

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Diseño y análisis CFD del paquete aerodinámico de un monoplaza para la competición Time Attack Germany

Autor: Fernando Fernández García

Tutor: Sergio Esteban Roncero

Dpto. Ingeniería Aeroespacial
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Diseño y análisis CFD del paquete aerodinámico de un monoplaza para la competición Time Attack Germany

Autor:

Fernando Fernández García

Tutor:

Sergio Esteban Roncero

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Grado: Diseño y análisis CFD del paquete aerodinámico de un monoplaza para la competición
Time Attack Germany

Autor: Fernando Fernández García

Tutor: Sergio Esteban Roncero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A Patricia

A mis amigos

Agradecimientos

Probablemente el capítulo más difícil de realizar en todo el proyecto. Son muchas las personas a las que debo estar agradecido de presentar este proyecto, que representa el final una carrera que se ha realizado de forma discontinua, pero sin perder en ningún momento el apoyo de mis padres y el de toda mi familia. Es por ello que empiezo este capítulo agradeciéndoles a ellos todos los momentos compartidos durante estos años y la confianza ciega depositada en mí.

Mención especial merece Patricia, encargada de motivarme y responsable de que apruebe casi la mitad de los créditos de la carrera. Persona de la que he aprendido mucho y seguiré aprendiendo.

A ARUS, por todos los momentos inolvidables que sin duda han forjado la persona que soy a día de hoy, por todo lo aprendido tanto a nivel técnico como personal, y por permitirme conocer a personas con una capacidad de sacrificio increíble y que espero poder seguir considerando la parte de familia que uno elige.

A todos mis amigos, por haber demostrado que puedo contar con ellos a pesar de la distancia.

Y por supuesto a Sergio Esteban, que ha sido amigo antes que tutor, por el incansable apoyo al equipo ARUS y por la paciencia mostrada en la supervisión de este proyecto.

Fernando Fernández García

Wiesbaden, 2020

Resumen

Este proyecto resume el proceso de diseño y análisis del paquete aerodinámico de un monoplaza de la BEC Category, siguiendo la normativa de la competición alemana Time Attack Germany. En concreto, se crea una carrocería, un splitter, un difusor y un alerón trasero.

La principal motivación que ha llevado a elegir este trabajo ha sido la de realizar un estudio aerodinámico en CFD en una categoría en la que no se invierte dinero en el desarrollo de la aerodinámica. De esta forma se puede marcar una gran diferencia en el rendimiento del monoplaza en la competición en relación a los monoplazas que existen en la actualidad en el mercado, pudiendo así sembrar la base para fabricarlo en un futuro y comercializarlo.

Esta memoria está dividida en cinco partes bien diferenciadas. En la primera de ellas se introducirá la categoría a la que pertenece el monoplaza, la competición y circuitos donde se incluiría, además de un breve marco teórico y la selección de softwares para el modelado, análisis y simulación. En el capítulo posterior, se definirán los objetivos del proyecto tras recopilar las normas clave del reglamento de la competición y las características y dimensiones de las que parte el diseño. La tercera parte, y donde reside el grueso del trabajo, se detallará el completo proceso de diseño y análisis CFD, así como de los resultados de tal estudio y la posterior simulación en el software de Tiempo por Vuelta. De esta forma se podrán comparar las diferentes alternativas y elegir el diseño final que será expuesto en el cuarto capítulo. Por último, en la quinta parte que daría la conclusión al escrito, se reflexionará sobre los objetivos que han sido cumplidos y se propondrán nuevas vías de mejora o posibles trabajos futuros.

Abstract

This project summarizes the design and analysis process of the aerodynamic package of a BEC Category single-seater car, following the regulations of the German Time Attack Germany competition. Specifically, these four aerodynamic elements will be created: a bodywork, splitter, difusor and rear wing.

The main motivation for choosing this topic was to carry out an aerodynamic study in CFD in a category in which no money is invested in the development of aerodynamics. In this way, a great difference can be made in the performance of the car in competition in relation to the cars that currently exist on the market, thus being able to create the base to manufacture it in the future and market it.

This report is divided into five distinct parts. In the first one, the category to which the car belongs, the competition and circuits where it would be included will be introduced, as well as a brief theoretical framework and the selection of software for modeling, analysis and simulation. In the later chapter, the objectives of the project will be defined after compiling the key rules of the competition regulations and the characteristics and dimensions from which the design starts. The third part, and where the bulk of the work resides, will detail the complete CFD design and analysis process, as well as the results of such study and the subsequent simulation in the Time per Lap software. In this way, it is possible to compare the different alternatives and choose the final design that will be exposed in the fourth chapter. Finally, in the fifth part that would give the conclusion to the writing, the objectives that have been fulfilled will be reflected and new ways of improvement or possible future work will be proposed.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xix
Notación	xxii
1 Introducción	23
1.1 <i>BEC Category</i>	23
1.1.1 Estado del arte	25
1.1.2 Circuito	27
1.2 <i>Marco teórico y definiciones</i>	28
1.2.1 Definiciones	28
1.3 <i>Software</i>	33
1.3.1 Modelado 3D	33
1.3.2 Análisis CFD	34
1.3.3 Tiempo por vuelta	35
1.3.4 JavaFoil.	35
2 Objetivos del Proyecto	37
2.1 <i>Normativa</i>	37
2.2 <i>Características generales del monoplaza.</i>	38
2.3 <i>Objetivos</i>	38
2.4 <i>Procedimiento para llevar a cabo el Proyecto</i>	38
3 Diseño y Análisis	41
3.1 <i>Carrocería</i>	41
3.1.1 Diseño inicial: versión V1	43
3.1.2 Versión V2	53
3.1.3 Iteración sobre Versión V2	55
3.2 <i>Difusor y Splitter</i>	66
3.2.1 Iteraciones sobre el <i>splitter</i> .	67
3.2.2 Iteraciones sobre el difusor.	69
3.3 <i>Alerón trasero</i>	71
4 Coche completo	75
4.1 <i>Modelado.</i>	75
4.2 <i>Análisis.</i>	77
4.3 <i>Resultado.</i>	78
5 Conclusión	82
5.1 <i>Diseño CAD de una carrocería y componentes aerodinámicos de bajo presupuesto.</i>	82

5.2	<i>Análisis en CFD y desarrollo iterativo del diseño.</i>	82
5.3	<i>Simulación de tiempo por vuelta y comparación con datos de carrera.</i>	83
5.4	<i>Posibles proyectos</i>	83
5.4.1	Proyectos con la fabricación como finalidad.	83
5.4.2	Proyectos para mejorar las prestaciones del monoplaza.	83
Referencias		85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación de transmisión en cada marcha.	52
Tabla 2. Resultados de la simulación.	65
Tabla 3. Resultados obtenidos.	69
Tabla 4. Resultados para distintos ángulos.	70
Tabla 5. Resultados para 4°.	70
Tabla 6. Resultados obtenidos para cada perfil.	73
Tabla 7. Iteraciones realizadas.	78
Tabla 8. Resultados obtenidos.	80
Tabla 9. Tiempos por vuelta obtenidos en comparación con resultados reales de la competición.	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Coche de la marca alemana Performer by Elkmann para esta categoría.	24
Figura 2. Radical SR3 XX	24
Figura 3. <i>BEC 1000</i> de la categoría de Ultraligeros del <i>Time Attack</i> alemán.	25
Figura 4. Performer 1000 by Elkmann	25
Figura 5. Superkart Anderson.	26
Figura 6. Superkart PVP	26
Figura 7. Pacemaker Revolution	27
Figura 8. Circuito de Nürburgring actual (negro) sobre el antiguo (gris). En rojo el <i>GP Strecke</i> .	28
Figura 9. Chasis tubular.	29
Figura 10. Chasis monocasco.	29
Figura 11. Splitter en un coche de carreras.	30
Figura 12. Funcionamiento del difusor.	30
Figura 13. Elementos que caracterizan el perfil aerodinámico.	31
Figura 14. Componentes de la fuerza aerodinámica y las fuerzas a las que se oponen.	32
Figura 15. Batalla y ancho de vía.	33
Figura 16. Captura de la interfaz de CATIA V5.	34
Figura 17. Captura de la interfaz de STAR CCM+.	34
Figura 18. Captura de la interfaz de OptimumLap.	35
Figura 19. Captura de la interfaz de JavaFoil.	36
Figura 20. Modelo CAD del chasis del modelo comercial Performer 1000 [3].	42
Figura 21. Vista del modelo de dimensionado del chasis.	42
Figura 22. Perfil del modelo de dimensionado del chasis.	43
Figura 23. Diseño V1.	43
Figura 24. Uso de la herramienta <i>Close Surface</i> para el carenado del motor.	44
Figura 25. Uso de la herramienta <i>Fill</i> (superficies) para crear un límite de extrusión.	45
Figura 26. Dominio fluido.	46
Figura 27. Detalle de la rueda delantera izquierda del resultado obtenido con <i>Surface Wrapper</i> .	46
Figura 28. Malla refinada cerca de las superficies del monoplaça.	49
Figura 29. Malla refinada cerca de las superficies del monoplaça.	49
Figura 30. Distribución de presiones.	50

Figura 31. Prueba en banco de potencia de diferentes motocicletas deportivas.	51
Figura 32. Curva de par del motor.	52
Figura 33. Relación final de cambio.	53
Figura 34. Vista de perfil del modelo CAD de la versión V2.	54
Figura 35. Vista en perspectiva del modelo CAD de la versión V2.	54
Figura 36. Distribución de presiones.	55
Figura 37. Oscilaciones en los resultados.	56
Figura 38. Configuración del túnel de viento.	56
Figura 39. Bloque usado.	57
Figura 40. Evolución de los coeficientes de resistencia y sustentación.	58
Figura 41. Evolución de los residuos.	59
Figura 42. Ley de la Pared.	60
Figura 43. Wall Y+ sobre la superficie del modelo.	61
Figura 44. Wall Y+ sobre la superficie del modelo.	61
Figura 45. Evolución de los coeficientes de resistencia (rojo) y sustentación (verde).	62
Figura 46. Evolución de los residuos de la solución.	62
Figura 47. Versión V2 con neumáticos.	63
Figura 48. Vista en planta del modelo anterior (izquierda) y el modelo a simular en este apartado.	63
Figura 49. Configuración de la región correspondiente a la rueda delantera izquierda.	64
Figura 50. Evolución de los coeficientes de resistencia (rojo) y sustentación (verde).	65
Figura 51. Evolución de los residuos.	65
Figura 52. Distribución de presiones sobre el carenado del motor.	66
Figura 53. Modelo CAD.	67
Figura 54. Nuevo <i>Surface Control</i> .	68
Figura 55. Zonas sobre las que se realizan los controles volumétricos.	68
Figura 56. Detalle de <i>splitter</i> de 110 mm.	69
Figura 57. Distintas configuraciones del difusor.	70
Figura 58. Vista inferior del modelo CAD con difusor de 4° de inclinación.	71
Figura 59. Barrido de simulaciones variando el coeficiente de sustentación negativo.	72
Figura 60. Perfil NACA 20420.	73
Figura 61. Perfil NACA 22420.	73
Figura 62. Modelo CAD del alerón.	74
Figura 63. Vista de perfil del modelo CAD completo.	75
Figura 64. Vista en planta del modelo CAD completo.	76
Figura 65. Vistas en alzado y alzado posterior del modelo CAD completo.	76
Figura 66. Vista en perspectiva del modelo CAD completo.	76
Figura 67. Vista en perspectiva posterior del modelo CAD completo.	77
Figura 68. Detalle de la zona de aplicación del control volumétrico del mallado.	77
Figura 69. Valor de y^+ sobre la superficie del modelo. Vista superior.	78

Figura 70. Valor de y^+ sobre la superficie del modelo. Vista inferior.	79
Figura 71. Evolución de los coeficientes de resistencia y sustentación.	79
Figura 72. Evolución de los residuos de la solución.	80
Figura 73. Captura de un diseño preliminar con el fin de reducir la resistencia aerodinámica.	84

Notación

CAD	Computer-aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
c_D	Coefficiente de resistencia
c_L	Coefficiente de sustentación
u_τ	Velocidad de fricción
Y^+	Distancia a la pared adimensional
ρ	Densidad
v	Velocidad
A	Área
L	Fuerza de sustentación
D	Fuerza de resistencia

1 INTRODUCCIÓN

"Pienso en mí como un niño cumpliendo su sueño. Un sueño que se hizo más y más grande... hasta construir un coche que no tenga que frenar en las curvas, que vuele sin dejar el suelo".

- Enzo Ferrari -

Antes de entrar en materia, es importante introducir el contexto del proyecto, en qué categoría se sitúa el coche prototipo de estudio en el mundo del Motorsport y para qué circuito en concreto se va a analizar el tiempo por vuelta. El prototipo para el que se ha diseñado el paquete aerodinámico es un coche de la *BEC Category*, una categoría principalmente amateur cuya filosofía principal es reducir el coste del monoplace tanto como sea posible brindando unas prestaciones parecidas a las de un coche de Fórmula 4. A partir de un pequeño Estado del Arte, se podrá ver qué línea siguen los paquetes aerodinámicos de los coches de la *BEC Category* que están en el mercado.

A continuación, se introducirá un breve marco teórico que describa los aspectos teóricos claves que han servido como base para los análisis aerodinámicos, ya que la justificación de los parámetros usados en las simulaciones se explicará con más detenimiento en el capítulo de Diseño y Análisis.

Por último, hoy en día existen múltiples programas en el mercado que proporcionen solución de ingeniería, pero dado que no son todos iguales, se justificará la selección de software que se ha usado para cada sección del proyecto.

1.1 BEC Category

La *BEC Category* o *Bike-engined Car*, es una categoría de coches de circuito en la que se usan motores de motocicleta. Estos coches prototipo son ultraligeros, tienen un peso por debajo de los 300kg, pero gracias a motores de 1000 cc, 4 cilindros en su mayoría, consiguen prestaciones parecidas a las de un coche de Fórmula 4 o GT. Alcanzan una velocidad punta de aproximadamente 240 km/h, pueden acelerar de 0 a 200km/h en menos de 12 segundos (0,5 G aproximadamente) y consiguen aceleraciones laterales de 2,4G. El objetivo principal de estos monoplazas, es conseguir un alto rendimiento a bajo coste, el precio está por debajo de los 30.000 €. Otra alternativa mucho más costosa, que, a pesar de llevar motor de motocicleta, no tiene la misma

filosofía que la *BEC Category*, son los coches *Radical Sportcars*, cuyos coches más modernos se venden por encima de los £100.000.



Figura 1. Coche de la marca alemana Performer by Elkmann para esta categoría.



Figura 2. Radical SR3 XX

Los *Bike-engined Car* son conocidos en Estados Unidos, Inglaterra y Alemania. En este último país, se usan para las competiciones de *Time Attack*, donde los coches compiten contra reloj y sin competidores en pista, es decir, gana el que dé la vuelta más rápida. A diferencia de las competiciones de *Hill Climb*, que se practican en carreteras de montaña con gran pendiente y que también son a contrarreloj, el *Time Attack* sólo compite en circuitos. Esta modalidad se originó en Japón en los años 80, como una competición de coches preparados, cuyo objetivo era mostrar la eficacia de estas preparaciones de coches de calle. A día de hoy sigue siendo una competición principalmente *amateur*, en la que cabe destacar que, aunque cada federación tiene su propio reglamento, las reglas son casi exclusivamente sobre seguridad, lo que permite una gran flexibilidad en el diseño. Esto hace la competición a nivel técnico muy atractiva e interesante. El resultado es una gran variedad de gamas de coches con altas prestaciones, teniendo cada participante su propia versión de cómo sacar provecho de una normativa tan flexible.



Figura 3. BEC 1000 de la categoría de Ultraligeros del *Time Attack* alemán.

1.1.1 Estado del arte

El primer paso del proceso de diseño ha sido la documentación, es decir, buscar información de cuáles el paquete aerodinámico de los coches que están en el mercado. Para ello, se han elegido los coches con mejores resultados de la categoría de Ultraligeros del *Time Attack Germany*, que son en la temporada 2020: Performer BEC 1000, Superkart Anderson, Superkart PVP y Pacemaker Revolution.

En general, con el poco presupuesto con el que se cuenta para diseñar y fabricar este tipo de monoplasas, no se suele invertir una gran cantidad en el desarrollo de los elementos aerodinámicos. Se caracterizan por llevar una carrocería que, a parte de cubrir el chasis, tiene sólo un fin estético. Por otro lado, el alerón trasero no parece que pueda generar mucha carga aerodinámica, por lo que se podría decir que el único elemento que trabaja esencialmente en la generación de *Downforce* es el fondo plano.

- Performer BEC 1000:



Figura 4. Performer 1000 by Elkmann

- Superkart Anderson:



Figura 5. Superkart Anderson.

- Superkart PVP:



Figura 6. Superkart PVP

- Pacemaker Revolution:



Figura 7. Pacemaker Revolution

1.1.2 Circuito

El *Time Attack Germany* se desarrolla en distintos circuitos no sólo de Alemania sino también de Holanda, pero a fin de simplificar los pasos del diseño, sólo se ha utilizado el famoso Circuito de Nürburgring para calcular el tiempo por vuelta, sobre el trazado de Gran Premio (5,1 km). Este circuito se concibió como lugar de pruebas de los automóviles alemanes, pero en el 1927 comenzó a albergar el Gran Premio de Alemania. El circuito en su origen estaba compuesto por dos secciones, la sur (*Südschleife*) y la norte (*Nordschleife*, también conocido como Infierno Verde), que está considerado como el circuito más agotador y difícil del mundo. Debido al peligro que suponía el circuito a las tan altas velocidades de la Fórmula 1, el Gran Premio de Alemania se mudó temporalmente al Circuito de Hockenheimring en el 1970. En 1984 se inauguró la nueva pista del Gran Premio (*GP Strecke*), sobre el antiguo *Südschleife*, de sólo 4,5 km, que se amplió en el 2002 a 5,1 km y que es actualmente el circuito que se usa para la Fórmula 1. Esta pista es también la que alberga la competición de *Time Attack Germany*.

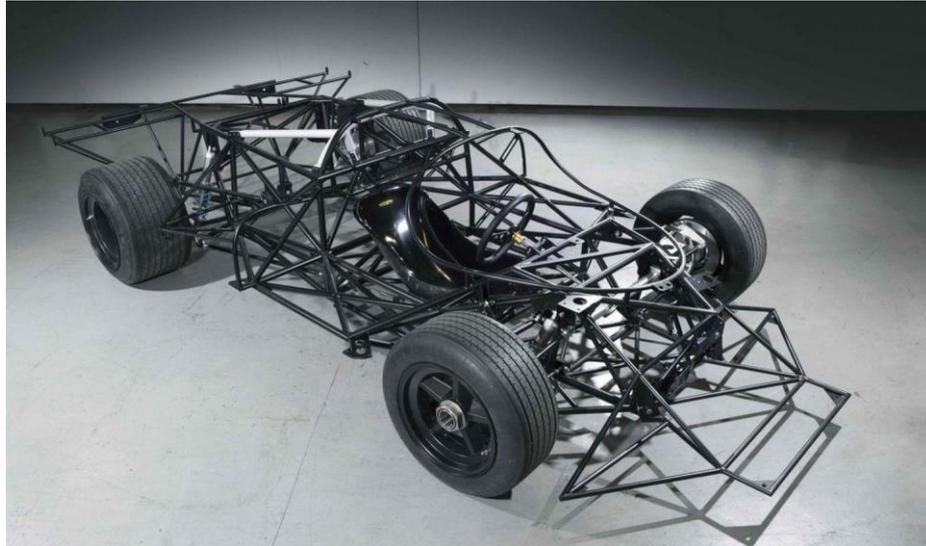


Figura 9. Chasis tubular.



Figura 10. Chasis monocasco.

- **Splitter:** es un elemento aerodinámico que sirve para equilibrar la distribución delantera y trasera de *Downforce*. Este elemento consiste en una parte plana que se coloca para aprovechar la zona de alta presión que se genera en la parte delantera del coche, al incidir el aire. Esta zona de alta presión que provocará cierto Drag, al incidir sobre la placa generará una componente vertical que será la sustentación negativa.

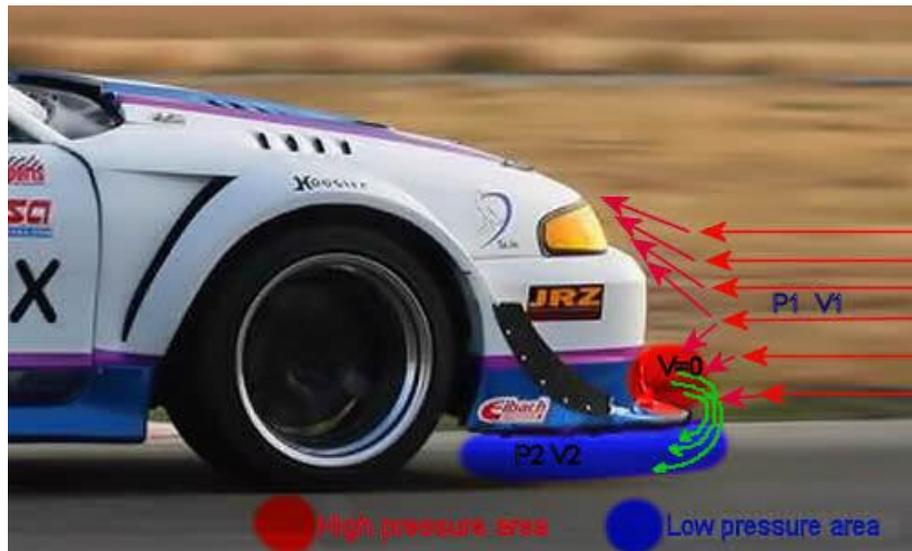


Figura 11. Splitter en un coche de carreras.

- **Difusor:** se le llama así a la terminación del fondo plano, en la cual se aumenta el volumen entre la carretera y el coche. Si la función del fondo plano es acelerar el aire para tener una zona de baja presión respecto a la parte de arriba del coche, lo que generará Downforce, el objetivo del difusor es gradualmente ir frenando el fluido, mejorando así la transición entre el fluido de alta velocidad y el aire más lento del ambiente.

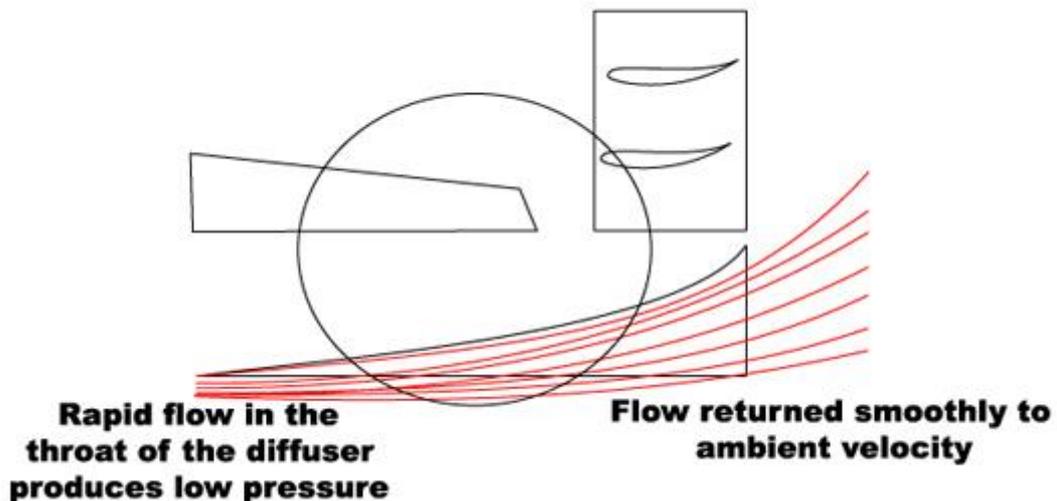


Figura 12. Funcionamiento del difusor.

- **Ala:** se le llama así al alerón del monoplaza por tener la misma misión que el ala de un avión, generar fuerzas aerodinámicas de sustentación, en este caso negativa, al incidir sobre ellos una corriente de aire.
- **Perfil aerodinámico:** nombre que recibe la forma que tiene una sección de un ala de un avión. En la imagen puede verse un perfil aerodinámico junto a algunos de los elementos que lo caracterizan y que se definen más adelante. Normalmente se hablará de perfil cuando se esté hablando en términos bidimensionales.

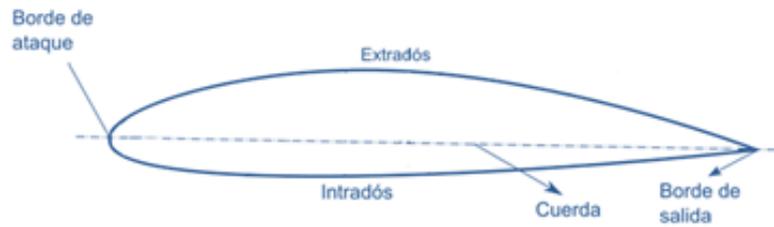


Figura 13. Elementos que caracterizan el perfil aerodinámico.

- **Extradós:** en aeronáutica, recibe este nombre la superficie curva superior del perfil aerodinámico en la que se crea una zona de baja presión estática y por tanto mayor velocidad del aire.
- **Intradós:** por el contrario, recibe este nombre la superficie curva inferior del perfil aerodinámico en la que se crea una zona con mayor presión que la generada en el extradós y consecuentemente menor velocidad.
- **Borde de ataque:** nombre con el que se denomina la parte del perfil con la que primero contacta el aire para dividirse en dos flujos, uno que discurre por el extradós, y otro que discurre por el intradós.
- **Borde de salida:** punto del perfil, situado en la parte posterior del mismo, en el que se unen el flujo de aire del extradós con el del intradós.
- **Cuerda:** elemento geométrico característico de los perfiles aerodinámicos que se obtiene uniendo los bordes de ataque y de salida de los mismos.
- **Etapa:** se llama de esta manera a cada una de las piezas similares al ala de un avión que forman el alerón, delantero o trasero de un coche. Está formada por la prolongación de un perfil aerodinámico, y en los coches suele encontrarse entre dos paneles o placas de formas muy diversas que reciben el nombre de endplates. Dicho de otra manera, es la propagación tridimensional de un perfil aerodinámico.
- **Downforce:** Fuerza aerodinámica que se genera en un perfil aerodinámico al incidir una corriente. La incidencia de la corriente produce dos fuerzas aerodinámicas, la sustentación, L , y la resistencia, D . En los coches de competición se desea generar una fuerza que lo empuje hacia el suelo, por lo que se colocan los perfiles aerodinámicos al contrario de cómo se colocan en las alas de los aviones, de manera que la fuerza de sustentación la generan hacia abajo. Esta fuerza de sustentación orientada hacia el suelo es lo que recibe el nombre de Downforce y será comúnmente usada a lo largo del documento.

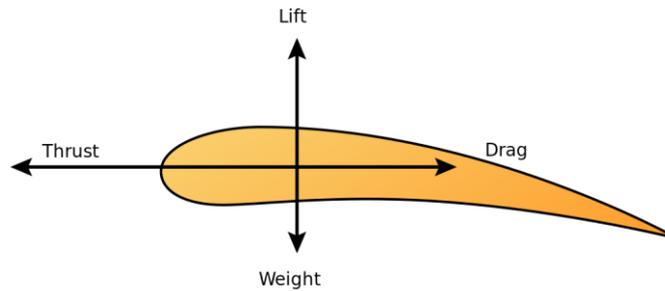


Figura 14. Componentes de la fuerza aerodinámica y las fuerzas a las que se oponen.

- Coefficiente de sustentación:** es una cantidad adimensional que se usa para cuantificar la sustentación de un objeto en un medio fluido. Se busca una fuerza de sustentación negativa (*Downforce*), por lo que el coeficiente de sustentación será negativo para un monoplaza. La fuerza de sustentación tiene la expresión siguiente: $L = \frac{1}{2} \rho v^2 c_L A$; por lo que el coeficiente de sustentación c_L , vendrá determinado por $c_L = \frac{2L}{\rho v^2 A}$.
- Drag:** es la otra componente de la fuerza aerodinámica que se genera en un perfil al incidir la corriente. Esta es la fuerza de resistencia y se opone al avance del vehículo, es decir tiene sentido contrario a la velocidad.
- Coefficiente de resistencia:** es una cantidad adimensional que se usa para cuantificar la resistencia de un objeto en un medio fluido. Si la fuerza de resistencia tiene esta expresión: $D = \frac{1}{2} \rho v^2 c_D A$; el coeficiente de resistencia, c_D , se define como: $c_D = \frac{2D}{\rho v^2 A}$. Para el caso de vehículos, el área A es el área frontal proyectada de éste. $c_D = f(Re)$, por lo que depende de la viscosidad cinemática, la velocidad y una escala de longitud característica del objeto. En un flujo compresible como el aire, c_D es también función de *Mach*.
- Ancho de vía:** se define como la distancia entre ruedas del mismo eje, tomada entre los planos centrales de las mismas. Señalar que la vía de los ejes delantero y trasero de un vehículo no tiene por qué ser la misma.
- Batalla:** hace referencia a la distancia entre los ejes delantero y trasero del coche.

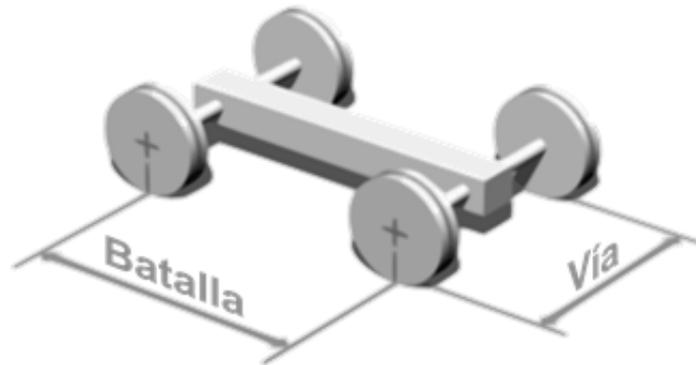


Figura 15. Batalla y ancho de vía.

- **CAD:** *Computer-Aided Design*, en español Diseño Asistido por Ordenador, es el uso de ordenadores para ayudar en la creación, modificación, análisis u optimización de un diseño. El software CAD se utiliza para aumentar la productividad del diseñador, mejorar la calidad del diseño, mejorar las comunicaciones a través de la documentación y crear una base de datos para la fabricación.
- **CFD:** *Computer Fluid Dynamics*, Mecánica de Fluidos Computacional, es una rama de la Mecánica de fluidos en la que se utilizan métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de fluidos. En el Anexo I se explicará más detalladamente estos métodos numéricos.

1.3 Software

Hay una gran variedad de softwares en el mercado, sobretodo de CAD, por ello antes de comenzar el proyecto se tiene que hacer una selección de los programas que se van a utilizar.

1.3.1 Modelado 3D

Para modelar el coche y el paquete aerodinámico se ha usado Catia V5, programa que se desarrolló inicialmente para la industria aeronáutica. La razón por la que se ha elegido este software es, por un lado, por ser sobre el que se imparten clases en el grado de Ingeniería Aeroespacial, y por otro por la experiencia obtenida usándolo durante varios años en el equipo de Formula Student ARUS.

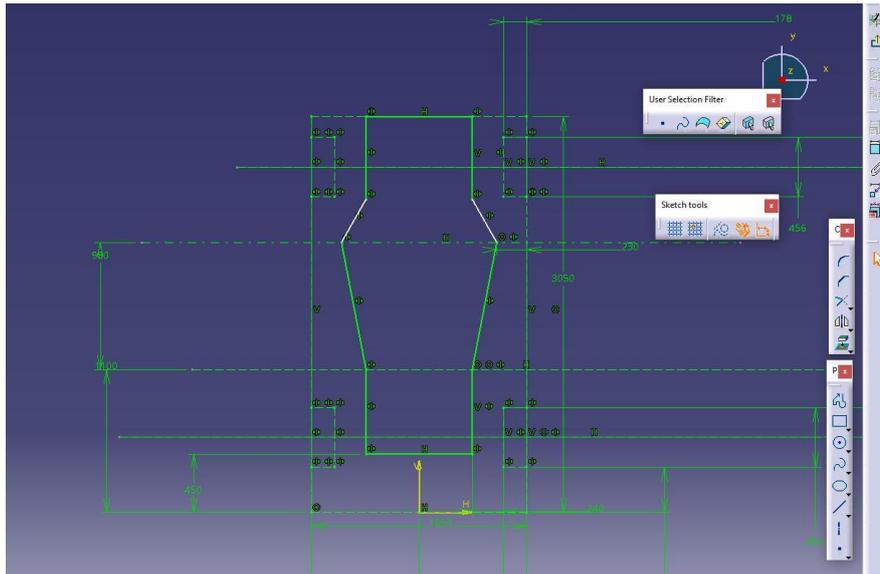


Figura 16. Captura de la interfaz de CATIA V5.

1.3.2 Análisis CFD

El criterio prioritario para la elección del software de análisis CFD ha sido la experiencia. Tras haber utilizado anteriormente ANSYS Fluent y Star CCM+, se eligió hacer el proyecto con este último porque parecía más fácil hacer converger los análisis de modelos con geometrías muy complejas, como ocurre con el modelo CAD del monoplaza.

Para el diseño del alerón delantero, se ha usado además otro programa. Para el estudio de este componente se ha utilizado el software JavaFoil, que realiza un cálculo en 2D sobre un perfil aerodinámico establecido, de esta forma se puede seleccionar el perfil que mejores resultados obtenga.

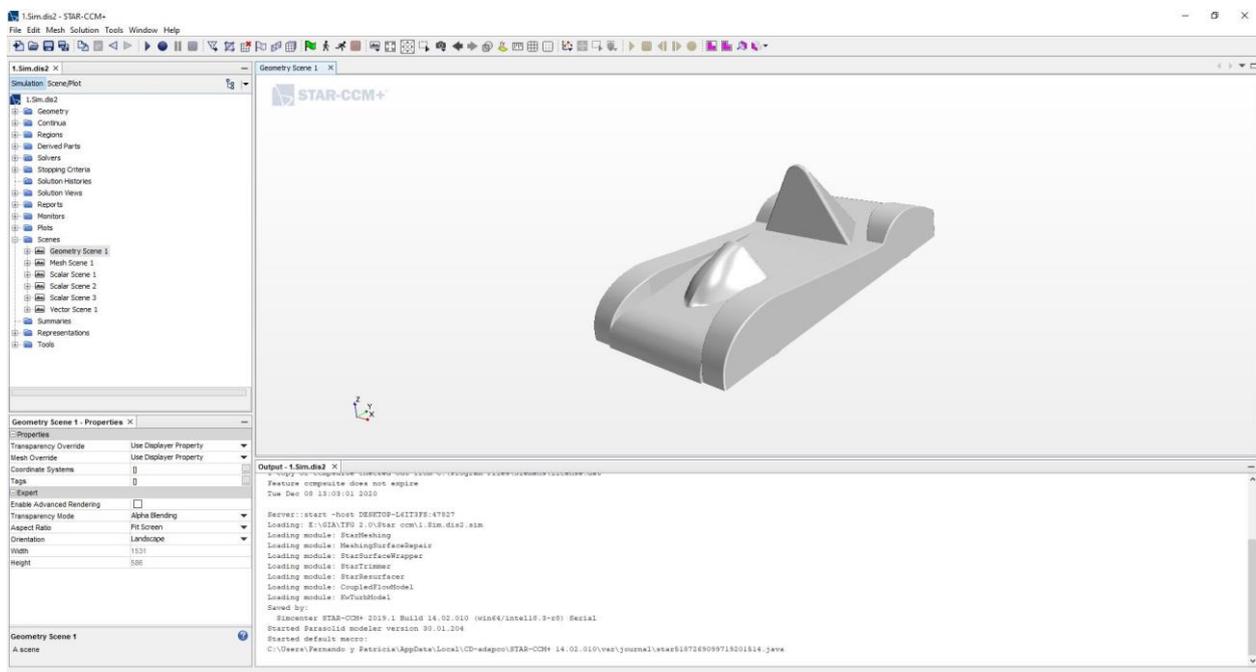


Figura 17. Captura de la interfaz de STAR CCM+.

1.3.3 Tiempo por vuelta

En la industria del Motorsport, los equipos con mayores recursos desarrollan sus propios programas de simulación de tiempo por vuelta, totalmente personalizados a los parámetros de sus coches. Este tipo de programas realizan una simulación simplificada del coche en un determinado circuito y estiman el tiempo que tardaría en dar una vuelta. Teniendo en cuenta que el objetivo del diseño es conseguir un monoplace rápido para el *Time Attack*, es importante hacer este tipo de simulaciones para justificar los diseños previamente a ser fabricados. El software que se ha utilizado es el Optimum Lab de Optimum G, que es un programa bastante sencillo. Sin embargo, es un software libre, por lo que el criterio ha sido que era el único al alcance.

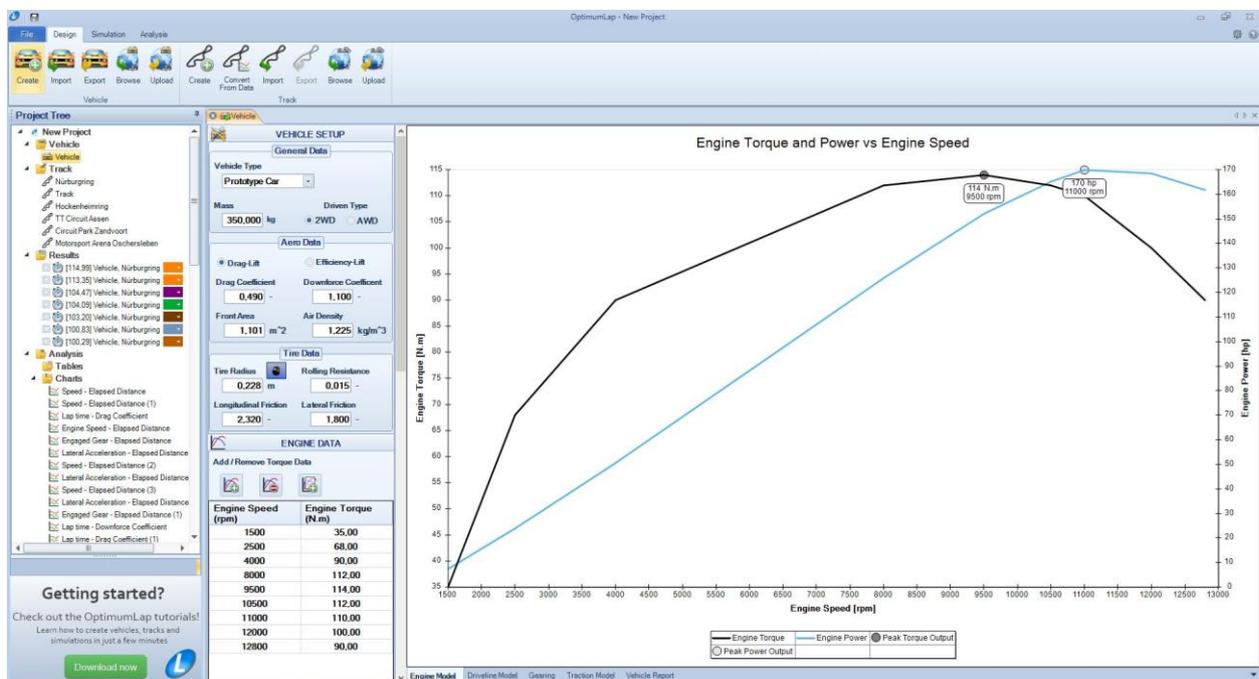


Figura 18. Captura de la interfaz de OptimumLap.

1.3.4 JavaFoil.

Software libre de análisis de perfiles aerodinámicos. El programa realiza un cálculo en 2D de las fuerzas ejercidas por un fluido de propiedades a especificar sobre un perfil en concreto en un rango de ángulos de ataque y a distintos números de Reynolds. Permite la configuración sencilla del perfil, además de la exportación de la geometría a un programa de CAD como CATIA V5. Debido al número de posibles combinaciones y al tiempo requerido para analizar en CFD cada una de ellas, este programa resulta para la elección del perfil.

JavaFoil

Geometría | Modificar | Diseñar | Velocidad | Campo fluido | Capa Límite | Polar | Aircraft | Opciones

Geometría del perfil

Nombre: NACA 20420

Coordenadas:

1,00116487	0,00174731
1,00056749	0,00233780
0,99877570	0,00410442
0,99579053	0,00703264
0,99161376	0,01109841
0,98624798	0,01626841
0,97969674	0,02250039
0,97196466	0,02974358
0,96305756	0,03793924
0,95298268	0,04702115
0,94174880	0,05691629
0,92936648	0,06754549
0,91584817	0,07882411
0,90120847	0,09066274
0,88546426	0,10296796
0,86863492	0,11564303
0,85074251	0,12858857
0,83181203	0,14170330

Borrar

decimal digits: 8

Crear un perfil NACA:

Familia: NACA 4 dígitos (e.g. 2412)

Numero de Puntos: 121 [-]

Espesor max t/c: 20 [▲▼] [%]

Situación del espesor max xt/c: 30 [▲▼] [%]

Curvatura max f/c: 20 [▲▼] [%]

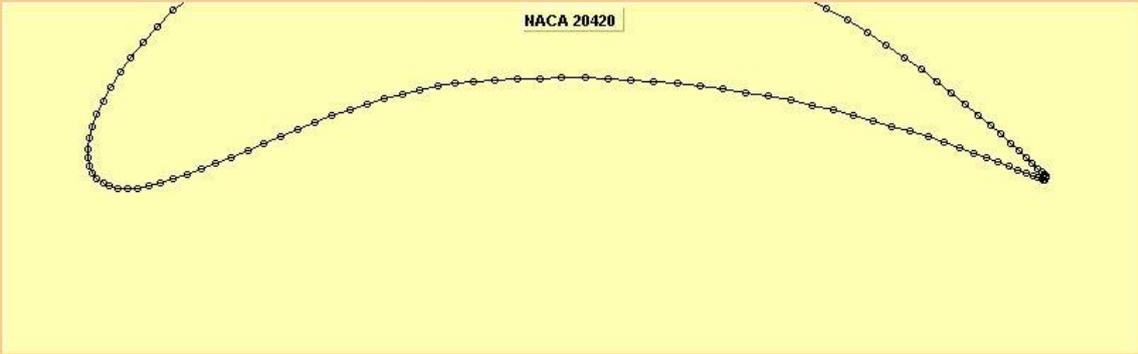
Situación de la curvatura max xf/c: 40 [▲▼] [%]

0 [▲▼] [%]

Modificar el perfil NACA cerrando el borde de salida

Es una familia de proposito general

Crear un perfil



NACA 20420

Para los siguientes análisis el borde de salida debería ser cerrado.

Actualizar vista | Copiar (Texto) | Pegar (Texto) | Abrir... | Guardar... | Imprimir... | Compare...

Figura 19. Captura de la interfaz de JavaFoil.

2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

“Am Anfang schaute ich mich, konnte aber den Wagen, von dem ich träumte, nicht finden. Also beschloss ich, ihn mir selbst zu bauen.”.

"Al principio busqué yo mismo, pero no pude encontrar el coche con el que estaba soñando. Así que decidí construirlo yo mismo".

- Ferdinand Porsche

En este capítulo se definen los objetivos del proyecto, concretamente los objetivos del diseño. Previamente se contextualiza en los dos primeros capítulos la motivación general de llevar a cabo el proyecto. En el tercer capítulo se exponen los objetivos principales para exponer en un cuarto capítulo los procedimientos a seguir para el cumplimiento de los mismos.

2.1 Normativa

Esta competición se caracteriza por las escasas restricciones a nivel de diseño. Son sólo regulaciones que garanticen la seguridad del piloto [1]. Estos puntos siguientes son las normas que corresponden a la aerodinámica del monoplace y que se han usado para restringir el diseño del paquete.

- Los *canards*, el *splitter* delantero, el difusor, el *spoiler* y fondo plano pueden sobresalir un máximo de 300 mm por encima del contorno del vehículo en la parte delantera, lateral y trasera.
- El *spoiler* puede sobresalir del techo 250 mm y la carrocería 150 mm lateralmente.
- El *spoiler* puede ser ajustable durante la conducción, siempre que mantenga las distancias permitidas al cuerpo en su recorrido.
- Se permite el uso de un fondo plano cerrado.

A la vista de la normativa, la verdadera limitación de diseño viene impuesta por los costes de fabricación. No sólo debe tenerse en cuenta un precio final del producto muy reducido, también el bajo número de prototipos fabricados al año. Esto limita los recursos disponibles para la fabricación del utillaje necesario. Por otro lado, esto mismo, junto al reducido tamaño del prototipo, hace posible su fabricación en un lugar de tamaño similar al de un garaje, con una inversión inicial muy baja.

2.2 Características generales del monoplaza.

La normativa de la categoría admite una libertad considerable en el diseño del prototipo, pero se encuentran las siguientes características en común:

- Motor y transmisión: se emplean motores de motocicleta de 4 cilindros de 1000cc con una potencia de alrededor de 180 cv. La transmisión se realiza mediante un sistema de cadena piñon-corona, similar al empleado en la motocicleta. A menudo se evita el uso de un diferencial trasero para reducir costes.
- Chasis: multitubular de acero, de fabricación totalmente artesanal. Debe incluir un arco de seguridad que proteja al piloto en caso de vuelco.
- Suspensión: en el eje delantero se emplea un esquema de suspensión independiente de doble trapecio. El eje trasero carece de sistema de suspensión, similar al empleado en karts.
- Frenos: sistema de discos y pinzas, empleándose en el eje trasero un solo disco en el eje. La actuación carece de cualquier sistema de asistencia.
- Carrocería: de fabricación artesanal en fibra de vidrio.

Es en el último punto donde aparece la motivación principal del proyecto, pues queda de manifiesto en detalles como el uso de un perfil alar prácticamente simétrico para el alerón que el diseño de la carrocería se ha realizado sin un estudio aerodinámico. Esto, junto con la velocidad media alcanzada por los prototipos de 160 km/h, indica que existe un gran margen de mejora en las prestaciones del monoplaza si se empleara un kit aerodinámico debidamente desarrollado, incluso si existen grandes limitaciones en el presupuesto disponible.

2.3 Objetivos

Tras definir el tipo de monoplaza para el que se va a diseñar el paquete aerodinámico, la normativa que debe cumplir y las características del diseño inicial y del monoplaza, se llega a uno de los puntos fundamentales del Proyecto, que es la definición de los objetivos, ya que es lo que influirá en cómo se elaboran los diseños, y los criterios de selección de estos a la hora de comparar los resultados.

Los objetivos del Proyecto se describen a continuación:

- Diseño de una carrocería usando software CAD cumpliendo el requisito de tener una fabricación de bajo presupuesto.
- Estudio en CFD de la carrocería e implementación y análisis iterativo de los diferentes elementos aerodinámicos.
- Simulación de tiempo por vuelta de cada diseño y comparación con los datos conocidos de otros prototipos de la misma categoría.

2.4 Procedimiento para llevar a cabo el Proyecto

Los pasos que se han llevado a cabo durante el proceso de diseño han sido: en primer lugar, elaborar un diseño inicial en Catia V5, realizar sobre éste una simulación en CFD usando el programa Star CCM+ y por último, calcular el tiempo por vuelta en el circuito en Optimum Lab. Tras estos tres pasos, se ha ido iterando hasta conseguir los objetivos del diseño.

En el caso del alerón trasero, se ha empleado el software JavaFoil para la obtención del perfil alar. Posteriormente se ha analizado dicho alerón junto con el resto del modelo para obtener los datos necesarios para el análisis de tiempo por vuelta del modelo final y poder compararlo con datos existentes de otros prototipos.

3 DISEÑO Y ANÁLISIS

“Form follows function”.

- Louis Sullivan -

Como se comentó al final del capítulo anterior, el procedimiento del Proyecto ha sido un proceso iterativo de diseño de la geometría, análisis CFD y simulación de Tiempo por vuelta. A continuación, se describe el proceso de cada uno de los componentes del paquete aerodinámico y se muestran los resultados. Cabe destacar que las iteraciones de cada versión no hay variaciones en la geometría, sino variaciones en los parámetros usados en el análisis CFD para una mejora en la convergencia de los análisis y, por tanto, una mejora en los resultados.

3.1 Carrocería

El objetivo inicial del diseño es crear una carrocería sencilla cuya fabricación pueda realizarse sin la necesidad de moldes complejos, pues el precio final del producto debe ser el menor posible. Por otro lado, teniendo en cuenta la normativa bajo la cual competiría en Alemania, se opta por un diseño en el que las ruedas están carrozadas. Se toma como base un diseño de chasis similar al de otros modelos de la misma categoría, teniendo en cuenta que éste debería tener una estructura de absorción de impacto frontal y dos arcos de seguridad que proteja al piloto en caso de vuelco.

En la siguiente figura se muestra el chasis del modelo Performer 1000. Se observa un arco principal situado en la zona del respaldo del piloto y la ausencia de un arco frontal de seguridad. Esta configuración no sería válida en otras normativas de competiciones como la Formula Student [2], pues no crea una envolvente que proteja al piloto en caso de vuelco. Se toma por tanto la geometría general, pero añadiendo un arco frontal de seguridad.

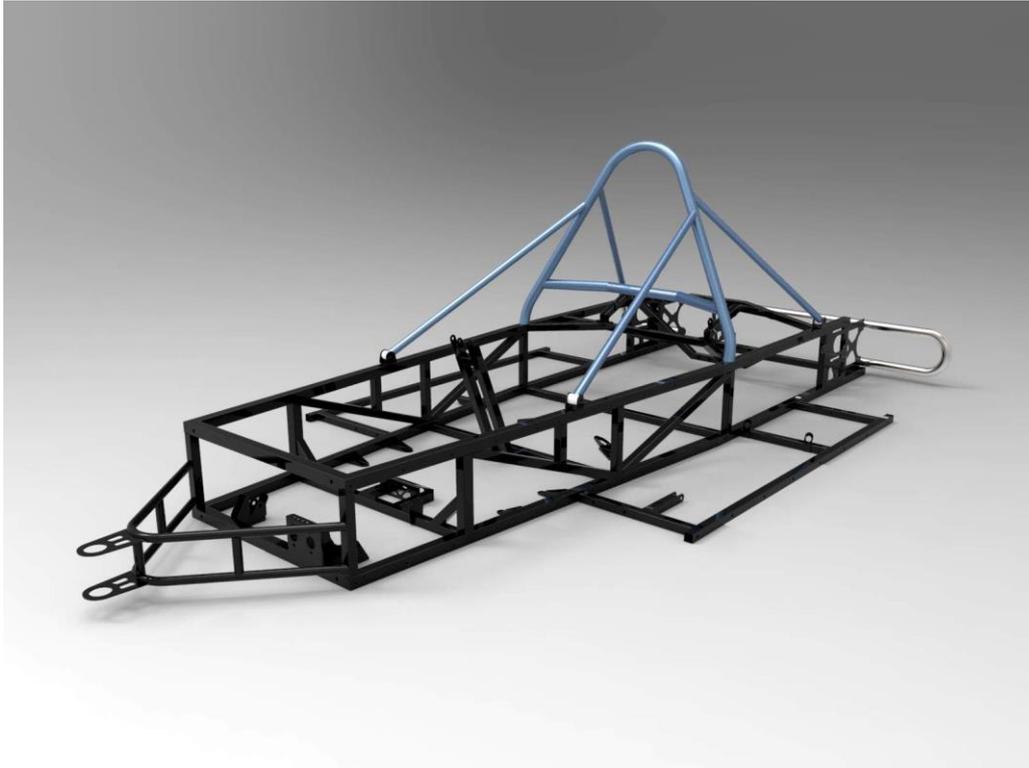


Figura 20. Modelo CAD del chasis del modelo comercial Performer 1000 [3].

En la siguiente figura se muestra el modelo CAD de la base a usar. Se realiza mediante un extrusionado de un boceto de la forma en planta, herramienta que también se usa para generar los arcos de seguridad. Para la estructura de absorción de impacto se usa el modelo de generación de superficies para generar posteriormente un sólido. En el caso de las ruedas se emplea la herramienta de generación de sólidos por revolución, empleando las medidas del neumático Hoosier R25B [4]. El objetivo es crear un sólido lo más sencillo posible que sirva como base de las dimensiones de la carrocería. A fin de comprobar las dimensiones generales, se añade un maniquí con altura superior al 95 por ciento de la población europea y un modelo CAD del motor.

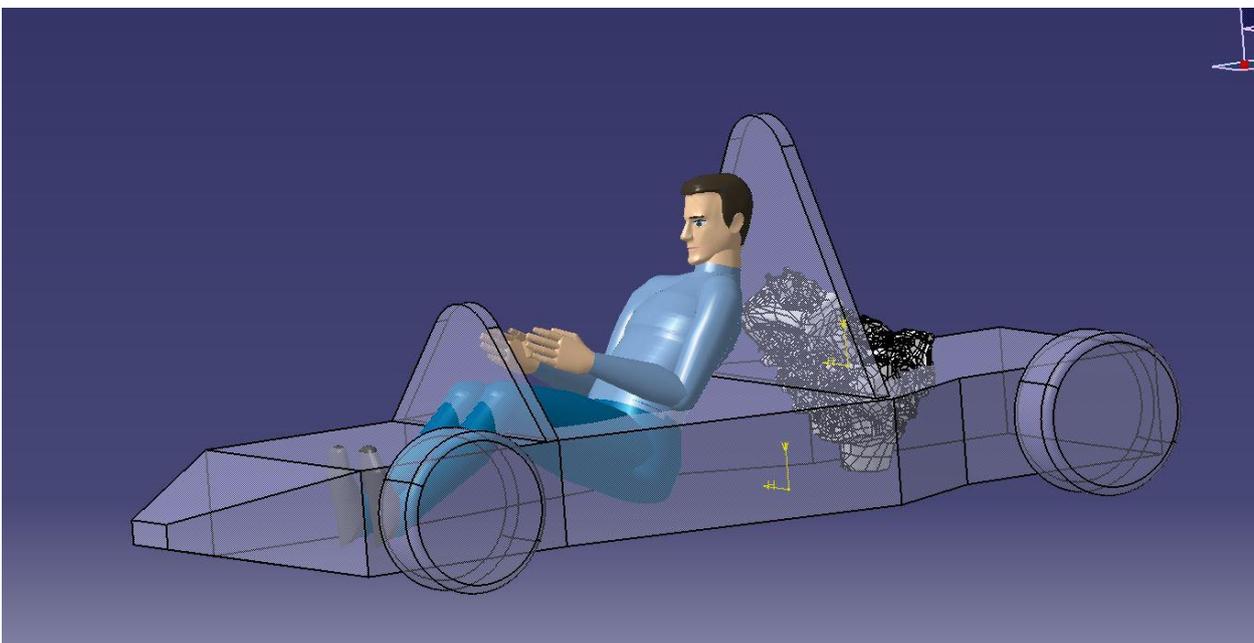


Figura 21. Vista del modelo de dimensionado del chasis.

Para comprobar la envolvente que forman los arcos de seguridad se usa una vista de perfil y una línea imaginaria tangente a los dos arcos de seguridad, tal y como se muestra en la siguiente figura.

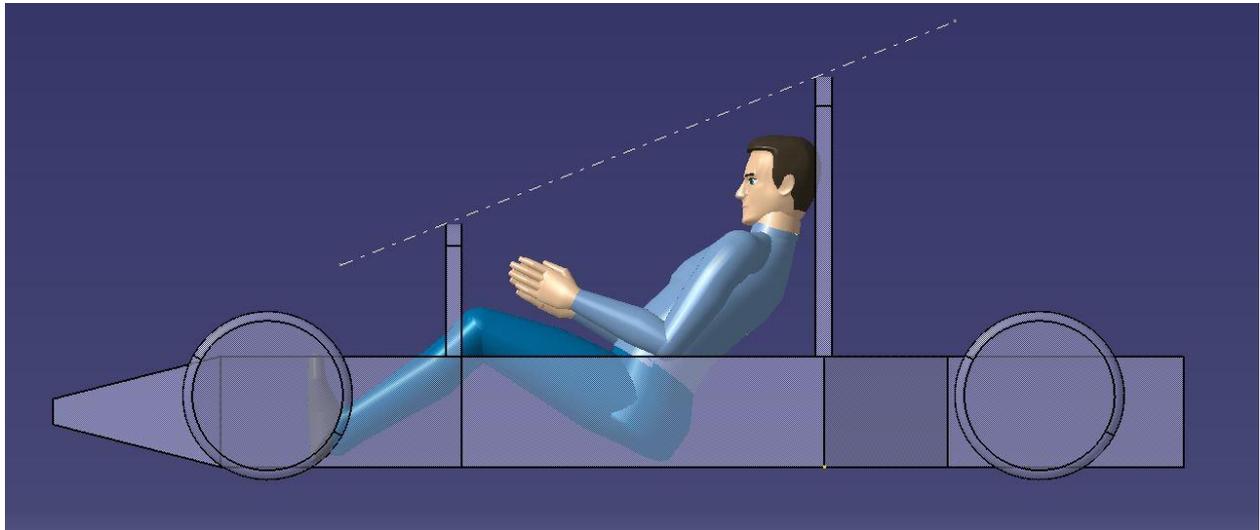


Figura 22. Perfil del modelo de dimensionado del chasis.

Partiendo de esta base se procede al diseño de la carrocería. El objetivo inicial es crear dos diseños de características distintas y analizar ambos de forma paralela. Tras elegir el diseño con mejores resultados, se procede a la evolución iterativa de éste.

3.1.1 Diseño inicial: versión V1

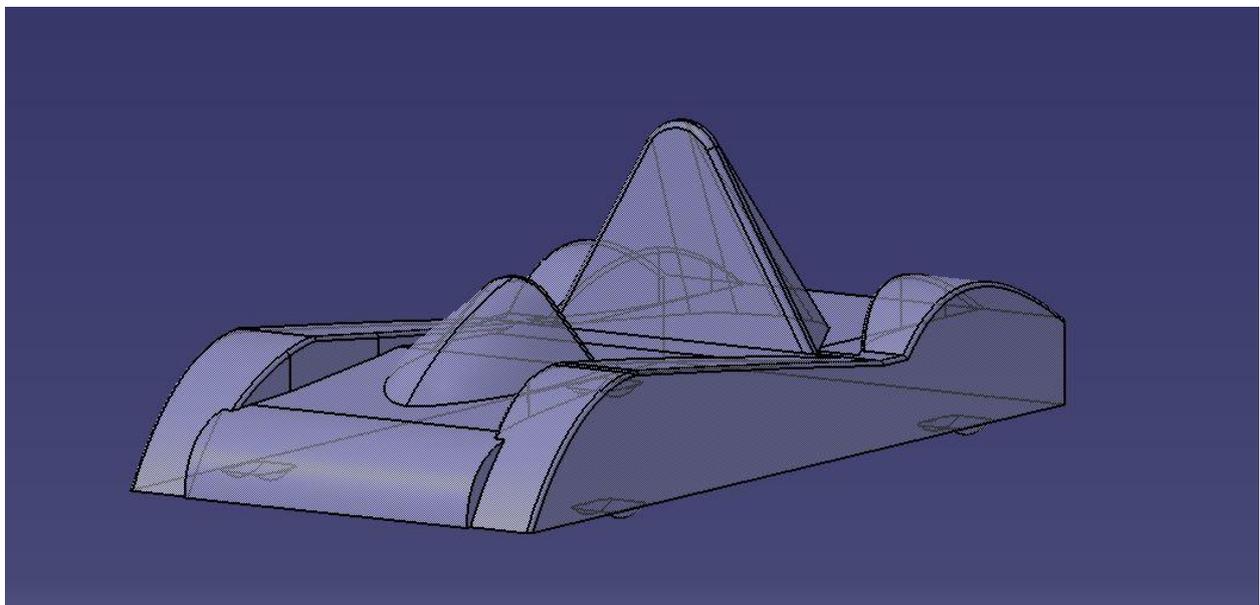


Figura 23. Diseño V1.

Como primer diseño se opta por una carrocería de curvas de gran radio de curvatura. La razón principal es la posibilidad de realizar los contramoldes necesarios en la fabricación con chapa de acero curvada. Método con un coste muy inferior al de realizar los moldes o contramoldes mediante mecanizados y que además aprovecha la superficie del metal, reduciéndose considerablemente el tiempo necesario para preparar la superficie antes de laminar la pieza.

3.1.1.1 Modelado

El objetivo es crear un modelo CAD que represente la forma real lo más parecida posible, pero manteniendo una forma sencilla, evitando representar detalles que compliquen excesivamente la malla. El formato final debe ser .igs o .stp para poder analizarlo posteriormente con el programa STAR CCM +.

Se emplea en la medida de lo posible la herramienta *Pad* (extrusión) del módulo de diseño mecánico, pues genera un sólido continuo al que se puede añadir o eliminar material de forma sencilla. En la cúpula y en el carenado del motor se emplea la herramienta *Fill* del módulo de superficies para crear el límite de extrusión de la herramienta *Pad*. Esta forma se adopta después de usar la herramienta *Close Surface* y comprobar que la posterior unión al resto del modelo es problemática. En las siguientes figuras se puede observar el uso de esta operación en el carenado del motor y el uso combinado de los módulos de superficies y diseño mecánico a fin de crear un sólido continuo.

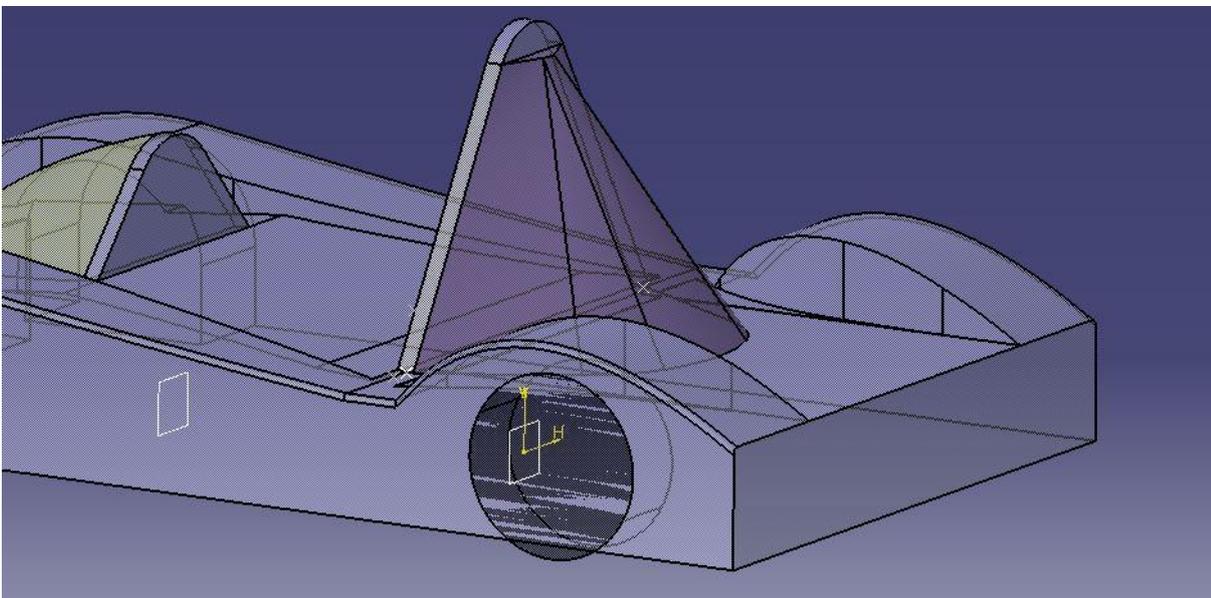


Figura 24. Uso de la herramienta *Close Surface* para el carenado del motor.

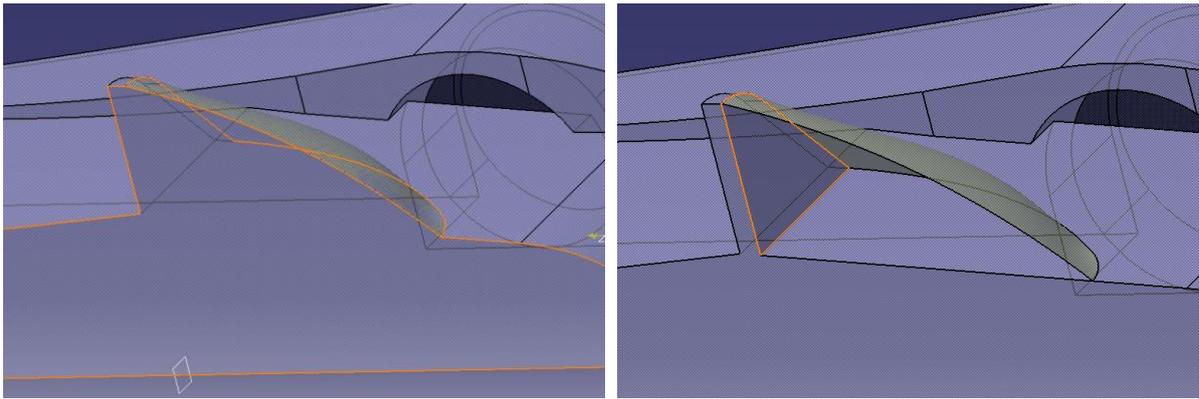


Figura 25. Uso de la herramienta *Fill* (superficies) para crear un límite de extrusión.

3.1.1.2 Análisis

En una simulación de CFD, independientemente del software que se use, se distinguen tres etapas [5]:

- Preproceso: en la que se introduce la geometría, se define el dominio fluido y se discretiza (mallado). Además, se configuran las condiciones de contorno y las ecuaciones y modelos de turbulencia a emplear en el cálculo de la solución.
- Proceso o computación: en la que se resuelve de forma iterativa las ecuaciones en el dominio fluido. El tiempo por iteración varía según el número de elementos que formen la malla, así como de la configuración usada en el método de cálculo. Se deben realizar un número de iteraciones suficiente para asegurar la convergencia de la solución.
- Postproceso: una vez finalizado el proceso iterativo, se analiza la solución empleando gráficas de la evolución de magnitudes de interés. Además, pueden crearse proyecciones de una magnitud en una superficie de interés.

En este apartado se va a exponer el preproceso de la simulación, indicando todos los pasos realizados y los parámetros modificados. El resto de parámetros se usan con la configuración por defecto.

En el preproceso se pueden distinguir tres etapas principales: introducción de la geometría y caracterización, discretización del dominio fluido o mallado, y configuración del método empleado para el cálculo de la solución. A continuación, se desarrolla cada una de ellas:

3.1.1.2.1 Introducción de la geometría.

Usando la opción *Import Surface Mesh*, situada en el marco superior de Star CCM+, se selecciona el modelo CAD a simular. El programa acepta una amplia variedad de formatos, siendo los formatos .igs y .stp los más utilizados; en este caso se usará el formato .stp.

Una vez importada la geometría se crea el túnel de viento virtual, de dimensiones 18x6x3 m (largo, ancho, alto), con el monoplaza situado a 3 m de la entrada de aire. Posteriormente, se le resta el volumen del modelo del monoplaza para crear el dominio fluido, empleando la herramienta *Substrac*. En la siguiente captura se muestra el resultado obtenido:

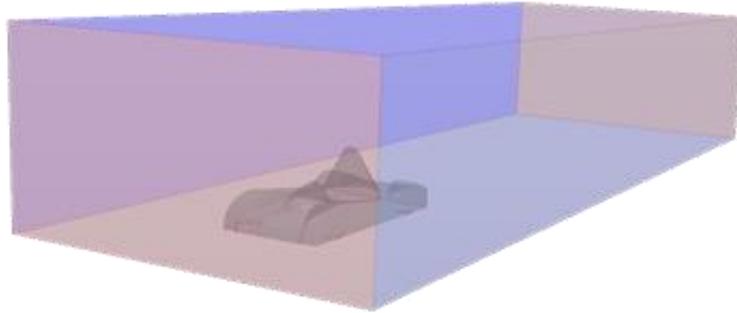


Figura 26. Dominio fluido.

Tras esta operación se puede usar la herramienta de *Surface Wrapper* para realizar un mallado superficial con el fin de suavizar y simplificar la geometría. A pesar de que es una herramienta útil en geometría complejas, puede dar resultados no deseados incluso usando elementos de 1 mm, deformando la geometría. A continuación, se muestra el resultado obtenido al utilizar esta herramienta, razón por la que desestima su uso:

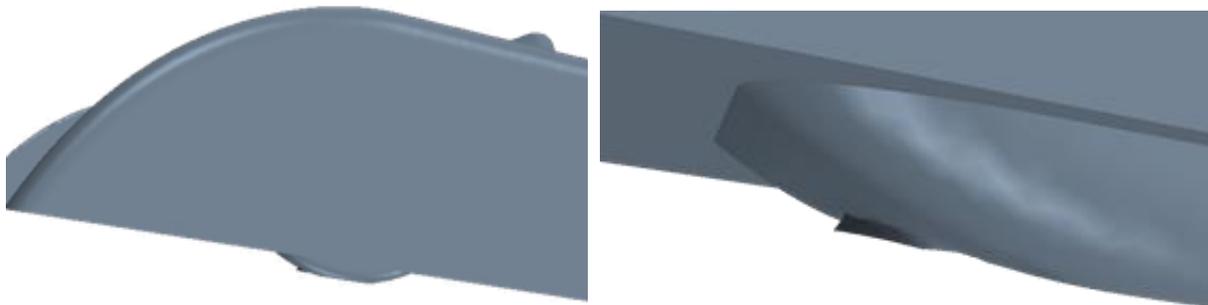


Figura 27. Detalle de la rueda delantera izquierda del resultado obtenido con *Surface Wrapper*.

Tras obtener la geometría del dominio fluido, se divide utilizando la herramienta *Split by Patch* de forma que se diferencia entre la entrada y salida de aire, asfalto, límites laterales y el monoplaza. Según los objetivos de la simulación se puede dividir la superficie del monoplaza, algo que se realizará en futuras simulaciones. Tras la división, se asigna una región del problema a cada parte obtenida para configurar las condiciones de contorno del problema:

- Entrada de aire: se configura como *Velocity inlet*.
- Salida de aire: se configura como *Outlet Pressure*.
- Asfalto: se establece la condición de pared, opción *Wall*.
- Laterales y límite superior del túnel de viento: se establece condición de simetría empleando la opción *Simetry Plane*. Esto se hace para evitar los efectos viscosos que aparecería si se configurase como pared.

3.1.1.2.2 Discretización o Mallado

Se realiza una operación de *Automated Mesh* sobre el dominio fluido, seleccionando las siguientes opciones:

- *Surface Remesher*: aporta varios parámetros para controlar el refinamiento de la malla cerca de una superficie.
- *Trimmed Cell Mesher*: elementos en forma de cubo. Se elige al necesitar aproximadamente la mitad de memoria RAM por elemento que usando el método *Polyhedral Mesher* sin tener efecto sobre la solución. Es ampliamente usado en simulaciones de flujo externo.
- *Prism Layer Mesher*: Para mallar de forma concreta la capa límite.

Tras hacer dicha selección, se configura los parámetros principales de la operación de mallado en el apartado *Default Controls*:

- *Base Size*: Base sobre la que el resto de parámetros se dimensionan de forma proporcional, 0,1m.
- *Target Surface Size*: Tamaño objetivo de elemento cercano a la superficie. 15% de la base, 5mm.
- *Minimum Surface Size*: Si la superficie es compleja el programa reducirá el tamaño de elemento cerca de la superficie sin llegar a ser menor a este valor, 5% de la base o 5 mm.
- *Surface Grow Rate*: Ratio entre volúmenes de celdas adyacente en la superficie. Se selecciona 1,3.
- *Number of Prism Layer*: número de elementos dentro de la capa límite, 8.
- *Prism Layer Stretching*: Ratio de incremento de la distancia a la pared de los elementos de la capa límite.
- *Prism Layer Total Thickness*: Espesor de la capa límite, junto con los dos parámetros anteriores configuran el mallado de ésta. Se realiza un cálculo del espesor teniendo en cuenta la geometría y la velocidad de entrada, para una viscosidad de $1,82e-5$ kg/m.s 3mm.
- *Volumen Growth Rate*: velocidad a la que se realiza la transición de tamaño de elementos al alejarse de la superficie y en núcleo del dominio a mallar. Se selecciona la opción de *muy lento*.

Por último, se añade zonas de superficie de control (*Surface Control en Custom Controls*):

- *Surface Control 1*: Se seleccionan las paredes y se modifica el tamaño de celda en la superficie, 300mm. De esta forma se reduce en gran medida el número total de elementos, realizándose un mallado selectivo.
- *Surface Control 2*: Se usa para introducir un mallado de la estela del monoplaza. Se selecciona la región correspondiente a éste y se configura de forma que el tamaño de la malla 8 metros aguas abajo no sea menor de 20 mm.

El resultado es una malla de 7.152.962 elementos, con un reporte de calidad positivo, el cual se muestra a continuación:

-> *ENTITY COUNT*:

Cells: 7152962

Faces: 21502773

Verts: 7482143

-> *EXTENTS:*

x: [-3.0000e+00, 3.0000e+00] m

y: [-2.0000e+00, 1.5000e+01] m

z: [-3.0271e-02, 3.0000e+00] m

Setting pro-STAR cell IDs on Surface Wrapper starting at 1.

-> *MESH VALIDITY:*

Mesh is topologically valid and has no negative volume cells.

-> *FACE VALIDITY STATISTICS:*

Minimum Face Validity: 1.000000e+00

Maximum Face Validity: 1.000000e+00

<i>Face Validity < 0.50</i>	<i>0</i>	<i>0.000%</i>
<i>0.50 <= Face Validity < 0.60</i>	<i>0</i>	<i>0.000%</i>
<i>0.60 <= Face Validity < 0.70</i>	<i>0</i>	<i>0.000%</i>
<i>0.70 <= Face Validity < 0.80</i>	<i>0</i>	<i>0.000%</i>
<i>0.80 <= Face Validity < 0.90</i>	<i>0</i>	<i>0.000%</i>
<i>0.90 <= Face Validity < 0.95</i>	<i>0</i>	<i>0.000%</i>
<i>0.95 <= Face Validity < 1.00</i>	<i>0</i>	<i>0.000%</i>
<i>1.00 <= Face Validity</i>	<i>7152962</i>	<i>100.000%</i>

-> *VOLUME CHANGE STATISTICS:*

Minimum Volume Change: 6.760303e-04

Maximum Volume Change: 1.000000e+00

<i>Volume Change < 0.000000e+00</i>	<i>0</i>	<i>0.000%</i>
<i>0.000000e+00 <= Volume Change < 1.000000e-06</i>	<i>0</i>	<i>0.000%</i>
<i>1.000000e-06 <= Volume Change < 1.000000e-05</i>	<i>0</i>	<i>0.000%</i>
<i>1.000000e-05 <= Volume Change < 1.000000e-04</i>	<i>0</i>	<i>0.000%</i>
<i>1.000000e-04 <= Volume Change < 1.000000e-03</i>	<i>3</i>	<i>0.000%</i>
<i>1.000000e-03 <= Volume Change < 1.000000e-02</i>	<i>351</i>	<i>0.005%</i>
<i>1.000000e-02 <= Volume Change < 1.000000e-01</i>	<i>78003</i>	<i>1.090%</i>
<i>1.000000e-01 <= Volume Change <= 1.000000e+00</i>	<i>7074605</i>	<i>98.905%</i>

En las siguientes capturas se puede observar como se consigue un mallado con una resolución mucho mayor en las zonas cercanas a la superficie del modelo, y como aumenta el tamaño de elemento a medida que se aleja de éste:

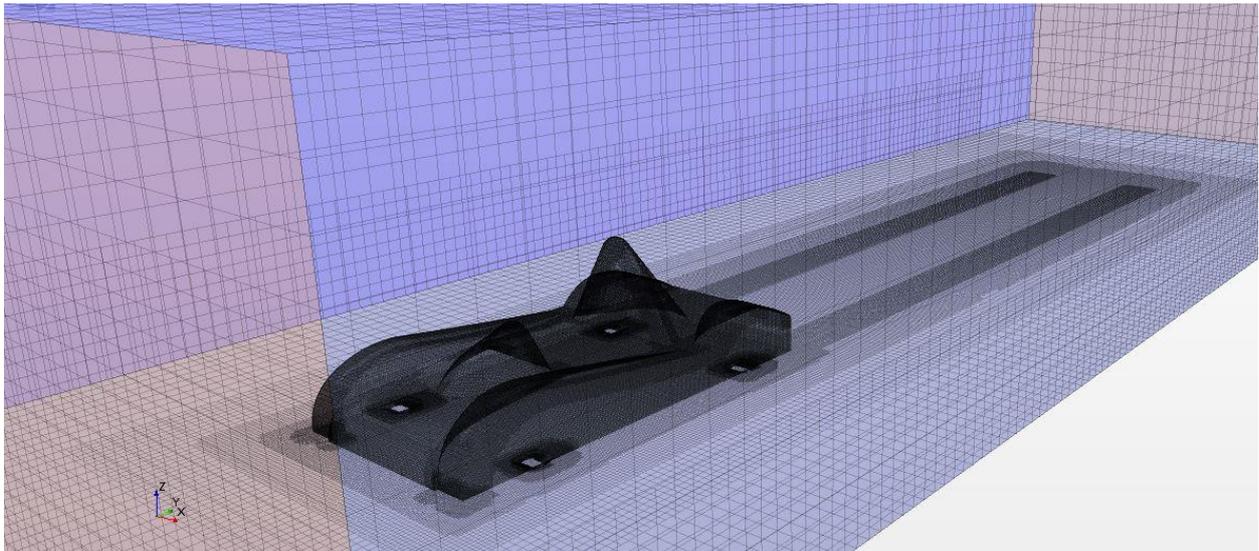


Figura 28. Malla refinada cerca de las superficies del monoplaza.

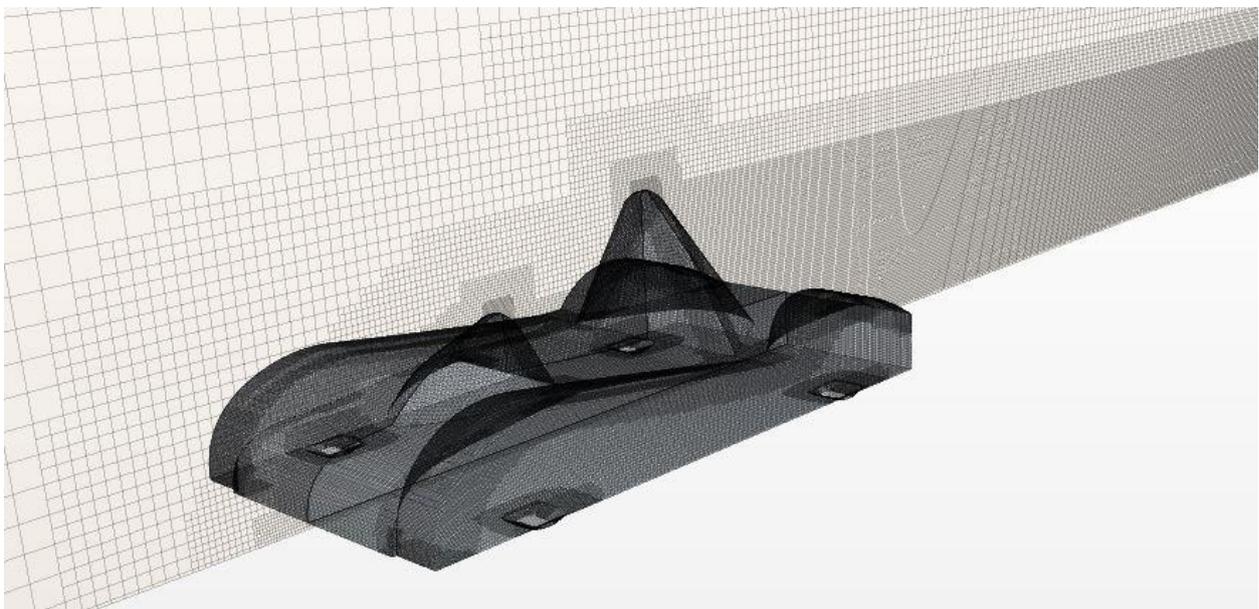


Figura 29. Malla refinada cerca de las superficies del monoplaza.

3.1.1.2.3 Configuración de la física del problema.

En el apartado *Physics* seleccionamos los modelos de resolución del problema siguiendo los siguientes pasos:

- Gas.
- *Segregated Flow*: resuelve las ecuaciones de forma secuencial. Necesita menor memoria que haciéndolo en paralelo (*Coupled Flow*) y no presenta mejoras en la solución en problemas con densidad constante [6].
- Densidad constante: pues la simulación se realiza a un número Mach mucho menor que la unidad [7].

- Estacionario.
- Turbulento: se selecciona el modelo de turbulencia *K-Omega*, pues reproduce con mayor fidelidad los efectos viscosos que el modelo *K-Epsilon* cerca de la pared sin necesitar mayor potencia de cálculo. Se selecciona el modelo *Gamma* de transición [8].

La simulación se realiza a 40 m/s y se mantiene constante en todas las simulaciones. Se elige este valor en base a los datos obtenidos de otros monoplazas similares de la competición [10]. Como condición inicial se toma este valor en todo el dominio fluido.

Por último, se configuran los informes de los coeficientes de resistencia y sustentación, magnitudes a introducir en la simulación de tiempo por vuelta junto con el área frontal. Es por ello que se adimensionalizan los coeficientes con el área frontal, que se calcula mediante la opción *Frontal Area* en el apartado *Reports*. En todas las simulaciones se usará una densidad de 1,225 kg/m³.

3.1.1.3 Resultados

En la siguiente figura se representa la resistencia aerodinámica (línea roja) y el Downforce sobre el modelo. Se observa una oscilación en los resultados debido al carácter turbulento del problema. Se toman por tanto valores medios de las últimas 300 iteraciones. La adimensionalización de los coeficientes correspondientes se realiza respecto del área frontal en este caso. Esto es algo habitual en la automoción, pero se realiza de esta forma debido a que el programa de simulación de tiempo por vuelta sólo acepta el área frontal como dato de entrada. El resultado es el siguiente:

- $C_d = 0,746$
- $C_l = 0,232$

Se observa un coeficiente de resistencia bastante elevado. Como referencia, el valor de éste en un monoplaza similar (Lister Storm LMP) es 0,55. Por otro lado el hecho de que la carrocería sin ningún elemento aerodinámico genere sustentación, como ocurre en este caso, es bastante común. Esto se debe principalmente al aumento de presión que se produce en la parte inferior de los neumáticos y a la disminución de presión en las zonas curvas, parte de la cual se proyecta sobre la vertical. En la siguiente figura se representa la distribución de presiones sobre la superficie del modelo:

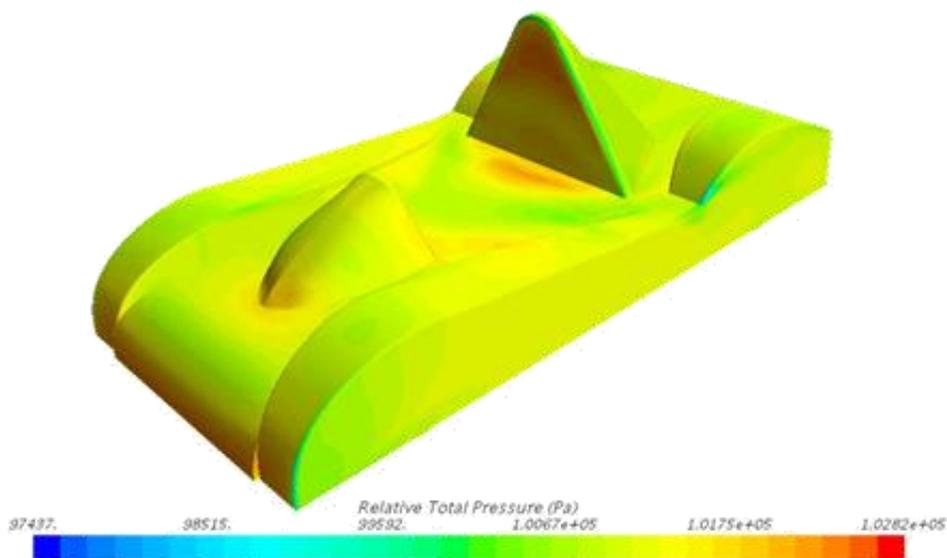


Figura 30. Distribución de presiones.

3.1.1.4 Tiempo por vuelta.

Empleando el software OptimumLap presentado en el apartado 1.3.3, se realiza una simulación de tiempo por vuelta. A continuación, se presentan los parámetros introducidos en el programa, variándose en las siguientes simulaciones sólo aquellos relacionados con la aerodinámica.

- Masa del vehículo: se introducen 365 kg, suma de un piloto de 75kg y un vehículo de 290kg, cifra aportada por el fabricante del modelo *Performer* [11].
- Tipo de tracción: dos ruedas motrices traseras.
- Coeficiente de resistencia: en este caso igual a 0,746.
- Coeficiente de *downforce*: en este caso igual a -0,232, negativo si se produce sustentación.
- Área frontal: 1,109 metros cuadrados.
- Radio del neumático: 0,228 metros, dato obtenido del fabricante Hoossier [4].
- Resistencia a la rodadura: 0,015; valor recomendado por el programa.
- Coeficiente de fricción longitudinal y lateral del neumático: 2,32 y 1,8 respectivamente; datos obtenidos de las pruebas realizadas por el laboratorio de Callspan sobre el modelo R25B de Hoossier [12].
- Curva de par del motor: se obtiene de una prueba sobre las motocicletas deportivas del mercado de hace 6 años, cuyo motor se puede obtener por un precio reducido. La gráfica en cuestión es la siguiente:

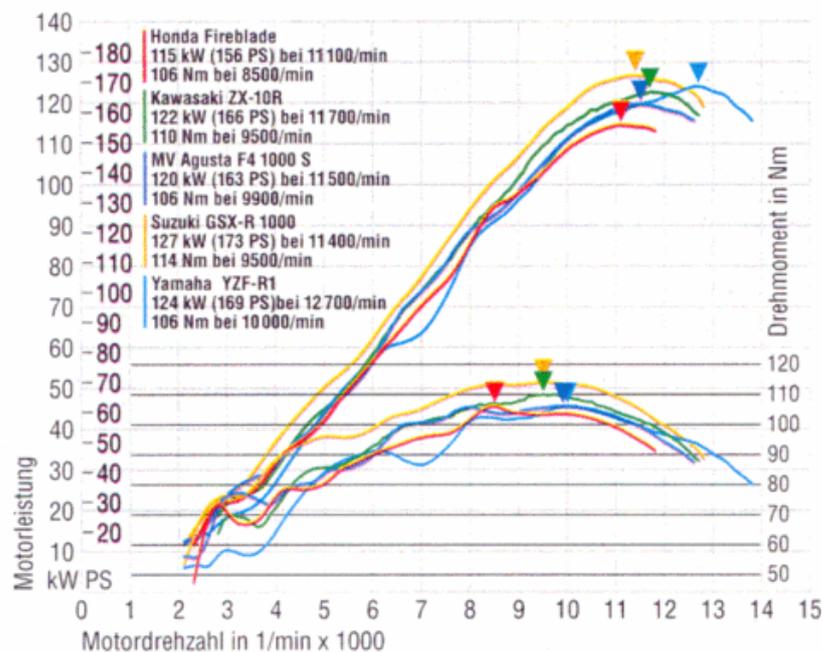


Figura 31. Prueba en banco de potencia de diferentes motocicletas deportivas.

Se introducen los valores más significativos de la curva correspondiente al modelo Suzuki GSX-R 1000, de forma que el resultado es el presentado en la siguiente figura.

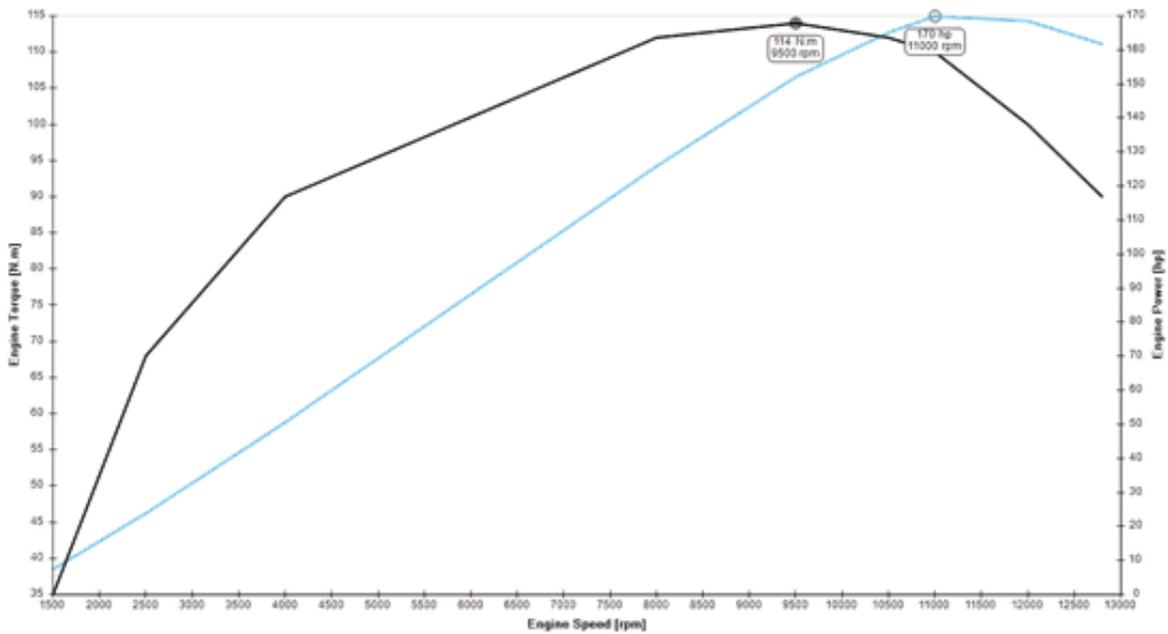


Figura 32. Curva de par del motor.

- Relación de cambio: dato aportado por el fabricante [13], presentado en la siguiente tabla:

Marcha	Relación de cambio
1°	2,5620
2°	2,0520
3°	1,7140
4°	1,5000
5°	1,3600
6°	1,2690

Tabla 1. Relación de transmisión en cada marcha.

- Eficiencia de la transmisión: 90 por ciento. Valor por defecto en el programa, típico para una transmisión en buen estado. Se mantiene al no conocerse el valor real.
- Relación final de cambio: este valor se obtiene haciendo un barrido de simulaciones, escogiéndose el valor que minimiza el tiempo por vuelta. Dicha relación varía cambiando el número de dientes tanto del piñón de salida del motor como de la estrella situada en el eje trasero. En la siguiente figura se

muestra el resultado de este barrido:

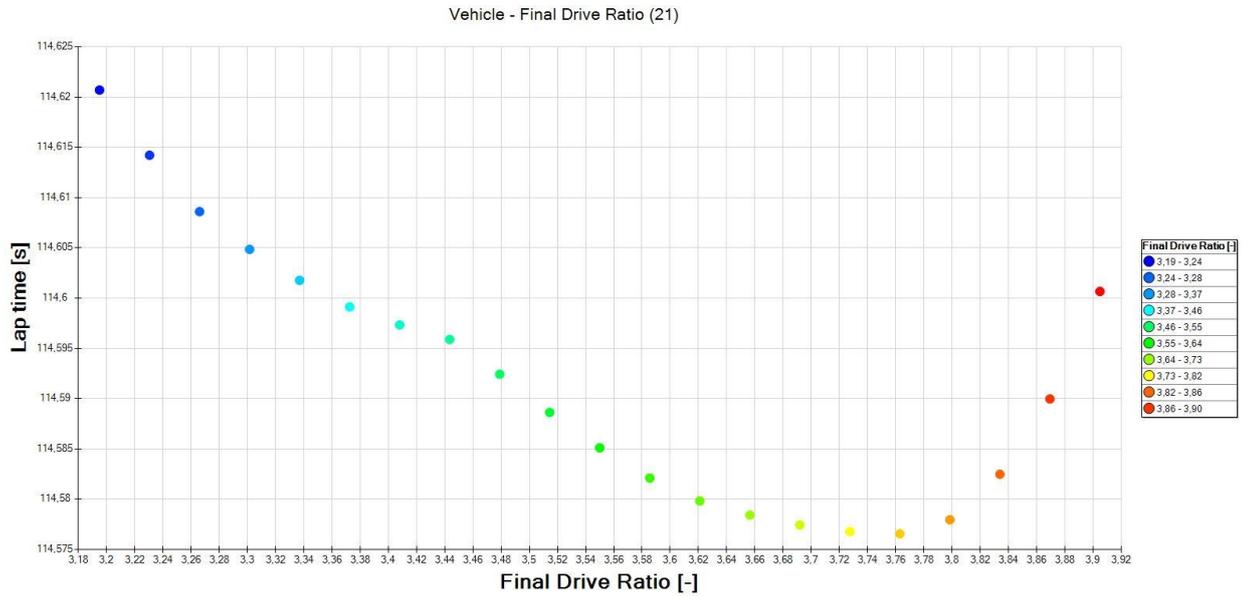


Figura 33. Relación final de cambio.

El menor tiempo por vuelta se obtiene para una relación final de cambio de 3.76, siendo éste de 114,557s ó 1:54.557 min.

3.1.2 Versión V2

A la vista de los resultados obtenidos en la versión V1 se realiza un diseño completamente nuevo. Las diferencias principales son un menor tamaño de la cúpula y una silueta vista de perfil menos curva, predominando aún más las partes rectas, cuya fabricación sería más sencilla. En cuanto a la parte frontal, se opta por una forma más afilada a fin de disminuir la resistencia aerodinámica producida por la proyección sobre la vertical de la presión.

3.1.2.1 Modelado

El modelado se hace de forma muy similar al de la versión V1 salvo que, en este caso, se construye primero la mitad del modelo y se realiza una operación de simetría una vez está acabado. En las siguientes figuras, se muestra la primera iteración de la versión V2:

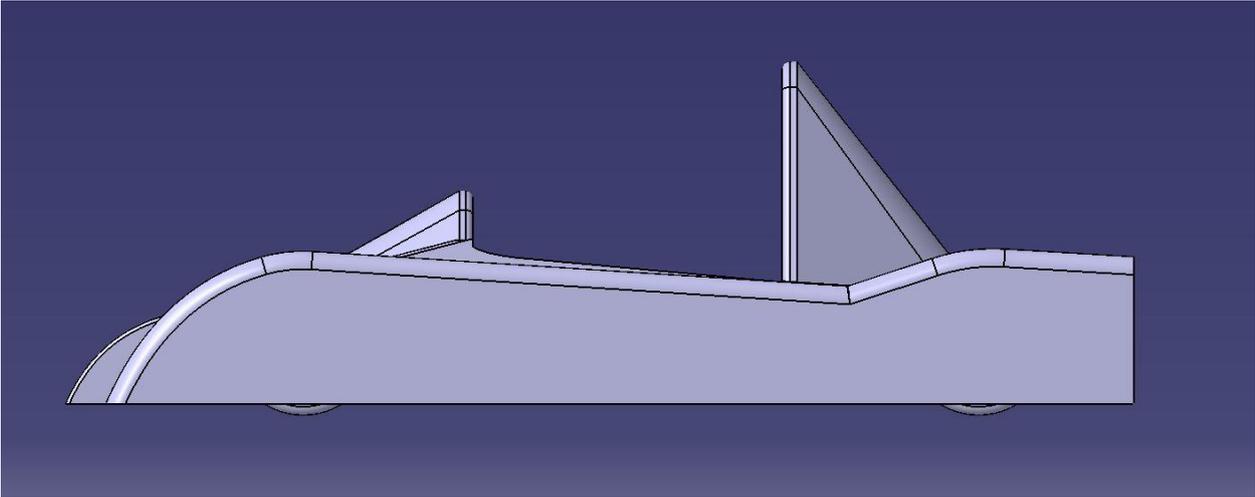


Figura 34. Vista de perfil del modelo CAD de la versión V2.

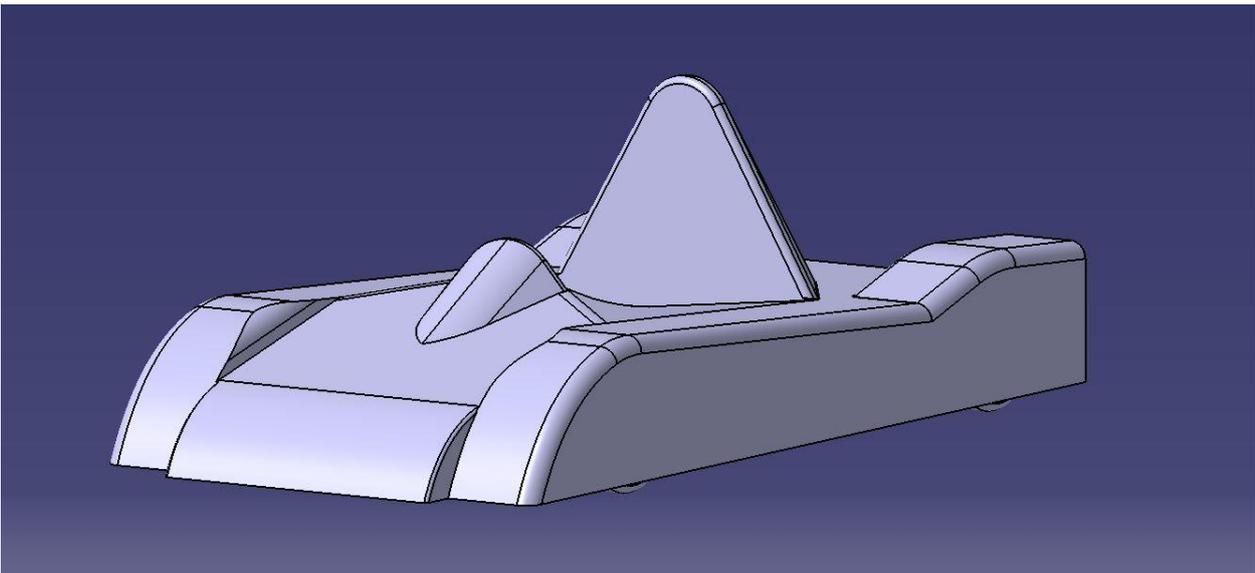


Figura 35. Vista en perspectiva del modelo CAD de la versión V2.

3.1.2.2 Análisis.

A fin de poder comparar los datos obtenidos de las simulaciones de las versiones V1 y V2, la configuración y los parámetros se mantienen constantes.

3.1.2.3 Resultados.

Tras hacer la media de las últimas 300 iteraciones se obtienen los siguientes resultados;

- $C_d = 0.454$

- $Cl=0.251$
- Área frontal = 1.101 metros cuadrados.

Se consigue una considerable reducción del coeficiente de resistencia, por lo que se decide continuar con este diseño de carrocería. A continuación, se muestra la distribución de presiones sobre la superficie del modelo:

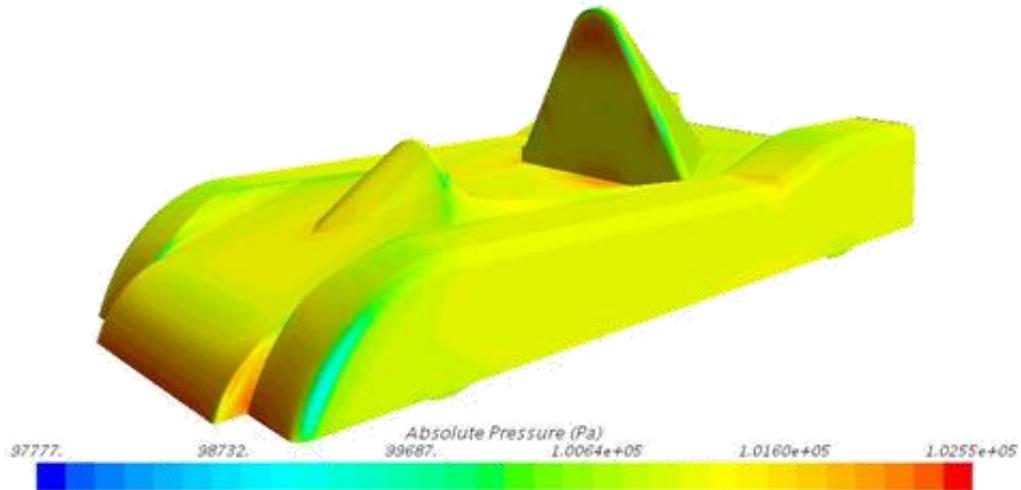


Figura 36. Distribución de presiones.

3.1.2.4 Tiempo por vuelta.

Se realiza de nuevo un barrido de simulaciones variando la relación final de cambio, variando únicamente los parámetros correspondientes a la aerodinámica del monoplace. En este caso se obtiene un tiempo por vuelta de 113,355 segundos ó 1: 53,355 minutos, empleando una relación final de cambio de 3,55. Se obtiene por tanto una mejora de 1,625 segundos.

3.1.3 Iteración sobre Versión V2

A la vista de los resultados anteriores se decide continuar con la versión V2. Antes de realizar cambios en el modelo se decide mejorar la configuración de la simulación en CFD, pues en las simulaciones previas se observa una oscilación considerable en el resultado de fuerza de sustentación, tal y como se presenta en la siguiente figura:

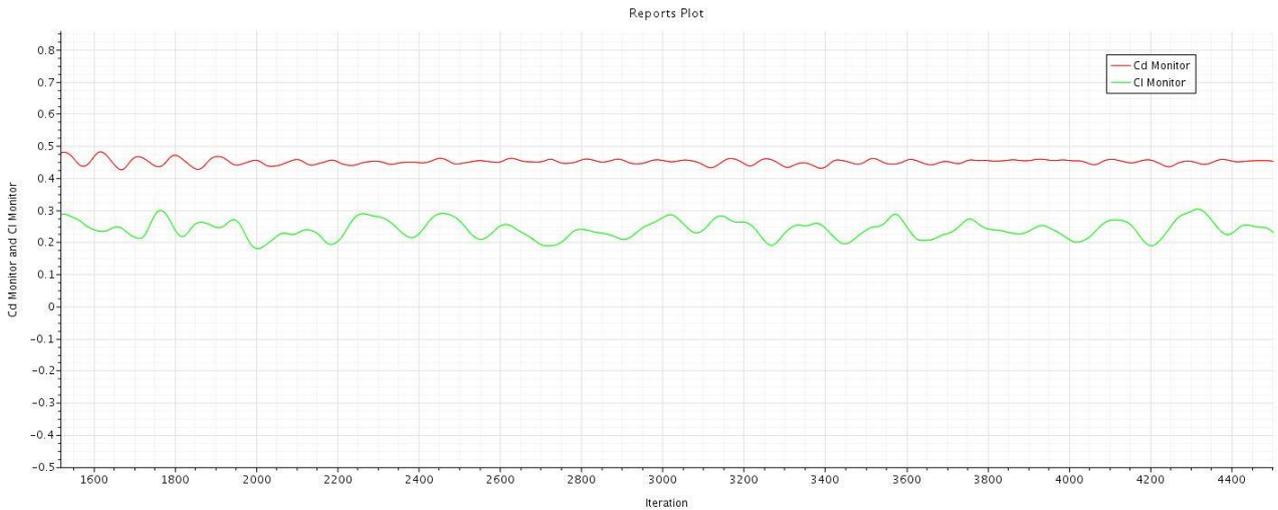


Figura 37. Oscilaciones en los resultados.

Previamente a realizar cambios en la configuración de la malla, se realiza una simulación con un plano de simetría a fin de comprobar que la solución es realmente independiente de esta consideración.

3.1.3.1 Simulación con simetría.

Se realiza una simulación con una configuración idéntica a la realizada en el apartado 3.1.2 salvo por el uso de un plano de simetría que contiene a la dirección vertical y longitudinal del modelo. La siguiente figura muestra la configuración del túnel de viento virtual. Se observa que la geometría importada es la completa, pues si se importa con la simetría realizada en Catia aparece un error a la hora de realizar la operación de *Subtract*.

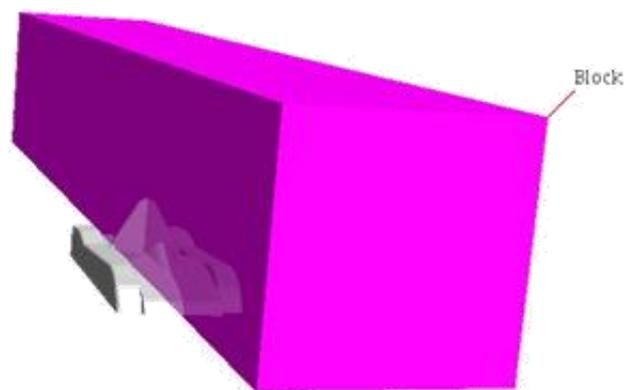


Figura 38. Configuración del túnel de viento.

Los resultados obtenidos son idénticos a los obtenidos en el apartado 3.1.2, por lo que todas las simulaciones posteriores se realizan utilizando un plano de simetría.

3.1.3.2 Aumento del número de elementos en la malla.

La validación del uso de un plano de simetría nos permite aumentar el número de elementos de la malla. Este aumento se realiza teniendo en cuenta que se necesita dejar libre parte de la memoria, pues la geometría del modelo final con paquete aerodinámico será más compleja y necesitará un número mayor de elementos. A continuación, se presentan los parámetros que han sido modificados en la configuración de la malla, el resto de parámetros se han mantenido:

- *Target Surface Size*: 8 por ciento en lugar de 10 por ciento (8 mm).
- *Minimum Surface Size*: 4 por ciento en lugar de 5 por ciento (4mm).
- *Surface Grow Rate*: 1,15 en lugar de 1,2
- *Volumetric Control*: de forma similar al Surface Control, podemos añadir una configuración distinta en un volumen concreto. Esta herramienta permite afinar la malla en lugares donde sea necesario sin aumentar excesivamente el número total de elementos. Se usa sobre un bloque de 80 mm de espesor que cubre el fondo plano. En la siguiente figura se muestra el bloque usado:

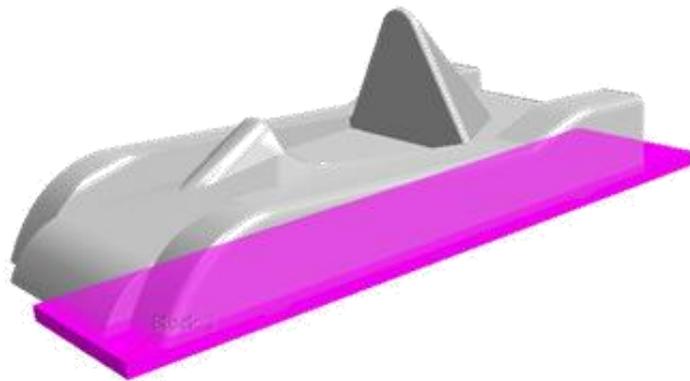


Figura 39. Bloque usado.

Se configura el tamaño tanto en la superficie como en el volumen a 7 mm.

Con esta nueva configuración se obtiene una malla con 10.209.915 elementos frente a 3.400.005 de la anterior simulación, con el siguiente reporte de calidad de malla:

-> *MESH VALIDITY*:

Mesh is topologically valid and has no negative volume cells.

-> *FACE VALIDITY STATISTICS*:

Minimum Face Validity: 1.000000e+00

Maximum Face Validity: 1.000000e+00

<i>Face Validity < 0.50</i>	0	0.000%
<i>0.50 <= Face Validity < 0.60</i>	0	0.000%
<i>0.60 <= Face Validity < 0.70</i>	0	0.000%

$0.70 \leq \text{Face Validity} < 0.80$	0	0.000%
$0.80 \leq \text{Face Validity} < 0.90$	0	0.000%
$0.90 \leq \text{Face Validity} < 0.95$	0	0.000%
$0.95 \leq \text{Face Validity} < 1.00$	0	0.000%
$1.00 \leq \text{Face Validity}$	10209915	100.000%

-> *VOLUME CHANGE STATISTICS:*

Minimum Volume Change: 1.374080e-03

Maximum Volume Change: 1.000000e+00

$\text{Volume Change} < 0.000000e+00$	0	0.000%
$0.000000e+00 \leq \text{Volume Change} < 1.000000e-06$	0	0.000%
$1.000000e-06 \leq \text{Volume Change} < 1.000000e-05$	0	0.000%
$1.000000e-05 \leq \text{Volume Change} < 1.000000e-04$	0	0.000%
$1.000000e-04 \leq \text{Volume Change} < 1.000000e-03$	0	0.000%
$1.000000e-03 \leq \text{Volume Change} < 1.000000e-02$	57	0.001%
$1.000000e-02 \leq \text{Volume Change} < 1.000000e-01$	23016	0.225%
$1.000000e-01 \leq \text{Volume Change} \leq 1.000000e+00$	10186842	99.774%

Se consigue una mejora en el apartado de *Volume Change Statistic* respecto a la anterior simulación. En el apartado de *Face Validity* se obtiene la mejor calidad posible. Se procede por tanto al cálculo de la solución. En las siguientes figuras se muestra la representación de la evolución de los coeficientes de resistencia y sustentación, y la evolución de los residuos de la solución:

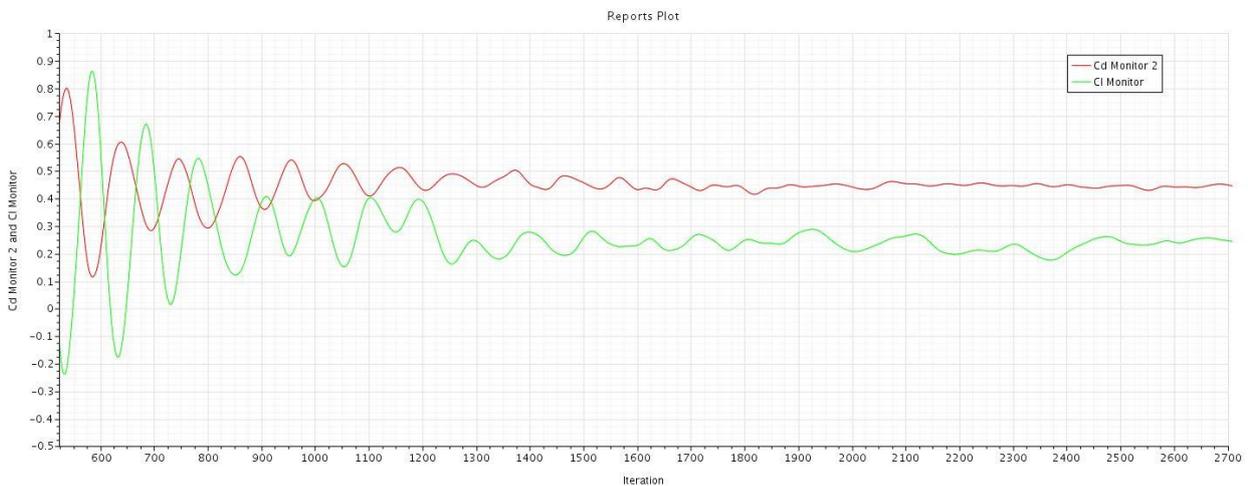


Figura 40. Evolución de los coeficientes de resistencia y sustentación.

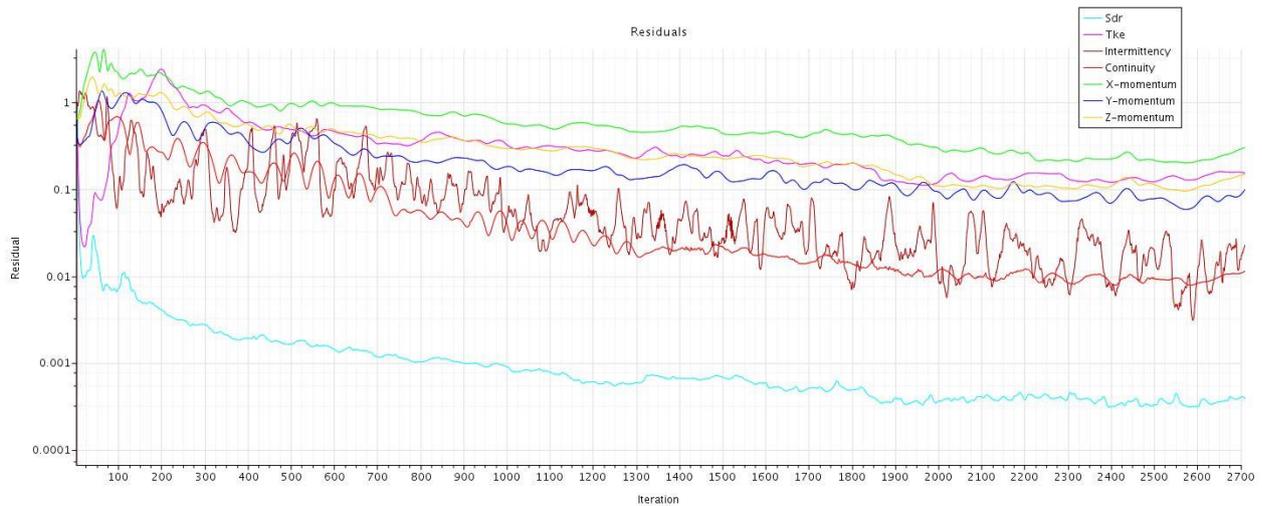


Figura 41. Evolución de los residuos.

Se obtiene una solución muy similar a la anterior, a pesar de tener un número de elementos de aproximadamente el triple. Esto lleva a buscar una estrategia distinta para mejorar la simulación.

3.1.3.3 Mejora del mallado de la capa límite.

Hasta ahora se ha realizado el mallado en la capa límite usando 8 capas, con un espesor total de 3mm y un *Stretching* de 1,2. Sin embargo, tras profundizar en las características del modelo de turbulencia K-Omega, se detecta un error en el mallado de la capa límite.

Primero se va a definir brevemente la distancia a la pared adimensional, y^+ , y las regiones que componen la capa límite según la Ley de la Pared.

- **Y^+ :** Parámetro fundamental en la Ley de la Pared, denominado distancia a la pared adimensional, definida por la siguiente expresión:

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu}$$

y: distancia a la pared.

u_τ : velocidad de fricción.

ν : viscosidad.

Esta magnitud por tanto determina la importancia relativa de los efectos viscosos frente a los turbulentos dentro de la capa límite.

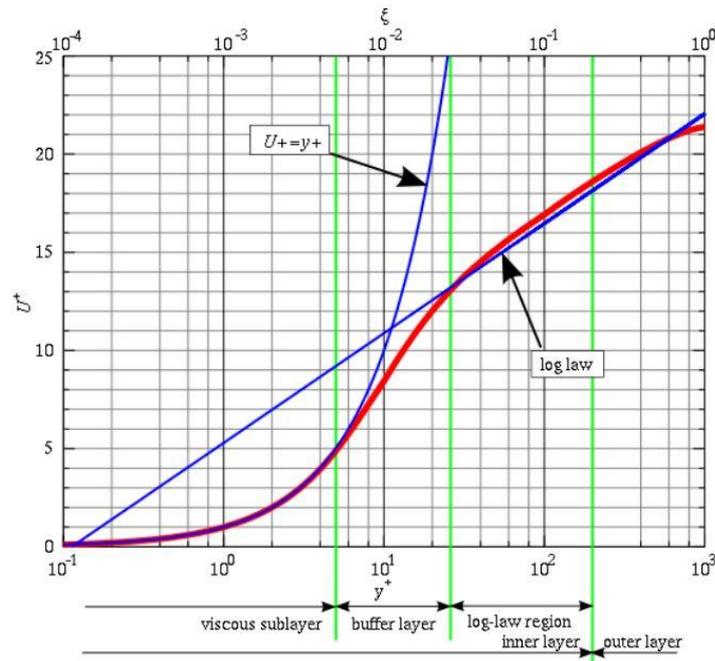


Figura 42. Ley de la Pared.

- **Subcapa laminar o viscosa:** comprendida entre valores de y^+ 0 y 5. Capa fluida en contacto con la pared, dominada por los efectos viscosos y prácticamente laminar. La velocidad media del flujo sólo depende de la densidad del fluido, la viscosidad, la distancia a la pared y el esfuerzo en la pared.
- **Capa intermedia o buffer layer:** comprendida entre valores de y^+ 5 y 30. Capa de transición que no puede representarse mediante ninguna función específica.
- **Capa logarítmica:** comprendida entre valores de y^+ 30 y 500. Capa en la que los efectos viscosos y turbulentos tienen una dominancia similar.

En las simulaciones donde se emplea este modelo de turbulencia, el primer elemento de la malla debe cumplir la condición de $y^+ < 1$ para poder reproducir con precisión los efectos viscosos de la subcapa laminar o viscosa de la capa límite.

La forma de calcular la distancia absoluta que corresponde un determinado valor de y^+ es iterativa, pues en el cálculo de y^+ se necesita conocer variables que son desconocidas previamente a la simulación. Como primera iteración se usan ecuaciones válidas para una placa plana y valores de Reynolds menores a 10^9 . Para una densidad de $1,225 \text{ kg/m}^3$, una velocidad aguas arriba de 40 m/s , una viscosidad dinámica de $1,82 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ y una longitud de la capa límite de $3,2 \text{ m}$ se obtiene un espesor de capa límite de $3,1 \text{ mm}$ y un número de Reynolds de $8,6 \cdot 10^6$. La distancia absoluta a la pared obtenida para $y^+ = 1$ es de $1 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$.

A partir de estos resultados se configura de nuevo el mallado del modelo, modificando únicamente las opciones correspondientes a la capa límite, siendo el resto de parámetros constantes respecto a la simulación del apartado 3.1.3.1. A continuación, se presentan los parámetros modificados:

- Number of Prism Layers: 22 en lugar de 8.
- Prism Layer Stretching: 1,3 en lugar de 1,2.
- Prism Layer Total Thickness: 3,1 mm en lugar de 3 mm.

De esta forma se consigue que el primer elemento de la malla esté a menos de $1 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$ de la pared. Se obtiene una malla de 4.651.782 elementos, con un reporte de calidad muy similar al del apartado anterior.

Se procede por tanto al cálculo de la solución. Previamente a analizar la evolución de ésta se comprueba que el valor de y^+ en el primer elemento de la malla se mantiene inferior a la unidad. Esto se realiza mediante la herramienta *Scalar Scene*, representando sobre la superficie del modelo el campo escalar *Wall Y+*. Esto se representa en las siguientes figuras:

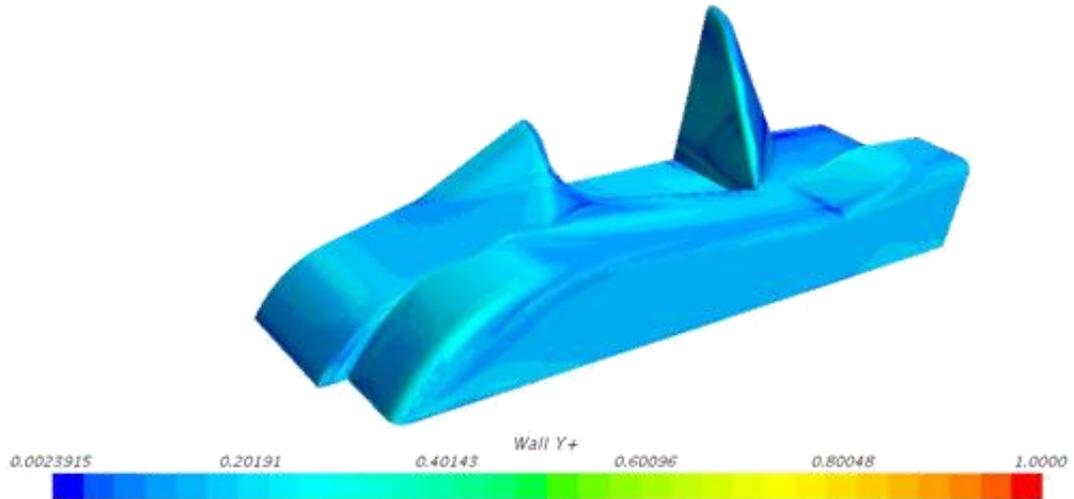


Figura 43. Wall Y+ sobre la superficie del modelo.

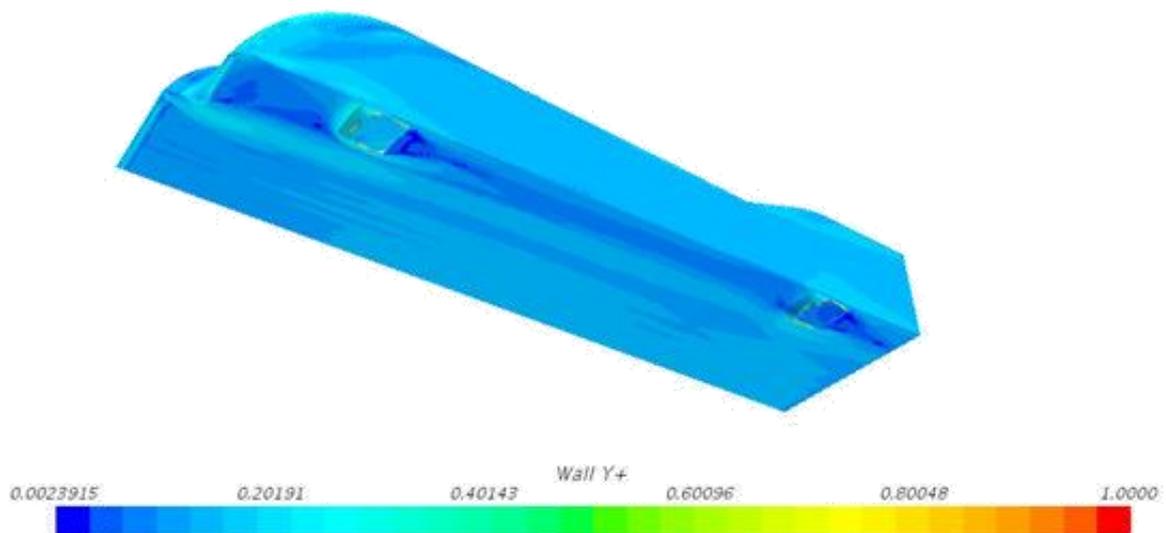


Figura 44. Wall Y+ sobre la superficie del modelo.

Salvo en puntos muy concretos alrededor de la zona de contacto del neumático, se observa que el valor de Y^+ del primer elemento de la malla se mantiene por debajo de 0,5 en toda la superficie del modelo.

En las siguientes figuras se muestra tanto la representación de la evolución de los coeficientes de resistencia y sustentación como la evolución de los residuos de la solución:

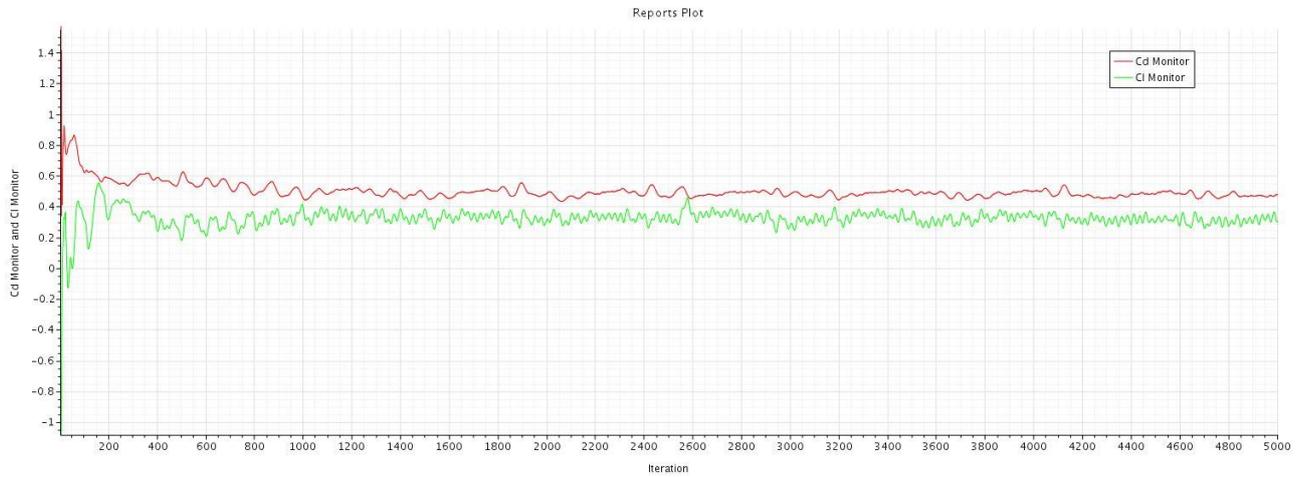


Figura 45. Evolución de los coeficientes de resistencia (rojo) y sustentación (verde).

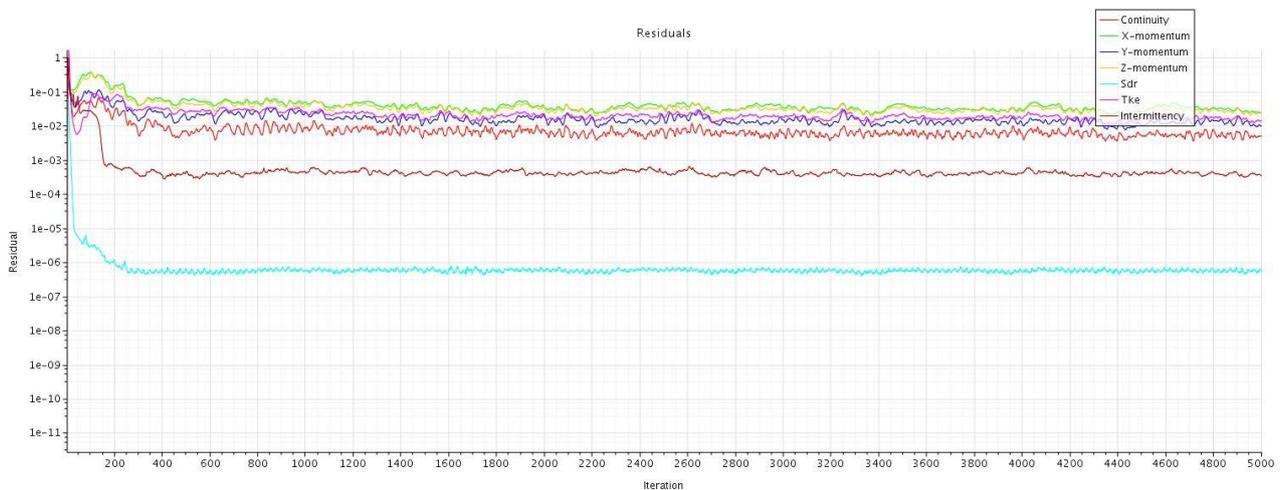


Figura 46. Evolución de los residuos de la solución.

Se observa una disminución de la amplitud en la oscilación del valor del coeficiente de sustentación, pero principalmente se observa una rápida disminución de los residuos, alcanzándose la solución en un número menor de iteraciones. En este caso se realizaron 5000 iteraciones a modo de prueba, pero se comprueba que a partir de 1600 la solución oscila respecto al mismo valor. Se adopta por tanto esta configuración de la malla para las siguientes simulaciones.

3.1.3.4 Simulación del giro de las ruedas.

Antes de introducir los distintos componentes del paquete aerodinámico se procede a simular de forma más detallada los neumáticos. Éstos tienen un efecto relevante en el funcionamiento del difusor al crear una estela que influye en el rendimiento de éste. Por tanto, se decide realizar una simulación con el modelo que se presenta a continuación:

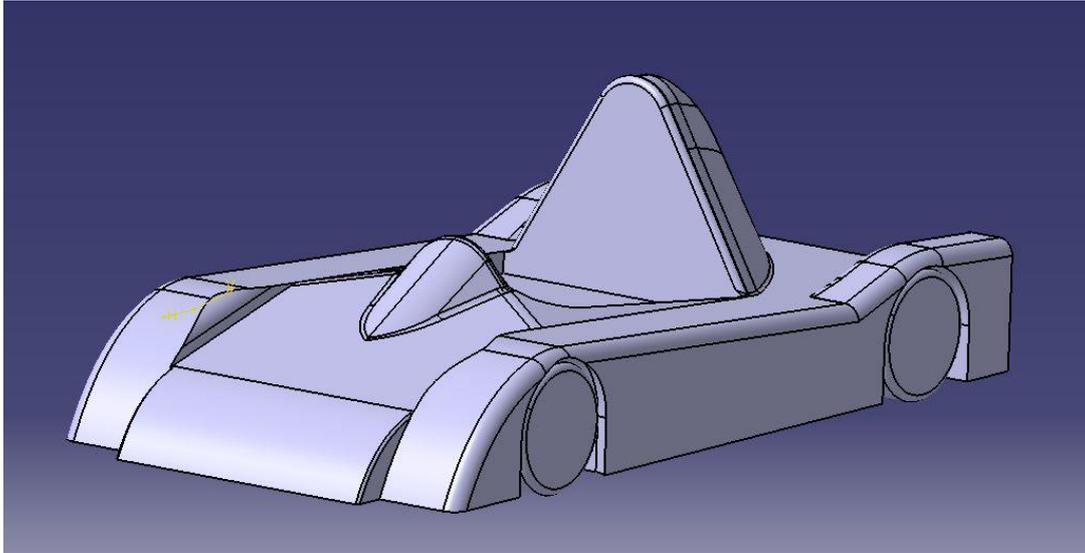


Figura 47. Versión V2 con neumáticos.

A fin de no aumentar excesivamente el número necesario de elementos en la malla para reproducir correctamente la geometría, se realiza el conjunto llanta – neumático como un sólido único, empleando la herramienta *Shaft*. Además, se decide no introducir ningún elemento de la suspensión por la misma razón.

Por otro lado, se realizan otras dos modificaciones: se reduce el carenado de las ruedas traseras, pues no necesitan la anchura de las delanteras al permanecer siempre rectas, y se modifica el carenado del motor, con el fin de reducir la resistencia que provoca éste. Para esto último se opta por una forma curva del carenado, con una curvatura similar a la de un perfil aerodinámico. El carenado entonces estaría compuesto por dos piezas de fácil fabricación usando chapa de 1,5 mm de acero para dar forma a los contramoldes para laminar dichas piezas. A continuación, se presentan dos vistas en planta del nuevo modelo junto con el anterior:

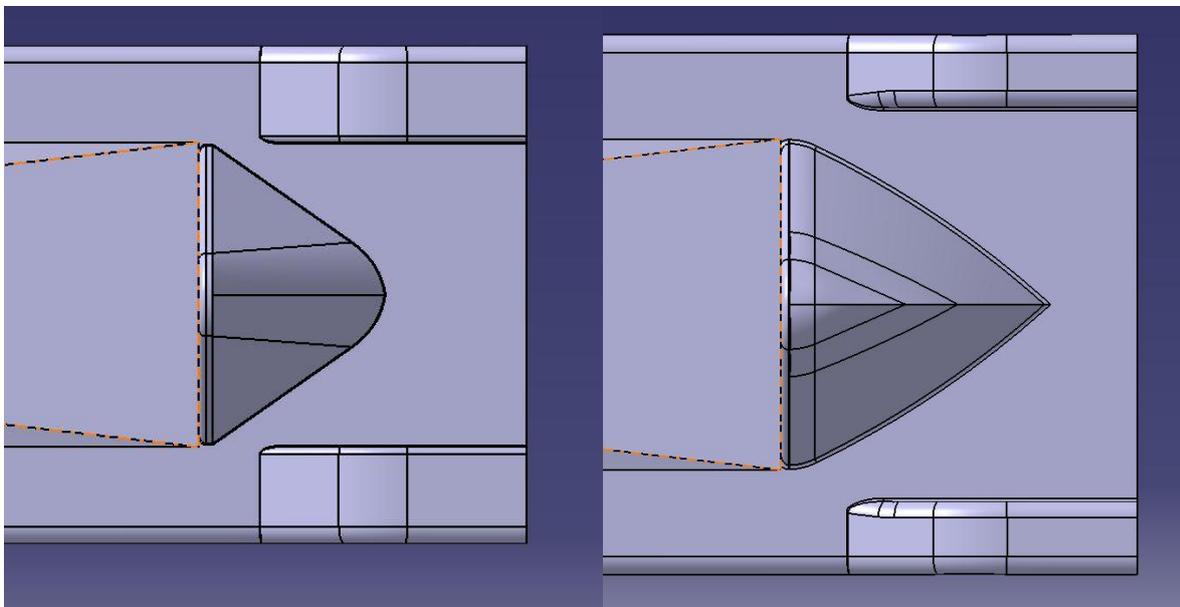


Figura 48. Vista en planta del modelo anterior (izquierda) y el modelo a simular en este apartado.

Para la simulación de este modelo se mantiene la configuración de la malla, pero se añade la condición de giro en las ruedas. Para esto primero se debe definir cada rueda como una región independiente, segundo se configura la región para que tenga un flujo girando alrededor de esta respecto de un eje definido y una velocidad angular determinada. A continuación, se muestran dos capturas del programa en el momento de realizar dicha configuración.

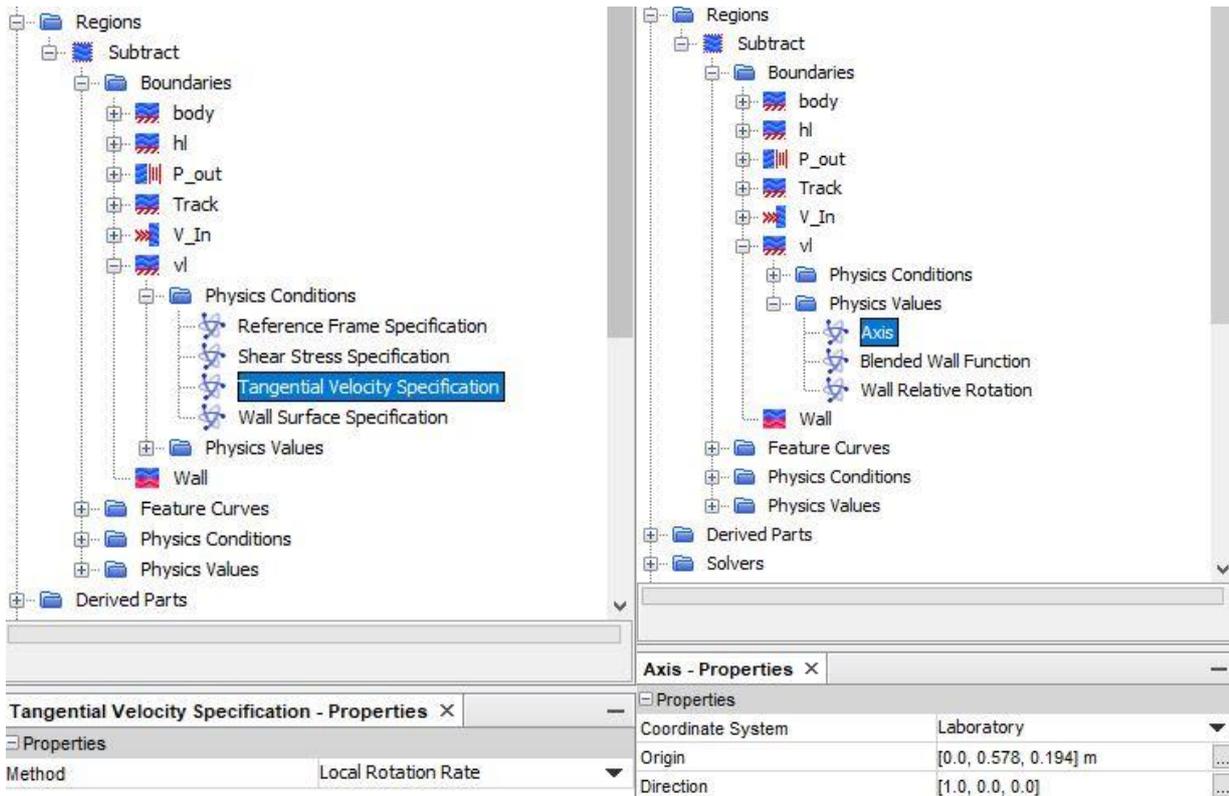


Figura 49. Configuración de la región correspondiente a la rueda delantera izquierda.

Para obtener el origen del eje de rotación usamos el modelo CAD y realizamos la medida en Catia. Para una corriente incidente de 40 m/s y un radio de neumático de 0,228 m obtenemos una velocidad angular del neumático de 175,43859 rad/s.

Para esta geometría se obtiene una malla de 6.241.635 elementos, un aumento de aproximadamente 1,2 millones respecto al modelo sin ruedas. En las siguientes gráficas se representa la evolución de los coeficientes de resistencia y sustentación, así como los residuos de la solución:



Figura 50. Evolución de los coeficientes de resistencia (rojo) y sustentación (verde).

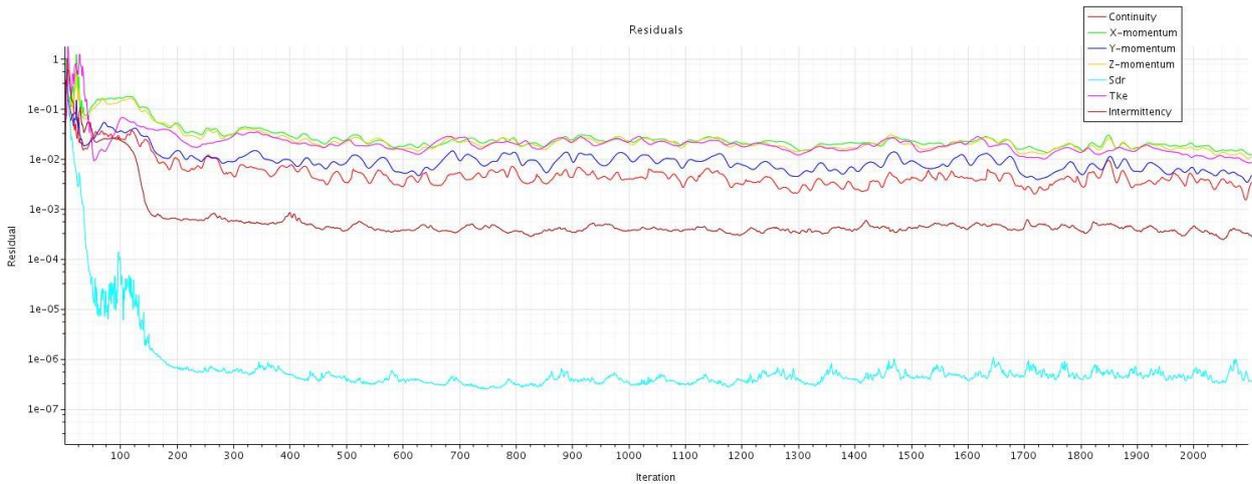


Figura 51. Evolución de los residuos.

Si se toma la media de los valores de las últimas 300 iteraciones de las simulaciones realizadas en las iteraciones sobre la versión V2 se obtiene el siguiente resultado:

Version (apartado)	3.1.3.1	3.1.3.2	3.1.3.3	3.1.3.4
Cd	0,454	0,448	0,469	0,489
Cl	0,251	0,249	0,307	0,332
Area frontal (m²)	1,101	1,101	1,101	1,088

Tabla 2. Resultados de la simulación.

Se observa que al mejorar el mallado de la capa límite se obtiene un resultado considerablemente distinto para una geometría idéntica. Teniendo en cuenta la rapidez con la que converge la solución y la reducción de la oscilación en los valores de ambos coeficientes, cabe pensar que ésta última sea una solución más precisa.

En la última simulación se obtienen valores mayores en ambos coeficientes debido a la introducción de las ruedas en la simulación. La reducción del carenado de las ruedas traseras tiene un resultado positivo en la reducción del área frontal. Por último, se observa en las siguientes capturas la distribución de presiones en el carenado del motor, ajustando la escala de presiones para poder observar con claridad la diferencia respecto del modelo anterior (izquierda).

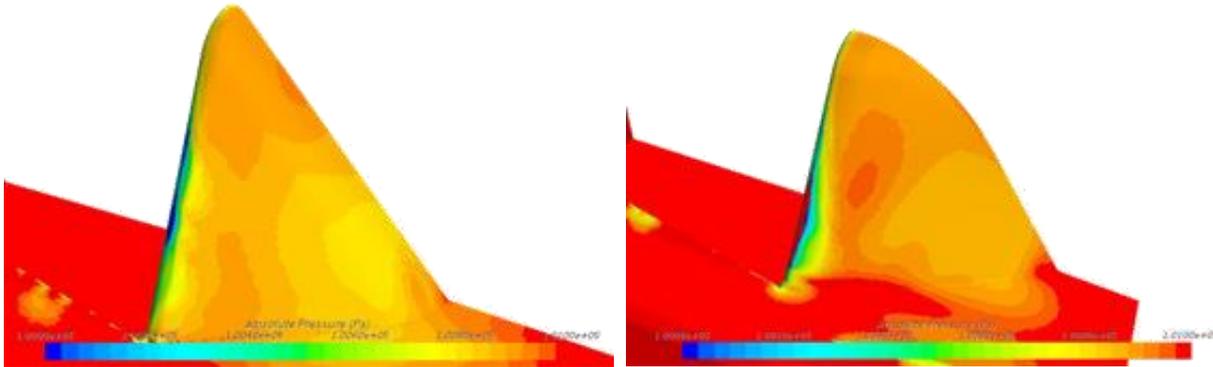


Figura 52. Distribución de presiones sobre el carenado del motor.

Se observan tonos más claros correspondientes a una menor presión en el modelo anterior, por lo que se mantiene la modificación en el diseño. De acuerdo a los resultados, se selecciona este último modelo como base a modificar para el paquete aerodinámico.

3.2 Difusor y Splitter

El paquete aerodinámico del monoplaza estará compuesto por un splitter o labio frontal, un difusor y un alerón trasero. Para poder determinar el efecto de cada componente se decide la siguiente estrategia de diseño:

- Variación de la longitud del spoiler delantero manteniendo constante el difusor y sin introducir el alerón trasero.
- Variación de la inclinación y punto de inicio del difusor manteniendo el spoiler delantero constante, usando el que ofrezca mejor resultado en el apartado anterior.
- Introducción del alerón trasero empleando el perfil y ángulo de ataque proporcionado por un estudio previo realizado con el software Javafoil. Se introduce en la configuración de spoiler y difusor con mejor resultado en el simulador de tiempo por vuelta.

La decisión de analizar de forma conjunta *splitter* delantero y difusor se debe a la gran interacción que tienen dichos componentes entre ellos, pues el objetivo principal de ambos es crear una sección convergente-divergente respecto del suelo. Esto acelera el flujo, reduciendo la presión para posteriormente realizar un proceso difusivo en el que se desacelera el flujo y se adapta la presión a la encontrada en la parte trasera del monoplaza.

Por otro lado, se decide implementar un modelo simplificado del piloto. Esto se hace principalmente por el efecto que pueda tener sobre el alerón trasero, sin embargo, se decide introducirlo al inicio del desarrollo del paquete aerodinámico para una mejor comparación de los resultados. En la siguiente captura se muestra el

modelo CAD empleado para una de las iteraciones del splitter:

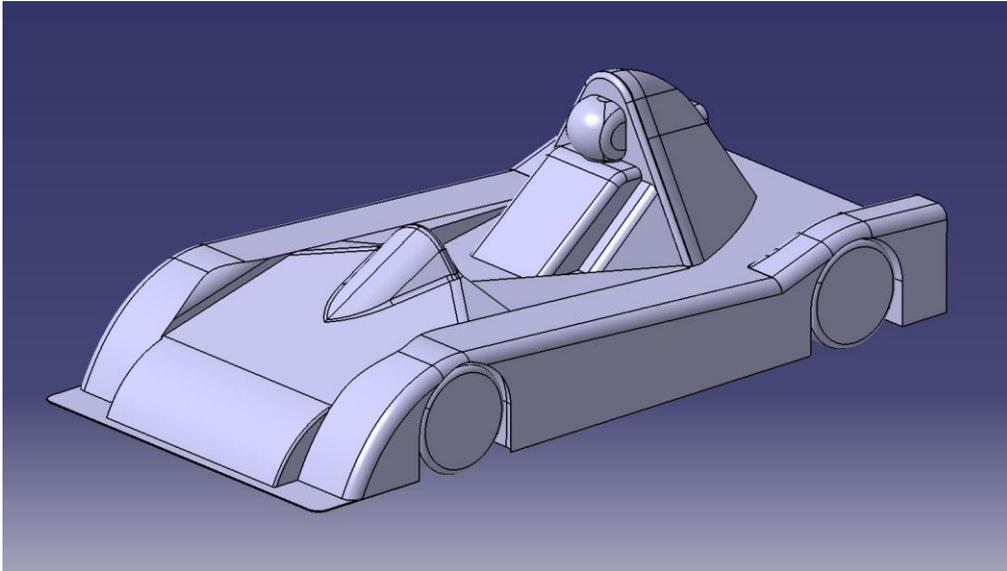


Figura 53. Modelo CAD.

3.2.1 Iteraciones sobre el *splitter*.

Se prueban tres configuraciones distintas para un ángulo en el difusor de 7° :

- Configuración sin splitter: que servirá como referencia.
- Splitter de 55 mm de longitud,
- Splitter de 110 mm: que servirá como límite superior.

Se utiliza una nueva configuración de la malla, que se mantiene constante para las tres simulaciones. Los cambios son los siguientes:

- Se introduce un nuevo *Surface Control* sobre todo el fondo plano, splitter y difusor. Dicha superficie, mostrada en la siguiente captura, se define previamente. La configuración será:
 - *Target Surface Size*: 8 mm.
 - *Minimum Surface Size*: 4 mm.

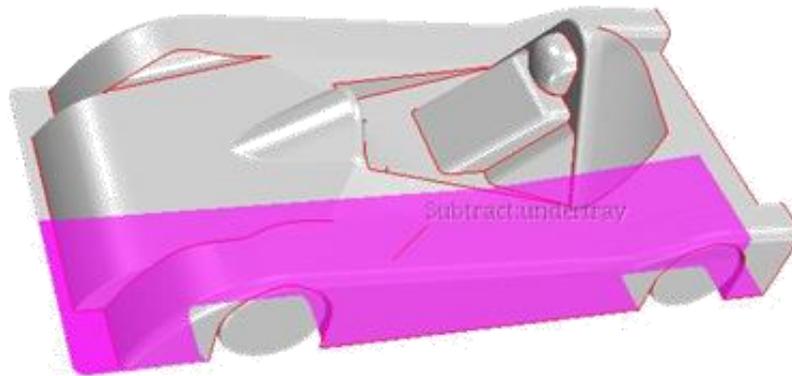


Figura 54. Nuevo *Surface Control*.

- Introducción de dos volúmenes de control (*Volumetric Control*), opción que fija el tamaño de los elementos dentro de la zona establecida:
 - *Volumetric Control 1*: sobre un bloque que engloba la zona del inicio del difusor a fin de captar con mayor fidelidad el comportamiento del flujo. Se establece un tamaño de elemento de 4 mm.
 - *Volumetric Control 2*: sobre la zona del *splitter*, con tamaño de elemento de 5 mm.

En la siguiente captura se muestran las zonas sobre las que se realizan los volúmenes de control del mallado:

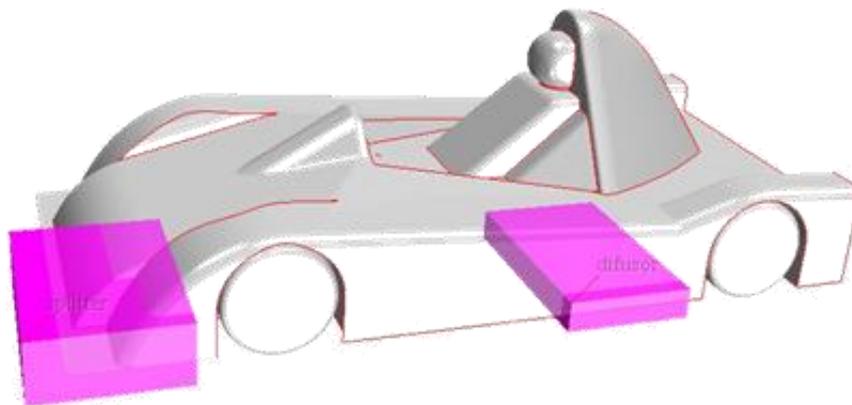


Figura 55. Zonas sobre las que se realizan los controles volumétricos.

En la siguiente figura se expone el resultado de las tres configuraciones, realizándose la media de las últimas 300 iteraciones para el caso de los coeficientes de resistencia y sustentación:

Configuración	Número de elementos de la malla	Coefficiente de resistencia	Coefficiente de sustentación	Área frontal (m ²)	Tiempo por vuelta (min)	Relación final de cambio
Sin splitter	13.077.854	0,490	-1,07	1,09	1:41,007	3,34
55 mm	13.147.892	0,491	-1,15	1,09	1:40,492	3,36
110 mm	13.164.800	0,492	-1,26	1,09	1:39,782	3,37

Tabla 3. Resultados obtenidos.

A la vista de los resultados es fácil seleccionar la configuración con un *splitter* de 110 mm. Se establece este límite en la longitud usando como referencia prototipos similares. Un tamaño excesivo de *splitter* puede provocar problemas estructurales, por lo que se opta por un límite conservativo. En la siguiente captura se muestra la configuración de *splitter* seleccionada:

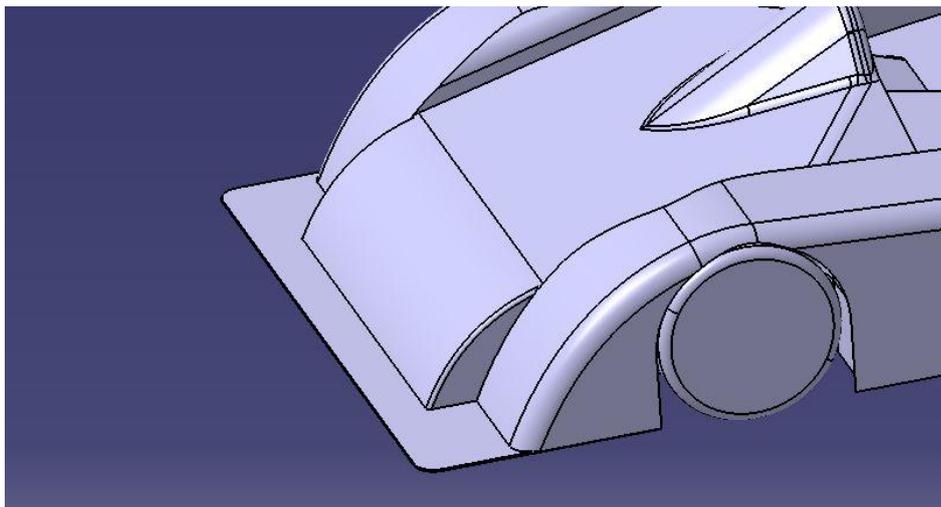


Figura 56. Detalle de *splitter* de 110 mm.

3.2.2 Iteraciones sobre el difusor.

Empleando el modelo de *splitter* seleccionado en el apartado anterior se realizan 2 simulaciones variando el ángulo del difusor, una configuración con 9° respecto al plano horizontal y otra con 5°. Esto se hace teniendo en cuenta la corona del sistema de transmisión, elemento restrictivo en el posicionamiento del difusor. En la siguiente captura se muestra la línea que define el difusor para cada configuración:

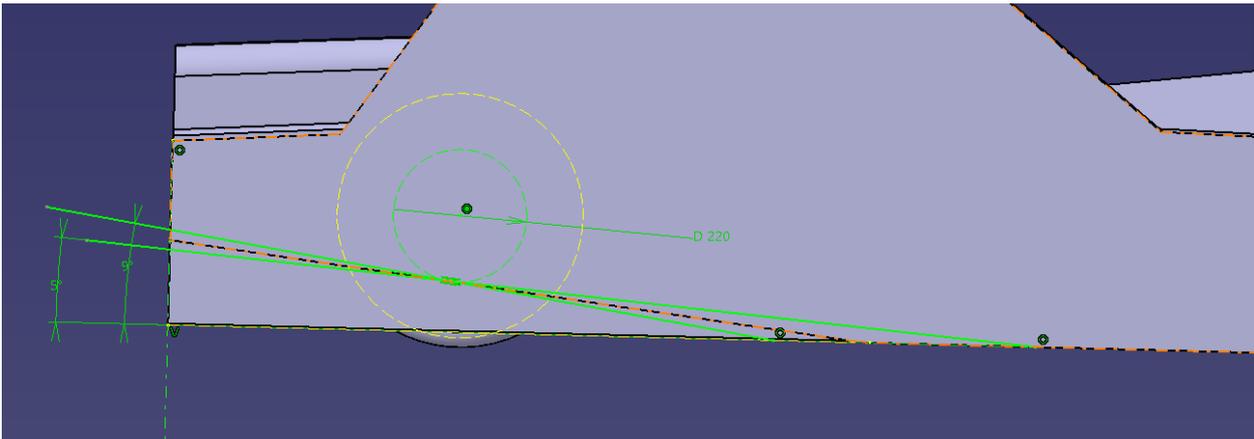


Figura 57. Distintas configuraciones del difusor.

De esta forma se varía el punto de inicio según el ángulo, así las diferentes configuraciones equidistan del eje de giro trasero.

La configuración del análisis es idéntica al del apartado anterior, obteniéndose los siguientes resultados:

Configuración	Número de elementos de la malla	Coefficiente de resistencia	Coefficiente de sustentación	Área frontal (m ²)	Tiempo por vuelta (min)	Relación final de cambio
9°	13.665.763	0,497	-0,962	1,09	1:41,818	3,38
7°	13.164.800	0,492	-1,26	1,09	1:39,782	3,37
5°	13.232.153	0,493	-1,38	1,09	1:39,056	3,38

Tabla 4. Resultados para distintos ángulos.

Se observa como la configuración de 9° es demasiado agresiva, penalizando considerablemente en el coeficiente de sustentación. La configuración de 5° sin embargo, muestra una mejoría respecto a la configuración base. En base a esto se toma la decisión de analizar una configuración de 4°, pues sería técnicamente viable. El resultado es el siguiente:

Configuración	Número de elementos de la malla	Coefficiente de resistencia	Coefficiente de sustentación	Área frontal (m ²)	Tiempo por vuelta (min)	Relación final de cambio
4°	13.723.824	0,501	-1,44	1,09	1:38,718	3,38

Tabla 5. Resultados para 4°.

A pesar de que se obtiene un coeficiente de resistencia ligeramente superior, el incremento del coeficiente negativo de sustentación lo compensa, obteniéndose una mejora de más de tres décimas de segundo por vuelta. Por otro lado, una configuración de 3° no sería viable si se mantuviese la distancia del difusor al eje de giro, a

fin de conseguir el mayor volumen posible en el difusor, por lo que se escoge la configuración de 4°. A continuación, se muestra una captura del modelo CAD de esta configuración, donde se puede observar lo adelantado que se encuentra el inicio del difusor:

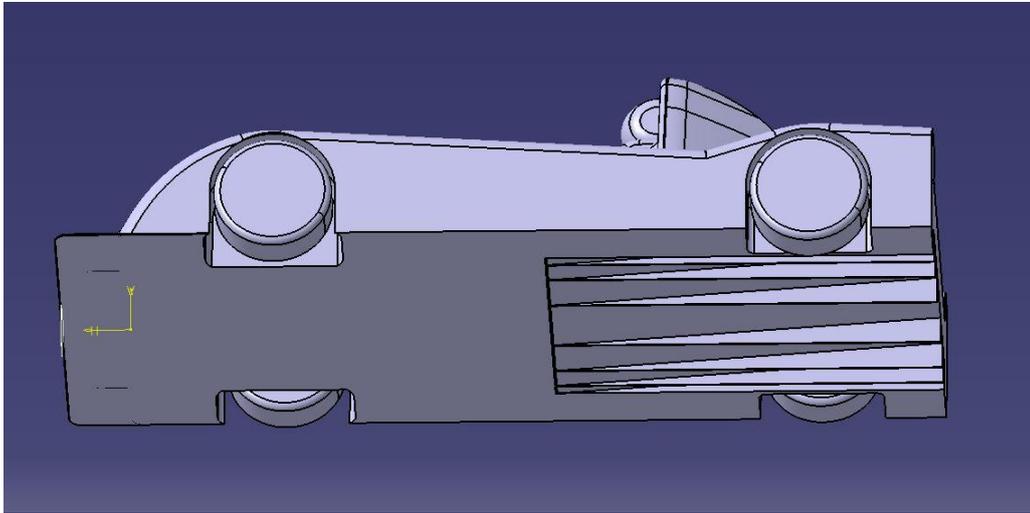


Figura 58. Vista inferior del modelo CAD con difusor de 4° de inclinación.

3.3 Alerón trasero

Una vez establecidas las configuraciones de splitter y difusor, se procede al desarrollo del alerón trasero. A pesar de que la normativa no limita el número de etapas que pueden componer el alerón, se decide utilizar sólo una etapa por motivos económicos, pues una segunda o tercera etapa necesitaría otro conjunto de moldes para su fabricación.

Para el estudio de este componente se utiliza el software JavaFoil, que realiza un cálculo en 2D sobre un perfil aerodinámico establecido. Puesto que el número de distintas configuraciones es infinito, se decide emplear la herramienta de barrido del programa de simulación de tiempo por vuelta para averiguar si interesa una configuración que priorice una alta eficiencia aerodinámica o una carga aerodinámica elevada. Para esto se realiza un barrido fijando un coeficiente de resistencia de 0,6 y variando el coeficiente de sustentación desde -1,44 hasta 2,5. En la siguiente captura se muestra el resultado obtenido:

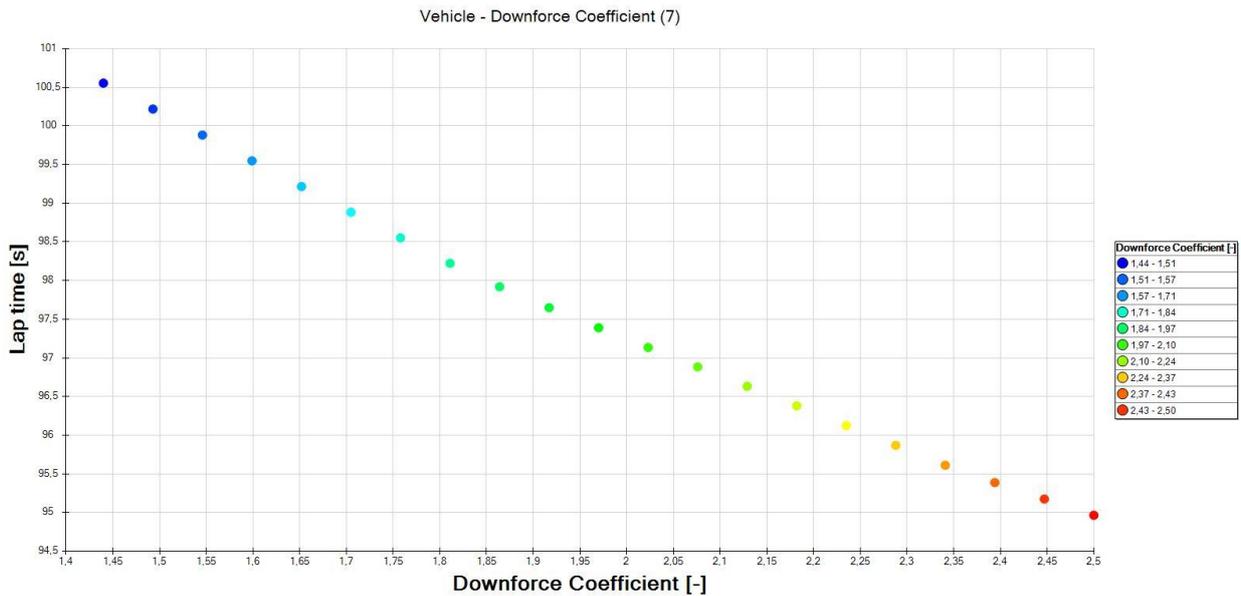


Figura 59. Barrido de simulaciones variando el coeficiente de sustentación negativo.

Se produce una mejora en el tiempo por vuelta a partir de un coeficiente de sustentación de -1,71. Por tanto una modificación que aumente el coeficiente de resistencia en 0,1 tendría una mejora en el tiempo por vuelta si el aumento en el coeficiente de sustentación es mayor que 0,26. Esto indica que, para esta aplicación, interesa una configuración que priorice carga aerodinámica sobre eficiencia. En base a esto iniciamos un proceso iterativo para obtener un perfil adecuado.

Se emplean perfiles NACA de 4 cifras, aunque como se verá más adelante, el primer dígito se lleva hasta un valor de dos cifras. Se prueban múltiples configuraciones de espesor, posición de máximo espesor y curvatura, buscando un perfil que admita altos ángulos de ataque sin entrar en pérdida, con un elevado coeficiente de sustentación. A continuación, se exponen los resultados obtenidos en las diferentes iteraciones:

Perfil NACA	Espesor max. t/c	Curvatura máx. f/c	Situación de la curvatura máx. xf/c	Ángulo de ataque de máx. Cl	Cl	Cd	L/D
2205	5	2	20	9°	0,988	0,0081	124
2210	10	2	20	13°	1,422	0,0175	81,1
2215	15	2	20	16°	1,673	0,0297	56,1
5215	15	5	20	16°	1,98	0,0365	54,2
5315	15	5	30	17°	2,045	0,0372	54,9
5415	15	5	40	17°	2,101	0,034	61,8
9415	15	9	40	17°	2,255	0,042	60,1
9420	20	9	40	21°	2,88	0,068	45,6
12420	20	12	40	21°	3,19	0,079	40,3

20420	20	20	40	17°	4,03	0,049	80,9
22420	20	22	40	17°	4,19	0,052	81,4

Tabla 6. Resultados obtenidos para cada perfil.

Se decide para el proceso iterativo y escoger el perfil 20420, debido a la excesiva curvatura. Esto puede presentar problemas a la hora de fabricar el perfil mediante dos moldes, laminado intradós y extradós por separado. Por otro lado, se ha conseguido un valor de Cl muy por encima del obtenido en las primeras iteraciones. A continuación, se muestra una figura de la geometría de las dos últimas iteraciones:

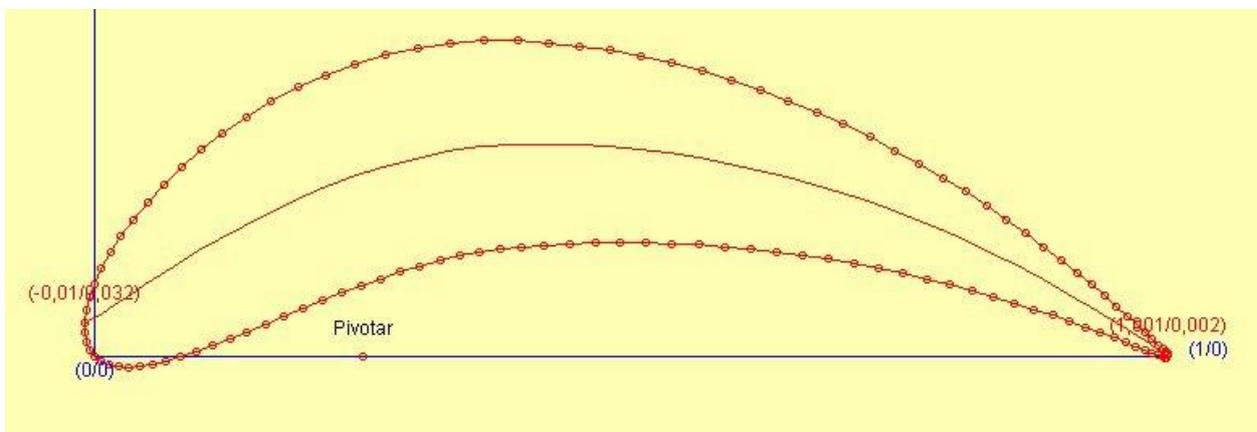


Figura 60. Perfil NACA 20420.

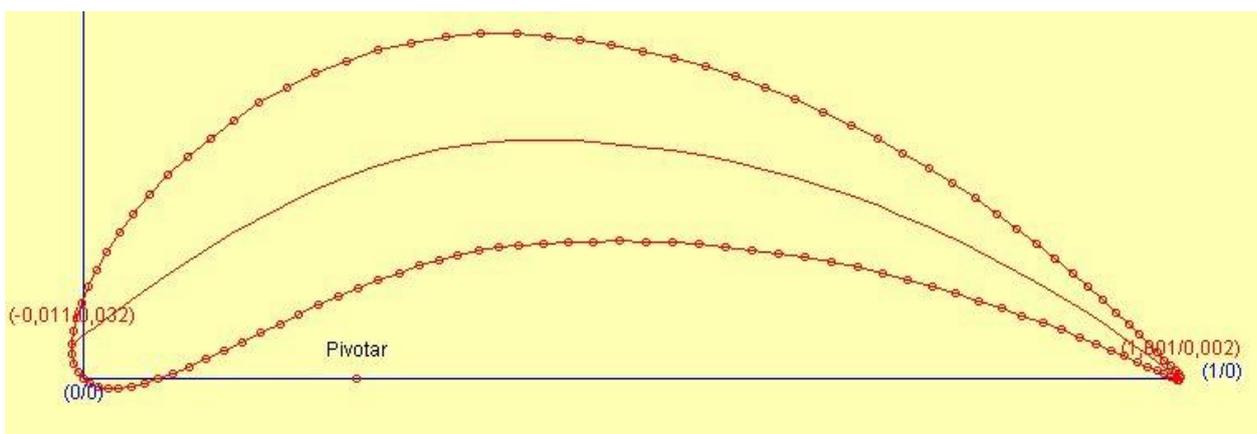


Figura 61. Perfil NACA 22420.

Seleccionado el perfil, se introduce en Catia para crea mediante la herramienta *Pad* un ala recta de 1655 mm a la que se añaden dos endplates. El ángulo de ataque queda determinado respecto a los endplates, de forma que sin los extremos superior e inferior de éstos son paralelos al plano horizontal, el alerón tendrá un ángulo de ataque de 17° grados. Esto facilita la integración en el resto del modelo del monoplaza. A continuación, se muestra una captura del modelo CAD de dicho alerón:

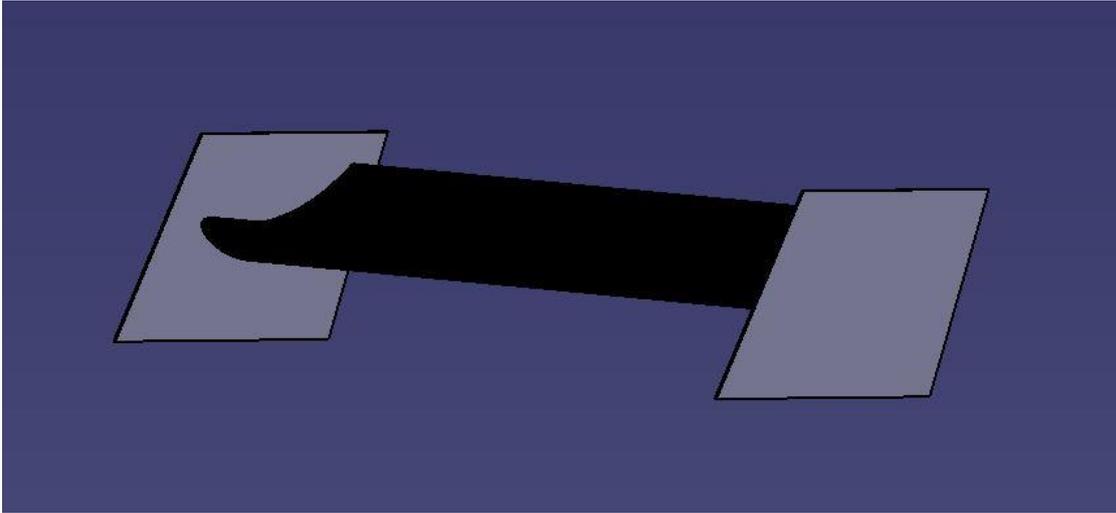


Figura 62. Modelo CAD del alerón.

4 COCHE COMPLETO

“Success represents the 1% of your work which results from the 99% that is called failure.”

- Soichiro Honda-

Una vez seleccionado el perfil alar y la configuración tanto del splitter como del difusor, se procede a un análisis del coche completo que aportará los datos necesarios para comparar los tiempos por vuelta de otros prototipos con los obtenidos en la simulación en OptimumLap.

4.1 Modelado.

Para introducir el alerón en el conjunto se emplea el módulo *Assembly Design*. El alerón se introduce de forma que tenga un ángulo de ataque de 17° respecto del plano horizontal. Se posiciona a media altura y retrasado de forma que cumpla con la normativa de la competición, la cual estipula que no puede sobresalir más de 300 mm. Se decide suprimir la estructura necesaria para la sujeción a fin de simplificar la geometría del modelo.

Tras el posicionado del alerón, se emplea la herramienta *Generate CATpart from Product* para obtener un modelo único importable en STAR CCM+. Posteriormente se guarda el CATPart obtenido en formato *stp*. A continuación, se muestran varias capturas del modelo en CATIA del monoplace completo:

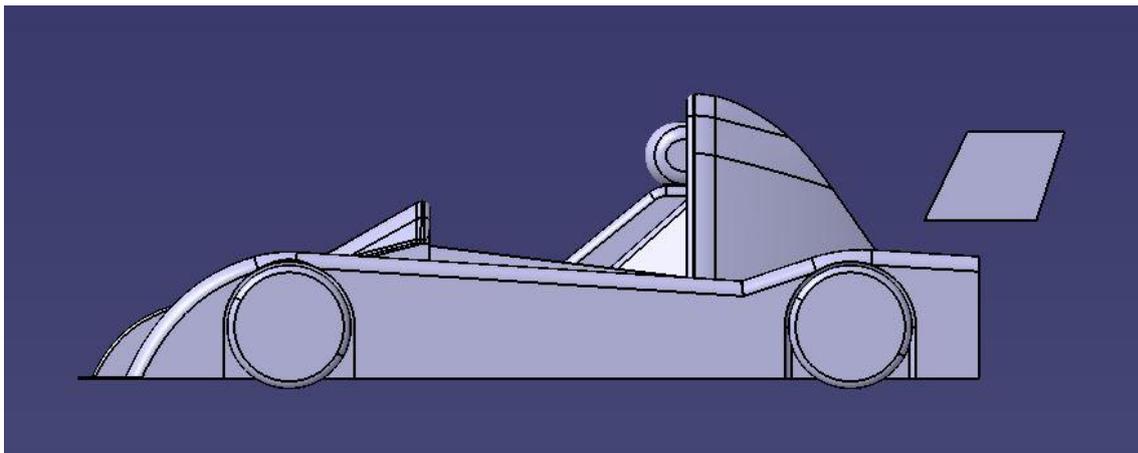


Figura 63. Vista de perfil del modelo CAD completo.

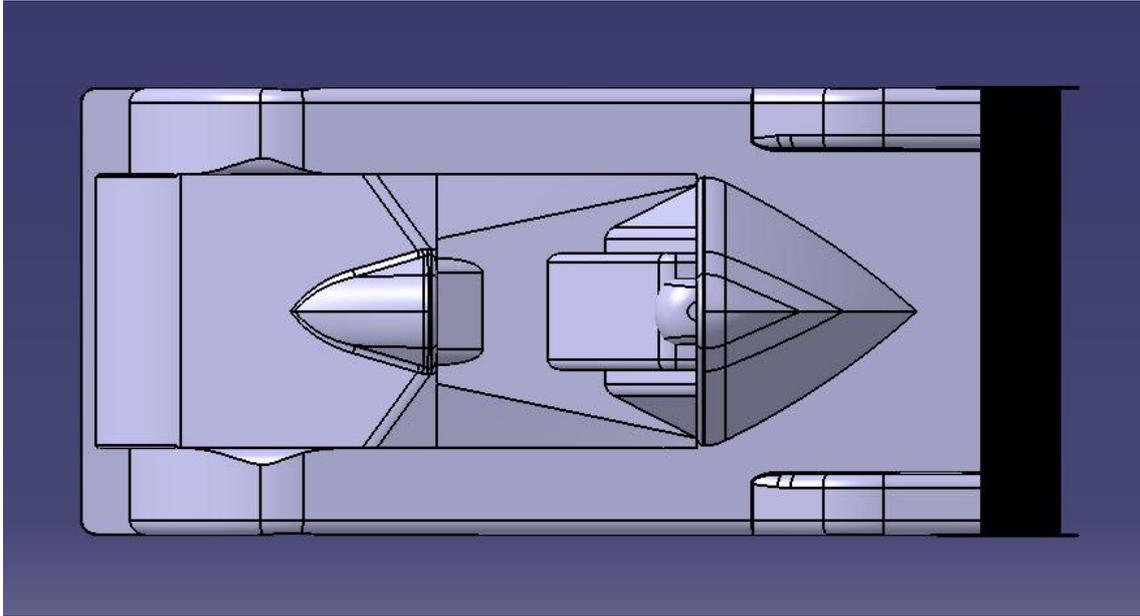


Figura 64. Vista en planta del modelo CAD completo.

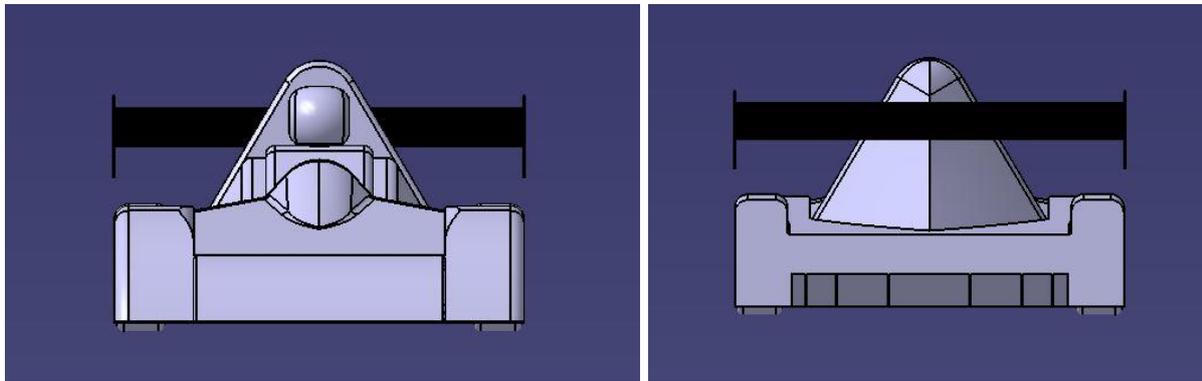


Figura 65. Vistas en alzado y alzado posterior del modelo CAD completo.

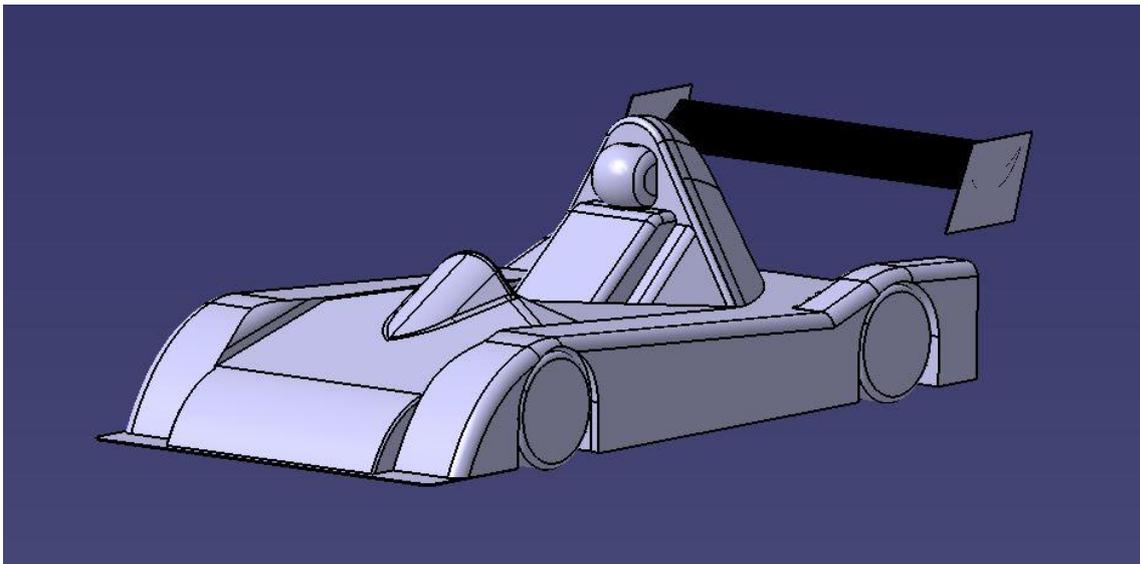


Figura 66. Vista en perspectiva del modelo CAD completo.

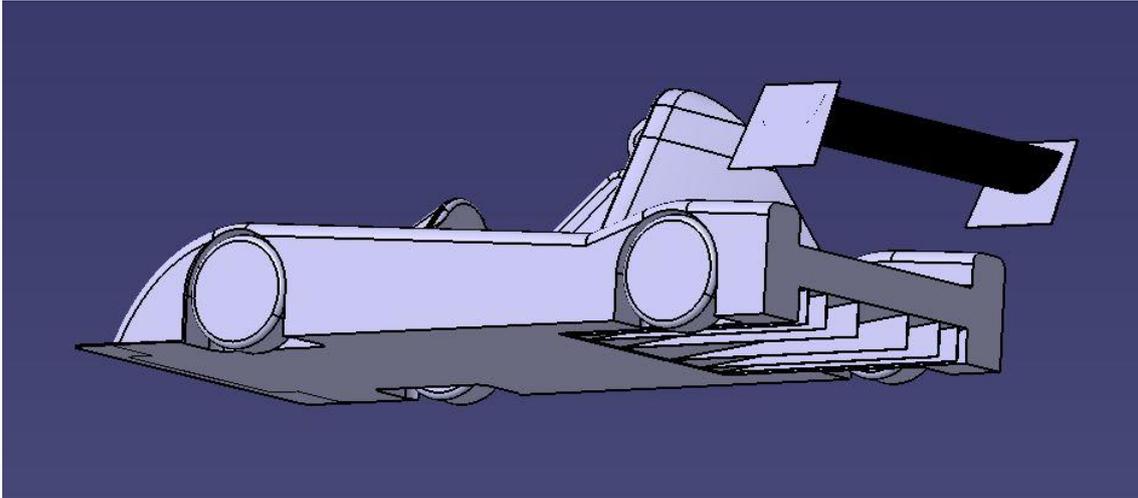


Figura 67. Vista en perspectiva posterior del modelo CAD completo.

4.2 Análisis.

El mallado se realiza manteniendo los parámetros de la simulación correspondiente al desarrollo del conjunto splitter- difusor, y añadiendo los siguientes controles locales sobre la malla:

- Surface Control: sobre la superficie del alerón. Como configuración inicial se emplea:
 - Target Surface Size: 2 mm.
 - Minimum Surface Size: 1 mm.
- Volumetric Control: sobre un bloque que engloba el ala. Como configuración inicial se introduce un tamaño de celda de 2 mm. En la siguiente captura se muestra la zona en cuestión:

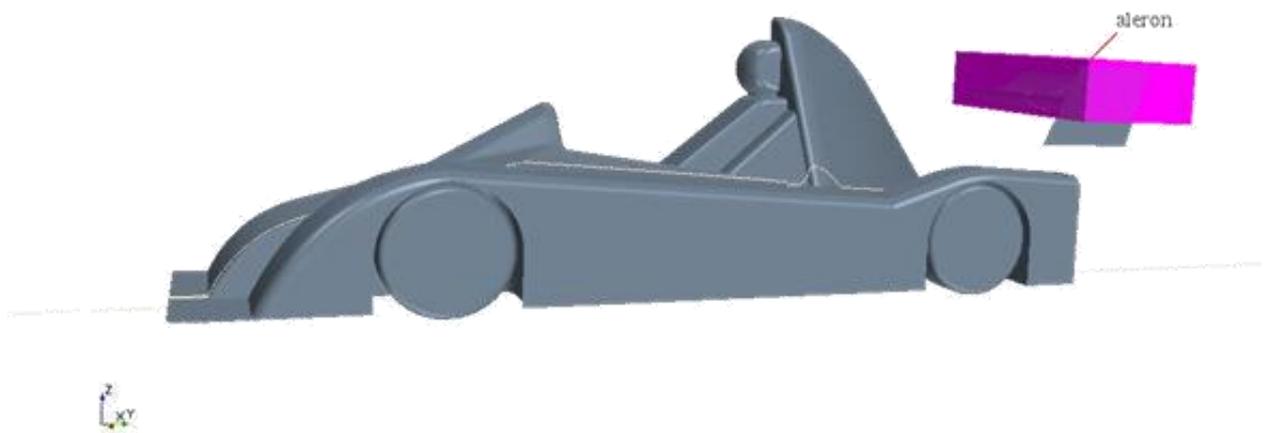


Figura 68. Detalle de la zona de aplicación del control volumétrico del mallado.

Esta configuración da como resultado una malla de x elementos, que supera la capacidad computacional del equipo usado. Por tanto, se modifican los parámetros anteriores hasta encontrar una configuración que represente

con fidelidad la geometría sin exceder el límite de memoria RAM disponible. En la siguiente tabla se muestran las diferentes iteraciones realizadas:

Surface Control		Volumetric Control, Custom Size (mm)	Número de elementos
Target Surface Size (mm)	Minimum Surface Size (mm)		
2	1	2	Error, memoria insuficiente.
4	2	4	20.928.186
6	1,5	3,5	22.291.333
3,5	1	3,5	22.761.127

Tabla 7. Iteraciones realizadas.

Se opta por la configuración final, para la que se establece un tamaño de celda en el volumen algo menor que el utilizado en la zona del difusor, y se consigue un tamaño muy reducido en la superficie.

4.3 Resultado.

Para esta simulación, el tiempo necesario por iteración aumenta considerablemente, llegando a varios minutos. Queda patente la importancia de analizar por separado el perfil del alerón. Tras 1000 iteraciones se comprueba el valor de y^+ sobre la superficie, obteniéndose el siguiente resultado:

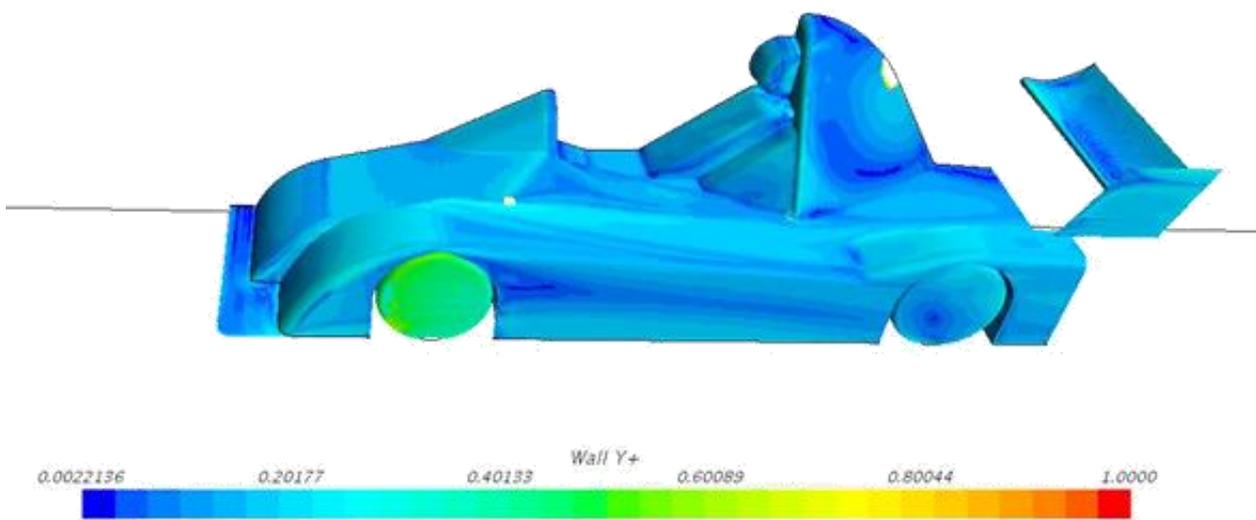


Figura 69. Valor de y^+ sobre la superficie del modelo. Vista superior.

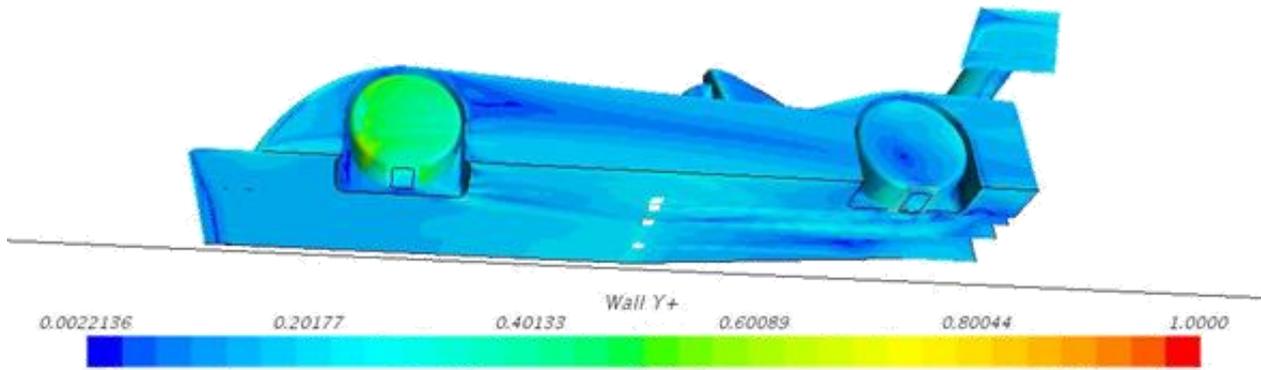


Figura 70. Valor de y^+ sobre la superficie del modelo. Vista inferior.

Salvo en pequeñas zonas muy concretas, se obtiene un valor menor de la unidad, siendo en mayor parte menor a 0,4, por lo que se continúa iterando sin realizar ningún cambio. Se decide parar el cálculo al completar 3000 iteraciones tras observar una oscilación estable de los valores de interés. A continuación, se muestra una captura de la evolución del valor de los coeficientes de resistencia y sustentación, así como de los residuos de la solución.

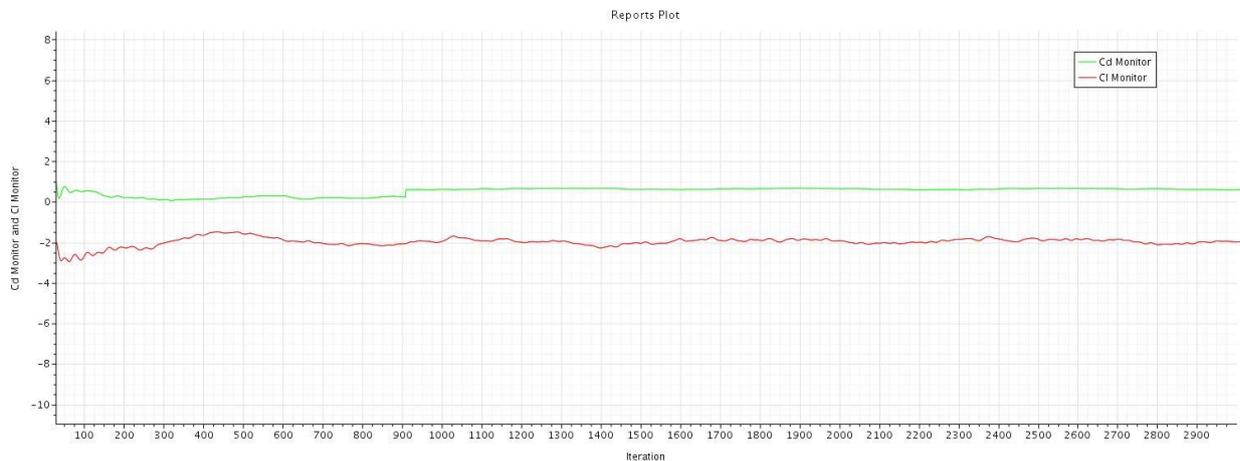


Figura 71. Evolución de los coeficientes de resistencia y sustentación.

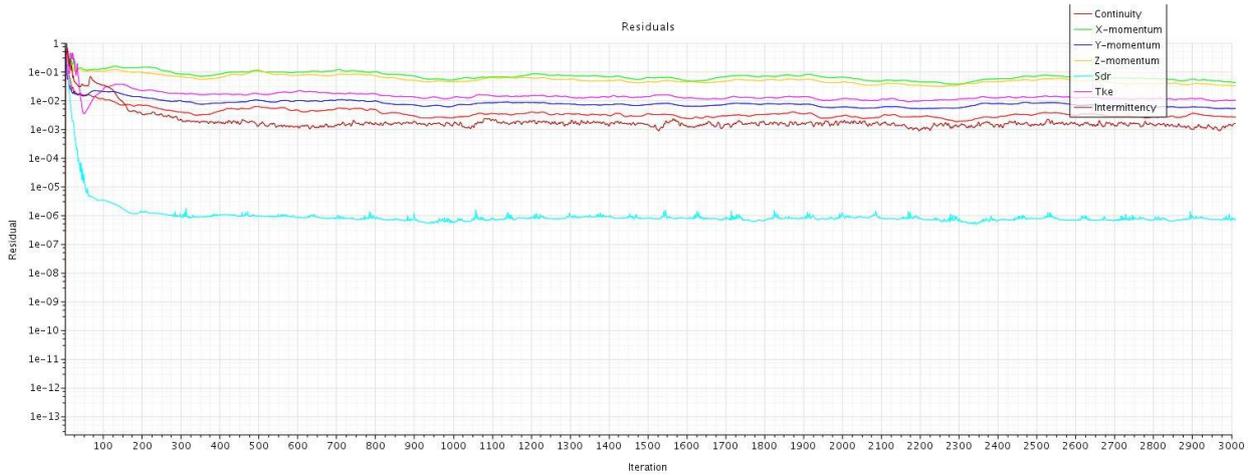


Figura 72. Evolución de los residuos de la solución.

Teniendo en cuenta que la capacidad computacional no permitiría una mejora del malla, se obtiene una solución estable. Al igual que en los apartados anteriores, realizamos la media de las últimas 300 iteraciones. El resultado se muestra en la siguiente tabla:

Cd	Cl	Area frontal (m²)	Tiempo por vuelta (min)	Relación final de cambio.
0,593	-2,05	1,28	1:37,417	3,55

Tabla 8. Resultados obtenidos.

Se obtiene una mejora en el tiempo por vuelta de 1,301 segundos respecto a la configuración sin alerón. Teniendo en cuenta que cada vez es más difícil reducir el tiempo por vuelta, es una mejora considerable que justifica la implementación de este elemento.

A fin de tener una referencia para comparar los diferentes resultados, se han realizado las simulaciones de tiempo por vuelta únicamente en un circuito, Nürburgring GP. Una vez obtenidos los datos de la configuración final, se procede a realizar simulaciones en todos los circuitos pertenecientes al campeonato. En la siguiente tabla se muestran los resultados, comparándose con el mejor tiempo obtenido en carrera de prototipos similares [10]:

Circuito	Tiempos por vuelta (min)			
	Diseño inicial V1	Diseño final	Performer 1000	SuperKart
Assen GP	1:40,015	1:24,91	Sin datos	1:35,9
Zandvoort	1:37,642	1:21,786	1:44,14	1:39,27
Oscherleben	1:27,531	1:11,754	Sin datos	1:29,333
Hockenheimring	1:40,494	1:26,467	1:38,89	1:40,4

Tabla 9. Tiempos por vuelta obtenidos en comparación con resultados reales de la competición.

Las simulaciones obtenidas con el software OptimumLap no tienen en cuenta un sinfín de factores que aumentarían el tiempo por vuelta en el caso real, como errores cometidos por el piloto o condiciones climatológicas, por lo que cabría esperar un error de varios segundos. Sin embargo, comparando dos configuraciones distintas sí obtenemos resultados más fiables, pues el error cometido en ambas sería prácticamente el mismo. Además, se ha escogido la vuelta más rápida realizada por el piloto más rápido de cada modelo de prototipo.

Observando los resultados, el tiempo por vuelta del primer diseño es bastante similar al obtenido por prototipos que compiten en la misma categoría, caracterizada por un presupuesto reducido y en la que no se destinan recursos a desarrollar la aerodinámica del vehículo. Respecto de este diseño inicial se consigue una reducción en el tiempo por vuelta de hasta 16 segundos, lo que pone de manifiesto el potencial de mejora que tendría un diseño sin estudio aerodinámico para esta categoría en la que la velocidad media ronda los 160 km/h.

5 CONCLUSIÓN

"I've always been asked, 'What is my favorite car?' and I've always said 'The next one.'"

- Carroll Shelby-

En este punto se da por concluido este trabajo. A continuación, en los próximos tres apartados, se analizará el cumplimiento de los objetivos que fueron planteados al inicio. Posteriormente, se expondrán en un cuarto capítulo los distintos posibles proyectos que el autor considera oportunos para acercar la idea principal a una posible fabricación y comercialización.

5.1 Diseño CAD de una carrocería y componentes aerodinámicos de bajo presupuesto.

Debido al carácter no profesional de la categoría de Superlight de la competición Time Attack Germany al bajo coste de las alternativas que existen en el mercado de prototipos para competir en esta división, el diseño sólo puede ser exitoso si es posible su fabricación con bajo coste. El hecho de que el segundo diseño de carrocería realizado, la versión V2, consiga mejores resultados en el análisis CFD es todo un éxito, pues se lleva al extremo la implementación de zonas planas o de baja curvatura, cuya fabricación sería posible empleando chapa de acero como contramolde en lugar de costosos moldes fabricados por control numérico.

Por otro lado, se consigue obtener modelos sólidos en CAD con la complejidad necesaria para replicar la forma real, pero con formas suaves y carentes de discontinuidades que impidan obtener una solución en el análisis CFD.

5.2 Análisis en CFD y desarrollo iterativo del diseño.

Tras varias iteraciones en la configuración de las simulaciones, se obtienen resultados que convergen con relativa rapidez y que aportan resultados lo suficientemente estables para trabajar con los datos obtenidos en las simulaciones. Cabe resaltar la mejora obtenida a raíz de la configuración de la capa límite teniendo en cuenta el valor Y^+ del primer elemento de la superficie, que sienta las bases para las simulaciones posteriores de geometrías más complejas.

5.3 Simulación de tiempo por vuelta y comparación con datos de carrera.

Haciendo uso del software libre OptimumLap es posible comparar las actuaciones de cada configuración introduciendo los datos obtenidos en las simulaciones de CFD. Es esta herramienta la que permite analizar cada diseño a través de la magnitud que rige la calidad del producto final: el tiempo. Tomando los datos conocidos de otros prototipos de la categoría, así como los datos conocidos del motor y los neumáticos, se consigue realizar simulaciones de tiempo por vuelta que se aproximan a los valores que podrían obtenerse al fabricar el producto. Estas simulaciones son especialmente útiles si se usan a modo comparativo, y como se puede observar en el capítulo 4.3, se consigue una mejora abismal respecto a un diseño sin analizar aerodinámicamente. Esto invita a pensar que, en caso de llevarse a cabo la fabricación del producto, se consigan mejores resultados en competición que los obtenidos por otros prototipos de la categoría.

5.4 Posibles proyectos

El autor propone varios proyectos que podrían surgir como continuación de este, divididos en dos capítulos según la motivación principal de éstos, bien enfocados a la fabricación y posible comercialización o bien enfocados a la evolución de las prestaciones del monoplaza.

5.4.1 Proyectos con la fabricación como finalidad.

En este sentido el autor propone dos proyectos principales:

- Análisis estructural de la carrocería y los componentes aerodinámicos: a fin de garantizar la integridad estructural, sería necesario un estudio FEM de las zonas más críticas. En el apartado 3.2.1 queda patente como un estudio de estas características podría ayudar a aprovechar la normativa hasta su límite. Para esto se podría usar la distribución de presiones obtenida en las simulaciones CFD.
- Diseño del chasis y suspensión: empleando los datos de las simulaciones de tiempo por vuelta se puede extraer una aceleración lateral y longitudinal que sirvan como base para el diseño del esquema de suspensión.
- Diseño de un sistema de refrigeración del motor: empleando datos de potencia del motor y velocidad media.
- Estudio y desarrollo de un sistema de refrigeración de frenos: empleando los datos de la simulación por vuelta junto con la masa del prototipo.

5.4.2 Proyectos para mejorar las prestaciones del monoplaza.

Siempre teniendo en cuenta las limitaciones de presupuesto, sería posible desarrollar distintas evoluciones del prototipo:

- Mejora de las prestaciones del motor mediante el uso de un sistema RamAir, similar al usado en la motocicleta donante del motor. Debido a la normativa tan permisiva y a la velocidad media por vuelta, el prototipo podría beneficiarse de un sistema de admisión que incremente la presión de entrada a la cámara de combustión. Esto se realiza mediante un sistema que convierte la presión dinámica, producida por la velocidad relativa entre el monoplaza y el aire, en presión estática en una zona de remanso
- Diseño y desarrollo de apéndices aerodinámicos: cuya implementación podría ser posterior a la

fabricación del diseño principal, con los siguientes objetivos:

- Reducción de la resistencia aerodinámica creada por la zona del arco principal. En el transcurso de este proyecto se ha probado a estudiar un sistema de carenado del arco principal que ayude a retrasar el punto de desprendimiento del aire respecto del carenado del motor. Debido a la compleja geometría, la capacidad computacional disponible no es suficiente para analizar dicho apéndice. A continuación, se muestra una captura de un diseño preliminar:

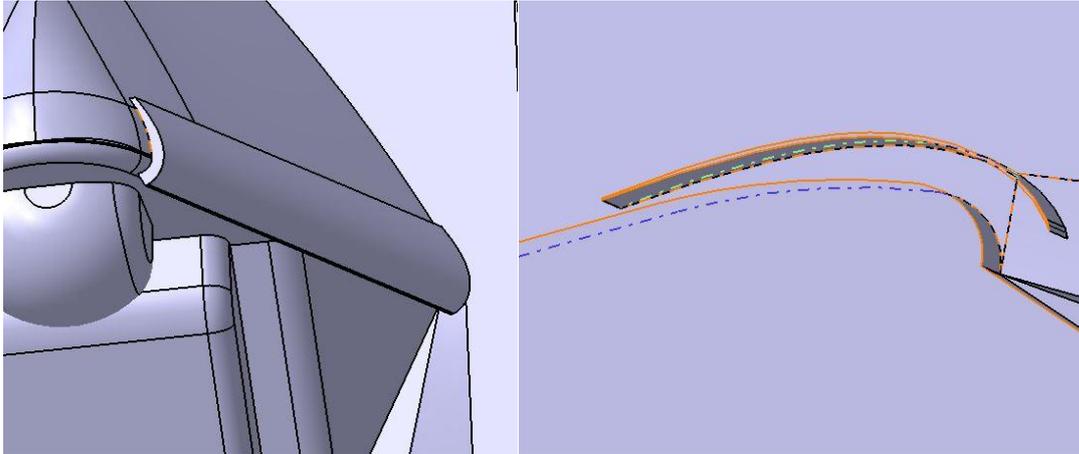


Figura 73. Captura de un diseño preliminar con el fin de reducir la resistencia aerodinámica.

- Mejora del rendimiento del difusor: bien mediante el diseño de un generador de vórtices en el splitter delantero que genere un efecto de barrido hacia afuera en los laterales del monoplaza o bien añadiendo zonas en los laterales del fondo plando que dificulten el movimiento del aire en la dirección transversal. En definitiva, se trata de evitar en la medida de lo posible el movimiento de aire hacia la garganta del difusor, donde se producen las presiones más bajas.

REFERENCIAS

- [1] Normativa del Time Attack Germany, http://www.timeattack.de/images/pdf/Reglement_GTAM.pdf
- [2] https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf
- [3] <http://www.performer-by-elkmann.de/construction.html>
- [4] https://www.hoosiertire.com/news/article/64377/Circuit_Series_Tire_Specs
- [5] David Neva Sánchez, **Mejora en la Metodología de Estudio Aerodinámico de un Formula Student mediante herramientas CAD y CFD**, Dpto. Ingeniería Aeroespacial
- [6] [http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/html/ug/node20.htm#:~:text=The%20segregated%20and%20coupled%20approaches,solves%20them%20simultaneously%20\(i.e.%2C%20coupled](http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/html/ug/node20.htm#:~:text=The%20segregated%20and%20coupled%20approaches,solves%20them%20simultaneously%20(i.e.%2C%20coupled)
- [7] Miguel Pérez Saborid, Apuntes de Mecánica de Fluidos II
- [8] The k - omega SST Turbulence Model, https://www.youtube.com/watch?v=myv-ityFnS4&ab_channel=FluidMechanics101
- [9] <https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/13743/Choosing-the-Right-Turbulence-Model-for-Your-CFD-Simulation.aspx>
- [10] <https://getraceresults.com/Results/organisator/2017?evenement=TT-Circuit+Assen&race=Gamma+Racing+Day%27s+2017>
- [11] <http://www.performer-by-elkmann.de/>
- [12] <https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1518&context=mesp>
- [13] https://www.motorcyclespecs.co.za/model/suzu/suzuki_gsxr1000%2007.htm

