



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis CFD del sistema DRS del alerón trasero de un
monoplaza de Fórmula 1 y propuesta de mejora*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: AF Poch Santana, Julio

DIRECTORES: D. Miguel Ángel Gómez Rodríguez
D. Arturo González Gil

CURSO ACADÉMICO: 2018-2019

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis CFD del sistema DRS del alerón trasero de un
monoplaza de Fórmula 1 y propuesta de mejora*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General / Infantería de Marina

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

La Fórmula 1 es un deporte de motor de alta exigencia, en el cual, la aerodinámica ha cobrado un valor transcendental con el paso de los años. Muchos de los avances tecnológicos desarrollados en esta categoría, se trasladan a los vehículos de calle. Lo mismo pasa con las técnicas usadas para llevar a cabo estos avances. Una de ellas es conocida como *Computational Fluid Dynamics* (CFD), la cual se ha convertido en una herramienta fundamental en la ingeniería, sobre todo en la aeronáutica y en el ámbito naval.

En este trabajo el desarrollo se realiza en un ambiente aeronáutico más bien, ya que el objetivo es analizar un alerón trasero de Fórmula 1, particularmente el *Drag Reduction System* (DRS), mediante esta tecnología. Para ello se va a partir de un modelo físico, al que se le ha simplificado la geometría para su mejor estudio. Una vez realizado el modelado, se lleva a cabo el proceso de mallado, para realizar su análisis posteriormente mediante software CFD.

Gracias a la simulación, se pueden obtener datos de presión, fuerzas y velocidades del flujo de aire, entre otros. Con esto y con las ecuaciones aerodinámicas oportunas se puede obtener un análisis completo y conocer el comportamiento del alerón en múltiples situaciones. En este caso, se ha reducido notablemente la carga aerodinámica y se ha obtenido una considerable ganancia de velocidad del monoplace con la mejora propuesta frente al DRS convencional, gracias a la reducción de superficie alar en contacto con el flujo de aire.

PALABRAS CLAVE

Aerodinámica, Alerón, Fórmula 1, Dinámica Computacional de Fluidos, Túnel de viento.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo pone fin a una etapa de aprendizaje a bordo de la Escuela Naval Militar, donde se me ha inculcado una formación científica, humanística y militar, con la inestimable colaboración del Centro Universitario de la Defensa. Finaliza así una singladura de cinco años, en la que he vivido tanto momentos buenos, como momentos difíciles, de los cuales he sacado unas valiosas lecciones.

Por ello, aprovechando la ocasión, me gustaría agradecer a todas las personas que han aportado sus conocimientos, instruyéndome no solo en el saber científico, sino también en el saber moral. Quiero agradecer especialmente a mi tutor Miguel Ángel Gómez Rodríguez, por su gran ayuda prestada en la elaboración de este TFG. Con su dedicación y esfuerzo ha sabido marcarme el camino cuando estaba todo oscuro y así poder salir adelante.

También agradecer a mis compañeros de fatiga por estos cinco años conviviendo codo con codo, y a los que se han quedado atrás, que para mí, serán siempre parte de la promoción 418-148.

No quiero terminar estas líneas sin agradecer a mi novia Alicia todo su cariño y apoyo incondicional, y a mi familia por los ánimos que me han transmitido durante todos estos años, en especial a mis padres, Julio y M^a José, por ayudarme a mantener la mente fría en situaciones de frustración, a mi hermana Miryam, por escogermme como su referente a seguir y a mis abuelos, Julio y Paquichi, por sentirse orgullosos de su nieto.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Introducción	6
1.2 Motivación	10
1.3 Objetivos generales	10
1.4 Objetivos específicos	10
1.5 Metodología	11
2 Estado del arte	12
2.1 Historia de la aerodinámica en la competición	12
2.1.1 Descubrimiento de la carga aerodinámica	12
2.1.2 Uso de alerones	12
2.1.3 Primer alerón	13
2.1.4 El comienzo de los alerones	13
2.1.5 El efecto suelo	14
2.2 Alerón trasero	18
2.2.1 Definiciones	18
2.2.2 Criterios de diseño	19
2.2.3 Criterios de diseño: Alerones de un solo elemento	19
2.2.4 Criterios de diseño: Alerones de dos elementos	21
2.2.5 Criterios de diseño: Alerones de varios elementos	22
2.2.6 Criterios de diseño: Alerones múltiples	23
2.2.7 Criterios de diseño: Derivas laterales	24
2.3 Fuerzas aerodinámicas	24
2.3.1 Principio de Bernoulli	24
2.3.2 Fuerzas implicadas	26
2.3.3 Cálculo del área frontal	27
2.4 Capa límite	28
2.5 Número de Reynolds	29
3 Desarrollo del TFG	31
3.1 Procedimiento	31
3.1.1 Modificación de la geometría	32

3.1.2 Análisis	33
4 Resultados	35
4.1 Obtención de resultados	35
4.2 Análisis DRS desactivado	36
4.2.1 Análisis de presiones	37
4.2.2 Análisis de flujo de aire	38
4.2.3 Análisis de fuerzas	39
4.3 Análisis DRS activado	40
4.3.1 Análisis de presiones	40
4.3.2 Análisis de flujo de aire	42
4.3.3 Análisis de fuerzas	42
4.4 Comparativa DRS desactivado y DRS activado	44
4.4.1 Análisis	44
4.4.2 Ganancia de velocidad	46
4.5 Propuesta de mejora	49
4.5.1 Análisis de presiones	49
4.5.2 Análisis de flujo de aire	50
4.5.3 Análisis de fuerzas	51
4.6 Comparativa DRS desactivado, DRS activado y DRS activado mejorado	53
4.6.1 Análisis	53
4.6.2 Ganancia de velocidad	55
5 Conclusiones y líneas futuras	56
5.1 Conclusiones	56
5.2 Líneas futuras	57
6 Bibliografía	59
Anexo I: Resultados de fuerzas	61
Anexo II: Planos	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Túnel de viento abierto. [4]	7
Figura 1-2 Alerón. [8]	8
Figura 1-3 Zonas de detección y activación del DRS del GP de Singapur. [9]	9
Figura 1-4 Alerón trasero Red Bull Racing RB13 2017. [10]	10
Figura 2-1 Porsche Spyder de Michael May. [12]	13
Figura 2-2 Chaparral 2E. [14]	14
Figura 2-3 Chaparral 2J. [11]	14
Figura 2-4 Efecto suelo en el Lotus 79, sucesor del Lotus 78. [12].....	15
Figura 2-5 Difusor de F1. [13]	16
Figura 2-6 Mazda 787B de las 24 h de Le Mans (1991). [20]	17
Figura 2-7 Opel Calibra del DTM (1994). [21]	17
Figura 2-8 Esquema de la sección transversal de un alerón. [14].....	18
Figura 2-9 Distribución de presiones en un alerón. [14].....	19
Figura 2-10 Sustentación en función del ángulo de ataque. [14].....	20
Figura 2-11 Influencia del grosor en la curva de sustentación. [14].....	20
Figura 2-12 Alerón de dos elementos. [14].....	21
Figura 2-13 Sustentación de un alerón de dos elementos. [14].....	22
Figura 2-14 Alerón de 3 elementos. [14]	22
Figura 2-15 Curva de sustentación de un alerón de tres elementos. [14].....	23
Figura 2-16 Alerón de doble plano del Benetton B197. [15].....	23
Figura 2-17 Efecto de las derivas. [14]	24
Figura 2-18 Teoría de la carga aerodinámica de Newton. [14].....	25
Figura 2-19 Tubo Venturi. [14].....	26
Figura 2-20 Componentes de la fuerza aerodinámica. [14]	27
Figura 2-21 Método para calcular el área frontal. [14]	27
Figura 2-22 Flujo laminar (izquierda) y turbulento (derecha). [16].....	28
Figura 2-23 Capas límite laminar y turbulenta. [14].....	29
Figura 2-24 Flujos laminar, transitoria y turbulento. [16]	29
Figura 3-1 Alerón propuesto. [Autoría propia]	31
Figura 3-2 Alerón mallado visto de perfil con factor de crecimiento. [Autoría propia]	32
Figura 3-3 Alerón mallado seccionado por la mitad. [Autoría propia]	33
Figura 3-4 Software CFD Ansys Fluent. [15].....	33
Figura 4-1 Creación de gráficas de contorno y vectorial. [Autoría propia].....	35

Figura 4-2 Configuración de las gráficas de contorno y vectorial. [Autoría propia]	36
Figura 4-3 Contornos de presión en 3D a 300 Km/h. [Autoría propia]	37
Figura 4-4 Contornos de presión en 2D a 300 Km/h. [Autoría propia]	38
Figura 4-5 Vectores de velocidad en 2D a 300 Km/h. [Autoría propia]	38
Figura 4-6 Gráfica Velocidad VS Fuerza de sustentación.	39
Figura 4-7 Gráfica Velocidad VS Fuerza de resistencia al avance.	40
Figura 4-8 Contornos de presión en 3D a 300 Km/h. [Autoría propia]	41
Figura 4-9 Contornos de presión en 2D a 300 Km/h. [Autoría propia]	41
Figura 4-10 Vectores de velocidad en 2D a 300 Km/h. [Autoría propia]	42
Figura 4-11 Gráfica Velocidad VS Fuerza de sustentación.	43
Figura 4-12 Gráfica Velocidad VS Fuerza de resistencia al avance.	44
Figura 4-13 Gráfica Velocidad VS Fuerzas de sustentación con DRS activado y desactivado.....	45
Figura 4-14 Gráfica Velocidad VS Fuerza de resistencia al avance con DRS activado y desactivado.....	45
Figura 4-15 Vista frontal del Red Bull Racing RB13. [16]	47
Figura 4-16 Vista frontal del Red Bull Racing RB13 sin fondo.	47
Figura 4-17 Vista frontal del Red Bull Racing RB13 sombreada y con referencia.	48
Figura 4-18 Contornos de presión en 3D a 300 Km/h. [Autoría propia]	50
Figura 4-19 Contornos de presión en 2D a 300 Km/h. [Autoría propia]	50
Figura 4-20 Vectores de velocidad en 2D a 300 Km/h. [Autoría propia]	51
Figura 4-21 Gráfica Velocidad VS Fuerza de sustentación.	52
Figura 4-22 Gráfica Velocidad VS Fuerza de resistencia al avance.	53
Figura 4-23 Gráfica Velocidad VS Fuerzas de sustentación con DRS activado, DRS desactivado y DRS activado mejorado.	54
Figura 4-24 Gráfica Velocidad VS Fuerza de resistencia al avance con DRS activado, DRS desactivado y DRS activado mejorado	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Fuerzas de sustentación.....	39
Tabla 2 Fuerzas de resistencia al avance.....	40
Tabla 3 Fuerzas de sustentación.....	42
Tabla 4 Fuerzas de resistencia al avance.....	43
Tabla 5 Fuerzas de sustentación.....	51
Tabla 6 Fuerzas de resistencia al avance.....	52

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La aerodinámica es la ciencia que se encarga de estudiar las acciones resultantes sobre los cuerpos sólidos, en presencia de un movimiento entre estos y el fluido (gas en este caso) en el que están contenidos. [1]

En el sector del automóvil, a la hora de diseñar un vehículo, la aerodinámica cobra un papel cada vez más importante. Está estrechamente relacionada con el diseño exterior del vehículo, pero ésta no es su única misión, ya que existen unas características técnicas y de seguridad que dependen de un buen diseño aerodinámico. Es por eso por lo que este área de desarrollo de automóviles, no tiene únicamente un papel decorativo sino también una importancia en el comportamiento global del mismo. [2]

Los principios de la aerodinámica se rigen por una serie de ecuaciones complejas, dificultando la resolución mediante métodos analíticos, sobre todo, si se trata de cuerpos complejos. Es por eso por lo que el estudio de la aerodinámica requiere de otros métodos que, a diferencia de los habituales en los que se limitaban a resolver unas ecuaciones, permitan resolverlo de forma aproximada.

En la actualidad existen dos métodos para abordar el problema de los estudios aerodinámicos:

- Túnel de viento (experimental).
- Análisis CFD (Computational Fluid Dynamics) (simulación).

Un túnel de viento es muy preciso, por eso la mayoría de los grandes fabricantes de automóviles tienen sus propias instalaciones con estos túneles, que se utilizan para el desarrollo de las características y resolución de problemas aerodinámicos de un nuevo modelo de automóvil. De las principales preocupaciones de la aerodinámica en un automóvil, una es la reducción de la fricción y eliminar en la medida de lo posible, cualquier tipo de inestabilidad cuando el coche circula a altas velocidades. [3]

Por lo general, un túnel de viento comprende:

- Cámara de establecimiento: Sección cuya función es enderezar y uniformizar el flujo de aire.
- Cono de aceleración: Sección que se encarga de acelerar el flujo de aire manteniéndolo ordenado y uniforme, para que posteriormente llegue a la cámara de ensayos.
- Cámara de ensayos: Sección donde se coloca el objeto que se quiere estudiar. Es la parte más importante del túnel, ya que aquí será donde se hagan las mediciones. En esta parte, es importante que el flujo de aire atraviese la cámara lo más uniformemente posible.

- Difusor: Sección en la que se reduce la velocidad del flujo de aire gracias a su perfil divergente. Una vez que el aire ha salido de la cámara de ensayos, es interesante que el aire salga a la menor velocidad posible, ya que la velocidad a la salida irá relacionada con las pérdidas energéticas del túnel. A menor velocidad, menores pérdidas.
- Ventilador: Su función es crear un flujo de aire a una determinada velocidad. Normalmente están configurados para poder variar la velocidad y así poder realizar ensayos en función de las condiciones deseadas por los ingenieros.
- Suelo: Existen suelos rodantes y estáticos. Los primeros son mucho más precisos, ya que se asemejan más a la realidad.

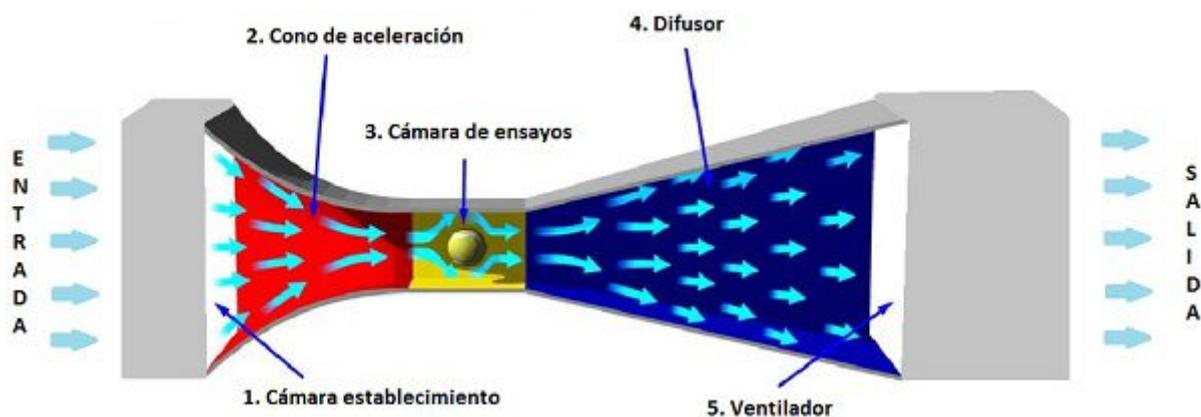


Figura 1-1 Túnel de viento abierto. [4]

En cuanto a la solución constructiva, existen varios tipos de túneles de viento, cada uno con sus ventajas e inconvenientes:

- Abiertos o cerrados: El cerrado se diferencia en que tiene la salida de aire conectada con la entrada. Este último tiene una ventaja muy importante, ya que al ser un sistema cerrado, permite tener controladas todas las variables termodinámicas del aire: densidad, temperatura y presión. Además tiene menos pérdidas que el abierto. El inconveniente que tiene, es que requiere de una instalación de grandes dimensiones, lo que repercute directamente en el precio.
- Cámara de ensayos abierta o cerrada: Una cámara abierta nos permite realizar el estudio de modelos más grandes. La desventaja que tiene es que el flujo de aire es menos controlable, además del consecuente aumento de pérdidas relacionadas con el aire que se escapa.
- Soplado o aspirado: Según la disposición de los ventiladores se puede diferenciar entre el túnel soplado, que es aquel que tiene el grupo de ventiladores antes de la cámara de ensayos, y el túnel aspirado, que tiene el grupo de ventiladores después de la cámara de ensayos. Ambos tienen ventajas e inconvenientes y su configuración dependerá del uso que se le quiera dar. En el soplado la velocidad del aire es mayor que en el aspirado, sin embargo en el aspirado el flujo de aire es más regular y uniforme. [4]

La Dinámica de Fluidos Computacional es el conjunto de técnicas que permiten resolver las ecuaciones que se derivan de tres principios fundamentales, como son: conservación de la masa, momento y energía. Como resultado se obtienen los campos de velocidad, temperatura y presión en el fluido estudiado.

Este sistema trabaja dividiendo la geometría de interés en una serie de pequeños volúmenes discretos usando una malla. Las propiedades físicas del fluido, como pueden ser temperatura o velocidad, son calculadas en cada uno de estos volúmenes como solución de las ecuaciones fundamentales. [5]

Un análisis completo de dinámica de fluidos computacional consta de una serie de etapas. La primera consiste en realizar unos cálculos previos. Dentro de esta, se formula el problema y se plantean las ecuaciones que lo gobiernan, posteriormente se establecen las condiciones de contorno para después generar una malla de volúmenes finitos. Todo esto depende del análisis que se quiera llevar a cabo (fuerzas, flujos, transferencia de calor...) y de la capacidad computacional.

La segunda etapa es la concerniente a la solución de las ecuaciones. Esta es la etapa principal del CFD, en ella tiene lugar la resolución numérica de las ecuaciones que gobiernan el problema, realizando este cálculo mediante iteraciones y con ayuda de un software como Ansys Fluent.

Por último, se lleva a cabo la etapa de análisis de los resultados. Los resultados obtenidos de la solución de las ecuaciones, se corresponde con el valor de las variables de campo en cada punto de la malla. Una parte interesante de esta última etapa, es la representación gráfica de las variables que rigen el flujo, con el fin de obtener una visión clara y amena de los resultados recopilados. Esta etapa también incluye la comparación de los resultados recopilados con otros ya obtenidos con anterioridad mediante el análisis de CFD, con resultados experimentales de un túnel de viento y con resultados tabulados existentes en normativas, publicaciones científicas, etc. [6]

La aerodinámica es muy importante en los automóviles si se atiende a prestaciones como ahorro de combustible, estética y potencia. Muchas veces se ven alerones montados en los coches de calle, pero la mayoría habitualmente tienen una función meramente estética. En cambio, atendiendo a la competición, se pueden ver alerones muy sofisticados de lo más sorprendente.

Los alerones tienen dos funciones. La primera de ellas es reducir la resistencia del aire al avance (drag), mientras que la segunda consiste en aumentar la fuerza (downforce) con la que el coche se pega al asfalto. Para reducir la resistencia del aire, se colocan distintos alerones y apéndices aerodinámicos que desvían el aire en varias partes del coche para que pueda avanzar de forma mucho más cómoda. Estos alerones normalmente se pueden encontrar en la parte delantera del coche. La segunda función de los alerones es aumentar la fuerza con la que el coche se apoya sobre el asfalto. Esto permite al vehículo una velocidad de paso por curva mayor, además de que el coche se apoye mejor sobre el asfalto a altas velocidades. Para conseguir este efecto, se diseñan alerones en los que el aire que circula por la parte superior, tiene que recorrer una distancia menor que el aire que circula por la parte inferior. Debido a esto, el aire que circula a mayor velocidad hace que la presión disminuya, consiguiendo que el aire que circula por la parte superior aumente de presión. Como consecuencia, la diferencia de presiones hace que el alerón tenga un empuje hacia abajo y pegue el coche hacia el asfalto. [7]

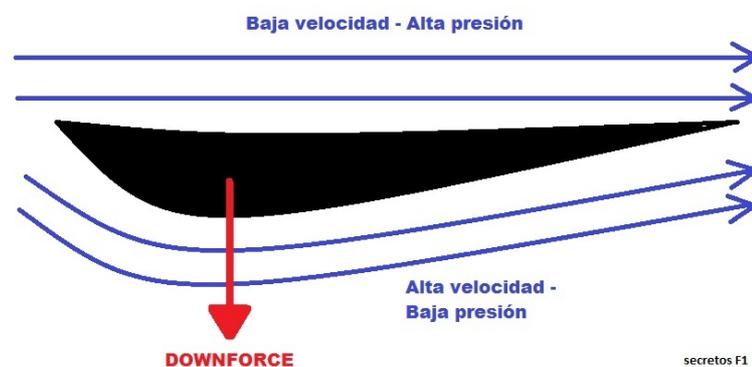


Figura 1-2 Alerón. [8]

La fuerza que ejerce el aire sobre el monoplaza, ha sido motivo de rompecabezas para los ingenieros de las escuderías de la categoría reina del automovilismo. La normativa no libra de este

problema a las escuderías, ya que cada año van imponiendo más limitaciones en el diseño de los monoplazas, tanto a nivel aerodinámico como a nivel motor.

En los últimos años se ha sido partícipe de una congelación en el desarrollo potencial de los motores, pasando en apenas 8 años de los motores V10 atmosféricos de 3000 cc a los V6 turboalimentados de 1600 cc y limitado a 15000 rpm. Esto hace que los ingenieros tengan que apañárselas en buscar potencia en otra parte que no sea el motor, y aquí es donde entra en juego la aerodinámica. Así, se ha podido ver artificios de algunas escuderías, como el difusor soplado de Red Bull Racing F1 Team en 2010, el F-duct de McLaren F1 Team en el mismo año o el DRS, introducido en todas las escuderías a partir de 2011. Este último invento, el alerón trasero móvil o mejor conocido por los espectadores como DRS (Drag Reduction System), es un sistema que reduce la resistencia aerodinámica al avance (drag) y permite obtener una mayor velocidad en recta, facilitando los adelantamientos y por consiguiente el espectáculo.

Este sistema forma parte del alerón trasero de los monoplazas, el cual está formado por dos flaps y su funcionamiento se realiza mediante un sistema hidráulico. El piloto activa el mecanismo a través de un botón en el volante. Al hacerlo, el flap superior cambia de ángulo permitiendo un mayor flujo de aire entre ambos flaps y por consiguiente, provoca una disminución de la resistencia al avance, al reducir la superficie de contacto entre este flap y el aire, aumentando la velocidad del monoplaza en unos 10 o 15 km/h extra durante unos segundos. El mecanismo se desactiva bien cuando el piloto suelta el botón o bien cuando pisa el pedal del freno, volviendo el flap superior a su posición original.

El sistema tiene unas condiciones de uso: Solo se puede activar cuando el piloto se encuentra a menos de 1 segundo de distancia detrás del monoplaza que quiere adelantar cuando ambos pasan por la zona de detección, que suele ser la curva anterior a la recta en la que se encuentra la zona de DRS, representado esquemáticamente en verde en la Figura 1-3.

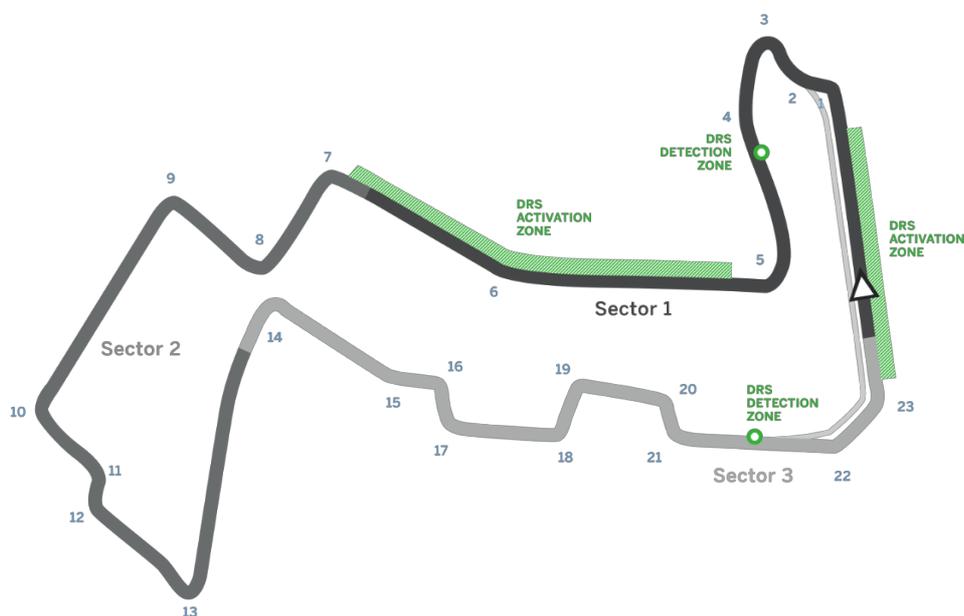


Figura 1-3 Zonas de detección y activación del DRS del GP de Singapur. [9]

Momentos en los que el sistema estará inhabilitado:

- Durante las dos primeras vueltas de la carrera.
- Relanzamiento después de un Safety Car.
- Cuando haya algún incidente en carrera que justifiquen el uso de banderas amarillas en la zona de DRS.

- Condiciones climatológicas adversas.

La dirección de carrera podrá inhabilitar el uso de este sistema en cualquier momento de la carrera si lo considera necesario.

1.2 Motivación

La idea de este proyecto surge de la pasión por los deportes de motor en general y el automovilismo en particular, en especial la Fórmula 1, ya que ha despertado mucho mi interés desde temprana edad. Esto y muchos otros principios, son los que nos han impulsado a algunos hacia la senda de la ingeniería. Es por eso por lo que este propósito, representa el vínculo que desde prematura edad he tenido con el automovilismo. Por lo que este proyecto, aparte de ser un requerimiento, es una ocasión para poner en práctica los conocimientos de mecánica aprendidos en la carrera.

Los estudios sobre aerodinámica, tienen multitud de usos. No solo se pueden hacer análisis sobre un perfil alar en el seno de un fluido como el aire, también se puede extrapolar al mundo naval, y podría ser una iniciación para futuros estudios sobre las aletas estabilizadoras, incorporadas en algunos buques. Al igual que en este proyecto se busca llevar a cabo un análisis y una posterior mejora, esta misma filosofía puede ser aplicada a la construcción de buques más estables. Un buen diseño de una aleta podría mejorar las condiciones de confort de la dotación, navegando en condiciones adversas y aumentando el rendimiento operativo de los tripulantes. Todo esto podría hacer del CFD, una potente herramienta indispensable para la construcción de los futuros buques de la Armada.

1.3 Objetivos generales

Una vez hablado de la aerodinámica y de la importancia de los alerones en el automovilismo, es importante saber que el objetivo principal de este estudio, no solo es conocer el principio físico por el que funcionan los alerones, sino también llevar a cabo un estudio exhaustivo dentro de un ambiente práctico, donde las magnitudes y resultados obtenidos pueden ser comparables y escalables en la vida real.

Este trabajo tiene como fin el estudio y posibles mejoras del alerón trasero empleado en el Red Bull Racing RB13 de 2017, mostrado en la Figura 1-4.



Figura 1-4 Alerón trasero Red Bull Racing RB13 2017. [10]

1.4 Objetivos específicos

El principal objetivo de este trabajo va a ser realizar un análisis del alerón mediante técnicas de CFD, con lo cual se analizará el alerón con el flap superior en su posición original (condición de DRS desactivado) y con su posición nueva tras la activación del mecanismo (condición de DRS activado). También se realizará un tercer análisis para una geometría modificada, de la que se espera una

contundente mejora con respecto al DRS convencional (condición de DRS activado mejorado). De esta manera se tendrá tres modelos, de los que se obtendrá unos datos muy relevantes para la elaboración de tablas y gráficas, con el fin de plasmar éstos y materializarlos en resultados.

Para ello se seguirán los siguientes hitos:

- Obtención de la geometría: buscando en la web un archivo CAD que sea lo más fiel posible al alerón de la realidad.
- Simplificar adecuadamente la geometría, para permitir un mallado lo más correcto posible que no comprometa la capacidad computacional del ordenador, ni las propiedades físicas del alerón.
- Mallar la geometría.
- Utilizar el programa Ansys Fluent para analizar la geometría.
- Analizar los datos obtenidos y recabar toda la información posible en gráficas y modelos.
- Determinar la ganancia de velocidad del monoplaza con ambos sistemas, DRS activado y DRS activado mejorado.

1.5 Metodología

Los procedimientos descritos a continuación, están realizados para cumplir estrictamente con los objetivos del proyecto.

Primeramente, es necesario ponerse en situación, por lo que se comienza a describir, sin entrar demasiado en detalle, todas las mejoras y evoluciones que han experimentado los alerones desde su creación. Además, esta información se complementa con algunos principios físicos descubiertos y aplicándolos a otras partes del automóvil. Posteriormente, se describen todas las partes que componen un alerón de competición y cómo influye en los bólidos, según algunos criterios de diseño. Al final de este apartado, se comentan los principios físicos más relevantes, como son fuerzas aerodinámicas, capa límite y número de Reynolds.

En el siguiente apartado se describe el desarrollo propiamente dicho que se va a seguir para la obtención de resultados. En él, se detalla cómo se ha de realizar el mallado, así como las condiciones para realizar la simulación en CFD.

El apartado de mayor interés es el que sigue a este, ya que en él se exponen todos los resultados obtenidos de la simulación, con la ayuda de tablas, gráficas y diagramas.

Finalmente se hacen una serie de conclusiones recabadas del anterior apartado, así como la exposición de unas posibles líneas futuras para mejorar o ampliar el contenido del trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Historia de la aerodinámica en la competición

2.1.1 Descubrimiento de la carga aerodinámica

Durante años en el mundo de la competición, la eficacia aerodinámica ha sido concebida únicamente como una forma de conseguir velocidad en las rectas. Pero la realidad, es que el uso de esta esta supone una mejoría en el paso por curva y en el frenado. La explotación de este campo ha sido en los últimos años el desarrollo tecnológico más importante.

El uso de la aerodinámica se ha dejado plasmar a través de la historia de los automóviles de competición. Desde los comienzos de las carreras de Fórmula 1 en los años 50, los bólidos ya eran contruidos con formas aerodinámicas, sin embargo, el desarrollo de otras tecnologías referentes al motor, la suspensión y los neumáticos, cobraban más importancia en aquella época. El desarrollo de la aerodinámica no fue meditado hasta bien entrados los 60. La reducción de la resistencia al avance seguía siendo importante, pero un nuevo concepto tomó preferencia: la carga aerodinámica o lo que viene siendo, la producción de una fuerza hacia abajo.

Desde el comienzo de las carreras de automóviles, los coches se han vuelto mucho más rápidos, tanto, que a principio de la década de los 60 la velocidad ya había alcanzado un nivel peligroso. Para disminuir la velocidad y aumentar la seguridad, se crearon algunas reglas para limitar la potencia del motor y regular el tamaño de los neumáticos. Sin embargo, los diseñadores necesitaban ahora algo que les diera a su coche una ventaja sobre los demás. Debido a las altas velocidades, los automóviles producían sustentación, aumentando esta proporcionalmente con la velocidad y haciendo el vehículo inestable. Para contrarrestar este problema, los coches de carreras se diseñan para producir sustentación negativa. Esto quiere decir que al coche se le agregan una serie de dispositivos que hace que se presione contra el suelo. Estos dispositivos neutralizan la sustentación o lo que es lo mismo, crean sustentación negativa.

2.1.2 Uso de alerones

La aerodinámica es una ciencia que aplicada en el automovilismo, trata de manejar el flujo de las corrientes de aire para conseguir mayor adherencia sobre el vehículo, con el objetivo de obtener mayor velocidad y seguridad para el piloto. Existen varios métodos para producir anti sustentación. Estos métodos incluyen el uso de interceptores aerodinámicos o spoilers y su uso depende de la clase de competencia y de la normativa en vigor.

Los alerones delantero y trasero aumentan el apoyo aerodinámico y por lo tanto la velocidad en las curvas. Dependiendo del circuito, esos tendrán unos ajustes u otros. En circuitos rápidos, con rectas largas y pocas curvas, los flaps son casi horizontales para reducir el apoyo aerodinámico y la

resistencia al avance en las rectas. En circuitos lentos, con pocas rectas y muchas curvas, las alas tienen mucho más ángulo de ataque, sacrificando velocidad máxima en pro de un mejor agarre en las curvas.

2.1.3 Primer alerón

Antes de comenzar la década de 1960, los ingenieros trataban de diseñar sus vehículos reduciendo la resistencia al avance con la filosofía de “menos es más”, sin embargo en 1956 Michael May cambió este concepto. May fue un ingeniero y piloto suizo nacido en 1934 en Stuttgart. Pilotó un Fórmula Junior en 1959 obteniendo una victoria en Mónaco y debutó en la Fórmula 1 en 1961 con la escudería Lotus, obteniendo como mejor resultado un undécimo puesto en Reims, Francia. [11]



Figura 2-1 Porsche Spyder de Michael May. [12]

La instalación del primer alerón en un coche se le atribuye a este ingeniero. En 1956 le puso uno a su Porsche Spyder e iba montado justo encima de la cabina del piloto, con el que pretendía aprovechar la fuerza del aire para mejorar el rendimiento del vehículo a su paso por curva. Sin embargo los comisarios de las carreras en las que quiso competir no le permitieron su uso.

Los ingenieros de la época se percataron de como esos extraños alerones como el que llevaba May, perdían velocidad punta, sin embargo conseguían mejores tiempos por vuelta. Por tanto, cuando examinaron la situación, dedujeron que si en las rectas era más lentos, la respuesta solo podía estar en las curvas, donde ciertamente la generación de apoyo aerodinámico les permitía pasar mucho más rápido por ellas. [13]

2.1.4 El comienzo de los alerones

Tras un tiempo en el olvido, en 1966, Jim Hall retomó el uso de los alerones en los vehículos. Hall fue un ingeniero y piloto americano nacido en 1935 en Texas. Compitió en Fórmula 1 de 1960 a 1963, participando en 12 Grandes Premios y en numerosas carreras fuera de campeonato.

En 1966 se presentó el Chaparral 2E, un vehículo creado por la empresa de coches que él mismo fundó. Este destacaba por el gran alerón que montaba en su parte trasera. Un ala de avión invertida que además era capaz de moverse por accionamiento de un pedal. Mediante este accionamiento se conseguía inclinar el alerón trasero móvil, concediendo mayor velocidad en las rectas o una mejor frenada y paso por curva.



Figura 2-2 Chaparral 2E. [14]

La marca Chaparral se inscribió con dos 2E para el campeonato Can-Am (Canadian-American Challenge Cup) de la temporada 1966. Uno fue pilotado por el propio Jim Hall y el otro por el piloto de Fórmula 1 Phil Hill. El mejor resultado lo obtuvieron en el circuito de Laguna Seca, acabando en primera posición el bólido de Phil Hill y seguido de este, en segunda posición, el de Jim Hall. [14]

2.1.5 El efecto suelo

El siguiente avance se consiguió en la década de los 70, cuando el ingeniero Peter Wriight, que trabajaba en Lotus, introdujo el fenómeno de “efecto suelo”. Esta idea no era novedosa, ya que una patente de 1930 describía el fenómeno. Entonces surgió el Chaparral 2J, quizás uno de los bólidos más famosos del fabricante americano. En su parte trasera incorporaba dos ventiladores que eran alimentados por un motor de moto de nieve. Estos ventiladores absorbían el aire que había bajo el vehículo expulsándolo por la parte posterior y así se conseguía el denominado efecto suelo, con el cual se mantenía el bólido pegado al asfalto.



Figura 2-3 Chaparral 2J. [15]

La marca participó en el campeonato Can-Am con un 2J en la temporada de 1970, con el piloto de Fórmula 1 Jackie Stewart al volante. La fiabilidad nunca fue el punto fuerte de la marca, por eso de las seis pruebas que tenía el calendario, fueron solo a cuatro de ellas a las que pudo llegar a tiempo.

A partir de la segunda carrera contrataron al piloto Vic Elford, en sustitución de Stewart. El bólido resultó tener una velocidad y un paso por curva sorprendente, además de obtener buenos puestos en clasificación. Sin embargo, la enorme cantidad de fallos mecánicos salían a la luz, degradando al 2J a puestos retrasados de la parrilla durante la carrera.

Finalmente la FIA (Federation Internationale de l'Automobile), prohibió el uso del vehículo fabricado por Jim Hall, debido a las recriminaciones de los pilotos y los equipos contra el 2J. Esto les convenía a los equipos, así que lanzaron acusaciones contra el doble ventilador que incorporaba, por lo que la FIA prohibió el uso de este, declarando que estaban prohibidos los elementos móviles. [15]

Años más tarde, fue el equipo Lotus el que le sacó todo el potencial al efecto suelo sin salirse del estricto reglamento de la FIA.

Colin Chapman y su aerodinamista Peter Wright, estudiaban la manera de colocar los radiadores en los pontones, de manera que produjeran la menor resistencia aerodinámica, y realizando pruebas obtuvieron unos valores de apoyo aerodinámico impresionantes.

La idea consistía en aplicar el principio de Bernoulli, según el cual, si se incrementa la velocidad de un fluido, en este caso el aire, su presión desciende. Esto quiere decir que cuando el monoplaza está acelerando, el flujo de aire que pasa por debajo de este, disminuye su presión, absorbiendo al coche contra el suelo. Esto se traduce en que el coche entero se convierte en un alerón.

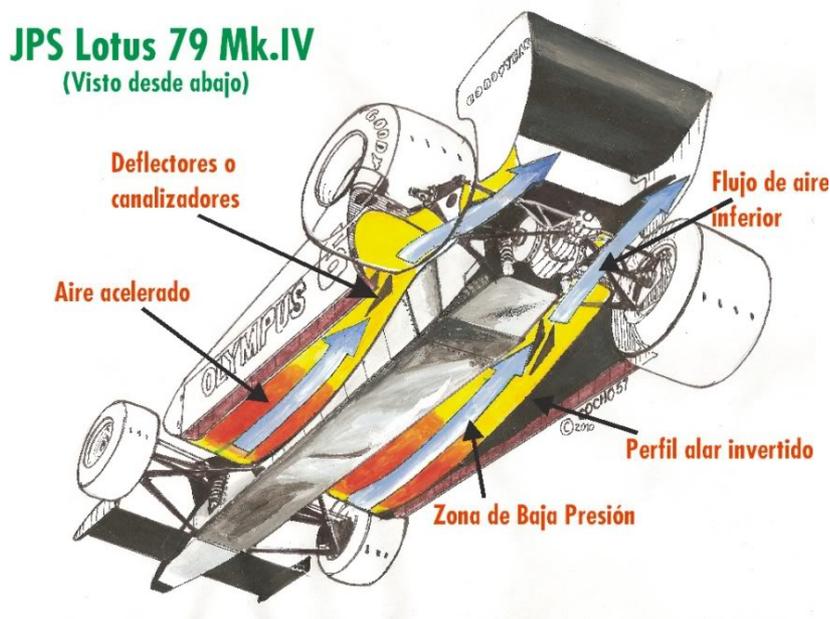


Figura 2-4 Efecto suelo en el Lotus 79, sucesor del Lotus 78. [16]

Así, el equipo Lotus realizó un fondo con una forma especial, donde colocó faldones en los costados de los pontones para sellar esa zona de baja presión. Los resultados de este monoplaza dejaron bien claro la importancia de la aerodinámica en la Fórmula 1. El efecto suelo supone la gran ventaja de ser una solución que no produce resistencia aerodinámica a diferencia de los alerones, por lo que la velocidad en recta no se veía comprometida y se conseguía mayor velocidad de paso por curva.

El monoplaza en sí, era un coche común como cualquiera de la parrilla, pero los niveles de apoyo aerodinámico superaban notablemente a los de sus competidores, por lo que se convirtió

indiscutiblemente en el coche más rápido. No lograron el título de 1977 a pesar de que su piloto, Mario Andretti lograra más victorias que el ganador del título. Esto fue debido a que tuvieron 5 roturas de motor durante la temporada. La temporada de 1978 se mostraron implacables logrando el mundial de pilotos y de constructores con el Lotus 79. [17]

Durante los años siguientes, se llegó a un desarrollo extremo en lo relativo al fenómeno del efecto suelo. Cuanto más velocidad se conseguía, más succión se creaba y se alcanzaban velocidades de paso por curva muy peligrosas, que no se entendían con las prestaciones de los neumáticos y suspensiones de la época, y sobre todo, no iba en nada de acorde con la seguridad, tanto del monoplaza como de los circuitos. En Fórmula 1, para intentar contener el fenómeno del efecto suelo, introdujeron la obligatoriedad de tener un fondo plano entre los dos ejes, limitando así las cavidades que propiciaban el efecto suelo, y haciendo los coches más maniobrables. De ahí que estos monoplazas fueran muy difíciles de controlar, ya que eran muy sensibles a cualquier bote o cualquier elemento que variase la succión producida por el efecto suelo.

Esta limitación en el reglamento coincidió con la “era del turbo”, una época en la que se fabricaron motores más potentes, tanto que algunos superaron la barrera de los 1000 CV, gracias a los propulsores turboalimentados de 1,5 L. Con estas potencias descomunales, la resistencia aerodinámica era irrelevante.

Ya en 1989 la Fórmula 1 volvió a los motores de aspiración natural de 3,5 L, lo que supuso una reducción de potencia importante. La relación entre carga aerodinámica y resistencia al avance volvió a cobrar importancia, así que los diseñadores empezaron a buscar soluciones. Se llegó a la conclusión de que había suficiente espacio entre el monoplaza y el suelo, y que con un morro inclinado también sería posible crear fuerza de succión incluso con el fondo plano, gracias a una forma escueta de sección Venturi, pero para conseguir este efecto, el aire tenía que salir por detrás del monoplaza de forma ordenada. Nacieron entonces los difusores y todos los diseñadores de los equipos se centraron en torno al desarrollo de este, trasladándose muchas de las tecnologías a otras categorías del automovilismo. Paralelamente el desarrollo de los alerones seguía en proceso, y se comenzó a fabricar formas y apéndices aerodinámicos complejos que mejoraban notablemente la carga aerodinámica.

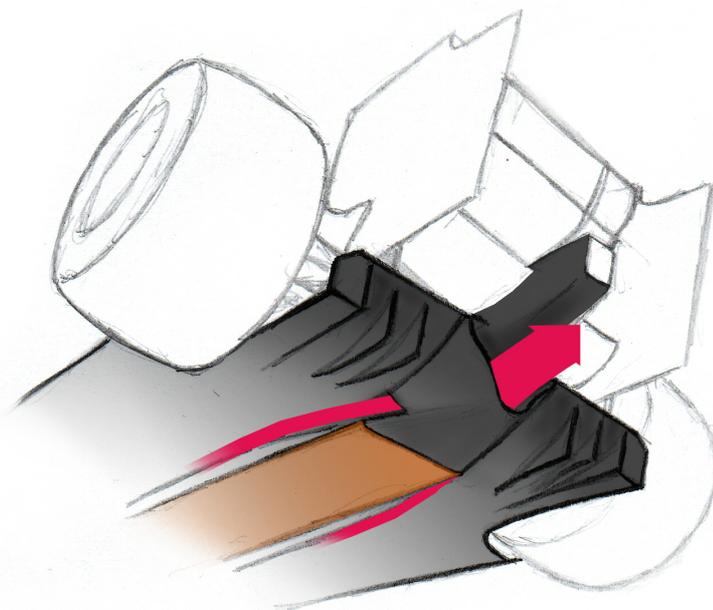


Figura 2-5 Difusor de F1. [18]

Entonces en la temporada de 1994, aconteció un fin de semana trágico en la que murieron dos pilotos: Ayrton Senna y Roland Ratzenberger. El trágico suceso tuvo lugar en el circuito de Ímola del

Gran Premio de San Marino, Italia. Respecto a las causas del accidente no hay demasiada conformidad, pero la principal hipótesis apunta a la pérdida del efecto suelo. En esa década hubo muchos accidentes debido a que el monoplaza se quedaba sin succión al pisar el piano o cualquier resalto y levantarse el coche.

Este ejemplo de llevar la aerodinámica al extremo, se convirtió en el punto de inflexión de lo que fue, una tecnología que sobrepasó a los aerodinamistas de la época. A partir de entonces, la FIA introdujo cambios en el reglamento para la mejora de la seguridad. Fue destacable la introducción del fondo escalonado, que redujo drásticamente el rendimiento aerodinámico dedicado a la adherencia.

Se habla esencialmente de Fórmula 1 porque fue la categoría donde más se desarrolló la aerodinámica, sin embargo en las 24 horas de Le Mans, la adherencia también fue un área muy trabajada y a la vista está en cada uno de los coches que han triunfado en la famosa carrera. En la disciplina del DTM (Deutsche Tourenwagen Masters), el estudio de la aerodinámica también ha dado lugar a vehículos verdaderamente llamativos, con todo tipo de apéndices aerodinámicos peculiares.



Figura 2-6 Mazda 787B de las 24 h de Le Mans (1991). [20]



Figura 2-7 Opel Calibra del DTM (1994). [21]

La aerodinámica muchas veces es la responsable de restar atractivo a la competición. No obstante, si es verdad que algunos pilotos se suelen quejar de que el efecto de la aerodinámica es tan acusado que cuando persiguen el monoplaza de otro piloto, pierden tanta carga aerodinámica que hace que los metros siguientes pierdan el ritmo que llevaban. Algunos estudios han restado importancia al asunto, incluso llevando a la FIA a reducir la carga aerodinámica de los coches, afirmando que los coches que van detrás sufren más.

De ahí que a finales de la década de los 90, la FIA decidiese abordar el tema de los neumáticos, prohibiendo los del tipo “slick” o lisos, e implantando los neumáticos de cubiertas con dibujo, con el fin de reducir el agarre a partir de la disminución de la cantidad de goma en contacto con el suelo. Con esto conseguían reducir la velocidad de paso por curva y aumentar la distancia de frenado.

A finales de la década de los 2000, la FIA volvió a introducir los neumáticos lisos para abordar otra vez el fomento de la aerodinámica, que había vuelto a alcanzar una importancia decisiva, sobre todo a partir de 2009 cuando, por aquel entonces la escudería Brawn GP introdujo el doble difusor, un ingenioso sistema que permitía extraer más aire por debajo del monoplaza, aumentando este su velocidad y haciendo que el coche fuera más rápido en su paso por curva. Además, a diferencia del resto, su forma característica le permitía generar turbulencias muy complejas para el coche perseguidor, haciendo que sea muy difícil de adelantar. [13]

Tras la prohibición al año siguiente del doble difusor aprobada por la FIA, la escudería Red Bull Racing ya había atajado una forma de conseguir mayor carga aerodinámica usando el difusor. El invento consistía en dirigir el chorro de los gases de escape al difusor. Debido a la temperatura y

velocidad de estos gases que atraviesan el difusor, se produce un aumento de la succión de este y un aumento de la velocidad del aire que pasa por debajo del coche. Consecuentemente se produce una depresión más grande y por ende una mayor carga aerodinámica. [19]

Finalmente en 2011 llegó el DRS, un dispositivo implementado por la FIA y que puede verse en los monoplazas de todas las escuderías. Como ya se dijo en el apartado 1.3, las siglas DRS viene del inglés “Drag Reduction System”, en castellano conocido como alerón trasero móvil. Es un sistema que consiste en reducir la resistencia al avance del tren trasero y consta de un flap superior móvil y un actuador. Cuando el piloto activa el actuador, este levanta el flap superior reduciendo su superficie al viento y por consiguiente, reduciendo sustancialmente la resistencia al avance y la carga aerodinámica, con el fin de obtener mayor velocidad en las rectas.

Se ha seguido usando desde entonces hasta la actualidad, por lo que se puede afirmar que se está ante un sistema eficiente, cuya eficacia ha sido demostrada con el paso de los años manteniéndose dentro de los límites del reglamento.

2.2 Alerón trasero

2.2.1 Definiciones

En este apartado se desarrolla conceptos sobre el alerón trasero, el cual es objeto fundamental de este estudio. Los fundamentos que rigen el comportamiento de estos vienen de la rama de la aeronáutica. Alerón, es normalmente otra forma de decir ala, que consiste en un cuerpo que cuando se le hace pasar el aire a través de él, crea sustentación, o en el caso de los alerones, carga aerodinámica. Una representación habitual de los alerones es su sección transversal y puede tener formas bastantes complejas, es por eso por lo que es necesario definir algunos parámetros

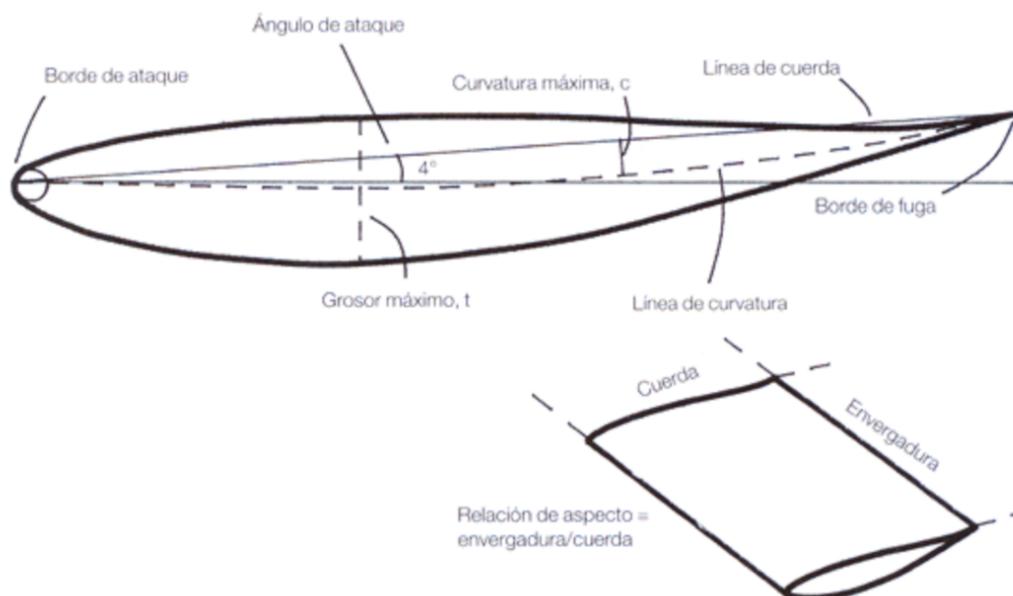


Figura 2-8 Esquema de la sección transversal de un alerón. [20]

- Borde de ataque (BA): Es la parte delantera de un ala y normalmente tiene forma radial.
- Borde de fuga (BF): Está justo en la otra esquina del alerón y tiene forma estrecha.
- Línea de cuerda (c): Recta que une BA y BF y la distancia a lo largo de ésta es la dimensión de la cuerda.
- Grosor máximo (t): Medida que se expresa como un porcentaje de la dimensión de la cuerda
- Línea de curvatura: Línea que pasa por los puntos medios de un ala, desde el BA al BF.
- Envergadura: Es el ancho del ala.

- Relación de aspecto: Cociente entre la envergadura y la cuerda.
- Ángulo de ataque: Ángulo entre el flujo de aire y la línea de cuerda del ala.

Como se ha ido viendo a lo largo del proyecto, el objetivo de un alerón es reducir la presión bajo el lado de succión de la parte inferior (extradós) y aumentar la presión del aire en la parte superior o lado de presión (intradós). Como se puede ver en la Figura 2-9 el resultado de esto es que se producen tanto carga aerodinámica como resistencia al avance.

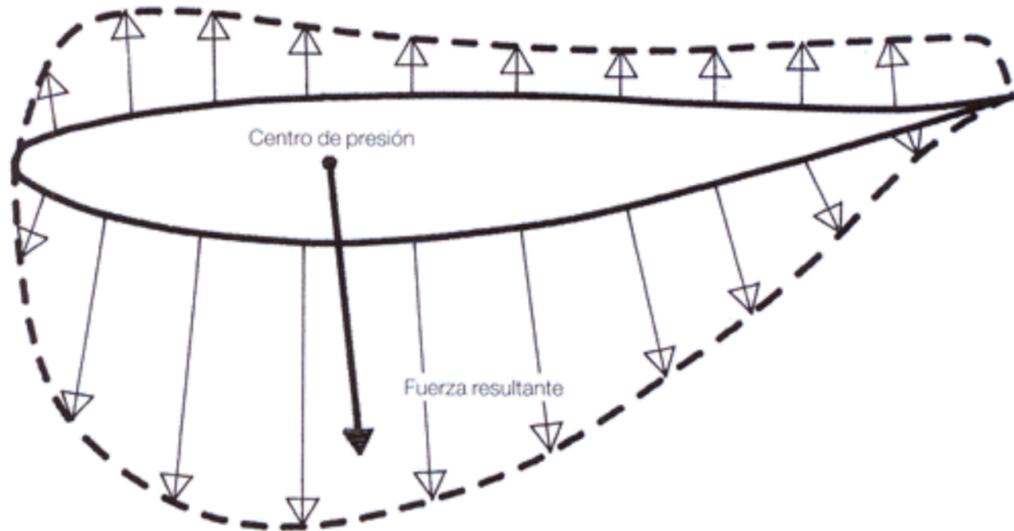


Figura 2-9 Distribución de presiones en un alerón. [20]

2.2.2 Criterios de diseño

Antes de entrar en detalle en los criterios de diseño, es importante mencionar primero los perfiles de alas de la NACA (National Advisory Committee for Aeronautics). Esta organización americana, predecesora de la actual NASA, se encargaba de desarrollar un sistema para definir y recopilar las formas de las alas en los años 20 y 30. Es cierto que los perfiles fueron creados para propósitos aeronáuticos y que muchas escuderías tengan hoy en día información suficiente para desarrollar sus alerones, pero es un repositorio extenso tanto para profesionales como aficionados que no tengan capacidad de diseño por ordenador o refinamiento en un túnel de viento.

Los alerones de los coches de competición pueden tener un solo elemento, dos o múltiples elementos, en función de la categoría en la que compitan y las modificaciones que permita el reglamento, al igual que las necesidades de cada circuito.

2.2.3 Criterios de diseño: Alerones de un solo elemento

Los principios para crear carga aerodinámica parten del supuesto de que, cuanto mayor es el ángulo de ataque, mayor es la carga aerodinámica, hasta el punto conocido como ángulo de pérdida. Como se puede ver en la Figura 2-10, la carga aumenta casi de forma lineal con el incremento del ángulo de incidencia, hasta que alcanza los 14°-16°. No bastante, el ángulo de pérdida varía en función de la sección del ala y las condiciones del flujo.

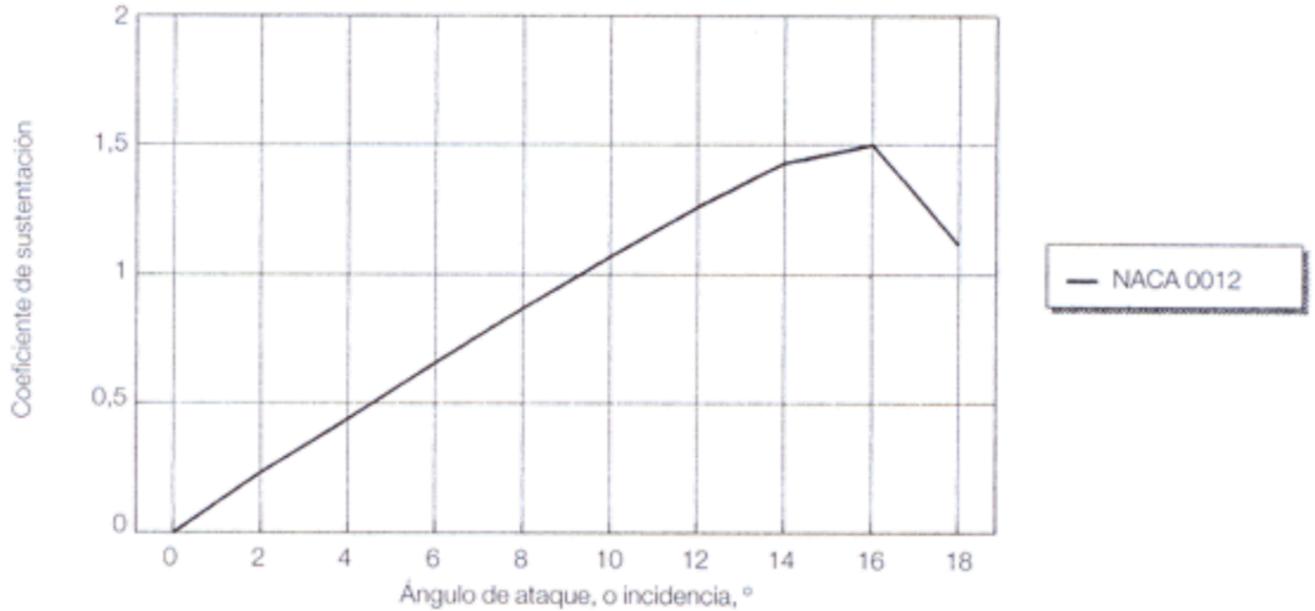


Figura 2-10 Sustentación en función del ángulo de ataque. [20]

El grosor (t) influye en la carga aerodinámica y según se acerca a 0,12c, el ángulo de pérdida se da más tarde, permitiendo así una mayor carga aerodinámica. Para algunos perfiles simétricos con grosor entre 0,06c y 0,12c, la pérdida es más pronunciada a medida que se acercan al ángulo de pérdida, mientras que en otros de grosor entre 0,12c y 0,18c, el aumento de este tiende a generar una pérdida más suave, según se ve en la Figura 2-11.

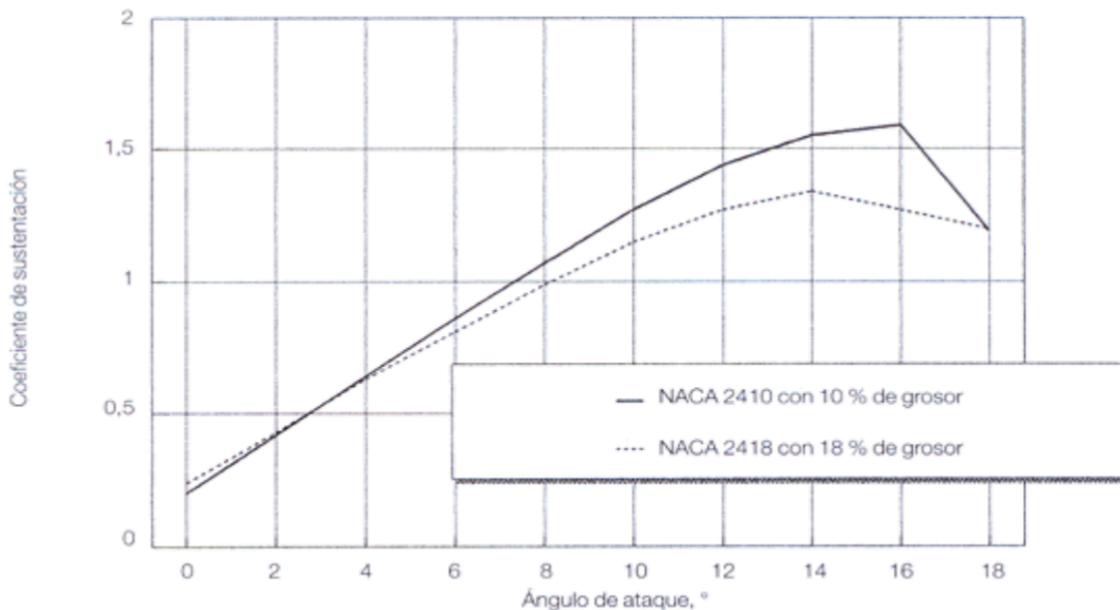


Figura 2-11 Influencia del grosor en la curva de sustentación. [20]

Para obtener de forma analítica el valor del coeficiente de sustentación, se usa la siguiente ecuación:

$$C_L = \frac{2 \cdot F}{\rho \cdot A \cdot v^2}$$

Ecuación 1 Coeficiente de sustentación.

Donde,

- F = Fuerza de sustentación.
- ρ = Densidad del aire.
- A = Superficie en planta del alerón (Cuerda x Envergadura).
- C_L = Coeficiente de sustentación.
- v = Velocidad del fluido.

2.2.4 Criterios de diseño: Alerones de dos elementos

Si es necesario una mayor carga aerodinámica de la que se puede obtener con un alerón de un solo elemento y la resistencia al avance que se genera es admisible, se puede considerar usar alerones más complejos.

De la ecuación de carga aerodinámica vista anteriormente, se puede deducir que para cualquier velocidad dada, la carga puede aumentarse bien incrementando el valor de A , o bien el de C_L . En la mayoría de las categorías de competición el tamaño de los alerones está limitado por el reglamento y se tiende a explotar toda la libertad permitida al máximo, pero si se abusa de esta libertad, puede acarrear pérdidas en la eficacia del alerón. Por ejemplo, si el reglamento no limita el tamaño de la cuerda, no necesariamente debe tener ésta el tamaño más grande que pueda admitir el diseño, ya que una relación de aspecto baja (envergadura entre cuerda) hace que el alerón sea menos eficaz hablando en términos de carga. Un modo eficaz de aumentar la carga aerodinámica sería mantener una relación de aspecto moderada, tratando de aumentar el C_L . Para ello se recurre a perfiles de un solo elemento pero con mayor curvatura, y si se necesita más carga, a un perfil de varios elementos.

Entre los diseños de alerones de varios elementos, el más sencillo es el de dos elementos, en el cual el plano principal va acompañado de un flap. Si se añade un flap puede ocurrir:

- 1º) Se aumenta la superficie de planta, por lo que se genera mayor carga aerodinámica.
- 2º) La curvatura efectiva del alerón aumenta, junto con la carga un cierto ángulo de ataque.
- 3º) La interacción entre el plano principal y el flap debida a la posición relativa del uno con el otro, contribuye a generar carga por la modificación del flujo de aire en el lado de succión.

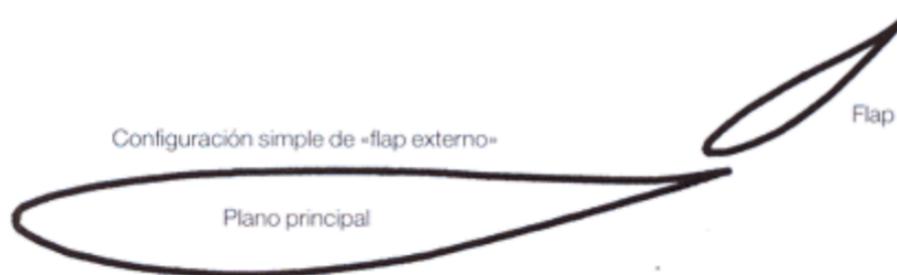


Figura 2-12 Alerón de dos elementos. [20]

Algunos de los criterios básicos de los alerones de un solo elemento son aplicables al diseño del plano principal. Sin embargo, unas secciones del plano principal más anchas pueden funcionar mejor con flaps. La cantidad de curvatura en el plano principal dependerá de su uso y es probable que esté entre el 5 y 15 % de c , para usos con mucha carga aerodinámica. La cuerda del flap debe estar entorno al 30% c y en cuanto al grosor, existe un valor óptimo como pasaba en el caso del alerón de un elemento, solo que con la aclaración de que el flap sería relativamente más ancho con el fin de resistir las cargas sin romperse. El ángulo máximo de inclinación del flap, tomando como referencia la línea

de cuerda del plano principal, será determinado experimentalmente, sin embargo muy difícilmente supere los 40° . Para hallar un ángulo óptimo es necesario un túnel de viento o un software de CFD.

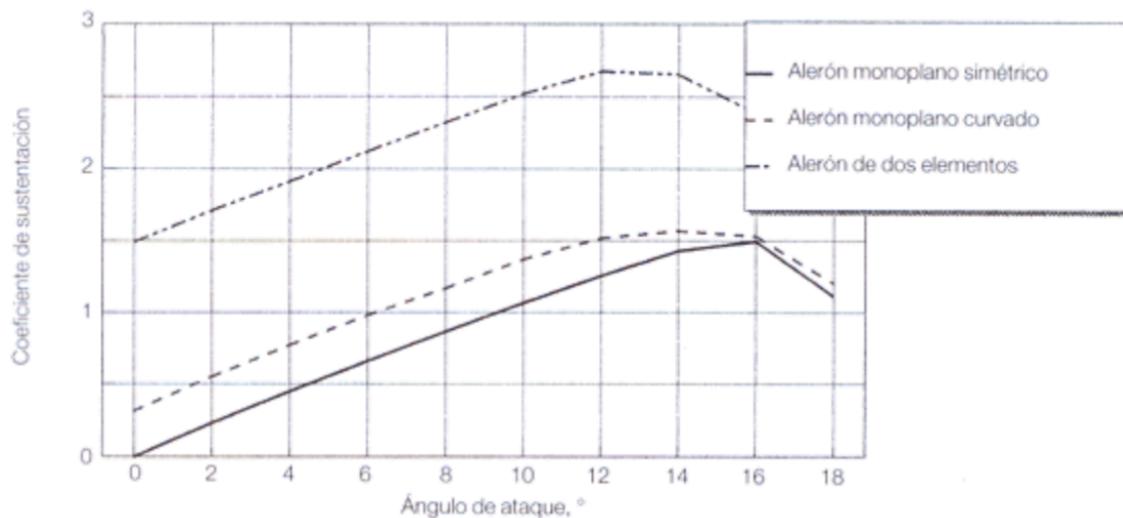


Figura 2-13 Sustentación de un alerón de dos elementos. [20]

2.2.5 Criterios de diseño: Alerones de varios elementos

Es posible obtener valores de $-C_L$ mayores si se añaden más flaps a un alerón. La configuración de doble flap ranurado, en la cual se colocan dos flaps sobre el borde de fuga del plano principal, es una continuación de la configuración de un solo flap y sirve para incrementar más la curvatura del ala.

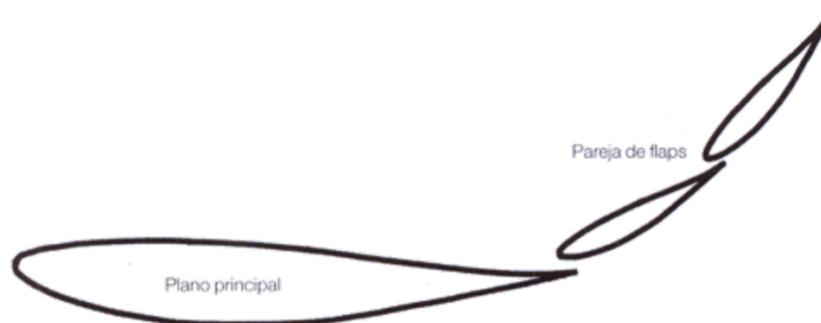


Figura 2-14 Alerón de 3 elementos. [20]

El tamaño de la ranura entre el plano principal y el primer flap, y entre este y el segundo flap, puede ser similar o, si no lo fuera, el primero debe ser más grande que el segundo. La dimensión de los dos flaps podría establecerse entre el 30 y 40 % de la cuerda del ala. Los coches de Fórmula 1 por ejemplo, debido a las restricciones del reglamento, tienen las cuerdas del plano principal muy cortas en relación con las cuerdas de su flap.

En términos de mejora, la adición de un segundo flap hace que se aumente de forma sustancial el valor de $-C_L$ y se puedan alcanzar cifras mayores, pero en términos generales la adición de flaps adicionales aumenta la carga aerodinámica de forma reducida. El ángulo de inclinación de los flaps puede estar entre los $25-30^\circ$ para el primario y entre $30-70^\circ$ para el secundario.

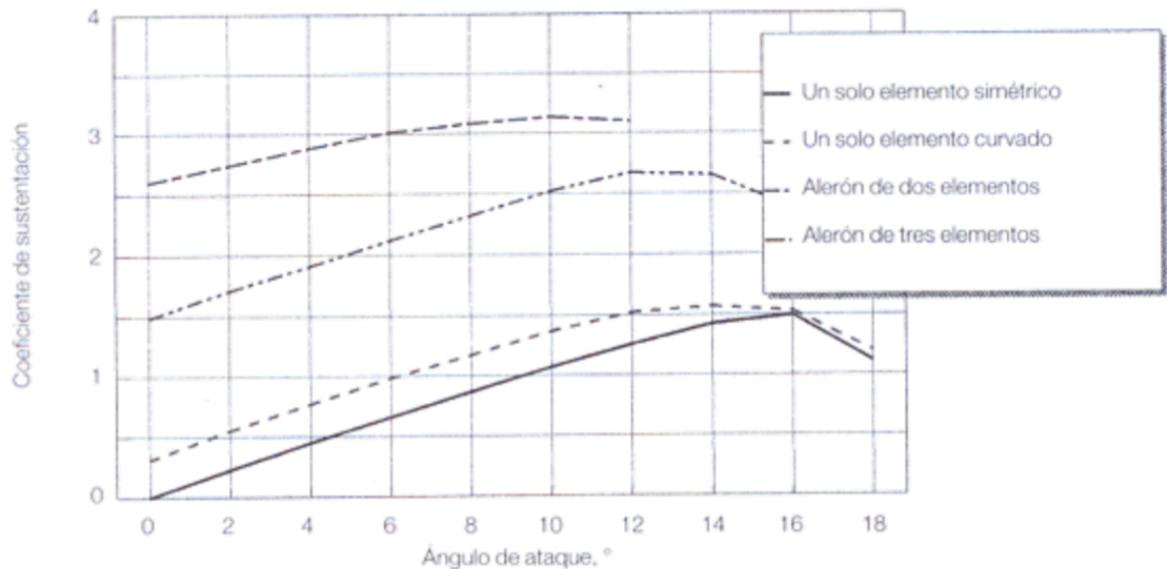


Figura 2-15 Curva de sustentación de un alerón de tres elementos. [20]

2.2.6 Criterios de diseño: Alerones múltiples

Cabe destacar la importancia de los alerones múltiples, es decir, con dos o más planos principales. Aparentemente uno de los beneficios es el incremento de la superficie del ala, pero existe una desventaja para esta configuración. El plano superior genera una zona de baja presión en su parte inferior, así pues, si se coloca otro alerón más abajo, la zona de baja presión bajo el plano superior, actúa sobre la superficie del ala inferior. Análogamente, se podría decir que esto es tan útil como levantarse uno mismo del suelo tirando de los cordones de los zapatos. No se conseguirá el doble de carga aerodinámica solo por tener dos alas superpuestas, sin embargo, el efecto combinado puede dar beneficios y conseguir más carga aerodinámica que un solo plano.



Figura 2-16 Alerón de doble plano del Benetton B197. [21]

El primero de ellos, es que, aunque la eficacia del alerón puede empeorar con el uso de tres o cuatro planos, el efecto del flujo de aire es tal que podría tolerar un incremento en el ángulo de ataque, permitiendo generar más carga aerodinámica antes de que el alerón entre en pérdida.

El segundo beneficio puede obtenerse situando el plano inferior de modo que interactúe de modo favorable con el flujo de aire del fondo del coche, contribuyendo a la producción de baja presión y de este modo poder aumentar de forma significativa la cantidad de carga aerodinámica.

2.2.7 Criterios de diseño: Derivas laterales

Las derivas o “endplates” no solo están ahí para esconder la forma del perfil del alerón. Estas tienen un propósito muy valioso, que es el de incrementar la carga aerodinámica del alerón de forma considerable. Son importantes porque sin ellas, la diferencia de presión del aire en la parte inferior y superior de un alerón, haría que el aire intentara escapar a la zona de baja presión, derramándose por las alas, creando un característico patrón de vórtices como se puede ver en la Figura 2-17.

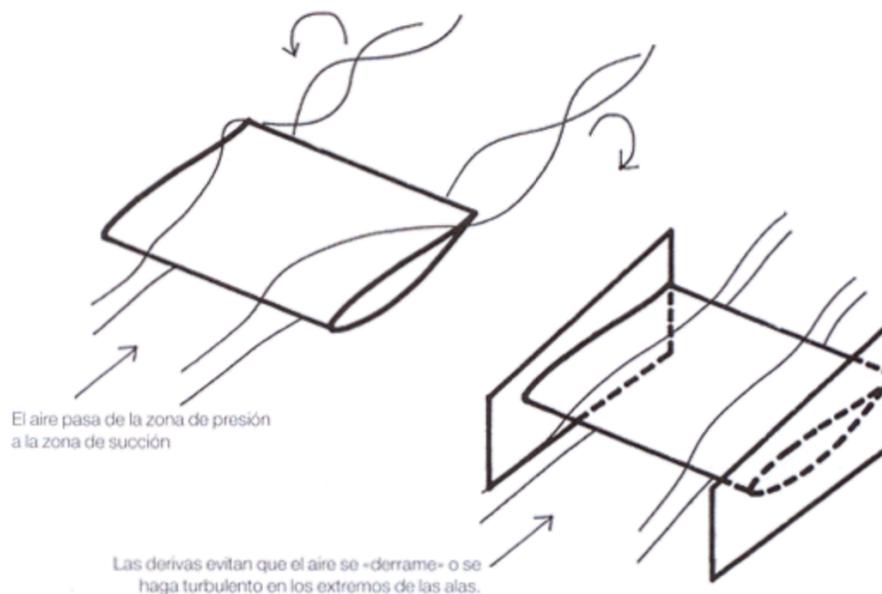


Figura 2-17 Efecto de las derivas. [20]

Al colocar las derivas, se evita que ocurra este movimiento por lo que ayuda a mantener la diferencia de presiones por encima y por debajo. Para conseguir efectividad, las derivas tienen que ser grandes, en muchas ocasiones extendiéndose hasta el suelo si el reglamento lo permitiese. En la mayoría de ocasiones constituyen la principal sujeción al coche o suelen por lo menos, servir como estabilizadores.

2.3 Fuerzas aerodinámicas

Algunas de las fuerzas aerodinámicas se conocen intuitivamente, por ejemplo, cuando se saca el brazo con la palma de la mano abierta e inclinada por la ventanilla de un coche en marcha, se puede sentir la fuerza ejerciendo presión sobre la mano y el brazo. Si se inclina la palma de la mano hacia arriba o hacia abajo, se puede sentir como esa fuerza empuja en esa dirección al mismo tiempo que empuja el brazo hacia atrás.

Sin embargo, esto son fuerzas evidentes que actúan sobre los objetos. Existen otros efectos imperceptibles pero muy trascendentales, que crean fuerzas en función de los diferentes ángulos con respecto al flujo de aire.

2.3.1 Principio de Bernoulli

Aristóteles (384-322 a.C.) ya hizo un estudio sobre este tema. Así pues, dedujo que cuando un cuerpo se mueve a través del aire, se creaba un vacío que hacía que el cuerpo siguiera en movimiento. Sin embargo, esta afirmación no era muy loable, hasta que en 1726 Sir Isaac Newton retomó esta teoría, e hizo unas conclusiones más meritorias cuando se dio cuenta que el aire y el agua se movían como respuesta a leyes físicas parecidas, y que estas fuerzas dependían de la viscosidad y la velocidad del fluido que bañaba un objeto, y también de las dimensiones y tamaño de éste.

Esta teoría se asemeja más a lo que se conoce hoy en día, sin embargo, cuando intentó cuantificarla no logró acercarse a la realidad. Newton asumió que las fuerzas que actúan sobre un objeto, están causadas por partículas de aire rebotando sobre el objeto, como se puede apreciar en la Figura 2-18.

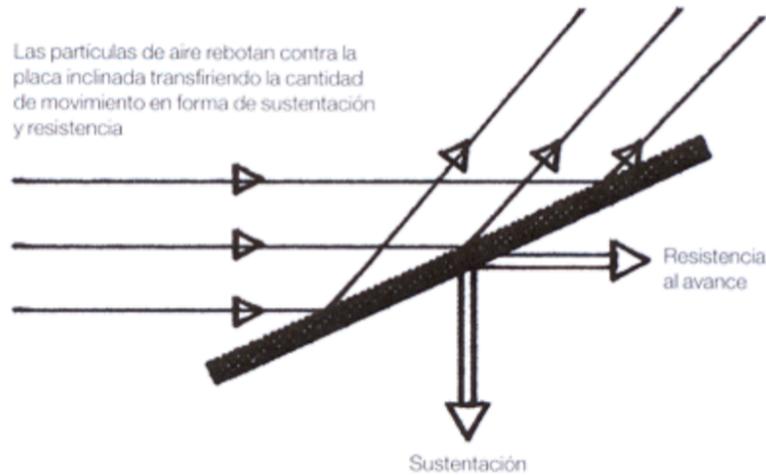


Figura 2-18 Teoría de la carga aerodinámica de Newton. [20]

Como se puede ver, las fuerzas de sustentación y resistencia, son el resultado de la transferencia de la cantidad de movimiento entre las partículas del aire y la placa. En principio, esta teoría sí explica parte de las fuerzas que actúan sobre un objeto en el seno de un fluido, sin embargo, no explica los fenómenos de sustentación y resistencia al avance.

Finalmente en 1907, un ruso llamado Joukowski, hizo unos experimentos en los que las trazadas del flujo podían visualizarse y la fórmula de las fuerzas de sustentación guardaba cierta similitud con los resultados de sus ensayos. Joukowski se dio cuenta de que, por efecto de la viscosidad, la influencia de la placa inclinada se extendía dentro del aire una distancia considerable de la propia placa.

Aun así, es necesario remontarse al año 1738, para encontrar las primeras explicaciones que relacionan flujo y presión en un entorno de dinámica de fluidos. En aquel entonces el físico Bernoulli, encontró en un libro de hidrodinámica una relación directa entre presión y velocidad. Pero la ecuación fue creada realmente en 1755 por Euler, sin embargo, éste no se llevó ningún mérito, y es la que se conoce hoy en día como:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + p + \rho \cdot g \cdot z = k$$

Ecuación 2 Ecuación de Bernoulli.

Donde,

- p = Presión estática.
- ρ = Densidad del aire.
- v = Velocidad del flujo.
- z = Altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.
- k = Constante.
- $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$ = Presión dinámica.

Esta fórmula viene a decir que donde el flujo alcanza su mayor velocidad, la presión alcanza su mínimo. En los alerones, la altura será despreciable en comparación con la presión y la velocidad.

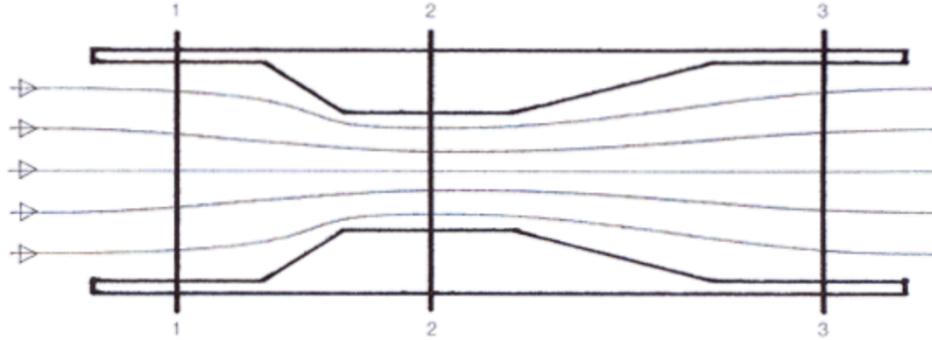


Figura 2-19 Tubo Venturi. [20]

En la Figura 2-19 se puede ver un esquema de un tubo Venturi en la que se explica el principio de Bernoulli. El aire entra por la línea 1 y va acelerando su velocidad hasta la línea 2 debido a la reducción de la sección del tubo, por lo que hay una bajada de presión en esa parte.

Este principio también es aplicable a la sección de un alerón. El aire que fluye por debajo del ala tiene que recorrer mayor distancia para ir desde el borde de ataque al borde de salida, debido a la curvatura de esta. Así pues, el aire que toma el camino más largo se acelera y adquiere mayor velocidad, y al igual que se veía en el tubo Venturi, esto causa una reducción de presión localizada en la parte inferior del ala, creando carga aerodinámica mediante la succión del perfil hacia abajo.

2.3.2 Fuerzas implicadas

Las componentes de la fuerza aerodinámica son resistencia y sustentación. La combinación vectorial de estas da como resultado, un vector resultante llamado fuerza aerodinámica total (Figura 2-20). Las diferencias de presión pueden expresarse como el coeficiente de presión multiplicado por la presión dinámica:

$$p - p_0 = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

Ecuación 3 Coeficiente de presión

Para pasar de unidades de presión a unidades de fuerza, es necesario multiplicarla por el área sobre la que la presión actúa:

$$p = F/A$$

Así pues, de la primera ecuación se puede establecer una ecuación para la sustentación y otra para la resistencia:

$$F_{Sustentación} = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A$$

Ecuación 4 Carga aerodinámica.

$$F_{Resistencia} = C_X \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A$$

Ecuación 5 Resistencia al avance.

Donde,

- C_L = Coeficiente de sustentación.
- C_X = Coeficiente de penetración.
- ρ = Densidad del aire.
- v = Velocidad del flujo.

- $A = \text{Área}$.

Nota: Para un ala siempre se toma la superficie en planta ya que así es como se expresan los coeficientes, pero en el caso de un vehículo entero, lo normal es utilizar el área frontal para la sustentación y la resistencia.

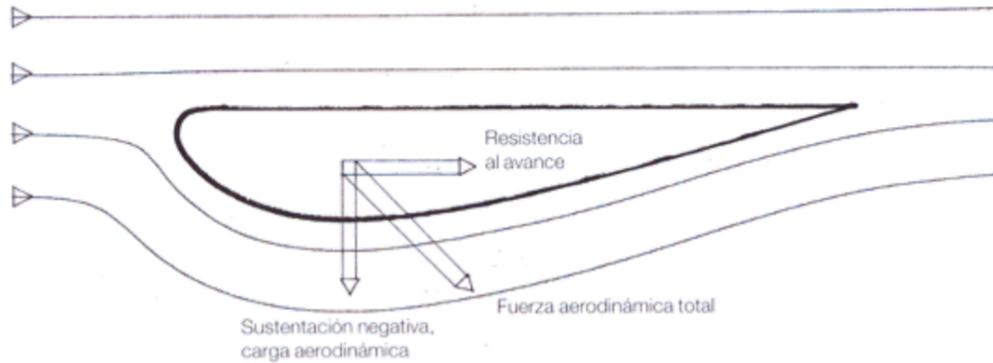


Figura 2-20 Componentes de la fuerza aerodinámica. [20]

Estos coeficientes de sustentación y penetración son medidas relativas de la sustentación y resistencia al avance que genera un cuerpo. Normalmente a simple vista se podrá discernir si un coche tiene un C_x alto o bajo, por ejemplo, un coche de calle tiene un aspecto mucho menos resistente que un monoplaza de Fórmula 1, de hecho, es posible calcular analíticamente los coeficientes a partir de un método para calcular el área frontal.

2.3.3 Cálculo del área frontal

Si se recurre a las ecuaciones de la sustentación y de la resistencia, podrá verse que el área (A) está presente en ambas. Por lo tanto, si el área frontal de un coche es más grande que la de otro, producirá más resistencia a igual velocidad y con el mismo C_x .

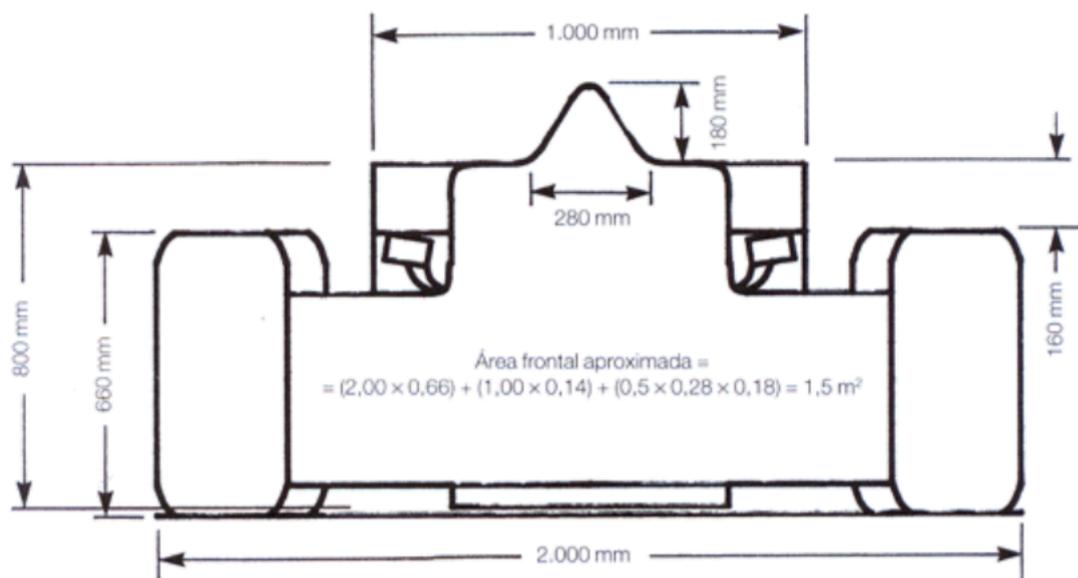


Figura 2-21 Método para calcular el área frontal. [20]

Para calcular el área del monoplaza mostrado en la figura, habría que recurrir a numerosas fuentes con el fin de conseguir muchos datos fiables, como pueden ser, el diámetro de los neumáticos, ya que estos están regulados por la FIA y pueden obtenerse fácilmente a través de la página web oficial de Pirelli, altura y anchura del monoplaza, dimensiones del alerón (las cuales se tienen), etc.

Como se ve en la Figura 2-21, se ha deducido que el área frontal de un monoplaza genérico es $1,5 \text{ m}^2$, y el C_x de $0,75$ según varias referencias. Tomando la densidad del aire como $1,22 \text{ Kg/m}^3$, con una velocidad de 320 Km/h ($89,4 \text{ m/s}$) la carga aerodinámica resulta 560 Kg . Haciendo los cálculos al revés se podría obtener el coeficiente de penetración C_x .

2.4 Capa límite

Para introducir el concepto de capa límite es necesario enunciar algunas definiciones que son trascendentales si se quieren entender las influencias de este fenómeno. Para ello es necesario hablar de los tipos de flujo que existen.

El flujo puede ser laminar o turbulento. Si todas las partículas que viajan dentro de un flujo se mueven en la misma dirección que la velocidad del aire y que las líneas de flujo, entonces se está hablando de un flujo laminar. Si por el contrario, las partículas de aire se desplazan de forma errática en caminos diferentes al de la velocidad del aire, entonces se está ante un flujo turbulento.



Figura 2-22 Flujo laminar (izquierda) y turbulento (derecha). [22]

A su vez, el flujo que está alrededor de un cuerpo puede ser flujo adherido, si este sigue la forma del cuerpo o flujo separado si este se despega. Este efecto tiene una gran influencia en la resistencia y en la carga aerodinámica. Hasta ahora se ha asumido que el aire se comportaba como un gas ideal, es decir sin viscosidad, sin embargo no es así, el aire es un fluido viscoso y como tal, cuando un cuerpo se mueve a través de él, el aire genera un rozamiento interno en sus proximidades. Las partículas de aire que están en contacto con la superficie son frenadas por el rozamiento viscoso y la capa de aire adyacente sobre la superficie se pega a esa superficie. Las capas más alejadas a la superficie también son frenadas por el rozamiento viscoso, pero a medida que aumenta la distancia sobre la superficie, este efecto se va atenuando hasta que a una cierta distancia, el aire no se ve afectado, y a esta velocidad del aire se lo conoce como flujo principal. Así pues, existe una capa de aire alrededor del cuerpo en la que el gradiente de velocidad es cero, desde la superficie, hasta el flujo principal del borde exterior. Esta capa se conoce como capa límite.

Si las variaciones de velocidad entre las subcapas de la capa límite son pequeñas, estas deslizarán una sobre otras con poca interacción creando lo que se conoce como capa límite laminar. Si existe alguna perturbación en la capa límite como puede ser una curvatura en la superficie del cuerpo, la capa límite se convierte en turbulenta. La capa límite normalmente suele incrementar su grosor (Figura 2-23) a lo largo de la superficie de un cuerpo, por lo que en un turismo, por ejemplo, en su parte delantera será delgada y laminar, siendo en su parte trasera más gruesa y turbulenta.

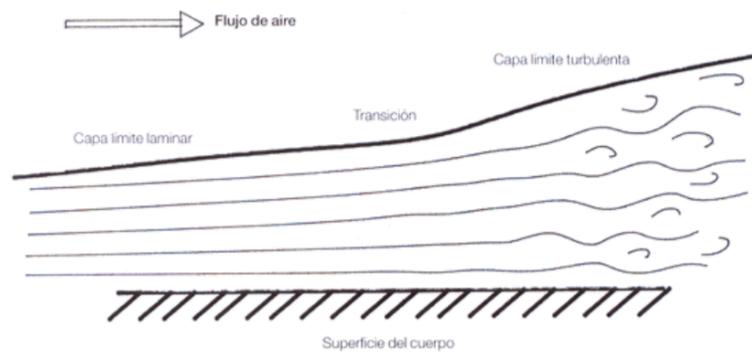


Figura 2-23 Capas límite laminar y turbulenta. [20]

La capa límite laminar genera menos superficie de rozamiento que una turbulenta y por ello la resistencia es menor. Sin embargo, una capa límite turbulenta puede retrasar la separación del flujo bajo ciertas circunstancias, o unir el flujo separado. Esta acción es importante ya que genera carga aerodinámica y reduce la resistencia, por lo que no siempre se tratará de alcanzar un flujo laminar. [20]

2.5 Número de Reynolds

El número de Reynolds es un concepto que es necesario introducir para entender la aerodinámica y concretamente el movimiento de los fluidos. Viene definido por la fórmula:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu}$$

Ecuación 6 Número de Reynolds.

Donde,

- ρ = Densidad del aire.
- v = Velocidad.
- L = Longitud.
- μ = Viscosidad.

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que establece una relación entre las fuerzas viscosas y las fuerzas inerciales. Para $Re \gg 1$, las fuerzas inerciales son mucho mayores que las viscosas y el fluido puede considerarse ideal, o lo que es lo mismo, no viscoso.

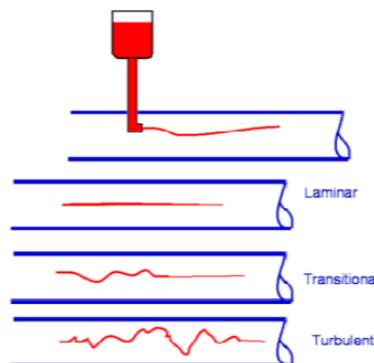


Figura 2-24 Flujos laminar, transitorial y turbulento. [23]

Este número también es un indicativo de si el flujo será laminar o turbulento, ya que generalmente el flujo se vuelve más turbulento con el aumento de velocidad del fluido (v) y con la longitud del cuerpo (L). Para determinar la estabilidad del flujo se establecen los siguientes valores:

- $Re < 2000$: Flujos laminares.
- $Re > 4000$: Flujos turbulentos.
- $2000 < Re < 4000$: Transición (Región crítica).

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Procedimiento

A continuación se detallan las pautas que se han seguido para llevar a cabo el trabajo, es decir, explicar los procedimientos que se han realizado para abordar el problema.

En primer lugar, se necesita procesar algunos de los parámetros obtenidos con softwares posteriores. Para ello se ha elaborado una hoja de cálculo en Excel, a partir de la cual se puedan obtener las velocidades finales del monoplaza con el alerón trasero móvil desactivado y activado, a partir de los datos obtenidos con Ansys Fluent. De esta forma se puede obtener la velocidad que se gana en recta con la configuración apropiada de este dispositivo.



Figura 3-1 Alerón propuesto. [Autoría propia]

Para el estudio del problema es necesario partir de una geometría. En este caso se ha partido de una geometría ya creada (Figura 3-1) que se puede encontrar en el siguiente enlace: <https://grabcad.com/library/rear-wing-formula-1-2017-red-bull-1>. Esta ha sido simplificada con el fin de adecuarla al programa Ansys Fluent, lo que supone que se le harán las modificaciones oportunas para no dificultar el proceso de mallado. También se modificará la posición del flap superior para hacer un estudio detallado del sistema DRS convencional y mejorado, por lo tanto se tendrán tres geometrías distintas con sus respectivas configuraciones.

Posteriormente se procederá al mallado con el programa Ansys Gambit. Para ello, se partirá de los tres archivos que contienen las geometrías (DRS desactivado, activado y activado mejorado). Se tendrá que elegir entre hacer un mallado tetraédrico o trigonal, teniendo en cuenta que la precisión que ofrece el mallado trigonal es mayor, a la vez que tiene menos problemas de deformación. Tras el mallado de los alerones, se procede a crear el mallado superficial del túnel. Aquí se puede relajar el tamaño de la malla, permitiendo elementos más grandes.

Por último se procederá a recopilar los datos que se han obtenido con Fluent, que servirán para introducirlos en la hoja de cálculo y obtener resultados.

3.1.1 Modificación de la geometría

El proceso de modificación se puede hacer con el mismo software de mallado, y servirá para eliminar pequeños elementos que dificultarán el proceso posterior, así como modificar la posición del flap superior. Ya una vez modificada la geometría, se prosigue a realizar el mallado para la resolución de las ecuaciones mediante el método de volúmenes finitos. Para el mallado, hay que definir el límite en el espacio de la malla, es decir, lo que sería propiamente dicho como túnel de viento.

La malla es una herramienta que utiliza Fluent para determinar los cálculos de las ecuaciones de Navier-Stokes, teniendo en cuenta que, cuanto más elementos tenga la malla, mayor será el requerimiento de cálculos y de recursos, es decir, tardará más tiempo en converger. Si por el contrario, se reducen el número de elementos, el programa genera resultados falsos.

Como lo que es de interés, es conocer el comportamiento del flujo cercano al alerón, se utiliza un factor de crecimiento de malla. Con esto se genera una malla muy densa cerca de las alas y una malla más amplia en sus fronteras, como se puede ver en la Figura 3-2. Para la zona cercana a los flaps, se ha utilizado cinco capas, siendo la primera de 0,2 mm de espesor, con un factor de crecimiento de 1,5 para el resto. Se han escogido estos parámetros porque así lo recomienda el manual del programa. De esta forma, se puede observar más detalladamente los efectos de la capa límite cuando se haga la simulación. Además se ha optado por una malla de elementos triangulares, ya que esta es más adecuada para geometrías con muchas curvas como es el caso de estudio.



Figura 3-2 Alerón mallado visto de perfil con factor de crecimiento. [Autoría propia]

Para el mallado se recomienda hacer solo la mitad del alerón (Figura 3-3), aprovechando la simetría, por lo que los datos obtenidos representan solo el 50% del alerón y por lo tanto es necesario multiplicar posteriormente los resultados obtenidos. Como beneficio, se obtiene que se reduce considerablemente el número de elementos en la malla, permitiendo un análisis más rápido que no demande una gran cantidad de procesamiento de cálculo.

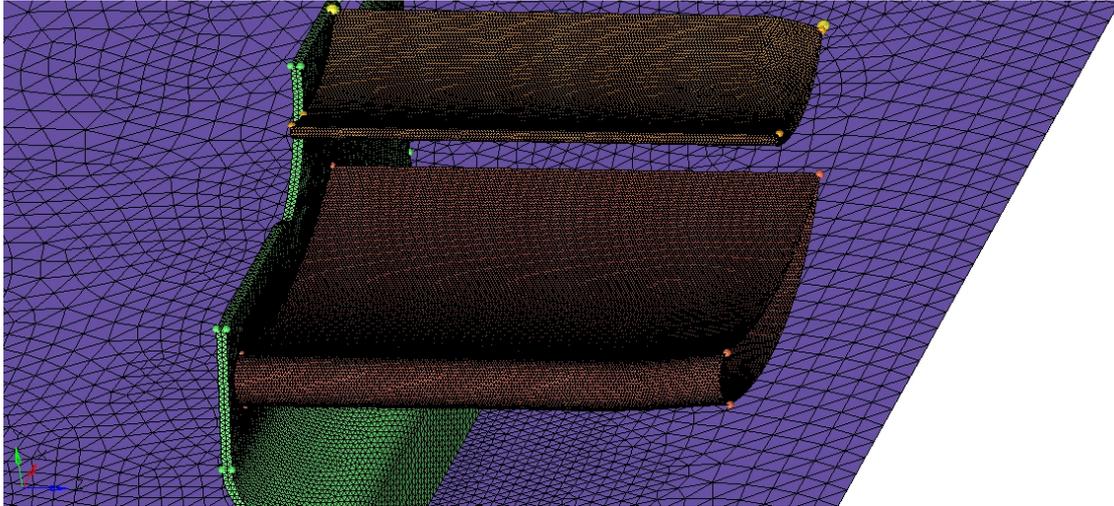


Figura 3-3 Alerón malla seccionado por la mitad. [Autoría propia]

Para el mallado del túnel se ha optado por un mallado trigonal con elementos más grandes que los empleados en el alerón. Tiene una longitud total de 5 m y un radio de 1,82 m. El alerón se encuentra situado a unos 86 cm de la entrada, dejando unos 4,14 m por detrás de este para visualizar la estela del flujo en posteriores simulaciones con Fluent. También se han establecido unas condiciones de contorno para su posterior simulación:

- Alerón fijo: Wall
- Alerón móvil: Wall
- Flujo de entrada: Velocity-inlet
- Deriva lateral: Wall
- Outlet: Outflow
- Plano de simetría: Symmetry
- Suelo: Wall
- Túnel: Wall

3.1.2 Análisis

Una vez obtenida la malla, se importa al programa de CFD Ansys Fluent, un software basado en el método de los volúmenes infinitos.



Figura 3-4 Software CFD Ansys Fluent. [24]

Los programas de CFD resuelven las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos, para ello es necesario que sean transformadas en expresiones algebraicas para que sean resueltas mediante operaciones sencillas (sumas, restas y multiplicaciones). Esta conversión se conoce como proceso de discretización numérica. Para que el programa resuelva este proceso iterativo, es necesario definir unas condiciones iniciales y unas condiciones de contorno.

- Condiciones iniciales:
 - Modelo de turbulencia: k-omega. Está englobado dentro de los modelos RANS (Reynolds Navier-Stokes) y son modelos de turbulencias que requieren de menor coste computacional en comparación con los modelos DES (Detached Eddy Simulation) y LES (Large Eddy Simulation). Además de ser de los primeros modelos en desarrollarse, son los más conocidos por los estudiantes y profesionales que se dedican al CFD.
 - Se utilizará como densidad del aire un flujo constante de $1,225 \text{ Kg/m}^3$, con una viscosidad constante de $1,7894\text{e-}05 \text{ Kg/m}\cdot\text{s}$.
 - En cuanto al criterio de convergencia, no se ha puesto ninguno, por lo que el programa seguirá haciendo iteraciones hasta que no se observe variación alguna en las variables, en este trabajo se ha observado que un número de 1000 iteraciones es suficiente para alcanzar la convergencia.
- Condiciones de contorno:
 - Velocidad de entrada: Se utilizarán varias velocidades cercanas a los 300 Km/h, debido a que el sistema DRS tiene como fin aumentar la velocidad del monoplaza en las rectas, en las cuales, el sistema suele activarse pasado los 260 km/h. Teniendo en cuenta esto, se ha elegido las siguientes velocidades de entrada: 260, 270, 280, 290 y 300 Km/h.
 - Presión manométrica a la salida: 0 Pa. Es decir, se tendrá presión atmosférica a la salida.
 - Las paredes del túnel y el propio alerón son del tipo “Wall” lo que quiere decir que son declarados como fijos y que es el fluido el que estará en movimiento exclusivamente.
 - “Symmetry” es un plano creado justo en la mitad del túnel de viento que corta a este longitudinalmente, quedándose solo con una parte del túnel para ahorrar tiempo y capacidad de procesamiento de cálculo.

Una vez definidas las condiciones iniciales y las de contorno se itera hasta obtener una convergencia, según el criterio que se haya predefinido. Estos datos se plasman en una gráfica de residuales, que son la diferencia entre el valor de la solución nueva y la anterior. El programa obtiene la convergencia cuando los residuales tienen un valor suficientemente bajos.

4 RESULTADOS

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos mediante las simulaciones, comenzando a realizar el estudio con el DRS desactivado y luego con el DRS activado, para posteriormente hacer una comparativa y calcular una ganancia de velocidad. Seguidamente, se llevará a cabo el estudio para el DRS mejorado y hacer otra comparativa con los casos anteriores, calculando nuevamente la ganancia de velocidad. A lo largo de este apartado, se analizarán las principales variables, como son: presiones, velocidad de flujo y fuerzas.

4.1 Obtención de resultados

Una vez realizadas las iteraciones de cálculo, se tienen que plasmar los resultados. Para ello, hay que dirigirse al menú “Results” en el que se tendrá que seleccionar el tipo de gráfica que se quiere representar. Las gráficas más representativas para este proyecto serán las de velocidad y presiones. Estas se sitúan en la pestaña “Graphics and Animations” (1) que se puede ver en la barra de la izquierda, y a continuación se pulsa sobre la opción “Contours” (2) para los contornos de presión o “Vectors” para los vectores de velocidad, y por último “Set Up...” (3) para abrir la ventana con las opciones para generar el gráfico.

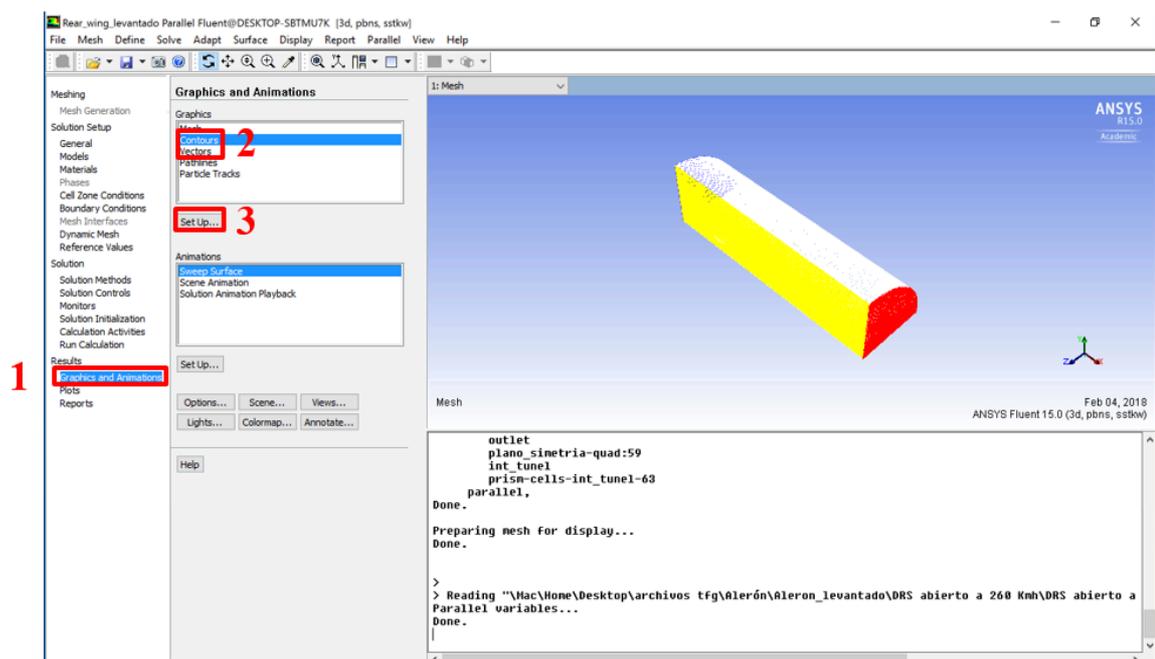


Figura 4-1 Creación de gráficas de contorno y vectorial. [Autoría propia]

Las gráficas que se van a generar son las siguientes:

- “Pressure”: Representación gráfica tridimensional de las variaciones de presión estática en las superficies del alerón.
- “Pressure”: Representación gráfica bidimensional de las variaciones de presión estática de ambos flaps en vista seccionada.
- “Velocity”: Representación gráfica vectorial y bidimensional de la velocidad en el entorno de ambos flaps en vista seccionada.

Para los tres grafos habrá que dejar marcadas por defecto las casillas dentro del cuadro de “Options”, al igual que con los menús desplegables de “Contours of/Vectors of”. Para el primer caso habrá que seleccionar: “alerón_fijo”, “alerón_movil” y “lateral” dentro del cuadro “Surfaces”. Para el segundo y el tercero solo se seleccionará “plano_simetria” y “plano_simetria-quad:59” dentro de “Surfaces”. Haciendo click en “Display” se generarán los gráficos y se podrán manipular tanto las vistas, como el tamaño de la escala.

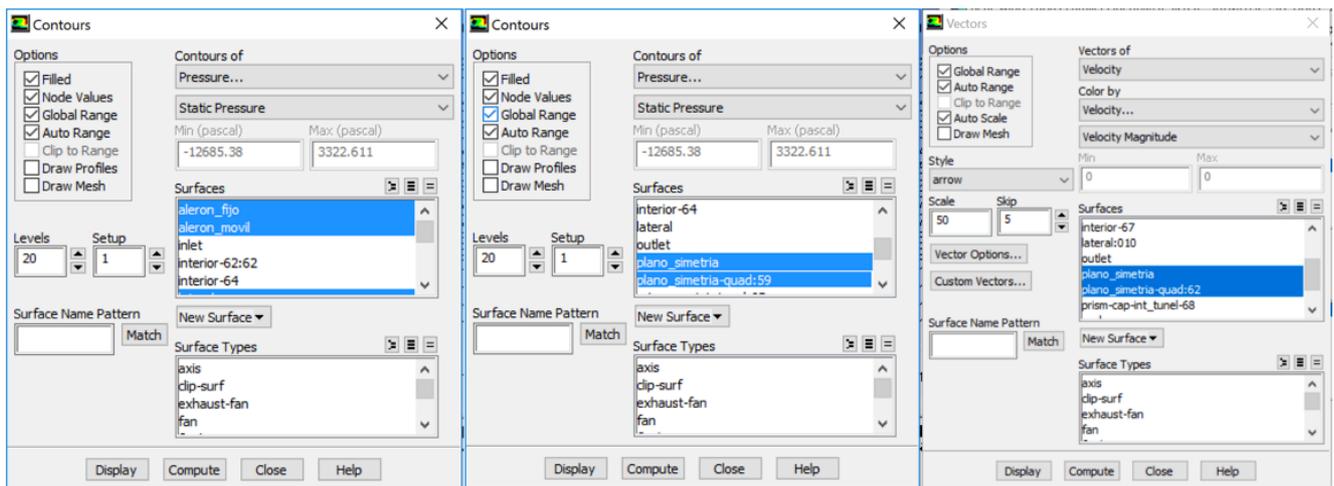


Figura 4-2 Configuración de las gráficas de contorno y vectorial. [Autoría propia]

En los siguientes subapartados se llevarán a cabo unos análisis detallados acerca de las presiones, flujos de aire y fuerzas que actúan sobre el alerón, en función de si el DRS está desactivado, activado o activado con la mejora propuesta, ayudándose para ello de las gráficas de contorno y vectorial anteriormente descritas y con los datos de fuerzas arrojados por el programa Fluent.

Para los análisis de presiones y de flujo de aire, se ha seleccionado gráficos con la velocidad fijada en 300 Km/h (83,33 m/s) ya que esta velocidad es determinante cuando se activa el DRS. En los circuitos donde se alcanzan grandes velocidades, como por ejemplo el de Monza (Italia), este sistema se activa cuando el monoplaza alcanza velocidades similares. A medida que el coche va subiendo de velocidad, aumenta la fuerza de resistencia al avance. Cuando el DRS se activa, gran parte de esa fuerza se ve reducida repentinamente y consecuentemente se consigue mayor velocidad extra a esta velocidad que a otra inferior.

En cuanto a los análisis de fuerza se han recopilado los datos de 5 velocidades distintas cercanas a 300 Km/h para observar la evolución de las fuerzas tanto de sustentación como de resistencia al avance, en función de la velocidad.

4.2 Análisis DRS desactivado

Esta es la configuración estándar, la posición de los flaps permiten obtener la carga aerodinámica necesaria, con su correspondiente drag, para no desequilibrar el tren trasero del monoplaza. Esta disposición es la que se utiliza durante casi todo el circuito, especialmente en las curvas, dejando

exclusivamente la activación del DRS en las rectas destinadas para ello, siempre cuando no esté prohibido su uso según lo estipulado en el subapartado 1.1.

4.2.1 Análisis de presiones

En la Figura 4-3 se puede apreciar unos tonos rojos en el intradós de ambos flaps, sobre todo en el móvil, que indican una presión mayor, por lo que se demuestra que la fuerza aerodinámica es generada contra el suelo, produciendo lo que se conoce como carga aerodinámica. Los tonos azules y verdes indican una menor presión y están repartidos por la parte interna de los endplates y por el extradós de ambos flaps. Estos últimos contornos pueden apreciarse y entenderse mejor en la vista seccionada de la Figura 4-4.

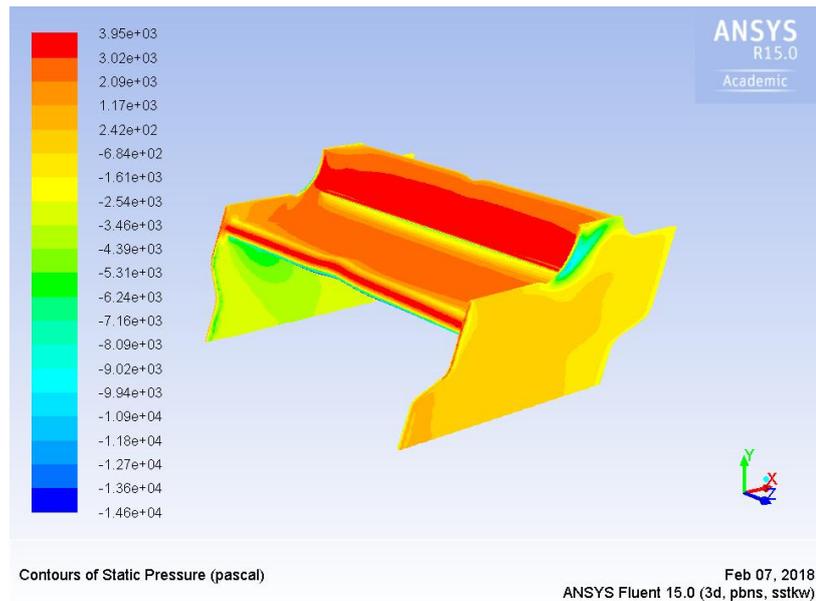


Figura 4-3 Contornos de presión en 3D a 300 Km/h. [Autoría propia]

Se puede ver claramente que en el extradós de ambas alas se crea una depresión, esto es debido a que la velocidad a la que circula el aire es mucho mayor comparada con la que circula por arriba. Además, se puede apreciar en la misma figura que el punto de incidencia del flujo se encuentra ligeramente por encima del borde de ataque del flap fijo, lo que indica que el alerón está trabajando correctamente, provocando la sobrepresión necesaria para que se produzca una notoria diferencia de presiones entre ambas caras del alerón. Cabe destacar la presión ejercida sobre el flap superior, responsable de generar una importante carga aerodinámica que se verá reducida considerablemente cuando éste cambie de posición.

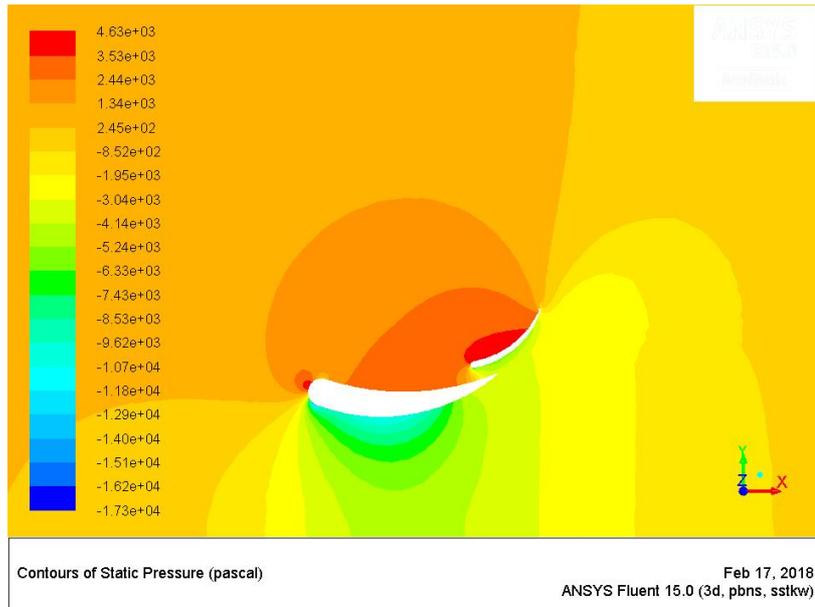


Figura 4-4 Contornos de presión en 2D a 300 Km/h. [Autoría propia]

4.2.2 Análisis de flujo de aire

Para la elaboración de las gráficas correspondientes al análisis de flujo de aire, se han optado por unos grafos vectoriales, con el fin de que se pueda apreciar no solo la velocidad del flujo, sino también la dirección. Además en este tipo de gráfico puede visualizarse si ha habido desprendimiento de la capa límite. En las siguientes distribuciones, la variable que se está representando varía su magnitud dependiendo del color, siendo los colores azulados los de menor magnitud, pasando por los verdes y amarillos, siendo los rojos los de mayor valor. En la Figura 4-5, se puede apreciar como el flujo se acelera por la parte baja, tanto del flap móvil como del flap fijo, tomando colores amarillos y contrastando con los colores azules de la parte superior de éstos, en el que el aire circula a menor velocidad y que por lo tanto, se puede corroborar la generación de carga aerodinámica mediante esa diferencia de presiones que se mencionó en el subapartado 4.2.1. Los vectores de color azul oscuro en el área cercana a la cola del ala móvil, corresponden a una zona en la que el flujo es desordenado y de muy baja velocidad. Ahí se ha producido un desprendimiento de la capa límite, sin embargo al producirse muy cerca del borde de fuga, no altera negativamente el comportamiento del ala fija. Tampoco afecta al ala móvil ya que aunque el flujo es muy lento en la parte superior del ala fija, éste vuelve a acelerarse cuando entra en contacto con la parte inferior del ala móvil.

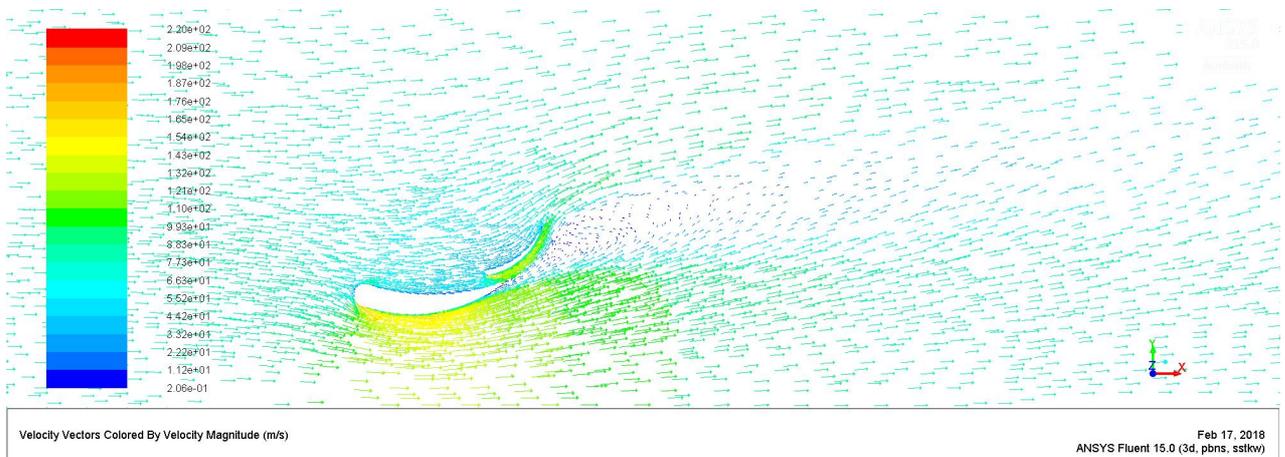


Figura 4-5 Vectores de velocidad en 2D a 300 Km/h. [Autoría propia]

4.2.3 Análisis de fuerzas

Para la elaboración de las siguientes tablas y sus correspondientes gráficas, se han usado los datos recopilados por el programa Fluent. Es importante destacar que estas cifras obtenidas por el programa se han multiplicado por 2, debido a que se ha trabajado con medio alerón como se comentó en anteriores apartados. Las fuerzas de sustentación corresponden a las fuerzas en el eje vertical, y como se está trabajando con alerones, se ha tomado como criterio que las fuerzas en el sentido “-y” sean positivas. Según la Tabla 1, se puede observar que las fuerzas de presión son mucho más mayores que las fuerzas viscosas, ya que el rango de magnitudes de esta es muy pequeño en comparación con las fuerzas de presión. La suma de ambas, fuerzas de presión y viscosas, constituyen las fuerzas de sustentación.

Velocidad (Km/h)	Fuerzas de presión (N)	Fuerzas viscosas (N)	Fuerzas de sustentación (N)
260	2925,12	-1,469	2923,66
270	3268,52	-1,5538	3266,96
280	3370,9	-1,6704	3369,22
290	3787,18	-1,5182	3785,68
300	3980,34	-1,9648	3978,38

Tabla 1 Fuerzas de sustentación.

Se puede observar en la gráfica de la Figura 4-6 que la fuerza de sustentación sigue un crecimiento aproximadamente lineal con la velocidad, llegando a multiplicarse por 1,4 en sus subida desde los 260 Km/h a los 300 Km/h.

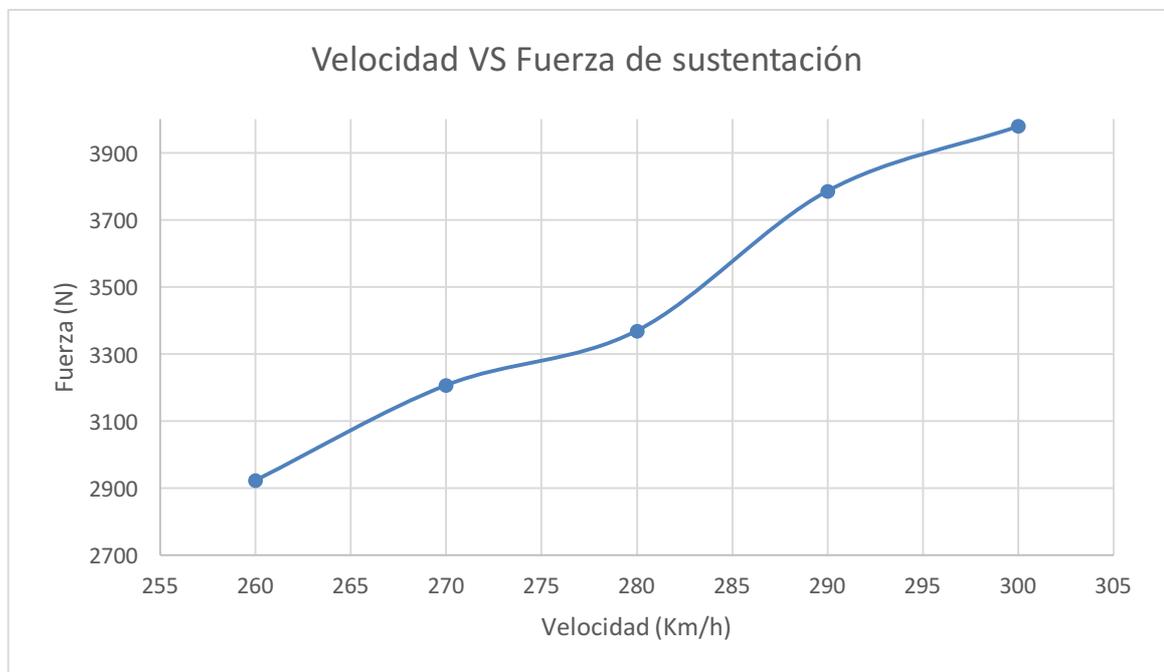


Figura 4-6 Gráfica Velocidad VS Fuerza de sustentación.

Las fuerzas de resistencia al avance corresponden con las fuerzas en el eje horizontal y se ha tomado como criterio que las fuerzas en el sentido “+x” sean positivas. Como se puede apreciar en la Tabla 2, las fuerzas de resistencia al avance son menores en comparación con las de sustentación, sin embargo juegan un papel fundamental en la aerodinámica del coche. Aquí se puede apreciar que las

fuerzas viscosas son relativamente mayores a las que se veían en la Tabla 1, ya que estas se generan en el mismo sentido al que circula el flujo, teniendo mayor valor la componente en el eje x que en el eje y. Análogamente a las fuerzas de sustentación, la suma de las fuerzas de presión y viscosas en el sentido del eje x, constituyen las fuerzas de resistencia al avance.

Velocidad (Km/h)	Fuerzas de presión (N)	Fuerzas viscosas (N)	Fuerzas de resistencia (N)
260	693,6	12,9072	706,52
270	754,02	14,0654	768,08
280	793,14	14,7644	807,9
290	834,92	16,0428	850,96
300	938,22	17,2134	955,42

Tabla 2 Fuerzas de resistencia al avance.

En la gráfica de la Figura 4-7 se puede apreciar que la fuerza de resistencia al avance sigue un crecimiento lineal aproximadamente, multiplicándose por 1,4 veces en su subida desde los 260 Km/h a los 300 Km/h.

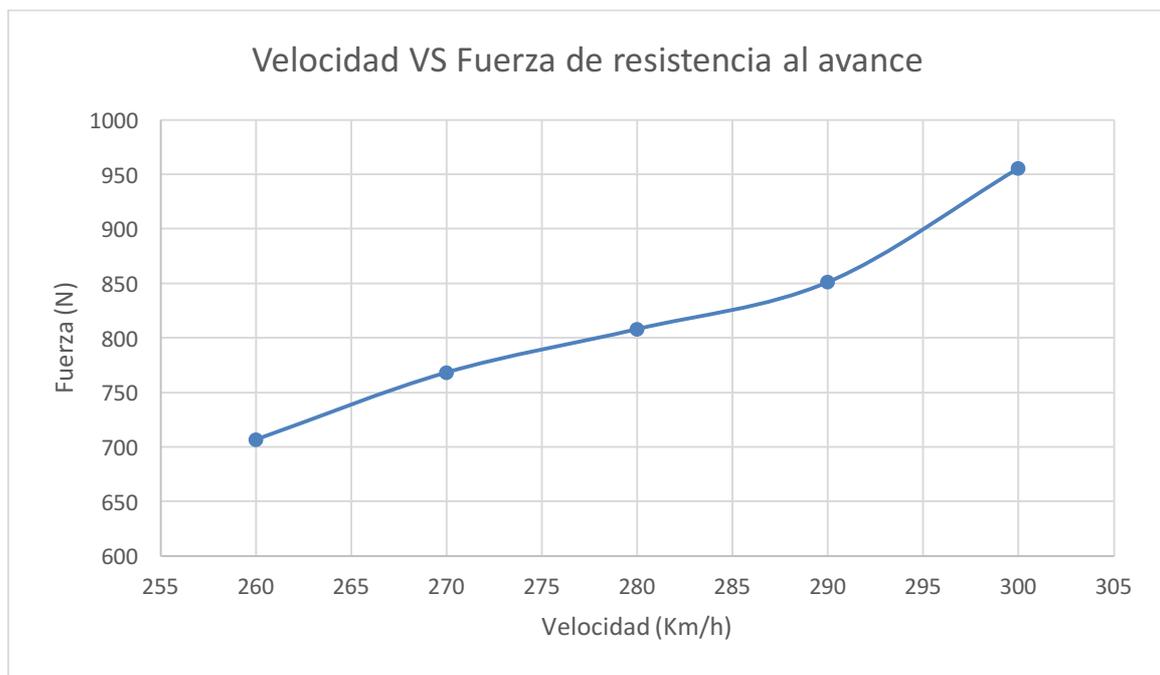


Figura 4-7 Gráfica Velocidad VS Fuerza de resistencia al avance.

4.3 Análisis DRS activado

Una vez realizado los ensayos con el DRS desactivado, se va a efectuar el análisis con la configuración de DRS activado. Hay que tener en cuenta que el propósito de esta configuración es reducir el drag mediante la reducción de superficie alar en contacto con el viento y con ello conseguir un aumento de la velocidad punta del monoplaza. Como consecuencia de esto, se producirá una reducción del downforce y del drag, por lo que se obtendrá unas presiones menores sobre los flaps.

4.3.1 Análisis de presiones

Si se observa la Figura 4-8, se puede apreciar unos tonos anaranjados sobre ambos flaps, que contrastan con los colores rojos correspondientes a la configuración del DRS desactivado. Esto se

traduce en una disminución de la carga aerodinámica como era de esperar. Se puede ver también que los endplates mantienen presiones similares tanto por su cara interna como externa.

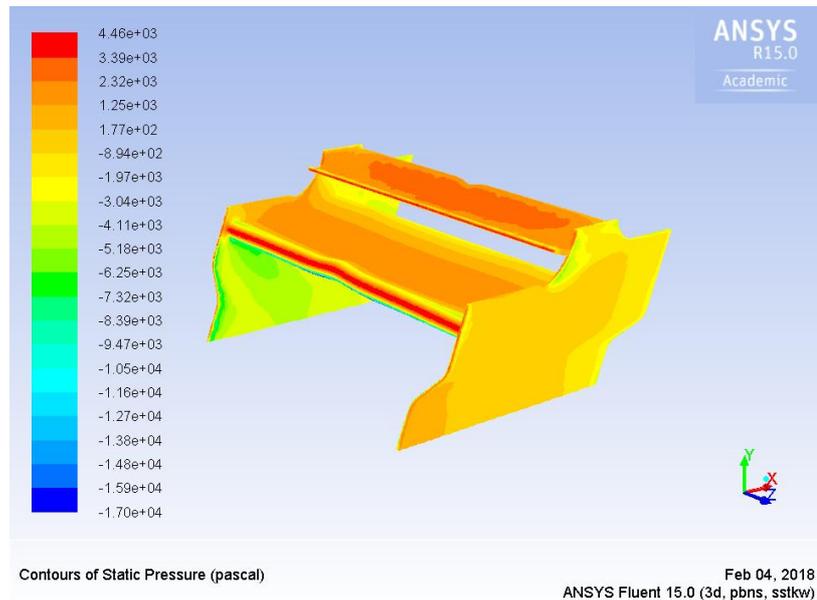


Figura 4-8 Contornos de presión en 3D a 300 Km/h. [Autoría propia]

En la vista seccionada de la Figura 4-9, se puede apreciar que a pesar de haber cambiado la posición del ala superior, se sigue creando una depresión en su extradós, tanto en el de esta, como en el del ala fija. Se puede observar también que el punto de incidencia del flujo se encuentra justo en el borde de ataque de ambas alas, haciendo que el alerón trabaje correctamente, manteniendo la sobrepresión necesaria para que exista una diferencia de presiones a ambas caras de las alas. Cabe reseñar que ya no existe tanta presión sobre el intradós del flap superior y se ha reducido ligeramente ésta en el del flap inferior. Todo esto tiene como consecuencia una notable reducción de la carga aerodinámica, y una reducción muy importante de la resistencia al avance.

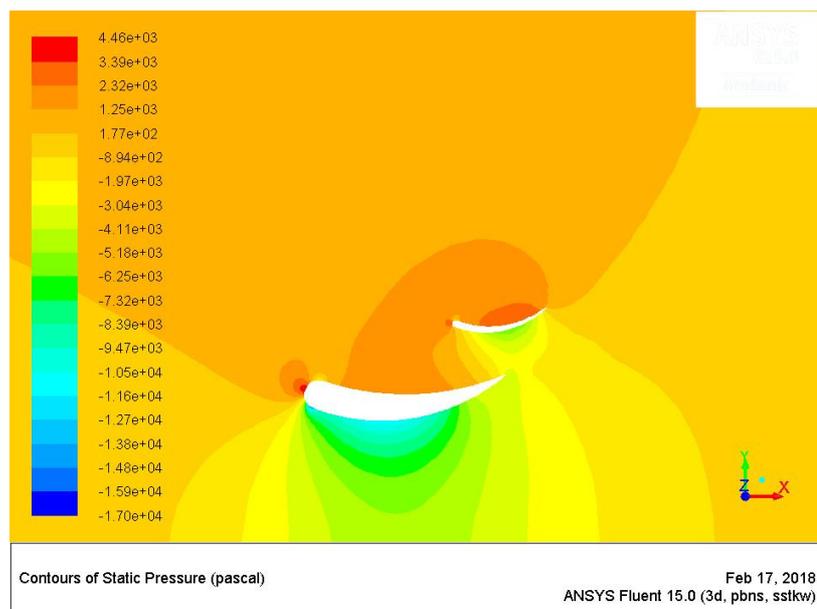


Figura 4-9 Contornos de presión en 2D a 300 Km/h. [Autoría propia]

4.3.2 Análisis de flujo de aire

En la Figura 4-10 se puede observar que el flujo se acelera por el extradós de ambas alas, tomando colores amarillos e incluso anaranjados en el caso del ala inferior. Estos colores contrastan con los del intradós que toman colores azulados, los cuales indican una menor velocidad y por lo tanto pone de manifiesto la generación de carga aerodinámica debida a la presión resultante provocada por esa diferencia de velocidades. Se puede apreciar que unos vectores de pequeña magnitud de color azul, salen por el borde de fuga del ala inferior. Esto se corresponde con un desprendimiento de la capa límite, pero no es comparable con el del subapartado 4.2.2, ya que este desprendimiento ocasiona un régimen turbulento muy pequeño y el flujo vuelve a ser laminar muy rápidamente. Si se observa bien, también pasa lo mismo en el intradós del flap superior. Al producirse en esas zonas no afectan negativamente en ningún caso al comportamiento de ambas alas.

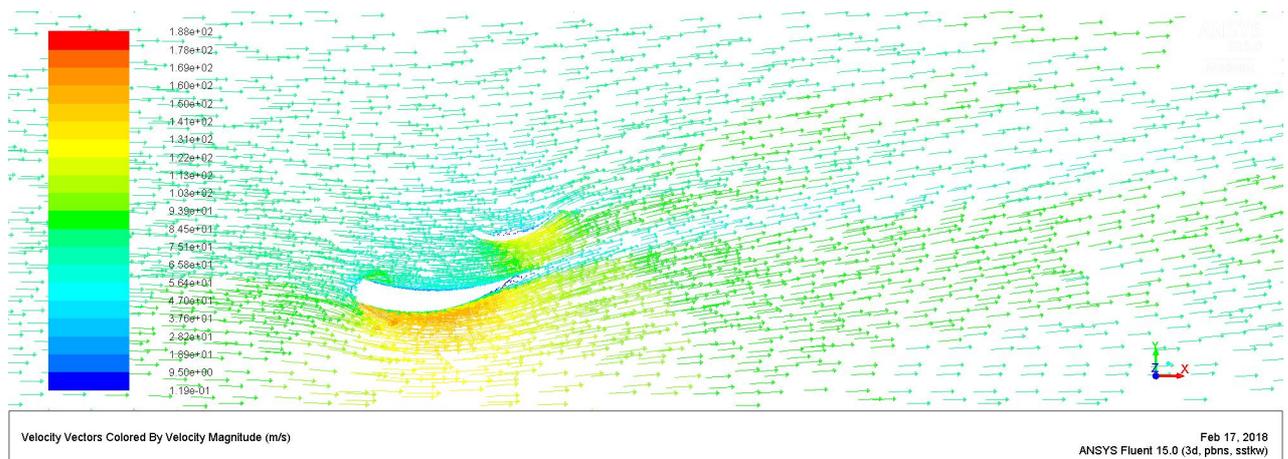


Figura 4-10 Vectores de velocidad en 2D a 300 Km/h. [Autoría propia]

4.3.3 Análisis de fuerzas

Observando la Tabla 3, se puede apreciar que todas las fuerzas, son relativamente más bajas que las del subapartado 4.2.3, ya que al cambiar el ángulo del flap superior se generan unas fuerzas inferiores, tanto de presión como viscosas.

Velocidad (Km/h)	Fuerzas de presión (N)	Fuerzas viscosas (N)	Fuerzas de sustentación (N)
260	2885,84	-0,5664	2885,28
270	3261,68	-0,7638	3260,9
280	3321,52	-0,6254	3320,9
290	3527,6	-0,8724	3526,72
300	3813,1	-0,907	3812,18

Tabla 3 Fuerzas de sustentación.

En la gráfica de la Figura 4-11, se puede apreciar como la fuerza sigue un crecimiento lineal desde los 260 Km/h hasta los 270 Km/h, manteniéndose constante hasta los 280 Km/h, y volviendo a crecer linealmente hasta los 300 Km/h. Se puede observar también que las fuerzas de sustentación se multiplican por 1,3 en su subida desde los 260 Km/h hasta los 300 Km/h. Constituye un múltiplo ligeramente inferior al que se vio en el subapartado 4.2.3.

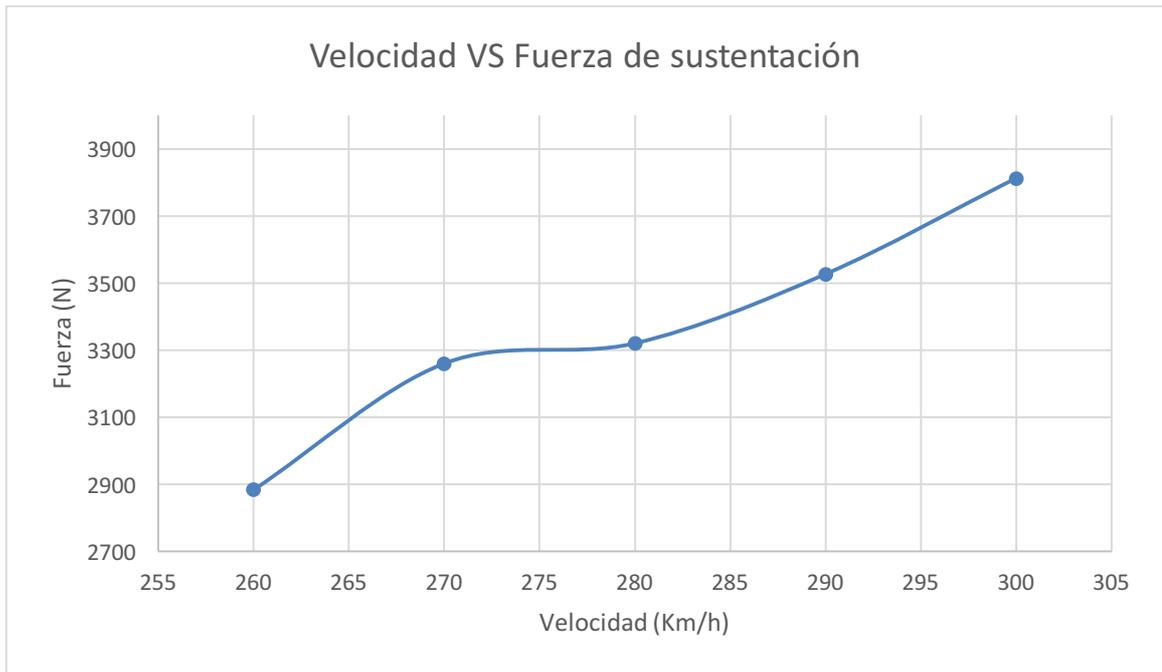


Figura 4-11 Gráfica Velocidad VS Fuerza de sustentación.

En cuanto a las fuerzas de resistencia al arrastre de la Tabla 4, se puede afirmar que son aproximadamente la mitad que las que figuran en el subapartado 4.2.3. Esto es debido a que se ha reducido considerablemente la superficie alar del flap superior respecto al flujo de aire incidente. Sin embargo, las fuerzas viscosas se mantienen en el mismo orden de magnitud.

Velocidad (Km/h)	Fuerzas de presión (N)	Fuerzas viscosas (N)	Fuerzas de resistencia (N)
260	351,4	14,8078	366,24
270	383,68	17,0354	400,72
280	402,28	16,6564	418,94
290	430,8	18,2088	449
300	471,04	19,5498	490,6

Tabla 4 Fuerzas de resistencia al avance.

Según la gráfica de la Figura 4-12, las fuerzas de resistencia al avance siguen una distribución lineal, llegando a multiplicarse estas por 1,3 veces en su subida desde los 260 Km/h hasta los 300 Km/h.

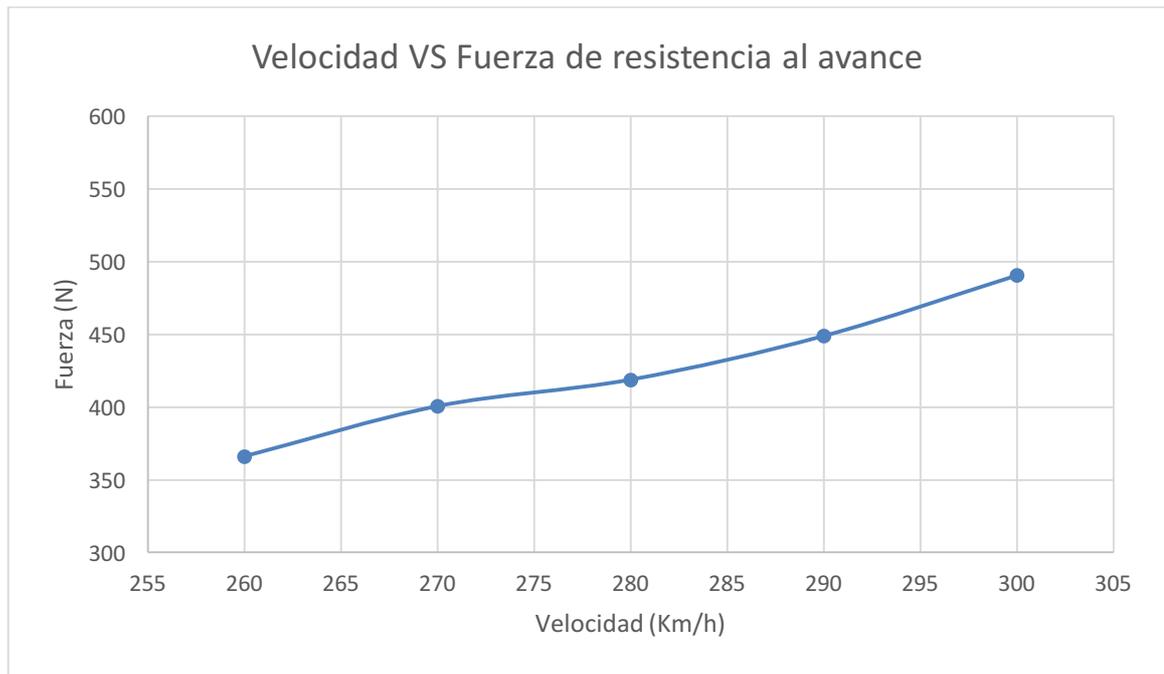


Figura 4-12 Gráfica Velocidad VS Fuerza de resistencia al avance.

4.4 Comparativa DRS desactivado y DRS activado

A continuación se va a llevar a cabo una comparativa en la que se analizarán todos los datos recopilados sobre fuerzas de sustentación y fuerzas de resistencia al avance en dos gráficas, para observar la diferencia que supone tener el DRS activado o desactivado. Además se realizará un estudio sobre la ganancia que supone la activación de este sistema en términos de velocidad, haciendo uso de la ecuación de resistencia al avance.

4.4.1 Análisis

En la primera gráfica se va a comentar los resultados obtenidos referentes al downforce y en la segunda, los obtenidos del drag. Como se puede observar en la gráfica de la Figura 4-13, durante el recorrido desde los 260 Km/h hasta los 280 Km/h, ambas fuerzas de sustentación para las dos configuraciones, tienen un valor similar, aunque siempre se encuentra ligeramente por encima la configuración con DRS desactivado. A partir de los 280 Km/h comienzan a abrirse distancia las fuerzas de ambos sistemas, siendo más suavizada la pendiente para el DRS activado y más pronunciada la correspondiente al DRS desactivado.

A la vista de este hecho, se puede afirmar que este sistema es efectivo a velocidades más cercanas a los 300 Km/h, como se comentó en el capítulo 4, llegando a liberarse una carga de unos 259 Newtons a los 290 Km/h, lo que supondría una menor carga de peso para el empuje que genera el motor del monoplaza.

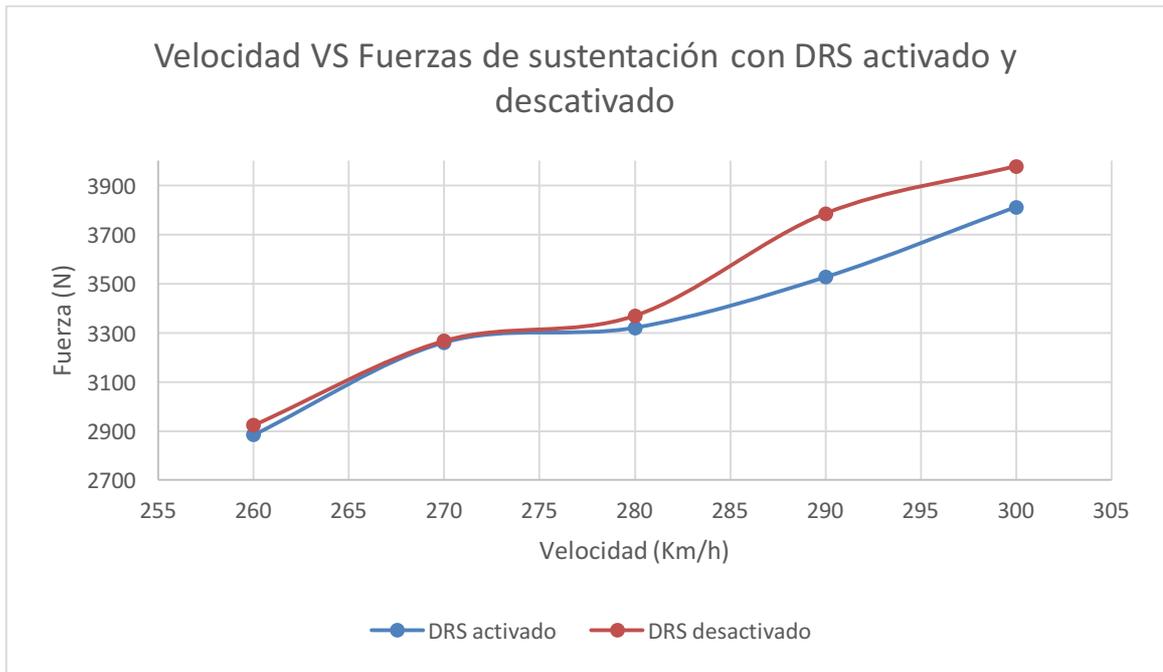


Figura 4-13 Gráfica Velocidad VS Fuerzas de sustentación con DRS activado y desactivado.

En cuanto a la gráfica de la Figura 4-14, se puede contemplar que ambas fuerzas, la correspondiente al DRS desactivado y al DRS activado, siguen un crecimiento aproximadamente lineal durante todo su recorrido, siendo la diferencia más notable a 300 Km/h, con una liberación de unos 465 Newtons de resistencia al avance. Esta reducción de resistencia es de vital importancia y determina la cantidad de velocidad que se gana con este sistema.

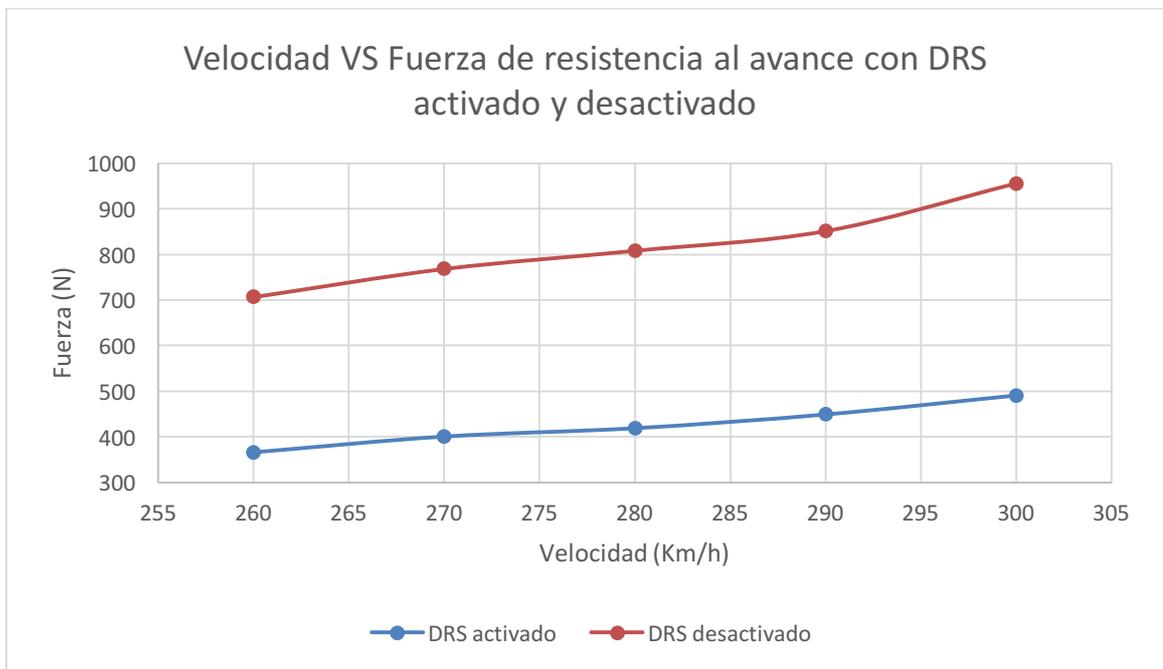


Figura 4-14 Gráfica Velocidad VS Fuerza de resistencia al avance con DRS activado y desactivado.

4.4.2 Ganancia de velocidad

Ya se ha demostrado en el anterior apartado la reducción sustancial de la resistencia al avance, debido a la reducción de superficie alar en contacto con el aire. Igualmente, se puede apreciar la ligera pérdida de carga aerodinámica debida al ángulo de posición del ala móvil. Esto se traduce en velocidad, debido a que el motor tiene que hacer el mismo empuje por construcción del mismo, pero con menos fuerzas que le impiden el avance.

En este apartado se va a calcular cuál es esa ganancia de velocidad. Para ello se recurre a la Ecuación 5 vista en el subapartado 2.3.2:

$$F_{Resistencia} = C_X \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A$$

Se particulariza para las condiciones de DRS activado y desactivado.

- (1) $F_{Resistencia_1} = C_{X_1} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_1$, para DRS desactivado.
- (2) $F_{Resistencia_1} - \Delta F_{Resistencia_{CFD}} = C_{X_2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_2$, para DRS activado.
- (3) $F_{Resistencia_1} = C_{X_2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{mejorada}^2 \cdot A_2$, para DRS activado.

Con la ecuación (1) se pretende calcular la fuerza aerodinámica de resistencia al avance sobre la totalidad del monoplaza. Con la ecuación (2) se calcula el nuevo C_X resultante de activar el DRS y por último en la ecuación (3) se calcula la velocidad mejorada.

La velocidad estará fijada en 300 Km/h (83,33 m/s), ya que este sistema, en la mayoría de los circuitos donde prima la velocidad, suele activarse a estas celeridades. La densidad en condiciones atmosféricas normales y a 15 °C de temperatura tiene un valor de 1,225 Kg/m³.

Las escuderías suelen ajustar el rendimiento aerodinámico del monoplaza en función del circuito, así pues, en circuitos de alta velocidad con largas rectas, se verán alerones muy descargados y con perfiles aerodinámicos muy simples con el fin de reducir la resistencia al avance. En este tipo de “set up” el coeficiente de arrastre (C_X) suele estar en torno a 0,7, por lo que se usará éste para los cálculos.

El área que se tiene que usar en la ecuación es el área frontal, así que se seguirá el método que se vio en el apartado 2.3.3, con el input de que se utilizará el programa de diseño Adobe Photoshop CC, ya que posee una potente herramienta para calcular superficies haciendo uso de la comparación.

Lo primero que tenemos que hacer es partir de una fotografía en la que se vea el monoplaza totalmente de frente, como la de la Figura 4-15.



Figura 4-15 Vista frontal del Red Bull Racing RB13. [25]

Luego con el software Adobe Photoshop CC, se utiliza una herramienta para quitar el fondo quedando como puede verse en la Figura 4-16



Figura 4-16 Vista frontal del Red Bull Racing RB13 sin fondo.

A continuación, se sombrea toda la imagen para que la herramienta pueda reconocer la silueta y además se añade un neumático que se tiene que escalar con la imagen como se aprecia en la Figura 4-17.

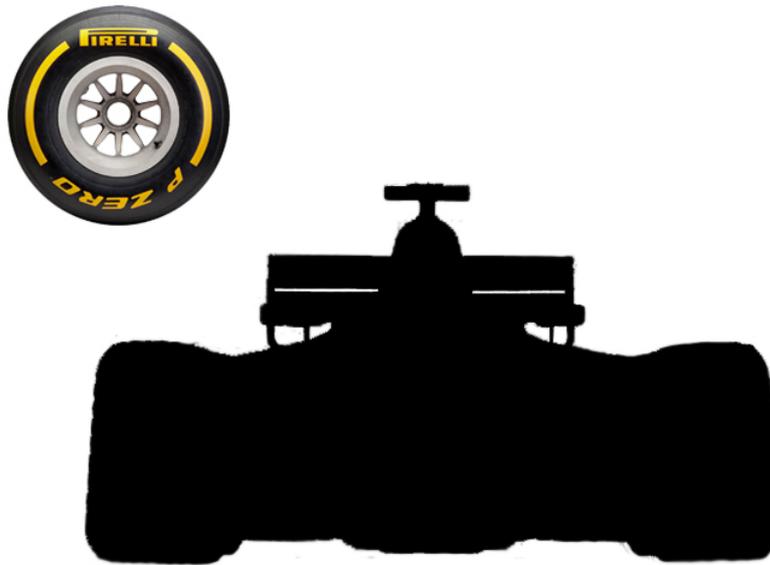


Figura 4-17 Vista frontal del Red Bull Racing RB13 sombreada y con referencia.

Se trata del neumático Pirelli P Zero de 670 mm de diámetro, y la información sobre éste es fácilmente accesible a través de su web. La herramienta de análisis con la que cuenta el programa se basa en la comparación entre una longitud lógica, en este caso la medida del diámetro de la rueda, y la longitud de los píxeles que abarca el diámetro de la rueda sobre la imagen. Se ha definido como unidad lógica el metro (m) para obtener los resultados directamente en m^2 .

Al ejecutar el análisis, entre muchos otros resultados, se obtiene el área de la figura sombreada, dando un valor de $1,561 m^2$. Esta superficie se corresponde con el área frontal con el DRS desactivado. Para calcular la superficie con el DRS activado no es necesario volver a repetir este procedimiento, para ello se usará el software Fluent.

Se carga primero la geometría con el sistema desactivado y con ayuda de una herramienta se calcula el área frontal proyectada sobre las alas. A continuación, se carga la geometría correspondiente al sistema activado y se vuelve a repetir el mismo procedimiento. Para el primer caso se obtiene una superficie de $0,1044 m^2$ y para el segundo, una superficie de $0,0764 m^2$. La diferencia de estas medidas ($0,028 m^2$) da como resultado el área frontal del hueco entre ambas alas, que deberá restarse a la medida que se obtuvo primeramente con el otro software. Finalmente el área frontal del monoplaza con el DRS activado queda $1,533 m^2$.

Volviendo a la ecuación (1) planteada para el DRS desactivado al principio de este subapartado, se procede a calcular la fuerza aerodinámica que tiene que vencer el motor.

Con todos los datos ya conocidos, queda:

$$F_{Resistencia_1} = 0,7 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 83,333333^2 \cdot 1,561 = 4647,7 N$$

A continuación en la ecuación (2), al reducirse la superficie frontal del alerón y consecuentemente la del monoplaza, tiene sentido que se reduzca la fuerza con la que el coche tiene que empujar, por lo tanto habrá que restar la diferencia de fuerzas de resistencia al avance entre el DRS desactivado y activado, con la fuerza de resistencia al avance de la totalidad del monoplaza con el DRS desactivado. En base a esta premisa, se despeja C_{x_2} , quedando lo siguiente:

$$4647,7 - 464,82 = C_{x_2} \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 83,333333^2 \cdot 1,533 \rightarrow C_{x_2} = 0,6415$$

En la ecuación (3) se introduce este coeficiente que se acaba de calcular y se usa la fuerza de resistencia al avance de la totalidad del monoplaza con el DRS desactivado, para ver cuánto se gana en velocidad, como si el motor tuviera que empujar con la misma fuerza pero con un coeficiente más reducido. Finalmente queda:

$$4647,7 = 0,6415 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot v_{mejorada}^2 \cdot 1,533 \rightarrow v_{mejorada} = 87,8415 \text{ m/s} = 316,23 \text{ Km/h}$$

Haciendo la diferencia entre esta velocidad (316,23 Km/h) y la inicial (300 Km/h), se concluye que con este sistema se obtiene una ganancia de velocidad de 16,23 Km/h extra.

Esta ganancia es muy importante, pero como ya se dijo en anteriores apartados, es aplicable solamente en recta. Su uso en una curva podría suponer una pérdida de adherencia en el tren trasero, debido a la pobre carga aerodinámica en esta zona en comparación con la del tren delantero, provocando sobreviraje en el monoplaza y causando un posible accidente. Sin embargo su uso en recta podría suponer la diferencia entre realizar un adelantamiento o recortar distancia al rival si se está dentro de las condiciones de uso.

4.5 Propuesta de mejora

En los anteriores apartados se ha visto y corroborado la ganancia de velocidad que suministra el DRS. El propósito de este apartado es proponer una alternativa al clásico sistema implantado según la normativa en la temporada del 2011. El ya conocido DRS funciona girando el flap superior un ángulo para que fuese paralelo al flap inferior y así reducir la superficie alar en contacto con el viento, con la correspondiente pérdida de carga aerodinámica y resistencia al avance. La idea de esta propuesta, es que el alerón reduzca esa superficie completamente. Este sistema en vez de usar un actuador para girar el flap superior, utilizaría otro tipo de mecanismo que permita a éste “escondarse” detrás del flap inferior. Al reducir completamente la superficie, se eliminaría casi todo el drag y consecuentemente aumentaría la ganancia de velocidad.

4.5.1 Análisis de presiones

En la Figura 4-18 se puede notar que ya no existen tantas zonas de color rojo como sucedía en el caso del DRS desactivado e incluso en el activado. Estas zonas anaranjadas y amarillas suponen una presión media y se pueden ver en ambas alas, por lo que la carga aerodinámica se ve reducida sustancialmente. En los endplates se puede ver que la presión apenas ha variado tampoco en este caso, tanto por el interior como por el exterior de estos.

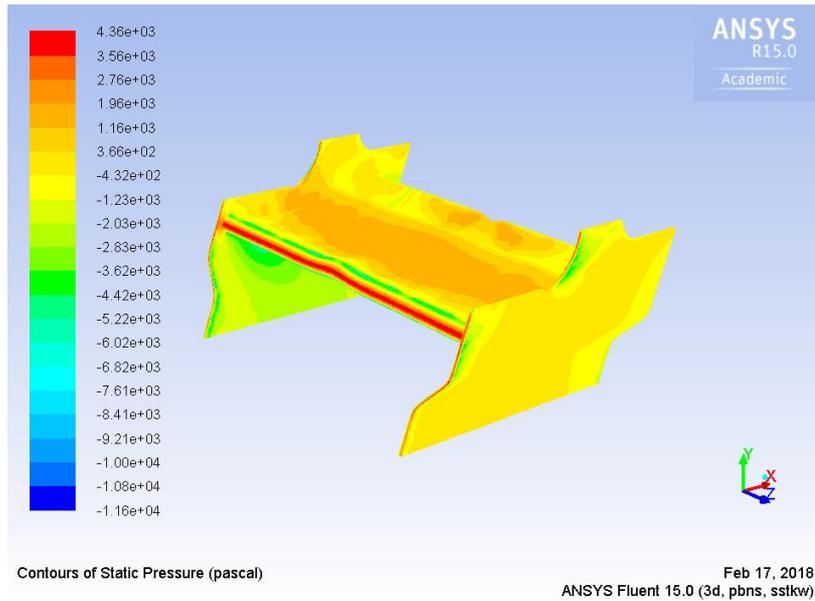


Figura 4-18 Contornos de presión en 3D a 300 Km/h. [Autoría propia]

En la vista de la Figura 4-19 se puede apreciar mucho mejor la reducción del downforce. A pesar de seguir existiendo una depresión en el extradós de ambos flaps, se puede observar claramente que en el intradós del flap móvil la presión es prácticamente la misma que la atmosférica, por lo que se ha conseguido que este no aporte apenas alguna cantidad de carga aerodinámica. Si se centra la atención en el flap fijo, se podrá observar que el punto de incidencia del flujo se encuentra ligeramente por debajo del borde de ataque, provocando una ligera depresión en el intradós, cerca de éste. Aun así, se genera la sobrepresión necesaria para que el alerón actúe correctamente.



Figura 4-19 Contornos de presión en 2D a 300 Km/h. [Autoría propia]

4.5.2 Análisis de flujo de aire

En la Figura 4-20 se puede observar que la escala de la leyenda es mucho mayor que en los casos anteriores, debido a que el flujo adquiere mucha más velocidad en algunas zonas del alerón. Primero, lo más destacable es la relevante velocidad que adquiere el flujo cuando circula por el extradós de ambas alas. Esto unido a que se ha producido un desprendimiento de la capa límite justo en la mitad del intradós del ala fija y en todo el intradós del ala móvil, provoca una situación en la que el flujo es

desordenado y de muy baja velocidad, lo que ocasiona que la carga aerodinámica se reduzca drásticamente, haciendo que esta configuración sea algo inestable.

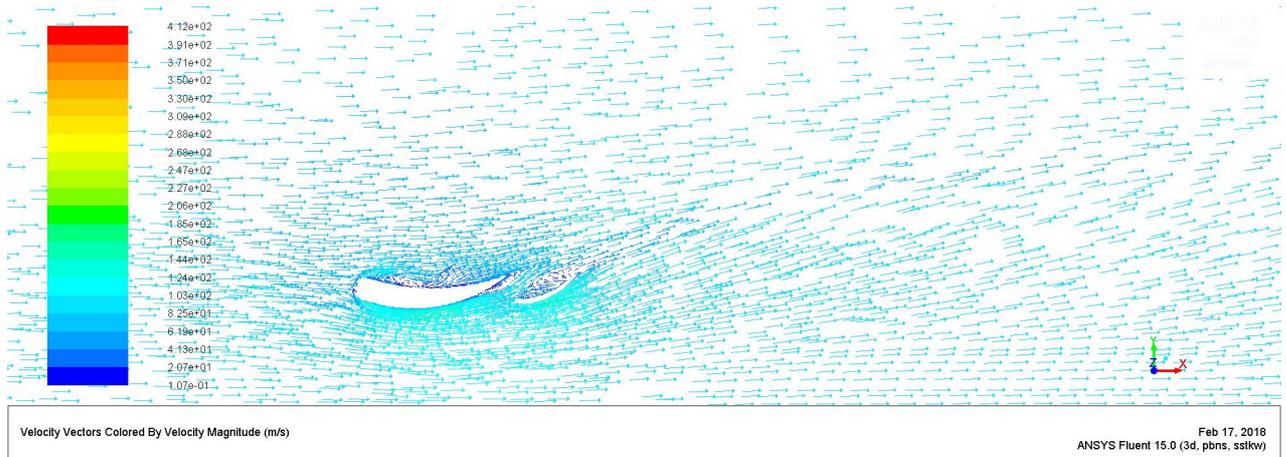


Figura 4-20 Vectores de velocidad en 2D a 300 Km/h. [Autoría propia]

4.5.3 Análisis de fuerzas

En la Tabla 5 puede notarse que las fuerzas de presión se han reducido considerablemente. Lo mismo pasa con las viscosas, que apenas son influyentes, debido al desprendimiento de la capa límite.

Velocidad (Km/h)	Fuerzas de presión (N)	Fuerzas viscosas (N)	Fuerzas de sustentación (N)
260	1365,28	0,0271	1365,31
270	1430,75	0,0509	1430,80
280	1373,01	0,0496	1373,06
290	1542,10	-0,0409	1542,06
300	1834,33	-0,1772	1834,15

Tabla 5 Fuerzas de sustentación

Observando la gráfica de la Figura 4-21, se puede apreciar la inestabilidad del flujo, sobre todo en las velocidades comprendidas entre 260 Km/h y 280 Km/h. A partir de esta última velocidad parece que las fuerzas siguen una subida constante, siguiendo como se veía en anteriores apartados, la misma proporcionalidad de multiplicarse la fuerza por 1,3 veces durante su subida, desde los 260 Km/h a los 300 Km/h.

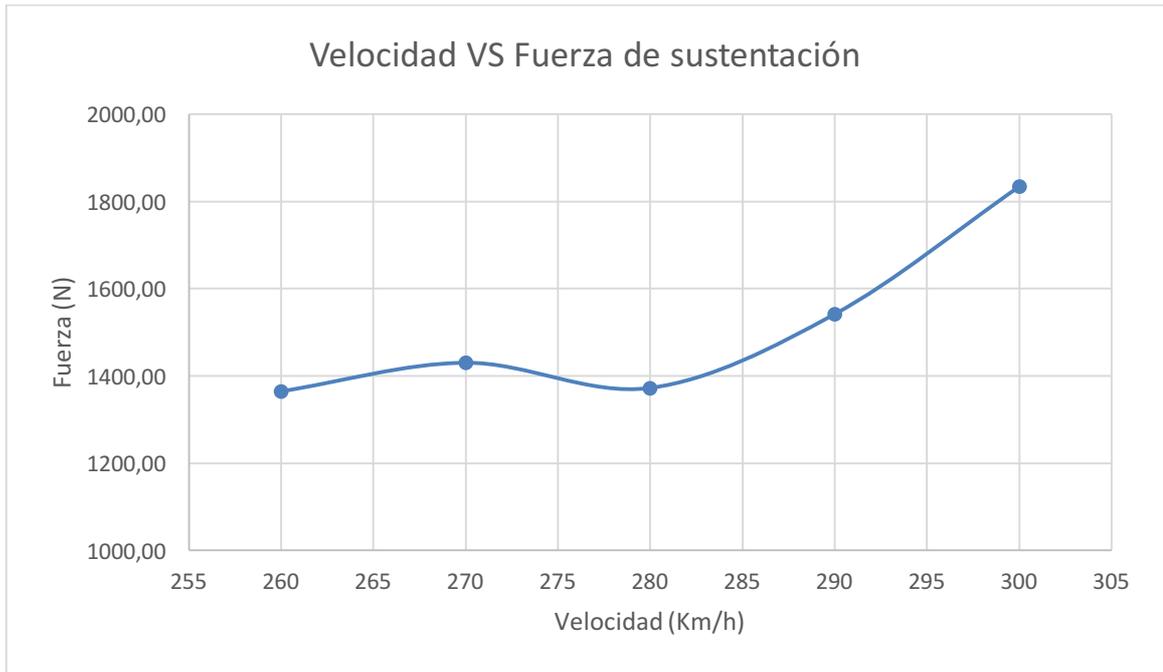


Figura 4-21 Gráfica Velocidad VS Fuerza de sustentación.

Si se observa la Tabla 6, se puede apreciar que se ha reducido considerablemente las fuerzas de presión, al haber eliminado el contacto directo del flujo de aire con el ala móvil. También las fuerzas viscosas se han reducido casi a la mitad, comparando estos datos con los del DRS activado del subapartado 4.3.3. Todo esto da lugar a unas fuerzas de resistencia al avance considerablemente bajas, que será determinante para la obtención de una mayor velocidad.

Velocidad (Km/h)	Fuerzas de presión (N)	Fuerzas viscosas (N)	Fuerzas de resistencia (N)
260	188,28	8,4712	196,75
270	203,84	8,9772	212,81
280	205,11	9,2569	214,37
290	180,98	10,7201	191,70
300	296,06	11,2963	307,36

Tabla 6 Fuerzas de resistencia al avance.

En la gráfica de la Figura 4-22 se puede apreciar como el flujo se vuelve más inestable entre los 280 Km/h y los 290 Km/h, luego vuelve a estabilizarse. Nótese que la fuerza se multiplica 1,4 veces en su subida desde los 260 Km/h hasta los 300 Km/h.

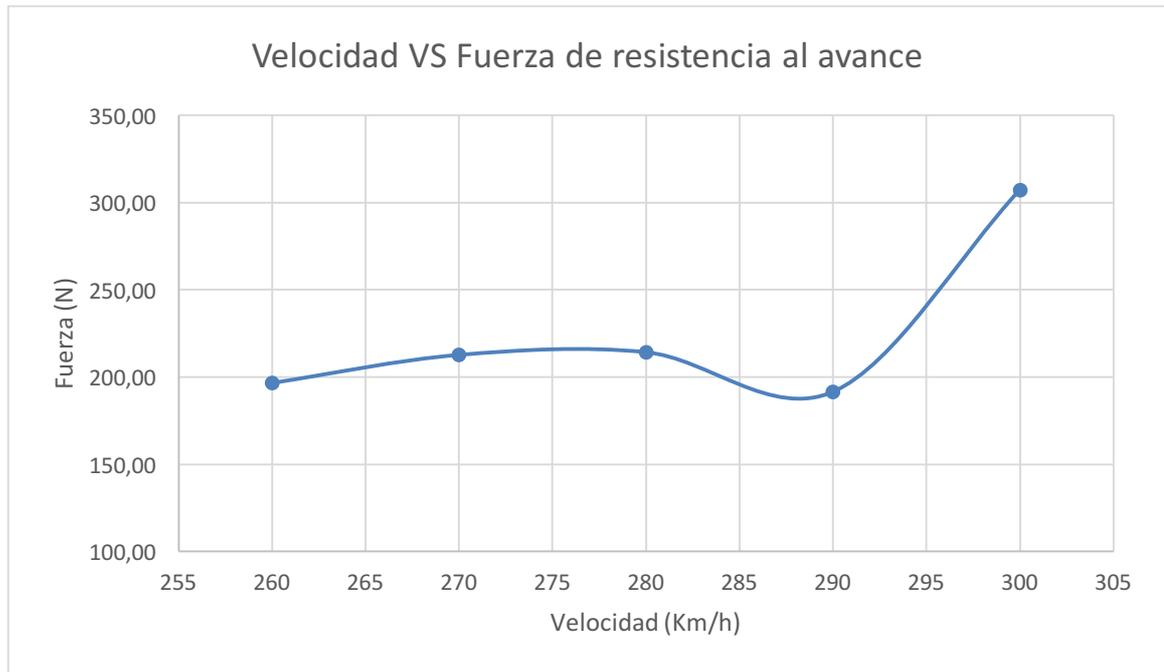


Figura 4-22 Gráfica Velocidad VS Fuerza de resistencia al avance.

4.6 Comparativa DRS desactivado, DRS activado y DRS activado mejorado

4.6.1 Análisis

Siguiendo el mismo procedimiento que en el apartado 4.4.1, se procede a comentar los resultados obtenidos que hacen referencia al downforce y al drag, representados en ambas gráficas de abajo. A primera vista se puede apreciar en la Figura 4-23, la enorme diferencia entre las fuerzas de sustentación producidas por el DRS activado mejorado y el DRS desactivado y activado. También se observa que todas las configuraciones siguen un patrón similar: una aumento de la fuerza desde los 260 Km/h hasta los 280 Km/h, luego una zona de transición, desde los 270 Km/h hasta los 280 Km/h en la que la fuerza fluctúa ligeramente, y por último un aumento de ésta hasta los 300 Km/h.

Nótese que para la velocidad determinante de este estudio (300 Km/h) existe una diferencia de 2144 Newtons entre el DRS desactivado y el DRS activado mejorado, lo que supone que la carga aerodinámica se reduce a la mitad, haciendo que el motor tenga que vencer mucha menos fuerza que antes.

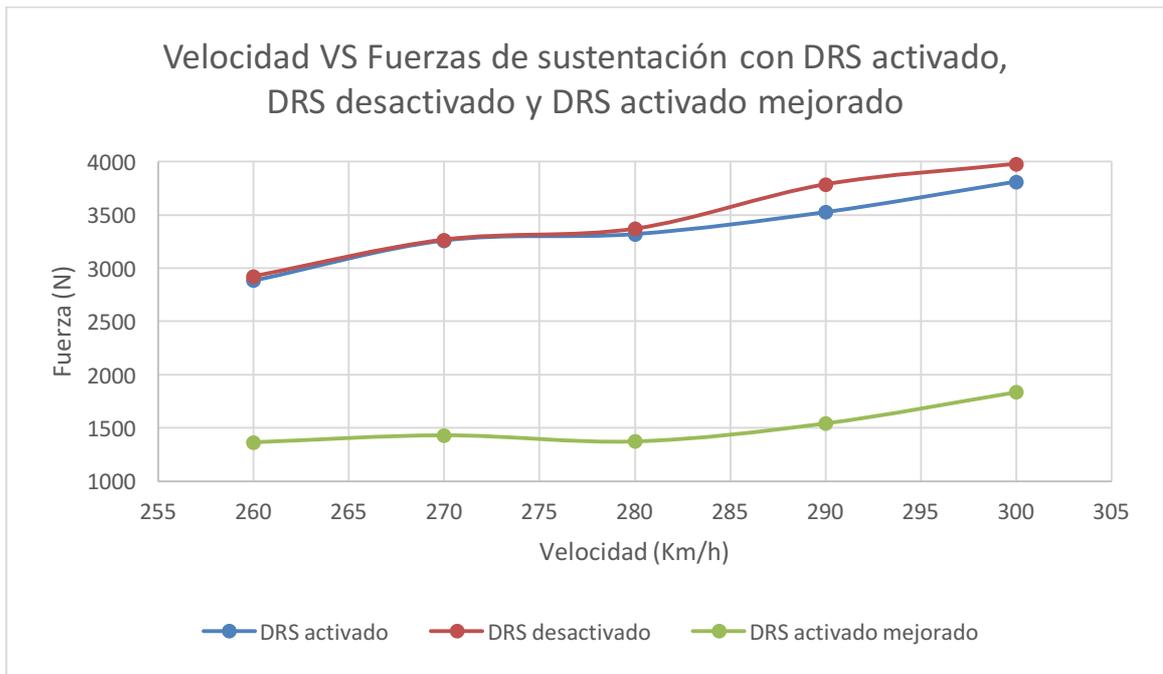


Figura 4-23 Gráfica Velocidad VS Fuerzas de sustentación con DRS activado, DRS desactivado y DRS activado mejorado.

En cuanto a las fuerzas de resistencia al avance, se puede observar en la gráfica de la Figura 4-24, que todas las configuraciones siguen una tendencia lineal desde los 260 Km/h hasta los 290 Km/h, para luego aumentar con pendiente más pronunciada hasta los 300 Km/h. A esta velocidad se produce una liberación de unos 648 Newtons, 183 más que con la configuración del DRS activado convencional.

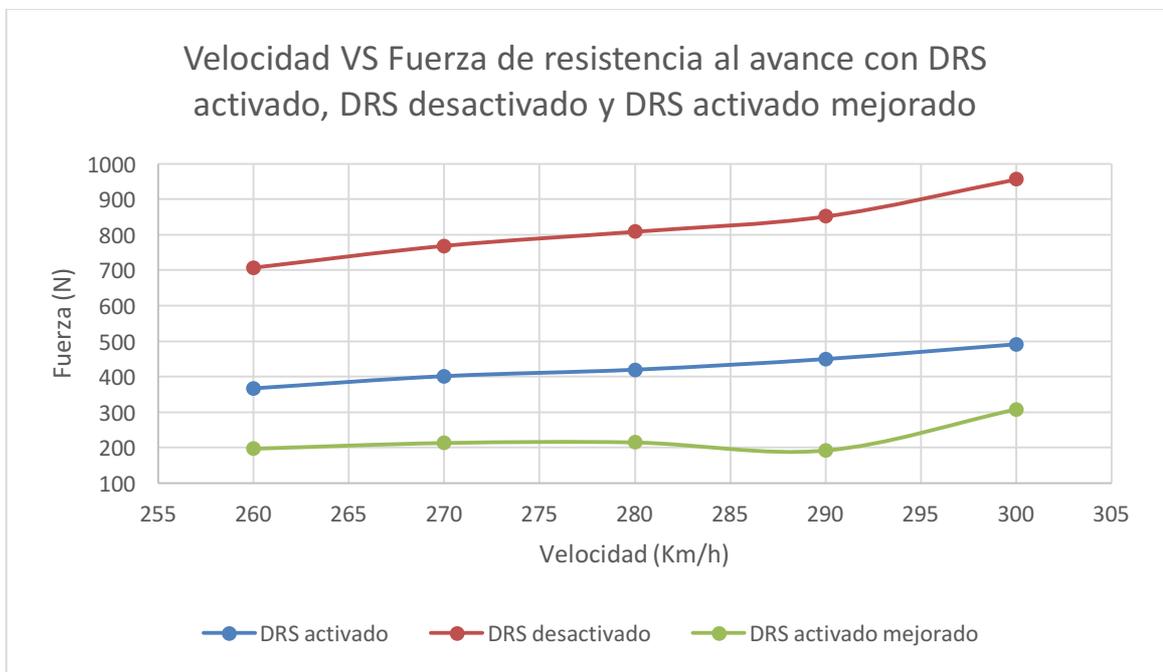


Figura 4-24 Gráfica Velocidad VS Fuerza de resistencia al avance con DRS activado, DRS desactivado y DRS activado mejorado

4.6.2 Ganancia de velocidad

Ya se ha visto la importancia de reducir la superficie alar al flujo de aire en movimiento, de forma parcial o total. Se han obtenido unas cifras que parecen muy buenas y a la vista está en el análisis comparativo. A continuación, siguiendo la metodología que se plasmó en el subapartado 4.4.2, se va a proceder a materializar los resultados obtenidos en los anteriores apartados, para obtener la ganancia de velocidad que se adquiere con la mejora propuesta.

Se recurre a la Ecuación 5 como base del cálculo:

$$F_{Resistencia} = C_X \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A$$

Al igual que se hizo en el 4.4.2, se particulariza la ecuación anterior para las condiciones de DRS desactivado y activado mejorado.

- (1) $F_{Resistencia_1} = C_{X_1} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_1$, para DRS desactivado.
- (2) $F_{Resistencia_1} - \Delta F_{Resistencia_{CFD}} = C_{X_2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_2$, para DRS activado mejorado.
- (3) $F_{Resistencia_1} = C_{X_2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{mejorada}^2 \cdot A_2$, para DRS activado mejorado.

Como datos se tienen:

- $C_X = 0,7$
- $\rho = 1,225 \text{ Kg/m}^3$
- $v = 83,33 \text{ m/s}$

En cuanto al área frontal del monoplaza para la condición de DRS activado mejorado, se calcula de manera análoga. Se tiene que el área frontal de éste con el DRS desactivado es $1,561 \text{ m}^2$ y el área frontal del alerón es $0,1044 \text{ m}^2$. Una vez cargado en Fluent el archivo con la geometría del DRS activado mejorado, con la herramienta adecuada se calcula el área proyectada sobre las alas, saliendo un valor de $0,0436 \text{ m}^2$. La diferencia entre el área frontal del alerón con el DRS desactivado y el área frontal del alerón con el DRS activado mejorado es de $0,0608 \text{ m}^2$. Este área es el hueco que hay que restar a la superficie frontal del monoplaza con el DRS desactivado, con esto, se obtiene finalmente un valor de $1,5002 \text{ m}^2$.

Con todos los datos ya conocidos y aplicando las mismas deducciones que se aplicaron en el subapartado 4.4.2, queda:

$$F_{Resistencia_1} = 0,7 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 83,333333^2 \cdot 1,561 = 4647,7 \text{ N}$$

$$4647,7 - 648,06 = C_{X_2} \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 83,333333^2 \cdot 1,5002 \rightarrow C_{X_2} = 0,6268$$

$$4647,7 = 0,6268 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot v_{mejorada}^2 \cdot 1,5002 \rightarrow v_{mejorada} = 89,831 \text{ m/s} = 323,39 \text{ Km/h}$$

Haciendo la diferencia entre esta velocidad ($323,39 \text{ Km/h}$) y la inicial (300 Km/h), se concluye que con este sistema se obtiene una ganancia de velocidad de $23,39 \text{ Km/h}$ extras, $7,16 \text{ Km/h}$ más que con el DRS convencional.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

En este trabajo se han expuesto y analizado las características aerodinámicas de los alerones utilizados en la Fórmula 1. Para llevarlo a cabo se partió de una geometría a la que se realizó una serie de simplificaciones para el posterior mallado de la misma. Una vez exportado al software de simulación, se realizaron los estudios oportunos para obtener un análisis completo del alerón y poder representar los resultados. Gracias a esto, se pudo realizar cálculos para hallar la ganancia de velocidad, a través de las ecuaciones aerodinámicas descritas en sus correspondientes apartados.

En este proyecto se han analizado distintos tipos de configuraciones aerodinámicas para un alerón trasero de un monoplaza de Fórmula 1, con el fin de conseguir la máxima velocidad en recta, intentando reducir el drag sin descuidar el downforce necesario para mantener el coche estable.

Se trabajaron con tres geometrías diferentes:

- Alerón con DRS desactivado.
- Alerón con DRS activado.
- Alerón con DRS activado mejorado.

Los análisis concluyeron que a medida que se va reduciendo la superficie alar expuesta al flujo de aire en movimiento, se reduce la resistencia al avance, pero consecuentemente esto acarrea también una pérdida de carga aerodinámica, factor limitante para el uso de esta configuración cuando el monoplaza circula por una curva.

Con la configuración de DRS desactivado se obtuvieron unos datos propios de cualquier alerón de Fórmula 1, unas fuerzas de sustentación considerablemente elevadas para obtener un buen agarre en las curvas con su correspondiente fuerza de resistencia al avance. Estos datos se corroboraban con las gráficas generadas sobre los contornos de presión y vectores de velocidad. A lo largo de la exposición de los resultados se ha hablado acerca del desprendimiento de la capa límite. Este efecto puede ser negativo para el alerón o no afectarle. Para este caso, no afectaba negativamente ya que al producirse cerca del borde de fuga no perturbaba las fuerzas generadas a lo largo de los flaps.

Una vez que se analizó el alerón sin modificaciones, se realizó el análisis sobre el alerón con el DRS activado. Como era de esperar, se obtuvieron fuerzas de sustentación menores, aun así, lo suficientemente adecuadas para no desestabilizar el tren trasero del monoplaza. Donde hubo un cambio significativo fue en las fuerzas de resistencia al avance, reduciéndose a algo más de la mitad. Esto fue debido a que se redujo considerablemente la superficie del ala móvil al flujo de aire. En cuanto a la capa límite, hubo un desprendimiento, pero a muy pequeña escala, apenas imperceptible para ambos

flaps, dejando atrás una estela muy uniforme. Cuando se realizó la comparativa se concluyó que con esta configuración se ganó 16,23 Km/h con respecto a la configuración del DRS desactivado.

En el caso anterior se demostró que reducir parcialmente la superficie alar en contacto con el viento es una buena medida para ganar celeridad. En esta última configuración, la idea surgió de este principio. Si reduciendo parcialmente la superficie se ganaba velocidad, entonces reduciendo casi por completo, se ganará aún más velocidad independientemente de lo que ocurra con la carga aerodinámica. Al realizar el análisis se vio que se había reducido notablemente las presiones sobre el intradós de los dos flaps. Además, se produjo una separación de la capa límite sobre la superficie de estos, provocando un flujo desordenado y de muy baja velocidad, provocando esta gran pérdida de carga aerodinámica, que podría afectar negativamente a la estabilidad del monoplaça, sin embargo, cuando el flujo abandona la geometría se obtiene una estela limpia y uniforme. Por otra parte, se obtuvo una amplia reducción de la fuerza de resistencia al avance, obteniéndose un valor de un tercio de la fuerza original correspondiente al DRS desactivado. En la comparativa, se obtuvo una ganancia de velocidad de 23,39 Km/h, lo que supone un aumento de 7,16 Km/h respecto al sistema convencional.

Finalmente se puede concluir, que los dos objetivos generales, de vital transcendencia para este trabajo, como son el estudio analítico de las geometrías y la propuesta de una mejora al alerón, se han llevado a cabo correctamente en tiempo y forma.

En cuanto a los objetivos específicos como la obtención de una geometría que fuera lo más fiel al alerón de la realidad, la simplificación y modificación de las geometrías, el mallado de éstas para su posterior análisis, la recopilación de datos para su presentación y la determinación de la ganancia de velocidad de ambos sistemas, se han realizado con éxito.

5.2 Líneas futuras

Al principio de este trabajo se comentaba que los principios de la aerodinámica, se rigen por unas ecuaciones complejas que dificultan la resolución de éstas mediante métodos analíticos, teniendo que resolverlo de forma aproximada. Esta resolución podía hacerse bien mediante métodos experimentales, como puede ser un túnel de viento, o bien mediante métodos de simulación como los softwares de CFD.

Este proyecto se realizó enteramente con CFD, sin embargo, para mejorar este TFG, podría haberse hecho también con la tecnología de un túnel de viento. En España el único centro que alquila los servicios de un túnel de viento se encuentra en el Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, situado en Santa Cruz de Tenerife. Éste alquila su túnel de viento por horas, ofreciendo toda la instrumentación disponible y un técnico que se encarga de la operación del túnel. Previamente es necesario un modelo físico del alerón que podría realizarse con la tecnología de impresión en 3D, no siendo necesariamente a escala real. Esta opción, sin embargo, es costosa y no es de la índole de este proyecto, más bien estaría a la altura de una tesis doctoral de la que podría partir como base de este proyecto, para así llegar a un análisis más exacto con ambos métodos de resolución.

Durante el desarrollo de este trabajo se ha hablado acerca de los efectos aerodinámicos sobre el alerón, ya que el ámbito de este proyecto es íntegramente aerodinámico. Sin embargo, el sistema que posibilita el movimiento del ala móvil ha pasado desapercibido, ya que no era materia a analizar de este proyecto. Una propuesta para ampliar este TFG, sería diseñar un mecanismo actuador, que posibilita el movimiento del flap móvil, para pasar de su posición original a la posición que figura en la mejora propuesta. Esta proposición consistiría en reestructurar totalmente el mecanismo convencional del DRS, ya que este actuador sólo se limitaba a rotar el flap, pero con la mejora de DRS propuesta, es necesario trasladar el flap hasta la posición adecuada. Partir del actuador actual, quizás sea algo complicado, por lo que lo más óptimo sería hacer un sistema de raíles sobre las derivas

laterales de manera que afecte lo mínimo posible a la aerodinámica y posibilite llegar al flap hasta esa posición.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. Fraija B., «Estudio de la aerodinámica en los vehículos,» 2006. [En línea]. Available: <http://www.redalyc.org/pdf/4962/496251108011.pdf>.
- [2] I. Prada y Nogueira, «Papel de la aerodinámica en el diseño de los automóviles convencionales,» 2005. [En línea]. Available: https://www.icaei.es/contenidos/publicaciones/anales_get.php?id=1497.
- [3] Autoproyecto News, «La aerodinámica y el túnel de viento,» 2013. [En línea]. Available: <http://autoproyecto.com/2013/06/la-aerodinamica-y-el-tunel-del-viento.html>.
- [4] Redacción, «F1 al día,» 20 11 2010. [En línea]. Available: <http://www.flaldia.com/10650/tuneles-de-viento-i/>.
- [5] Universidad de La Rioja, «Dinámica de Fluidos Computacional,» [En línea]. Available: <http://www.unirioja.es/cu/manuruiz/simulacion%20que%20es%20cfid.shtml>.
- [6] J. Sánchez Vázquez, «Capítulo 3,» de *Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)*, pp. 65-66.
- [7] Taller Virtual, «Actualidad Motor,» 2012. [En línea]. Available: <https://www.actualidadmotor.com/para-que-sirven-los-alerones-de-los-coches/>.
- [8] R. Gozalbo, «secretosf1.wordpress.com,» 15 3 2010. [En línea]. Available: <https://secretosf1.wordpress.com/2010/03/15/los-alerones-principios-basicos/>.
- [9] F. Chuvieco, «vavel.com,» 17 9 2015. [En línea]. Available: <https://www.vavel.com/es/formula1/2015/09/17/541424-descubre-el-gran-premio-de-singapur-de-formula-1-2015.html>.
- [10] Sutton Images, «motorsport.com,» 6 9 2017. [En línea]. Available: <https://www.motorsport.com/f1/photo/main-gallery/red-bull-racing-rb13-rear-wing-detail-13109514/>.
- [11] fl-club.es, «Biografía de Michael May,» fl-club.es, [En línea]. Available: <https://www.fl-club.es/pilotos-fl/suizos/michael-may/https://www.fl-club.es/pilotos-fl/suizos/michael-may/>.

- [12] D. Simanaitis, «simanaitissays.com,» 2015. [En línea]. Available: <https://simanaitissays.com/2015/07/26/michael-mays-marvelous-idea/>.
- [13] conrderacing.com, «Aerodinámica: Historia en competición,» conrderacing.com, [En línea]. Available: <http://www.conrderacing.com/2015/03/aerodinamica-historia-en-competicion-ii.html>.
- [14] D. López, «Chaparral 2E,» historiadelautomovilismo.es, 8 8 2016. [En línea]. Available: <http://www.historiadelautomovilismo.es/chaparral-2e/>.
- [15] D. López, «Chaparral 2J,» historiadelautomovilismo.es, 17 10 2016. [En línea]. Available: <http://www.historiadelautomovilismo.es/chaparral-2j/>.
- [16] R. M. Recio, «tecnicaformula1.com,» [En línea]. Available: <http://tecnicaformula1.com/el-efecto-suelo-propuesto-como-reforma-para-la-f1-de-2017/>.
- [17] I. Empanan, «Lotus 78: El F1 más influyente de la historia,» formulaf1.es, 2012. [En línea]. Available: <https://www.formulaf1.es/16542/lotus-78-el-f1-mas-influyente-de-la-historia/>.
- [18] P. Santos, «soymotor.com,» 12 11 2013. [En línea]. Available: <http://soymotor.com/articulos/la-tecnica-f1-tu-alcance-repasamos-movido-ultimos-anos-escapes-difusores-92363>.
- [19] Redacción, «F1 al día,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.f1aldia.com/12578/el-difusor-soplado/>.
- [20] S. McBeath, Aerodinámica del automóvil de competición.
- [21] A. Breann, «1997 Benetton B197 F1 Judd V10 Sound,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.dailymotion.com/video/x3qwjj5>.
- [22] Educar Chile, «educarchile.cl,» [En línea]. Available: <http://www.educarchile.cl/ech/pro/app/detalle?id=133173>.
- [23] Centro Universitario de la defensa, «Apuntes de Mecánica de Fluidos,» 2015.
- [24] Ansys, «Ansys.com,» [En línea]. Available: <https://www.ansys.com>.
- [25] Motorsport, «motorsport.com,» 2017. [En línea]. Available: <https://lat.motorsport.com/f1/news/galeria-tecnica-la-actualizacion-del-red-bull-rb13-durante-2017-991323/>.
- [26] W. Melissen, «ultimatecarpage.com,» 27 7 2015. [En línea]. Available: <http://www.ultimatecarpage.com/car/304/Mazda-787B.html>.
- [27] H. Valverde, «periodismodelmotor.com,» 30 12 2014. [En línea]. Available: <https://periodismodelmotor.com/opel-calibra-historia/80467/opel-calibra-v6-dtm-1994/>.

ANEXO I: RESULTADOS DE FUERZAS

El objeto del siguiente anexo es servir como fuente original de los datos que se han usado en el apartado 4. A continuación, se van a exponer primero las fuerzas correspondientes al DRS desactivado, luego las del DRS activado y por último las del DRS activado mejorado. Dentro de cada apartado se dan los resultados desde los 260 Km/h hasta los 300 Km/h, exponiendo primero los valores correspondientes a las fuerzas en el eje x, seguidas de las fuerzas en el eje y. En las columnas, de izquierda a derecha, se puede leer: fuerzas de presión, viscosas y la suma de ambas. En las filas, de arriba hacia abajo, se puede leer: fuerzas sobre el alerón fijo, alerón móvil y la suma de ambas.

DRS desactivado

- Resultados para 260 Km/h:

Forces - Direction Vector (1 0 0)

	Forces (n)		
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	34.329037	4.7181606	39.047197
aleron_movil	312.47342	1.7354677	314.20889
-----	-----	-----	-----
Net	346.80246	6.4536283	353.25608

Forces - Direction Vector (0 -1 0)

	Forces (n)		
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	1069.0406	0.47517332	1069.5158
aleron_movil	393.5242	-1.2096632	392.31454
-----	-----	-----	-----
Net	1462.5648	-0.73448983	1461.8304

- Resultados para 270 Km/h:

Forces - Direction Vector (1 0 0)

	Forces (n)		
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	36.048527	5.1649895	41.213516
aleron_movil	340.95734	1.8677185	342.82505
-----	-----	-----	-----
Net	377.00586	7.0327079	384.03857

Forces - Direction Vector (0 -1 0)

Zone	Forces (n)		
	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	1174.2458	0.51459169	1174.7604
aleron_movil	430.01096	-1.291447	428.71951
-----	-----	-----	-----
Net	1634.2568	-0.77685535	1633.48

- Resultados para 280 Km/h:

Forces - Direction Vector (1 0 0)

Zone	Forces (n)		
	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	38.878311	5.4194932	44.297804
aleron_movil	357.69144	1.9627149	359.65415
-----	-----	-----	-----
Net	396.56975	7.3822081	403.95196

Forces - Direction Vector (0 -1 0)

Zone	Forces (n)		
	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	1234.4836	0.53135037	1235.015
aleron_movil	450.96582	-1.3665171	449.5993
-----	-----	-----	-----
Net	1685.4495	-0.83516669	1684.6143

- Resultados para 290 Km/h:

Forces - Direction Vector (1 0 0)

Zone	Forces (n)		
	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	33.150139	5.9518766	39.102015
aleron_movil	384.30872	2.0695271	386.37824
-----	-----	-----	-----
Net	417.45885	8.0214038	425.48026

Forces - Direction Vector (0 -1 0)

	Forces (n)		
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	1408.1796	0.66893667	1408.8485
aleron_movil	485.41452	-1.4280708	483.98645
-----	-----	-----	-----
Net	1893.5941	-0.75913411	1892.835

- Resultados para 300 Km/h:

Forces - Direction Vector (1 0 0)

	Forces (n)		
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	48.026192	6.3463836	54.372575
aleron_movil	421.07977	2.2602723	423.34005
-----	-----	-----	-----
Net	469.10596	8.6066558	477.71262

Forces - Direction Vector (0 -1 0)

	Forces (n)		
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	1456.465	0.5978272	1457.0628
aleron_movil	533.70581	-1.5801997	532.12561
-----	-----	-----	-----
Net	1990.1708	-0.98237252	1989.1884

DRS activado

- Fuerzas para 260 Km/h:

Forces - Direction Vector (1 0 0)

Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	66.887054	5.6698742	72.556929
aleron_movil	108.83243	1.7339827	110.56641
-----	-----	-----	-----
Net	175.71948	7.4038569	183.12334

Forces - Direction Vector (0 -1 0)

Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	1097.9325	0.21521237	1098.1477
aleron_movil	344.99219	-0.49841639	344.49377
-----	-----	-----	-----
Net	1442.9247	-0.28320402	1442.6415

- Resultados para 270 Km/h:

Forces - Direction Vector (1 0 0)

Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	67.310745	6.5434775	73.854223
aleron_movil	124.53105	1.974254	126.50531
-----	-----	-----	-----
Net	191.8418	8.5177315	200.35953

Forces - Direction Vector (0 -1 0)

Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	1215.368	0.16729058	1215.5353
aleron_movil	415.46747	-0.54914522	414.91832
-----	-----	-----	-----
Net	1630.8355	-0.38185464	1630.4537

- Resultados para 280 Km/h:

Forces - Direction Vector (1 0 0)

Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	77.958969	6.422605	84.381574
aleron_movil	123.18213	1.9055725	125.0877
Net	201.1411	8.3281776	209.46928

Forces - Direction Vector (0 -1 0)

Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	1262.9578	0.22917983	1263.1869
aleron_movil	397.80447	-0.54183298	397.26264
Net	1660.7622	-0.31265315	1660.4496

- Resultados para 290 Km/h:

Forces - Direction Vector (1 0 0)

Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	77.958969	6.422605	84.381574
aleron_movil	123.18213	1.9055725	125.0877
Net	201.1411	8.3281776	209.46928

Forces - Direction Vector (0 -1 0)

Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	1262.9578	0.22917983	1263.1869
aleron_movil	397.80447	-0.54183298	397.26264
Net	1660.7622	-0.31265315	1660.4496

- Resultados para 300 Km/h:

Forces - Direction Vector (1 0 0)

Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	77.958969	6.422605	84.381574
aleron_movil	123.18213	1.9055725	125.0877
-----	-----	-----	-----
Net	201.1411	8.3281776	209.46928

Forces - Direction Vector (0 -1 0)

Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	1262.9578	0.22917983	1263.1869
aleron_movil	397.80447	-0.54183298	397.26264
-----	-----	-----	-----
Net	1660.7622	-0.31265315	1660.4496

DRS activado mejorado

- Fuerzas para 260 Km/h:

Forces - Direction Vector (1 0 0)

Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	40.867523	3.4843163	44.35184
aleron_movil:010	53.270283	0.75126791	54.021551

Net	94.137806	4.2355843	98.37339

Forces - Direction Vector (0 -1 0)

Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	549.32404	0.18292591	549.50696
aleron_movil:010	133.3157	-0.16936165	133.14634

Net	682.63974	0.013564259	682.6533

- Fuerzas para 270 Km/h:

Forces - Direction Vector (1 0 0)

Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	49.480579	3.6828094	53.163389
aleron_movil:010	52.436932	0.80579656	53.242728

Net	101.91751	4.4886059	106.40612

Forces - Direction Vector (0 -1 0)

Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	582.92883	0.19220456	583.12104
aleron_movil:010	132.44666	-0.16675128	132.2799

Net	715.37549	0.025453284	715.40094

- Fuerzas para 280 Km/h:

Forces - Direction Vector (1 0 0)

Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	49.645786	3.8321033	53.47789
aleron_movil:010	52.909363	0.79633296	53.705696
-----	-----	-----	-----
Net	102.55515	4.6284362	107.18359

Forces - Direction Vector (0 -1 0)

Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	562.76105	0.17152168	562.93257
aleron_movil:010	123.74426	-0.14671409	123.59755
-----	-----	-----	-----
Net	686.50531	0.024807587	686.53012

- Fuerzas para 290 Km/h:

Forces - Direction Vector (1 0 0)

Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	51.287857	4.1454878	55.433345
aleron_movil:010	39.203629	1.2145587	40.418187
-----	-----	-----	-----
Net	90.491486	5.3600465	95.851532

Forces - Direction Vector (0 -1 0)

Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	633.72888	0.20179561	633.93068
aleron_movil:010	137.32155	-0.22223549	137.09931
-----	-----	-----	-----
Net	771.05043	-0.020439878	771.02999

- Fuerzas para 300 Km/h:

Forces - Direction Vector (1 0 0)

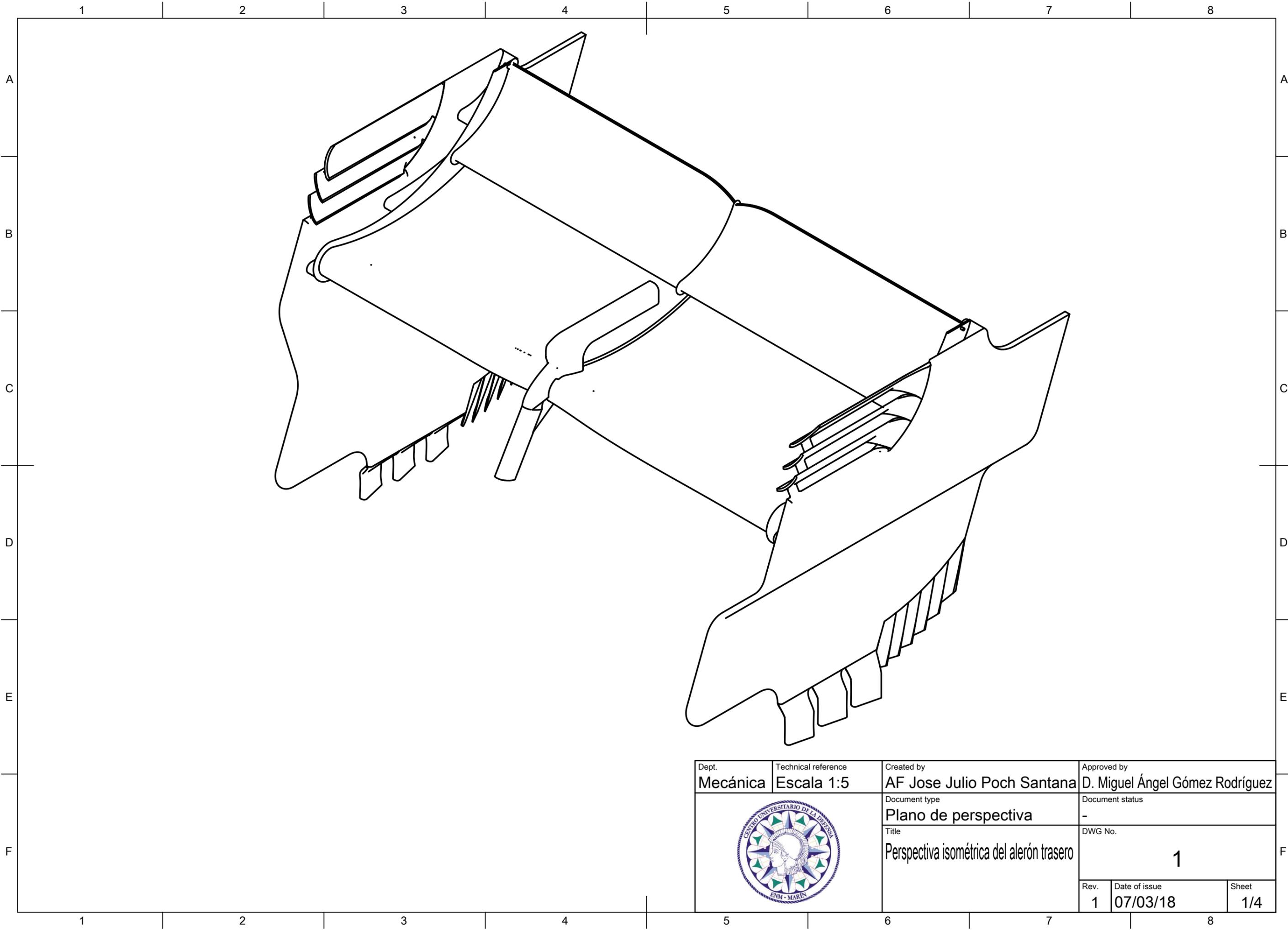
Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	62.87883	4.5729671	67.451797
aleron_movil:010	85.151642	1.0751731	86.226815
Net	148.03047	5.6481402	153.67861

Forces - Direction Vector (0 -1 0)

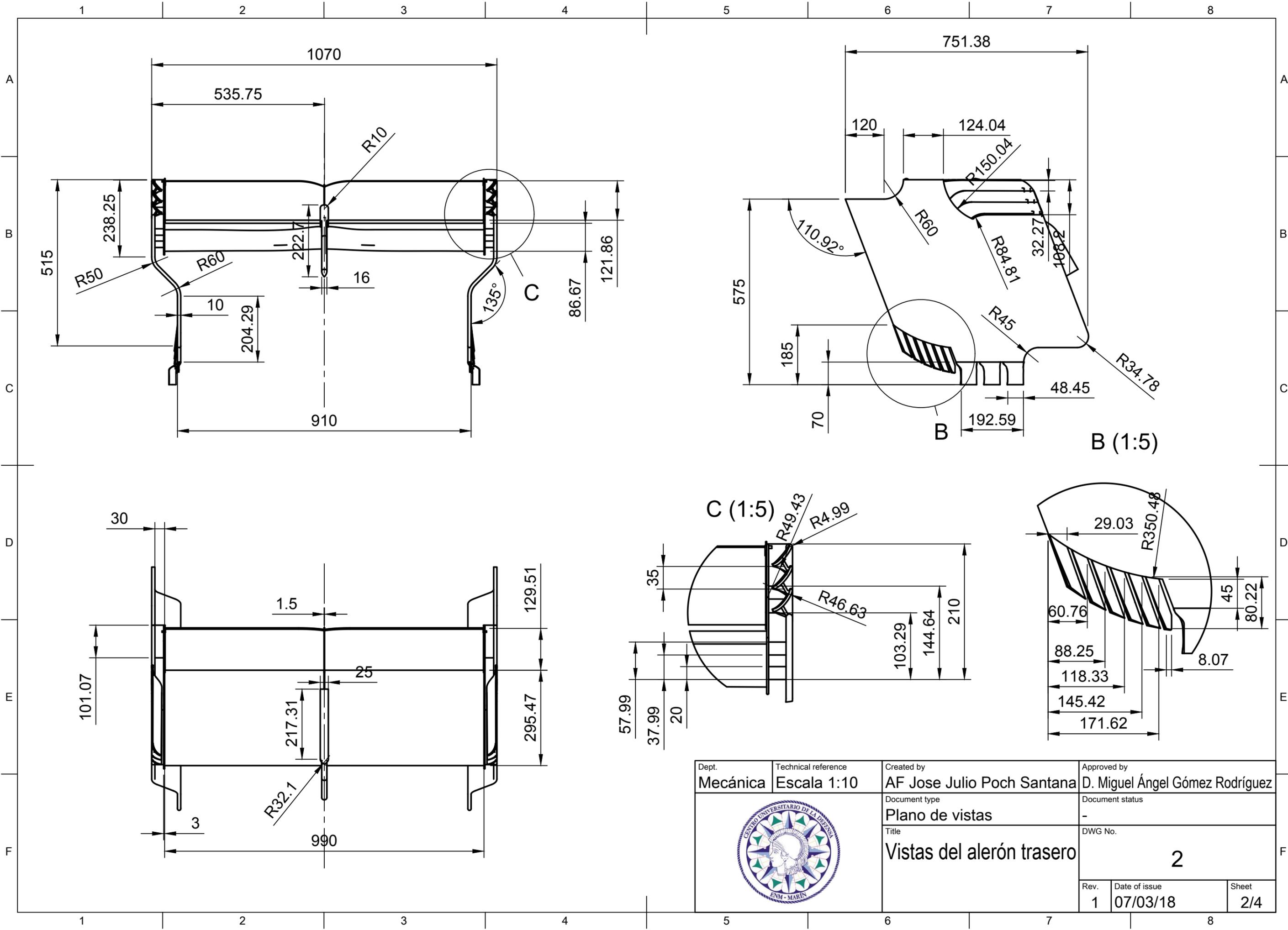
Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron_fijo	726.67273	0.21165553	726.88439
aleron_movil:010	190.48999	-0.30023506	190.18976
Net	917.16272	-0.088579535	917.07414

ANEXO II: PLANOS

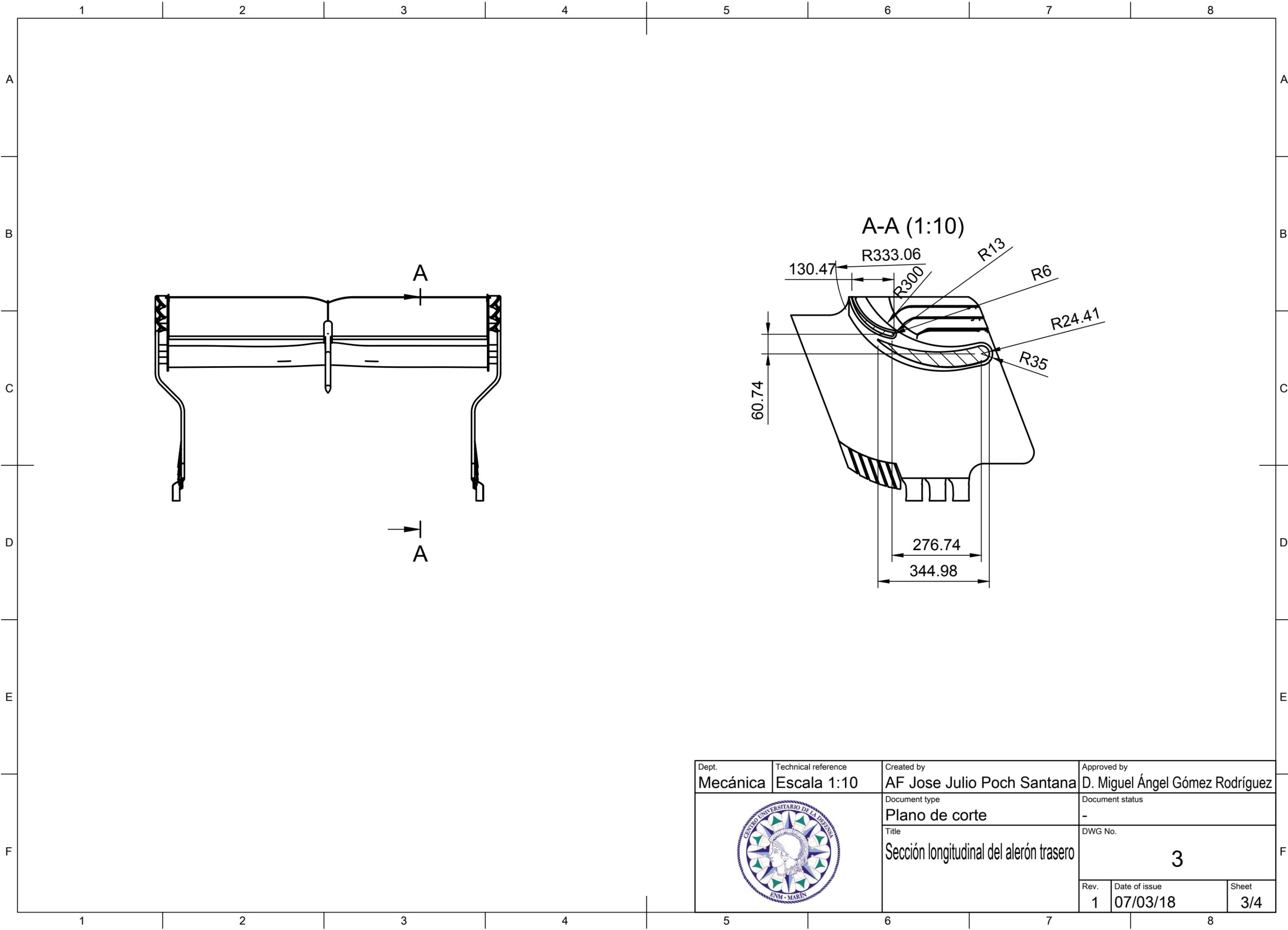
El objeto de este anexo es facilitar los planos para obtener una visión más detallada del alerón sobre el que se ha trabajado y realizado las correspondientes modificaciones.



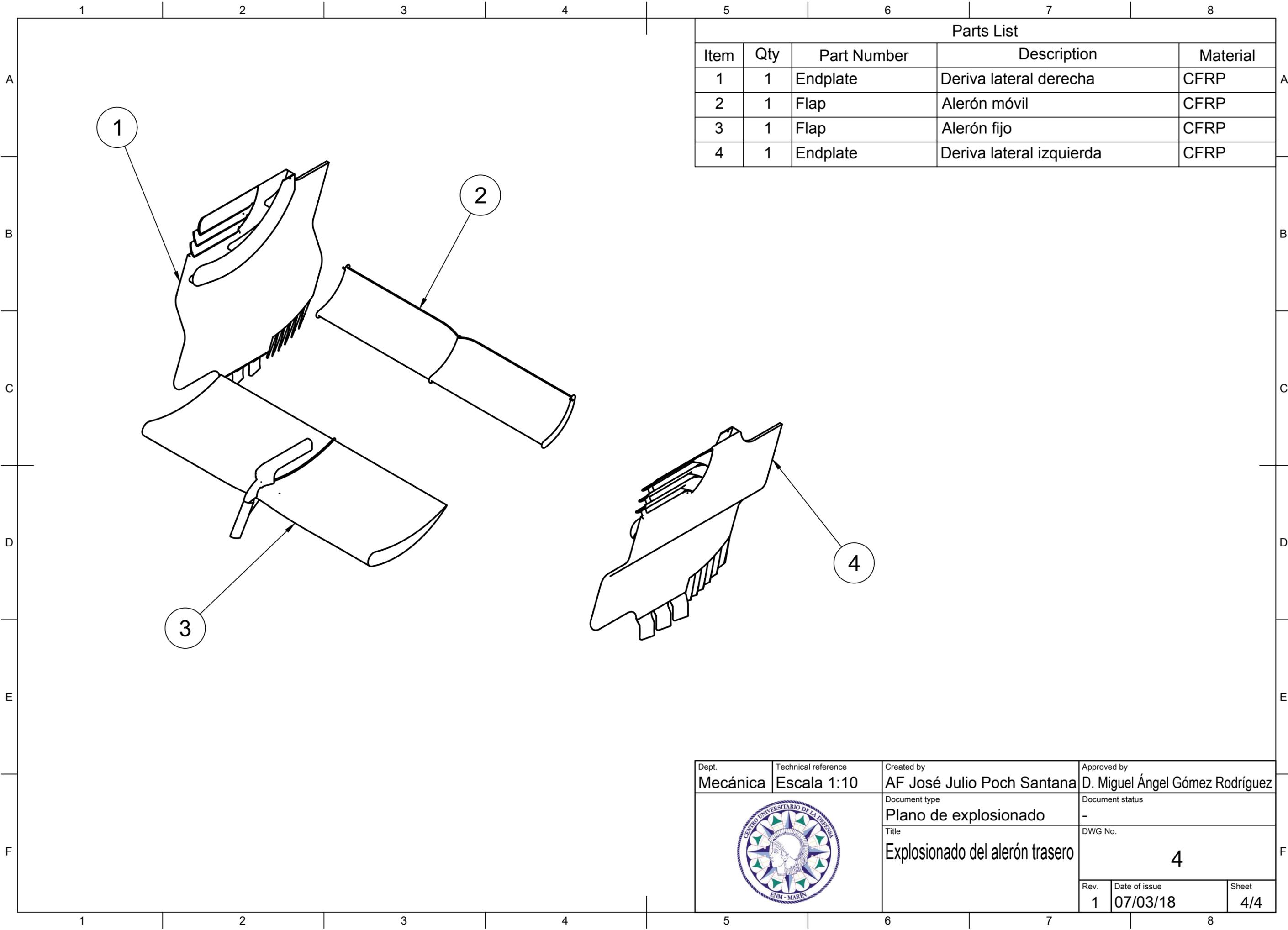
Dept. Mecánica	Technical reference Escala 1:5	Created by AF Jose Julio Poch Santana	Approved by D. Miguel Ángel Gómez Rodríguez	
		Document type Plano de perspectiva	Document status -	
		Title Perspectiva isométrica del alerón trasero	DWG No. 1	
		Rev. 1	Date of issue 07/03/18	Sheet 1/4



Dept. Mecánica	Technical reference Escala 1:10	Created by AF Jose Julio Poch Santana	Approved by D. Miguel Ángel Gómez Rodríguez
		Document type Plano de vistas	Document status -
		Title Vistas del alerón trasero	DWG No. 2
Rev. 1	Date of issue 07/03/18	Sheet 2/4	



Dept. Mecánica	Technical reference Escala 1:10	Created by AF Jose Julio Poch Santana	Approved by D. Miguel Ángel Gómez Rodríguez
		Document type Plano de corte	Document status -
		Title Sección longitudinal del alerón trasero	
		3	
Rev. 1	Date of issue 07/03/18	Sheet 3/4	



Parts List				
Item	Qty	Part Number	Description	Material
1	1	Endplate	Deriva lateral derecha	CFRP
2	1	Flap	Alerón móvil	CFRP
3	1	Flap	Alerón fijo	CFRP
4	1	Endplate	Deriva lateral izquierda	CFRP

Dept. Mecánica	Technical reference Escala 1:10	Created by AF José Julio Poch Santana	Approved by D. Miguel Ángel Gómez Rodríguez
		Document type Plano de explosionado	Document status -
		Title Explosionado del alerón trasero	
Rev. 1	Date of issue 07/03/18	Sheet 4/4	