



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

## DISEÑO DEL CARENADO DE LA MOTO DEL EQUIPO MOTOSTUDENT ICAI SPEED CLUB

Autor: Luis María de Faría-Pereira Pérez de Rada

Directores: Luis Manuel Mochón Castro

José Rubén Pérez Domínguez

Madrid

Agosto 2021



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
'Diseño del carenado de la moto del equipo MotoStudent ICAI SPEED CLUB' en la ETS  
de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2020/21 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.: Luis María de Faría Pereira Pérez de Rada

Fecha: 24/08/2021

Autorizada la entrega del proyecto

LOS DIRECTORES DEL PROYECTO

Fdo.: Luis Manuel Mochón Castro

Fecha: 24/08/ 2021

Fdo.: José Rubén Pérez Domínguez

Fecha: 24/08/ 2021





# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

## DISEÑO DEL CARENADO DE LA MOTO DEL EQUIPO MOTOSTUDENT ICAI SPEED CLUB

Autor: Luis María de Faría-Pereira Pérez de Rada

Directores: Luis Manuel Mochón Castro

José Rubén Pérez Domínguez

Madrid

Agosto 2021

# DISEÑO DEL CARENADO DE LA MOTO DEL EQUIPO DE MOTOSRUDENT ICAI SPEED CLUB

**Autor: De Faria-Pereira Pérez de Rada, Luis María.**

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

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## RESUMEN DEL PROYECTO

Se ha diseñado el carenado para el prototipo eléctrico del ICAI Speed Club (ISC), para ello se ha modelado una primera versión en SolidWorks que posteriormente ha sido simulada en Fluent. Tras el análisis de los resultados de las simulaciones se modifica el diseño para obtener una segunda versión del carenado que a su vez se simula y analiza para acabar en un tercer y final diseño del carenado para el cual se ha desarrollado un proceso de fabricación sostenible.

**Palabras clave:** Carenado, MotoStudent, Simulación, Fluent, SolidWorks, Fabricación

### 1. Introducción

En este proyecto se busca diseñar el carenado de la moto eléctrica de la asociación de alumnos del ISC de la Universidad Pontificia Comillas. Resulta necesario un perfecto acople entre el prototipo diseñado por los alumnos y el carenado ya que, al ser una moto eléctrica, las geometrías de la misma varían con respecto a las tradicionales motos de combustión interna, hacienda que los carenados desarrollados para éstas no puedan utilizarse sin sufrir una penalización aerodinámica.

Este prototipo va a correr en verano de 2021 en el circuito mundialista de Motorland, ampliamente reconocido por sus grandes rectas, en particular la llamada recta de atrás, zona de principales adelantamientos durante los eventos disputados en el circuito de Alcañiz.

La competición en la cual se participa es MotoStudent Electric cuyo reglamento, muy similar al de la categoría inferior del mundial de motociclismo, es de obligado cumplimiento por todos los equipos participantes, planteando así límites en el diseño del carenado.

### 2. Objetivos del Proyecto y Justificación

Este proyecto busca un diseño aerodinámicamente eficiente del carenado de la motocicleta eléctrica ISC, buscando así minimizar la fuerza de arrastre que actúa sobre el carenado. Se justifica el desarrollo de esta pieza, al tener que buscar un perfecto acople con el prototipo.

Por otro lado, se desarrollará un proceso de fabricación ecológico para el carenado diseñado. La implementación de la fabricación aditiva mediante impresión 3D en PLA, un polímero ecológico, ya que puede ser reutilizado para otras funciones después de haber servido como molde para las piezas del carenado.

Estas piezas se van a fabricar en un material compuesto ecológico, siendo los componentes de este, una resina epoxi ecológica y la fibra de lino, material de origen vegetal que sustituye a la conocida fibra de carbono o fibra de vidrio muy utilizada en la alta competición. De esta

forma, se busca desarrollar una actividad industrial con el menor impacto posible sobre el medio ambiente.

### 3. Metodología empleada

En primer lugar, se va a diseñar el carenado respetando la normativa relevante de la competición y las geometrías del prototipo eléctrico desarrollado por el ISC. Posteriormente, se va a realizar un análisis aerodinámico del mismo buscando así su optimización, hasta obtener una versión que cumpla con el objetivo marcado, el de minimizar la fuerza de arrastre de forma sustancial. Se va a despreciar el efecto de la fuerza de sustentación en este proyecto al no considerarse relevante para minimizar la fuerza de arrastre.

Por último, con la versión final del carenado se va a desarrollar un proceso de fabricación sostenible de la pieza.

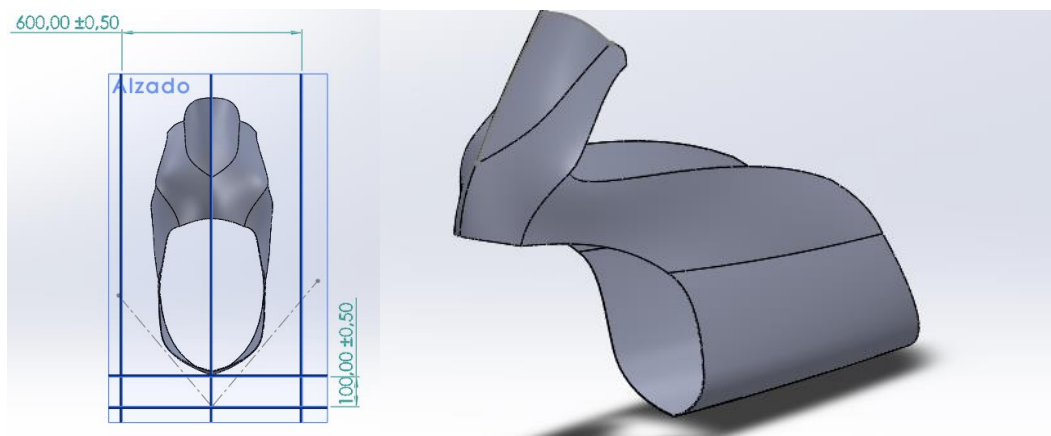
La pieza a desarrollar ocupa una gran función aerodinámica al ser esta la primera en entrar en contacto con el aire, como se puede ver a continuación.



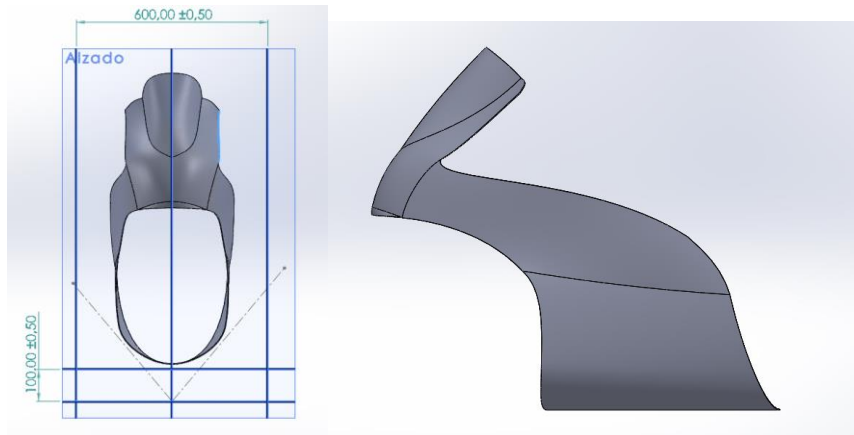
*Ilustración 1 – Moto en posición de menor resistencia al aire [1]*

### 4. Resultados

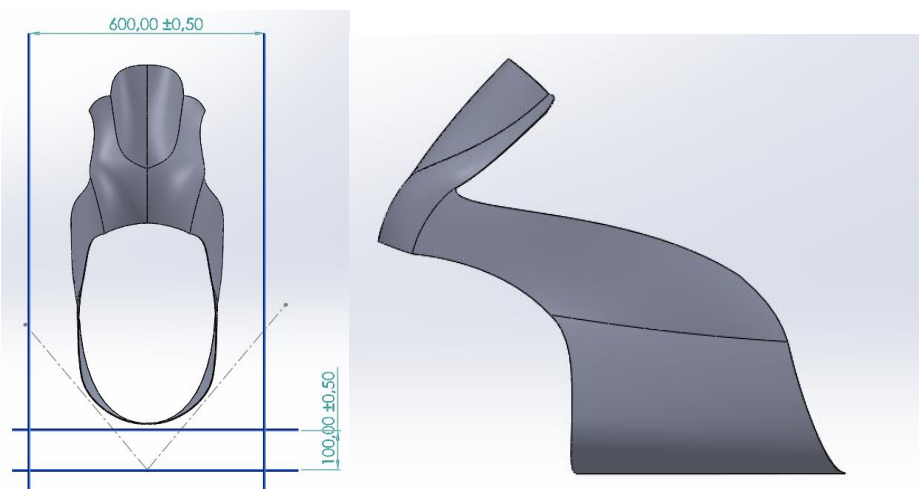
Se puede ver a continuación, las diferentes versiones del carenado que se han desarrollado.



*Ilustración 2 – Vistas frontal acotada y lateral de la versión 1 del carenado*



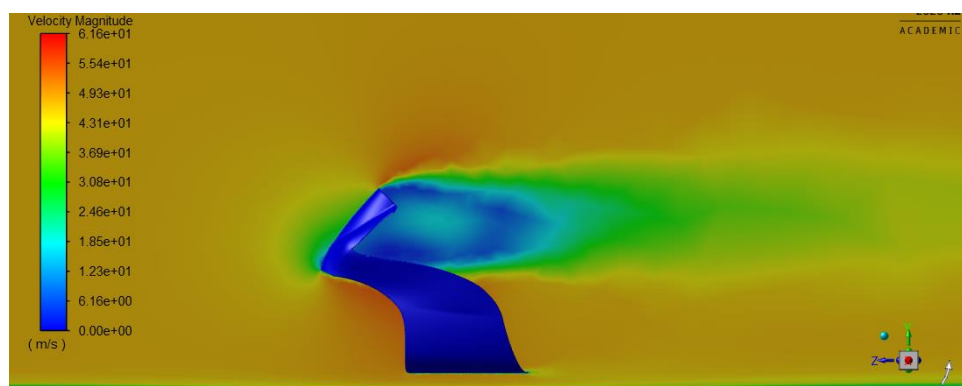
*Ilustración 3 – Vistas frontal acotada y lateral de la versión 2 del carenado*



*Ilustración 4 – Vistas frontal acotada y lateral de la versión 3 del carenado*

Se puede ver como la tendencia en el diseño del carenado, es la de reducir el frontal del mismo, buscando reducir la fuerza de arrastre.

El desarrollo de todas las simulaciones ha sido satisfactorio, al haber obtenido convergencia en todas las simulaciones. Se muestra, a continuación, el campo de velocidad de la simulación a 170 km/h de todas las versiones del carenado.



*Ilustración 5 – Gráfica del campo de velocidad a 170 km/h para la versión 1 del carenado*



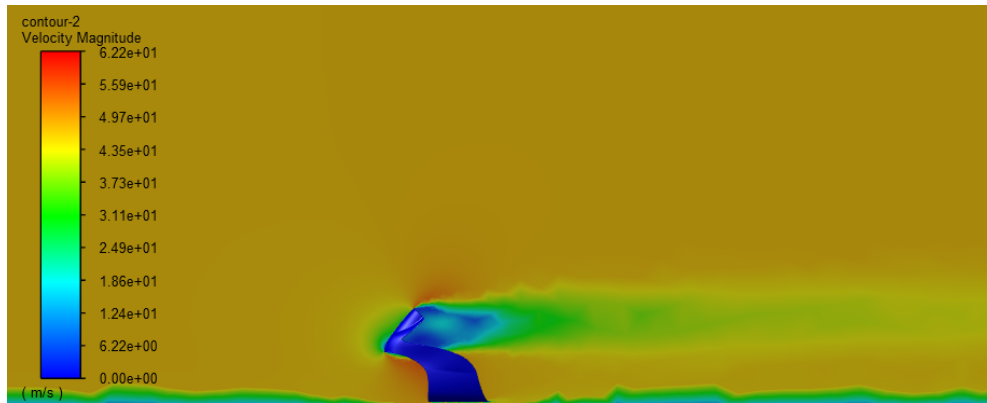


Ilustración 6 – Gráfica del campo de velocidad a 170 km/h para la versión 2 del carenado

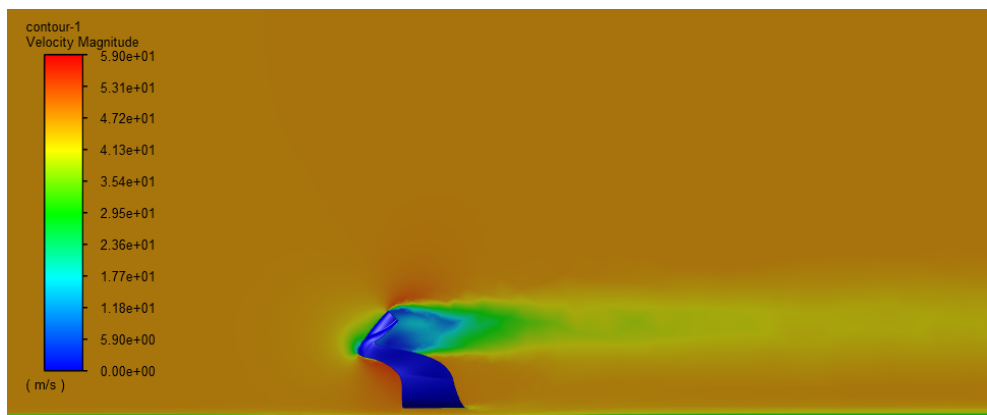


Ilustración 7 – Gráfica del campo de velocidad a 170 km/h para la versión 3 del carenado

Por último, se muestra una tabla resumen con los valores más significativos obtenidos de las simulaciones.

Tabla 2 – Resultados

	Fd (N) a 170 km/h	Área (m <sup>2</sup> )	C <sub>D</sub> [-] a 170 km/h
versión 1	113,92	0,157	0,532
versión 2	115,68	0,147	0,577
versión 3	110,06	0,143	0,565

## 5. Conclusiones

Como se puede comprobar en la tabla 1, la primera versión del carenado es la más eficiente, en términos del C<sub>D</sub>. La segunda versión empeora las prestaciones de la primera y, por último, el rediseño final de la tercera versión permite reducir la fuerza de arrastre pese a tener un C<sub>D</sub> mayor que en el primer caso, pero menor que el segundo caso, reduciendo en un 3,39% el valor de la fuerza de arrastre entre la primera versión y la última. Esto se debe a un área característica menor en esta tercera versión con respecto a las anteriores

Para la fabricación de los moldes se va a emplear impresión 3D, en concreto la tecnología de deposición de capa fundida (FDM) mientras que el material compuesto empleado es la fibra de lino con una bio resina epoxi, reduciendo el impacto en el medioambiente y cumpliendo con dos de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenibles definidos por las Naciones Unidas.

## **6. Referencias**

- [1] Máximo Sanz, *.La mala aerodinamica de las motos*. Source: Moto1pro Magazine, 2015  
<https://www.moto1pro.com/reportajes-motos/la-mala-aerodinamica-de-las-motos>

# **MOTOSTUDENT ICAI SPEED CLUB TEAM MOTORCYCLE FAIRING DESIGN**

**Author: De Faria-Pereira Pérez de Rada, Luis María.**

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

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **ABSTRACT**

The fairing has been designed for the electric prototype of the ICAI Speed Club (ISC), a first version has been modelled in SolidWorks that has subsequently been simulated in Fluent. After analysing the results of the simulations, the design is modified to obtain a second version of the fairing which has been simulated as well and analysed to end up in a third and final fairing design for which a sustainable manufacturing process has been developed.

**Keywords:** Fairing, MotoStudent, Simulation, Fluent, SolidWorks, manufacturing

## **1. Introduction**

This project seeks to design the fairing of the electric motorcycle of the ISC student association of the Universidad Pontificia Comillas. It is necessary a perfect coupling between the prototype, designed by the students, and the fairing since, being an electric motorcycle, its geometries vary a lot compared to traditional internal combustion motorcycles, making the fairings developed for these unable to be used without suffering an aerodynamic penalty.

This prototype will run in the summer of 2021 on the Motorland World Cup circuit, widely recognized for its great straights, the so-called back straight, the main overtaking area during events held at the Alcañiz circuit.

The competition in which it participates is MotoStudent Electric whose regulations, very similar to those of the lower category of the motorcycling world championship, are mandatory for all participating teams, thus setting limits on the design of the fairing.

## **2. Project objectives and justification**

This project seeks an aerodynamically efficient design of the fairing of the ISC electric motorcycle, thus seeking to minimize the drag force that acts on the fairing. The development of this piece is justified, having to look for a perfect fit with the prototype.

On the other hand, an environmentally friendly manufacturing process will be developed for the designed fairing. The implementation of additive manufacturing through 3D printing in PLA, an ecological polymer since it can be reused for other functions after having served as a mold for the fairing parts.

These pieces will be manufactured in an ecological composite material, the components being an ecological epoxy resin and linen fiber, a material of plant origin that replaces the well-known carbon fiber or fiberglass widely used in high competition. In this way, it seeks to develop an industrial activity with the least possible impact on the environment.

## **3. Used Methodology**

First, the fairing will be designed in compliance with the relevant competition regulations and the geometries of the electric prototype developed by the ISC. Subsequently, an

aerodynamic analysis of it will be carried out, thus seeking its optimization, until obtaining a version that meets the objective set, that of minimizing the drag force substantially. The effect of lift force will be neglected in this project since its effect are minimal in the fairing.

Finally, with the final version of the fairing, a sustainable manufacturing process for the part will be developed.

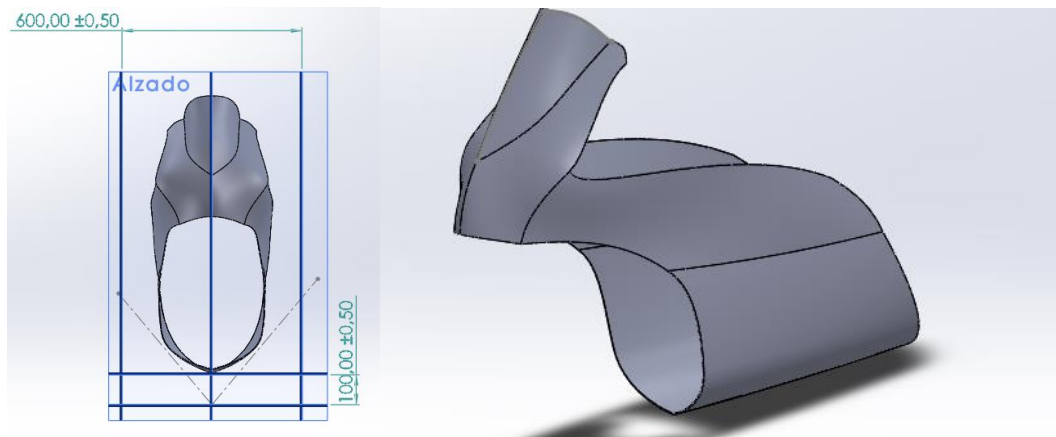
The piece to be developed occupies a great aerodynamic function as it is the first to come into contact with the air, as can be seen below.



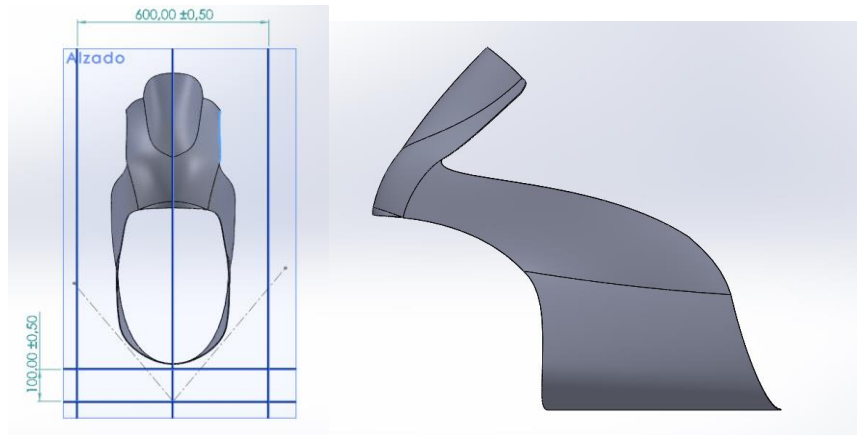
*Illustration 1– Motorcycle in prone position [1]*

#### 4. Results

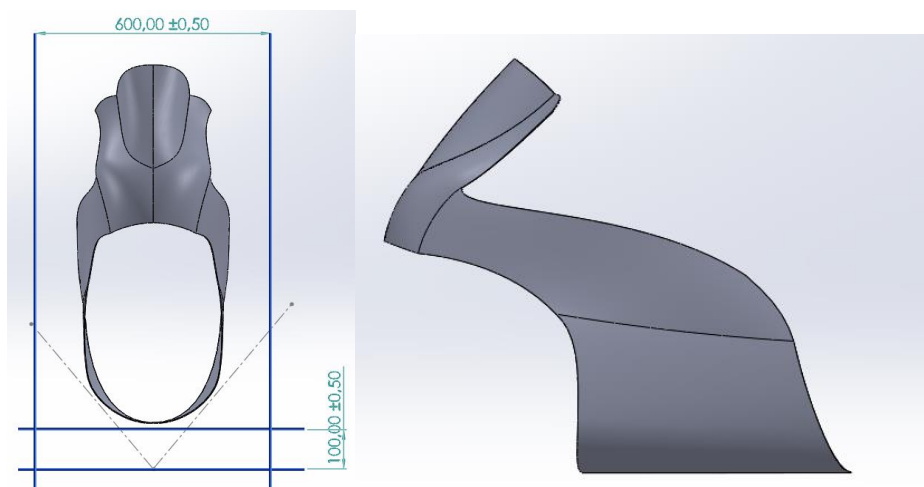
Below, it can be seen the different versions of the fairings that have been developed.



*Illustration 2 – Bounded front and side views of version 1 of the fairing*



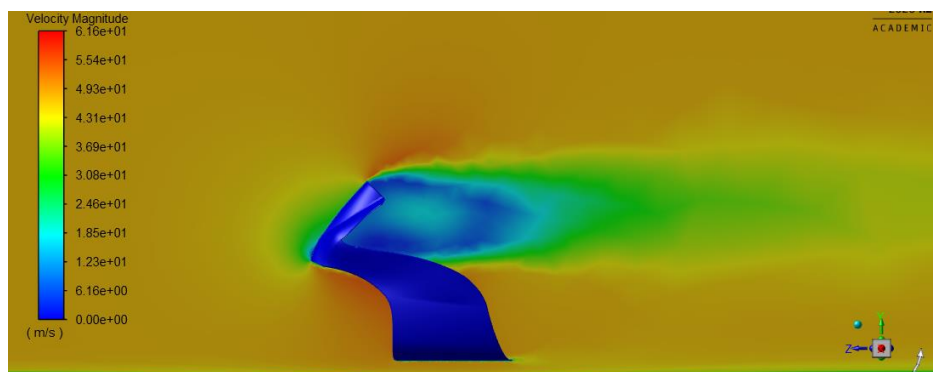
*Illustration 3 – Bounded front and side views of version 2 of the fairing*



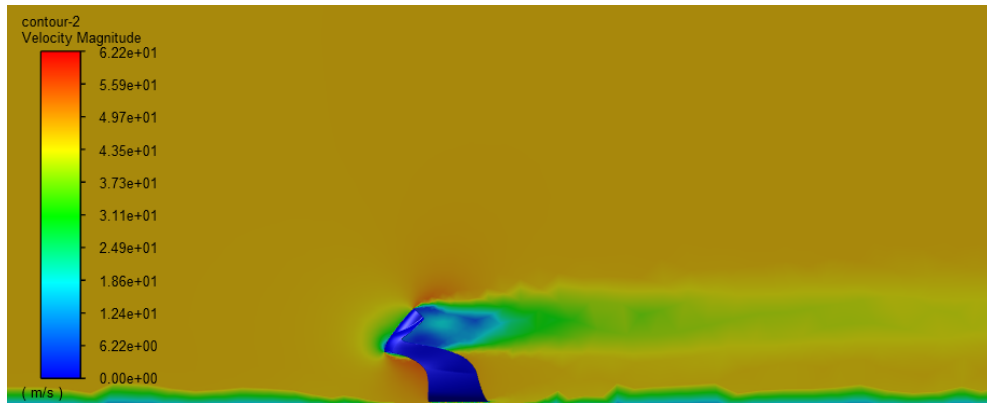
*Illustration 4 – Bounded front and side views of version 3 of the fairing*

It can be seen how the trend in the design of the fairing is to reduce the front of it, seeking to reduce the drag force.

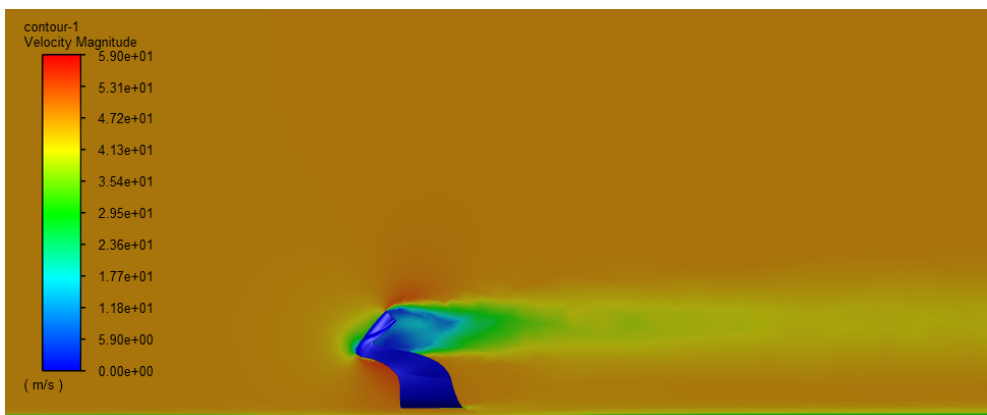
The development of all the simulations has been satisfactory, having obtained convergence in all the simulations. The speed field of the simulation at 170 km / h of all versions of the fairing is shown below.



*Illustration 5 – Graph of the speed field at 170 Km / h for version 1 of the fairing*



*Illustration 6 – Graph of the speed field at 170 Km / h for version 2 of the fairing*



*Illustration 7 – Graph of the speed field at 170 Km / h for version 3 of the fairing*

Finally, a summary table is shown with the most significant values of the simulations.

*Table 1 – Results*

	Fd (N) at 170 km/h	Area (m <sup>2</sup> )	C <sub>D</sub> [-] at 170 km/h
version 1	113,92	0,157	0,532
version 2	115,68	0,147	0,577
version 3	110,06	0,143	0,565

## 5. Conclusions

As can be seen in table 1, the first version of the fairing is the most efficient, in terms of the CD. The second version worsens the performance of the first and, finally, the final redesign of the third version allows to reduce the drag force despite having a higher CD than in the first case, but less than the second case, reducing by 3,39% the value of the drag force between the first version and the last one. This is due to a smaller characteristic area in this third version compared to the previous ones.

For the manufacture of the moulds, 3D printing will be used, specifically fused layer deposition technology (FDM) while the composite material used is linen fibre with an epoxy

bio resin, reducing the impact on the environment and complying with two of the 17 Sustainable Development Goals defined by the United Nations.

## **6. Referencics**

[1] Máximo Sanz, *.La mala aerodinamica de las motos*. Source: Moto1pro Magazine, 2015

# Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a la universidad y a mis directores de TFG la posibilidad de realizar un trabajo tan apasionante como éste. En especial con guiarme en la parte de simulación tan desconocida para mi antes de empezar el proyecto.

No me puedo de olvidar de todos mis amigos, familiares y en especial a mi pareja por apoyarme en los momentos más duros, especialmente al contraer la COVID-19 a un mes de presentar este trabajo y sobre todo en los momentos de estrés y de agobio en los que he estado encerrado en mi cuarto diseñando, simulando y en particular redactando esta memoria en vez de estar a su lado disfrutando del momento. Este trabajo ha sido únicamente posible gracias a vosotros.



## *Índice de la memoria*

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....</b>	<b>3</b>
<b>Capítulo 3. Estado de la Cuestión .....</b>	<b>4</b>
<b>Capítulo 4. Definición del Trabajo .....</b>	<b>14</b>
4.1 Justificación.....	14
4.2 Objetivos .....	15
4.3 Metodología.....	16
<b>Capítulo 5. Diseño y Desarrollo del Carenado .....</b>	<b>18</b>
5.1 Análisis de las limitaciones del diseño.....	18
5.1.1 Limitaciones del prototipo.....	18
5.1.2 Limitaciones impuestas por la competición .....	20
5.2 Desarrollo del Diseño .....	23
5.3 Desarrollo de la Simulación .....	28
5.3.1 Creación del Dominio Computacional.....	29
5.3.2 Mallado .....	30
5.3.3 Teoría aplicada en Fluent .....	36
5.3.4 Condiciones de contorno y parametros.....	44
5.3.5 Resultado y análisis de la simulación.....	49
5.4 Mejora del diseño .....	60
5.4.1 Segunda versión del diseño del carenado .....	60
5.4.2 Versión final del carenado .....	67
<b>Capítulo 6. Proceso de Fabricación.....</b>	<b>75</b>
6.1 Fabricación de la pieza final.....	75
6.1.1 Diseño y Fabricación de los moldes.....	75

6.1.2 <i>Laminación Manual del Material Compuesto</i> .....	77
6.2 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	79
6.2.1 <i>Definición y contribución</i> .....	80
6.2.2 <i>Implementación alternativas ecológicas al material compuesto tradicionalmente empleado</i> .....	81
<b>Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros</b> .....	<b>83</b>
7.1 Conclusión del Trabajo .....	83
7.2 Propuesta de Trabajos Futuros .....	84
<b>Capítulo 8. Bibliografía</b> .....	<b>86</b>

## *Índice de figuras*

Figura 1– Honda Rc181[1] .....	4
Figura 2– Honda NR500[1] .....	5
Figura 3– Honda NS500[1] .....	6
Figura 4– Honda NSR500 (1984)[1] .....	6
Figura 5– Honda NSR500 (1997) [1] .....	7
Figura 6– Honda RC211V (2005)[1].....	8
Figura 7– Honda RC212V (2009)[1].....	9
Figura 8– Ducati Desmosedici Gp 2016[2].....	10
Figura 9– Fuerzas aerodinámicas y su distancia al CdP.....	10
Figura 10– Propuesta de alerón de doble pared de Aprilia en 2017[3] .....	11
Figura 11– Moto 3 de GasGas 2021[4] .....	12
Figura 12– Moto E del mundial [5] .....	13
Figura 13– Ensamblaje del prototipo sin el carenado .....	19
Figura 14– Sección B.2.1.2 del reglamento de MotoStudent [6] .....	20
Figura 15 – Sección B.2.1.3 del reglamento de MotoStudent [6] .....	21
Figura 16– Sección B.2.1.4 del reglamento de MotoStudent [6] .....	21
Figura 17– Sección B.2.1.8 del reglamento de MotoStudent [6] .....	22
Figura 18– Secciones B.4.1.1-B.4.1.3 del reglamento de MotoStudent [6].....	22
Figura 19– Sección B.4.1.4 del reglamento de MotoStudent [6] .....	23
Figura 20 – Ejemplo de croquis 3D.....	24
Figura 21– Ducati Panigale V4R del mundial de Superbikes [7].....	25
Figura 22– Diseño de la cúpula en vista lateral y superior.....	26
Figura 23– Diseño del frontal en vista lateral y fontal .....	26
Figura 24– Diseño de la zona intermedia en vista lateral y superior.....	27
Figura 25– Diseño de la quilla en vista lateral y trasera.....	27
Figura 26– Primera versión del carenado .....	28
Figura 27 – Dominio computacional empleado .....	30

Figura 28– Mallado por defecto del volumen de aire.....	31
Figura 29– Detalle quilla en dominio computacional .....	33
Figura 30– Versión 1-B del carenado.....	34
Figura 31– Mallado final de la versión 1-B del carenado .....	35
Figura 32- Flujo Laminar y flujo turbulento [9].....	38
Figura 33 –Capa límite en placa plana [11].....	42
Figura 34- Desprendimiento capa límite en una esfera [12] .....	43
Figura 35– Visualización de entrada y salida del flujo de aire en el dominio computacional. .....	45
Figura 36– Gráfica de residuos y fuerza de arrastre de simulación de versión 1.B a 170 km/h .....	50
Figura 37– Gráfica de velocidades de la simulación de versión 1.B a 170 km/h.....	51
Figura 38– Gráfica de presiones de la simulación de versión 1.B a 170 km/h .....	52
Figura 39– Gráfica de viscosidad turbulenta de la simulación de versión 1.B a 170 km/h	53
Figura 40– Gráfica de residuos y fuerza de arrastre de simulación de versión 1.B a 135 km/h .....	54
Figura 41– Gráfica de velocidades de la simulación de versión 1.B a 135 km/h.....	54
Figura 42– Gráfica de presión absoluta de la simulación de versión 1.B a 135 km/h .....	55
Figura 43– Gráfica de viscosidad turbulenta de la simulación de versión 1.B a 135 km/h	55
Figura 44 – Gráfica de residuos y fuerza de arrastre de simulación de versión 1.B a 100 km/h .....	56
Figura 45– Gráfica de velocidades de la simulación de versión 1.B a 100 km/h.....	57
Figura 46– Gráfica de presión absoluta de la simulación de versión 1.B a 100 km/h .....	57
Figura 47– Gráfica de viscosidad turbulenta de la simulación de versión 1.B a 100 km/h	58
Figura 48– Vistas frontal y lateral de la versión 2.0 del carenado .....	61
Figura 49– Gráficas residuos en función iteraciones de las tres simulaciones de la versión 2.0.....	61
Figura 50– Gráficas de fuerza de arrastre en función iteraciones de las tres simulaciones de la versión 2.0 .....	62

Figura 51– Gráficas de velocidades de las tres simulaciones de la versión 2.0 .....	64
Figura 52– Gráficas de presión absoluta de las tres simulaciones de la versión 2.0 .....	65
Figura 53– Gráficas de viscosidad turbulenta de las tres simulaciones de la versión 2.0 ...	67
Figura 54– Vistas frontal y lateral de la versión 3.0 del carenado .....	68
Figura 55– Gráficas de residuos en función iteraciones de las tres simulaciones de la versión 3.0 .....	68
Figura 56– Gráficas de fuerza de arrastre en función iteraciones de las tres simulaciones de la versión 3.0 .....	69
Figura 57– Gráficas de velocidades de las tres simulaciones de la versión 3.0 .....	71
Figura 58– Gráficas de presión absoluta de las tres simulaciones de la versión 3.0 .....	72
Figura 59– Gráficas de viscosidad turbulenta de las tres simulaciones de la versión 3.0 ...	73
Figura 60– Impresora 3D DT 600 [16].....	76
Figura 61– Molde cubre baterías .....	77
Figura 62- Diferentes alturas de capa [17] .....	77
Figura 63– Objetivos de Desarrollo Sostenible [19] .....	80

## *Índice de tablas*

Tabla 1– Valores parámetros de mallado inicial y mallado final .....	35
Tabla 2 – Resultados numéricos de simulaciones de versión 1.B del carenado.....	58
Tabla 3– Valores de $C_D$ de modelos comerciales según postura del piloto [15].....	59
Tabla 4– Resultados numéricos de simulaciones de versión 2.0 del carenado .....	63
Tabla 5– Resultados numéricos de simulaciones de versión 3.0 del carenado .....	70
Tabla 6– Comparación entre versión 1.B y versión 3.0 del carenado .....	74

## *Índice de ecuaciones*

Ecuación 1– Ecuación de conservación de la masa.....	36
Ecuación 2– Ecuación de conservación de cantidad de movimiento .....	36
Ecuación 3- Ecuación de la Energía .....	37
Ecuación 4- Ecuación de Estado .....	37
Ecuación 5- Número de Mach .....	37
Ecuación 6- Ecuación de conservación de la masa simplificada.....	37
Ecuación 7- Definición del número adimensional Re .....	38
Ecuación 8- Cálculo del Re .....	38
Ecuación 9- Energía cinética turbulenta.....	39
Ecuación 10- Disipación turbulenta .....	39
Ecuación 11– Definición fuerza de arrastre .....	40
Ecuación 12– Definición fuerza de sustentación.....	40

## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**

Este trabajo de fin de grado nace de la necesidad de implementar un carenado propio para el prototipo desarrollado por la asociación de estudiantes de la universidad Pontificia Comillas ICAI SPEED CLUB (ISC). En particular se trata del diseño y optimización del carenado del prototipo eléctrico para la competición MotoStudent. Esta competición de ingenieros se desarrolla en el circuito mundialista de Motorland situado en la localidad turolense de Alcañiz. Motorland es conocido por ser un circuito de alta velocidad en donde la velocidad punta es clave para lograr el mejor tiempo por vuelta debido a sus grandes rectas, en particular la de atrás. Además, los vehículos eléctricos son capaces de obtener una gran aceleración, pero la velocidad punta no alcanza los niveles de un vehículo de combustión interna. Viéndose así reforzada la necesidad de obtener un prototipo eficiente aerodinámicamente.

De igual manera, la caja de baterías del prototipo, su motor eléctrico y convertidor poseen una geometría muy diferente a la de un motor de combustión interna por lo que es necesario el diseño propio para un perfecto acoplamiento con el prototipo permitiendo así optimizar tanto la eficiencia aerodinámica como la ergonomía en el pilotaje. Además del diseño del carenado, se va a desarrollar un proceso de fabricación para el mismo, aplicando materiales y procesos de fabricación de última generación permitiendo así tener el menor impacto posible en el medio ambiente. Para controlar esto último, se van a ver los diferentes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que se cumplen en la fabricación del carenado.

De igual manera existen diferentes alumnos, miembros de diferentes escuderías que han participado en la competición de MotoStudent, que han desarrollado diferentes componentes de las motos de competición como parte de sus trabajos de fin de grado. Esto demuestra la importancia que tiene esta competición para los alumnos de ingeniería de los diferentes equipos participantes.

Esta competición busca el desarrollo de los ingenieros del mañana al plantear un reto en un mundo tan exigente como es el mundo de la competición. La participación en esta competición permite a un grupo de alumnos aprender a desarrollar un trabajo en equipo, a gestionar recursos, a buscar recursos y patrocinadores y diferentes habilidades que buscan las empresas en la actualidad. Esto significa que MotoStudent es el escaparte perfecto para realización de un proyecto de fin de grado. Además, el reglamento técnico de la competición está basado en el reglamento de Moto3 del mundial de motociclismo, lo cual representa el paso lógico para que las escuderías de esta categoría inferior del mundial puedan captar talento joven para renovar su cuerpo técnico.

Esta competición se desarrolla de forma bianual. El prototipo en el cual se va a implementar el carenado participa en la sexta edición de esta competición que debutó en el año 2010. Durante las tres primeras ediciones de esta competición, se compitió en la categoría *Petrol*, categoría en la que los prototipos son impulsados por un motor de combustión interna de 250 cc de 4 tiempos. En el año 2016 tuvo lugar la cuarta edición de MotoStudent, en la cual por primera vez tuvo lugar la categoría *Electric*, además de la categoría *Petrol*. En esta nueva categoría, los prototipos son impulsados por un motor eléctrico de imanes permanentes. En el año 2018 tuvo lugar la quinta edición de la competición, año en la que el ISC era novato en la categoría. De esta forma, esta sexta edición de MotoStudent, representa la segunda participación de la asociación en la categoría eléctrica.

Por motivos de la pandemia mundial de la COVID-19, la competición planificada para octubre de 2020 ha tenido que retrasarse a julio de 2021, permitiendo de esta forma el desarrollo de este trabajo de fin de carrera.



## **Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS**

En este proyecto se va a emplear el software de diseño CAD SolidWorks, en concreto se va a emplear el módulo de Superficies del producto de la marca *Dassault Systèmes*. Este módulo del programa permite la creación de superficies. Esto se traduce en la posibilidad de diseñar piezas de geometría compleja, que empleando el módulo *Part* sería imposibles de realizar. El módulo de Superficies crea en un primer momento un sólido que no tiene volumen, pero se puede extruir la superficie para dotarla de cierto espesor lo cual resulta perfecto para el diseño del carenado ya que se trata de una pieza cuyo espesor es mínimo al emplearse diferentes materiales compuestos como la fibra de vidrio o de carbono.

Otro software que se va a emplear en este proyecto es el programa ANSYS Fluent en su versión académica 2020. Este es un software de elementos finitos para cargas estructurales y de volúmenes finitos para estudios de fluidos. En concreto Fluent permite aplicar la dinámica de fluidos computacional (CFD) para realizar simulaciones de fluidos. En el capítulo 5 se va a detallar de forma precisa, las ecuaciones y la forma en la que este software las emplea para resolver las simulaciones.

El proceso que se va a desarrollar va a ser el diseño de una primera versión del carenado que se someterá a un posterior análisis aerodinámico en Fluent. Una vez simulado, se va a proceder al análisis de los resultados traduciéndose esto en un cambio de diseño de la pieza para obtener una mejor eficiencia aerodinámica. Se entiende por eficiencia aerodinámica la reducción de la fuerza de arrastre que actúa sobre el conjunto de un vehículo, lo cual permite aumentar su velocidad para una determinada energía disponible, o reducir el consumo para una velocidad dada.

Por último, en la fase de fabricación de la pieza se va a emplear el software ‘opensource’ Cura. Este software permite la comunicación del ordenador con una impresora 3D, ya que se va a emplear fabricación aditiva para la creación de los diferentes moldes del carenado. Estos moldes se diseñan mediante SolidWorks a partir de la pieza previamente optimizada. La tecnología de fabricación aditiva empleada va a ser el FDM ya que resulta la más versátil y la más barata a nivel industrial.

## Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Desde el nacimiento del mundial de motociclismo en 1949, los diferentes fabricantes han buscado la mejora y optimización constante de sus prototipos. Al descubrirse la importancia de la aerodinámica, los equipos han estado constantemente desarrollando esta área. Se ha evolucionado de una motocicleta de competición semicarenada, que permitía al piloto protegerse detrás de la cúpula en las rectas y así ganar tiempo a los complejos carenados que muestran diferentes zonas con alerones para mejorar el comportamiento del prototipo en cualquier situación que se pueden observar hoy en día en el mundial de Moto GP. Estos complejos carenados mejoran tanto la eficiencia aerodinámica en recta como la estabilidad durante la frenada. El desarrollo de la aerodinámica de las motos de competición moderna ha sido posible, fundamentalmente gracias a la evolución de la informática, permitiendo así la obtención de software de simulación que es luego ensayada en túneles de vientos creados por los equipos. Para entender el correcto desarrollo de la aerodinámica en las motos de competición, se va a estudiar la evolución de los prototipos presentados por Honda, la marca más laureada en la historia de la categoría reina. [1]

En 1966, Honda presentó su modelo de competición Rc181 con el cual la marca se estrenaba en la categoría de 500 centímetros cúbicos (cc) del mundial (figura 1)



*Figura 1– Honda Rc181[1]*

La marca del ala dorada conseguía hacerse con varias victorias en su año debut, consiguiendo que su moto llegase a alcanzar los 275 km/h con un motor que entregaba únicamente 85 CV, una cantidad irrisoria a día de hoy. Se puede observar un carenado frontal en el cual la cúpula redonda y grande toma una gran importancia mientras que el frontal resulta bastante plano en su ataque. La zona lateral cubre apenas la zona del motor. Esta velocidad se pudo alcanzar únicamente debido a la mejora aerodinámica y la reducción de la fuerza de arrastre del viento debido al carenado instalado.

Este carenado fue la tendencia a seguir desde que en 1957 la FIM prohibiese ciertos conceptos de carenados que empezaron a investigarse con anterioridad. Cabe destacar la importancia de este carenado de tipo delfín debido a su posterior desarrollo hasta llegar a las variantes que conocemos actualmente.

En 1979, tras varios años alejado de la competición, Honda compitió con la NR500, un prototipo igualmente de la categoría de 500 cc pero con un diseño completo mucho más elaborado que la versión presentada en 1966. (figura 2)



*Figura 2– Honda NR500[1]*

Se puede observar un desarrollo mucho más elaborado del conjunto de la aerodinámica del prototipo. En primer lugar, la presencia de un guardabarros mucho más elaborado que en la edición anterior. Tanto el colín como la ergonomía del cubre toman importancia con respecto a la versión anterior. En cuanto al carenado, se puede seguir observando que es ancho y redondo como en 1966 pero cuyas líneas evolucionan. El ataque del carenado es menos plano y adopta una forma curvilínea mientras que la cúpula se vuelve prácticamente inexistente en

este prototipo. Se ve una clara intención por parte de Honda de reducir el área frontal para así disminuir el arrastre de la moto.

El siguiente paso de Honda fue la NS500 en la cual se vio un claro desarrollo de la aerodinámica de la moto. La cúpula, toma una importancia mayor, acabando a la altura del de la cabeza del piloto para permitir una continuidad en el flujo de aire y reducir la fuerza de arrastre Este modelo se presentó en 1982. (figura 3)



*Figura 3– Honda NS500[1]*

Se puede comprobar que, con el avance de los años, la tendencia de desarrollar un prototipo con una aerodinámica eficiente resulta cada vez más claro en la marca nipona.

El siguiente modelo que presento la marca del ala dorado fue la NSR500, que compitió durante unos 18 años en el mundial tras ir presentando diferentes mejoras. La primera de estas versiones se puede ver en la siguiente figura. (figura 4)



*Figura 4– Honda NSR500 (1984)[1]*

Honda rediseño por completo su montura, que con un nuevo motor entregando 150 CV, el más potente de a categoría hasta la fecha y con ligeros cambios en la aerodinámica de la moto consiguió en su primera participación en el mundial, en la carrera de las 200 millas de Daytona de ese mismo año, superar la barrera de los 300 km/h y alcanzar una velocidad punta de 305 km/h. En comparación con la NS 500, se puede ver una ligera modificación de la cúpula siendo más pequeña y redonda, y una ligera modificación del colín. Esta versión de la Honda NSR 500 duro hasta 1991 obteniendo varios títulos mundiales a medida que se evolucionaba en el diseño del motor y elementos estructurales de la misma, dejando la aerodinámica sin apenas modificaciones durante siete años.

La siguiente etapa fue de 1992 a 2001, en estos nueve años se denominó al prototipo de Honda, la Honda NSR 500 ‘Big Bang’. Este nombre se debe al sonido del motor de esta moto con la que Honda obtuvo una gran ventaja respecto a sus rivales, haciendo que estos empleasen una gran cantidad de recursos a averiguar el sonido de este motor y la razón de su potencia cuyo secreto residía en el orden de ignición de los pistones para que la entrega de potencia fuese más controlable y por tanto el piloto tuviese más tracción. De igual manera el desarrollo aerodinámico fue un punto clave para Honda. Se incorporó una geometría de carenado muy suave y progresiva en comparación a los carenados con tendencia redondos que la marca del ala dorada empleaba anteriormente. De esta forma a continuación, se puede la NSR 500 del año 1997. (figura 5)



*Figura 5– Honda NSR500 (1997) [1]*

La evolución aerodinámica es evidente, permitiendo así conseguir prototipos en los que la fuerza de resistencia al avance se veía disminuida, obteniendo así una velocidad punta

mayor. Siendo esta moto la clara dominadora de la década de los 90 y años 2000 y 2001 en el cual la era de las 500 de 2 tiempos llegaba a su fin.

En 2002 se instauró la nueva normativa técnica del mundial, motos de motor de 4 tiempos y de 990 cc hasta 2006. Esta nueva normativa técnica tuvo un impacto directo en los carenados ya que, al cambiar los motores a 4 tiempos, estos cambiaban de forma drástica los escapes y las geometrías del motor haciendo que los equipos diseñasen un nuevo carenado para adaptarse a estos cambios técnicos. A continuación, se puede ver la Honda RC211V modelo empleado por Honda hasta 2006. (figura 6)



*Figura 6– Honda RC211V (2005)[1]*

Se puede ver una aerodinámica mucho más moderna en este modelo. El desarrollo del Ram-Air en el frontal de la moto encargado de sobrealimentar el motor en su admisión obteniendo así mayor rendimiento en la explosión de la mezcla de combustible con el aire entregado en condiciones óptimas por esta pieza, así como el desarrollo de unas líneas mucho más afiladas y agresivas, así como un colín mucho más elaborado que en la era de las 500 son un claro ejemplo de la evolución aerodinámica que el nuevo milenio trajo al mundial. De esta forma se conseguía superar la barrera de los 330 km/h en circuito. Además de una zona ampliada para la colocación del radiador y asegurar una temperatura de funcionamiento del motor correcta, hace que estos carenados tengan que ser mucho más elaborados para poder ofrecer alguna ventaja en las carreras.

En 2007 la configuración del motor cambiaba y estos motores se reducían hasta los 800 cc. Al ser motores más pequeños se necesita un mayor régimen de giro que en la etapa anterior para tener una potencia aceptable, esto se traduce en más calor que hay que refrigerar, ensanchando los carenados empleados. A continuación, se puede ver el modelo 212V del 2009. (figura 7)



*Figura 7– Honda RC212V (2009)[1]*

De esta forma se puede ver una nueva tendencia en los colines, siendo más anchos y sencillos para permitir la salida de uno de los tubos de escape por debajo de este. El carenado no sufre apenas modificaciones visibles pero cada marca, como Honda busca ligeros cambios que permitan ganar esos pocos km/h de velocidad punta tan necesarios en el mundo de la competición.

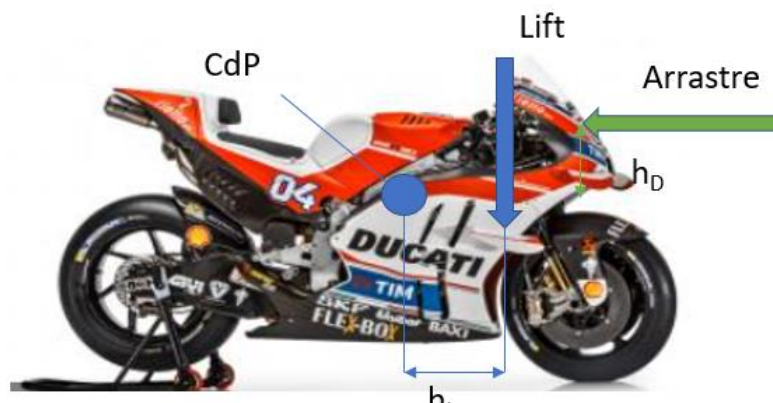
El siguiente paso fue en 2012, con la aparición de los motores de 1000 cc que se mantienen en la actualidad. Este cambio de geometrías trajo consigo la modificación de los carenados, pero fue en 2016 con la implementación de los alerones que el desarrollo de los carenados tuvo un impacto mayor. El genio de la escudería italiana Gigi Dall'igna fue el impulsor del desarrollo de esta nueva tecnología que crea una fuerza de sustentación negativa para que la moto apoyase más en el tren delantero a la salida de curva evitando así que se levante este y ganando tiempo por vuelta y estabilidad como se puede ver en la siguiente foto. (figura 8)



*Figura 8– Ducati Desmosedici Gp 2016[2]*

Se puede ver la implementación de estos alerones en la parte frontal como en la zona superior del vinilo de Ducati que adorna el carenado.

Además, todas las fuerzas aerodinámicas ejercidas en un cuerpo se ejercen sobre el centro de presiones (CdP) por lo cual la fuerza de arrastre crea un momento positivo, haciendo que la rueda delantera se levante y la fuerza de lift contrarresta este momento con una fuerza vertical descendente en el tren delantero. De esta forma la montura se vuelve mucho más estable ya que el momento aerodinámico se ve reducido. La situación ideal es que este momento sea cero en todo momento, pero debido a la distribución de masa en la moto y las variaciones bruscas de estas fuerzas aerodinámicas hacen que no se alcance en todo momento este equilibrio deseado. A continuación, se puede ver un esquema de la aplicación de estas fuerzas en la moto de la figura 8, entendiendo así el concepto de momento aerodinámico de forma visual. (figura 9)



*Figura 9– Fuerzas aerodinámicas y su distancia al CdP*



Se puede ver como el arrastre crea un momento antihorario mientras que el lift negativo crea un momento horario, restándose así y disminuyendo el momento aerodinámico del conjunto.

Esta tecnología fue rápidamente copiada por las otras marcas, respetando la nueva normativa de la FIM de 2017 [3] que prohibía cualquier elemento externo que sobresalía de los carenados para no comprometer la seguridad de los pilotos, ya que a altas velocidades estos elementos se volvían cuchillas. De esta forma los equipos se las ingeniaron para implementar alerones de doble pared que quedaban internos al carenado. Esto se puede ver en la moto de Aprilia en los test de pretemporada de 2017. (figura 10)



*Figura 10– Propuesta de alerón de doble pared de Aprilia en 2017[3]*

En la actualidad, la aerodinámica de las motos se sigue desarrollando, siguiendo estos principios mencionados para permitir a los diferentes fabricantes ajustar el carenado para conseguir más estabilidad en función de los puntos débiles de cada moto.

¿Pero y en otras categorías? En el caso de Moto2 y Moto3, categorías intermedia y pequeña del mundial respectivamente, el desarrollo de la aerodinámica por parte de cada equipo no está permitido, resultando en carenados ‘simples’ al no tener estos complejos alerones como sus hermanas mayores.

Al ser MotoStudent Electric una categoría con un reglamento similar al de Moto3, en este trabajo de fin de grado no se va a estudiar la implementación de alerones en el carenado. De esta forma va a quedar un carenado liso, sin elementos externos. (figura 11)



*Figura 11– Moto 3 de GasGas 2021[4]*

Además, cabe destacar la tendencia exponencial de los últimos años en la electrificación en el sector de la automoción. Los diferentes gobiernos incentivan la movilidad urbana eléctrica para evitar la emisión de gases contaminantes por vehículos en las grandes ciudades y así obtener una calidad de aire más puro y menos nocivo para la población. Además, como es sabido, la alta competición es el escaparate perfecto para el desarrollo de nuevas tecnologías que posteriormente se implementan para un uso fuera del ámbito de la competición. De hecho, la comercialización del airbag para motoristas ha sido únicamente posible gracias al previo desarrollo que las marcas han realizado desde el año 2008 en el mundial de Moto GP, creando así un software eficaz y seguro para el usuario promedio. De esta forma es necesario el avance de tecnología al más alto nivel en el ámbito eléctrico ya que toda esta tecnología está muy desarrollada para los prototipos de combustión interna, pero está empezando a investigarse en el sector eléctrico.

Desde 2019, existe la variante de Moto GP en la rama eléctrica, esta es la moto E, cuyo diseño es igual para todos los participantes y ha sido desarrollado por Energica. Esto muestra el poco avance que existe en el desarrollo aerodinámico de las motos de competición eléctricas.

De esta forma, en la actualidad solo existe este prototipo eléctrico como propuesta. A continuación, se muestra esta moto de competición. (figura 12)



*Figura 12– Moto E del mundial [5]*

Al ser un prototipo desarrollado en los últimos años, se puede observar un carenado afilado en su diseño en el cual cabe destacar la ausencia de elementos aerodinámicos tales como los alerones que cobran un rol tan importante en la categoría reina del mundial de motociclismo como se ha mencionado anteriormente. Al ser de propulsión eléctrica el prototipo para el cual se va a diseñar esta pieza aerodinámica, resulta interesante seguir la línea de diseño que se ha seguido para este prototipo.

## **Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO**

En este cuarto capítulo del documento, se va a justificar la decisión de su realización, así como de los objetivos que se buscan en este proyecto. De igual manera se va a estudiar la metodología que se va a emplear.

### **4.1 JUSTIFICACIÓN**

Como se ha visto en el capítulo anterior, existe una infinidad de carenados previamente diseñados cuyo rendimiento se ha probado en la pista. Cada marca y cada fabricante desarrolla una solución que funciona con el conjunto de su vehículo de competición. De esta forma si por ejemplo el equipo HRC copia al milímetro el carenado revolucionario de la Ducati, no tendría el mismo efecto aerodinámico que tiene en la Ducati. Es por esta razón que cada marca desarrolla su propia aerodinámica.

El prototipo desarrollado por los alumnos de la asociación ICAI Speed Club es un prototipo eléctrico, esto implica que el diseño de la caja de batería, la caja del convertidor y el motor tienen unas geometrías y una distribución en la moto que son muy diferentes a las que tendría una moto de combustión interna. De esta forma, el desarrollo de un carenado propio para que la adaptación al prototipo sea perfecta resulta indispensable.

Por último, en el departamento de aerodinámica del proyecto de MotoStudent del ICAI Speed Club se ha desarrollado tanto colín, como cubre baterías como guardabarros trasero. De esta forma la dirección lógica a seguir dentro del departamento es el diseño de un carenado propio, que al igual que el resto de las piezas fabricadas, permita un acople perfecto entre la aerodinámica y la montura.

Este desarrollo, además de lo mencionado anteriormente, va a permitir la evolución de la calidad del trabajo del departamento de aerodinámica anteriormente mencionado, asentando

de esta forma una base de trabajo y una metodología que se podrá seguir para el desarrollo de futuras piezas aerodinámicas en futuras ediciones de la competición.

## **4.2 OBJETIVOS**

En este proyecto de fin de grado se busca principalmente el correcto diseño y su posterior optimización para que el prototipo presentado por la asociación de alumnos del ICAI SPEED CLUB sea lo más competitivo posible. La competición en la cual va a competir el prototipo tiene lugar a mediados del mes de julio del año 2021 en el circuito mundialista de Motorland, situado en Alcañiz. El diseño como la simulación van a resultar claves en este documento. El objetivo principal en el diseño va a ser la disminución de la fuerza de resistencia al aire del carenado o fuerza de arrastre, de esta forma al tener una menor resistencia al avance del aire, para la misma potencia eléctrica del motor, se va a conseguir una mayor velocidad punta en recta y por tanto un mejor tiempo de vuelta en clasificación, y mayores oportunidades de adelantamiento en la carrera que se disputa el último día de la competición.

Además, otro objetivo de este proyecto resulta ser el correcto desarrollo del proceso de fabricación del carenado previamente diseñado. Se va a buscar el correcto balance entre menor impacto en el medioambiente y calidad de fabricación de la pieza. Al tratarse de una pieza fabricada en material compuesto y que posee geometrías complejas, la fabricación de los moldes en los cuales se va a laminar el material compuesto resulta fundamental y va a suponer la mayor parte de los gastos destinados a la fabricación, por lo cual la optimización de la fabricación de estos moldes va a resultar clave. Esto se estudiará en el capítulo 6 de este documento.

El fomento de la transición ecológica, la búsqueda de impactar de forma mínima en el medio ambiente con las actividades realizadas, tanto en el diseño como en la fabricación del carenado va a ser el tercer y el último objetivo que se va a estudiar en este trabajo. Este último objetivo, está directamente relacionado con los Objetivos de Desarrollo Sostenibles que existen desde septiembre de 2015. El fomento del desarrollo de la movilidad eléctrica mediante el desarrollo directo de la alta competición, así como la optimización del proceso

de fabricación del carenado, tanto en la fabricación de los moldes como en la posterior fabricación de la pieza final van a estar directamente alineados con estos objetivos definidos por las Naciones Unidas. De esta forma, este último objetivo se va a desarrollar en el capítulo 6 de este documento.

### **4.3 METODOLOGÍA**

En la realización de este proyecto, la metodología de trabajo resulta de vital importancia para la obtención de un trabajo de calidad, que además de resultar un buen trabajo de fin de grado, permita también el correcto desarrollo de una pieza muy importante del prototipo realizado por el ISC durante tres años.

La primera parte del proyecto, siendo esta la más importante es el correcto diseño y su posterior optimización de la pieza de estudio, es decir, del carenado. De esta forma lo primero que se realiza es la formación en los diferentes programas que se van a emplear. De esta manera se va a poder diseñar y simular de forma más rápida y sin interrupciones debidas a la falta de experiencias con el software empleado.

Una vez se empiece a diseñar la pieza final. Se van a ir realizando diferentes versiones a medida que se avanza con la optimización. Durante la realización de la primera versión, se va a documentar el proceso desarrollado para el diseño del mismo en SolidWorks. De esta forma se va a entender el diseño de la primera versión que después va a ir progresando al analizar los resultados de las diferentes simulaciones aerodinámicas que se van a realizar en el dominio computacional que se va a crear en Fluent.

Para el desarrollo de las simulaciones el proceso que se va a seguir es siempre el mismo. En un primer lugar se va a crear un dominio computacional alrededor de la pieza a ensayar. Una vez creado este dominio, el siguiente paso es realizar un correcto mado del volumen de aire resultante del apartado anterior.

Para cada diseño del carenado, se van a realizar simulaciones a diferentes velocidades, para entender la variación de comportamiento de cada diseño a tres velocidades diferentes y de esta forma buscar el mejor diseño posible.

Una vez obtenido el diseño final, tras realizar de forma iterativa el proceso anteriormente realizado, se procede al diseño de los moldes. Para ello se va a emplear el mismo software de diseño empleado en los diseños de la pieza. Esto va a permitir la realización del negativo del molde de forma sencilla. Se decide realizar el negativo del molde ya que la parte exterior de la pieza quedaría justo en la superficie del molde y la parte interior de la pieza, sería la zona que queda al aire una vez laminada. Esta última capa suele tener peor acabado superficial, de ahí el interés de buscar que la cara exterior de la pieza quede en la superficie del molde ya que el acabado superficial de este va a ser bastante mejor que la interior. Estos moldes van a ser optimizados para su correcta impresión en 3D.

Finalmente se va a fabricar la pieza de material compuesto gracias a los moldes previamente fabricados. Para ello se va a laminar el material compuesto sobre el molde. Para garantizar el cumplimiento de los diferentes objetivos de desarrollo sostenible se va a emplear una fibra de lino con una bio resina epoxi ecológica que van a reducir considerablemente el impacto del material compuesto en el medio ambiente.

## **Capítulo 5. DISEÑO Y DESARROLLO DEL CARENADO**

En este capítulo se va a proceder a la descripción del proceso aplicado en el desarrollo del diseño, así tanto como de la optimización de la pieza del proyecto que es el carenado de un prototipo de competición eléctrico. De esta forma este capítulo resulta de vital importancia para el desarrollo del proyecto.

### **5.1 ANÁLISIS DE LAS LIMITACIONES DEL DISEÑO**

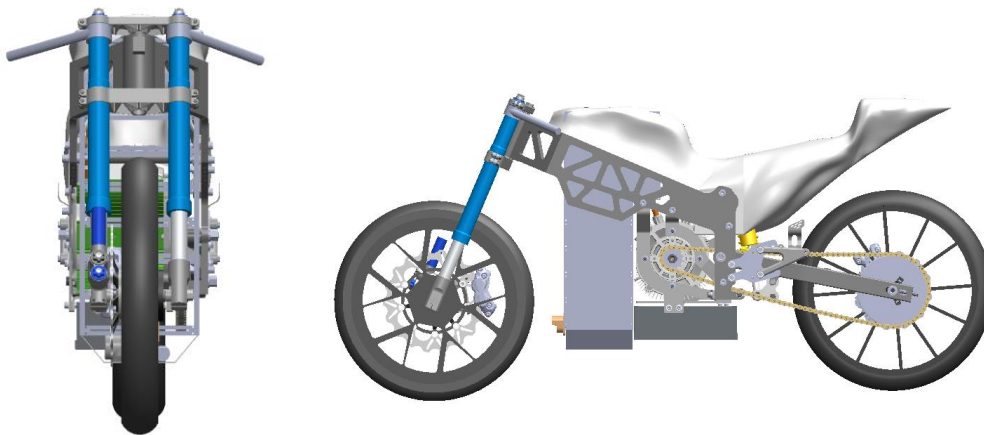
En esta primera parte del capítulo, se van a analizar las diferentes limitaciones que se van a tener en cuenta a la hora de diseñar el carenado de este proyecto. En un primer lugar se van a ver las limitaciones propias que presenta el prototipo, para ello se va a analizar la geometría que interacciona con el carenado, es decir con el chasis y la caja de baterías principalmente. A continuación, se va a estudiar las limitaciones impuestas por el reglamento de la competición de la sexta edición de MotoStudent.

#### **5.1.1 LIMITACIONES DEL PROTOTIPO**

La pieza que se va a diseñar forma parte del conjunto de un prototipo de moto de competición eléctrica tipo moto 3. Esto se traduce en unas geometrías y una serie de elementos que no existen en una moto de combustión interna. Estos elementos son principalmente, la caja de baterías, el motor eléctrico y el convertidor del prototipo. Este último elemento es de vital importancia ya que es el encargado de convertir la energía proveniente de las baterías, es decir corriente continua, en la corriente trifásica que necesita el motor para funcionar, por lo cual es necesario una cercanía tanto a la caja de baterías como al motor para optimizar la gestión de cables por dentro del prototipo. Esto se traduce en una aglomeración de elementos en la zona donde tradicionalmente se aloja el motor de combustión interna, por lo cual en una restricción del diseño del carenado.



Al tratarse de un proyecto de equipo, existe un ensamblaje del conjunto del prototipo montado con todos sus componentes. Este ensamblaje se ha ido realizando a medida que las diferentes piezas que componen el prototipo se han ido diseñando. Se va a emplear este ensamblaje como principal fuente de información a la hora de comprobar la no interferencia con los elementos claves anteriormente mencionados. A continuación, se muestra una captura del ensamblaje del prototipo que se va a emplear en este trabajo. (figura 13)



*Figura 13– Ensamblaje del prototipo sin el carenado*

Como se puede comprobar en la vista de perfil del ensamblaje de la moto, la caja de baterías es el elemento de mayor tamaño y con menos distancia al suelo. Al ser el elemento de mayor tamaño, va a implicar que va a ser el más restrictivo para el diseño del carenado. Se puede comprobar que el motor eléctrico va perfectamente acoplado con el chasis de la moto y que la caja del convertidor con este dentro, se sitúa justo por debajo del motor, quedando el conjunto de ambos por encima de la caja de baterías. De igual manera se puede ver como la caja del convertidor sobresale lateralmente por el perfil derecho con respecto a la caja de baterías. Esta asimetría va a dificultar en parte el diseño del carenado, ya que hay que asegurar que la caja del convertidor queda por dentro de la quilla del carenado, quedando así protegido. Además, la suspensión delantera se encuentra comprimida en este ensamblaje para ver que el frontal del carenado no choque con el flanco del neumático.

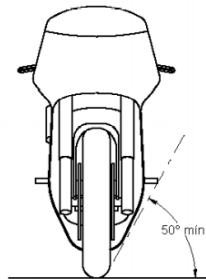
### 5.1.2 LIMITACIONES IMPUESTAS POR LA COMPETICIÓN

Además de las limitaciones que impone el propio diseño del prototipo, la competición plantea un reglamento técnico que los diferentes equipos deben de cumplir de forma estricta. En este trabajo se van a tratar únicamente las normas impuestas sobre el carenado.

Se va a analizar el reglamento situado en la sección de reglamento común del documento propuesto por la organización del evento [6]. En concreto se trata de los artículos 2 y 4 de la sección B del reglamento oficial. A continuación, se van a mostrar los diferentes requisitos generales que tienen un impacto directo en el diseño del carenado de cualquier prototipo participando en cualquier categoría de la competición de MotoStudent.

En primer lugar, se van a ver los requisitos asociados a las dimensiones del carenado para luego ver los requisitos propios de la geometría de la pieza aerodinámica. Se puede observar la sección B.2.1.2 del reglamento (figura 14).

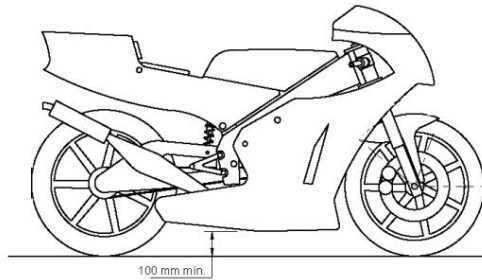
B.2.1.2 El ángulo mínimo de inclinación lateral del prototipo sin que ningún elemento del mismo (exceptuando los neumáticos) toque el pavimento debe ser 50°. Dicha medición se realizará con el prototipo descargado (es decir, sin piloto) pero con todo el equipamiento y líquidos para su funcionamiento.



*Figura 14– Sección B.2.1.2 del reglamento de MotoStudent [6]*

A continuación, se muestra la sección B.2.1.3 del reglamento de la competición en donde se establece la distancia mínima del prototipo con respecto al suelo. (figura 15)

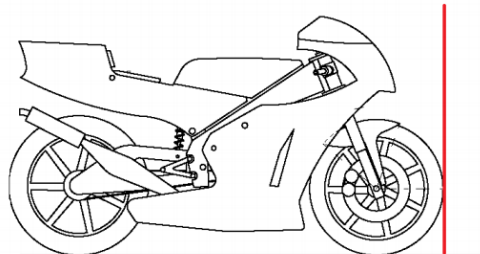
B.2.1.3 La distancia libre al pavimento con el prototipo en posición vertical ha de ser de un mínimo de 100mm en situación de reposo. Esta medición se realizará con el prototipo descargado (es decir, sin piloto), pero con todo el equipamiento y líquidos para su funcionamiento.



*Figura 15 – Sección B.2.1.3 del reglamento de MotoStudent [6]*

A continuación, se muestra la sección B.2.1.4 del reglamento, en este caso se indica que ningún elemento del prototipo puede sobrepasar la línea vertical del extremo del neumático delantero. (figura 16)

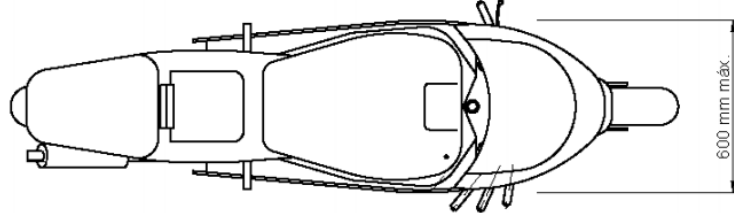
B.2.1.4 Límite frontal: Ningún elemento del prototipo podrá sobrepasar la vertical frontal trazada tangencialmente a la circunferencia exterior del neumático delantero.



*Figura 16– Sección B.2.1.4 del reglamento de MotoStudent [6]*

La última sección relacionada con las dimensiones del carenado viene dada por la sección, B.2.1.8 que limita la anchura máxima del carenado. (figura 17)

B.2.1.8 La anchura máxima del carenado será de 600mm.



*Figura 17– Sección B.2.1.8 del reglamento de MotoStudent [6]*

El artículo 4 de esta misma sección del reglamento de la competición de MotoStudent, busca aclarar a los equipos las normas respecto al carenado como pieza del prototipo. A continuación, se muestra las primeras normas de los requisitos generales que debe de tener el carenado. (figura 18)

**B.4.1 Requisitos generales**

B.4.1.1 Todos los bordes y acabados del carenado han de ser redondeados. Radio mínimo 1mm.

B.4.1.2 El carenado no podrá cubrir lateralmente al piloto a excepción de los antebrazos (esta excepción solamente aplica en posición de mínima resistencia aerodinámica del piloto).

B.4.1.3 No hay restricciones en cuanto al material de fabricación del carenado.

*Figura 18– Secciones B.4.1.1-B.4.1.3 del reglamento de MotoStudent [6]*

Como se puede comprobar en la figura 18, se puede ver en la tercera norma de estos requisitos generales, que se puede emplear cualquier material para la fabricación del carenado, esto va a permitir la implantación de un proceso ecológico de fabricación que se estudiará en el capítulo 6 de este documento.

A continuación, se muestra la 4 y última norma de los requisitos generales del carenado. (figura 19)

B.4.1.4 Se permite la instalación de alerones, siempre que no se excedan las dimensiones máximas descritas en el presente Reglamento y estén correctamente anclados al carenado. En el caso de alerones el radio mínimo de sus terminaciones será de 2,5 mm. No se permite la instalación de alerones u otros elementos aerodinámicos móviles. En caso de duda sobre la seguridad en pista por el diseño o instalación de alerones u otros elementos aerodinámicos, la decisión del Cuerpo Técnico de la Organización será inapelable.

*Figura 19– Sección B.4.1.4 del reglamento de MotoStudent [6]*

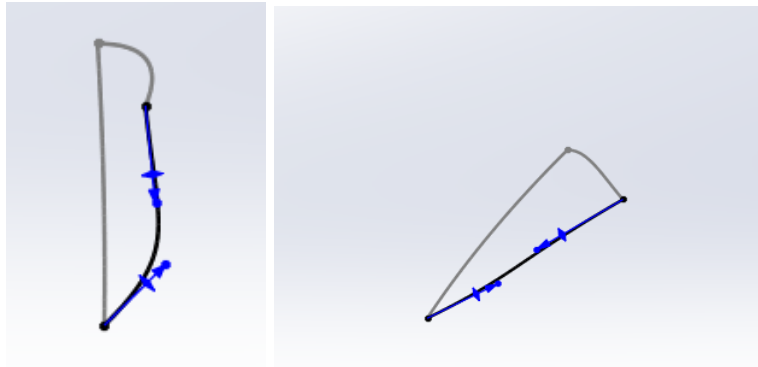
## **5.2 DESARROLLO DEL DISEÑO**

En este segundo apartado del capítulo 5 se va a estudiar el desarrollo del diseño del carenado. Este desarrollo va a realizarse en el diseño de la primera versión del carenado. Para el resto de las versiones se va a modificar la geometría desarrollada en este apartado.

Este diseño se va a realizar con el módulo de Superficies de SolidWorks como se explicó en el segundo capítulo de este documento, permitiendo realizar así las complejas geometrías de un carenado de competición.

El carenado se va a empezar a diseñar por su cúpula, para luego seguir por la parte frontal, luego la zona intermedia y por último la quilla de este. Se decide crear diferentes partes del carenado por separado, en primer lugar, para simplificar el diseño del mismo y por otro lado para no tener que rediseñar la pieza por completo después de cada análisis de los resultados de las simulaciones, modificando así únicamente la parte deseada.

La herramienta que se va a emplear para la creación de estas diferentes partes es la de rellenar superficie. Para emplear esta herramienta, hay que crear una serie de croquis, pueden ser de dos dimensiones como tridimensionales de tal forma que los croquis creen una geometría cerrada entre sí. De esta forma la superficie que se crea viene condicionada por los croquis. Un croquis 3D, es un croquis en el que se puede modificar la geometría en un plano sin verse afectado el diseño en los dos restantes. A continuación, se muestra un ejemplo de un croquis 3D, empleado en el diseño del primer elemento del carenado, es decir la cúpula. (figura 20)



*Figura 20 – Ejemplo de croquis 3D*

Se puede observar en dos vistas, diferentes, como el croquis marcado con la línea negra sigue una geometría diferente en función del plano escogido.

Como se van a crear diferentes superficies con la herramienta anterior, es necesario asegurarse que estas geometrías acaben unidas, por eso se va a emplear la herramienta de coser superficies para unir dos superficies adyacentes entre sí.

Por último, para asegurar la perfecta simetría de la pieza, simplificando así su posterior simulación, se va a realizar el diseño de la mitad lateral del carenado para aplicar una simetría final, obteniendo entonces la pieza completa.

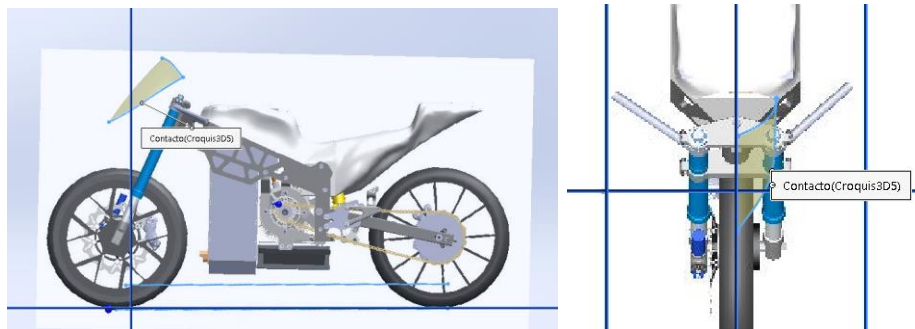
El primer diseño va a estar ligeramente inspirado en la moto que representa los intereses de la marca italiana Ducati en el mundial de Superbikes, es decir el modelo v4r que se puede adquirir en cualquier concesionario de la marca. El carenado de esta moto está adaptado a las geometrías de un motor de 1000 cc y además posee alerones al estilo de Moto GP. En el diseño del carenado de este proyecto no se van a tener en cuenta estos alerones. A continuación, se puede ver una muestra del carenado propuesto por Ducati en su modelo v4r. (figura 21)



*Figura 21– Ducati Panigale V4R del mundial de Superbikes [7]*

Se ha escogido este modelo ya que se trata de uno de los modelos que en casi todas las carreras está luchando por la victoria y que ha demostrado los pasados años su superioridad aerodinámica.

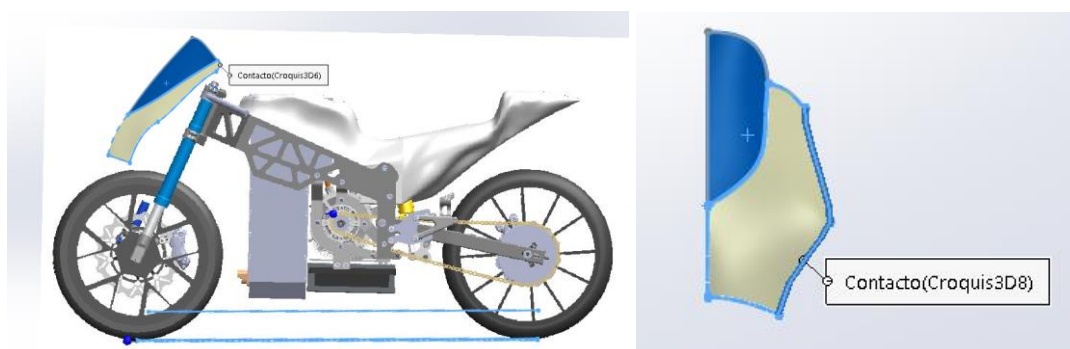
Para el diseño de esta cúpula es importante centrarse en la ergonomía general del prototipo ya que la cúpula tiene como función que el piloto sea capaz de ver lo que tiene delante en la posición de mínima resistencia de este. Para el diseño de este elemento se van a emplear 3 croquis, siendo uno de ellos bidimensional y los otros en tres dimensiones. El croquis bidimensional va a crearse en el plano de simetría del carenado y va a definir la longitud de la cúpula. Mientras que los croquis en 3D van a marcar la geometría que va a seguir la cúpula. Durante todo el diseño, se van a emplear de forma mayoritaria *splines*, que son unas líneas que siguen una ecuación y su curvatura puede modificarse en ambos extremos de la misma. En la figura 20 se puede ver cómo se puede modificar los *splines* a gusto del usuario. A continuación, se puede observar el diseño de este primer elemento del carenado. (figura 22)



*Figura 22– Diseño de la cúpula en vista lateral y superior*

A continuación, se procese al diseño del frontal del carenado. Esta parte de la pieza va a resultar la más crítica, ya que es la de mayor área frontal y por tanto la que más fuerza de arrastre va a recibir. Esta va a ser la parte del carenado que más se va a modificar en el proceso de optimización por lo cual se va a diseñar para poder modificarse de forma sencilla. Al igual que en el caso anterior la superficie se va a realizar mediante tanto croquis en 3D como bidimensionales. Para asegurar la posterior costura entre cúpula y el frontal, se va a aprovechar unos de los croquis creados anteriormente para el diseño del primero. De esta forma el croquis bidimensional va a representar la continuación del anterior, situándose así en el plano de simetría de la pieza. Este croquis marca la longitud final y la forma en ese plano de simetría. Los croquis en 3D limitan la forma exterior del frontal formando así una geometría cerrada que luego puede ser rellenada por una superficie. Una vez formada esta superficie nueva se procede a realizar una costura entre la unión del frontal y de la cúpula.

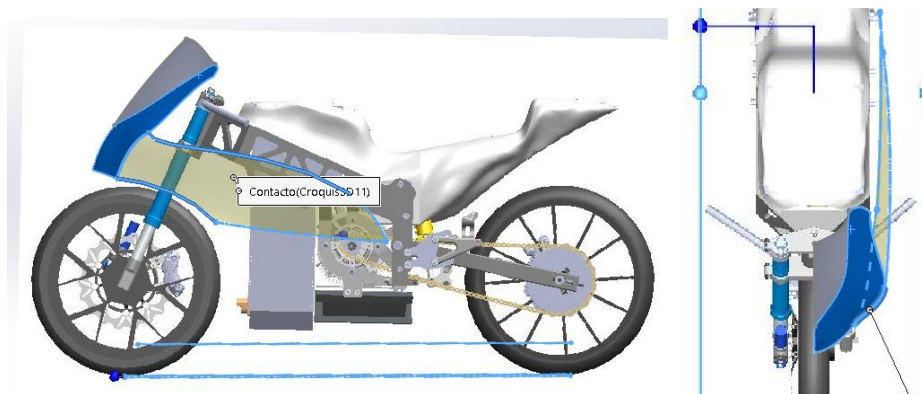
A continuación, se muestra el frontal diseñado. (figura 23)



*Figura 23– Diseño del frontal en vista lateral y frontal*



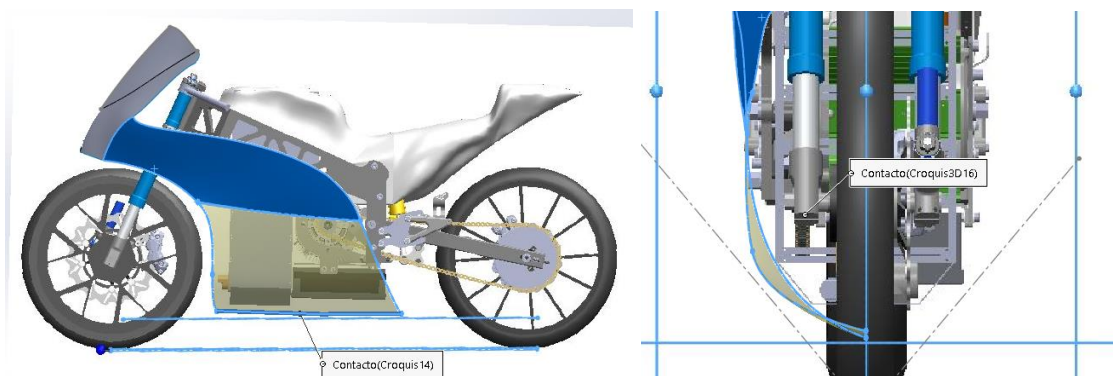
El siguiente paso es completar la zona intermedia del carenado, esta resulta la zona que se sitúa entre el frontal y la quilla. Se va a emplear uno de los croquis 3D del frontal, para que sirva de unión y se emplean dos croquis 3D más para cerrar la geometría y crear de esta forma la superficie. A continuación, se muestra esta parte de la pieza. (figura 24)



*Figura 24– Diseño de la zona intermedia en vista lateral y superior*

Se puede comprobar en la vista superior la ligera curvatura que presenta esta zona en la zona superior e inferior del mismo. Esto se debe a que se está empezando a ver la curvatura que va a tener la quilla para adaptarse a la caja de baterías. De igual manera, se puede comprobar en la vista frontal, como en ningún momento se sobre pasa la anchura máxima impuesta por el reglamento técnico de la competición.

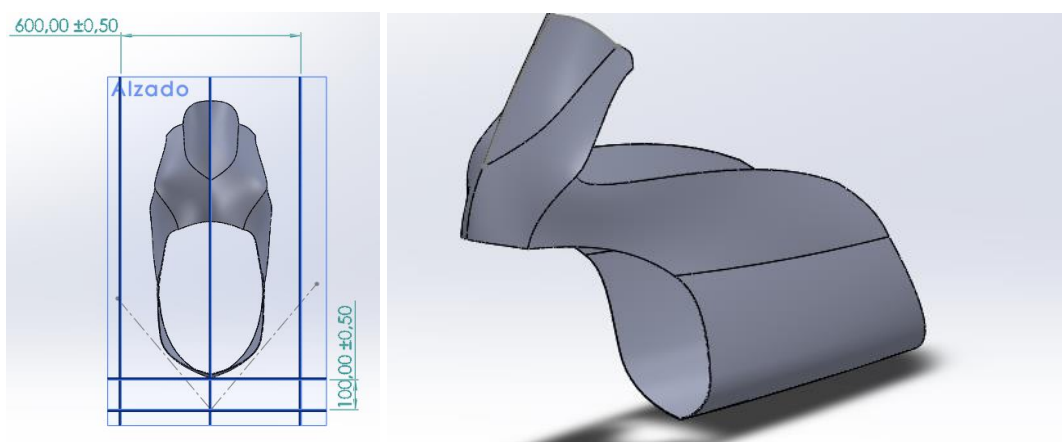
Por último, se diseña la quilla del carenado. (figura 25)



*Figura 25– Diseño de la quilla en vista lateral y trasera*

Se puede comprobar como la quilla es más ancha en la zona de la caja de baterías, para no interferir con ella y se estrecha en la zaga más trasera al ser la caja del convertidor más estrecha. De esta forma se asegura un perfecto acople con el acumulador del prototipo. Además, se observa que no existe interferencia entre el diseño y el prototipo.

Una vez completado el diseño de la mitad del carenado se procede a dar simetría según el plano lateral. De esta forma obtenemos el diseño de la pieza completa. (figura 26)



*Figura 26– Primera versión del carenado*

Como se puede comprobar en la figura 26, la quilla cumple con las normas estipuladas por la competición, es decir no hay ningún elemento por debajo del plano marcado a 100 mm del suelo. De igual manera, el ángulo con el suelo de 50° se cumple como se observa en la vista frontal. Además, se observa el cumplimiento del ancho máximo del mismo.

El paso final en el diseño del carenado es el de dar volumen a la totalidad de la pieza. Se le va a dar un grosor aproximado ya que este depende de la laminación manual del material compuesto que se va a emplear. Se estima un grosor aproximado de 2 mm en el proceso de laminación.

### **5.3 DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN**

Una vez completado el primer diseño se va a procesar a realizar un primer estudio aerodinámico del mismo. De esta manera se va a emplear el programa ANSYS Fluent en su

versión académica 2020. La forma en la que se van a ir trabajando las simulaciones va a ser siempre el mismo en todas las versiones del carenado. En un primer momento se va a crear en *Design Modeler* el dominio computacional. Posteriormente se va a mallar este dominio para después aplicar las condiciones de contorno deseadas y lanzar así la simulación. Se van a realizar tres simulaciones para cada diseño. Estas van a corresponder a la velocidad máxima prevista que se va a alcanzar, a una velocidad media en la recta y a la velocidad de inicio de esta.

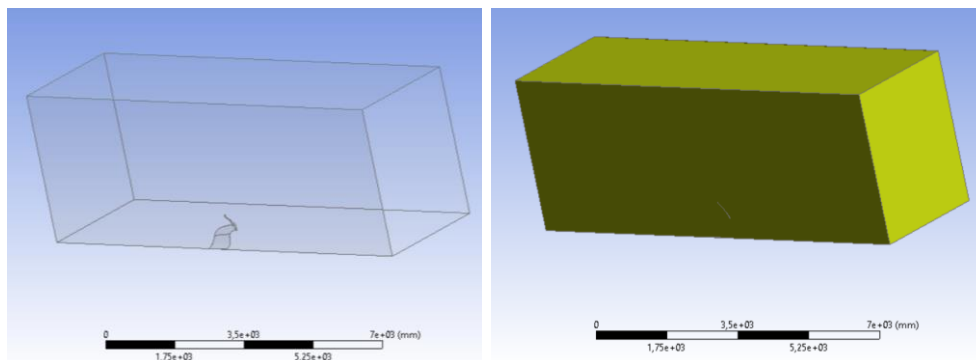
### **5.3.1 CREACIÓN DEL DOMINIO COMPUTACIONAL**

Como se ha mencionado anteriormente, la primera parte de la simulación consiste en la creación del volumen fluido en el cual se va a simular un flujo de aire para después analizar el comportamiento aerodinámico del carenado y buscar así su optimización. De esta forma es necesario tener en cuenta unas dimensiones que se tienen que cumplir en este dominio computacional. Se indica en el apartado 2.3 [8] la recomendación que la distancia entre el comienzo del vehículo y la entrada del flujo de aire al dominio computacional sea de al menos 3 veces la dimensión del vehículo, y que esta distancia aumente a al menos 5 veces la dimensión del vehículo detrás de este hasta la salida del dominio computacional. Esto se realiza para asegurarse una correcta homogeneidad del fluido antes del contacto con la pieza a simular y de igual manera una correcta distribución de este una vez el contacto se ha realizado. En este caso, al simularse únicamente el carenado, sin el vehículo, se va a coger la dimensión de este para dimensionar el dominio computacional. De igual manera hay que decidir la distancia lateral con la pared y con el techo de este ya que se busca que la perturbación del flujo del aire no llegue al nivel de la pared del dominio. Esta distancia podría ser infinita, pero se decide de hacerla de 3 metros con respecto al centro del carenado para simplificar la malla como se va a ver en el siguiente apartado de este documento.

De esta forma al tener el carenado, una longitud de alrededor de 1 metro, se toma una distancia de 5 metros tanto por delante como por detrás de este. De esta forma se asegura el cumplimiento de las recomendaciones anteriormente mencionadas y se tiene margen para reducir la longitud de la entrada frontal del dominio.

Este dominio computacional representa un volumen de aire al cual posteriormente se le van a aplicar unas condiciones que van a ser las que se quieran simular. De esta forma, resulta necesario restar a este volumen de aire, el volumen de la pieza a ensayar, quedando así la pieza como si fuese un vacío dentro del dominio.

Por último, para optimizar la potencia de cálculo del ordenador en la simulación y para reducir el tamaño del volumen fluido, se va a realizar la simulación de la mitad lateral del carenado, dada la simetría longitudinal del problema. Se crea una simetría en el plano longitudinal de la pieza, al ser esta simétrica por este plano y de esta forma el dominio computacional necesario para la simulación se reduce a la mitad y por tanto el volumen de aire se ve igualmente reducido. A continuación, se puede ver la forma del dominio computacional empleado. (figura 27)



*Figura 27 – Dominio computacional empleado*

Una vez creado este dominio computacional, el siguiente paso es mallar el volumen de aire que se va a estudiar. En la siguiente parte del capítulo se detalla en profundidad este proceso de la simulación.

### **5.3.2 MALLADO**

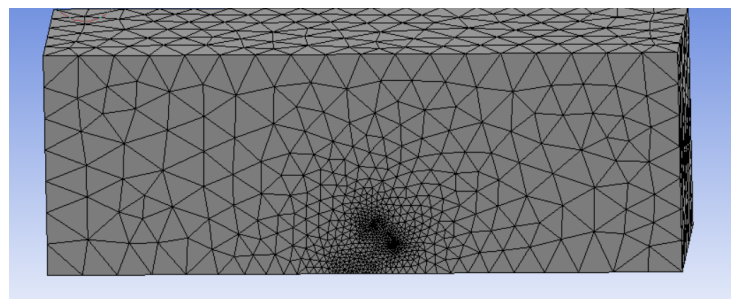
El segundo paso de la simulación es el mallado, un buen mallado es vital a la hora de conseguir unos resultados precisos, además de permitir que los cálculos converjan en una solución factible, y por tanto la simulación sea válida.

Mallar es dividir en celdas el volumen en el que se va a trabajar. La forma, el tamaño y la disposición de estas celdas afecta a la precisión de la simulación y a la convergencia matemática. Al dividirse el volumen de trabajo en elementos de diferentes o igual volumen se va a conseguir una serie de nodos, que son las intersecciones entre las celdas en los cuales se van a realizar la resolución de las diferentes ecuaciones que son necesarias para obtener una solución a la simulación. En el apartado 5.3.3 de este documento se va a detallar las ecuaciones que se van a resolver y la forma que el software va a efectuar los cálculos.

En la realización de este trabajo de fin de grado, se emplea la versión académica del programa ANSYS, de esta manera esta versión limita a 512 000 las celdas que se pueden simular. Por lo cual resulta importante simplificar la malla para no sobrepasar este límite y por tanto poder simular la pieza.

Para el mallado del carenado y sus diferentes versiones que se van a simular en este trabajo se va a emplear el módulo de mallado propio de Fluent para evitar problemas de compatibilidad con respecto a software de terceros.

La primera malla que propone ANSYS resulta trivial, ya que la realiza por defecto. Los elementos son muy grandes por lo cual se pierde información. Además, estos no quedan uniformes y la transición a la zona del carenado es brusca, lo cual empeora la calidad de la malla. A continuación, se puede observar el mallado por defecto que propone el programa. (figura 28)



*Figura 28– Mallado por defecto del volumen de aire*

Para obtener una malla de calidad, el parámetro fundamental es el *Skewness*, en concreto se va a controlar que el máximo quede por debajo de 0.97 o alrededor de este para garantizar que la calidad del mallado sirve para realizar una buena simulación. Este parámetro mide la calidad de las celdas, valiendo 1 en las celdas más deformadas y 0 en las más uniformes. De esta forma se busca la uniformidad de las celdas y una transición suave del mallado en función de la zona en la que se sitúe dentro del volumen de aire. Se busca entonces que las celdas triangulares tengan ángulos lo más cercano a 60°, para asegurar un triángulo equilátero y por tanto uniformidad. Las celdas hexaédricas o tetraédricas necesitan acercarse sus ángulos a 90° lo máximo posible para formar cuadrados y rectángulos y por tanto mantener esa uniformidad necesaria. Por lo que la geometría de la pieza a simular tiene que ser lo más uniforme posible, evitando tener picos o ángulos bruscos que pudiesen entorpecer el mallado.

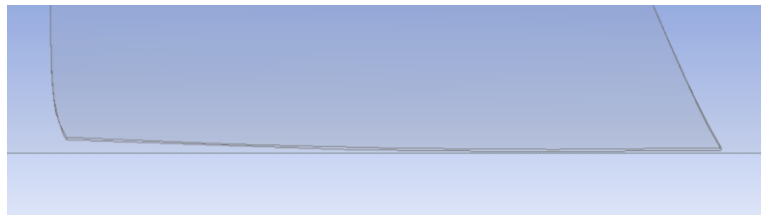
Para mejorar el mallado se cambia el tamaño de las celdas. El tamaño máximo se fija en 500 mm mientras que el estándar se fija en 250 mm. De igual manera se busca una transición suave en las zonas donde haya una variación del tamaño de las celdas, poniendo así el parámetro *smoothing* en calidad alta.

Además, se va a realizar un *face sizing*, es decir se va a modificar el tamaño de unas celdas que se sitúen en las caras de interés. En este caso, las caras que conforman el carenado son las de mayor interés. Se fija un tamaño de 8 mm y se mantiene el *growth rate* al que viene por defecto al igual que se mantiene el comportamiento en suave para que la transición sea uniforme.

Como se indica en el apartado 3.4 [8], para garantizar que los elementos tengan un *skewness* bajo donde los efectos viscosos son importantes se extruyen elementos prismáticos en estas zonas, el resto del volumen de trabajo se rellena con elementos hexaédricos o tetraédricos. Para la creación de esta zona con prismas, se va a emplear el menú de *inflation* dentro del mallado de Fluent. De esta forma se reduce la inflación numérica en la zona afectada mejorando así el parámetro de *skewness*. Los elementos que se van a modificar son los situados próximos al suelo dominio computacional y al carenado ya que estas son las paredes

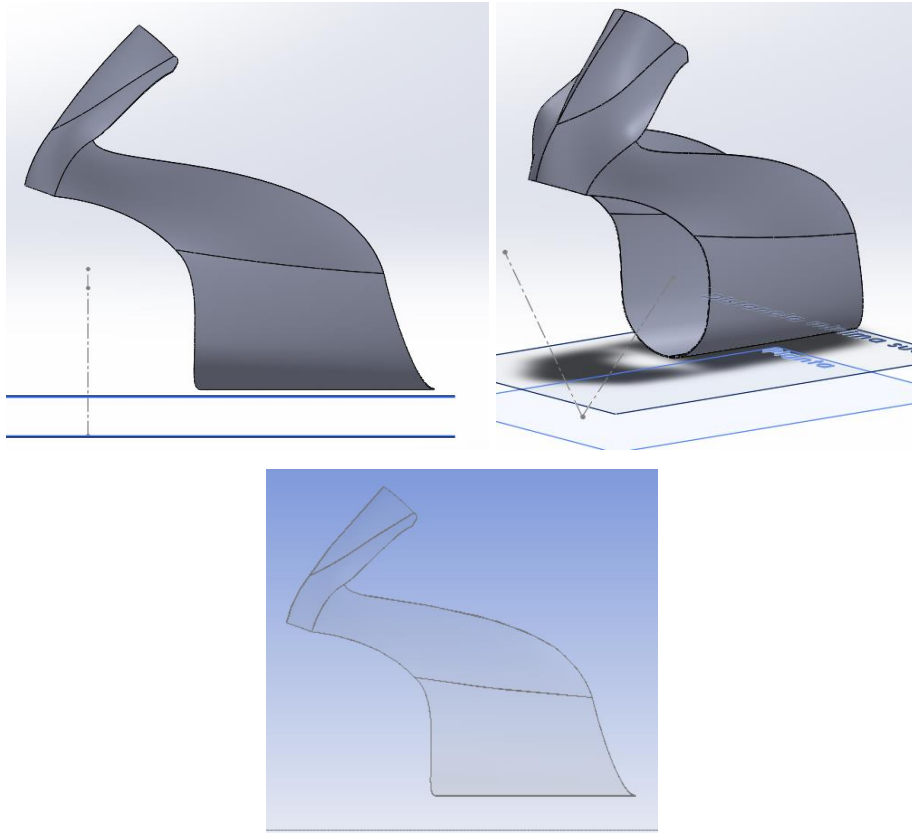
que se van a definir como estacionarias. Estos prismas van a permitir que los elementos triangulares de la malla varíen de forma mucho más suave de lo que lo hacían anteriormente. Se realiza una *inflation* de la zona según el método *program controled*. Además, se va a seleccionar según la opción *First Aspect Ratio*, un número de capas de elementos de 5 y un ratio de crecimiento geométrico de 1,2 según se recomienda en el documento anteriormente mencionado.

Existe un error en el mallado y resulta necesario realizar modificaciones en la geometría de la pieza. Esto se debe al espacio con geometría complicada que existe entre la zona más baja de la quilla y la zona del suelo del dominio computacional. A continuación, se puede observar esta zona en detalle. (figura 29)



*Figura 29– Detalle quilla en dominio computacional*

Se puede observar en la figura anterior que existe un punto de contacto entre la quilla y el suelo del dominio, pero al no ser la zona de la quilla una geometría horizontal, se ve una modificación de la separación entre quilla y suelo diferente a lo largo de la pieza. Además, la quilla es un elemento que se sitúa a 100 mm como poco del suelo por reglamento. Para poder proseguir con el mallado se opta por rediseñar esta parte de la quilla, haciéndola horizontal al suelo, además de modificar su altura en el dominio computacional para que la zona baja quede a 100 mm del suelo y así evitar el problema. Se puede ver el resultado de la modificación del diseño a continuación. (figura 30)

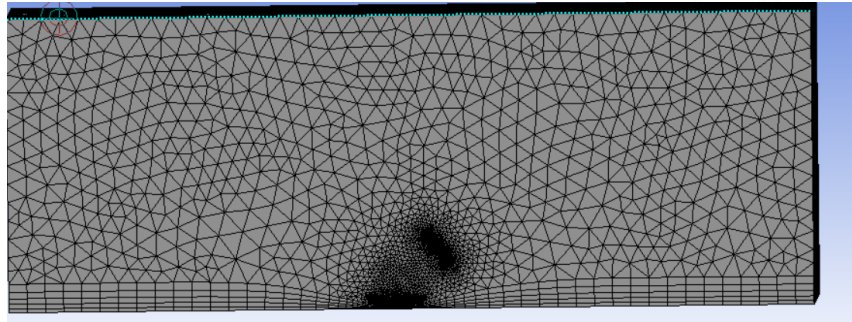


*Figura 30– Versión 1-B del carenado*

Se puede ver como la quilla ahora queda horizontal al suelo. Además, se ha decidido redondear la cúpula y la quilla haciendo tangentes las intersecciones con el plano de simetría, evitando así esquinas y picos innecesarios y mejorando el mallado de la pieza. Por último, se puede comprobar cómo se ha desplazado verticalmente el carenado en el dominio computacional para colocarlo en su posición límite estipulada por reglamento.

Se procede a repetir la modificación de los parámetros mencionados en este apartado del capítulo y finalmente se obtiene la siguiente malla. (figura 31)





*Figura 31– Mallado final de la versión 1-B del carenado*

Se observa cómo tras las modificaciones, la zona de la inflación queda muy marcada por la forma prismática de los elementos de las primeras 5 capas. Además, se observa que estos elementos se reducen de tamaño de forma suave a medida que se acercan a la zona de interés. Se ve que los elementos son más pequeños que en la figura 28. A continuación, se puede ver una tabla comparativa de los valores representativos entre la primera malla y la malla final. (tabla 1)

*Tabla 1– Valores parámetros de mallado inicial y mallado final*

Parámetro	Malla Inicial	Malla Final
Tamaño de los elementos	607,1 mm	250 mm
<i>Smoothing</i>	Medium	High
<i>Skewness</i> máximo	0,99864	0,97271
<i>Face sizing</i>	No	Si, tamaño de elementos 9 mm
<i>Inflation</i>	No	Si, 5 capas
Nº Elementos	51340	447298

Un estudio de sensibilidad de la malla no se puede realizar debido a la falta de potencia de cálculo disponible en la realización de este trabajo, quedando así la malla completamente definida.

Una vez obtenida una malla con una calidad correcta, se procede a lanzar el siguiente paso de la simulación que consiste en el solucionador de Fluent.

### **5.3.3 TEORÍA APLICADA EN FLUENT**

En este apartado del capítulo se va a explicar el funcionamiento de Fluent para calcular una solución válida de la simulación que se lance.

Como es sabido, las ecuaciones que se emplean en el estudio de la dinámica de fluidos computacionales (CFD) son las ecuaciones diferenciales de conservación de la masa, cantidad de movimiento (ecuaciones de Navier-Stokes) y energía, además del modelo de turbulencia que complementa esta última, cuando el fluido se comporta de forma turbulenta al tener un número de Reynolds elevado.

En el proceso de mallado explicado anteriormente, se ha dividido el volumen de aire en celdas de un tamaño definido. En total se tiene un número de elementos cercano al límite marcado por la versión académica. En cada celda se van a calcular los diferentes valores de presión, temperatura, velocidad y turbulencia. En primer lugar, hay que definir la conservación de la masa. (ecuación 1), la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento (ecuación 2), la ecuación de la energía (ecuación 3) y la ecuación de estado (ecuación 4).

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

*Ecuación 1– Ecuación de conservación de la masa*

$$\rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} = \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$$

*Ecuación 2– Ecuación de conservación de cantidad de movimiento*

$$\nabla \cdot (k\nabla T) + \nabla \cdot (\vec{v} \cdot \tau_{ij}) - \nabla \cdot (p\vec{v}) = \rho \frac{De}{Dt}$$

*Ecuación 3- Ecuación de la Energía*

$$pv = nRT$$

*Ecuación 4- Ecuación de Estado*

Para poder resolver estas ecuaciones, que a día de hoy la ecuación de conservación de cantidad no tiene solución en su forma completa, resulta necesario la simplificación de las ecuaciones.

En primer lugar, al ser la velocidad del sonido en el aire de 344 m/s a 20°C, el número adimensional de Mach para la máxima velocidad de la moto (170 km/h) vale: (ecuación 5)

$$M = \frac{v}{c} = \frac{47,2}{344} = 0,137$$

*Ecuación 5- Número de Mach*

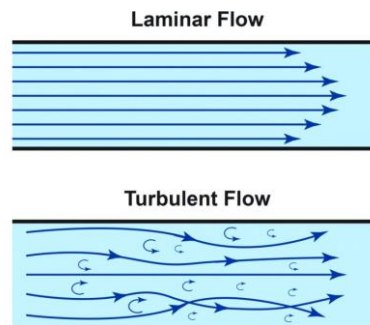
Al ser este número inferior a 0.3 se asume la incompresibilidad del flujo. De esta forma la ecuación de la conservación de la masa queda simplificada (ecuación 6)

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0$$

*Ecuación 6- Ecuación de conservación de la masa simplificada*

Al ser el fluido de trabajo incompresible, se puede despreciar el efecto de la ecuación de la energía mostrada anteriormente. De esta forma, se va a operar únicamente con velocidades y presiones, para así conocer el estado del fluido en toda zona del volumen fluido.

Finalmente se busca conocer el estado en el que se encuentra el fluido, si es este se encuentra en flujo laminar o turbulento. En el primero, las partículas de fluido van ordenadas, mientras que, en el turbulento a la velocidad media previsible, se le superpone un movimiento caótico. A continuación, se observa de forma esquemática la diferencia entre ambos flujos. (figura 32)



*Figura 32- Flujo Laminar y flujo turbulento [9]*

Para determinar el estado en el que se encuentra el fluido en el caso que atañe, es necesario el cálculo del número adimensional de Reynolds ( $Re$ ). Se va a aproximar el carenado a un cilindro para determinar su  $Re$  y por tanto el estado del flujo, ya que en caso turbulento se requieren de ecuaciones adicionales para poder resolver el sistema. (ecuación 7)

$$Re = v \frac{L_c}{\nu}$$

*Ecuación 7- Definición del número adimensional  $Re$*

El parámetro  $L_c$  es la longitud característica y se toma el ancho de la moto, para ello se tiene en cuenta el ancho del carenado, al ser esta pieza la más ancha de la moto. Su valor es de 403,97mm. El cálculo del Reynolds se da a velocidad máxima a 47,2 m/s. Por último, la viscosidad cinemática ( $\nu$ ) vale  $1,467 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . Quedando así el Reynolds siguiente. (ecuación 8)

$$Re = v \frac{L_c}{\nu} = 47,2 \frac{0,40397}{1,467 \cdot 10^{-5}} = 1299753,51 \approx 1,3 \cdot 10^6$$

*Ecuación 8- Cálculo del  $Re$*

Al ser el  $Re$  mayor de  $10^4$  se considera el flujo como turbulento, siendo necesario introducir un modelo turbulento en el sistema de ecuaciones. Al realizarse los cálculos de la dinámica de fluidos con Fluent, se escoge un modelo de viscosidad turbulento del programa. Se decide escoger un método k-epsilon tal que sea *realizable* y se escoge la opción de *Non-Equilibrium Wall Functions* dentro de la zona de tratamiento cerca de las paredes. Por defecto, Fluent

propone un modelo de viscosidad laminar, siendo este inválido al estar tratando con flujo turbulento. Como se explica en el punto 4.2 [8], Fluent recomienda el uso de dos tipos de modelos de turbulencia para el estudio de la aerodinámica externa de un cuerpo. Siendo estos, el método *Realizable k-epsilon* y el método *Reynolds Stress Model*. Entre estos dos se escoge el primero ya que es un método muy estable y cuya convergencia de resultados es muy rápida. Además, que se ha demostrado que para aplicaciones industriales el método entrega resultados correctos en valores como la fuerza de arrastre, objeto de interés de este trabajo de fin de grado.

Se rechaza entonces el uso del segundo método ya que en este existen 5 ecuaciones más con respecto al *k-epsilon*, de esta forma al ser un método con más ecuaciones que resolver, el tiempo de simulación se alarga. Se estima que el tiempo extra computacional aumenta en un 40% mientras que los recursos de RAM destinados a la simulación aumentan en un 20% según se indica el documento mencionado. De esta forma este método resulta inviable, ya que pese a otorgar resultados más precisos, el aumento de recursos empleados en la simulación lo convierte en un descarte.

El método escogido emplea dos ecuaciones para la turbulencia, la de la energía cinética turbulenta (K) y la de la disipación turbulenta (Epsilon). Se definen de la siguiente manera. [10]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

*Ecuación 9- Energía cinética turbulenta*

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon} \epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon$$

*Ecuación 10- Disipación turbulenta*

Se puede definir los parámetros de las ecuaciones empleadas por el modelo:

- $G_k$ : Generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad medios.

- Gb: Generación de energía cinética debido a la flotabilidad.
- $Y_M$ : Contribución de la dilatación fluctuante en turbulencia compresible.
- $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$ ,  $C_{3\epsilon}$ ,  $\sigma_t$ : Constantes determinadas experimentalmente.
- $\mu_t$ : Viscosidad turbulenta.
- $\sigma_k$ : Número de Prandtl en función de k.
- $\sigma_\epsilon$ : Número de Prandtl en función de  $\epsilon$ .

De esta forma el modelo consta de dos ecuaciones y dos incógnitas, siendo estas K y  $\epsilon$  (Epsilon). Estas ecuaciones se van a resolver en cada iteración, permitiendo calcular el campo de velocidades y de presión de forma precisa en cada zona del volumen fluido.

Además, para entender el correcto desarrollo de las simulaciones es necesario entender los principios aerodinámicos del comportamiento del flujo alrededor de cuerpos. De esta forma se va a estudiar la resistencia aerodinámica, fuerza que se busca minimizar en este trabajo. A continuación, se puede ver la fórmula de esta fuerza. (ecuación 11). La fuerza de sustentación va igualmente ligada a los estudios aerodinámicos del flujo alrededor de un cuerpo, en este caso se desprecia la acción de esta fuerza en el problema dado ya que se busca únicamente reducir la fuerza de arrastre, simplificando así el problema dado. (ecuación 12)

$$F_D = C_D A \frac{\rho V^2}{2}$$

*Ecuación 11– Definición fuerza de arrastre*

$$F_L = C_L A \frac{\rho V^2}{2}$$

*Ecuación 12– Definición fuerza de sustentación*

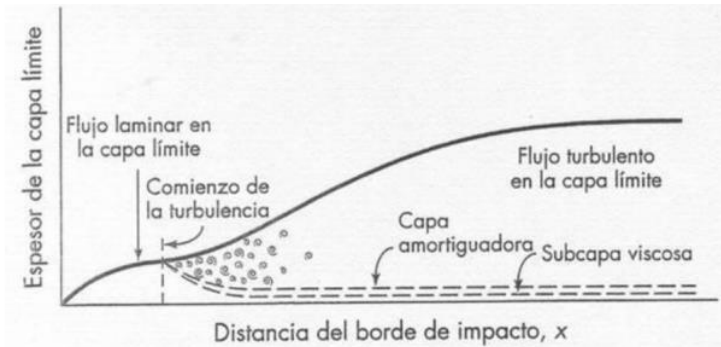
$F_D$  depende del coeficiente de arrastre  $C_D$ , directamente ligado con la forma del carenado.  $C_D$  es adimensional y comprende las contribuciones de los siguientes dos efectos, la resistencia de forma y de superficie. Siendo la segunda el desprendimiento de la capa límite que se detalla más adelante en el capítulo y la primera la resistencia debido al esfuerzo

cortante del contacto de la pieza y el fluido. Más adelante se va a comparar el  $C_D$  obtenido en comparación con los valores típicos en el sector del motociclismo.

De igual manera  $F_D$  depende del valor del área frontal  $A$  proyectada en la dirección de movimiento del fluido. La densidad  $\rho$  del fluido de estudio afecta proporcionalmente a esta fuerza y por último se ve que la velocidad relativa  $v$  entre objeto y fluido afecta de forma cuadrática.

De aquí se concluye que, si el área frontal se duplica, manteniendo el resto de los elementos constantes, el arrastre se duplica. En cambio, si es la velocidad la que se duplica, el arrastre se ve multiplicado por cuatro, cuando se ha alcanzado el flujo totalmente turbulento. De esta forma, a medida que se aumenta esta velocidad, resulta cada vez más interesante reducir esta fuerza de resistencia al avance para poderse obtener resultados más eficientes.

De esta forma se puede entender el fenómeno de la capa límite y como se va a analizar y posteriormente calcular utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes, previamente simplificadas. En la superficie de contacto del fluido y objeto es donde se da este fenómeno. La zona de fricción es esta superficie de contacto por lo cual el carenado va a tender a arrastrar consigo las partículas de aire con las que está en contacto. Estas van a desplazar las que están en contacto con ellas y así sucesivamente hasta llegar a una zona en la que ya no exista desplazamiento relativo entre las partículas. Visto de otra forma se puede decir que a medida que el fluido se aleja del carenado, la velocidad del aire pasa de la velocidad de este, a la velocidad que tiene el aire sin ser perturbado. Esto es lo que se conoce como capa límite y su estudio y comportamiento resultan claves para entender la aerodinámica de los objetos. A continuación, se puede ver un esquema explicando este fenómeno. (figura 33)

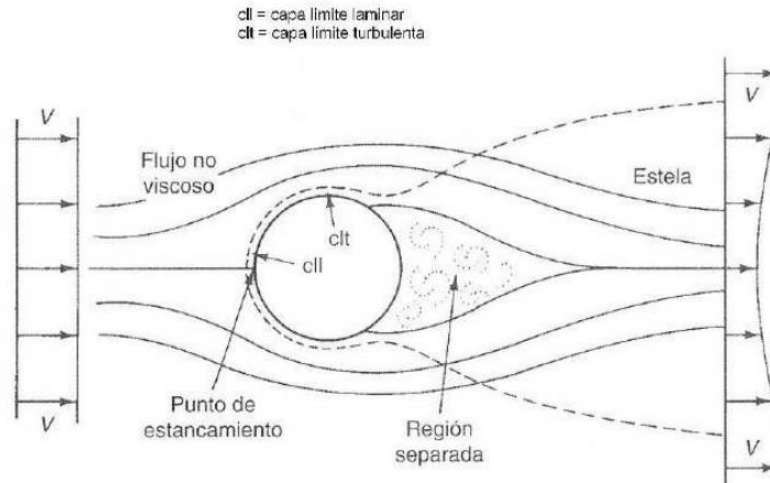


*Figura 33 –Capa límite en placa plana [11]*

Se puede ver como existen dos zonas en la capa límite, la primera en donde la totalidad del fluido se encuentra en un estado laminar, siendo laminar el estado en el que las partículas van ordenadas. En la segunda parte, esta capa límite crece hasta llegar a turbulencia. De esta forma en esta parte de la capa límite el flujo no es ordenado, los esfuerzos tangenciales frenan al fluido pegado a la pared y si además hay gradientes adversos de presiones el espesor de la estela aumenta, aumentando la zona turbulenta. Al ser el carenado de la moto un cuerpo fuselado, interesa que la capa límite sea lo más laminar posible y que el desprendimiento de esta, si tiene lugar, se retrase lo máximo posible para conseguir una menor fuerza de arrastre.

Interesa que el desprendimiento de la capa límite quede posterior a la pieza, teniendo así la componente de forma del  $C_D$  menor valor y reduciendo este parámetro. Se puede observar el desprendimiento de la capa límite. (figura 34)





*Figura 34- Desprendimiento capa límite en una esfera [12]*

Se observa como la capa límite se desprende, creando así una región separada en la cual el gradiente de presiones es muy elevado, contribuyendo así a aumentar la resistencia de forma del coeficiente de arrastre. Se busca que esta zona sea lo más pequeña posible, reduciendo así la fuerza de arrastre.

Fluent calcula el campo de presiones, para poder determinar de esta manera la fuerza de arrastre, variable de estudio en este trabajo.

Una vez entendido el funcionamiento de Fluent, resulta de vital importancia realizar una correcta configuración de la simulación para alcanzar unos resultados con éxito buscando el menor tiempo de simulación posible. De esta forma al inicializar el set-up, se elige la opción de precisión simple ya que esta calcula valores de 8 decimales mientras el de precisión doble lo hace de 16 decimales, casi duplicando el tiempo de la simulación.

De igual manera se escoge una formulación de la velocidad absoluta ya que no hay un movimiento relativo de algún elemento en el carenado diseñado. Quedando así fijadas las velocidades de fuera del sistema y usando esas como datos para proseguir en los cálculos. Las simulaciones se van a realizar en un instante dado y no en un intervalo de tiempo, eligiendo así la opción de *steady* (estacionario) para la opción del tiempo. De esta forma la simulación será mucho más rápida que calculando un transitorio.

### 5.3.4 CONDICIONES DE CONTORNO Y PARAMETROS

A continuación, es necesario modificar los parámetros de los modelos con los que Fluent va a resolver las diferentes ecuaciones. Se inhabilitan por defecto todas las ecuaciones adicionales que se propone. Por ejemplo, en este caso se trata de la simulación aerodinámica en un dominio computacional de un carenado de una moto. De esta forma no existe la presencia de ningún tipo de aire especialmente caliente por lo cual se desactiva la ecuación de la energía, simplificando así la simulación y permitiendo que se obtengan resultados de forma más rápida. Por lo cual lo único que hay que variar es la parte referida a la viscosidad del sistema.

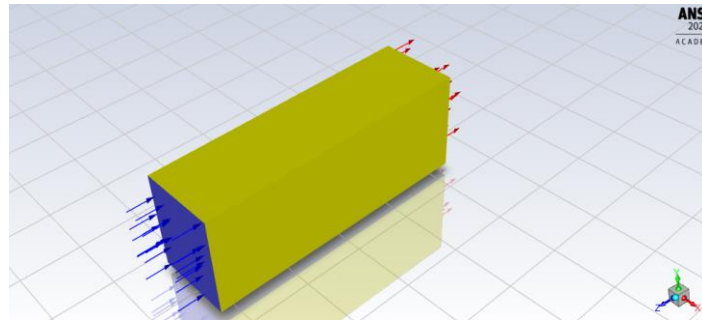
Además, al tratarse de un caso con un flujo de un número de Reynolds alto, al ser una pieza aerodinámica de una moto, resulta poco práctico resolver la región cercana a las paredes. De esta forma se escoge la opción *Non-Equilibrium Wall Functions*, para así hacer que los muros sean sensitivos a los efectos del gradiente de presiones dado, como se indica en el documento. Así esta opción devuelve valores más realistas del comportamiento turbulento de las zonas de contorno sin un significativo aumento del tiempo de simulación.

En este primer caso, se va a simular la versión 1-B del carenado. Las velocidades de simulación van a ser 100 km/h, 135 km/h y 170 km/h siendo esta última la velocidad máxima que los departamentos eléctricos y de *powertrain* del ISC esperan obtener de este prototipo.

La siguiente modificación de la configuración es el material. En el mallado y en el dominio computacional anteriormente mencionado, se define el volumen de fluido como aire. De esta forma, Fluent propone por defecto las propiedades del aire, siendo la densidad de 1.225 kg/m<sup>3</sup> y la viscosidad de 1.7894 10<sup>-5</sup> kg/ms. Estos parámetros se mantienen por defecto al no considerarse que la variación de estos datos por los del aire de la localidad de Alcañiz afecten en la simulación, además se desconoce la temperatura exacta del día de la competición, viéndose así las propiedades de dicho aire marcado por la temperatura local.

Además, se pueden modificar las *operating conditions*, es decir la presión atmosférica ya que el programa va a trabajar en presiones relativas, indicando presiones negativas si son menores que la atmosférica y positivas si son superiores.

Luego se parametrizan las condiciones de contorno. En este momento es cuando se entiende el haber llamado a las diferentes paredes como se ha hecho en la etapa de mallado. Como se va a ver a continuación, el programa reconoce la entrada de aire y salidas, al igual que la pieza a simular y da unos valores por defecto que van a ser válidos para la simulación, ahorrando así tiempo en la configuración de esta etapa de simulación. (figura 35)



*Figura 35– Visualización de entrada y salida del flujo de aire en el dominio computacional.*

Como se puede ver en la figura, el software indica mediante flechas de colores, la zona de entrada del aire, así como la de salida. Siendo el color amarillo el otorgado al volumen de aire, que va a estar condicionado por la velocidad de entrada y la de salida del volumen fluido. El azul muestra la entrada y el rojo la salida del mismo.

En primer lugar, el carenado se define como una pared estacionaria ya que en el dominio computacional se ha recortado el carenado de este como se indica en el punto 5.3.1 de este documento. De esta forma en la simulación se va a dotar de una velocidad al aire, quedando el carenado fijo. En la realidad se daría el caso contrario ya que la moto se mueve junto con el carenado a una velocidad dada, mientras que se supone un aire sin viento quedando este estacionario en el circuito y viéndose perturbado por el avance de la moto. De igual manera, el suelo del volumen fluido se considera estacionario, actuando como una zona de velocidad nula en la simulación.

Luego se tiene la presión de salida, que en este caso va a ser a presión ambiente por lo cual como se trabaja en presiones relativas, la presión resultante queda 0. Además, el propio software entiende que va a ser una simulación aerodinámica por el modelo que se ha escogido anteriormente y elige como método de especificación el de *Intensity and Viscosity Ratio* y marca por defecto 5% de turbulencia a la salida y un ratio de viscosidad turbulenta en la salida de 10. Estos valores de los parámetros vienen recomendados por el documento presentado por ANSYS junto con la salida de software [13]. Se recomienda un rango entre 1% y 5% para la intensidad de la turbulencia. Al ser esta la zona de salida del dominio, el flujo de aire ha sido perturbado por el carenado, resultando ser más turbulento que en la entrada donde se supone laminar y sin turbulencias. De esta forma se escoge en la salida el valor recomendado de 5%. En la entrada del dominio computacional se va a escoger este factor de 1% debido a que se supone fluido no perturbado en la entrada ya que se va a simular en condiciones de vuelta rápida en la que se supone que el tiempo entre el piloto anterior en pasar por ese punto de la recta y el piloto del ISC, es suficientemente largo para que el flujo de aire no siga perturbado. Además, para el ratio de viscosidad turbulenta se recomienda un valor de entre 1 y 10, dejando entonces el 10 marcado por defecto.

A continuación, se va a estudiar la entrada de aire al dominio computacional es decir la *velocity-inlet*. En este caso hay que determinar la velocidad, se puede observar que la entrada es en el eje z y por tanto la dirección del fluido es en esta dirección siendo su sentido decreciente en este eje como se ve en la figura 35. Por lo cual se otorga únicamente un valor de velocidad a la componente z.

Lo siguiente que se puede modificar son los valores de referencia. En este caso es importante destacar que, para simplificar el modelo, se ha aplicado un plano de simetría de la pieza a lo largo del eje YZ como se ha visto en la creación del dominio computacional. Esto significa que el área frontal del carenado es la mitad del área real, por tanto, la fuerza de resistencia aerodinámica que va a calcular el software va a estar referida a esta mitad de área por lo cual va a ser la mitad de la fuerza real de arrastre.

Para permitir el cálculo del arrastre por parte de Fluent, lo primero que hay que hacer es calcular el área frontal. Al ser una geometría compleja, el modelo matemático resulta muy difícil de calcular por lo cual la forma de obtener esta área frontal es la de proyectar la pieza en el eje de dirección del fluido. En este caso se obtiene un área de  $0.07846 \text{ m}^2$ , al redondear al quinto decimal.

Una vez calculada el área frontal, se puede proseguir con el módulo de valores de referencia. En este caso se va a indicar a Fluent, que haga los cálculos desde la cara por la cual va a entrar el aire. Además, se escoge el aire como zona de referencia. La longitud de la pieza se deja en 1 m ya que, aunque no sea esta su medida real, se acerca bastante y los resultados no se van a ver influenciados. El resto de los elementos se dejan por defecto ya que están relacionados con los valores del aire que previamente se han decidido en el módulo de materiales y en las condiciones de contorno.

A continuación, se empiezan a modificar parámetros dentro del módulo de *Solution*. Lo primero que se puede modificar son los métodos de solución que va a seguir el software. De forma automática, aplica un esquema *Coupled* para el acoplamiento de presión y velocidad. Se puede elegir entre varias opciones, pero esta resulta la mejor para este proyecto, ya que es la que más recursos del ordenador consume, pero la que va a llegar a converger antes, disminuyendo así el tiempo de la simulación. La otra opción viable sería emplear el esquema *Simple* pero este tarda más en obtener soluciones por lo cual resulta menos interesante aunque consuma menos recursos del ordenador. Los resultados finales de la simulación serían los mismos para ambos esquemas. En el esquema *Coupled* se pueden hacer varias modificaciones en la forma en la que llega a la solución. Para facilitar la convergencia de la simulación, durante las primeras 100 iteraciones se va a escoger para el momento, la energía cinética turbulenta y el ratio de disipación turbulenta la opción *First Order Upwind*. De esta forma el resultado que se va a obtener va a ser poco preciso pero la solución va a converger de forma rápida. Así, estas primeras iteraciones sirven para guiar la solución ya que, para las siguientes iteraciones, hasta convergencia se utiliza la opción *Second Order Upwind* para los mismos parámetros de discretización. De esta forma, este esquema de solución va a ser mucho más preciso, pero a cambio cuesta más su convergencia, pero al haber iterado 100

veces anteriormente, la solución queda guiada y la convergencia es rápida. Durante ambos procesos de cálculo se escoge la opción *Least Squares Cell Based* para el gradiente y para la presión se escoge la estándar además de dejar el flujo de aire como pseudo-transitorio.

El siguiente se modifica los controles dentro del módulo de *Solution* es el de los controles en el que se modifican los valores de los factores de relajación explícita pseudo transitoria. Se fijan los valores de momento y presión en 0.25 mientras que el de densidad y fuerzas en los cuerpos se deja en 1. Para las primeras 100 iteraciones, las que sirven para guiar solución, el parámetro de la viscosidad turbulenta se fija en 0.8 mientras que en el resto se fija en 0.98. El factor para energía turbulenta cinética y el ratio de disipación viscosa se fija en 0.8 para ambos procesos iterativos. Estos factores influyen en la convergencia de la solución. Se escogen estos valores debido a lo mencionado en la revista explicativa de ANSYS [14]. En esta se indica que para una malla *skewed*, es decir uniforme, como es el caso en la malla empleada en este trabajo, se recomienda bajar el valor del parámetro relacionado con la presión y el momento por debajo de 0.5 cuando la convergencia se vuelve oscilatoria. En este caso para evitar estas oscilaciones, se escoge un valor de 0.25 en ambos. De igual manera se indica en ese documento que para acelerar la convergencia en los casos viscosos se recomienda un parámetro de viscosidad turbulenta de entre 0.95 y 0.99. Se escoge 0.98 para acelerar la convergencia en la segunda etapa de las iteraciones de la solución, cuando se busca una solución precisa pero que la simulación converja rápidamente.

Lo siguiente que se escoge es el *report* que se quiere que Fluent muestre. De esta forma se escoge la fuerza de arrastre como una condición a estudiar. Se decide que mientras se simula, Fluent muestre la gráfica de la variación de la fuerza de arrastre en función de la iteración para así comprobar la convergencia de este en el momento en el que el valor se estabiliza. De igual manera se comprueba el correcto desarrollo de la simulación mediante el análisis de los *residuals* de la ecuación de continuidad, de las velocidades en todos los ejes y los dos parámetros del modelo escogido es decir los parámetros  $k$  y  $\epsilon$ . Esto se desarrollará en detalle en el siguiente punto del capítulo.

Por último, antes de inicializar el cálculo de la simulación, resulta necesario aplicar unos criterios de convergencia para que la simulación termine en el caso de que estas condiciones se cumplan. Al tener únicamente un parámetro de estudio, siendo este la fuerza de arrastre, se va a implementar únicamente un criterio de convergencia. Este va a ser que la variación de la fuerza de arrastre con respecto a la iteración anterior sea del 0.5 % o menor durante al menos 15 iteraciones. Para evitar posibles errores en la simulación, las primeras 10 iteraciones se van a ignorar ya que Fluent va a ir probando diferentes opciones y es posible que se obtenga una repetición de la fuerza de arrastre obtenida por la forma que tiene el software de trabajar.

La inicialización de la simulación que se emplea va a ser la híbrida, que consiste en la resolución del modelo laminar de una única ecuación de Fluent. Esto se configura para que el número de iteraciones sea 10. De esta forma, la solución empieza a guiarse desde el inicio de la simulación ya que este método de inicializar otorga valores de velocidad y presión mucho más cercanos a la realidad de lo que lo haría el de la inicialización estándar. Está última únicamente va a llenar el volumen de aire con los datos de velocidad, presión y ratio de disipación viscosa y energía turbulenta cinética planteados por el usuario, creando un volumen de aire muy diferente al de la realidad. De esta forma, al utilizar la inicialización híbrida se va a ahorrar tiempo de simulación ya que la convergencia del caso se va a dar antes que en la inicialización estándar.

### **5.3.5 RESULTADO Y ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN**

En este apartado del capítulo se va a realizar el análisis de los resultados de las simulaciones. En un primer lugar se va a comprobar el correcto desarrollo de la simulación. Se va a estudiar la convergencia o no de esta, para después analizar la representación gráfica de diferentes parámetros y datos para entender las zonas más turbulentas que van a modificarse en siguientes versiones.

La primera simulación es a la velocidad máxima esperada. Esta velocidad es de 170 km/h. A continuación, se puede ver el gráfico de los residuos y del valor de la fuerza de arrastre resultantes de esta primera simulación. (figura 36)

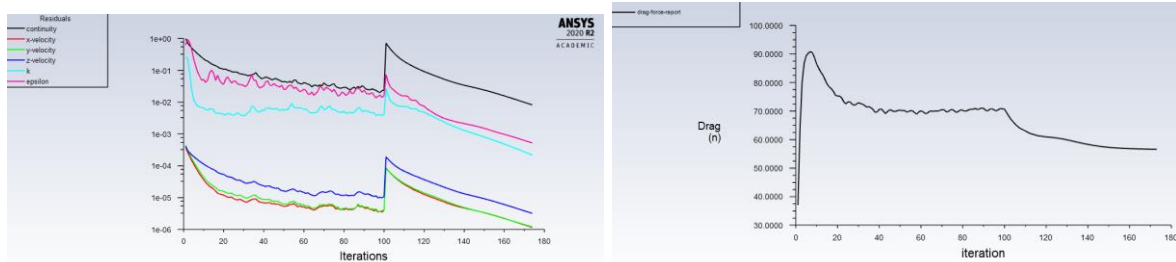
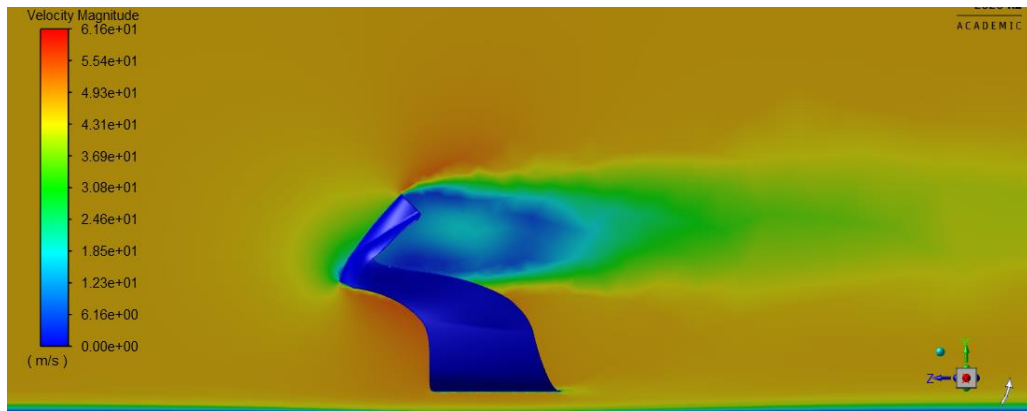


Figura 36– Gráfica de residuos y fuerza de arrastre de simulación de versión 1.B a 170 km/h

Se puede observar como en la gráfica de los residuos hay un pico de todos los valores en la iteración número 100. Esto se debe al cambio de parámetros realizados en la simulación mencionados anteriormente. De igual manera se ve como en la iteración 100 hay una bajada pronunciada del valor de la fuerza de arrastre, debido a lo mismo. De igual manera se puede comprobar que durante estas primeras 100 iteraciones todos los parámetros de los residuos se reducen, siendo esto un indicativo del correcto desarrollo de la simulación. En la gráfica de la derecha se observa como al final de las 100 primeras iteraciones, desde aproximadamente la iteración 40 se comprueba una estabilización de esta fuerza, aunque se comprueba una oscilación más o menos constante de esta fuerza, indicando que el valor no es suficientemente preciso e indicando la necesidad de pasar al esquema *Second Order Upwind* siendo este más preciso. De esta forma al estar la solución ya guiada, alcanza convergencia en menos de 80 iteraciones en la segunda etapa del proceso iterativo. Se puede comprobar la pendiente mucho más pronunciada en esta segunda etapa, indicando así la celeridad en llegar a convergencia de la simulación. Finalmente, el resultado de fuerza de arrastre obtenido es de 56,596 N. Es necesario recordar que este resultado es para la mitad del carenado quedando así la fuerza de arrastre total de 113,192 N.

Además, Fluent permite realizar diferentes gráficas que van a ser significativas para ver las propiedades del flujo de aire en todo el volumen de aire. Primeramente, resulta interesante estudiar el campo de velocidades para comprobar que el carenado y el suelo tienen velocidad cero a tratarse de paredes estacionarias. (figura 37)

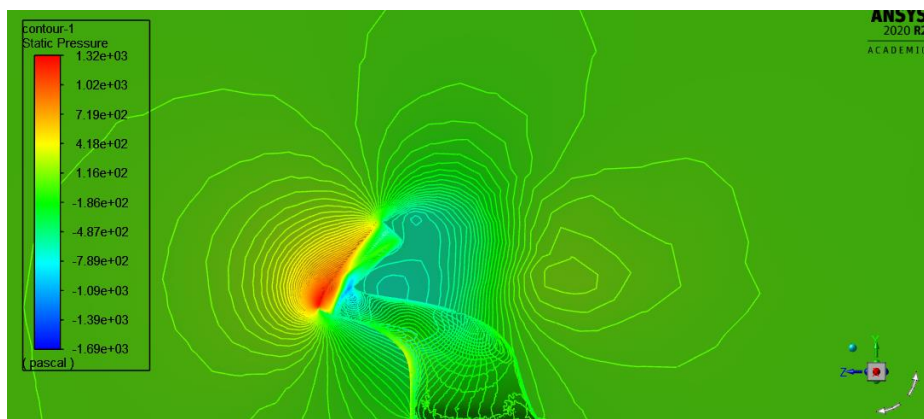


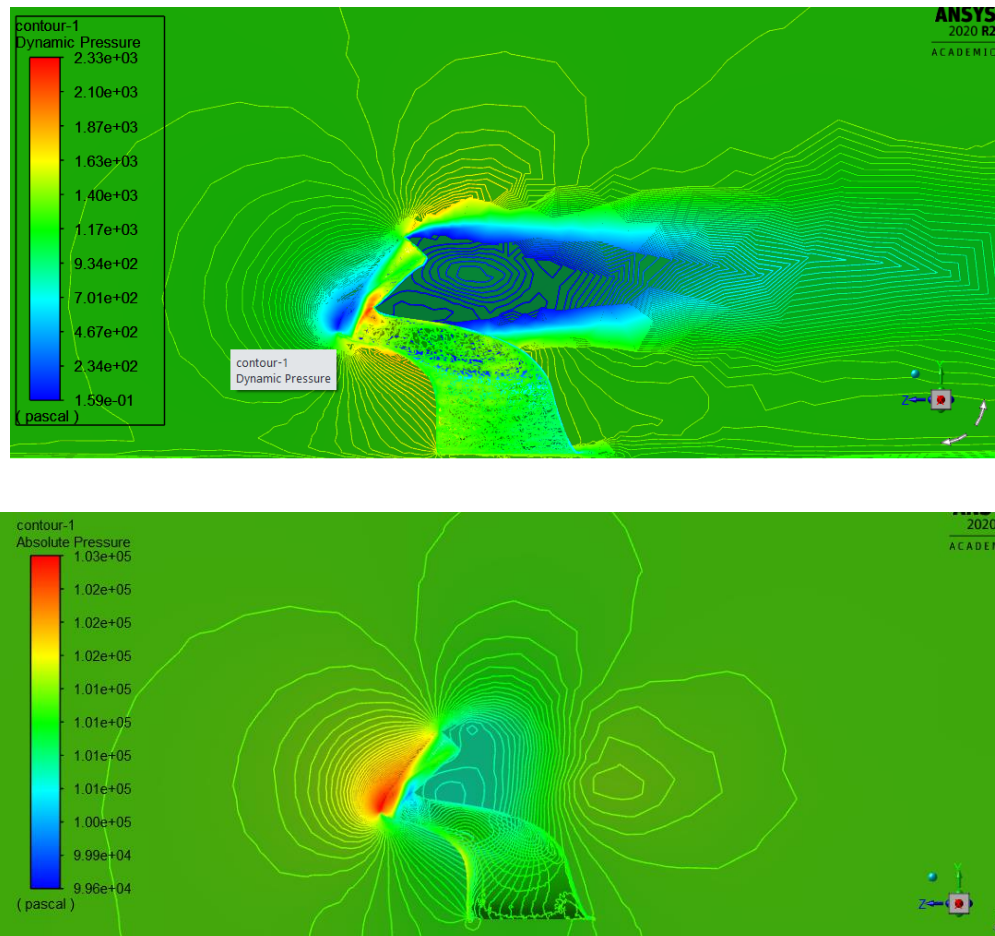


*Figura 37– Gráfica de velocidades de la simulación de versión 1.B a 170 km/h*

En la entrada del volumen fluido y en las zonas alejadas de la pieza se puede ver como el color es marrón anaranjado, siendo este el color de la velocidad de 47,22 m/s es decir 170 km/h. De igual manera se ve la variación de velocidad justo detrás de la zona frontal, zona de mayor área y por tanto de máxima zona de arrastre del carenado. Poco a poco el flujo va recuperando su velocidad establecida tras ser perturbado por el carenado. De esta primera gráfica se puede seguir comprobando la correcta resolución de la simulación además de intuir la zona más afectada aerodinámicamente y por tanto la zona sensible a ser modificada en la siguiente iteración.

La siguiente gráfica interesante de ver es la variación de presión en el volumen de aire. Se va a ver de forma separada la variación de la presión dinámica, estática y luego el conjunto de ambas. (figura 38)

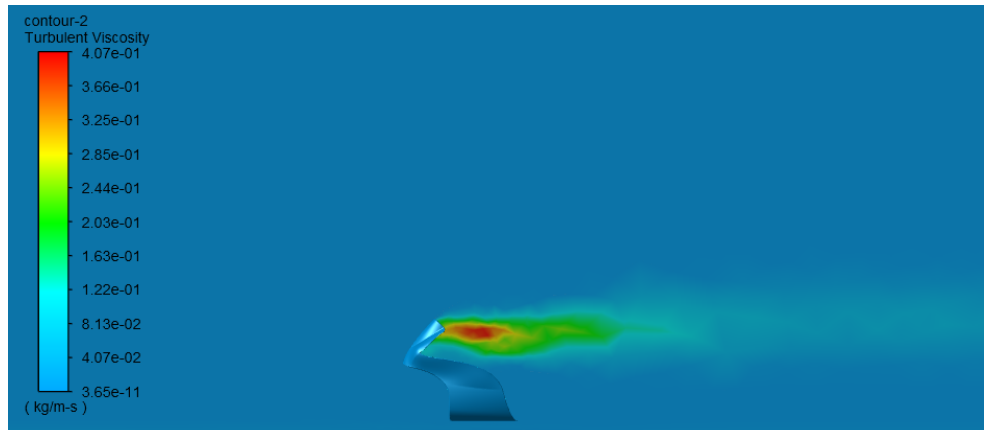




*Figura 38– Gráfica de presiones de la simulación de versión 1.B a 170 km/h*

Se puede comprobar como en el frontal del carenado, en la zona que entra en contacto con el aire la presión es máxima, siendo este el punto de remanso. La zona de menor presión resulta la zona posterior a la cúpula y frontal y del carenado, ocasionando así un gradiente de presiones de tal forma que incrementan el valor de la fuerza de arrastre. Esta baja presión es especialmente dada por la componente dinámica de la presión como se ve en las gráficas. De esta forma se complementa lo comprobado en la figura 38, la necesidad de perfeccionar la zona frontal y la cúpula del carenado. Por último, se puede constatar que la presión estática aumenta de forma inesperada hacia la zona baja del frontal desde el punto de remanso. Una modificación en esta zona se prevé interesante para disminuir esta variación de presión estática.

Por último, se decide analizar la gráfica de la viscosidad dinámica turbulenta. (figura 39)



*Figura 39– Gráfica de viscosidad turbulenta de la simulación de versión 1.B a 170 km/h*

Como se podía intuir a la vista de las gráficas de las figuras 37 y 38, la zona más turbulenta es la zona situada en donde iría la cabeza del piloto. De esta forma para disminuir la turbulencia en esa zona, además de para mejorar la eficiencia aerodinámica general del prototipo, resulta necesario modificar esa parte de la geometría.

A continuación, se van a ver los resultados de las simulaciones a velocidades de 100 km/h y 135 km/h.

En primer lugar, se va a estudiar el caso a 135 km/h, es decir 37,5 m/s. De esta forma es preciso analizar si a esta velocidad la simulación ha sido válida y ha convergido de forma correcta. Los criterios a emplear durante el resto del trabajo son los mismos que los comentados en el análisis de la fuerza de arrastre en función de las iteraciones y del valor de los residuos en función de estos mismos valores de la simulación anterior. (figura 40)

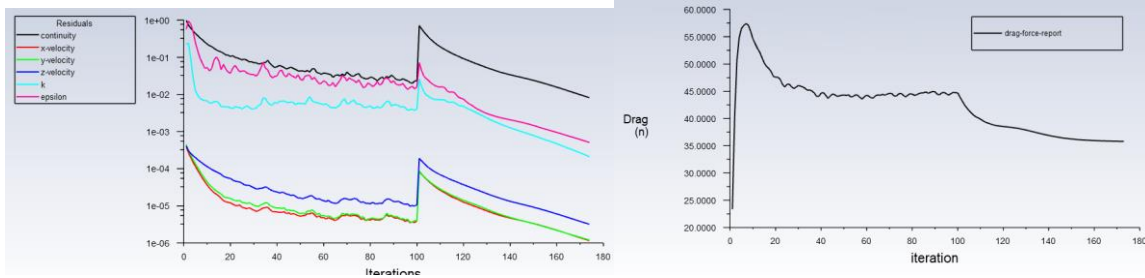


Figura 40– Gráfica de residuos y fuerza de arrastre de simulación de versión 1.B a 135 km/h

Se puede comprobar, como en el caso anterior, que el análisis de los residuos y la estabilidad final de la fuerza de arrastre son sinónimos de una buena convergencia en la simulación. De esta forma se obtiene una fuerza d arrastre de 35,797 N en la mitad del carenado, resultando de una fuerza de 71,59 N en la totalidad de este. Como se ha mencionado anteriormente, este resultado cobra sentido ya que la fuerza de arrastre disminuye de forma cuadrática al disminuir velocidad.

A continuación, se van a analizar los diferentes gráficos de los parámetros de interés. Se comienza por la de la velocidad en cada lugar del volumen fluido, (figura 41)

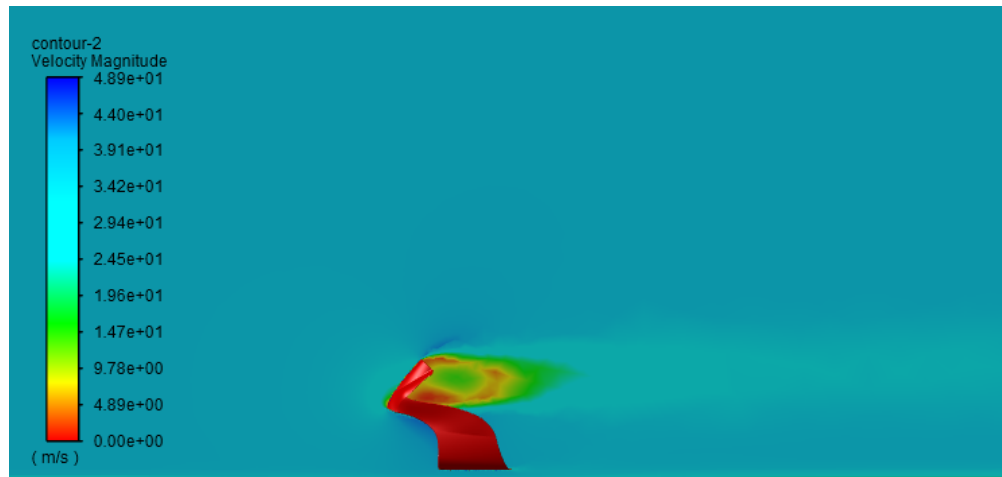
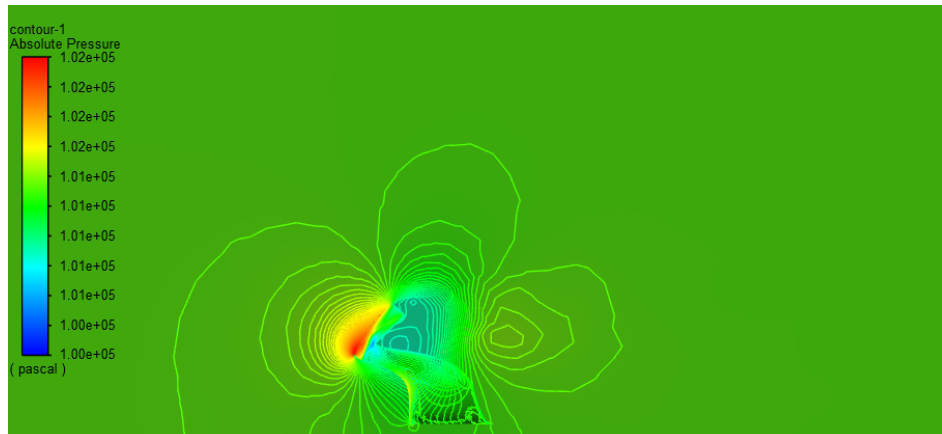


Figura 41– Gráfica de velocidades de la simulación de versión 1.B a 135 km/h

Se constata una distribución uniforme de velocidad lejos de las paredes estacionarios a un valor de 37,5 m/s, es decir la velocidad de simulación. De igual manera como se ha visto en la figura 37, la velocidad es cero en las paredes, demostrando una correcta aplicación de las

condiciones de contorno. El cambio de velocidades más notorio viene dado por la zona posterior al frontal del carenado, confirmando así lo visto en la simulación a 170 km/h.

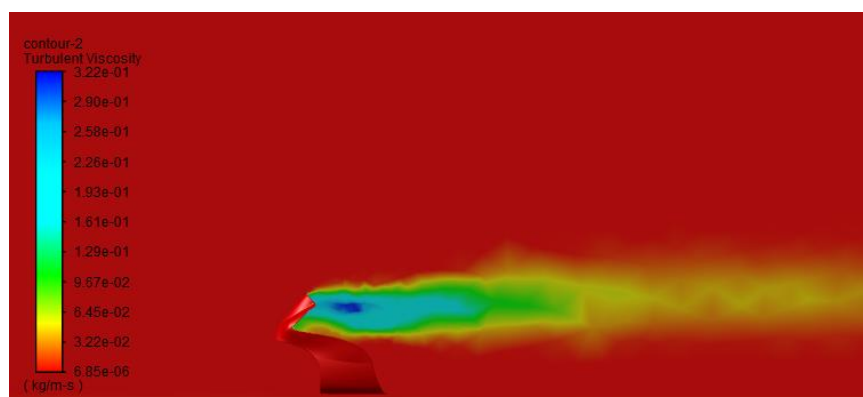
A continuación, se procede a analizar la presión absoluta (figura 42).



*Figura 42– Gráfica de presión absoluta de la simulación de versión 1.B a 135 km/h*

Se observa una presión muy alta en el frontal, siendo la zona de más alta presión el punto de remanso del carenado. Como se ha visto con anterioridad a 170 km/h, el gradiente de presiones absoluto se asemeja a este, reflejando una buena correlación entre ambas simulaciones.

Por último, se analiza la viscosidad turbulenta a esta velocidad de simulación. (figura 43)



*Figura 43– Gráfica de viscosidad turbulenta de la simulación de versión 1.B a 135 km/h*

La zona más turbulenta, como se ha visto en la figura 41, es la zona posterior del carenado ya que es la de mayor sección. Se observa como en la simulación anterior una zona turbulenta uniforme, siendo esto signo de un buen trabajo aerodinámico.

Como última simulación de esta primera versión, se analizan los resultados a 100 km/h, es decir 27,77 m/s. Esta velocidad se supone la de entrada a recta y salida de la misma del circuito de Motorland. De esta forma, se busca tener una correlación entre los resultados obtenidos a tres velocidades de simulación diferentes para esta primera versión de la pieza.

En primer lugar, es necesario el análisis de las gráficas de los residuos y de la fuerza de arrastre a lo largo de las iteraciones para así comprobar una correcta convergencia. (figura 44)

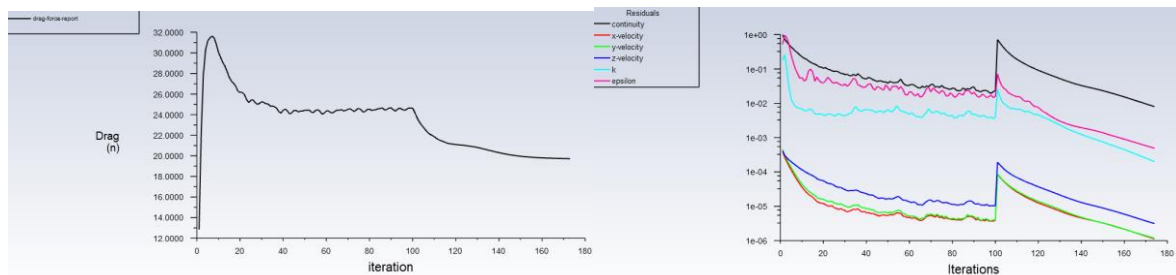
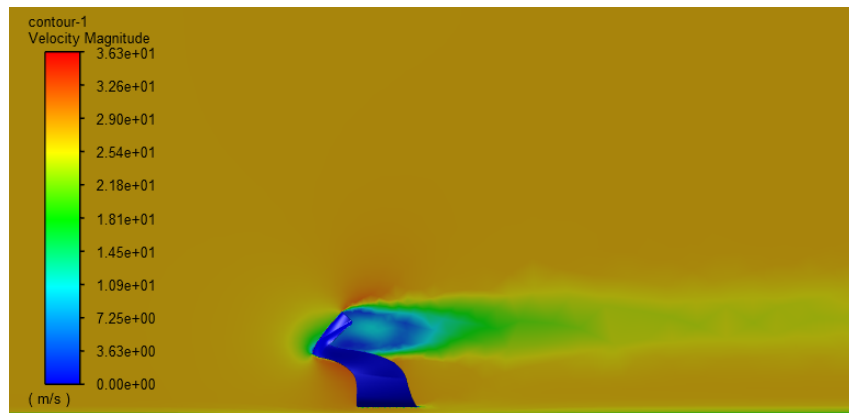


Figura 44 – Gráfica de residuos y fuerza de arrastre de simulación de versión 1.B a 100 km/h

Se comprueba una correcta estabilización de la fuerza de arrastre, así como una disminución de todos los residuos, a excepción del salto en la iteración 100 debido al cambio de sistema de solucionar las ecuaciones dadas. De esta forma se comprueba que la simulación realizada converge de forma satisfactoria pudiéndose así analizar los resultados de forma correcta. La fuerza de arrastre obtenida resulta en 19,72 N en media sección y por tanto de 39,44 N en la sección completa de la pieza.

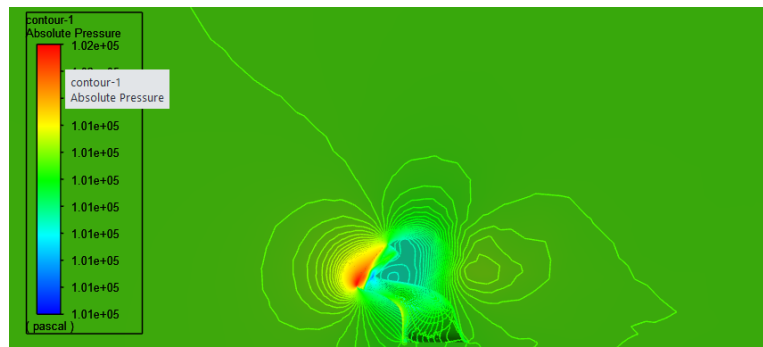
En primer lugar, se va a ver el perfil de velocidades que debería ser muy similar a los otros anteriormente vistos. (figura 45)



*Figura 45– Gráfica de velocidades de la simulación de versión 1.B a 100 km/h*

En efecto, se dan los gradientes de velocidad de forma muy similar a lo visto en las figuras 37 y 41. Cabe destacar una zona más uniforme de variación de la velocidad en la zona posterior al carenado debido a la disminución de la velocidad reduciendo así la turbulencia de la zona más turbulenta.

Sigue el estudio del campo de presiones del volumen fluido. (figura 46)



*Figura 46– Gráfica de presión absoluta de la simulación de versión 1.B a 100 km/h*

Se observa lo mismo que en los otros casos, siendo el gradiente de presiones algo que en los casos anteriores debido a la significativa variación de la velocidad de ensayo. En esta última simulación se da un gradiente de 0,1 KPa entre la zona de mayor y menor presión mientras que en la figura 44 se observa una variación de 0,7 KPa.

Por último, se analiza la viscosidad turbulenta a esta velocidad de simulación. (figura 47)

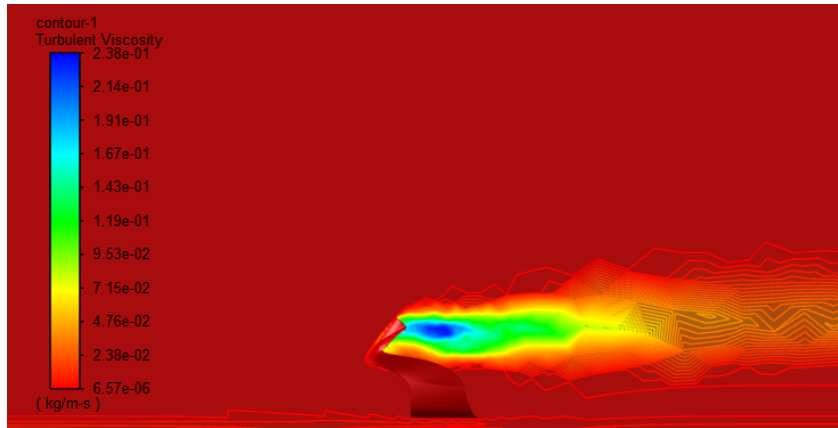


Figura 47– Gráfica de viscosidad turbulenta de la simulación de versión 1.B a 100 km/h

Se observa la misma zona turbulenta que en el resto de los casos, siendo esta suave y uniforme por detrás de la cúpula, reflejando la buena eficiencia aerodinámica de la primera versión del carenado. De esta forma se concluye que las 3 simulaciones reflejan unos resultados similares y coherentes entre sí, dando las bases para la posterior optimización del carenado.

Una vez vistas todos los resultados de las simulaciones de la primera versión se va a mostrar en la siguiente tabla los valores de arrastre de cada velocidad para después calcular el coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) de la pieza en cada simulación para acabar haciendo una media entre las tres simulaciones. (tabla 2)

Tabla 2 – Resultados numéricos de simulaciones de versión 1.B del carenado

Velocidad (m/s)	Área (m <sup>2</sup> )	Fd (N)	$C_D$ [-]
47,2	0,157	113,9	0,532
37,5	0,157	71,6	0,530
27,8	0,157	39,4	0,532

Se puede comprobar que el mejor coeficiente de arrastre, es decir el de menor valor se obtiene en la simulación a 135 km/h. Se puede deducir que, para esta velocidad, le geometría del carenado resulta más eficiente que para el resto.



Resulta interesante la comparación de estos valores del coeficiente de arrastre, con los valores de las diferentes motos que sus fabricantes facilitan. Se puede observar en la siguiente tabla, estos valores para diferentes modelos y posturas de pilotaje. (tabla 3)

*Tabla 3– Valores de  $C_D$  de modelos comerciales según postura del piloto [15]*

Description of bike	Rider prone	Rider sitting
Yamaha Venture		0.75
Honda V65 Magna		0.61
Honda Blackbird	0,44 / 0,49	0,72 / 0,81
Honda VF1000F	0.40	0.46 / 0.45
Aprilia Mille	0,52	0,61
Ducati 916	0,49 / 0,57 / 0,53	0,61 / 0,69 / 0,61
BMW R1100 RT	0,53	0,97
BMW K100RS	0.40	0.43
Yamaha R1 (1998)	0,57	0,62
Yamaha FJ1100	0.43	0.48
Kawasaki GPZ900R	0.36	0.43
Suzuki GSX1100EF	0.41	0.44
Suzuki GSXR750	0.32	
Suzuki Hayabusa	0.31	
Kawasaki ZX-12R	0.34	
Yamaha OW69	0.32	
Honda 1996 RS125	0.20	
Honda 1990 RS125	0.19	
Honda RS500	0.24	
Rifle faired Yamaha	0.15	

Esta tabla muestra los valores de  $C_D$  para una postura de pilotaje erguida y cómoda (*Rider sitting*) y en postura de recta (*Rider prone*). De esta forma una comparación con esta tabla resulta interesante para ver que el desarrollo de la pieza sigue una correcta evolución. Se puede ver que el orden de magnitud del  $C_D$  obtenido es similar a los mostrados en la tabla 2. Hay que resaltar la diferencia entre el análisis de una motocicleta completa y únicamente el carenado, como es el caso en este trabajo. De esta forma, la moto completa posee unas geometrías que son más aerodinámicas con la ayuda del colín, casco del piloto y guardabarros, pero posee una mayor área frontal debido a los elementos de la moto. Por lo cual no se puede establecer una conexión directa entre la comparación de los resultados debido a la gran diferencia de elementos afectados aerodinámicamente presentes en una moto.

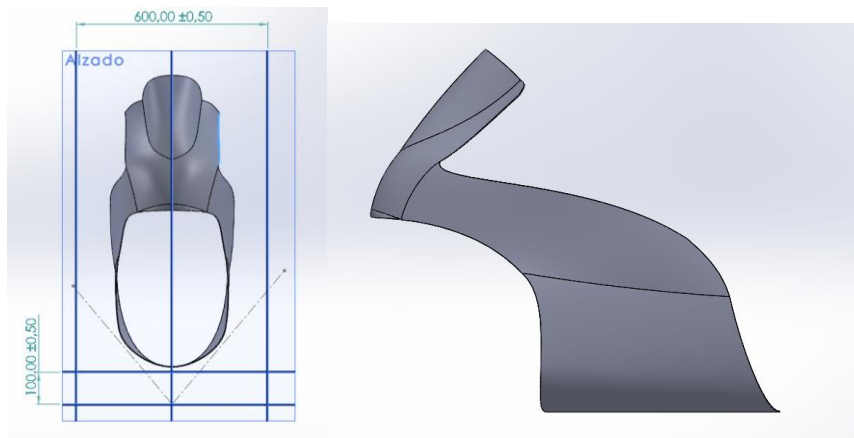
Una vez comprobado una coherencia de resultados entre las simulaciones, así como un respeto del orden de magnitud de modelos de calle, se prosigue el documento con la optimización del carenado en el siguiente punto del capítulo.

## **5.4 MEJORA DEL DISEÑO**

Para la optimización del carenado, se va a modificar la geometría del mismo según lo analizado tras los resultados de las simulaciones de la versión anterior. Se ha comprobado que la primera versión resulta generar una turbulencia y un cambio de velocidades uniforme siendo esto signo de una buena eficiencia aerodinámica, pero siendo esta todavía optimizable, como se estudiará a continuación.

### **5.4.1 SEGUNDA VERSIÓN DEL DISEÑO DEL CARENADO**

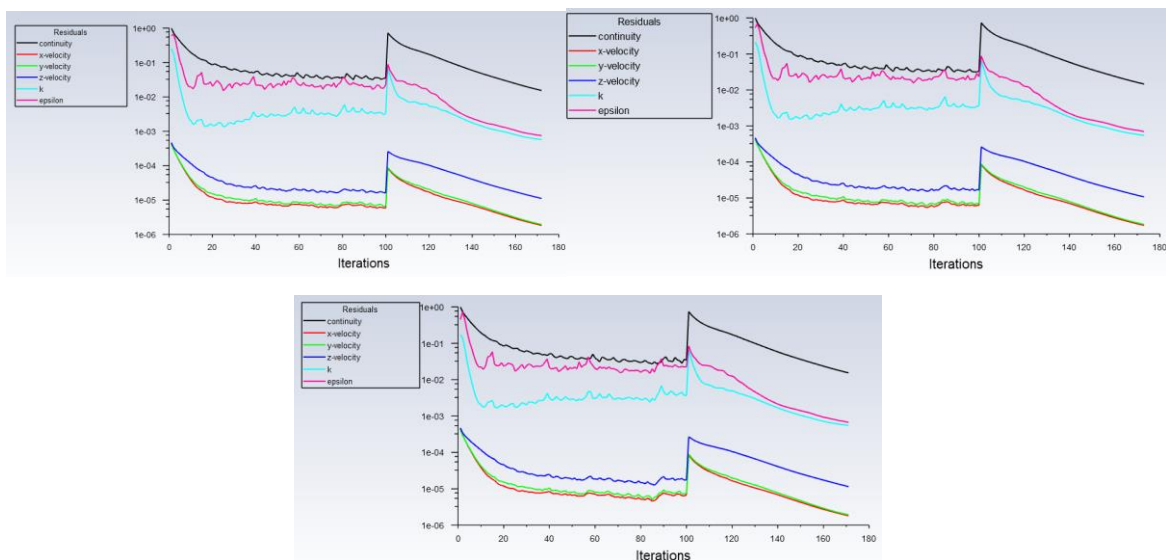
Para esta segunda versión del carenado se parte de la versión anteriormente simulada, es decir la denominada versión 1.B. En primer lugar, se va a modificar el frontal, reduciéndolo, para así disminuir el área frontal. Esto queda claro sobre todo en la zona de unión con la parte lateral del carenado. Además, se adelanta y baja el punto de remanso para intentar redirigir el flujo de aire para reducir así el gradiente de presiones adverso, atrasar el desprendimiento de la capa límite y reducir la fuerza de arrastre. Para ello se crea una nueva superficie en el frontal a cuál va a cerrar el morro de la moto, siendo así una geometría más suave. La quilla y la zona lateral del carenado no se ven modificadas en esta versión ya que no se ha visto una excesiva turbulencia debido al contacto con estas zonas, además de la limitación del diseño debido a las geometrías internas del conjunto de la moto y normas de la competición, en particular a la que se refiere a la distancia al suelo. De esta forma en la siguiente figura se observa el nuevo diseño del carenado, siendo esta su segunda versión la cual se denomina versión 2.0. (figura 48)



*Figura 48– Vistas frontal y lateral de la versión 2.0 del carenado*

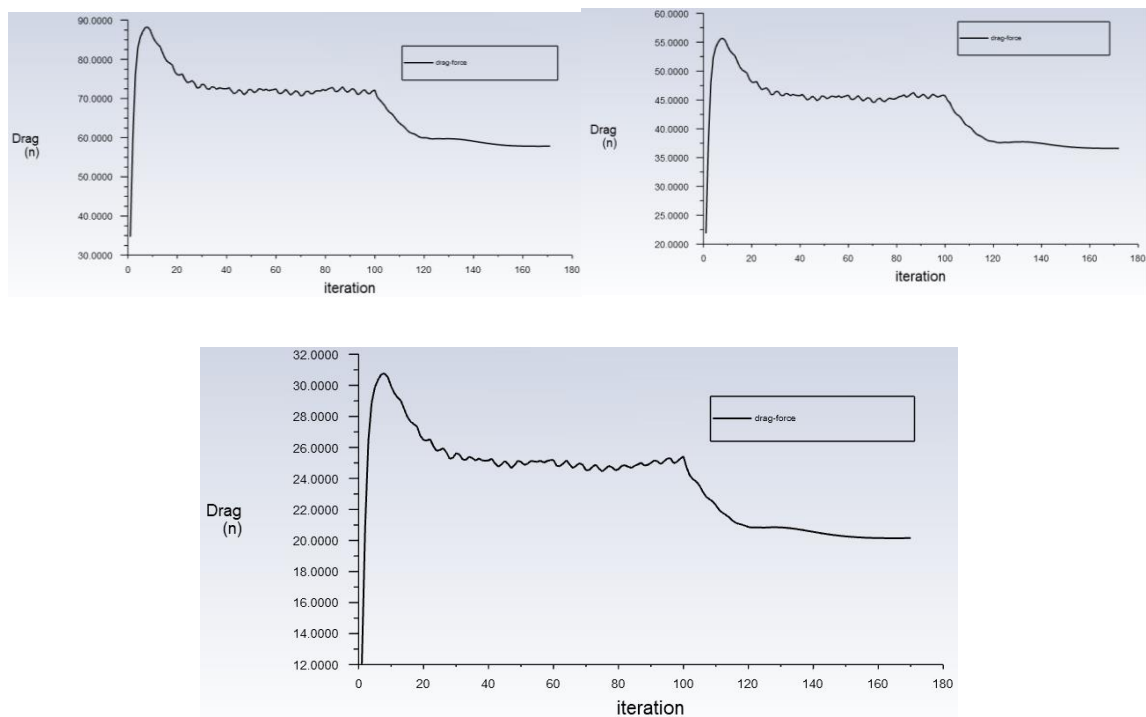
Una vez obtenida la pieza final, es necesario la creación de un nuevo proyecto en Fluent con esta nueva geometría. De esta forma se van a repetir los pasos detallados en el apartado 3 de este quinto capítulo. Al igual que en la versión anterior, se van a realizar tres simulaciones a velocidad máxima, a media y a velocidad de entrada a recta.

A continuación, se muestra la gráfica del valor de los residuos en función del número de iteraciones de las tres simulaciones siendo el orden de izquierda a derecha, 170 km/h, 100 km/h y 100 km/h respectivamente. (figura 49)



*Figura 49– Gráficas residuos en función iteraciones de las tres simulaciones de la versión 2.0*

Se puede comprobar en las tres gráficas mostradas, como se repite el patrón visto en las simulaciones de la primera versión. Los residuos bajan de forma constante, pero presentando ciertas oscilaciones durante las primeras 100 iteraciones, que son las que sirven para guiar la simulación y obtener una convergencia rápida. En las siguientes hay un salto de todos los residuos tomando valores iniciales para acabar disminuyendo de forma más rápida y precisa que en las primeras iteraciones, hasta convergencia. Como se ha visto antes, esto es signo de unas simulaciones que han convergido obteniendo así un resultado válido. Para comprobar además el correcto desempeño de las simulaciones se va a analizar la curva de la fuerza de arrastre, parámetro de estudio en estas simulaciones. Esto se muestra a continuación, ordenado de la misma forma que la gráfica de los residuos. (figura 50)



*Figura 50– Gráficas de fuerza de arrastre en función iteraciones de las tres simulaciones de la versión 2.0*

Se observa una gráfica que sigue las mismas tendencias y oscilaciones pero cuyos valores de arrastre son diferentes para cada versión de la simulación. Esto demuestra un primer indicio de correlación de las simulaciones y por tanto se pueden comparar las simulaciones entre sí. Al igual que en la primera versión, el arrastre aumenta al principio del cálculo de

las iteraciones, pero alrededor de la iteración 10 comienza a descender su valor, hasta estabilizarse entre un valor que va oscilando ligeramente, esto es signo de la inexactitud de las primeras iteraciones como ya se ha visto. Durante la segunda parte del cálculo de la simulación, todas ven como su fuerza de arrastre disminuye hasta estabilizarse. De esta forma se comprueba en efecto la correcta convergencia de las simulaciones haciendo validos sus posteriores análisis.

El área frontal proyectada de media sección resulta ser 0,0735 m<sup>2</sup>, siendo inferior a la de la versión anterior de 0,0785 m<sup>2</sup>. De esta forma el principal objetivo, siendo este el de reducir el área frontal se ve comprobado.

A continuación, se muestra en la tabla 4 los resultados numéricos de fuerza de arrastre y coeficiente de arrastre de las tres simulaciones de esta segunda versión. (tabla 4)

*Tabla 4– Resultados numéricos de simulaciones de versión 2.0 del carenado*

Velocidad (m/s)	Área (m <sup>2</sup> )	Fd (N)	C <sub>D</sub> [-]
47,2	0,147	115,7	0,577
37,50	0,147	73,2	0,580
27,8	0,147	40,3	0,582

Comparando los resultados a los obtenidos en la tabla 2 se puede ver un ligero aumento de la fuerza de arrastre obtenida de cada simulación. Pese a reducir de forma sensible el área frontal del carenado, el coeficiente de arrastre ha aumentado considerablemente, provocando así una peor eficiencia aerodinámica de esta segunda versión del carenado. De esta forma resulta evidente el rediseño del carenado para mejorar la eficiencia aerodinámica de este. Para poder entender las zonas en las que se ha aumentado la turbulencia y el trabajo de rediseño no ha sido bueno, es preciso ver los gráficos de los diferentes parámetros de interés.

Para ello en primer lugar se va a analizar la velocidad del volumen fluido para comprar la correcta aplicación de las condiciones de contorno propuestas al software. El orden seguido sigue siendo en velocidades de simulación decrecientes. (figura 51)

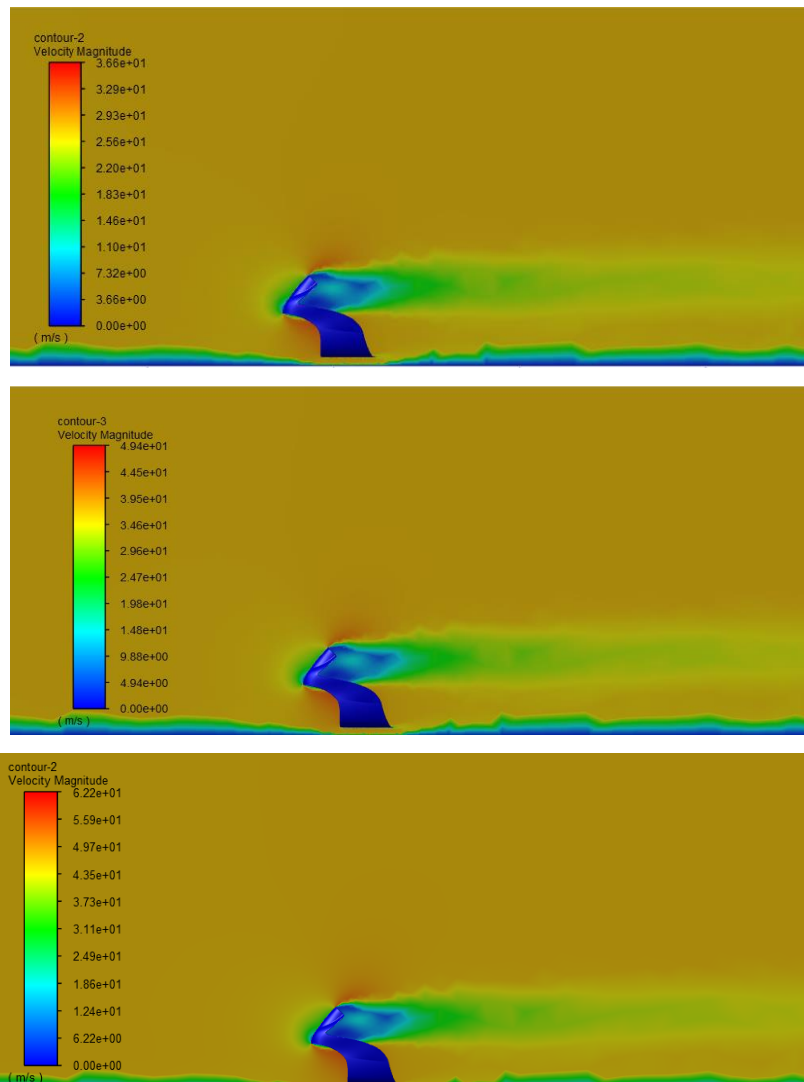


Figura 51– Gráficas de velocidades de las tres simulaciones de la versión 2.0

En todas las gráficas se comprueba una correcta aplicación de las condiciones de contorno, ya que velocidades del suelo y carenado son 0 mientras que la velocidad del fluido en la zona alejada del carenado es la de simulación. Por otro lado, se comprueba una turbulencia adicional en las tres simulaciones, siendo esto notorio por el gradiente de velocidades mucho más marcado en este caso que en las simulaciones de la primera versión, como se puede ver en las figuras 37, 41 y 45. Se puede comprobar como la variación de velocidades es más brusca que en la versión anterior, denotando una turbulencia mayor en el fluido, provocando así un rendimiento menor.

De esta forma se intuye que la nueva superficie creada para mejorar la eficiencia del prototipo ha resultado tener una función opuesta ya que ha aumentado la turbulencia de la zona.

A continuación, se van a estudiar el gráfico de las presiones absolutas de las tres simulaciones de esta versión, el orden seguido es el mismo que anteriormente. (figura 52)

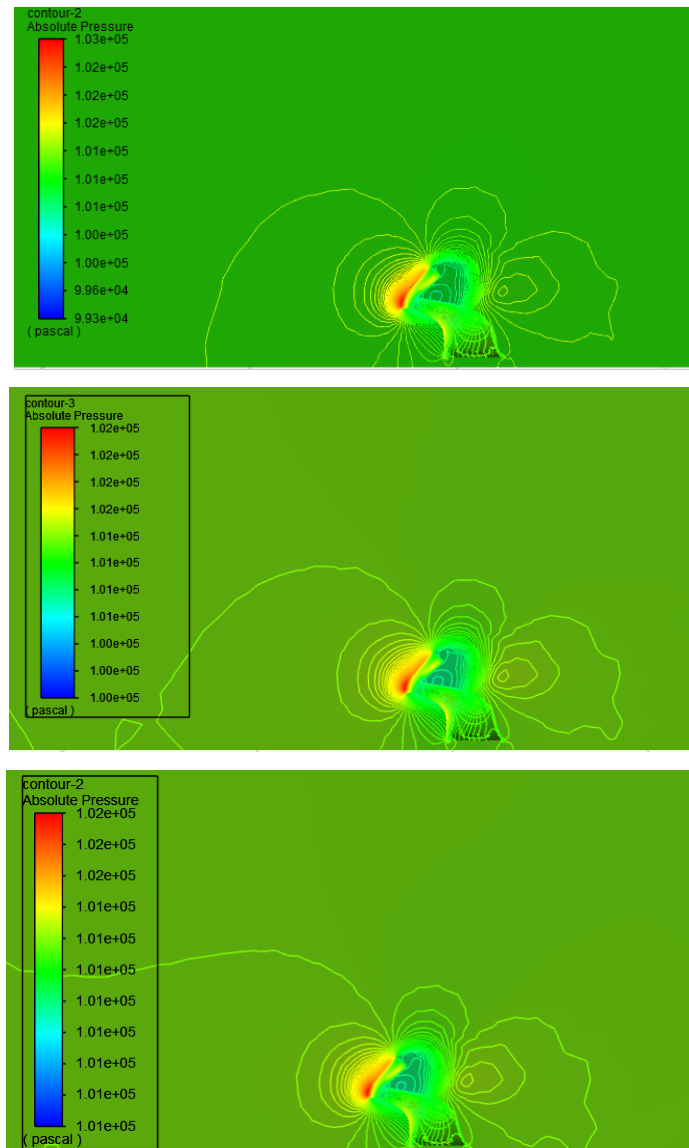
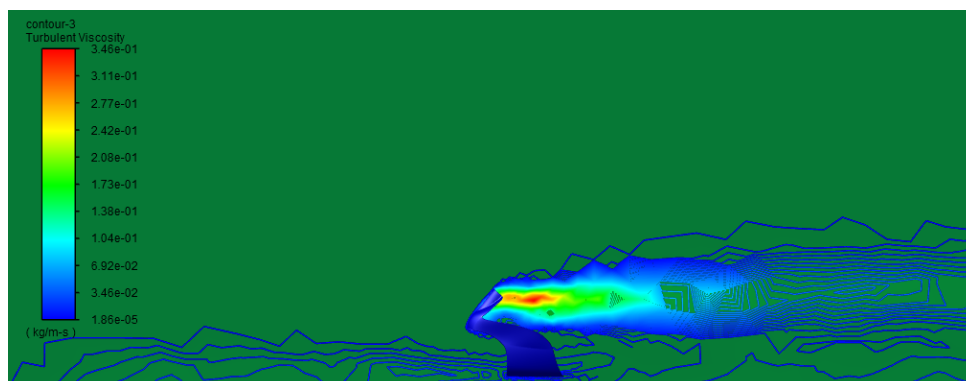
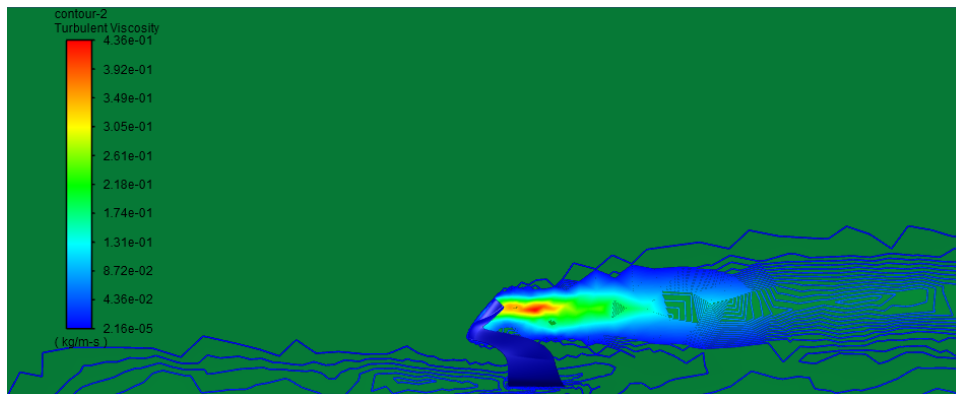


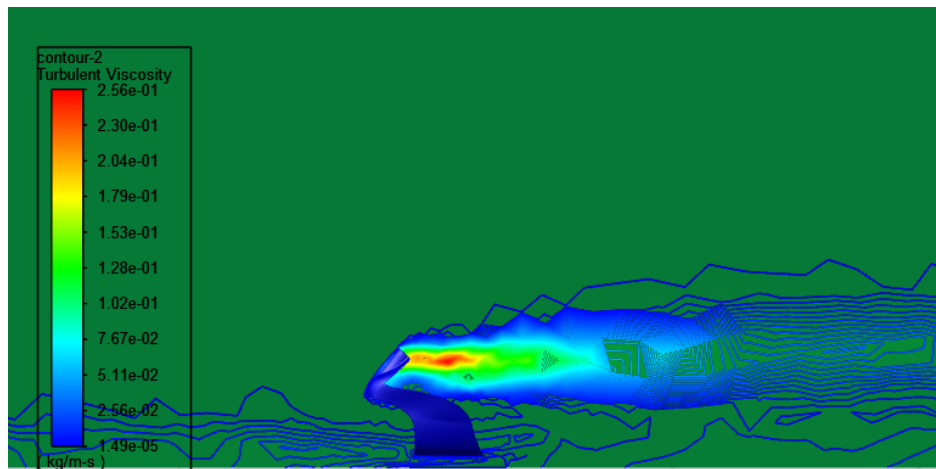
Figura 52– Gráficas de presión absoluta de las tres simulaciones de la versión 2.0

Se observa claramente un mayor gradiente de presiones en estas simulaciones con respecto a sus homologas de la versión anterior, siendo 0,2 KPa mayor para la máxima velocidad que en el diseño anterior. De esta forma, se entiende que esta es la principal causa del aumento del  $C_D$ . Se ve claramente la necesidad de suavizar entonces la zona de contacto carenado con flujo de aire para intentar que este gradiente de presiones sea lo menor posible y así reducir la fuerza de arrastre.

Por último, se va a estudiar la viscosidad turbulenta, para así entender y confirmar las hipótesis sobre la turbulencia planteada tras análisis de la figura 51. (figura 53)







*Figura 53– Gráficas de viscosidad turbulenta de las tres simulaciones de la versión 2.0*

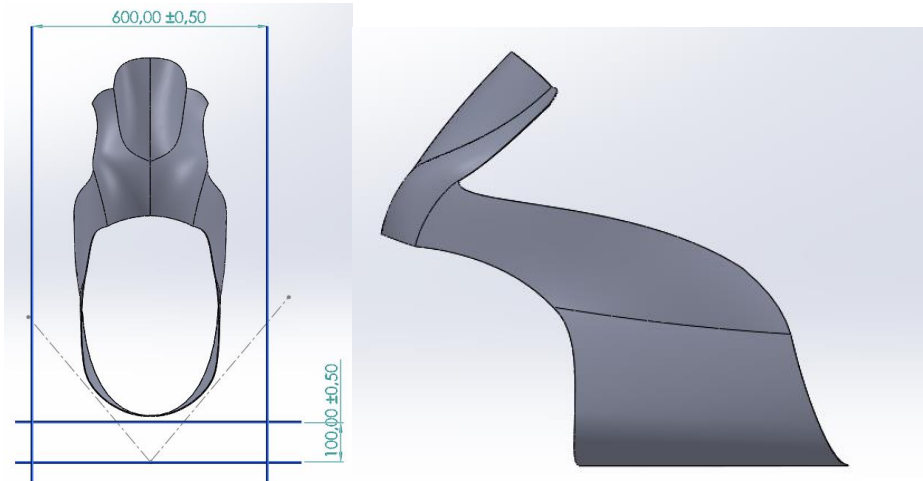
Se comprueba de igual manera la gran similitud entre las tres simulaciones. Además, comparando la gráfica de 135 km/h con su homóloga en la figura 43 se observa una menor uniformidad en este parámetro, siendo esto un claro indicativo de una mayor turbulencia del flujo de aire una vez perturbado por el carenado. Cabe destacar a la vista de las figuras 37 y la 43, una mayor turbulencia en la zona cercana al suelo del dominio computacional, siendo esto una consecuencia directa de un mallado de peor calidad en estas simulaciones que en el caso anterior. De todas formas, los resultados con un mejor mallado seguirían siendo no válidos para el objetivo de este trabajo ya que la fuerza de arrastre seguiría siendo de mayor valor que en la versión inicial, siendo necesaria una tercera versión.

Para esta tercera versión se busca como objetivo seguir reduciendo el área frontal, pero facilitando el movimiento del flujo de aire para reducir así la turbulencia y los gradientes adversos de presiones absolutas y mejorar la eficiencia aerodinámica del carenado.

#### **5.4.2 VERSIÓN FINAL DEL CARENADO**

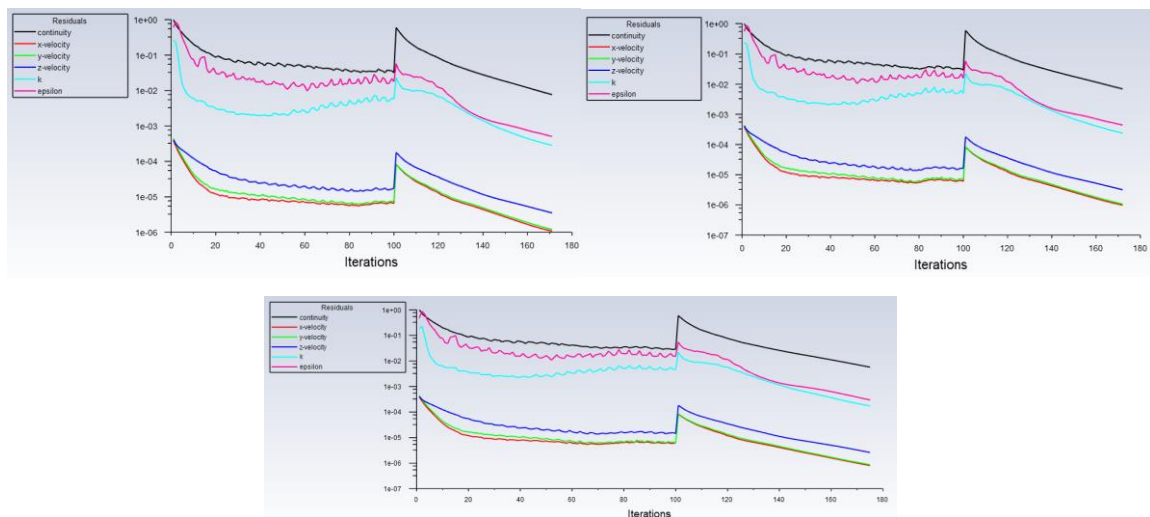
Para la siguiente versión del carenado se va a eliminar la nueva superficie creada en el frontal, volviendo a la filosofía del principio. Se busca la reducción del área frontal y un diseño suave de este para asemejarse a la baja turbulencia obtenida de la primera versión. Para ello se retoca la geometría del frontal, haciéndolo más suave y uniforme. De igual manera se retoca la zona de las aletas, estrechándolas en su centro y siguiendo curvas suaves,

acentuando así la zona de unión con la del lateral del carenado. Se observa este nuevo diseño, denominado versión 3.0, a continuación. (figura 54)



*Figura 54– Vistas frontal y lateral de la versión 3.0 del carenado*

El proceso de simulación de esta tercera versión es el mismo que en las dos anteriormente estudiadas. De esta forma se puede observar en orden decreciente de velocidad, las gráficas de los residuos en función de las iteraciones dadas en la siguiente figura. (figura 55)



*Figura 55– Gráficas de residuos en función iteraciones de las tres simulaciones de la versión 3.0*

Se comprueba una similitud entre las tres gráficas, siendo la bajada continua de los residuos en la segunda etapa de iteración constante y suave para todas, reflejando así la convergencia

de las simulaciones. De igual manera se comprueban los saltos en las tres curvas en la iteración 100 debido al proceso de simulación seguido.

De igual manera se comprueba la correlación de las gráficas de la fuerza de arrastre de media sección del carenado entre las tres simulaciones. (figura 56)

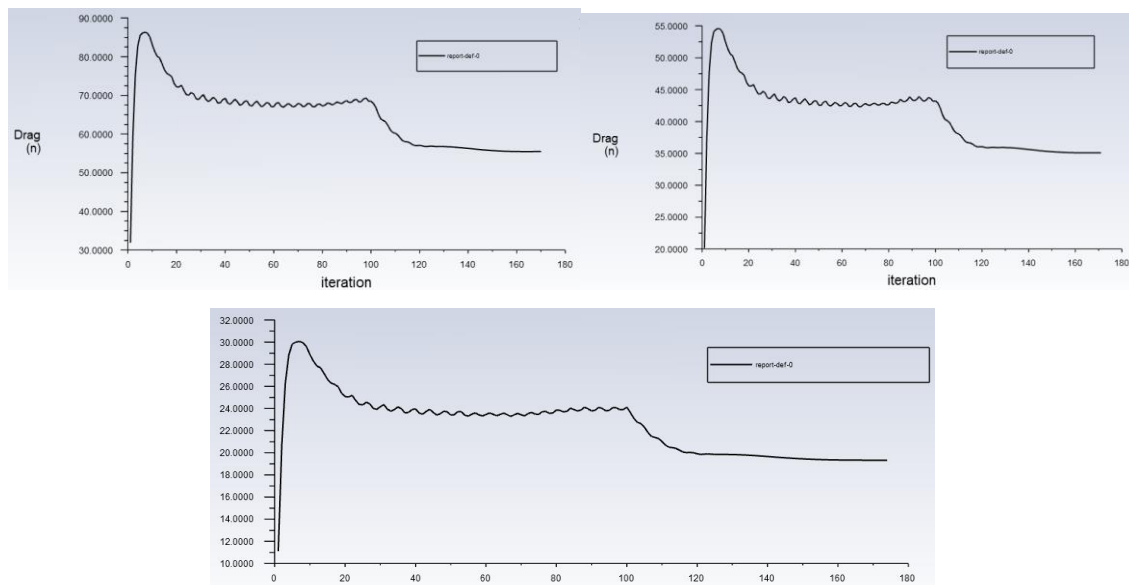


Figura 56– Gráficas de fuerza de arrastre en función iteraciones de las tres simulaciones de la versión 3.0

Al igual que en los residuos, la similitud de la forma de las tres simulaciones es muy elevada, haciendo así posible su comparación directa entre sí. Se observa la estabilidad oscilante alcanzada alrededor de la iteración 40 como en las otras versiones del carenado. Además, se ve el cambio brusco de pendiente de las curvas al pasar a la segunda etapa de la iteración para llegar finalmente a una solución convergida ya que los valores de fuerza de arrastre se estabilizan en los tres casos.

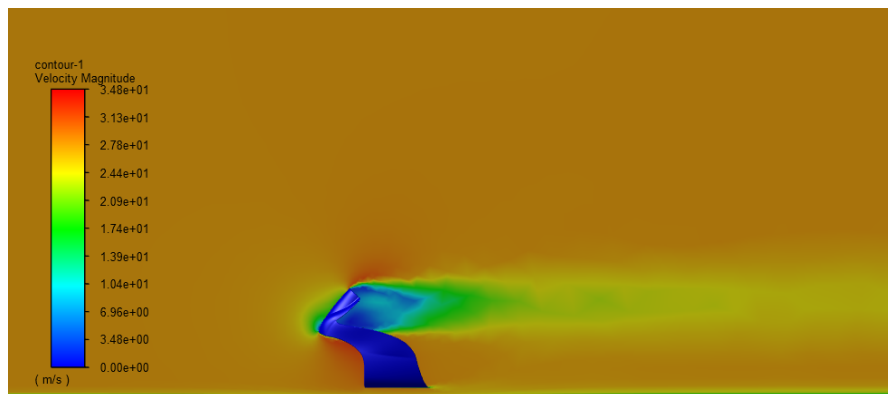
Se obtiene así un área frontal de  $0,0715 \text{ m}^2$  en la sección simulada resultando en  $0,143 \text{ m}^2$  para la totalidad de la pieza. Los resultados obtenidos de fuerza de arrastre y coeficiente de arrastre para cada simulación se detallan en la siguiente tabla. (tabla 5)

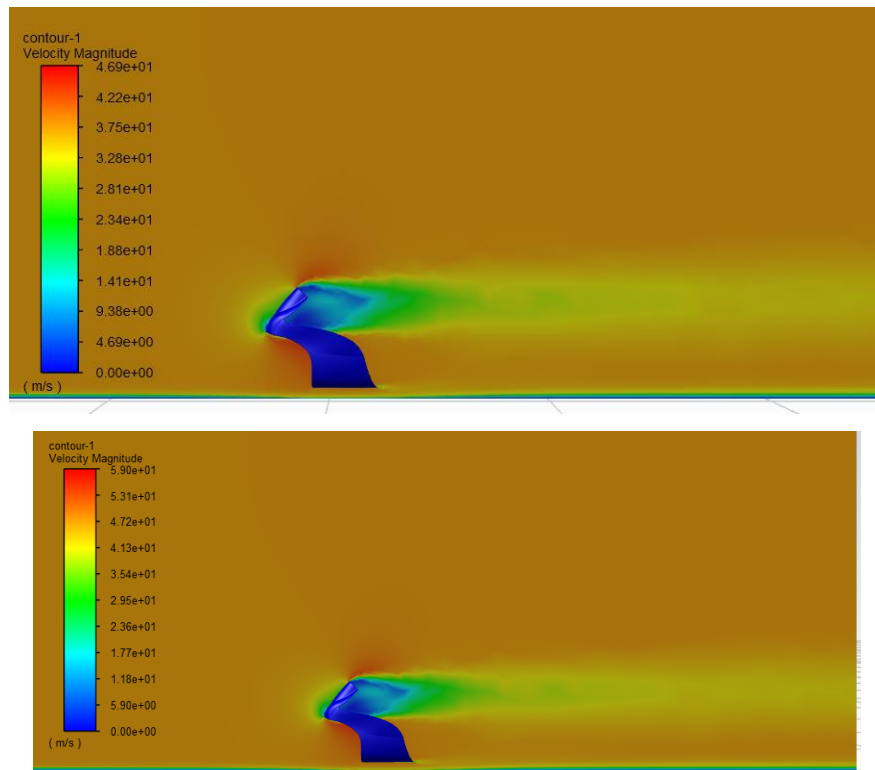
*Tabla 5– Resultados numéricos de simulaciones de versión 3.0 del carenado*

Velocidad (m/s)	Area (m <sup>2</sup> )	Fd (N)	C <sub>D</sub> [-]
47,2	0,143	110,1	0,565
37,5	0,143	70,2	0,572
27,8	0,143	38,7	0,574

Se puede comprobar como las fuerzas de arrastre obtenidas en las tres simulaciones son menores que en los casos anteriores. De esta forma se entiende una correcta evolución de esta tercera versión del carenado. Esto se debe a la disminución del área frontal con respecto a ambas versiones anteriores. El coeficiente de arrastre resulta ser mayor que el de la primera versión, pero menor que en la segunda, cumpliéndose así los objetivos de diseño de la tercera versión.

Se va a estudiar las gráficas de los diferentes parámetros de interés de estas tres simulaciones. El orden seguido es de arriba abajo, respectivamente 170 km/h, 135 km/h y 100 km/h. El primer parámetro es el del campo de velocidad en el volumen fluido. (figura 57)

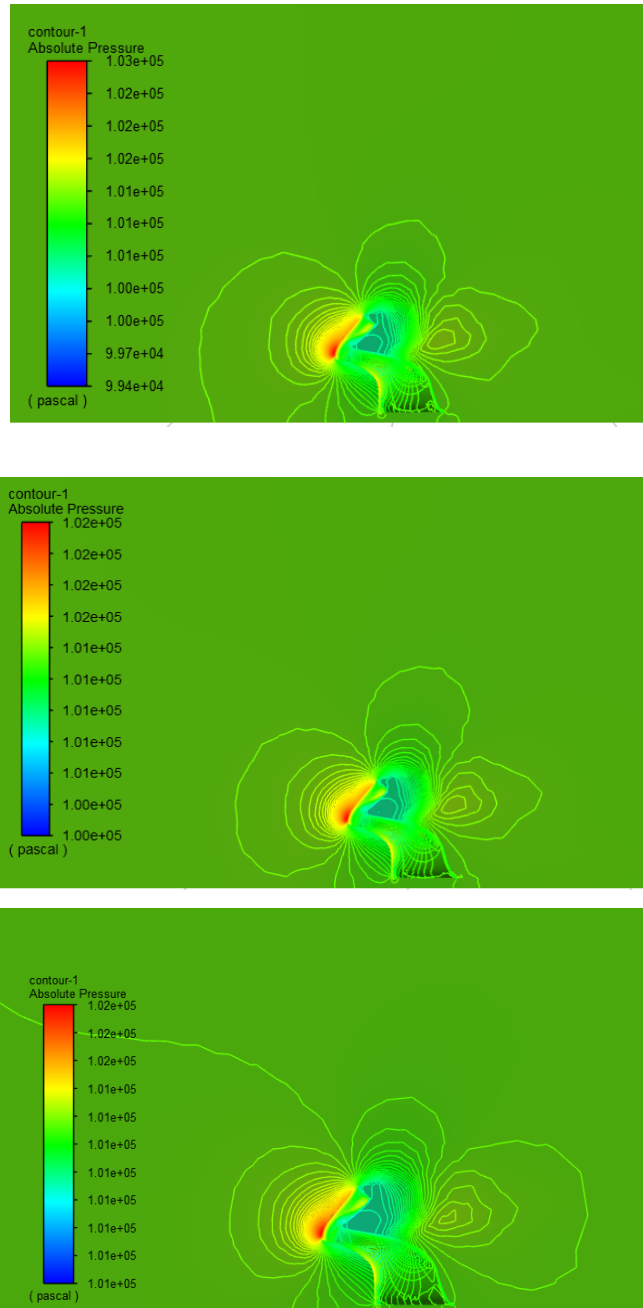




*Figura 57– Gráficas de velocidades de las tres simulaciones de la versión 3.0*

En los tres casos se ve una correcta aplicación de la condición de paredes estacionarias, siendo el carenado y suelo las zonas de velocidad nula. Además, se observa una similitud con las figuras 37, 41 y 45 ya que la zona del suelo no representa a penas un cambio de velocidad. De igual manera, el cambio de velocidad tras el frontal se ve más uniforme que en la versión 2, aunque algo menos que en la versión primera, viéndose aquí reflejado el aumento del  $C_D$  de la tercera versión con respecto a la primera.

A continuación, se va a estudiar el campo de presiones absolutas en las tres gráficas. (figura 58)

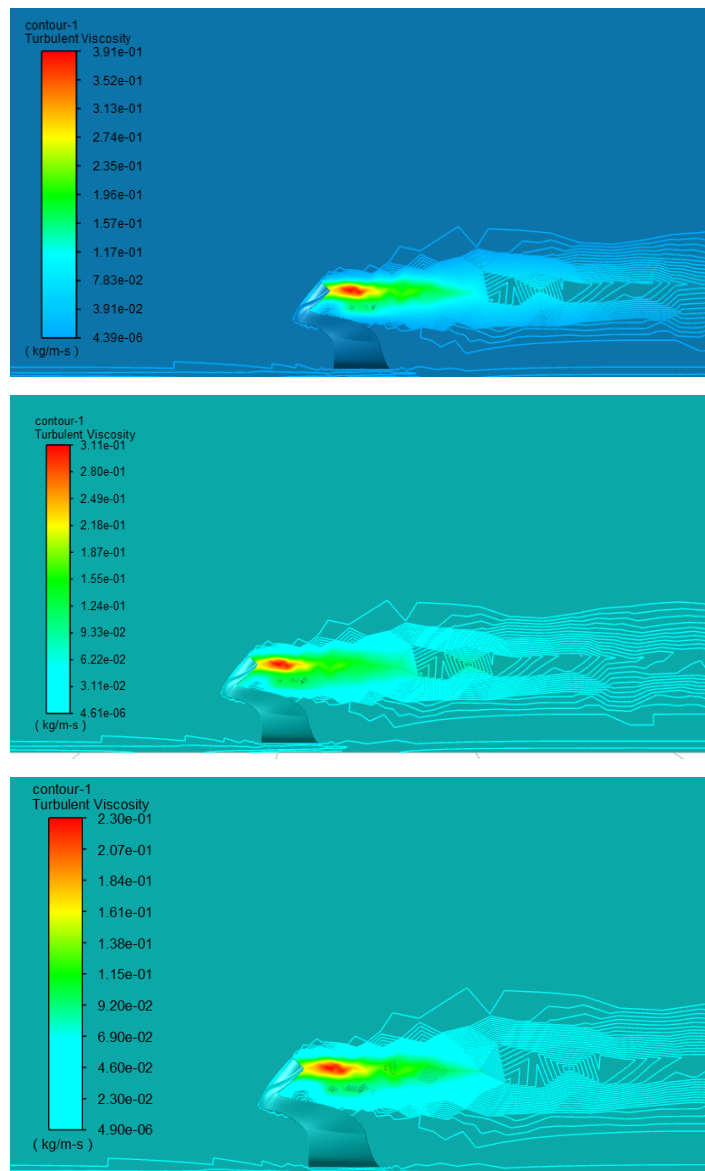


*Figura 58– Gráficas de presión absoluta de las tres simulaciones de la versión 3.0*

En comparación con la figura 50, se observa que la zona de máxima presión resulta ser de menor volumen, además de haber una menor variación del valor de presión absoluta. Esto indica la mejora obtenida en el coeficiente de arrastre con respecto a esta segunda versión. En cambio, en la figura se observa como este gradiente de presiones es de 0,05 KPa 170

km/h en comparación con los 0,06 Kpa entendiendo así parte de la variación del valor de este  $C_D$ .

Por último, se va a estudiar las gráficas de la viscosidad turbulenta de estas tres simulaciones. (figura 59)



*Figura 59– Gráficas de viscosidad turbulenta de las tres simulaciones de la versión 3.0*

Se constata que la estela posterior al frontal del carenado resulta ser bastante uniforme, dándose el máximo de este valor en la zona en donde iría la cabeza del piloto,

desplazando esta zona por el efecto aerodinámico de los cascos de hoy en día. De esta forma se observa una uniformidad a lo largo de la estela, en particular en la zona de valores medios de esta viscosidad turbulenta. En cambio, las zonas de mayor turbulencia se ven menos suaves y teniendo tendencias más bruscas que en el primer caso, pero mejorando las obtenidas de la segunda versión.

A la vista de los resultados de estas tres simulaciones se da por concluido el estudio aerodinámico, al obtener una mejorar considerable de prestaciones con respecto a la primera versión pese a tener un  $C_D$  superior al del primer caso.

A continuación, se muestra una tabla comparativa de los resultados de las simulaciones de la primera versión con respecto a la tercera y definitiva versión. (tabla 6)

*Tabla 6– Comparación entre versión 1.B y versión 3.0 del carenado*

Velocidad (km/h)	versión	Fd (N)	Mejora Fd (%)
100	1.B	39,44	1,96
	3.0	38,7	
135	1.B	71,6	1,93
	3.0	70,2	
170	1.B	113,9	3,39
	3.0	110,1	

Se observa una clara mejora en cuanto a la reducción de la fuerza de arrastre, siendo esta de hasta 3,39% menor a 170 km/h en la última versión en comparación con la definitiva. Se comprueba la correcta realización del proceso de optimización de esta pieza ya que un 3,39 % de mejora representa una cantidad importante en el mundo de la alta competición en donde en ocasiones se deciden las carreras por milésimas.

Al haber llegado a un resultado satisfactorio, es necesaria la correcta fabricación de la última versión del carenado. Para ello se va a desarrollar un proceso propio que se detallará en el siguiente capítulo.



## **Capítulo 6. PROCESO DE FABRICACIÓN**

En este capítulo se va a detallar el proceso de fabricación del carenado. Para ello se va a diseñar unos moldes que representen el negativo de la pieza. Estos moldes van a ser fabricados mediante impresión 3D. De igual manera se va a emplear un material compuesto respetuoso con el medio ambiente, cumpliendo así con parte de los Objetivos de Desarrollo sostenible (ODS) que se describirá posteriormente.

### **6.1 FABRICACIÓN DE LA PIEZA FINAL**

#### **6.1.1 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LOS MOLDES**

Una vez obtenida la geometría final, es necesario el diseño de un molde que represente fielmente esta geometría. La calidad superficial de la posterior pieza resulta de vital importancia, tanto como función estética como función técnica para así evitar una turbulencia adicional y un esfuerzo cortante excesivo en la superficie de la misma, haciendo que las prestaciones de la misma bajen. De esta forma se opta por realizar unos moldes negativos y no positivos. Se va a emplear SolidWorks para el diseño de estos moldes.

Para entender el diseño de los moldes es necesario conocer el método de fabricación empleado para así diseñar en función del mismo. En este caso se escoge la tecnología de fabricación aditiva de modelado por deposición fundida (FDM). Esto se debe a su gran versatilidad, la correcta obtención de geometrías complejas, la posibilidad de emplear diferentes materiales y el precio de esta. En este caso se emplea un polímero ácido poliláctico (PLA) cuyo impacto en el medio ambiente es menor a otras alternativas disponibles. Otro motivo de elegir este polímero es por su versatilidad al imprimir ya que no es necesaria temperatura en la cama de impresión como en el caso del acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), otro material clásico de la tecnología FDM. De esta forma se evitan fenómenos como el *wrapping* por el cual la pieza se agrieta al no tener la capa inferior la temperatura adecuada y evitando así la correcta fusión con la capa nueva y por tanto el agrietamiento de una zona

de la impresión. Este fenómeno se da sobre todo en el ABS y en piezas de gran tamaño como es el caso que atañe. Además, se escoge esta tecnología ya que el laboratorio de fabricación aditiva del ICAI cuenta con un modelo de última generación el cual se va a emplear. Esta impresora es la DT600, como se muestra a continuación. (figura 60)



*Figura 60– Impresora 3D DT 600 [16]*

En esta impresora se pueden alcanzar dimensiones de impresión de hasta 600 x 400 x 400 mm. De esta forma es necesario dividir el carenado en una serie de moldes cuyas dimensiones máximas no superen al límite definido por la máquina.

Para ahorrar tiempo de impresión y cantidad de material, haciendo así más económica su fabricación y teniendo menor impacto en el medioambiente, el diseño del molde se va a ajustar al máximo a la zona del carenado en cuestión. Además, para facilitar el despegado de la cama sin que el molde sufra daños se van a biselar los bordes en los que apoya en la cama, ahorrando así más material. A continuación, se puede ver el molde del cubre baterías del prototipo de esta edición en el cual se muestra la optimización de este. (figura 61)



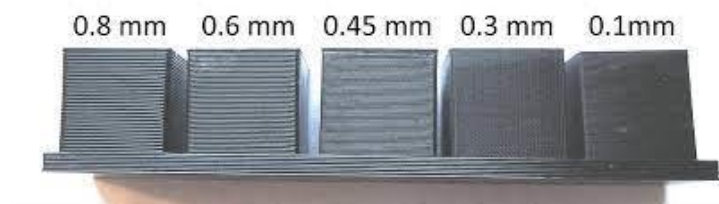
*Figura 61– Molde cubre baterías*

Se escoge este molde para ilustrar la forma final de los moldes ya que fue el primero en imprimirse siguiendo este proceso. Se puede ver como las geometrías de la pieza quedan perfectamente reflejadas en el molde y como se ha apurado al máximo para ahorrar material. Esta pieza en concreto gasto 3,5 Kg de material y tardó tres días y medio en completarse.

Para los moldes del carenado se va a realizar el mismo proceso que para el del cubre baterías.

### **6.1.2 LAMINACIÓN MANUAL DEL MATERIAL COMPUESTO**

Una vez diseñados y fabricados los moldes se procede al post-procesado de los mismos. Es necesario lijar la superficie donde se va a fabricar la pieza para así mejorar la calidad superficial de la misma reduciendo el efecto de la altura de capa tan característica de la tecnología FDM. (figura 62)



*Figura 62- Diferentes alturas de capa [17]*

Se observa como al disminuir la altura de capa, la rugosidad de la superficie disminuye considerablemente. Además, en este proceso de lijado se corrige alguna posible irregularidad de la deposición del material.

Una vez lijado el molde, se puede proceder a la fabricación de la pieza. Estará se hará mediante un laminado manual.

En primer lugar, la aplicación de un agente desmoldante, tras limpieza de la superficie de aplicación, resulta necesario para poder despegar la pieza del molde una vez este proceso realizado. Desde la compañía inglesa de Easycomposites recomiendan un desmoldante líquido, que además de permitir un correcto desmoldeo sin dañar la pieza o el molde, permite rellenar las posibles imperfecciones que no se hayan podido lijar del molde como se indica en su proyecto. [18]

Resulta indispensable el correcto uso de todo equipo de protección individual (EPI) durante todo el proceso de laminado.

Mientras se deja secar el desmoldante según indicación del fabricante, es necesario preparar la fibra del material compuesto. En este caso se va a emplear fibra de lino, como se detalla en la segunda parte de este capítulo. Para esta preparación hay que cortar la cantidad necesaria de material y realizar cortes en diferentes zonas de la fibra de tal manera que no se formen arrugas en la fibra al pegarse a las complejas geometrías del molde.

Una vez acabada la preparación de todas las capas de fibra de lino que se va a emplear hay que preparar la resina epoxi, en ese caso siendo ecológica como se verá en la segunda parte del capítulo. De esta forma se aplica una proporción de mitad de la pieza en fibra de lino y la otra mitad de la resina epoxi. Se calcula la cantidad de resina epoxi necesaria y se prepara esta mediante la ayuda de una báscula y un palito de madera. De esta forma es necesario aplicar las proporciones exactas de base y endurecedor que componen la resina epoxi y después realizar un mezclado manual para que la mezcla queda homogénea y sin burbujas de aire atrapadas en su interior.

Una vez todo preparado, se aplica una primera capa de resina epoxi en el molde para después aplicar una capa de fibra de lino, quedando esta empapada de resina epoxi de tal forma que se pega al molde para adoptar sus geometrías. Se aplica una segunda capa de fibra de lino

asegurando de que queda en su posición final mediante aplicación de la resina epoxi. Se repite este proceso hasta finalizar la resina epoxi y las capas de fibra de lino previstas.

Una vez acaba la laminación manual, se aplica de capa de Peel-ply, un tejido rugoso que va a dar esta textura a la zona interior de la pieza para asegurar un buen acabado, sin fibras salientes que puedan herir al operario. El siguiente paso es el de aplicar una manta absorbadora, en la superficie de la pieza, para absorber el posible exceso de resina epoxi aplicada en una zona. Finalmente se introduce en una bolsa al vacío y se realiza el mismo. Esto permite que las capas de fibra de lino mantengan su forma mientras se cura la resina epoxi. Se deja curar la resina epoxi un tiempo entre 24 horas y 48 horas, según recomendación del fabricante para después desmoldear la pieza. Para esto último hay que sacar el molde conteniendo la pieza de la bolsa de vacío, quitar la manta absorbadora y después el Peel-ply. Para no dañar la pieza ni el molde se emplean espátulas de plástico para ir separando la pieza del molde hasta que salga de este fácilmente.

Este proceso se realiza con todas las piezas del carenado menos con la cúpula. Para esta, es necesario dar forma a una capa fina de metacrilato mediante la aplicación de calor y posterior presión sobre el molde hasta que la lámina adopte la geometría deseada. Para evitar fundir el molde, es necesario aplicar una capa de resina epoxi al molde que va a coger la forma de este y por tanto ser el este el que finalmente actúa como molde aguantando este la temperatura y la presión para el moldeo de la cúpula.

Finalmente es necesario pintar las piezas del carenado según el diseño propuesto por el departamento de marketing del ISC para cumplir con los contratos con los patrocinadores.

## ***6.2 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)***

En 2021 resulta inevitable la implementación de alternativas tanto ecológicas como sociables en los diferentes proyectos. De esta forma se busca la aportación de soluciones para preservar

el medioambiente a la vez que se busca una mejora constante de la sociedad presente y futura es por esto que en este trabajo de fin de grado se implementan diferentes ODS,

### 6.2.1 DEFINICIÓN Y CONTRIBUCIÓN

En primer lugar, es necesario definir los ODS y su rol en la sociedad moderna. Estos objetivos nacen en el año 2015, de la necesidad de cambiar la sociedad para obtener un futuro mejor y más sostenible para todos. A continuación, se muestra un esquema con todos los ODS marcados por las naciones unidas hasta la fecha. (figura 63)



*Figura 63– Objetivos de Desarrollo Sostenible [19]*

En este trabajo se busca contribuir en los objetivos 12 y 13 mostrados en la figura 63. El objetivo 12 se ve reflejado al producir unos moldes no desechables, permitiendo así su posterior uso durante diferentes ediciones de la competición de MotoStudent. De esta forma se fomenta la producción y el consumo responsable dentro del departamento de aerodinámica del proyecto MotoStudent Electric del ISC.

Al emplear PLA en la fabricación, estos pueden ser triturados y así fabricar nuevo filamento que se puede utilizar en la fabricación de los moldes de las piezas de aerodinámica que tienen que ser actualizadas a lo largo de las ediciones futuras. Esto contribuye además al uso responsable de los materiales utilizados dentro del departamento y reduciendo el consumo

de plástico teniendo así una acción positiva hacia el clima como se indica en el objetivo 13 de la figura 63.

Además, se va a emplear un material compuesto ecológico en vez de los tradicionales en la industria de la alta competición, como son la fibra de carbono y la fibra de vidrio. Al no ser reciclables, las piezas aerodinámicas tradicionalmente acaban en vertederos una vez su vida útil termina o su diseño se actualiza. Esto supone un gran volumen de desechos a nivel mundial en todas las competiciones del *motorsport*. De esta forma, el impacto que se tiene en el medio ambiente con la aplicación de un material compuesto sostenible resulta menor que empleando unos materiales compuestos tradicionales, optimizando los recursos empleados y además emitiendo menos gases contaminantes al emplear este material compuesto ecológico, actuando así favorablemente sobre el clima, como se verá en el siguiente apartado.

### **6.2.2 IMPLEMENTACIÓN ALTERNATIVAS ECOLÓGICAS AL MATERIAL COMPUESTO TRADICIONALMENTE EMPLEADO**

En este apartado se va a ver en detalle la implementación de este material ecológico empleado, siendo este la fibra de lino y una bio resina epoxi. Un material compuesto es la composición de dos materiales para crear un tercer material cuyas propiedades mecánicas mejoran mucho la de ambos componentes por separado. El primer ejemplo claro es la fibra de carbono, el cual está compuesto por fibra de carbono y resina epoxi, siendo este el material más empleado en el *motorsport* debido a sus excelentes propiedades mecánicas a la vez que siendo muy ligero.

Diferentes fabricantes del sector de la automoción buscan la implementación de alternativas ecológicas [20]. De esta forma, la empresa Bcomp afirma que el uso de su fibra de lino, una combinación de ‘Amplietz’, la fibra de lino y ‘Powerribs’, un tejido de lino con forma de rejilla que otorga rigidez a la pieza, se reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> un 75% durante su fabricación, en comparación con la fibra de carbono. Además, para aplicaciones no estructurales, como es el caso del carenado siendo este un laminado delgado de alrededor 2

mm de espesor, se obtiene misma rigidez y peso que en la fibra de carbono, resultando así una candidata perfecta para su sustitución.

Por otro lado, está la parte del material compuesto que se compone por la resina epoxi, en el artículo anterior se menciona que los compuestos de Bcomp pueden usarse con una resina epoxi tradicional. En este trabajo se va a emplear una bio resina epoxi, teniendo esta un menor impacto en el medioambiente. De esta forma hay que entender la diferencia entre una resina epoxi tradicional y una bio. En primer lugar, las resinas epoxis tradicionales están formadas por dos componentes, un agente base y un agente endurecedor que permite el curado del agente base y el endurecimiento de las mismas. Una vez curado, este compuesto se cataloga como un plástico termoplástico que no se puede fundir y cuyo reciclado resulta posible únicamente de forma química, empleando además de un tiempo considerable para su correcto reciclaje como se ve en la revista de la asociación española de materiales compuestos [21].

De esta forma las bio resinas epoxis cumplen con los certificados USDA, siendo esta el departamento y agricultura de EEUU. De esta forma los productos *Biopreferred* son productos que se controlan según su contenido en carbono orgánico ‘nuevo’. De esta forma el carbón sería 0% *biobased* mientras un árbol sería el 100% *biobased* como indica la USDA [22]. Por lo cual, al cumplir con estos certificados se consigue un impacto mucho menor en el medio ambiente al emplear este tipo de resinas.



## **Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

En este último capítulo se tiene como objetivo, el resumen del proyecto y los límites encontrados para proponer diferentes proyectos que complementen la realización de este.

### ***7.1 CONCLUSIÓN DEL TRABAJO***

En este trabajo se ha realizado el diseño y un posterior estudio aerodinámico del carenado de la moto eléctrica del ISC. Cabe destacar el objetivo de minimizar la fuerza de arrastre sin considerar el efecto de la fuerza de lift en la pieza.

Tras partir de un diseño preliminar cuyos resultados aerodinámicos fueron satisfactorios, se modifica el diseño para sobre todo reducir el área frontal de esta primera versión. Los resultados de esta segunda versión son peores que los de la primera, siendo un diseño no válido y por tanto teniendo que modificarse para seguir manteniendo un área frontal reducida, pero manteniendo una geometría suave favoreciendo así una transición fluida del aire a través de la pieza. Finalmente se consigue este propósito, un diseño que a velocidad máxima del prototipo resulta ser hasta más de un 3% más eficiente que el diseño de la primera versión del mismo mientras que a velocidad media y velocidad de entrada y salida de recta se obtiene una mejora de entorno al 2%. Es preciso recordar que en la alta competición tener un prototipo más eficiente en recta permite un aumento considerable de velocidad punta en recta facilitando así los adelantamientos, por lo cual mejoras de orden del 2% resultan importantes. Estos resultados están relacionados con la disminución de la fuerza de arrastre, no teniendo en cuenta los valores del  $C_D$ , siendo este de 0,5 en su versión final, valor del estilo a los mostrados en la tabla 3.

De esta forma se puede considerar como satisfactorio el estudio aerodinámico realizado en este trabajo al cumplir con el objetivo marcado. De igual manera se considera satisfactorio el proceso de fabricación diseñado al encontrar un buen equilibrio entre impacto en el medio ambiente y calidad en las piezas fabricadas como se ha visto en el capítulo 6.

Pese a cumplir con todos los objetivos propuestos en el trabajo, queda mucho trabajo que no se ha realizado ni planteado en este documento. En el diseño y optimización de la pieza no se ha tenido en cuenta el resto de prototipo ni del piloto, siendo estos elementos que afectan claramente a la aerodinámica. Por otro lado, se ha utilizado únicamente un programa de simulación para los resultados aerodinámicos, no siendo comprobados los resultados por un prototipo a escala ensayado en un túnel de viento. Por último, el material compuesto empleado lleva poco tiempo en la industria siendo su desarrollo aún notorio para mejorar sus propiedades mecánicas. De esta forma se plantean una serie de trabajos futuros que tienen como objetivo complementar el estudio presentado.

## ***7.2 PROPUESTA DE TRABAJOS FUTUROS***

En un primer lugar resulta necesario el diseño y la simulación del carenado junto a todo el prototipo y el piloto para obtener unos resultados más cercanos a la realidad. De esta forma un correcto modelado del piloto en posición de recta, junto con todos los elementos de protección de este resulta necesario para este fin. Lo que se traduce en una geometría final a mallar mucho más compleja que la estudiada en este trabajo, siendo necesario una potencia de cálculo mayor para el correcto mallado y posterior simulación de dicho volumen fluido. Además, la licencia de estudiante no permitiría dicho mallado.

Por otro lado, la correcta correlación de los datos obtenidos por CFD con los datos obtenidos en los ensayos de prototipos resultan cruciales en los equipos, destinando así una gran cantidad de los recursos en el desarrollo y mejora constante de los túneles de viento empleados. De esta forma para comprobar los resultados computacionales, sería interesante la realización de un prototipo a escala para después realizar su ensayo aerodinámico en un túnel de viento correctamente sensorizado, siendo el costo económico de la instalación el principal problema de su realización.

Por último, la fibra de lino y su composición con una bio resina epoxi resulta algo novedoso en el sector. No existen apenas datos sobre la rigidez real de este compuesto ecológico. La caracterización de las propiedades mecánicas de este compuesto mediante ensayos de

resistencia, impacto, tracción flexión y fractura intra laminar, en función de las proporciones de fibra de lino y bio resina epoxi resulta vital para el correcto desarrollo de piezas de cada vez más responsabilidad estructural cuyo material sea este. De esta forma al tener las propiedades mecánicas se puede diseñar elementos de gran responsabilidad teniendo un impacto mucho menor en el medioambiente que el que se tiene actualmente.

## Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Prensa HONDA “Historia de Honda en la categoría máxima de MotoGP”, revista, Super7moto.com, Mayo 2020. <https://super7moto.com/directorio/revista/reportaje/15168-historia-de-honda-en-la-categoria-maxima-de-motogp.html>
2. Trevitt, A “MotoGP: The 2016 ducati Desmosedici GP”, revista, cycle word, Febrero 2016. <https://www.cycleworld.com/sport-rider/motogp-2016-ducatti-desmosedici-gp/>
3. Rodrigo, M “Alerones en MotoGP sí, pero con restricciones según el reglamento de 2017”, revista, Febrero 2017. <https://www.motorpasionmoto.com/motogp/el-reglamento-de-motogp-no-prohibe-los-nuevos-carenados>
4. Aymamí, J “Así es la GasGas de Moto3, gestionada por Jorge Martínez Aspar”, revista, solo moto, Noviembre 2020. <https://solomoto.es/asi-es-la-gasgas-de-moto3/>
5. Energica, “Energica the single manufacturer of the FIM Enel MotoE World Cup”, Energica. <https://www.energicamotor.com/motoe/>
6. Reglamento de Competición VI Edición MotoStudent, <http://www.motostudent.com/rules.html>
7. Ducati, “TECH SPECS Panigale V4 R” Ducati. <https://www.ducati.com/ww/en/racing/superbike/aruba-it-ducatti-bike-panigale-v4r>
8. Lanfrit, M “Best Practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with Fluent“, Febrero, 2005. <https://drive.google.com/file/d/0B9wOrrFpsUb3d1YydGpDYW9ReTg/edit?resourcekey=0-Q24uoWYFf4PflgS1T5HDOg>
9. Fernández Osmá, M “Flujo lamina y turbulento”, revista, Aerodinámica F, Octubre 2019. <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/10/flujo-laminar-y-turbulento/>
10. Grupo Termotecnia. Escuela Superior de Ingenieros “Fluidodinámica computacional (CFD)”. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4882/fichero/An%C3%A1lisis+del+sistema+de+ventilaci%C3%B3n+de+un+secadero+solar+mediante+técnica+fluidodin%C3%A1mica+computacional%252FCapitulo+5.+Fluidodin%C3%A1mica+Computacional.pdf>
11. Díaz Olmo, JM “Aerodinámica 3: Análisis de la capa límite y el efecto coanda”, blog Ángeles en la Cabeza, Diciembre 2017. <http://angelesenlacabeza.blogspot.com/2017/12/aerodinamica-3-analisis-de-la-capa.html>

12. Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería. “Fuerzas de arrastre y sustentación”, Asignatura de mecánica de fluidos. <https://qdoc.tips/e480-fuerzas-de-arrastre-y-sustentacion-pdf-free.html>
13. ANSYS, “Inlet Boundary Conditions”, Enero 2012.  
<https://drive.google.com/file/d/0B9wOrrFpsUb3VXpYwJBOZzFaVXc/edit?resourcekey=0-3BOB2HK29NfRlAtCaFbGvw>
14. Keating, M “Accelerating CFD Solutions”, ANSYS, 2011.  
<https://es.scribd.com/document/337161804/AA-V5-I1-Accelerating-CFD-Solutions>
15. Foale, T. (2002) “Motorcycle Handling and Chassis Design” (2º Edition) ISBN-8493328634, FOALE, A.E.
16. Lankideg, “Dt-600-3d-2”, Lankideg. <https://lankidego.com/impresion-3d/impresoras-3d/dt-600-3d-2/>
17. 3DWorks, “Altura de Capas y Resolución en la Impresión 3D”, 3DWorks.  
<https://www.3dworks.cl/post/altura-de-capas>
18. EasyComposites “Hand Laminating a carbon Fibre Part Directly into a 3D Printed Mould”, Febrero, 2021. <https://www.easycomposites.co.uk/learning/carbon-fibre-part-from-3d-printed-mould>
19. Naciones Unidas, “Objetivos de Desarrollo Sostenible”, Naciones Unidad.  
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
20. Redondo, M “Fibras naturales, una alternativa real a la fibra de carbono”, revista, HighMotor, Noviembre, 2020. <https://www.highmotor.com/fibras-naturales-alternativa-real-fibra-carbono.html>
21. Markaide, N, Boucher, V.M, Genua, A, Montes, S, Grande H.J,Redondo,A, “Composites termoestables reciclables derivados de textiles de desecho”, revista AEMAC, Junio, 2017.  
Redondo, M “Fibras naturales, una alternativa real a la fibra de carbono”, revista, HighMotor, Noviembre, 2020.  
<https://revista.aemac.org/materialescompuestos/article/download/144/94/>
22. USDA, “Understanding Biobased Content”, 2017.  
[https://www.biopreferred.gov/BPResources/files/UnderstandingBiobasedContent\\_2017.pdf](https://www.biopreferred.gov/BPResources/files/UnderstandingBiobasedContent_2017.pdf)