trabajo Fin de Grado no se ha optado por su utilización, ya que con el módulo de mallado de *ANSYS-FLUENT*, al hacer una malla híbrida, el *skewness* máximo aumenta hasta a valores cercanos a 1, lo que compromete bastante la calidad de la malla. Para mejorar la malla obtenida y poder incluir una malla híbrida en el problema de estudio se recomendaría emplear otros softwares como *ICEM CFD*.

### **6.3 CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN**

Por último, para la resolución del problema CFD, es necesario configurar la simulación, esto es, indicar las condiciones de contorno, propiedades del fluido de trabajo, criterios de convergencia y demás parámetros que intervienen en la resolución del caso.

Lo primero de todo es configurar el fluido de trabajo. Dado que este se trata del aire que rodeará al coche en una competición, se elige de la base de datos del programa. En esta, vienen por defecto unos valores de densidad y viscosidad cinemática de  $1,225 \text{ kg/m}^3$  y  $1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ .



A continuación, se especificará el modelo de turbulencia. Para este proyecto se ha optado por el modelo de dos ecuaciones  $k-\varepsilon$  *Realizable* y sin funciones de equilibrio en las paredes. Se ha optado por este modelo ya que es el comúnmente utilizado para modelar la turbulencia en problemas de aerodinámica en vehículos terrestres. Este modelo, como se vio en la descripción de los Modelos de Turbulencia, añade al problema dos ecuaciones relacionadas con energía cinética turbulenta del fluido de estudio ( $k$ ) y la disipación turbulenta ( $\varepsilon$ ).

Lo siguiente que se deberá especificar son las condiciones de contorno del problema. Estas se especificarán en el módulo de mallado como *named selections* y, posteriormente en la configuración de la simulación, se les asignará su valor. A continuación, se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Condiciones de contorno del problema.

CONDICIÓN DE CONTORNO	TIPO	VALOR
Velocidad de entrada	Velocidad	$17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ normal a la c.c.
Presión de salida	Presión	$0 \text{ Pa}$ (presión atmosférica)
Suelo	Pared en movimiento sin deslizamiento	$17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ constante
Coche	Pared estacionaria sin deslizamiento	-
Rueda	Pared en movimiento sin deslizamiento	$84,158 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ constantes en torno al eje x, aplicados en el centro de la rueda
<i>Symmetry</i>	Simetría	-

Por último, se deben configurar los métodos de solución y el criterio de convergencia. Para ello se selecciona un sistema de acoplamiento entre velocidad y presión simple y se especifica una precisión de segundo orden en las ecuaciones del momento lineal, de la



energía cinética turbulenta y de la disipación turbulenta. Esto aumentará la precisión de los resultados, pero también el tiempo de cálculo.

En cuanto al criterio de convergencia, se especifican los valores límite de las propiedades de trabajo. Cuanto menores sean los valores asociados a las ecuaciones que se deben resolver, más se asegurará la convergencia del modelo, a costa de aumentar el tiempo computacional. Estos valores se especifican en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores límite de las propiedades de trabajo para garantizar la convergencia del caso.

PROPIEDAD	VALOR LÍMITE
Presión	0,3
Densidad	1
Fuerzas sobre el cuerpo	1
Momento lineal	0,35
Ratio de disipación turbulenta	0,4
Viscosidad turbulenta	0,45

Finalmente, se deben configurar las fuerzas que se quieren calcular durante la simulación, estas son el *lift* y el *drag*. Aunque se pueden calcular una vez convergido el caso, es conveniente hacerlo en cada iteración, ya que puede ayudar a determinar el punto donde la simulación converge (cuando sus valores se estabilizan).

Después de configurar el caso, este se debe inicializar, es decir, se deben indicar las condiciones iniciales. Para ello se indicará una inicialización híbrida, esto es, el programa resolverá diez iteraciones partiendo de la suposición de presión constante en todo el dominio fluido. El resultado de la décima iteración servirá de punto de partida para la simulación. Una vez inicializado, se especifican las iteraciones que se desean calcular y se ejecuta el caso. En las simulaciones realizadas en este Trabajo Fin de Grado se ha observado que convergen razonablemente bien después de diez mil iteraciones.



Todos los parámetros necesarios para la configuración de la simulación en *ANSYS-FLUENT* se pueden consultar en el Anexo I.



## Capítulo 7. ANÁLISIS DEL ALERÓN DELANTERO DEL *IFS-04*

### 7.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE MALLA

Una vez finalizadas las simulaciones de los cuatro casos descritos anteriormente para realizar el análisis de sensibilidad de malla, se procede a comparar sus resultados. Para ello, se calcularán la fuerza de arrastre y la de sustentación en cada caso y se compararán los valores calculando el porcentaje de cambio en cada iteración. Al hacer esto, obtenemos el Gráfico 1 y el Gráfico 2<sup>4</sup>, en los que se ve la evolución de las fuerzas de arrastre y de sustentación calculadas en cada iteración. Se observa cómo, mientras la fuerza de arrastre tiene la tendencia de ir descendiendo, a medida que aumenta la precisión de la malla, para estabilizarse en un valor, la fuerza de sustentación tiende a crecer. No obstante, como se puede apreciar en el Gráfico 3, las variaciones entre iteraciones son pequeñas.

---

<sup>4</sup> Estos valores están calculados a partir del modelo de medio coche.

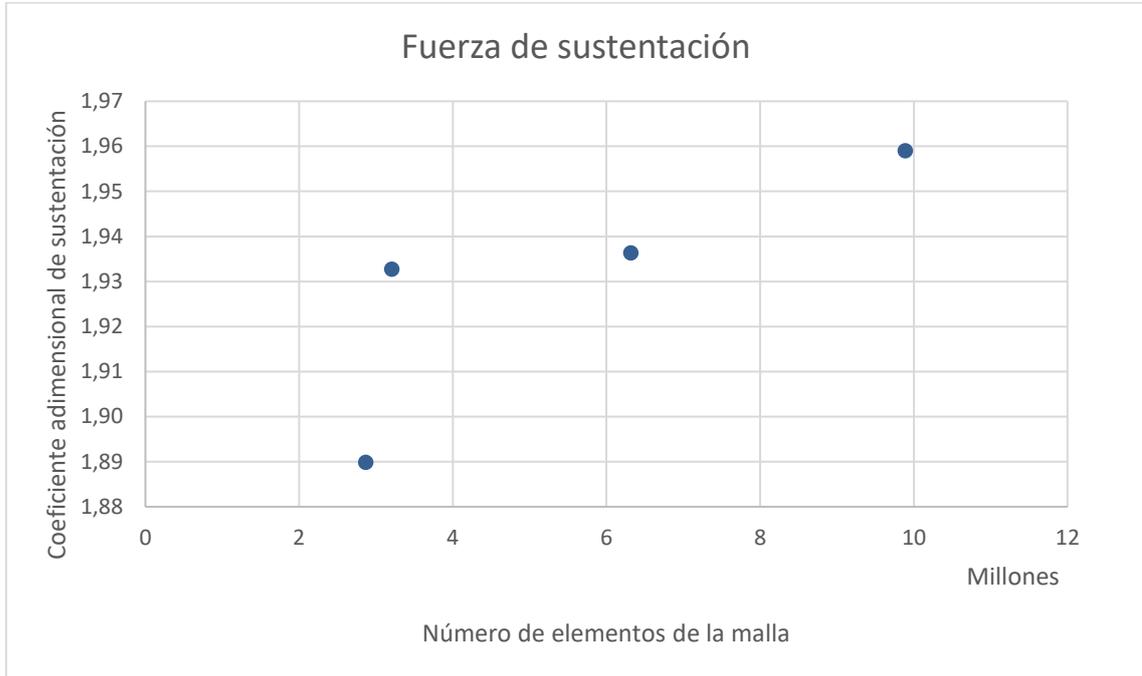


Gráfico 1. Representación del coeficiente adimensional de sustentación para cada tamaño de malla analizado.

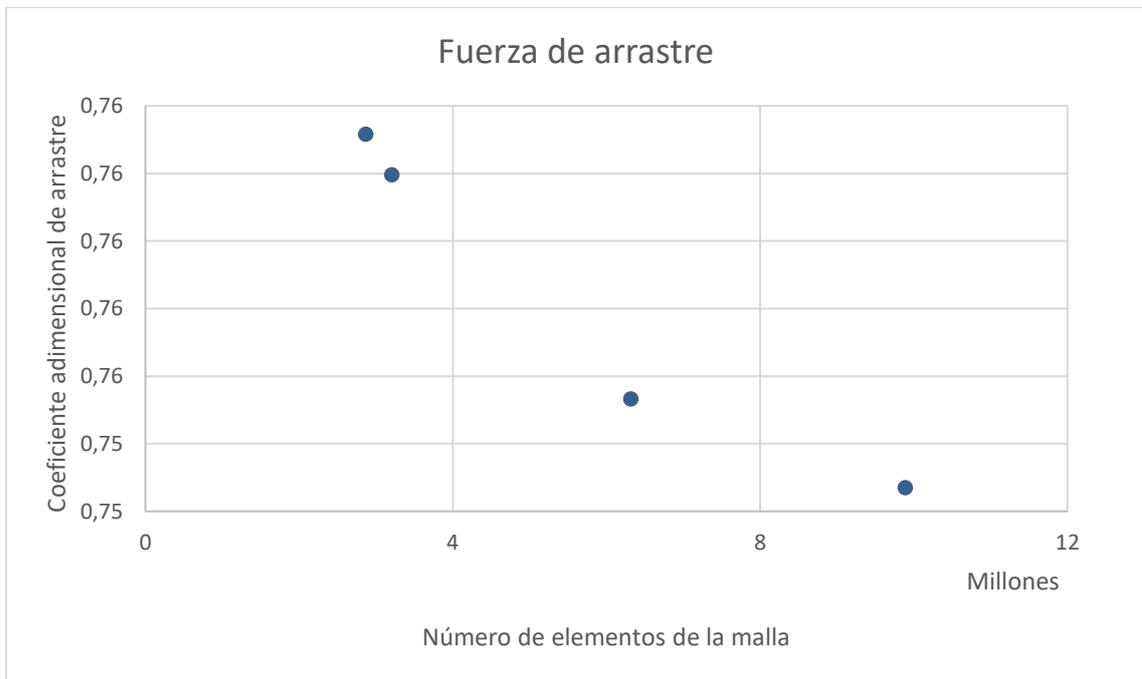


Gráfico 2. Representación del coeficiente adimensional de arrastre para cada tamaño de malla analizado.

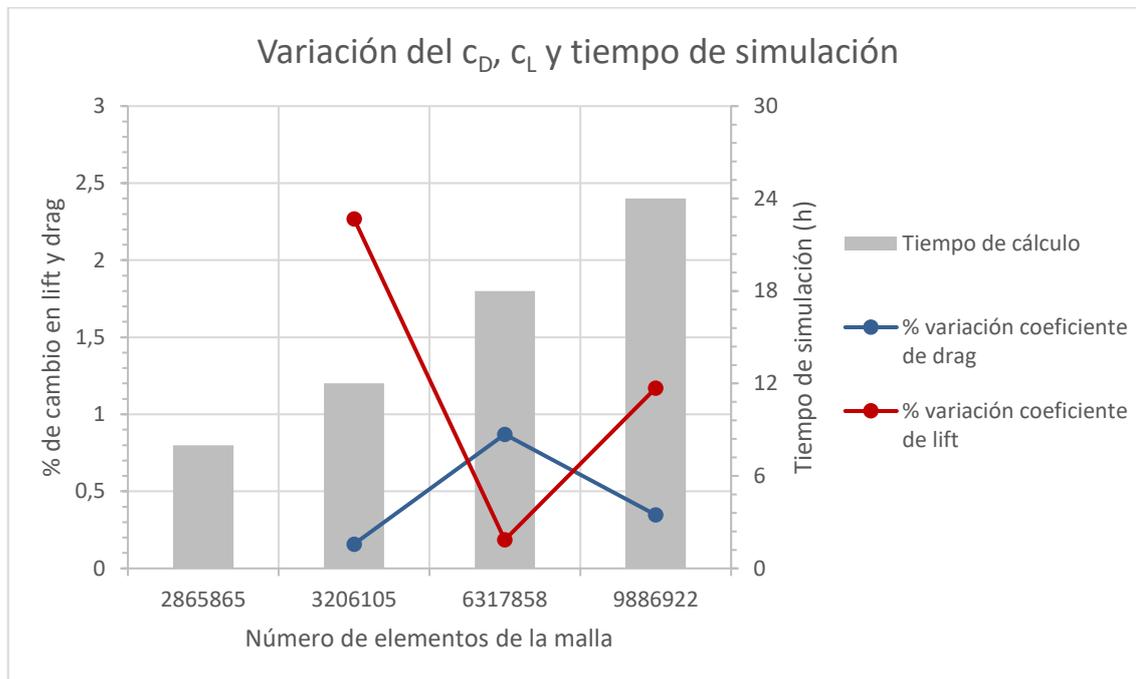


Gráfico 3. Representación de las variaciones porcentuales de sustentación y arrastre entre las diferentes iteraciones del análisis de sensibilidad de malla, así como del tiempo de cálculo de cada una.

Es especialmente relevante el Gráfico 3, ya que en él se puede comparar el cambio porcentual de las fuerzas calculadas entre iteraciones sucesivas. Se observa que en todos los casos el cambio es inferior al 5%, por lo que se podría aceptar cualquiera de las mallas con *body of influence* como la malla adecuada para el problema. Por ello, la decisión de la malla final se va a tomar en función al tiempo computacional requerido. Como se puede observar también en el Gráfico 3, el aumento de tiempo entre una simulación y otra está en aproximadamente seis horas, siendo el tiempo de simulación total de la primera malla con *body of influence* de 12 horas y el de la última de 24. Por esta razón y dado que las variaciones de las propiedades al aumentar la resolución de la malla son pequeñas, se optará por una malla intermedia entre la de tres y la de seis millones de elementos. Para la que se tomarán tamaños de elementos en cada uno de los *body of influence* mostrados en la Tabla 10. El tamaño final de la malla rondará los cuatro millones de elementos.



Tabla 10. Tamaños máximos de elemento para los body of influence de la malla final.

BODY OF INFLUENCE	TAMAÑO DE ELEMENTO
1	18,75 mm
2	37,5 mm
3	75 mm

## 7.2 ESTUDIO AERODINÁMICO DEL ALERÓN DEL IFS-04

A continuación, se analizará la interacción del alerón delantero del *IFS-04* con la corriente de aire incidente y los efectos de su estela. Para ello se tomará la simulación de seis millones de elementos y se representarán mapas de presión y de velocidad en diferentes secciones del volumen de control estudiado. También, se representarán las líneas de corriente con vectores velocidad.

En una primera representación del campo de velocidades y el de presiones dentro del dominio fluido, se puede apreciar que el flujo llega a desarrollarse completamente antes de incidir sobre la geometría del monoplaza, al ser la presión y la velocidad constantes. Se puede observar en la Imagen 30 y la Imagen 32 del Anexo II. Por ello, se puede concluir que las dimensiones de anchura, altura y longitud delante de la geometría de estudio del volumen de control son adecuadas para el estudio que se está realizando.

Observando con detalle los mapas de presión y velocidad, se puede apreciar con claridad la aparición de un punto de remanso en el intradós del elemento central del alerón, justo debajo del morro del monoplaza (Imagen 13). Se sabe que es un punto de remanso ya que en él hay un aumento significativo de la presión (de entre 140 y 180 Pa) y un descenso significativo de la velocidad. Esto ocurre en dicho punto al ser este la primera parte de la geometría del vehículo que entra en contacto con el flujo de aire incidente.

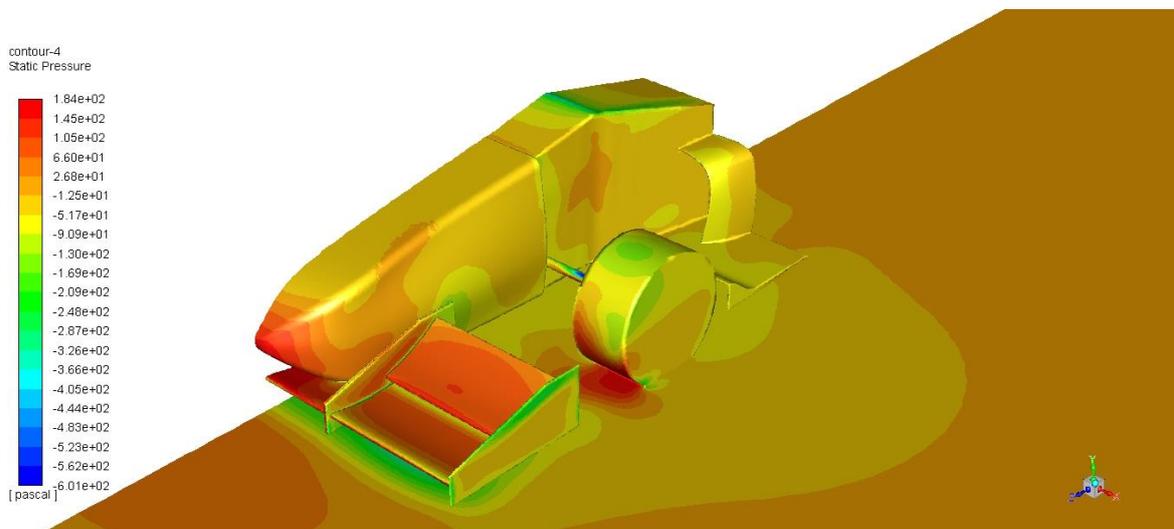


Imagen 13. Mapa de presión estática sobre la geometría de estudio y el suelo.

Otro fenómeno que se puede apreciar en los mapas de presión y velocidad representados en el Anexo II es el funcionamiento del alerón, esto es las diferencias de presión que genera su geometría, que inducen la fuerza de sustentación (en este caso carga aerodinámica). Se puede apreciar claramente en la Imagen 31 cómo en la parte superior (intradós), la presión aumenta y en la Imagen 33 cómo la velocidad disminuye, mientras que en la parte baja (extradós), la presión disminuye y la velocidad aumenta. También se aprecian en la Imagen 24 y en la Imagen 27 desprendimientos de la capa límite (representados en forma de depresiones y disminución de la velocidad del campo fluido en la misma región) en la parte baja de los *endplates*. Estos desprendimientos de la capa límite generan remolinos que se propagan hasta la rueda (los generados en la parte exterior del alerón) o interactúan con la geometría del morro (los generados en el *endplate* interno). Esta turbulencia se puede apreciar en la Imagen 14.

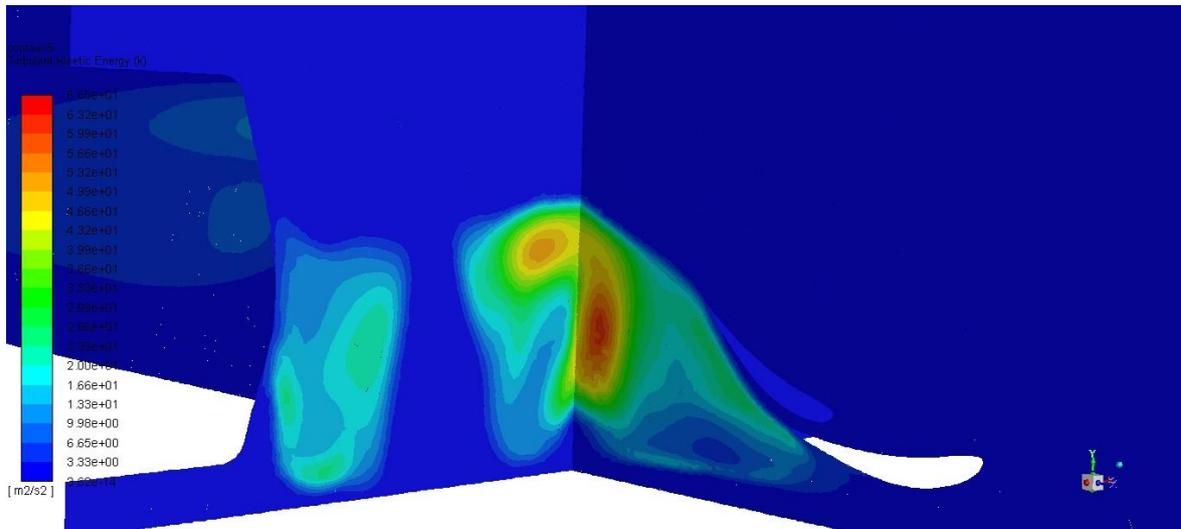


Imagen 14. Representación de una intersección de dos mapas de energía cinética de la turbulencia donde se pueden apreciar las turbulencias generadas por los desprendimientos de capa límite en la estela del alerón. El plano que contiene la geometría del alerón se encuentra cerca del *endplate* exterior.

También destaca la aparición de un vórtice en el extremo superior del *endplate* externo del alerón. Este se puede ver en la Imagen 24 y en la Imagen 27. El vórtice se propaga por toda la geometría estudiada impidiendo que la estela turbulenta de la rueda evolucione hacia el exterior del monoplaza (esto se puede apreciar en las imágenes Imagen 25, Imagen 26, Imagen 28 y Imagen 29), por lo que se podría decir que este vórtice «sella» el flujo alrededor del vehículo.

Como último punto de interés en el análisis que se está haciendo del flujo, se debe estudiar la estela de la rueda (Imagen 26 e Imagen 29). Esta genera un fuerte desprendimiento de la capa límite, lo que resulta en un aumento de la turbulencia y un movimiento caótico y desordenado del flujo. Este se propaga aguas abajo e interacciona con el pontón, haciendo que, especialmente en la parte baja de este, el flujo de aire no permanezca adherido a él viajando hacia la parte trasera del monoplaza, sino que este se desarrolla en remolinos. Estos remolinos se pueden apreciar en la Imagen 15 como una zona de baja velocidad donde no todos los vectores velocidad no se dirigen aguas abajo. Esta turbulencia también se puede ver cuantificada en la representación de la energía cinética de turbulencia de la Imagen 17.

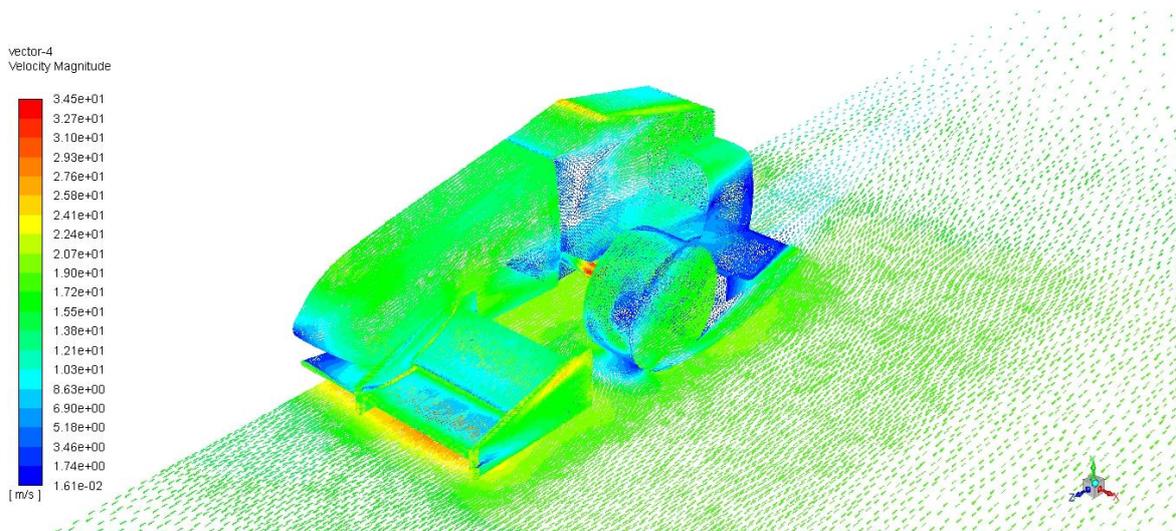


Imagen 15. Representación de los vectores velocidad sobre la geometría de estudio y el suelo del volumen de control. Se puede apreciar cómo en la estela de la rueda la velocidad disminuye considerablemente, llegando a producirse recirculaciones de flujo. Esto es efecto de la turbulencia que genera la rueda.

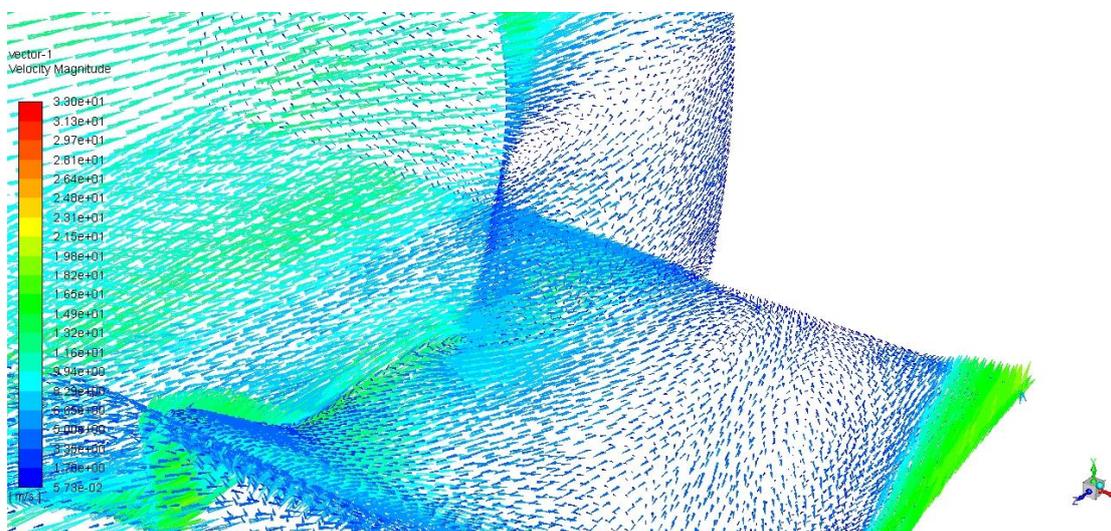


Imagen 16. Detalle de la Imagen 15 donde se pueden ver la mayoría de vectores velocidad representados en la parte superior del fondo plano y la parte inferior del pontón apuntando aguas arriba. Estas son las recirculaciones de flujo que aparecen en la estela de la rueda.

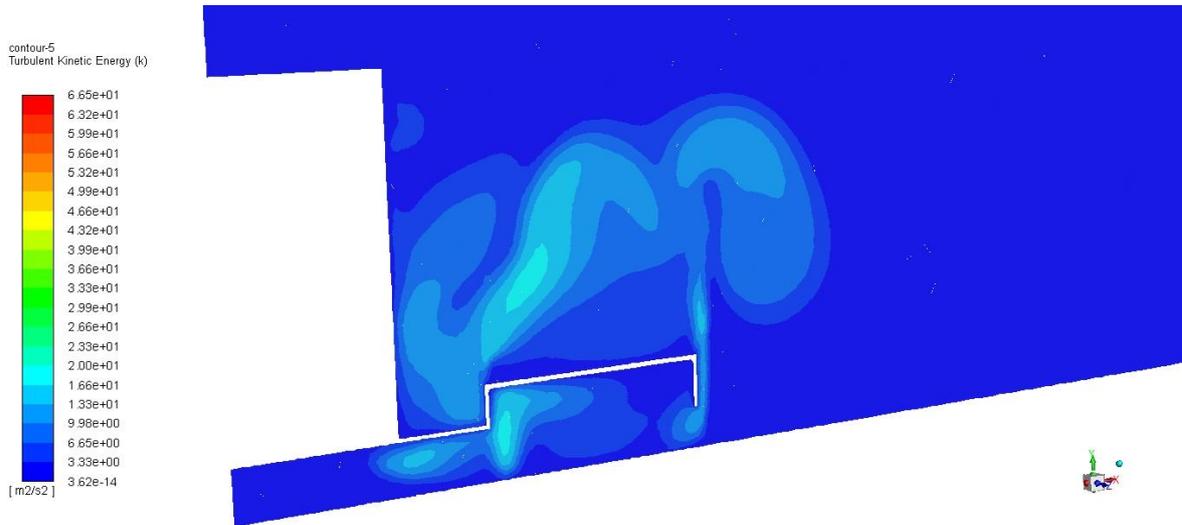


Imagen 17. Representación del mapa de energía cinética de la turbulencia en la estela de la rueda. Se puede ver cómo esta es mayor que en la corriente libre (parte derecha de la imagen).

Finalmente, es necesario puntualizar que, aunque se observa un claro y acusado desprendimiento de capa límite en la estela del vehículo, este no se va a tratar, ya que se debe en gran medida a que se trata de un modelo parcial en el que se ha eliminado la parte trasera del vehículo mediante un corte y se han dejado las aristas vivas y el cambio abrupto de sección. Todo esto favorece en gran medida al desprendimiento de capa límite y aumenta considerablemente la fuerza de arrastre (este cambio se refleja en el término de esta asociado a la presión), por ello los valores de esta fuerza obtenidos no son representativos y en los análisis de las geometrías propuestas que se desarrollarán a continuación, se estudiará simplemente el aumento de esta fuerza con respecto al valor obtenido en este estudio.

## Capítulo 8. ANÁLISIS DE LAS MEJORAS PROPUESTAS

Una vez analizada la geometría base, se van a estudiar tres propuestas de mejora. Estas consistirán en añadir un tercer elemento en cascada a la parte interior del alerón con un ángulo de ataque diferente en cada propuesta. En todas ellas se estudiará la velocidad en la sección de entrada de los pontones para, posteriormente, obtener una curva que represente la velocidad en dicho punto en función del ángulo de ataque del tercer elemento añadido. Esta será la curva que se deberá maximizar para obtener la velocidad máxima posible con esta geometría en la entrada de los pontones, para así cumplir con el primer objetivo de este Trabajo Fin de Grado de maximizar el caudal de aire en la refrigeración.

### **8.1 DESCRIPCIÓN DE LAS GEOMETRÍAS PROPUESTAS**

Las geometrías propuestas constarán de una parte de tres elementos en cascada en la parte del alerón comprendida entre el morro y el interior de la rueda. En cada una de las tres geometrías propuestas, variará el ángulo de ataque del tercer elemento de la cascada, por lo que variará el ángulo con el que la corriente abandona el alerón, lo que generará una mayor deflexión en la estela. Se busca con esta deflexión evitar la zona de las suspensiones, donde pueden producirse interacciones entre la corriente de aire y las barras de la suspensión, para posteriormente guiar el flujo en sentido descendente hasta la entrada de los pontones. Este guiado descendente se producirá de forma natural, debido al efecto de la gravedad. Lo que se intenta encontrar al resolver el problema de optimización planteado es aquel ángulo de salida de la estela del alerón que permita que este guiado descendente ocurra antes de la entrada de los pontones.

Para establecer los diferentes ángulos de ataque a estudiar, se ha decidido seguir con la progresión de la cascada de elementos, por lo que se ha elegido un intervalo de estudio entre el ángulo de ataque del segundo elemento del alerón ( $30^\circ$ ) y un valor límite de  $45^\circ$  (elegido al ser el valor límite para el que el área proyectada frontal del alerón empieza a ser mayor



que el área proyectada en planta). Se van a estudiar las geometrías de  $30^\circ$  (Imagen 18),  $40^\circ$  (Imagen 19) y  $45^\circ$  (Imagen 20).

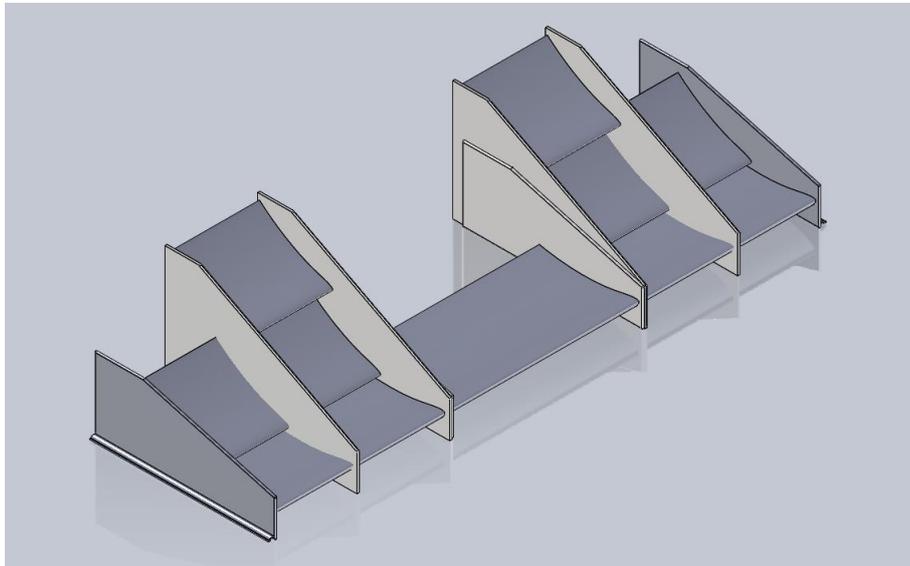


Imagen 18. Imagen de diseño de alerón con el tercer elemento con un ángulo de ataque de  $30^\circ$ . *SolidWorks*.

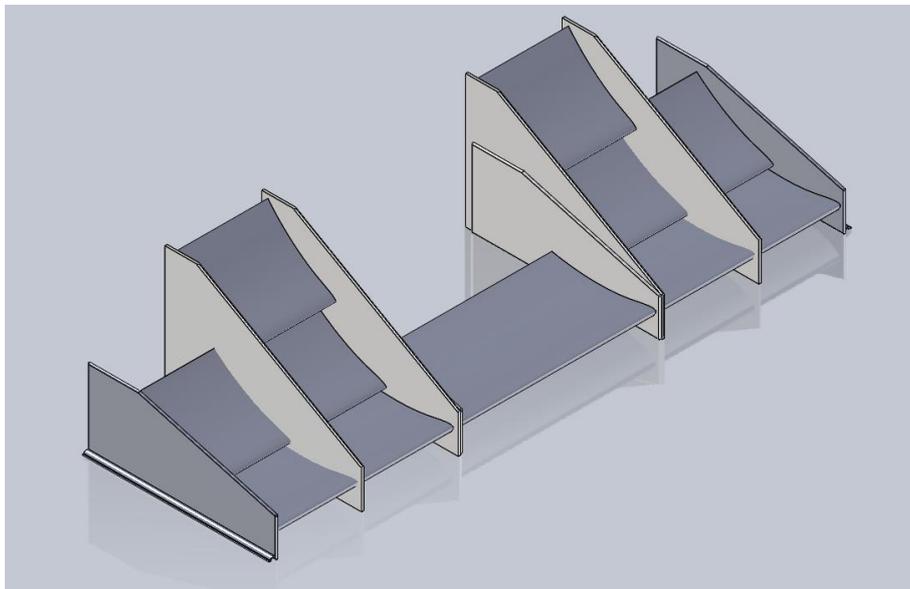


Imagen 19. Imagen de diseño de alerón con el tercer elemento con un ángulo de ataque de  $40^\circ$ . *SolidWorks*.

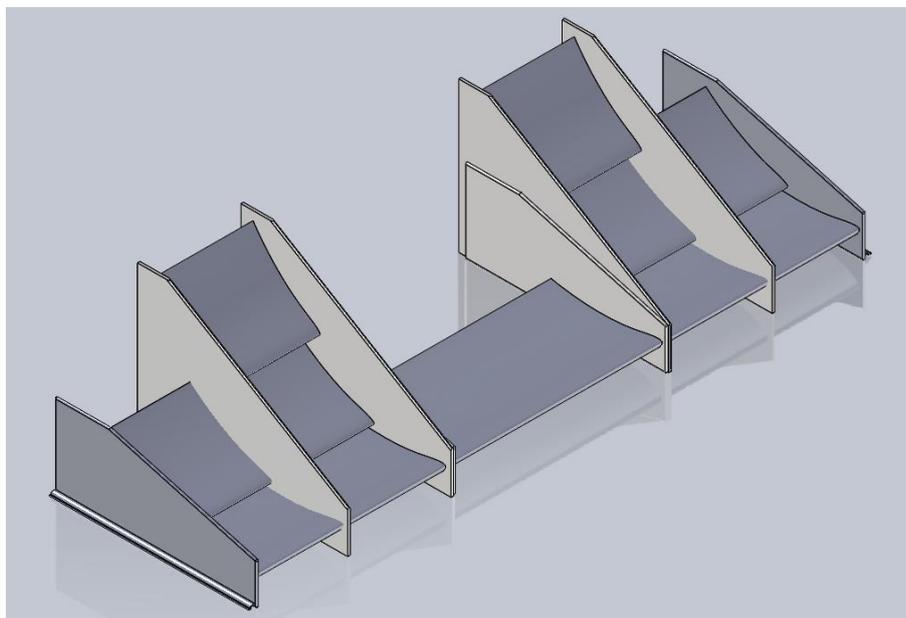


Imagen 20. Imagen de diseño de alerón con el tercer elemento con un ángulo de ataque de 45°. *SolidWorks*.

## 8.2 ANÁLISIS DE LAS GEOMETRÍAS PROPUESTAS

Para estudiar el efecto de la geometría diseñada en la velocidad del flujo a la entrada de los pontones se visualizará el mapa de velocidad en la sección de estudio para cada configuración. Estos se encuentran en el Anexo III.

Al ver con detalle los mapas de velocidad a la entrada de los pontones (Imagen 35, Imagen 36 e Imagen 37) y compararlos con el de la geometría base en la misma sección (Imagen 34), se observa que lejos de cumplir con el objetivo propuesto de aumentar la velocidad, para aumentar el caudal, esta ha disminuido, por lo que el caudal de aire que llega a la refrigeración es menor. En las imágenes se puede observar que, mientras en la geometría de referencia la velocidad en un punto medio de la sección era de aproximadamente 13 m/s, en las geometrías de 30°, 40° y 45° son de aproximadamente 9,2 m/s, 8,5 m/s y 9,5 m/s respectivamente.

Estudiando la estela del alerón (Imagen 38, Imagen 39 e Imagen 40 para la configuración de 30°; Imagen 41, Imagen 42 e Imagen 43 para la configuración de 40°; Imagen 44, Imagen 45 e Imagen 46 para la configuración de 45°), como se había propuesto en el segundo



Objetivos del Trabajo Fin de Grado, se puede comprobar que la velocidad disminuye considerablemente, en particular se produce un descenso brusco de la velocidad en el borde de fuga del segundo elemento de la cascada de tres elementos que se propaga aguas abajo generando recirculaciones de flujo. Estas recirculaciones son mayores en la geometría de  $30^\circ$  (Imagen 21), mientras que en las geometrías de  $40^\circ$  (Imagen 22) y especialmente de  $45^\circ$  (Imagen 23), se aprecia como se desarrollan hacia arriba siguiendo el ángulo de salida de la cascada de elementos del alerón.

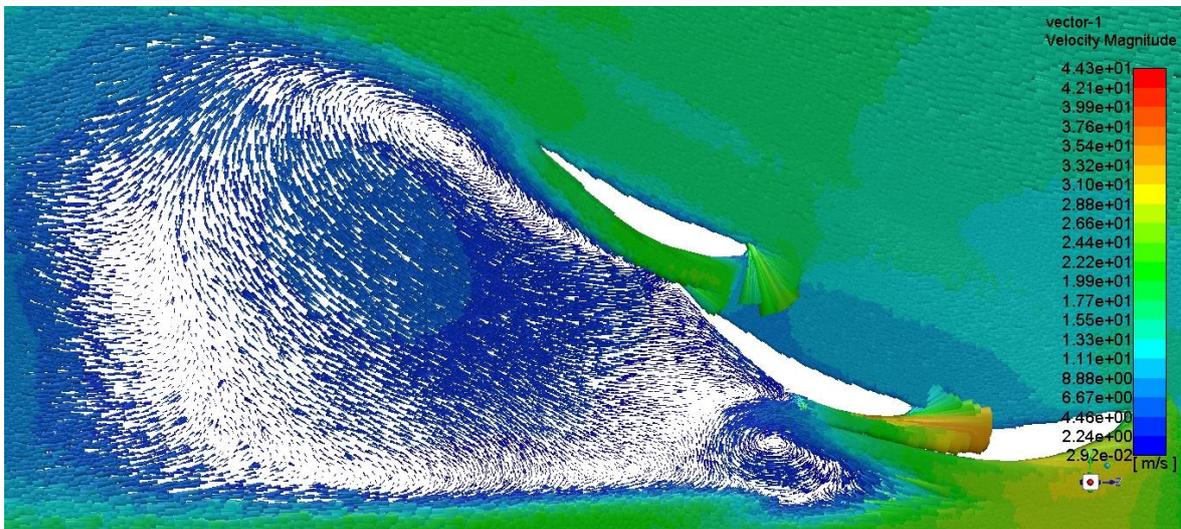


Imagen 21. Representación de los vectores velocidad en la estela del alerón con la configuración de  $30^\circ$ . Se observa una fuerte recirculación de flujo proveniente tanto del borde de fuga del primer como del segundo elemento del alerón.

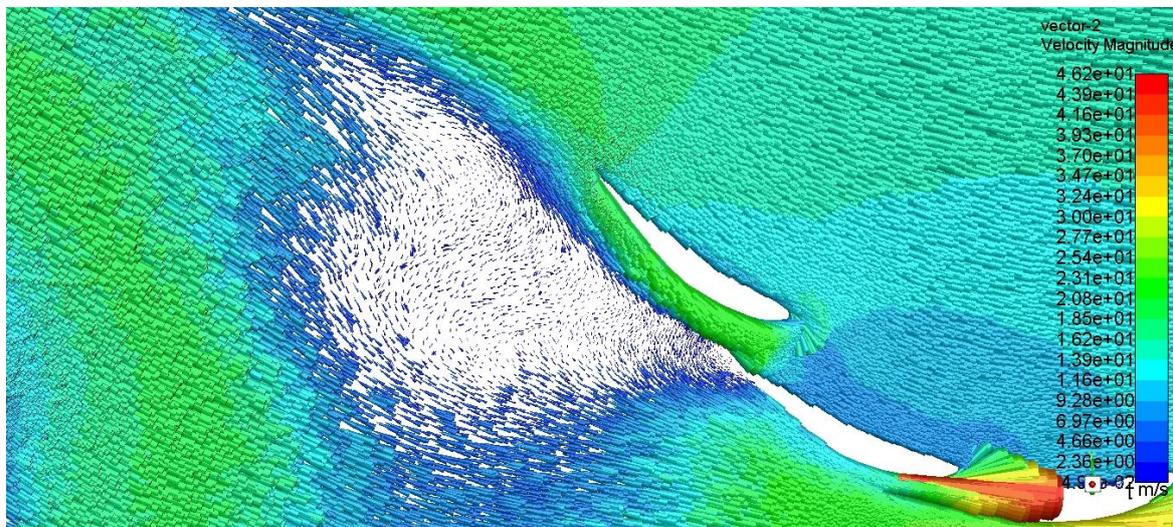


Imagen 22. Representación de los vectores velocidad en la estela del alerón con la configuración de 40°. Se observa que en este caso la recirculación de flujo aparece en el borde de fuga del segundo elemento del alerón y es menos fuerte que en el caso anterior.

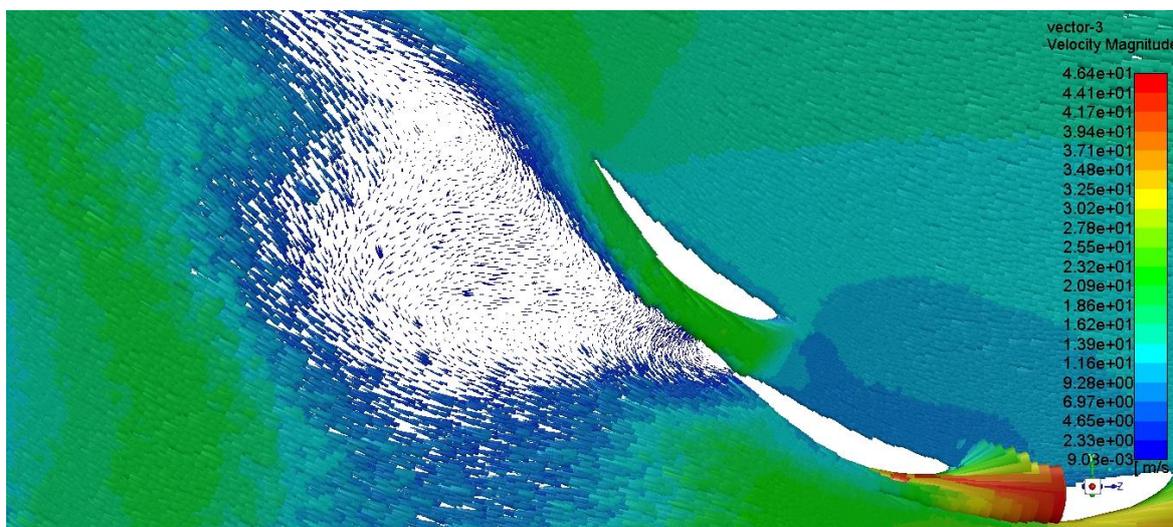


Imagen 23. Representación de los vectores velocidad en la estela del alerón con la configuración de 45°. Al igual que en la geometría de 40°, las recirculaciones que se observan son menores que en la geometría de 30°.

La aparición de estas recirculaciones aumenta a su vez considerablemente la intensidad de la turbulencia en la estela del alerón, lo que tiene un efecto perjudicial sobre el flujo alrededor de los pontones y en la parte superior del fondo plano, al aparecer en dichas zonas recirculaciones del flujo. Esta turbulencia viaja aguas abajo en sentido ligeramente ascendente como se puede apreciar en la Imagen 40, Imagen 43 e Imagen 46. Este ascenso



es especialmente acusado al abandonar la geometría del alerón, donde la estela adquiere el ángulo de salida de la cascada de tres elementos del alerón.

Por último, destaca la aparición de un vórtice en el extremo superior del *endplate* intermedio del alerón (el que separa la parte de dos de la de tres elementos) en las tres geometrías propuestas. Este vórtice es especialmente interesante ya que se propaga en dirección ascendente, pasando por encima de la rueda, y ligeramente hacia el exterior del vehículo, como se puede apreciar en la Imagen 47 y la Imagen 48 para la geometría de 30°; en la Imagen 49 y la Imagen 50 para la geometría de 40° y en la Imagen 51 y la Imagen 52 para la geometría de 45°. Esto hace que la turbulencia que se genera en la estela no se disperse hacia el exterior, manteniéndola cerca de la carrocería del vehículo.<sup>7</sup>



## Capítulo 9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 9.1 CONCLUSIONES EXTRAÍDAS DEL ANÁLISIS DE LAS GEOMETRÍAS PROPUESTAS

Aunque con las geometrías propuestas no se ha conseguido satisfacer el primer objetivo del presente Trabajo Fin de Grado de maximizar el caudal de aire en la refrigeración del vehículo, se pueden extraer conclusiones interesantes de los estudios realizados.

En primer lugar, destaca la aparición de recirculaciones en el borde de fuga del segundo elemento de la cascada de tres elementos del alerón, recirculaciones que se propagan aguas abajo afectando a la geometría del vehículo. Este hecho pone de manifiesto que los ángulos de ataque elegidos para los elementos del alerón, si bien estaban optimizados en trabajos previos del Departamento de Aerodinámica del *ISC Formula Student Racing Team*, no son óptimos para una geometría de tres elementos, por lo que se tendrían que volver a recalcular.

En segundo lugar, y en relación con el segundo objetivo propuesto en el Trabajo Fin de Grado, se ha observado la aparición de vórtices en los extremos superiores de los *endplates* del alerón. Este hecho no constituye un hallazgo sorprendente, ya que era algo esperable. Sin embargo, su importancia radica en la interacción de estos vórtices con las estelas del alerón y de la rueda aguas abajo. Como se ha podido comprobar, estos vórtices guían las estelas turbulentas actuando como barrera. Aunque en la geometría analizada este hecho era perjudicial, ya que forzaba a estas estelas a entrar en contacto con la carrocería del monoplace, se ha demostrado que la aparición de estos vórtices es algo natural y que tienen un fuerte poder de guiado sobre la estela. Por ello, se podría buscar mediante el guiado correcto de estos vórtices alejarla del resto de elementos aerodinámicos del vehículo, como hacen los equipos de *Formula 1*.

Finalmente, haciendo referencia al tercer objetivo propuesto, no se ha conseguido energizar la corriente aguas abajo del alerón, para conseguir que permaneciera adherida a la carrocería del monoplace. Lejos de esto, la corriente ha perdido velocidad aguas abajo del



alerón, generándose recirculaciones de flujo. Este hecho, como se ha explicado en la primera conclusión expuesta, puede darse debido a una mala elección de la geometría propuesta. Aunque también hace patente la necesidad de dispositivos aerodinámicos como pequeñas aletas en el alerón y en otras partes del monoplaza para conseguir este fin.

### 9.1.1 OPTIMIZACIÓN DE LA CARGA AERODINÁMICA GENERADA POR EL ALERÓN

Aunque no se haya conseguido optimizar la geometría en función de los objetivos marcados, sí se ha podido optimizar en función de la carga aerodinámica generada. Los valores obtenidos se pueden observar en la Tabla 11. Como se puede observar en la

Tabla 12, se ha incrementado la carga aerodinámica en un 13,72%, 21,3% y 26,65 % con respecto al caso base.

Tabla 11. Valores de carga aerodinámica y fuerza de arrastre para cada una de las geometrías estudiadas.

CASO	CARGA AERODINÁMICA	FUERZA DE ARRASTRE
Base	58,479	149,915
Geometría de 30°	65,777	170,482
Geometría de 40°	70,935	184,483
Geometría de 45°	74,061	191,615

Tabla 12. Porcentajes de aumento de la carga aerodinámica y la fuerza de arrastre con respecto al caso base.

CASO	% AUMENTO CARGA AERODINÁMICA	% AUMENTO FUERZA DE ARRASTRE
Geometría de 30°	13,719	12,481
Geometría de 40°	23,058	21,3
Geometría de 45°	27,816	26,647

Lamentablemente, al aumentar la carga aerodinámica, aumenta la fuerza de arrastre. Por ello, una forma de cuantificar la mejora global es utilizar el cociente de carga aerodinámica o sustentación y fuerza de arrastre. Si se representan estos valores en una gráfica, se pueden ajustar por una curva polinómica de regresión para buscar el ángulo de ataque óptimo del tercer elemento del alerón. Esto se muestra en el Gráfico 4.

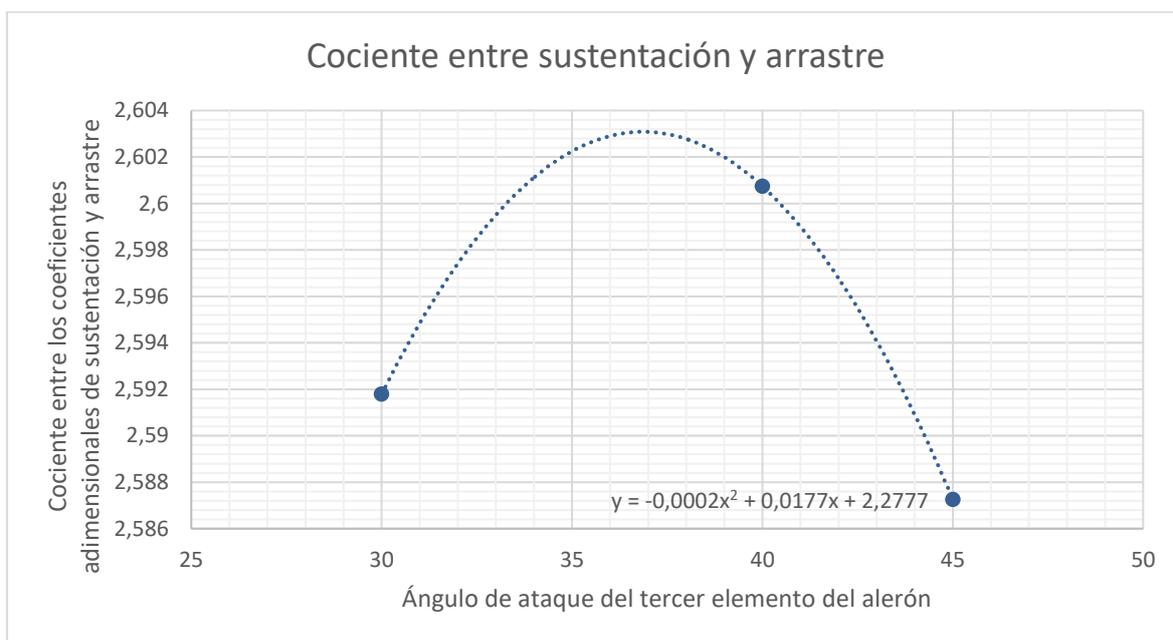


Gráfico 4. Representación del cociente entre los coeficientes adimensionales de sustentación y fuerza de arrastre para cada ángulo de ataque del tercer elemento analizado. En el gráfico se ha representado también la curva de regresión que ajusta los puntos obtenidos, así como su fórmula.

Realizando dicha optimización, el máximo valor del cociente se obtiene para un ángulo de aproximadamente 37°, alcanzando un valor de 2,603. Lo que supone un pequeño incremento con respecto al valor original, que era de 2,563.

La validez de estos resultados para su implementación en el monoplaza se deberá estudiar en función del tiempo por vuelta que se pueda ganar con ellas. También se deberá tener en cuenta si, aunque disminuya el caudal de aire que llega a la refrigeración, este es suficiente. No obstante, la refrigeración que monta el *IFS-04* consta de un ventilador, elemento que no se ha incluido en esta simulación al tratarse simplemente de un análisis aerodinámico a



grandes rasgos. Una simulación más detallada que implementara el ventilador podría arrojar resultados diferentes a los aquí obtenidos.

## ***9.2 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE***

Como en todo proyecto de ingeniería hoy en día, se deberá medir la sostenibilidad del proyecto. Para ello, se estudiará la alineación de este con los *Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS)*.

Según los objetivos descritos anteriormente, este Trabajo Fin de Grado se enmarca dentro del *ODS 9* fundamentalmente. Este hace referencia a la Industria, Innovación e Infraestructura. Dado que se trata de un proyecto de optimización de un diseño, las posibles soluciones a adoptar son en cierto modo innovadoras.

También, debido a que el proyecto del *ISC Formula Student Racing Team* tiene como objetivo el diseño y fabricación de un monoplaza de competición eléctrico, el presente Trabajo Fin de Grado se puede asociar con el *ODS 7*, que hace referencia a la Energía Asequible y No Contaminante. Siempre y cuando se pueda presuponer que la electricidad con la que se alimenta el vehículo proviene de una generación neutra en carbono.

***ANEXOS***





# ANEXO I. PARÁMETROS PARA CONFIGURAR LA SIMULACIÓN REALIZADA EN *ANSYS- FLUENT*

Fluent

Version: 3d, pbns, rke (3d, pressure-based, realizable k-epsilon)

Release: 19.1.0

## *MODELS*

Model	Settings
Space	3D
Time	Steady
Viscous Realizable	k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Non-Equilibrium Wall Functions
Heat Transfer	Disabled
Solidification and Melting	Disabled
Species	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Disabled
NOx Pollutants	Disabled
SOx Pollutants	Disabled
Soot	Disabled
Mercury Pollutants	Disabled

## *MATERIAL PROPERTIES*

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	1,225
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1006,43
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0,0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1,7894e-05
Molecular Weight	kg/kmol	constant	28,966
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Speed of Sound	m/s	none	#f



## ***CELL ZONE CONDITIONS***

### **ZONES**

Name	id	Type
air	13	fluid

### **SETUP CONDITIONS**

#### ***Air***

Condition	Value
Frame Motion?	no

## ***BOUNDARY CONDITIONS***

### **ZONES**

Name	id	Type
velocity_inlet	6	velocity-inlet
preassure_outlet	7	pressure-outlet
suelo	8	wall
rueda	9	wall
coche	10	wall
symmetry	11	symmetry
symmetry.1	12	symmetry

### **SETUP CONDITIONS**

#### ***Velocity Inlet***

Condition	Value
Velocity Magnitude (m/s)	17

***Pressure Outlet***

Condition	Value
-----------	-------

---

***Suelo***

Condition	Value
Wall Motion	1
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Velocity Magnitude (m/s)	17
X-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	-1

***Rueda***

Condition	Value
Wall Motion	1
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	yes
Rotation Speed (rad/s)	84,158
X-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0,69
Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0,11
Z-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0,23
X-Component of Rotation-Axis Direction	1
Z-Component of Rotation-Axis Direction	0

***Coche***

Condition	Value
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0

***Symmetry***

Condition	Value
-----------	-------

---

***Symmetry.1***

Condition	Value
-----	

***SOLVER SETTINGS*****EQUATIONS**

Equation	Solved
-----	
Flow	yes
Turbulence	yes

**NUMERICS**

Numeric	Enabled
-----	
Absolute Velocity Formulation	yes

**RELAXATION**

Variable	Relaxation Factor
-----	
Pressure	0.3
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.34999999
Turbulent Kinetic Energy	0.40000001
Turbulent Dissipation Rate	0.40000001
Turbulent Viscosity	0.44999999

**LINEAR SOLVER**

Variable	Solver Type	Termination Criterion	Residual Reduction Tolerance
-----			
Pressure	V-Cycle	0.1	
X-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Y-Momentum	Flexible	0.1	0.7



Z-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Turbulent Kinetic Energy	Flexible	0.1	0.7
Turbulent Dissipation Rate	Flexible	0.1	0.7

### **PRESSURE-VELOCITY COUPLING**

Parameter	Value
Type	SIMPLE

### **DISCRETIZATION SCHEME**

Variable	Scheme
Pressure	Standard
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	Second Order Upwind

### **SOLUTION LIMITS**

Quantity	Limit
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5e+10
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	10000000





## **ANEXO II. MAPAS DE PRESIÓN Y VELOCIDAD DE LA GEOMETRÍA BASE**

*MAPAS DE PRESIÓN TRANSVERSALES A LA GEOMETRÍA*



Imagen 24. Mapa de presión estática en un plano transversal a la geometría situado en la parte trasera del alerón. Se puede apreciar la aparición de un vórtice en el extremo superior del *endplate* externo.



Imagen 25. Mapa de presión estática en un plano transversal a la geometría situado en la rueda del modelo. Se aprecia la depresión causada por el desprendimiento de capa límite alrededor de la rueda.

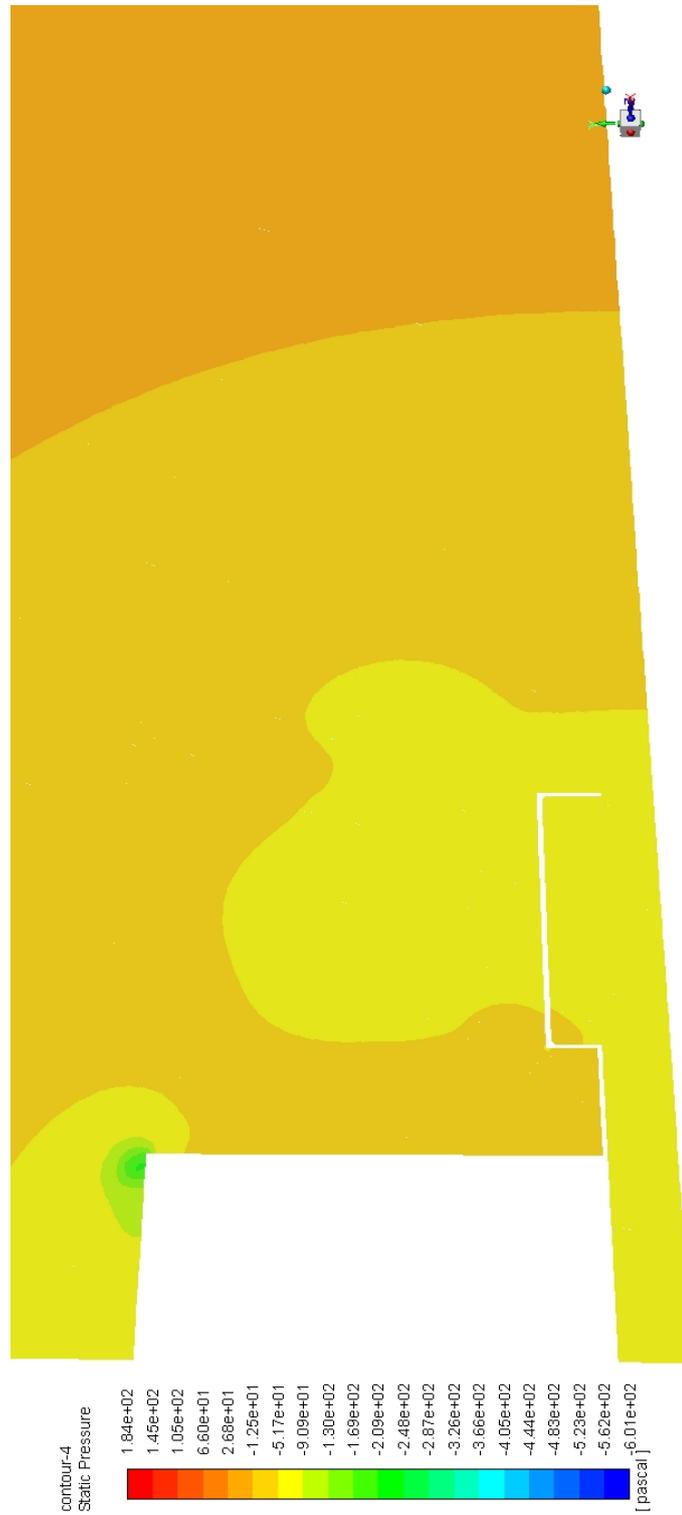


Imagen 26. Mapa de presión estática en un plano transversal a la geometría situado al inicio del fondo plano. Se aprecia la depresión de la estela de la rueda.



***MAPAS DE VELOCIDAD TRANSVERSALES***

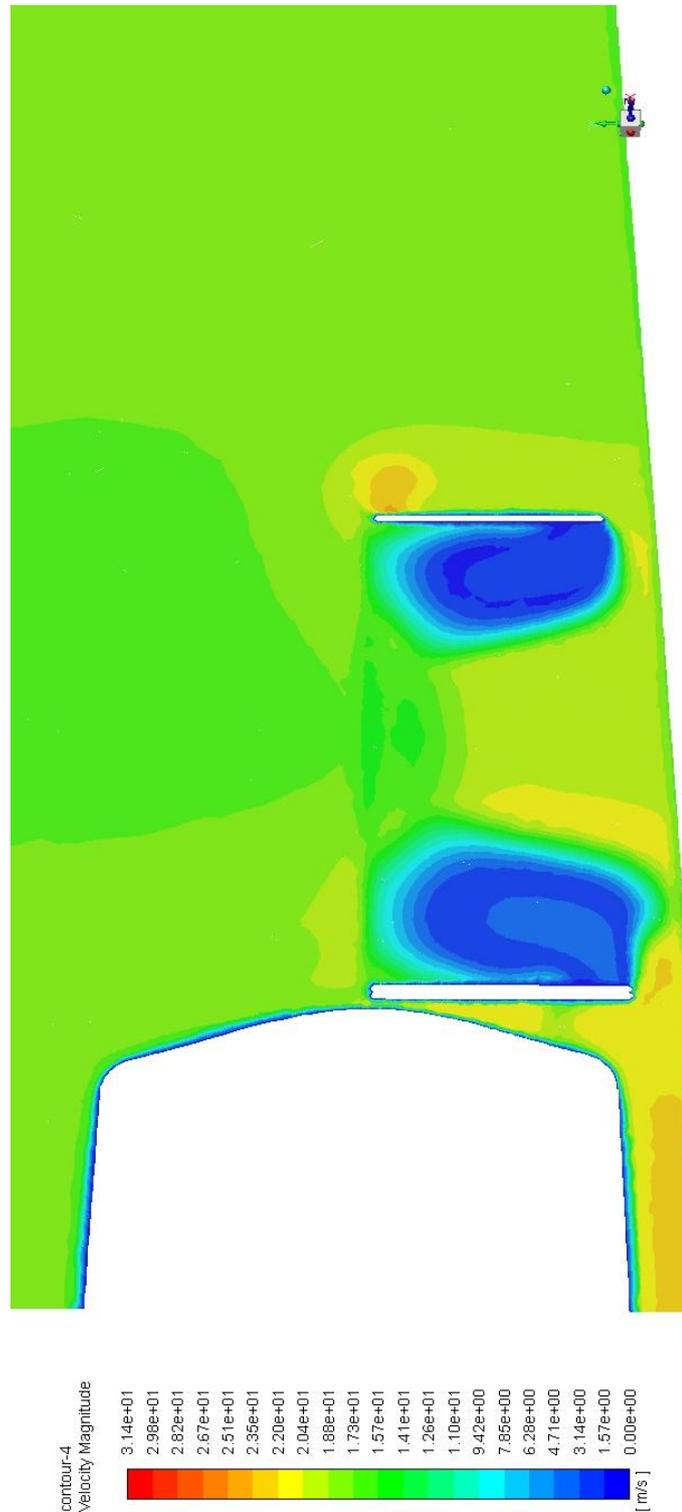


Imagen 27. Mapa de velocidad en un plano transversal a la geometría situado en la parte trasera del alerón.

Se puede apreciar la aparición de un vórtice en el extremo superior del *endplate* externo. Así como la aparición de zonas donde se ralentiza el flujo cerca de la parte inferior de los *endplates*.

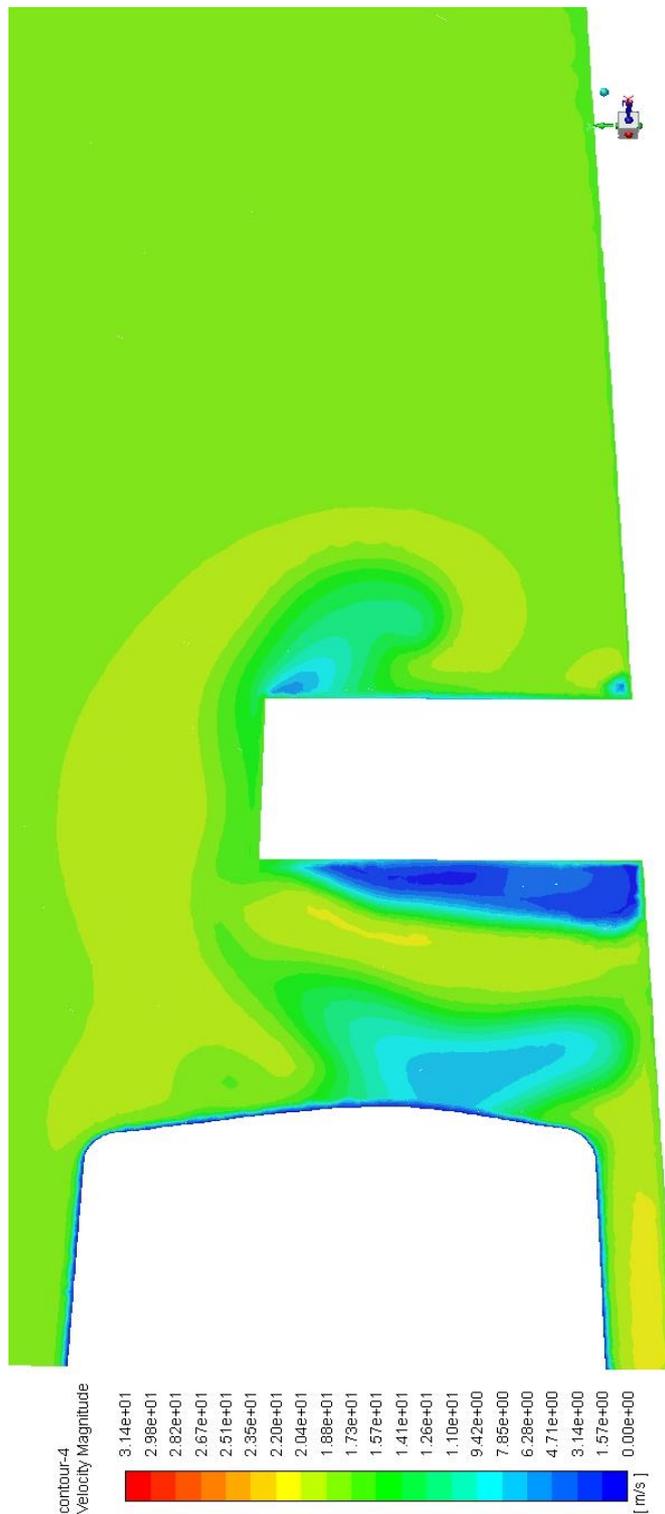


Imagen 28. Mapa de en un plano transversal a la geometría situado en la rueda del modelo. Se aprecia la depresión causada por el desprendimiento de capa límite alrededor de la rueda.

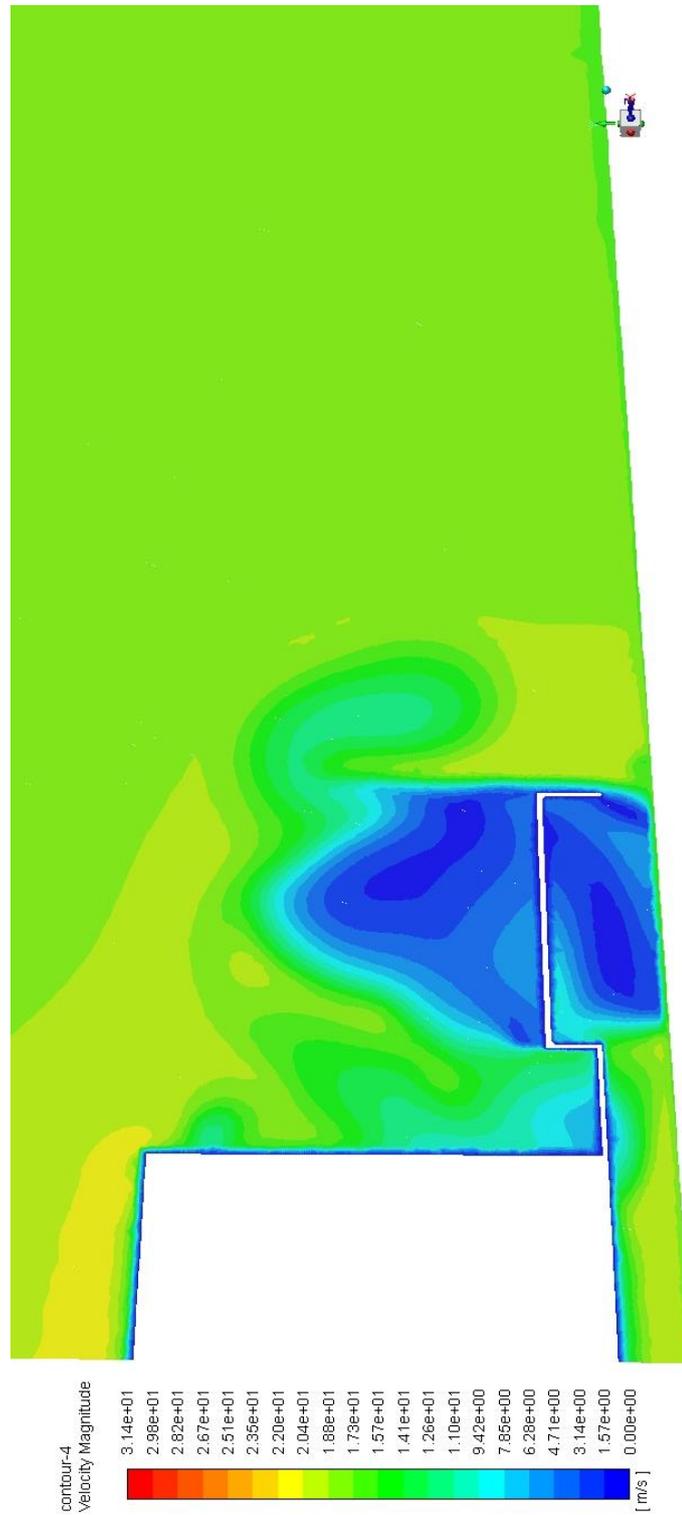


Imagen 29. Mapa de velocidad en un plano transversal a la geometría situado al inicio del fondo plano. Se aprecia la depresión de la estela de la rueda.



***MAPAS DE PRESIÓN LONGITUDINALES***

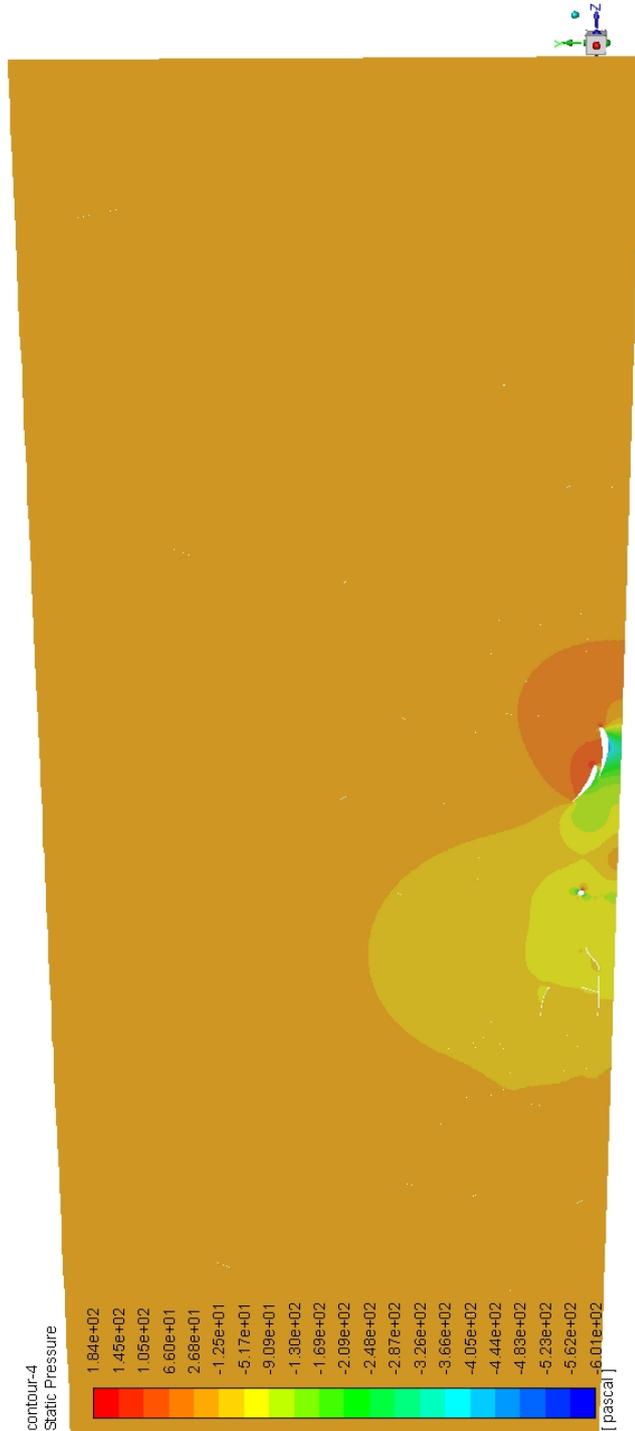


Imagen 30. Mapa de presión estática en un plano transversal a la geometría de estudio que corta a los dos elementos del alerón delantero. Se puede apreciar cómo la presión es constante en la corriente incidente.

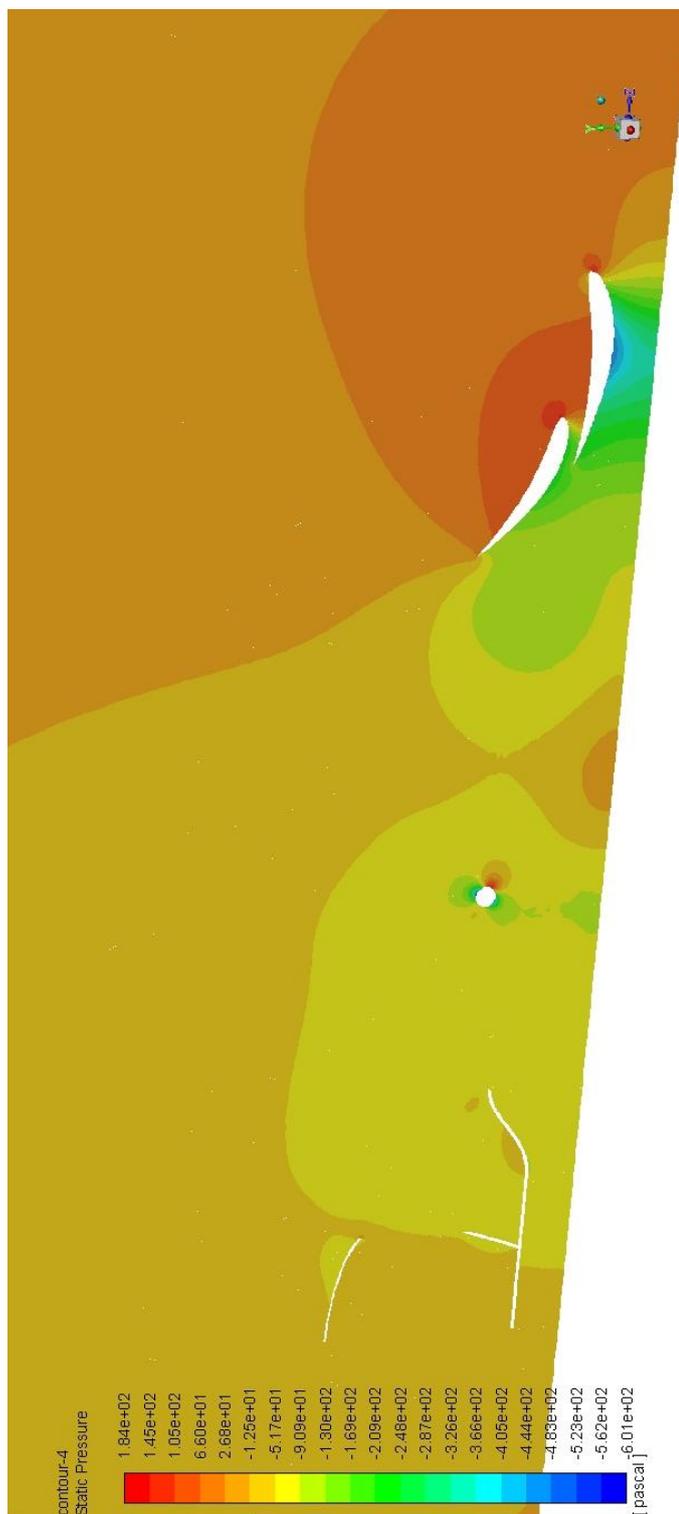


Imagen 31. Detalle cerca de la geometría del monoplaza del mapa de presión estática anterior. Se pueden apreciar las diferencias de presiones generadas en cada elemento del alerón, así como las depresiones de las estelas del alerón y la rueda.



## *MAPAS DE VELOCIDAD LONGITUDINALES*

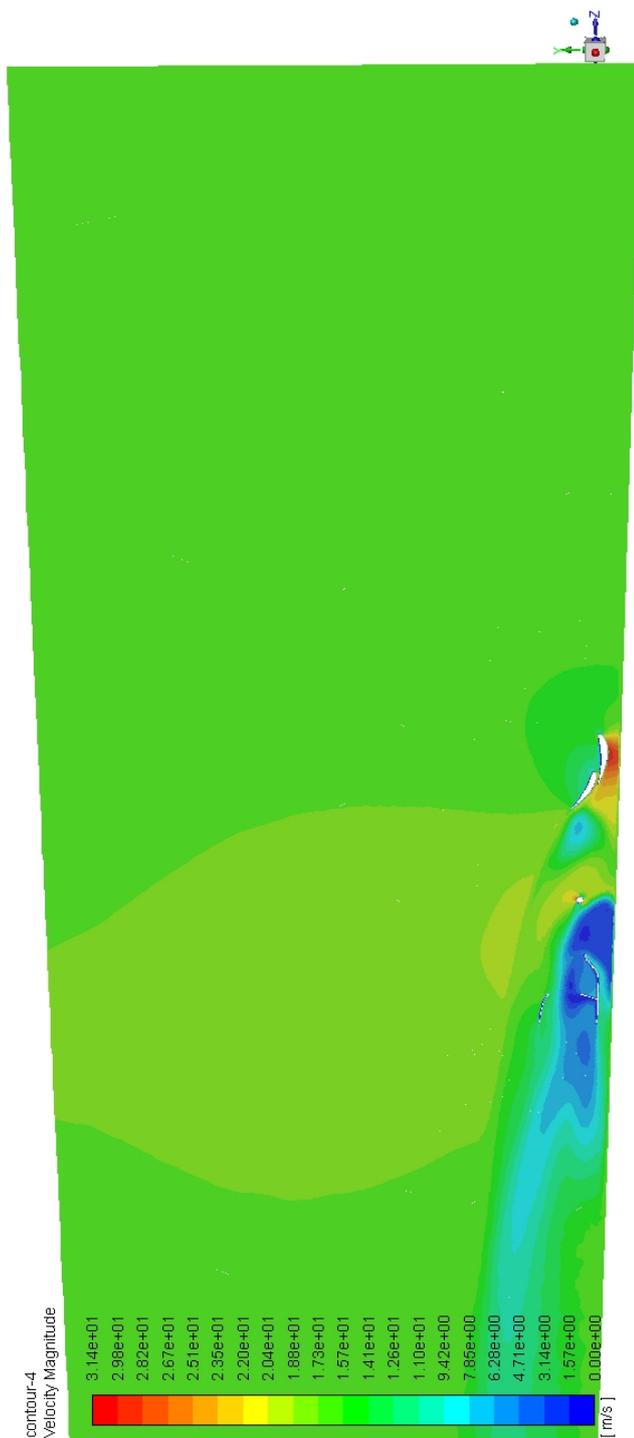


Imagen 32. Mapa de velocidad en un plano transversal a la geometría de estudio que corta a los dos elementos del alerón delantero. Se puede apreciar cómo la velocidad es constante en la corriente incidente.

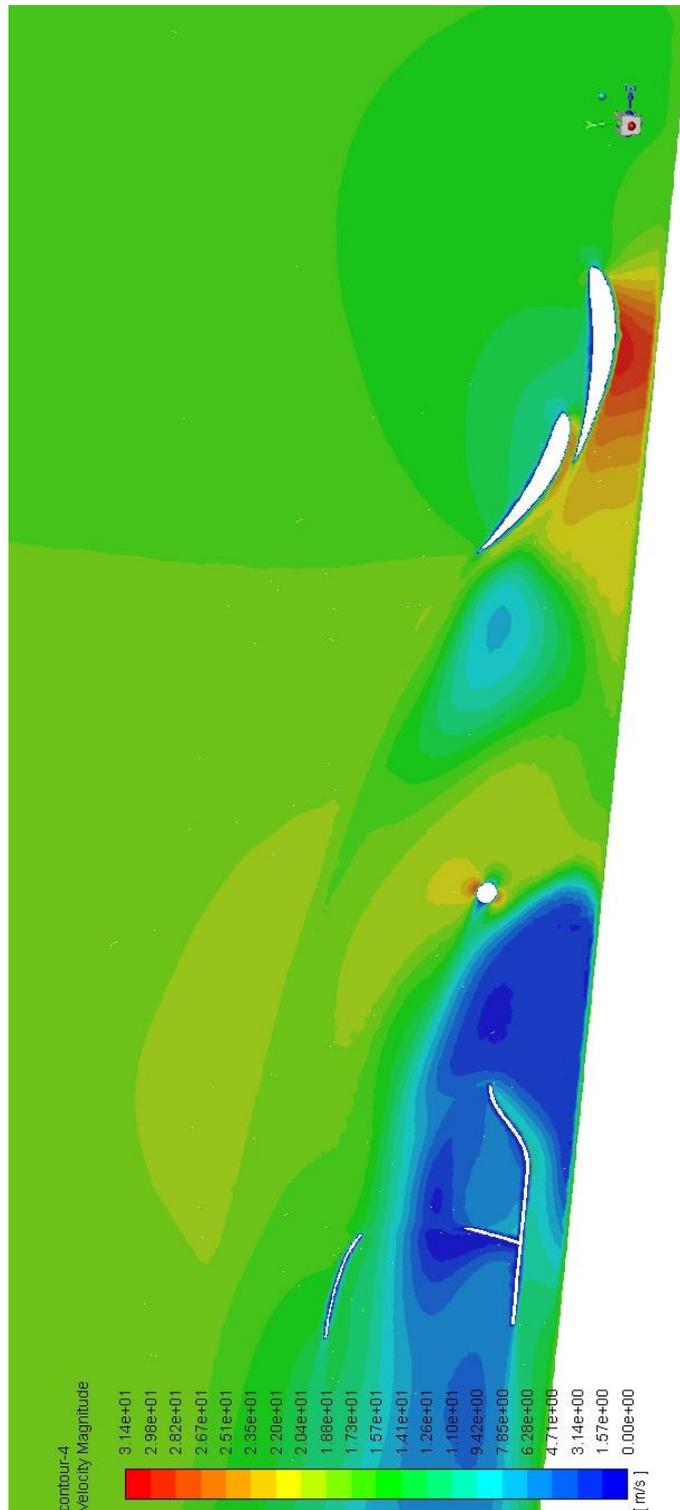


Imagen 33. Detalle cerca de la geometría del monoplaça del mapa de velocidad anterior. Se pueden apreciar las diferencias de presiones generadas en cada elemento del alerón, así como las depresiones de las estelas del alerón y la rueda.



**ANEXO III MAPAS DE VELOCIDAD DE LA SECCIÓN  
DE ENTRADA EN LOS PONTONES PARA  
TODAS LAS GEOMETRÍAS ESTUDIADAS**

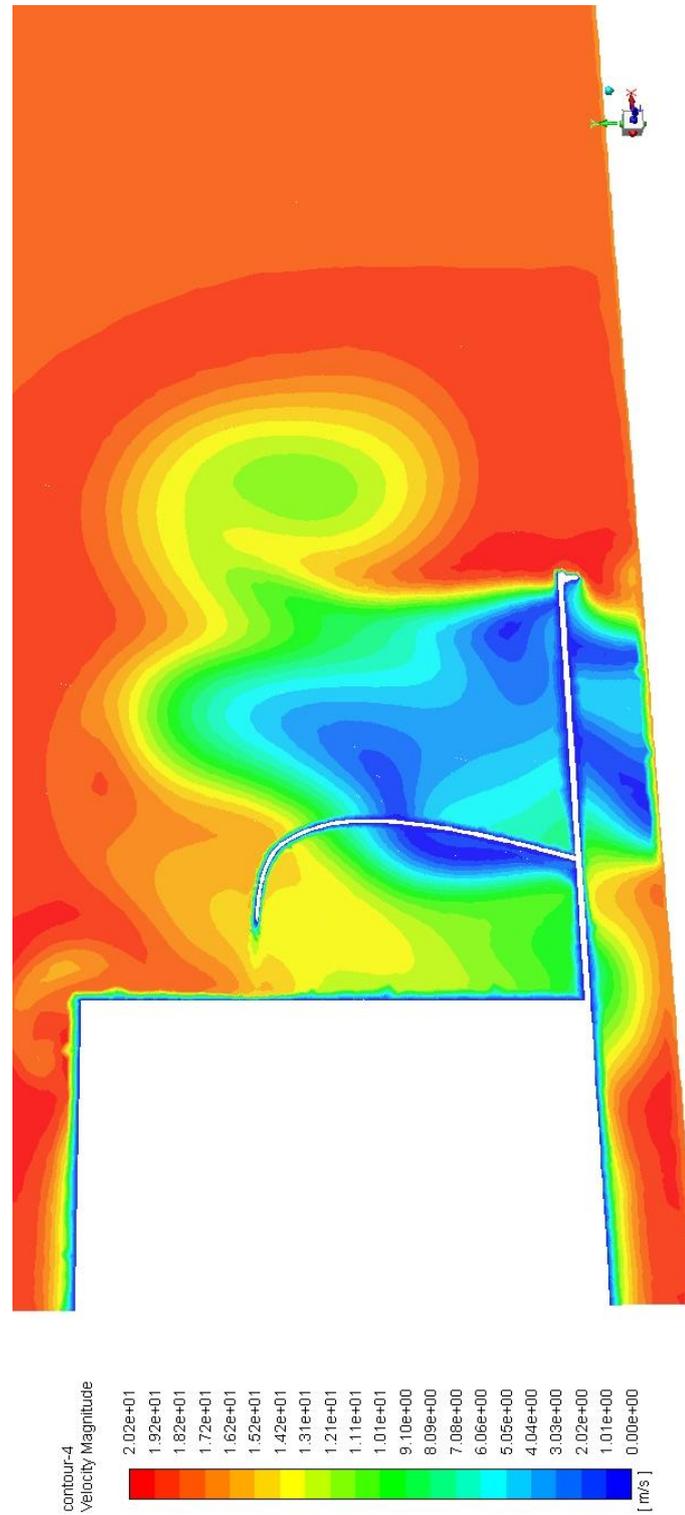


Imagen 34. Mapa de velocidad en la sección de entrada del pontón de la geometría base.

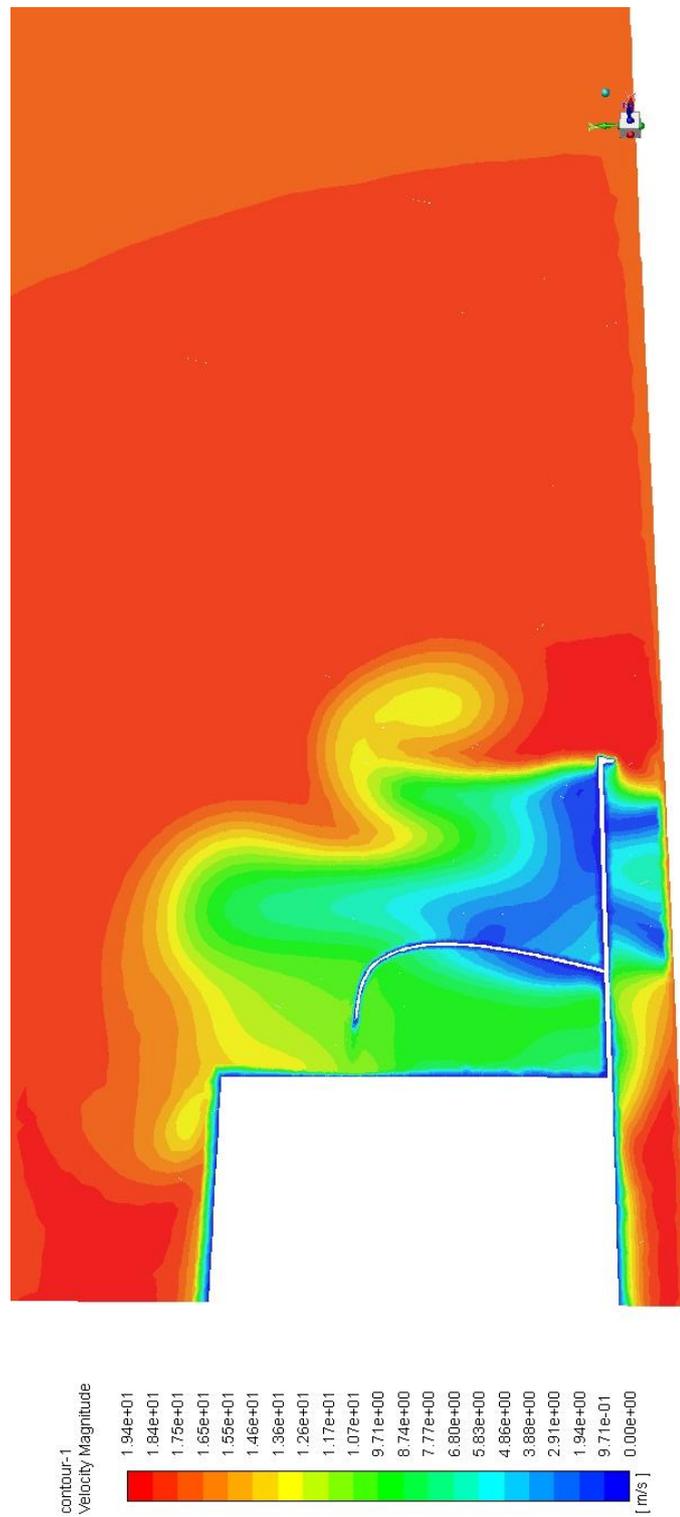


Imagen 35. Mapa de velocidad en la sección de entrada del pontón de la geometría con ángulo de 30°.

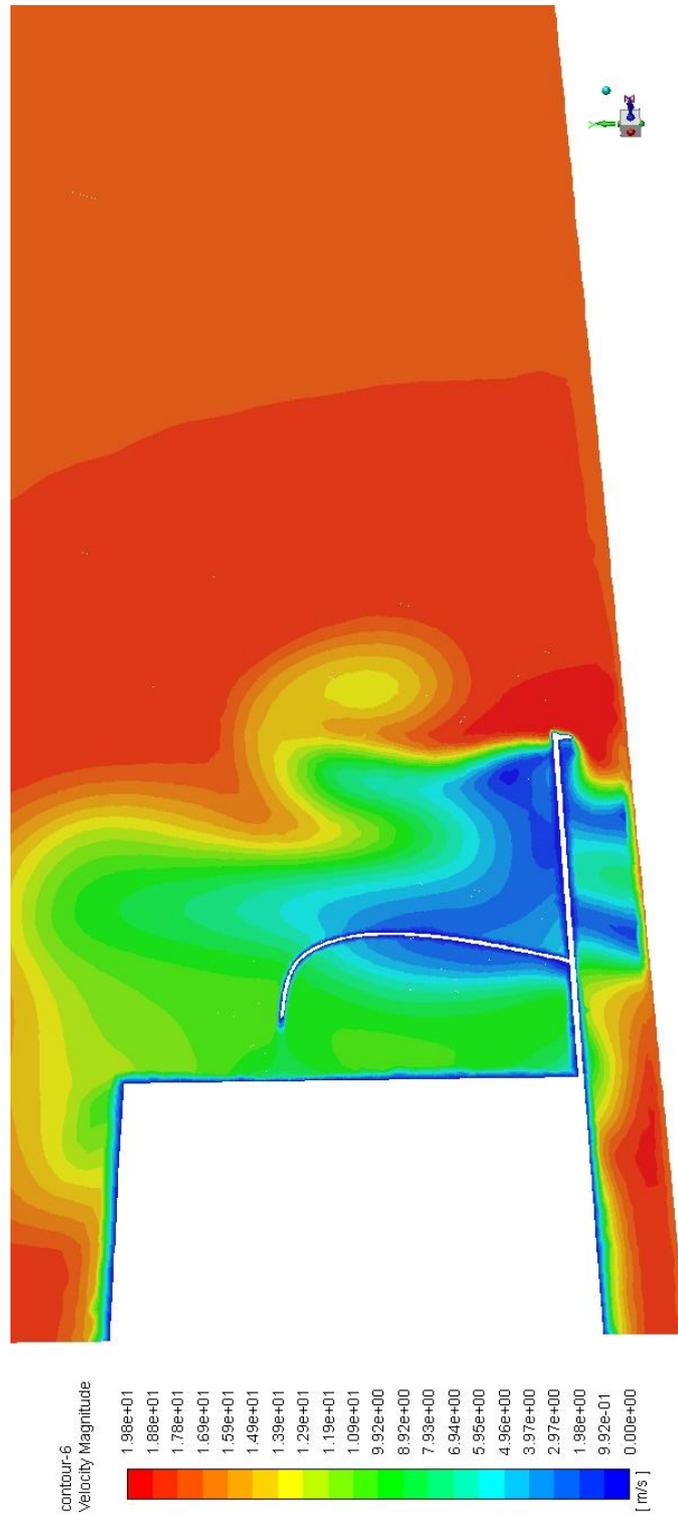


Imagen 36. Mapa de velocidad en la sección de entrada del pontón de la geometría con ángulo de 40°.

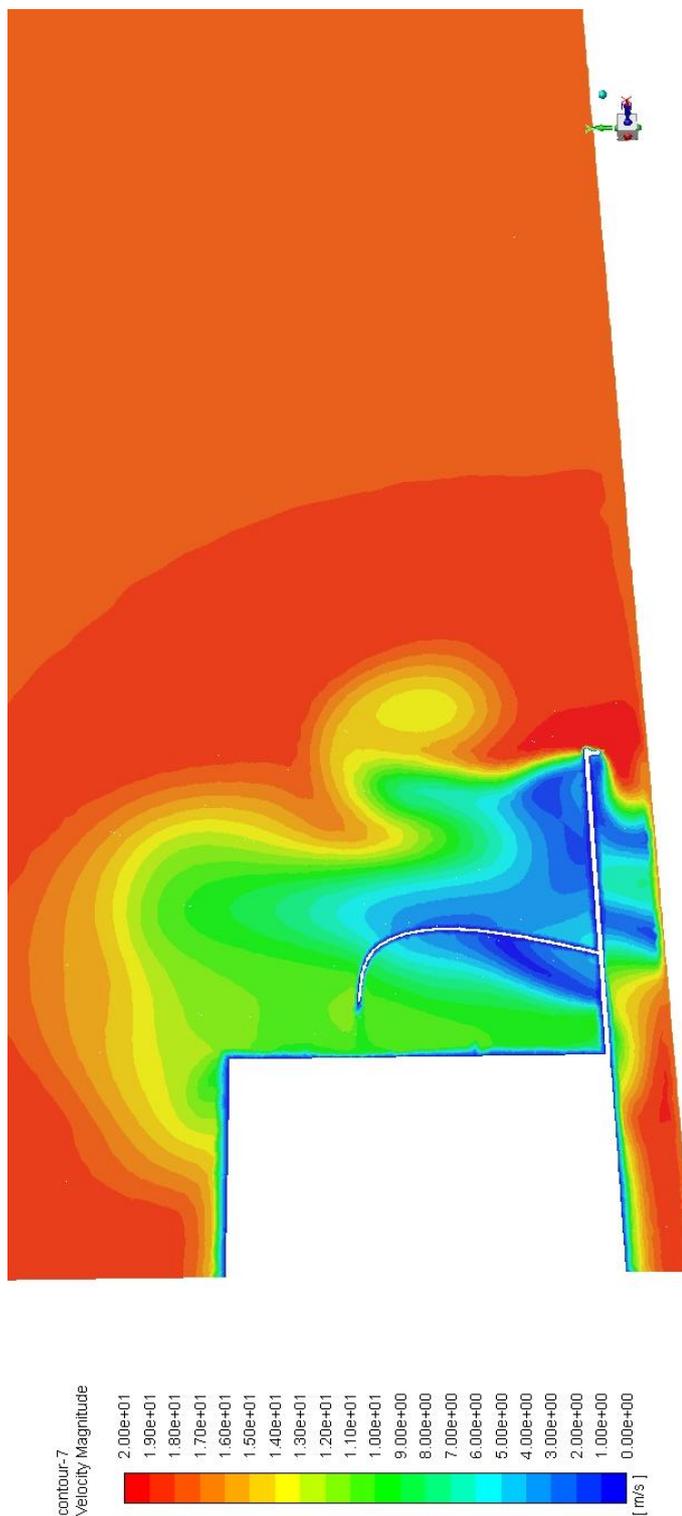


Imagen 37. Mapa de velocidad en la sección de entrada del pontón de la geometría con ángulo de 45°.





**ANEXO IV MAPAS DE VELOCIDAD, PRESIÓN Y  
TURBULENCIA DE LAS GEOMETRÍAS  
PROPUESTAS**

***MAPAS DE VELOCIDAD, PRESIÓN E INTENSIDAD DE TURBULENCIA  
DE LA ESTELA DEL ALERÓN DE LA GEOMETRÍA DE 30°***

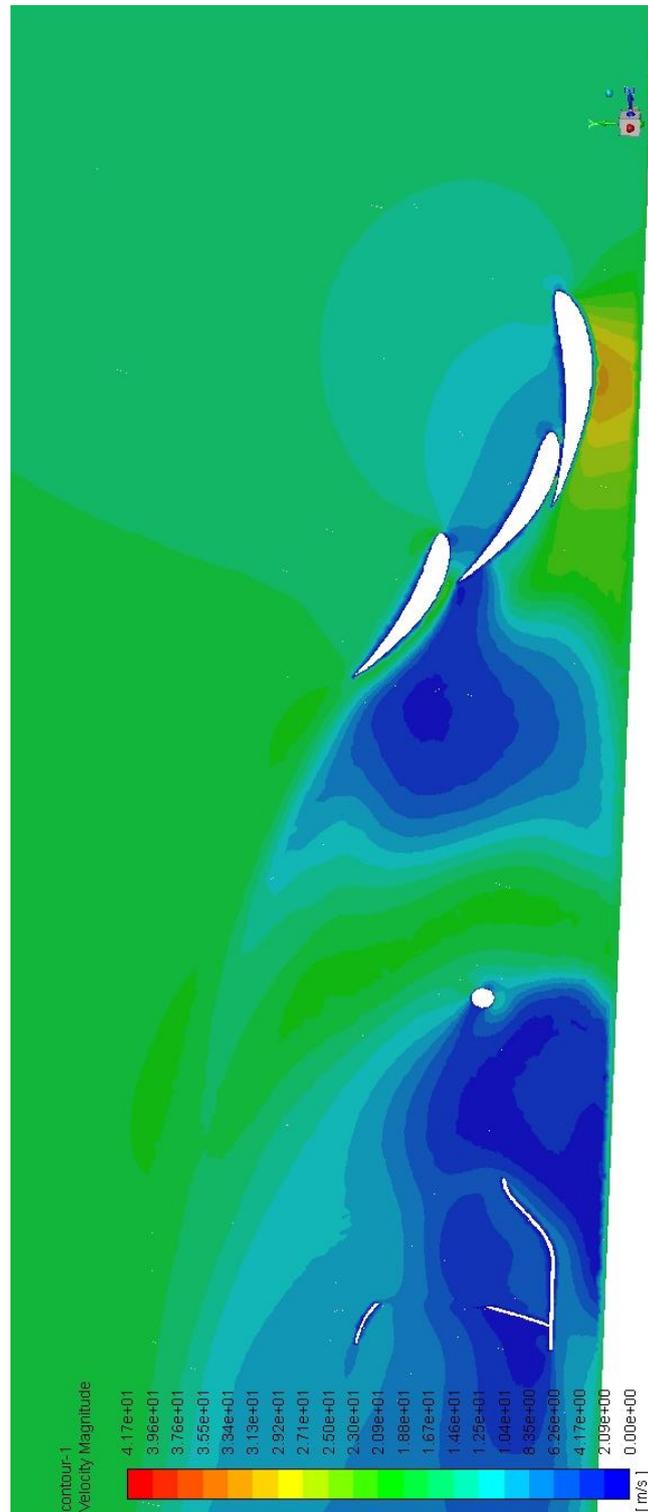


Imagen 38. Mapa de velocidad en un plano longitudinal que corta al alerón por la parte de tres elementos correspondiente a la geometría de 30°. Se aprecian los efectos de la estela del alerón y la estela de la rueda.



Imagen 39. Mapa de presión estática en un plano longitudinal que corta al alerón por la parte de tres elementos correspondiente a la geometría de 30°. Se aprecian los efectos de la estela del alerón y la estela de la rueda.

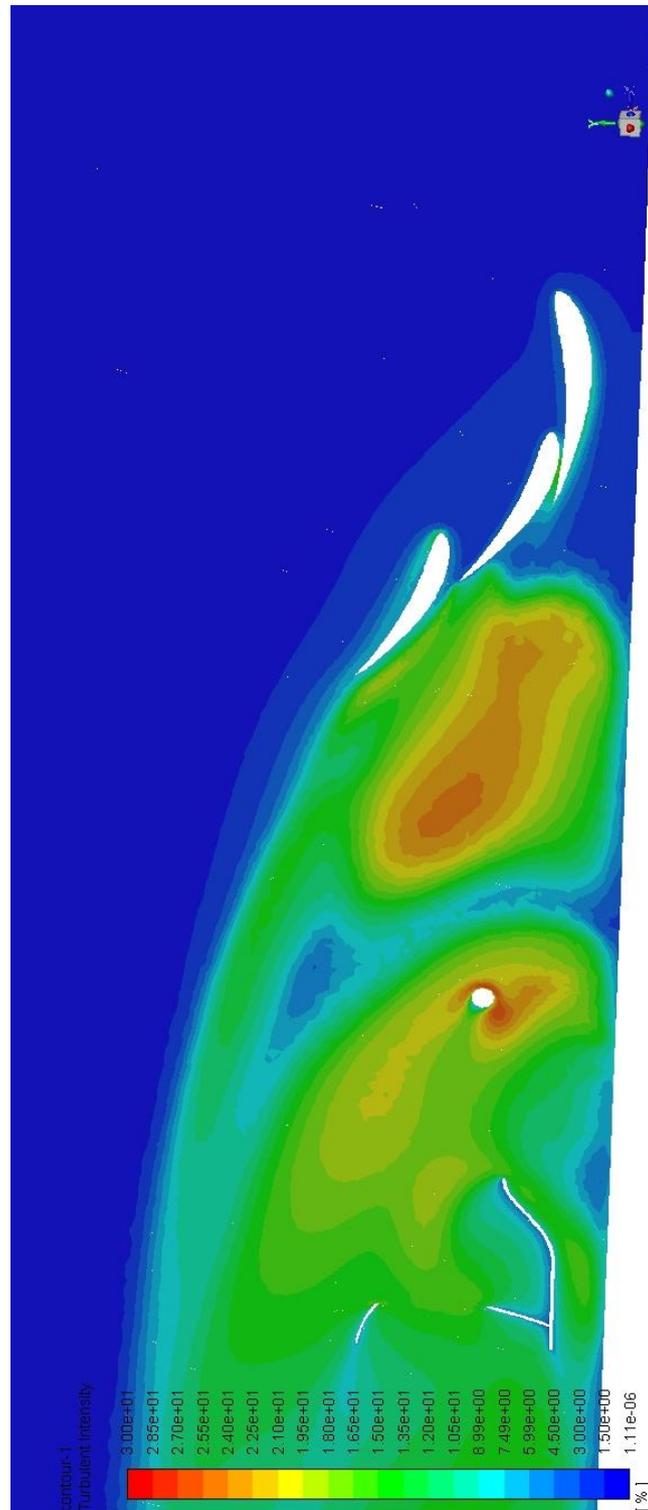


Imagen 40. Mapa de energía cinética de turbulencia en un plano longitudinal que corta al alerón por la parte de tres elementos correspondiente a la geometría de 30°. Se aprecian los efectos de la estela del alerón y la estela de la rueda.



***MAPAS DE VELOCIDAD, PRESIÓN E INTENSIDAD DE TURBULENCIA  
DE LA ESTELA DEL ALERÓN DE LA GEOMETRÍA DE 40°***

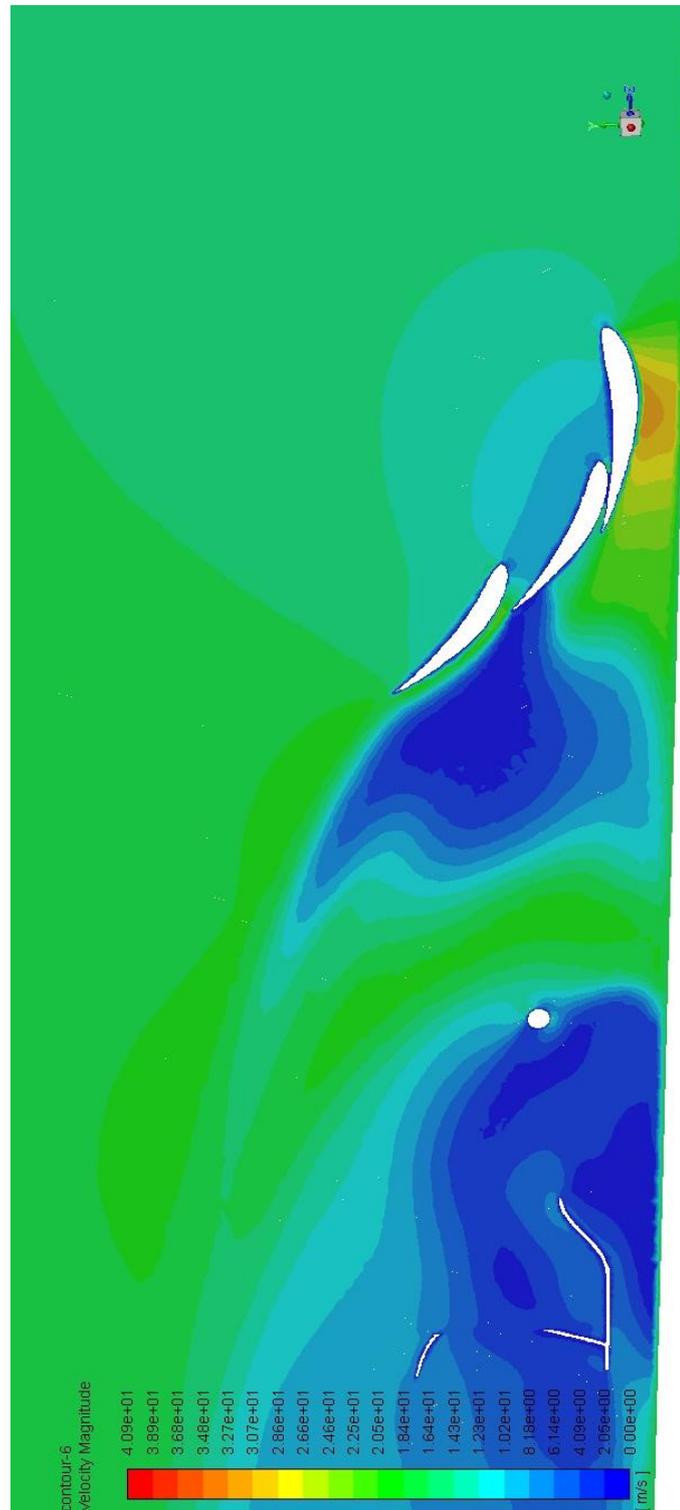


Imagen 41. Mapa de velocidad en un plano longitudinal que corta al alerón por la parte de tres elementos correspondiente a la geometría de 40°. Se aprecian los efectos de la estela del alerón y la estela de la rueda.



Imagen 42. Mapa de presión estática en un plano longitudinal que corta al alerón por la parte de tres elementos correspondiente a la geometría de 40°. Se aprecian los efectos de la estela del alerón y la estela de la rueda.

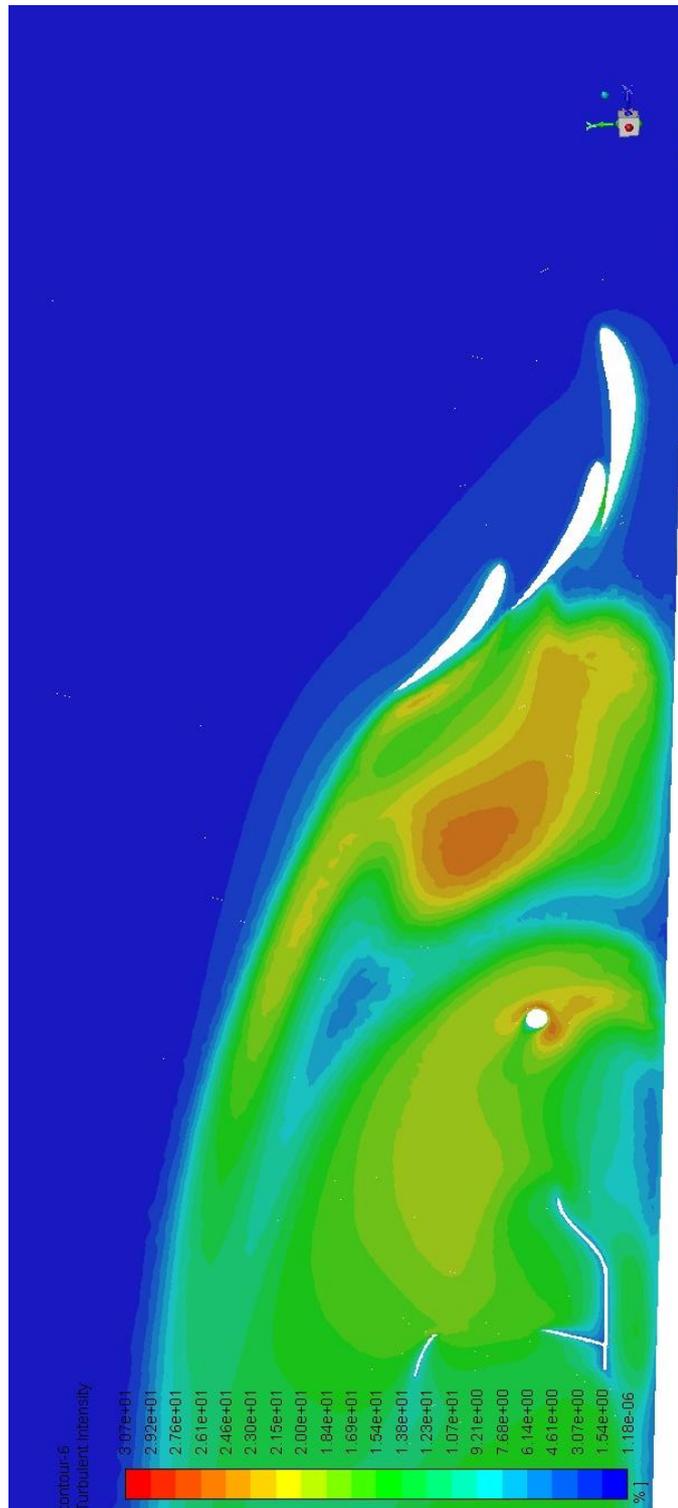


Imagen 43. Mapa de energía cinética de turbulencia en un plano longitudinal que corta al alerón por la parte de tres elementos correspondiente a la geometría de 40°. Se aprecian los efectos de la estela del alerón y la estela de la rueda.



***MAPAS DE VELOCIDAD, PRESIÓN E INTENSIDAD DE TURBULENCIA  
DE LA ESTELA DEL ALERÓN DE LA GEOMETRÍA DE 45°***

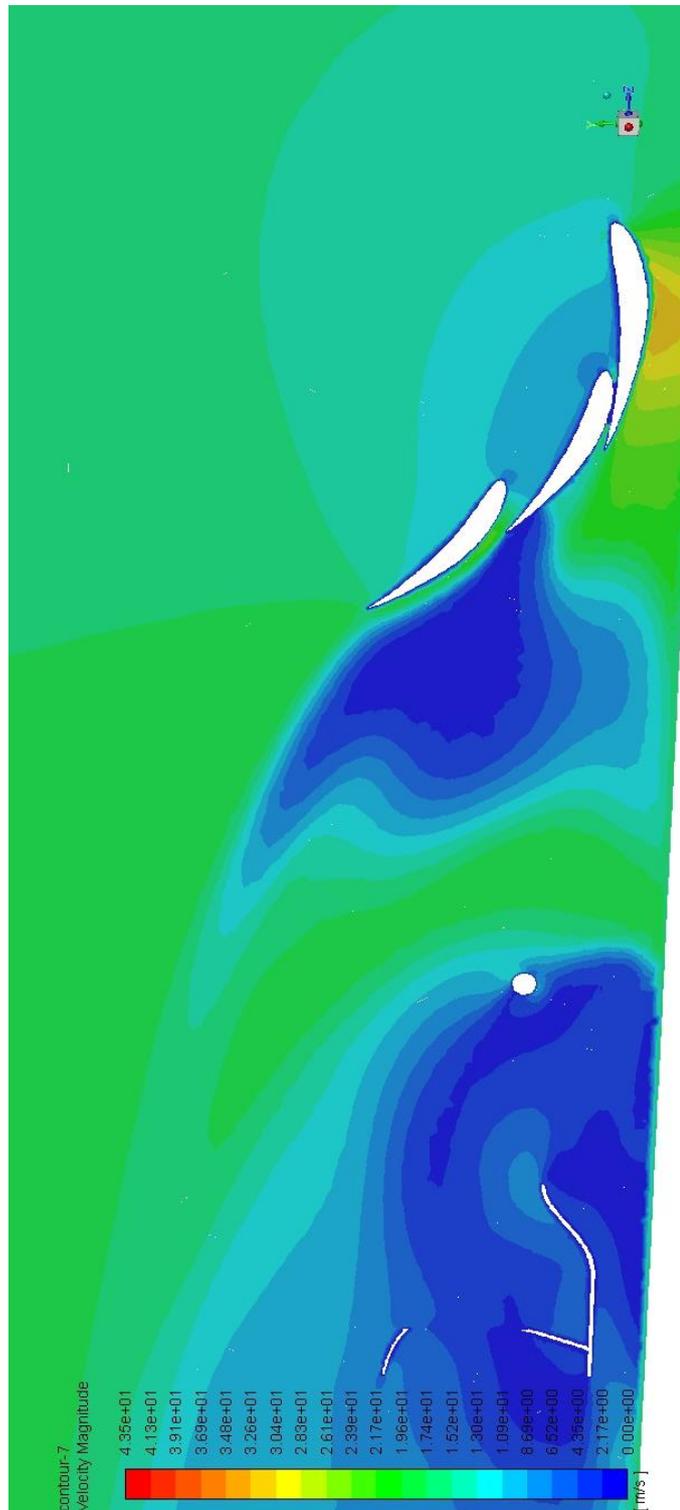


Imagen 44. Mapa de velocidad en un plano longitudinal que corta al alerón por la parte de tres elementos correspondiente a la geometría de 45°. Se aprecian los efectos de la estela del alerón y la estela de la rueda.



Imagen 45. Mapa de presión estática en un plano longitudinal que corta al alerón por la parte de tres elementos correspondiente a la geometría de 45°. Se aprecian los efectos de la estela del alerón y la estela de la rueda.

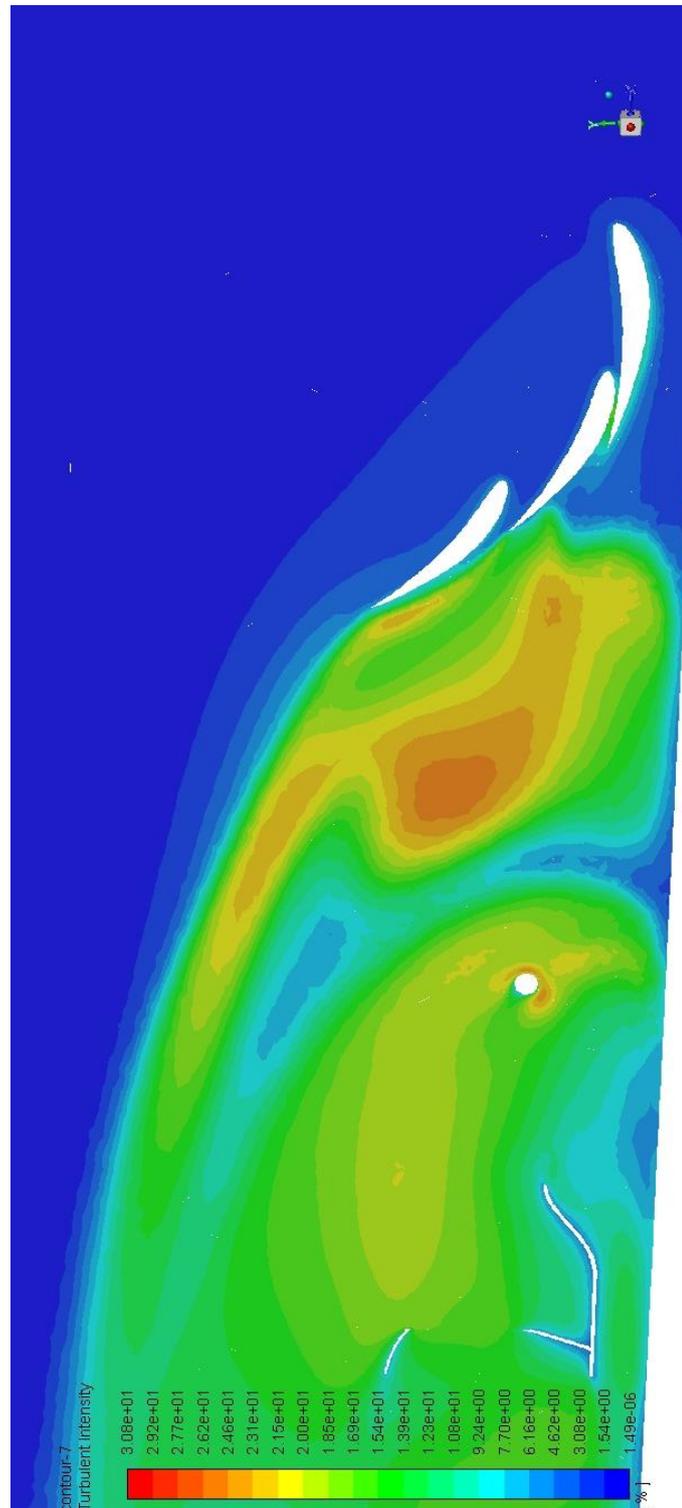


Imagen 46. Mapa de energía cinética de turbulencia en un plano longitudinal que corta al alerón por la parte de tres elementos correspondiente a la geometría de 45°. Se aprecian los efectos de la estela del alerón y la estela de la rueda.



***MAPAS DE VELOCIDAD Y PRESIÓN DONDE SE APRECIA LA  
APARICIÓN DE VÓRTICES***

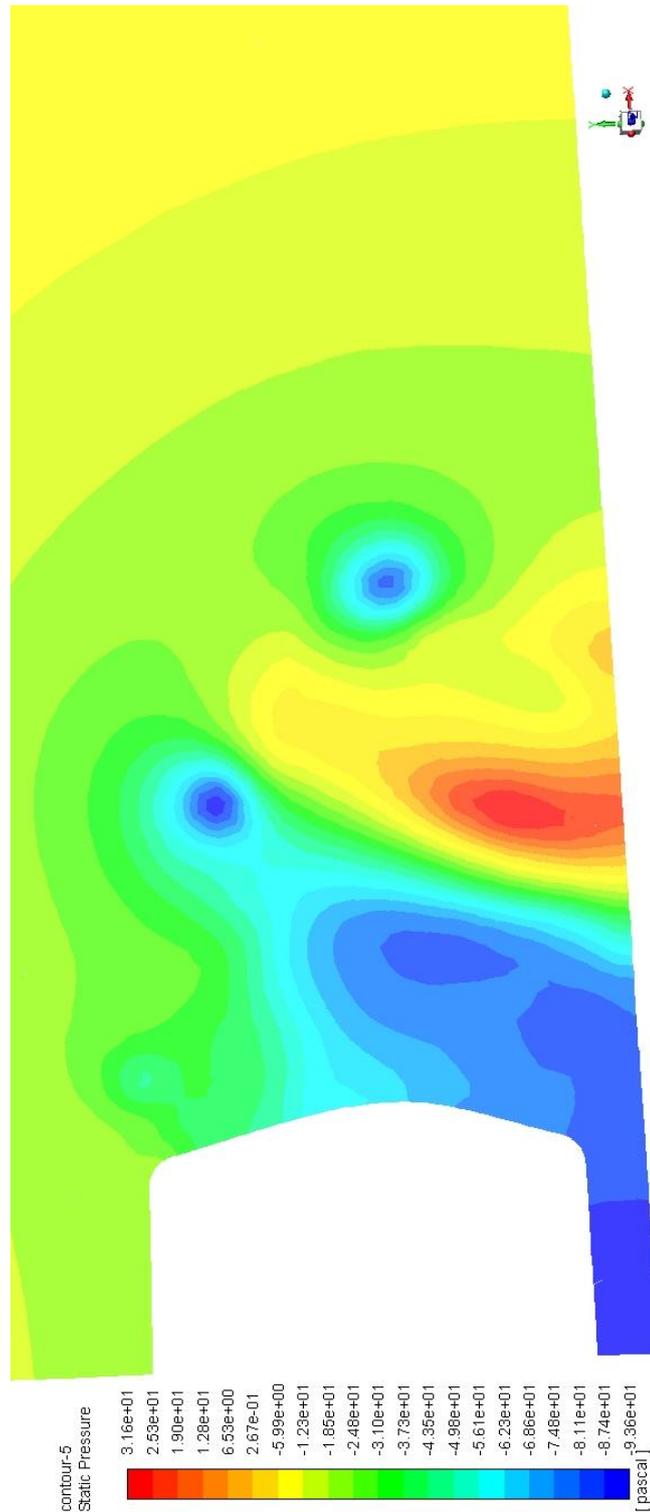


Imagen 47. Mapa de presión estática en un plano transversal a la geometría de estudio situado en la estela del alerón perteneciente a la configuración de  $30^\circ$ . Se pueden apreciar dos vórtices que han surgido en los bordes superiores de los *endplates*.

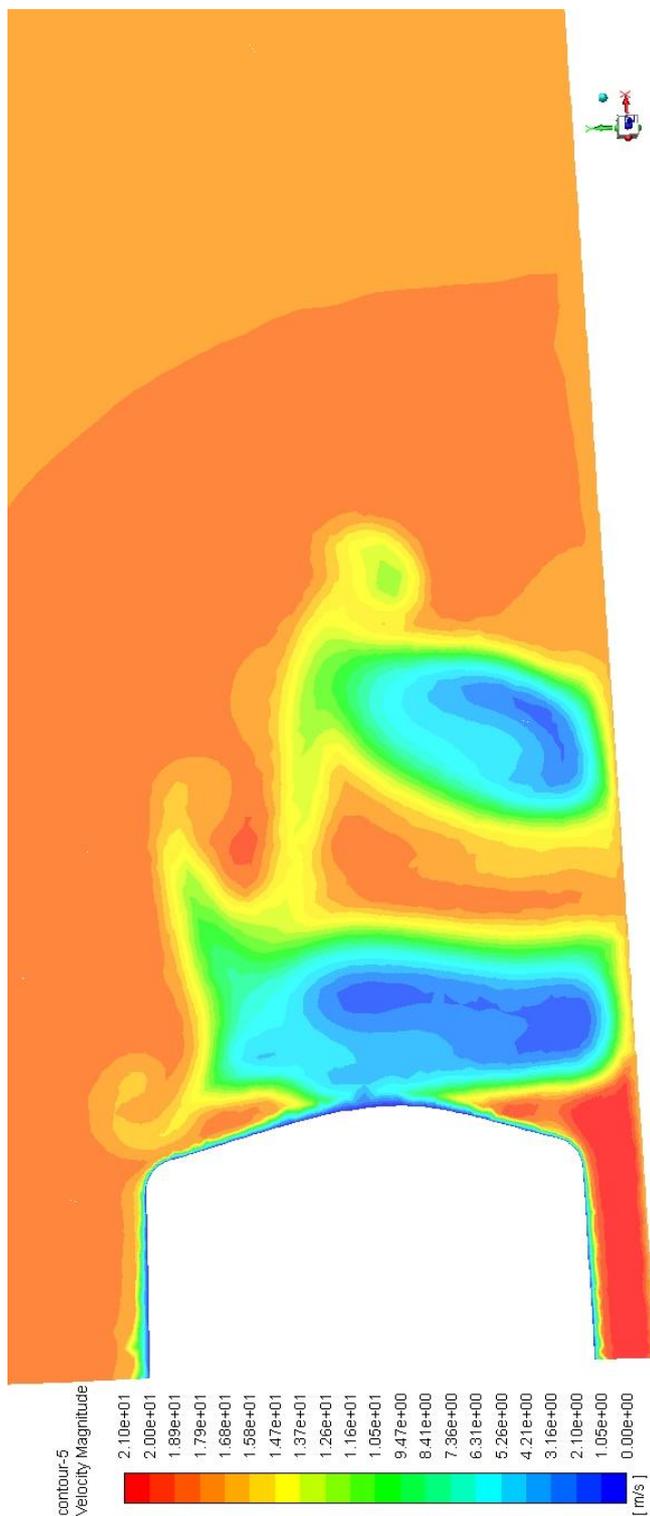


Imagen 48. Mapa de velocidad en un plano transversal a la geometría de estudio situado en la estela del alerón perteneciente a la configuración de  $30^\circ$ . Se pueden apreciar dos vórtices que han surgido en los bordes superiores de los *endplates*.

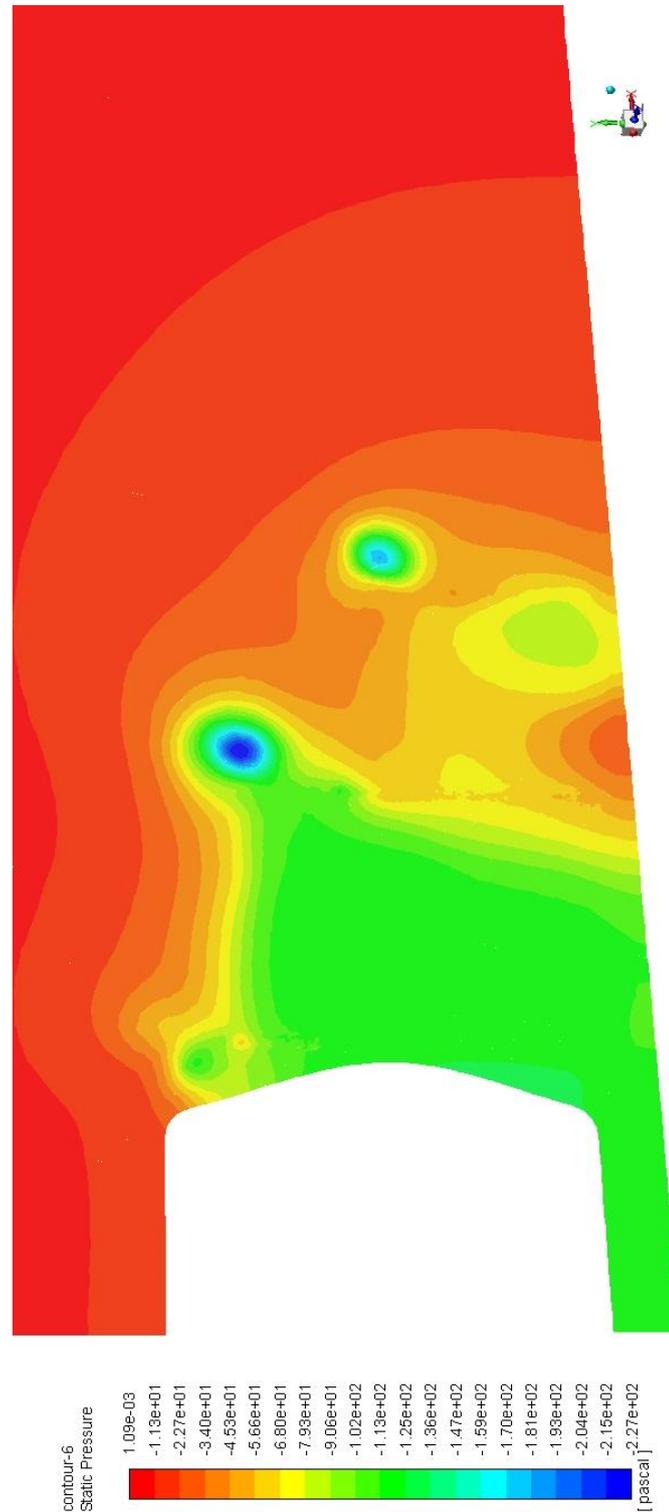


Imagen 49. Mapa de presión estática en un plano transversal a la geometría de estudio situado en la estela del alerón perteneciente a la configuración de 40°. Se pueden apreciar dos vórtices que han surgido en los bordes superiores de los *endplates*.

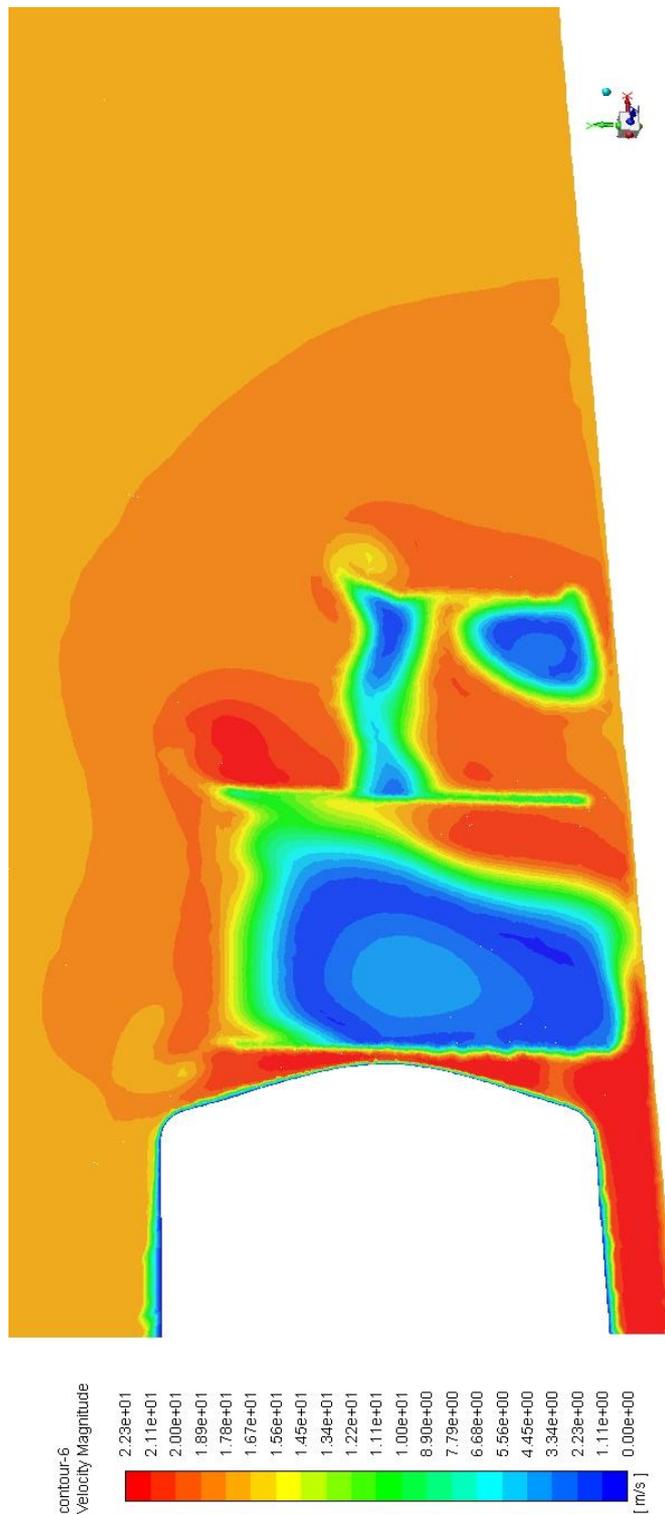


Imagen 50. Mapa de velocidad en un plano transversal a la geometría de estudio situado en la estela del alerón perteneciente a la configuración de  $40^\circ$ . Se pueden apreciar dos vórtices que han surgido en los bordes superiores de los *endplates*.

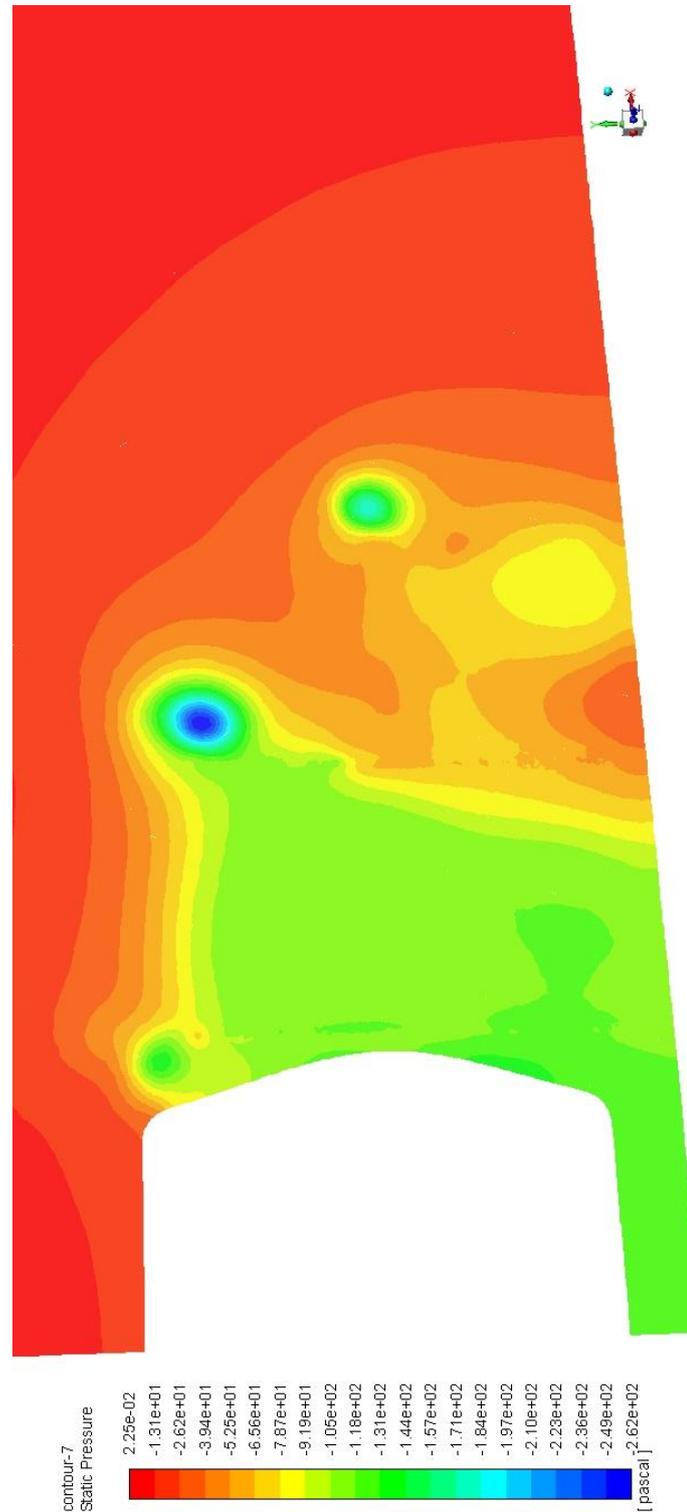


Imagen 51. Mapa de presión estática en un plano transversal a la geometría de estudio situado en la estela del alerón perteneciente a la configuración de 45°. Se pueden apreciar dos vórtices que han surgido en los bordes superiores de los *endplates*.

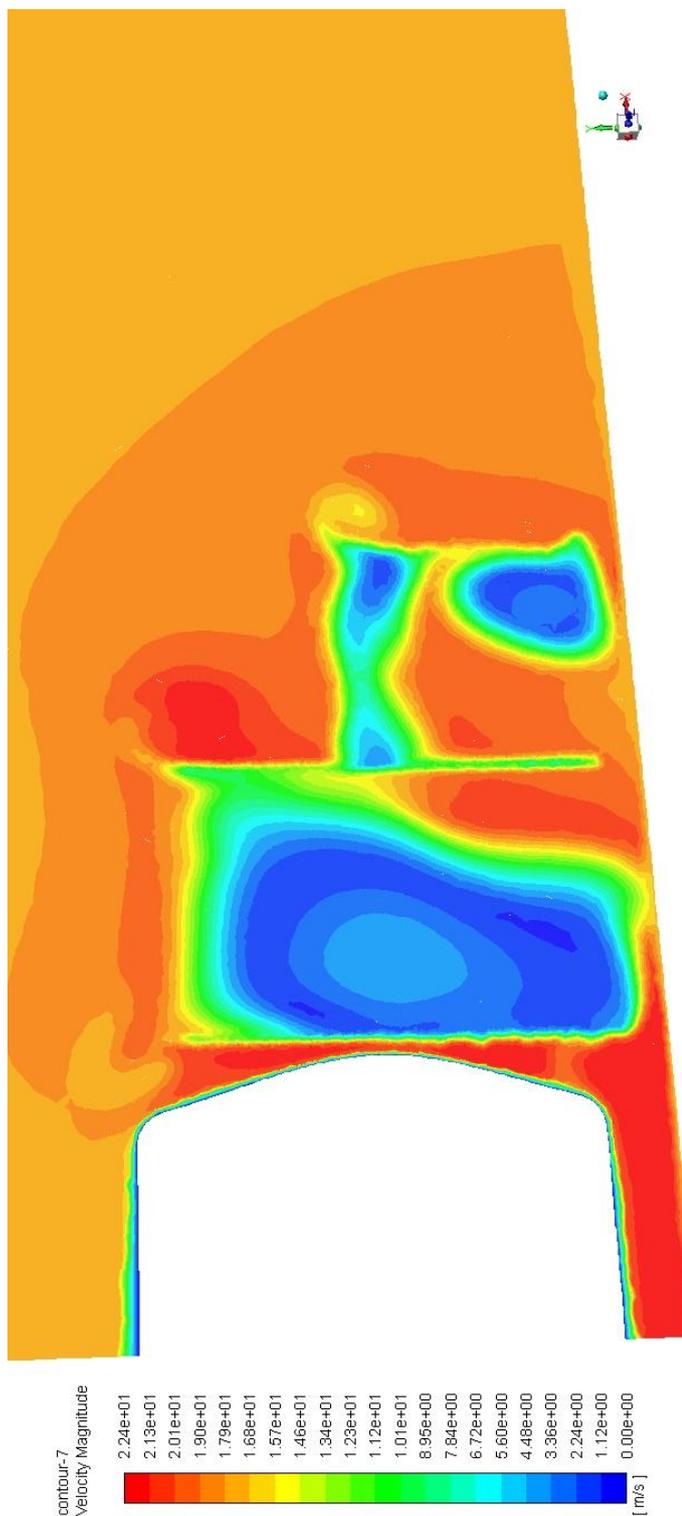


Imagen 52. Mapa de velocidad en un plano transversal a la geometría de estudio situado en la estela del alerón perteneciente a la configuración de  $45^\circ$ . Se pueden apreciar dos vórtices que han surgido en los bordes superiores de los *endplates*.





**ANEXO V REPRESENTACIÓN DEL FLUJO  
ALREDEDOR DE LA GEOMETRÍA DE  
ESTUDIO**

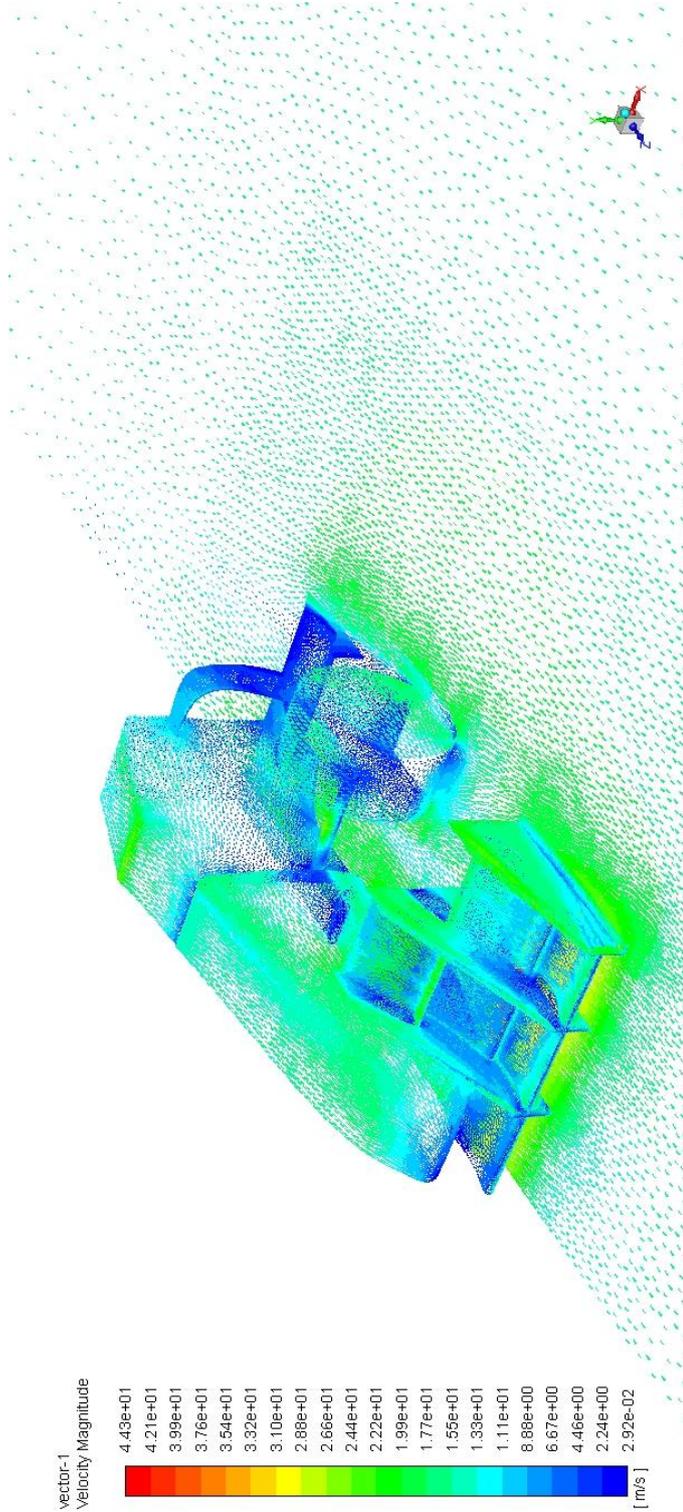


Imagen 53. Representación de los vectores velocidad alrededor de la geometría de estudio con la configuración de 30°.

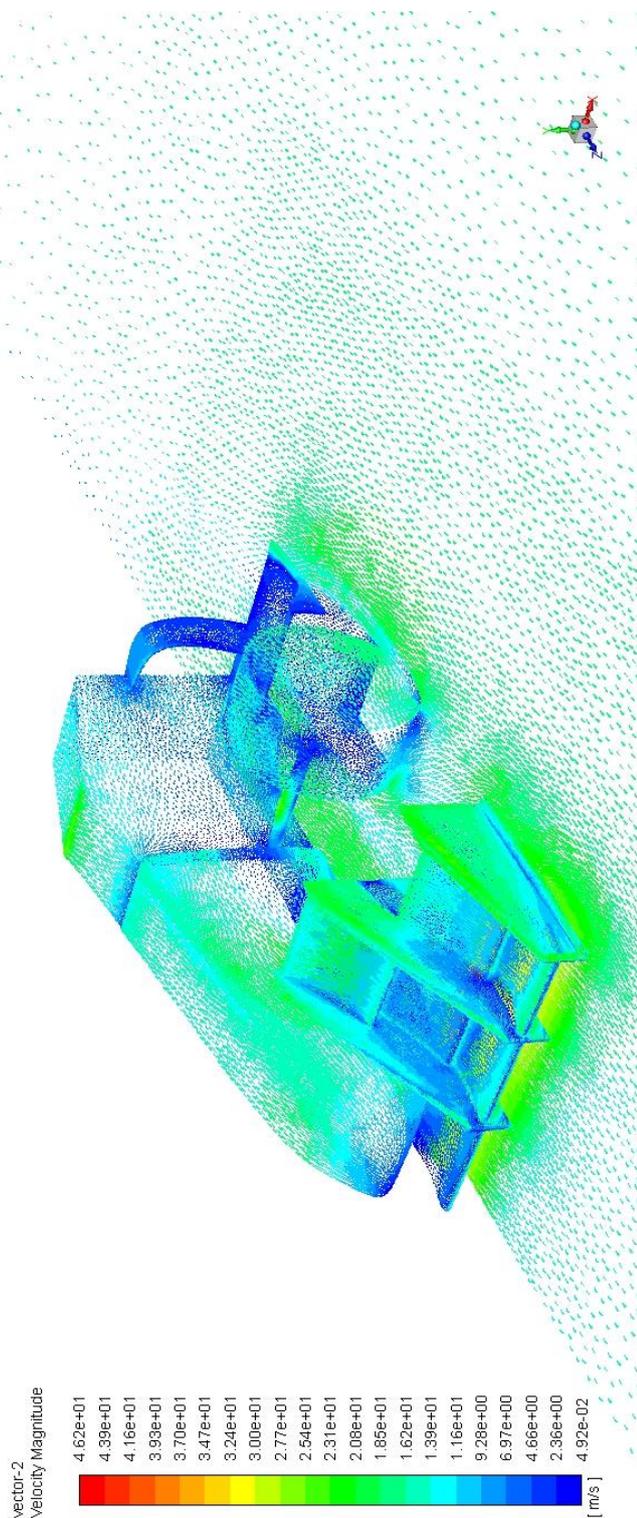


Imagen 54. Representación de los vectores velocidad alrededor de la geometría de estudio con la configuración de 40°.

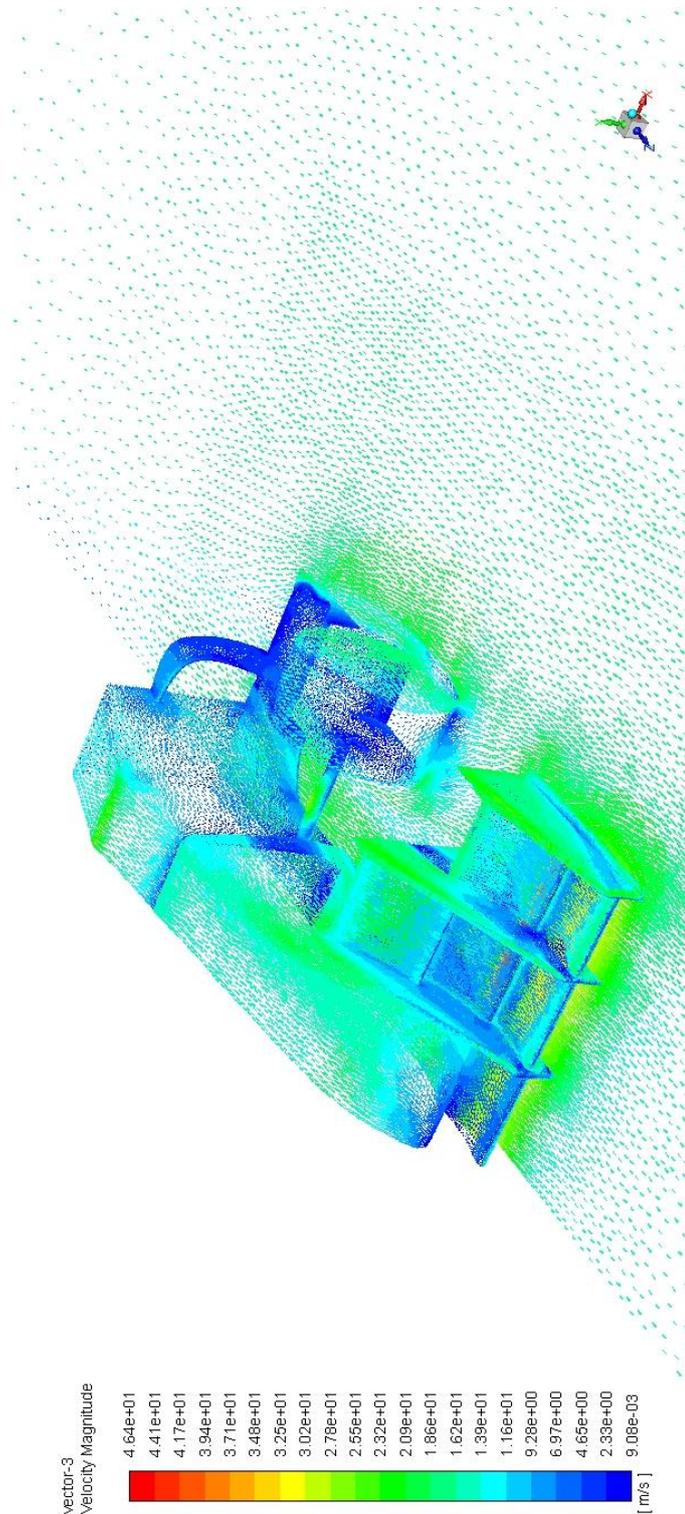


Imagen 55. Representación de los vectores velocidad alrededor de la geometría de estudio con la configuración de 45°.

# ***BIBLIOGRAFÍA***





## REFERENCIAS

- [1] Red Bull Racing, «The Sporting News,» 19 julio 2022. [En línea]. Available: <https://www.sportingnews.com/us-es/formula-1/news/deporte-fintech-cripto-criptomonedas-sponsors-formula-1-cuales-son-que-significan/u7ztidxmwh19tazajdnmmaf>.
- [2] D. Plaza, «Técnica Fórmula 1,» 3 septiembre 2010. [En línea]. Available: <https://tecnicaf1.wordpress.com/2011/09/03/el-aleron-delantero/>.
- [3] D. Novoa, «Pitlane Motor,» 3 abril 2017. [En línea]. Available: <https://pitlanemotor.com/2017/04/03/f1-tecnica-aleron-delantero/>.
- [4] «Wikipedia - Formula Student,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3rmula\\_Student](https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3rmula_Student).
- [5] *Normativa de Formula Student, 2022.*
- [6] «Wikipedia - Historia del automovilismo,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Historia\\_del\\_automovilismo](https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_del_automovilismo).
- [7] «Wikipedia - París-Rouen,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Paris-Rouen>.
- [8] «Mercedes-Benz Group Media,» [En línea]. Available: <https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/en/instance/picture.xhtml?oid=7438732>.



- [9] Á. García, «Diariomotor Competición,» 8 octubre 2016. [En línea]. Available: <https://www.diariomotor.com/competicion/2016/10/08/coches-de-competicion-para-recordar-chaparral/>.
- [10] «Pinterest - Coches de Carreras,» [En línea]. Available: <https://www.pinterest.es/pin/152840981079489142/>.
- [11] Reuters, «El Confidencial,» 22 mayo 2018. [En línea]. Available: [https://www.elconfidencial.com/deportes/formula-1/2018-05-22/f1-ferrari-mercedes-pirelli-vettel-neumaticos\\_1566932/](https://www.elconfidencial.com/deportes/formula-1/2018-05-22/f1-ferrari-mercedes-pirelli-vettel-neumaticos_1566932/).
- [12] Red Bull France, «Red Bull,» 14 febrero 2022. [En línea]. Available: <https://www.redbull.com/es-es/f1-aleron-delantero>.
- [13] «Airfoil Tools,» [En línea]. Available: <http://airfoiltools.com/>.
- [14] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, «Capítulo 1,» de *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y aplicaciones, 4ª edición*, Ciudad de México, McGraw-Hill, 2018.
- [15] «Apuntes del Curso de Mecánica de Fluidos,» [En línea]. Available: <https://sifo.comillas.edu>.
- [16] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, «Capítulo 2,» de *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y aplicaciones, 4ª edición*, Ciudad de México, McGraw-Hill, 2018.
- [17] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, «Capítulo 9,» de *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y aplicaciones, 4ª edición*, Ciudad de México, McGraw-Hill, 2018.
- [18] F. M. White, «Capítulo 7,» de *Mecánica de Fluidos, 5ª edición*, Aravaca (Madrid), McGraw-Hill, 2004.
- [19] D. Aspley, «Personal Pages The University of Manchester,» 2022. [En línea]. Available:



<https://personalpages.manchester.ac.uk/staff/david.d.apsley/lectures/comphydr/index.htm>.

- [20] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, «Capítulo 15,» de *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y aplicaciones, 4ª edición*, Ciudad de México, McGraw-Hill, 2018.
- [21] CAE Associates Inc., «YouTube,» [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=fc5ChOPkuZY>.
- [22] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, «Capítulo 5,» de *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones, 4ª edición*, Ciudad de México, McGraw-Hill, 2018.
- [23] J. Katz, *Race Car Aerodynamics. Designing for Speed*, Cambridge, MA: Bentley Publishers, 1995.
- [24] J. D. Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*, Nueva York: McGraw-Hill Education, 2017.

