



M A D R I D

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
I.C.A.I.

PROYECTO FIN DE MÁSTER

**Timón aerodinámico para automoción**

AUTOR: Ismael Humbrías Moracia

DIRECTOR: Jesús Ramón Jiménez Octavio

MADRID

Enero 2018

Máster Universitario en  
Ingeniería Industrial.  
(MII)



**AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO.**

**1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.**

El autor D. Ismael Humbrías Moracia, **DECLARA** ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: *Timón aerodinámico para automoción*, proyecto del Máster Universitario en Ingeniería Industrial, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

**2º. Objeto y fines de la cesión.**

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

**3º. Condiciones de la cesión y acceso**

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

**4º. Derechos del autor.**

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

**5º. Deberes del autor.**

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

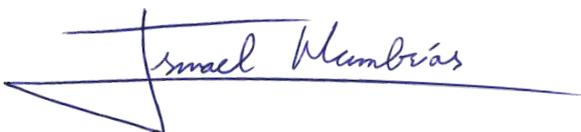
**6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.**

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 25 de enero de 2018

**ACEPTA**



Fdo: Ismael Humbrías Moracia



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título:

***Timón aerodinámico para automoción***

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2017/2018 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: **Ismael Humbrías Moracia**

Fecha: 25 / 01 / 2018

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: **Jesús Ramón Jiménez Octavio**

Fecha: 25 / 01 / 2018





## **TIMÓN AERODINAMICO PARA AUTOMOCIÓN**

**AUTOR: Humbrías Moracia, Ismael**

DIRECTOR: Jiménez Octavio, Jesús Ramón

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

### **RESUMEN DEL PROYECTO:**

En el mundo de la alta competición automovilística, cualquier mejora aerodinámica aporta una gran ventaja competitiva. Para reducir el tiempo por vuelta, concretamente en el trazado de las curvas, surge la idea de desarrollar un alerón trasero, dividido en dos partes, que modifican su orientación independientemente una de la otra, en función de las necesidades dinámicas del vehículo.

Antes de llegar a las curvas, es necesario frenar para evitar deslizamientos y salirse de la calzada, esta energía cinética del vehículo en movimiento se suele desaprovechar transformándola en calor. Aunque existen alternativas como almacenarla en baterías eléctricas o acumularla en discos de inercia, tienen la gran desventaja de que estos sistemas aumentan considerablemente el peso del vehículo. La ligereza de la carrocería tiene enormes ventajas, como reducir el gasto de potencia en aceleraciones o conseguir una mayor velocidad. Sin embargo, en ciertas ocasiones, puede resultar insuficiente para el agarre necesario de las ruedas, generando deslizamientos indeseados.

Para superar estas limitaciones y poder incrementar el agarre únicamente en los momentos deseados, mediante las fuerzas aerodinámicas complementando al propio peso del vehículo, se ha planteado la actuación de un alerón subdividido en dos alas móviles, mecanismo que se asemeja al timón de un barco o un avión. Este alerón a modo de flap, dota al automóvil de una aerodinámica activa, de tal manera que, en las rectas adapta una orientación nula para adquirir un menor arrastre y conseguir elevadas velocidades. Mientras que, en las frenadas y curvas, la orientación de cada elemento de este alerón debe aportar el mayor arrastre y carga aerodinámica posible. Asimismo, solo la parte del alerón más próxima al centro de giro actúa en el trazado de una curva.

El objetivo del presente proyecto es cuantificar el beneficio de este sistema, mediante simulaciones de la actuación del alerón móvil en diferentes casos de estudio e interpretar los resultados obtenidos con el fin de optimizar el agarre con este sistema.

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

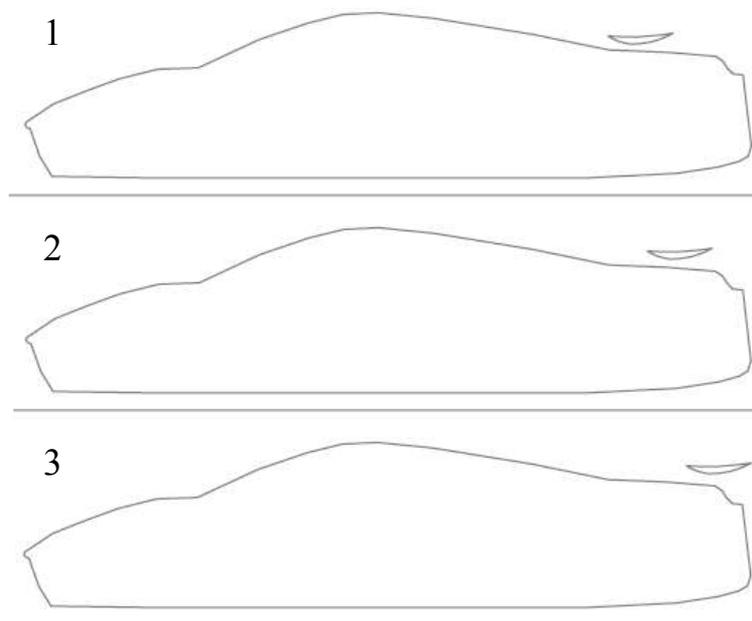
## Timón aerodinámico para automoción

---

Inicialmente se ha elaborado un repaso por la historia del automóvil, desde sus inicios, con especial énfasis en la relevancia de la aerodinámica, donde se puede comprobar la importancia que ha ido adquiriendo a lo largo de los años. También se realiza un detallado estudio de la aerodinámica, describiendo principios, fuerzas, números adimensionales, coeficientes y herramientas. Para finalizar este análisis del estado del arte, se enumeran los principales elementos aerodinámicos que forman parte de un monoplaza de competición.

A continuación, para centrarse únicamente en el diseño y funcionalidad del alerón se ha elegido un modelo de coche actual, el Pagani Huayra. Esta elección surge tras un minucioso estudio revelando a este vehículo con óptimas valoraciones aerodinámicas. El contorno de la geometría del automóvil se ha obtenido mediante fotografías de los principales planos ortogonales.

Para el estudio del impacto de un alerón que modifica su orientación se ha procedido a efectuar un diseño simple, generado mediante el programa de CAD Solidwork la geometría tridimensional. Debido al elevado requerimiento computacional necesario, finalmente se ha decidido examinar solo el escenario en dos dimensiones, con diferentes propuestas del tamaño del alerón y distintas posiciones respecto al vehículo.



*Ilustración 1. Perfil del contorno del vehículo con alerón en la posición 1, 2 y 3. Fuente propia.*

Para el estudio de la dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD) se ha empleado el programa Ansys para la simulación mediante elementos finitos.

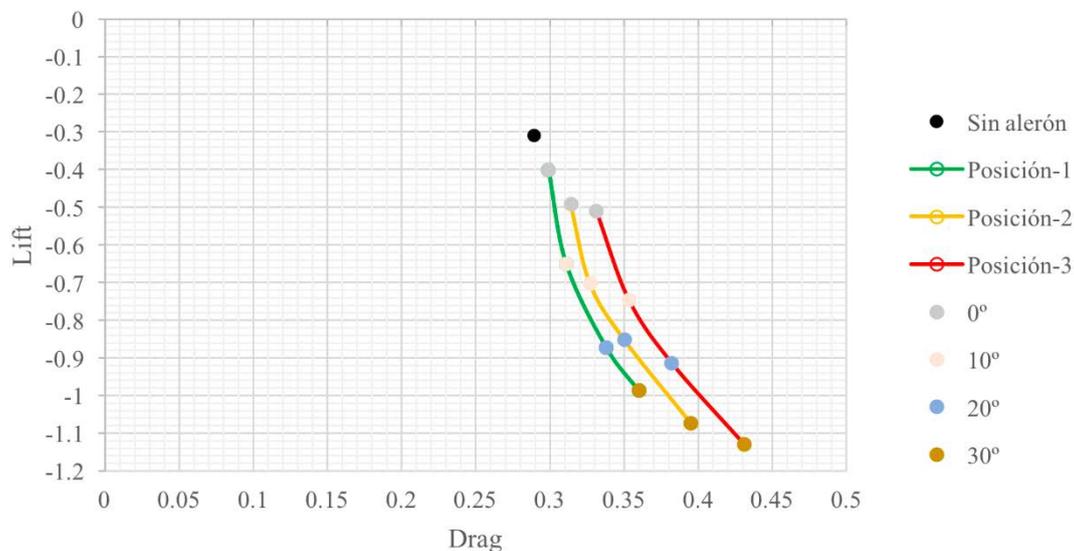
Inicialmente, se ha realizado una simulación dinámica, configurando el alerón en un movimiento de rotación respecto al vehículo. Se han expuesto los diferentes resultados obtenidos del efecto del fluido al ir girando el flap.

En el caso de la simulación dinámica se ha realizado una malla deformable, cercana al alerón que se va regenerando en cada movimiento del flap.

Para simplificar los resultados, se ha analizado más detalladamente varios escenarios estáticos, en los cuales se plantean tres posiciones respecto del vehículo y en cada una, diferentes orientaciones ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  y  $30^\circ$ ). De cada caso, se ha obtenido los coeficientes aerodinámicos drag y lift.

Tanto en la simulación dinámica como estática, se ha detallado el procedimiento que se ha llevado a cabo. Primeramente, se ha importado la geometría del contorno desde el Solidwork, posteriormente se ha realizado una malla lo más fina posible, con los elementos exteriores en forma cuadrilátera debido a un flujo más homogéneo y una malla triangular más cercana al vehículo y al alerón debido a un flujo más turbulento.

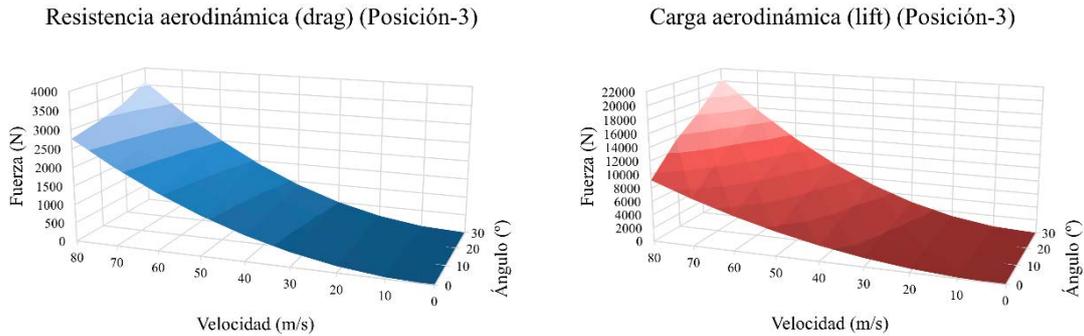
Coeficientes drag y lift:



Gráfica 1. Coeficientes drag y lift. Fuente propia.

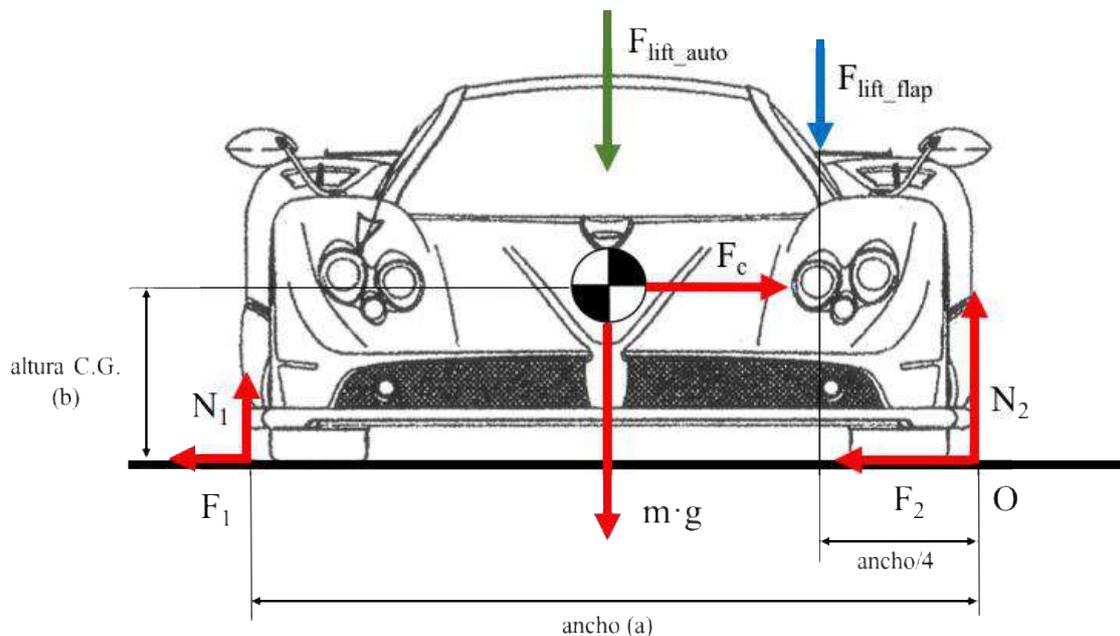
Después de realizar una exhaustiva comparativa con sus respectivos coeficientes, se deduce que la posición tercera, en la cual el alerón se ubica en el borde del vehículo, aporta mayores fuerzas aerodinámicas. Por este motivo, se analiza detalladamente su comportamiento.

Una vez obtenidos los coeficientes aerodinámicos adimensionales, se calculan las fuerzas de la resistencia y carga aerodinámica en función de la velocidad y el ángulo de orientación del alerón. En el escenario de la tercera posición, es donde se obtienen los mayores resultados, siendo los más ventajosos en la situación de frenada.



**Gráfica 2. Resistencia y carga aerodinámica en la posición-3 del alerón, en función del ángulo y velocidad. Fuente propia.**

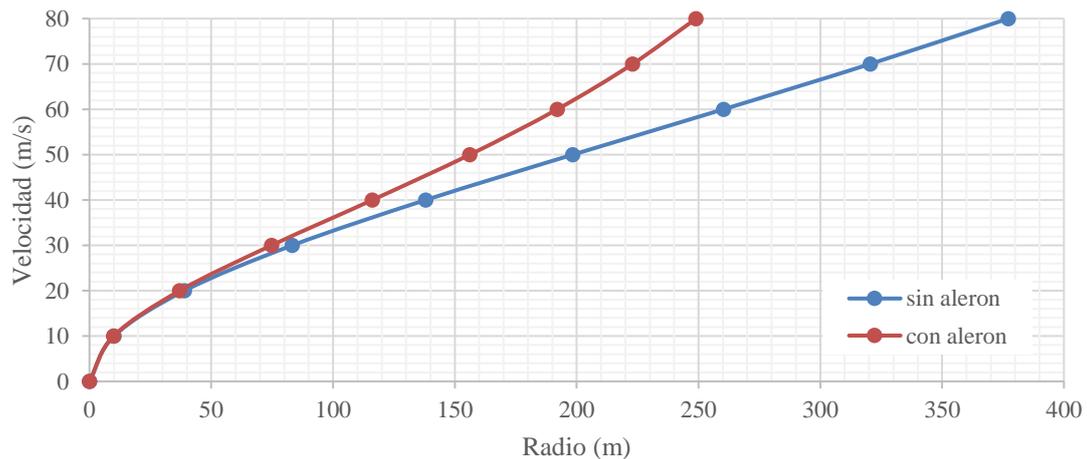
Se ha desarrollado un análisis del efecto del alerón en el trazado de curvas y el comportamiento que causa, al modificar la dinámica del vehículo. También se ha calculado la velocidad máxima que puede alcanzar el automóvil, al tomar una determinada curva sin perder estabilidad y se ha considerado el caso en el que se produzca un vuelco o deslizamiento.



**Ilustración 2. Diagrama de fuerzas en el alzado. Fuente propia.**

El caso de deslizamiento es mucho más restrictivo, obteniendo las velocidades máximas a las que el vehículo puede trazar una curva, con total seguridad, sin que se produzca un deslizamiento entre las ruedas del vehículo y la calzada.

Máxima velocidad en curva para no deslizarse con y sin alerón:



**Gráfica 3. Máxima velocidad en función del radio de la curva para no deslizarse con y sin alerón.**  
*Fuente propia.*

Se ha simulado la dinámica del vehículo mediante el programa veDYNA, siendo necesario la modificación del modelo, añadiendo fuerzas y momentos dinámicos externos que representan la actuación del alerón.

Para finalizar se ha analizado el proceso de fabricación eligiendo como material la fibra de carbono, muy empleado en diversas piezas del automóvil, debido a su ligereza y resistencia para soportar esfuerzos. Mediante una simulación en Ansys del proceso de fabricación, se ha elaborado un análisis estructural del mismo, en el cual se observan las propiedades de peso, tensión y deformación, así como las capas necesarias para este perfil.

## **ACTIVE AERODYNAMICS: FLAP FOR THE STEERING ON AUTOMOTIVE WORLD.**

**AUTHOR:** Humbrías Moracia, Ismael

**SUPERVISOR:** Jiménez Octavio, Jesús Ramón

**Collaborating Entity:** ICAI – Universidad Pontificia Comillas

### **SUMMARY:**

In the world of motor racing, any aerodynamic improvement could provide great competitive advantages. In order to reduce lap times, specifically during cornering, one approach is to develop a spoiler divided in two parts, each one changing its orientation independently from each other, depending of the dynamic needs of the vehicle.

Before reaching a curve, it is necessary to brake to avoid slipping and getting out of the road. The resulting kinetic energy of the vehicle is often wasted being transforming into heat. Although there are alternatives such as storing energy in batteries or accumulating it in inertial disks, both options are unfavorable since they increase the weight of the vehicle. Otherwise, a light car body provide several advantages, such as reducing power consumption in accelerations or achieving higher speeds. However, sometimes an excess of lightness could be insufficient for the necessary grip of the wheels, producing unwanted slipping.

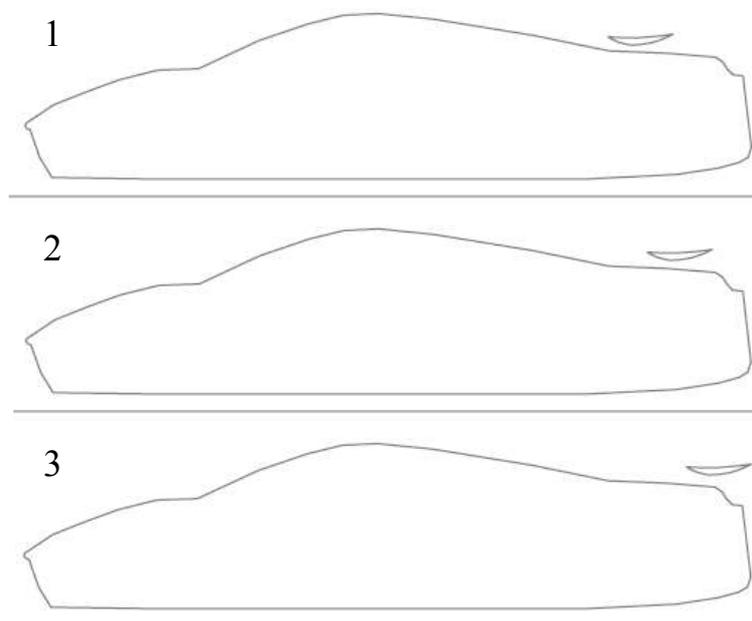
To overcome these limitations (increasing the grip by means of aerodynamic forces and complementing the own weight of the vehicle), a spoiler subdivided into two mobile wings has been developed, technique that resembles the rudder of a ship or an airplane. This flap-like spoiler provides active aerodynamics to the car, in such a way that adapts a null orientation on the straights to achieve a lower drag and higher speeds. By the other side, the orientation of each element of this wing must generate the greatest drag and downforce possible in braking and cornering. Likewise, only the spoiler part closest to the center of rotation acts on a curve.

The main aim of the present project is to quantify the advantages of this system, by performing simulations of the flap behavior in several study cases and interpreting the results obtained in order to optimize the implementation of this system regarding grip.

Firstly, a review of the history of automobile was presented, focusing on the relevance of the aerodynamics in car development. In addition, a comprehensive study of the aerodynamic field is carried out, by describing principles, forces, dimensionless numbers, coefficients and tools. To conclude this state-of-the-art analysis, the main aerodynamic elements that are part of a competition car are listed.

Then, in order to focus only on the design and functionality of the spoiler, a current car model (Pagani Huayra) was selected. This choice arose from a thorough study that revealed that this vehicle has optimal aerodynamic assessments. The contour of the vehicle was obtained from photographs.

A three-dimensional simple design was drawn to study the impact of a spoiler that modifies its orientation, by using CAD program Solidwork. Due to the high computational requirements, we decided to examine only the two-dimensional geometry, with different proposals for spoiler size and different positions with respect to the vehicle.



*Illustration 1. Contour profile of the vehicle with spoiler in position 1, 2 and 3. Own source.*

Computational fluid dynamics (Computational Fluid Dynamics, CFD) was used to perform several simulations of the flap, specifically, by means of Ansys software using finite elements.

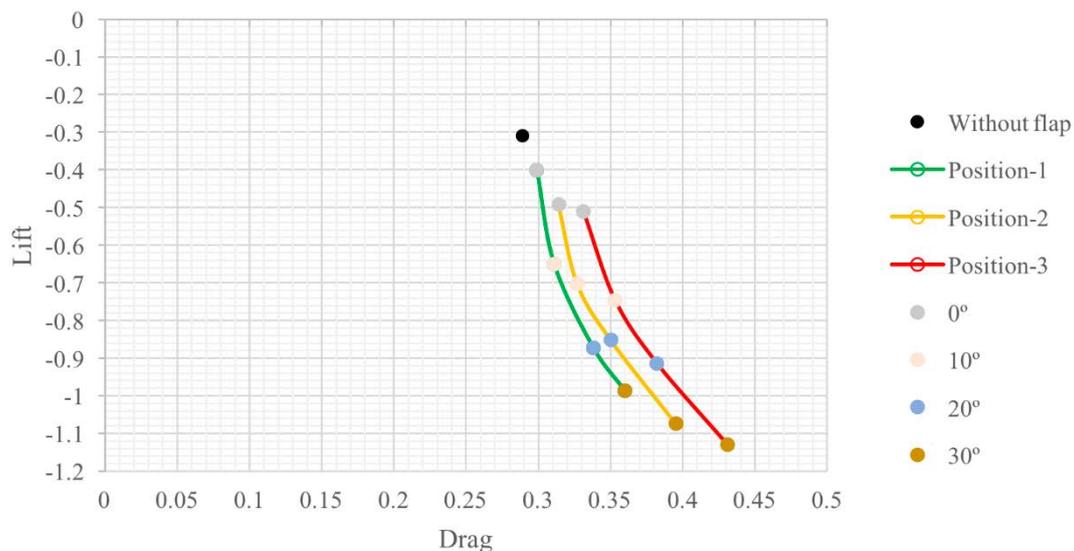
Initially, a dynamic simulation was carried out, configuring the flap in a rotation movement with respect to the vehicle. The effect of the fluid as the flap turned provided different results.

In the case of the dynamic simulation, a deformable mesh was required, close to the flap and that is being rebuilt in each flap movement.

To simplify the results, several static scenarios have been analyzed in more detail: the three positions (1, 2 and 3) each one with different orientations ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  and  $30^\circ$ ). In each case, drag and lift aerodynamic coefficients were obtained.

Both in the dynamic and static simulation, the procedure that has been carried out has been detailed. Firstly, the geometry of the contour has been imported from Solidwork. Next, a mesh was made as refined as possible, with the outer elements in a quadrilateral shape due to a more homogeneous flow, and the inner ones with a triangular shape due to a more turbulent.

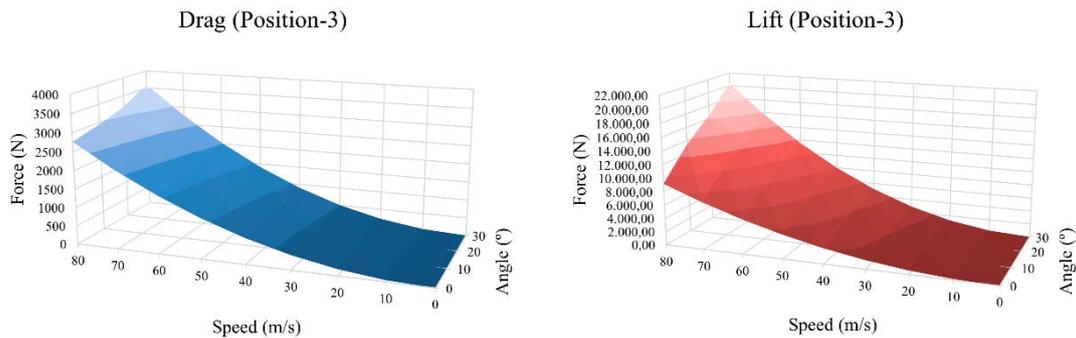
Drag vs. lift coefficients:



*Graph 1. Drag vs. lift coefficients. Own source.*

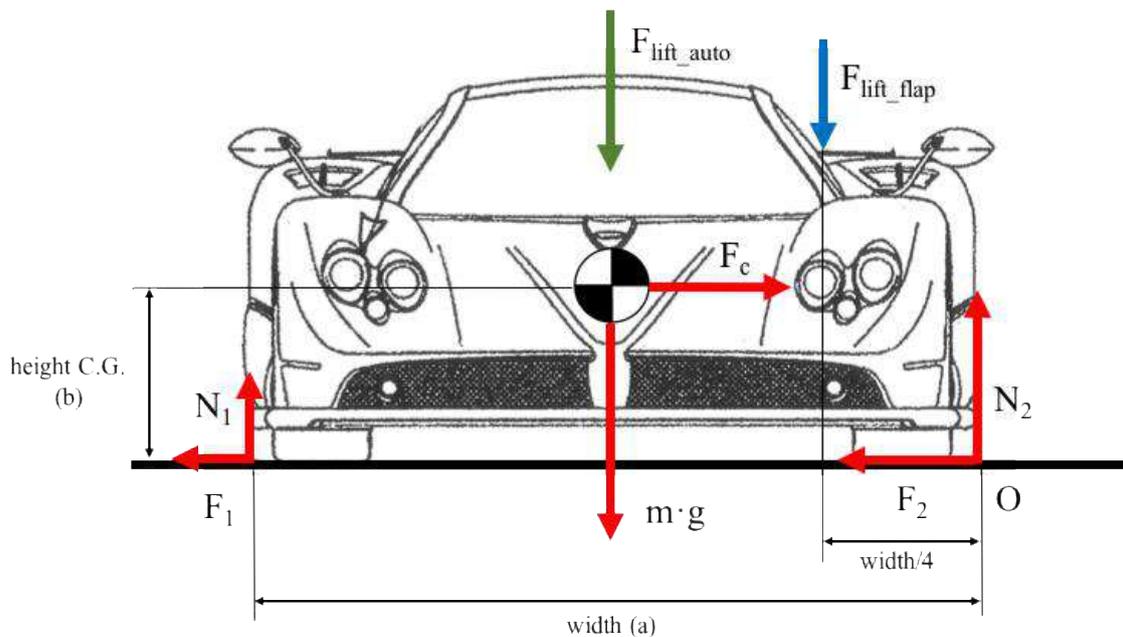
An exhaustive comparison of the aerodynamic coefficients shown that position 3, in which the spoiler is located on the edge of the vehicle, provides greater aerodynamic forces. Then, it is required a detailed analysis of its behavior.

Once the dimensionless aerodynamic coefficients were obtained, the forces of the drag and lift aerodynamic load were calculated as a function of the speed and the angle of flap orientation. Position 3 scenario was the most advantageous in the braking performance.



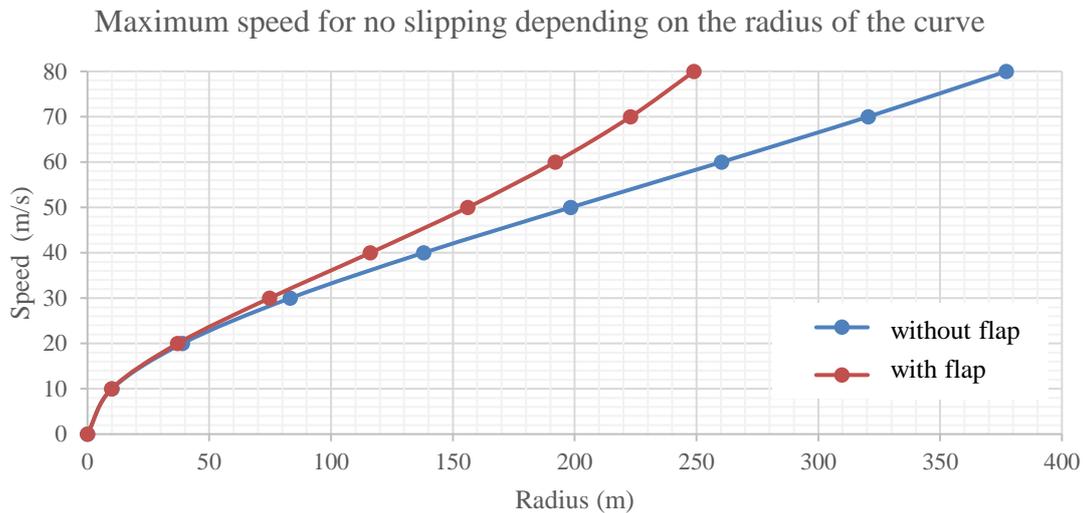
**Graph 2. Aerodynamic resistance and downforce in flap position 3, depending on the angle and speed.**  
*Own source.*

An analysis of the flap behavior in cornering was developed and its effect in modifying the dynamics forces of the vehicle. The maximum speed reached by the car was also calculated, by taking a certain curve without losing stability, specifically, considering rollover or slip scenarios.



**Illustration 2. Force diagram. Own source.**

The slip situation is much more restrictive, reaching the maximum speed at which the vehicle can corner with total safety, without slipping between the wheels and the road



**Graph 3.** Maximum speed for no slipping depending on the radius of the curve. Scenarios were tested in presence or absence of flap. Own source.

The dynamics of the vehicle have been simulated through the veDYNA program, being needed to modify the model by adding forces and external dynamic moments that represent the flap performance.

Finally, for the manufacturing process, carbon fiber was chosen, a material widely used in several automotive parts, due to its lightness and resistance to withstand stresses. A structural analysis of the manufacturing process was simulated by using Ansys software, in which weight, tension and deformation properties were integrated, as well as the layers needed for this flap.



## **Agradecimientos:**

A todo el profesorado, que me ha aportado los conocimientos y valores para luchar y defenderme ante las adversidades.

A toda mi familia, en especial a mis abuelos y a mis padres que me apoyan en todos mis proyectos.

A todos aquellos que creen y confían en mí. A los que entienden que la suerte no se tiene, sino que se consigue con esfuerzo. Y a todos aquellos con imaginación ilimitada que luchan por mejorar el mundo.

Al servicio técnico de Ansys que me han asesorado en la configuración de la malla dinámica.

A la compañía TESIS DYNAware por concederme una licencia avanzada durante unos meses.

Y en especial, a mi director del proyecto, pues detrás de un gran profesional docente se esconde una bellísima persona.

*Ismael Humbrías Moracia*





## ÍNDICE:

### PARTE-I: INTRODUCCIÓN

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>24</b>
1.1	Motivación del proyecto.....	27
1.2	Objetivos del proyecto.....	29

### PARTE-II: ESTADO DEL ARTE

<b>1</b>	<b>ANTECEDENTES HISTORICOS.....</b>	<b>32</b>
1.1	Historia del automovilismo.....	32
1.1.1	Introducción.....	32
1.1.2	Etapa de invención.....	35
1.1.3	Etapa Veterana.....	54
1.1.4	Etapa del latón o Eduardiana.....	59
1.1.5	Etapa de la Época.....	61
1.1.6	Etapa Pre-Guerra.....	63
1.1.7	Etapa Post Guerra.....	65
1.1.8	Etapa Moderna.....	69
1.1.9	Resumen de los principales acontecimientos de la historia del automóvil.....	74
<b>2</b>	<b>AERODINÁMICA.....</b>	<b>75</b>
2.1	Historia de la aerodinámica.....	76
2.2	Resumen de fechas de la historia de mejoras aerodinámicas en Formula 1.....	104
2.3	Glosario de imágenes de vehículos en la historia de Formula 1.....	108
2.4	Principios básicos aerodinámicos.....	109
2.4.1	Principio de Bernoulli.....	109
2.4.2	Efecto Venturi.....	111
2.4.3	Efecto Coanda.....	113
2.5	Fuerzas aerodinámicas.....	115
2.5.1	Carga aerodinámica.....	122
2.5.2	Resistencia aerodinámica.....	124
2.6	Los números adimensionales.....	125
2.6.1	El número de Reynolds.....	125
2.6.2	El número de Mach.....	127
2.7	Coeficientes aerodinámicos.....	128
2.7.1	Coeficiente de resistencia $C_x$ o $C_D$ (drag) (arrastre) (resistencia aerodinámica).....	129
2.7.2	Coeficiente de sustentación $C_z$ o $C_L$ (lift) (carga aerodinámica) (sustentación).....	131
2.7.3	Coeficiente de empuje lateral ( $C_Y$ ).....	133
2.7.4	Eficiencia aerodinámica.....	133

<b>2.8</b>	<b>Estudio de la aerodinámica .....</b>	<b>134</b>
2.8.1	CFD (Computacional Fluid Dynamics) .....	135
2.8.2	Túnel de viento .....	137
2.8.2.1	Tipos de túnel de viento .....	141
2.8.2.2	Partes de un túnel .....	144
<b>2.9</b>	<b>Elementos de la aerodinámica en un monoplaza de Formula1 .....</b>	<b>148</b>
2.9.1	Alerón delantero .....	149
2.9.2	Carenado .....	151
2.9.3	Aletas de nariz .....	152
2.9.4	Deflectores laterales .....	153
2.9.5	Toma de admisión .....	154
2.9.6	Pontones .....	155
2.9.7	Aletas de pontón .....	156
2.9.8	Fondo plano .....	157
2.9.9	Difusor .....	161
2.9.10	Casco .....	163
2.9.11	Alerón trasero .....	164

### PARTE-III: DISEÑO Y SIMULACIÓN

<b>1</b>	<b>Diseño del carenado .....</b>	<b>182</b>
1.1	<b>Boceto del diseño del Ferrari La Ferrari .....</b>	<b>183</b>
1.1.1	Herramienta utilizada: .....	183
1.2	<b>Datos del Pagani Huayra: .....</b>	<b>184</b>
1.3	<b>Fotografías del Pagani Huayra: .....</b>	<b>185</b>
1.4	<b>Herramienta utilizada .....</b>	<b>186</b>
1.5	<b>Geometría 3D .....</b>	<b>186</b>
1.5.1	Proceso de elaboración .....	186
1.5.2	Croquis obtenidos: .....	193
1.5.3	Resultados obtenidos: .....	194
1.6	<b>Geometría 2D .....</b>	<b>197</b>
1.6.1	Diferentes propuestas de alerón (flap) .....	198
1.6.2	Diseños con el alerón en diferentes posiciones .....	199
<b>2</b>	<b>Simulación .....</b>	<b>203</b>
2.1	<b>Herramienta utilizada .....</b>	<b>203</b>
2.2	<b>Simulación dinámica .....</b>	<b>203</b>
2.2.1	Geometría .....	204
2.2.2	Mallado .....	205
2.2.3	Calidad del mallado .....	207
2.2.4	Configuración .....	208
2.2.5	Resultados obtenidos .....	212
2.2.5.1	Presión .....	212
2.2.5.2	Velocidad .....	213
2.2.5.3	Flujo de velocidad .....	214
2.2.5.4	Turbulencia .....	215
2.3	<b>Simulación estática .....</b>	<b>216</b>
2.3.1	Geometría .....	217
2.3.2	Mallado .....	218
2.3.3	Calidad del mallado .....	220
2.3.4	Configuración: .....	221



2.3.5	Resultados obtenidos .....	224
2.3.5.1	Presión .....	224
2.3.5.2	Velocidad .....	225
2.3.5.3	Turbulencia de energía cinética.....	226
2.3.6	Coefficientes aerodinámicos obtenidos.....	227
2.3.7	Agrupación de todos los resultados .....	228
<b>3</b>	<b>Análisis de resultados .....</b>	<b>230</b>
<b>3.1</b>	<b>Cálculo de la resistencia aerodinámica .....</b>	<b>230</b>
3.1.1	Posición-1.....	230
3.1.2	Posición-2.....	231
3.1.3	Posición-3.....	232
<b>3.2</b>	<b>Cálculo de la carga aerodinámica .....</b>	<b>233</b>
3.2.1	Posición-1.....	233
3.2.2	Posición-2.....	234
3.2.3	Posición-3.....	235
<b>3.3</b>	<b>Eficiencia aerodinámica.....</b>	<b>236</b>
<b>4</b>	<b>Análisis de estabilidad.....</b>	<b>238</b>
4.1	El vehículo vuelca .....	240
4.2	El vehículo desliza.....	242
4.3	Límite de velocidad máxima .....	243
4.4	Conclusiones del análisis de la estabilidad .....	243
<b>5</b>	<b>Simulación de la dinámica del vehículo.....</b>	<b>244</b>
5.1	Herramienta utilizada .....	244
5.2	Modelo.....	245
5.3	Modificación del modelo.....	246
5.4	Parámetros de entrada.....	247
5.5	Simulación .....	249
5.6	Resultados.....	250
<b>6</b>	<b>Proceso de Fabricación.....</b>	<b>251</b>
6.1	Introducción.....	251
6.2	Diseño .....	253
6.3	Fabricación .....	254
6.4	<b>SIMULACIÓN EN ANSYS.....</b>	<b>256</b>
6.4.1	ACP (Pre).....	256
6.4.1.1	Propiedades del material: .....	257
6.4.1.2	Apilamiento de capas:.....	258
6.4.2	Análisis estructural estático: Fibra de carbono.....	260
6.4.2.1	Malla:.....	260
6.4.2.2	Cargas:.....	262
6.4.3	ACP (Post).....	264
6.4.3.1	Deformación [mm].....	265
6.4.3.2	Criterio de fallo: .....	266
6.4.3.3	Tensión: .....	267
6.4.3.3.1	Perfil del flap .....	268
6.4.3.3.2	Parte superior del flap .....	270
6.4.4	Análisis estructural estático: Acero [e=2 mm].....	272
6.4.4.1	Deformación [mm].....	272
6.4.4.2	Tensión Mecánica:.....	273
<b>7</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>275</b>
<b>8</b>	<b>Futuros desarrollos.....</b>	<b>279</b>

**PARTE-IV: PLANOS**

<b>1</b>	<b>Planos .....</b>	<b>282</b>
1.1	Plano del perfil vehículo con el alerón.....	282
1.2	Plano del perfil alerón .....	283

<b>Bibliografía.....</b>	<b>285</b>
<b>Libros.....</b>	<b>285</b>
<b>Artículos técnicos:.....</b>	<b>286</b>
<b>Patentes.....</b>	<b>287</b>
<b>Enlaces de interés .....</b>	<b>288</b>

<b>Glosario.....</b>	<b>290</b>
----------------------	------------



# **PARTE I**

# **INTRODUCCIÓN**

## 1 INTRODUCCIÓN

En el sector del automóvil existe un constante desarrollo tecnológico, muy relacionado con otros sectores industriales que requieren un alto grado de especialización.

La constante investigación e innovación son pilares fundamentales para el progreso de tecnologías de vanguardia que son introducidas en el mundo de la alta competición para posteriormente llevarlas a la automoción en general.

La carrocería es uno de los factores que aporta un aspecto atractivo al vehículo, pero además su diseño contribuye a las características técnicas y de seguridad del mismo, pues influye y determina el comportamiento global del coche a altas velocidades.

La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos con mayor interés de estudio en la alta competición de la automoción. El objetivo es conseguir una mayor carga aerodinámica con la mínima resistencia del aire al avance.

El diseño de los vehículos es uno de los aspectos en constante desarrollo, modificando la geometría de las líneas exteriores, para conseguir una mayor adherencia, estabilidad y seguridad, a la vez que se reduce la resistencia con el aire.

La aerodinámica no se plasma únicamente en formas afiladas o fluidas de las carrocerías, sino que esta dispersada por el interior del automóvil, desarrollando conductos para la canalización del aire, y así conseguir coches ultraeficientes.

Esta aerodinámica representa un papel fundamental en los coches de competición, ya que a grandes velocidades los efectos son muy considerables, generando apreciables fuerzas aerodinámicas.

En Formula 1, los distintos equipos estudian minuciosamente los efectos aerodinámicos, de todos los elementos y zonas del vehículo, desde la forma de la suspensión hasta el casco que lleva el piloto, para perfeccionar detalles que generen un mejor rendimiento del automóvil.

Para un correcto desarrollo de la aerodinámica, se realizan ensayos en túneles de viento, estudiando las interacciones que aparecen entre el cuerpo en movimiento relativo con el fluido del aire. Después se analizan todos los datos, ya que la aerodinámica de un coche a altas velocidades representa un elevado porcentaje del agarre.



Un aspecto de la tecnología, que se ha desarrollado vertiginosamente en los últimos años es la adquisición de datos, con la utilización de ordenadores con avanzados programas de simulación, donde es posible reproducir las condiciones reales del circuito, con un viento virtual modificando todos sus parámetros.

Actualmente, un vehículo cuando llega al túnel de viento real, posee ya unos resultados previos, mediante tecnologías de simulación con la dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD), que puede predecir el rendimiento aerodinámico de los cuerpos antes de ser constituidos, de tal manera que reducen el tiempo y el presupuesto de los proyectos.

Una vez analizados dichos datos, es el túnel de viento, la herramienta que toma mayor relevancia, pues se trata de un complejo dispositivo donde se representa un modelo reducido a escala del prototipo del coche definitivo, sobre una sección de trabajo en movimiento, simulando la superficie de una pista real, y comprobando el efecto que produce el flujo del aire en determinadas condiciones de temperatura, presión y otras variables, en torno a las diferentes partes del automóvil.

Dicha maqueta requiere ser idéntica al modelo real y a una escala lo más cercana a la original, para que los resultados definidos sean válidos. Pues uno de los inconvenientes del túnel de viento, cuando el estudio del modelo no se realiza a escala real, es que los datos pueden extrapolarse matemáticamente a la realidad y producir discrepancias entre las pruebas del túnel y la realidad de la pista del circuito.

Por tanto, podríamos decir, que el túnel de viento nos proporciona información real, pero bajo unas condiciones limitadas, que se complementan con la Dinámica Computacional de Fluidos, mediante resoluciones matemáticas de elementos finitos, y así precisar con el binomio de ambas herramientas gran información tanto cualitativa como cuantitativa.

Cuando un vehículo traza una curva, es imprescindible evitar riesgos de deslizamientos, evitando el peligro de salirse de su trayectoria. La fuerza centrífuga, proporcional al cuadrado de la velocidad, no debe superar a la fuerza de rozamiento de los neumáticos con el suelo, para ello, es necesario disminuir la velocidad a la entrada de la curva, perdiéndose energía en forma de calor en la frenada, y luego volver a acelerar al salir de ésta, para alcanzar velocidad, originando un gasto de combustible. Estos factores en la alta competición se calculan detenidamente, puesto que el tiempo y la masa son variables muy valiosas.

Actualmente, el mejor vehículo no es aquel que alcanza mayor velocidad punta en recta, sino el que consigue el menor tiempo por vuelta. La reducción del tiempo al tomar las curvas a mayor velocidad, en su computo es muy significativo.

En el presente proyecto se dotará al vehículo de aerodinámica activa, con un alerón que modifica su geometría para obtener la menor fricción posible con el aire en las rectas, así alcanzar mayores velocidades, y a la vez en las situaciones deseadas aumentar la sustentación de las ruedas con el asfalto, de tal manera, lograr no perder adherencia en las frenadas y curvas. Esto es posible gracias al desarrollo de un alerón trasero móvil, dividido en dos partes, que modifican independientemente su geometría una de la otra, a modo de timón aerodinámico, complementando la dirección del vehículo.

En la aviación ya existe diferentes partes móviles que permiten variar el perfil del ala, como flaps o hipersustentadores, que son imprescindibles en funciones básicas como en el despegue, vuelo, aterrizaje, y para controlar la dirección.

Dichas superficies orientables, incrementan la sustentación para mantener el avión en el aire, y con la aplicación de variaciones en el área de las alas, se consigue mayor o menor resistencia al aire, aumentando o disminuyendo la velocidad y sustentación en las maniobras de despegue y aterrizaje. Los flaps y el timón de dirección, son los encargados de tomar el rumbo. Cambiando su orientación, se consigue generar fuerzas aerodinámicas y momentos dinámicos para modificar la trayectoria.

En los vehículos a elevadas velocidades cabe considerar que este tipo de flap pueda complementar la dirección de las ruedas delanteras, gracias al desarrollo de actuadores hidráulicos, que pueden funcionar en milisegundos según las necesidades de adherencia.

Este proyecto se ha centrado en el diseño y estudio de la aerodinámica de un alerón móvil. Se ha calculado el incremento del agarre proporcionado por el alerón en situaciones de frenado y trazado de las curvas. Pero siempre con la pretensión de que el vehículo obtenga la mayor velocidad, garantizando las máximas prestaciones de estabilidad.

En su estudio se comprueba y analiza la influencia del alerón en la carrocería y en el rendimiento del vehículo mediante simulaciones con la herramienta de Ansys para la computación de la dinámica del fluido.



## 1.1 Motivación del proyecto

Las razones de interés que motivan este proyecto es intentar resolver el problema de reducir la velocidad al tomar las curvas para no perder la adherencia y el control de la estabilidad del vehículo.

Se trata de estudiar el diseño de un alerón móvil, que permita disminuir la resistencia del aire en las rectas, pero aumente el agarre sobre el asfalto, concretamente en las curvas y frenadas, de manera que, el vehículo alcance mayor velocidad, pero con las máximas prestaciones de seguridad.

Gracias a este sistema se consigue un ahorro de tiempo en el trazado de cada curva del circuito, que concluye en una reducción del tiempo total por vuelta en circuito. También supondría una disminución del combustible, al no tener que frenar tanto para reducir la velocidad antes de llegar a una curva para después acelerar, aunque ya existe en el mercado diferentes sistemas como el KERS (*kinetic energy recovery system*) que transforma la energía mecánica en eléctrica para luego ser aprovechada.

Al igual que, en la automoción las ruedas delanteras son las encargadas de tomar la dirección, en la aviación las partes móviles de los alerones son los encargados de tomar la trayectoria y en el sector náutico es el timón el encargado del rumbo. Así pues, la intención del proyecto es complementar al vehículo, con un timón aerodinámico, formado por alerones que complementen la dirección del automóvil. Siendo una pieza clave en la aerodinámica del vehículo.

El desarrollo de este alerón proporciona un mejor rendimiento en el agarre del vehículo con la pista, para conseguir mayores aceleraciones, realizar frenadas más bruscas y tomar las curvas a elevadas velocidades sin perder la estabilidad, de tal manera que, el tiempo por vuelta se reduce considerablemente.

El diseño trata de un alerón como un elemento móvil que modifica la geometría de la carrocería, alterando la aerodinámica y, por lo tanto, generando fuerzas y un momento angular que facilite al automóvil el giro a altas velocidades.

Para realizar el estudio se recreará diferentes situaciones de este elemento móvil con el aire, utilizando Ansys como programa de simulación de la dinámica del fluido. Mediante simulaciones de las corrientes de aire alrededor del vehículo y de este alerón, se comprueba el comportamiento, analizando su aceptación a una determinada velocidad y supervisando los márgenes de error.

El estudio de los efectos aerodinámicos generados sobre el vehículo necesita resolver ciertas ecuaciones que no es posible resolver de forma analítica, pues son operaciones muy complejas como la ecuación de Navier-Stokes (segunda ley de Newton generalizada para fluidos), la ecuación de continuidad, de estado, condiciones de contorno e iniciales. Pero utilizando la herramienta de Ansys para la computación de la dinámica del vehículo (CFD) se analizarán diversas simulaciones por ordenador, donde se va observar cuál es la configuración que describe mejor rendimiento aerodinámico y aporta mejores resultados.

Un aspecto primordial a tener en cuenta en este proyecto, es la seguridad, para ello, este diseño consigue aumentar la sustentación. Se evaluará la carga aerodinámica para obtener el máximo agarre de las ruedas al pavimento y poder circular el vehículo a mayor velocidad en las curvas, pero siempre evitando el deslizamiento.

La finalidad de los coches de competición es ser más competitivos y conseguir una mejor clasificación en los circuitos de carreras. Esto en ocasiones, ha llevado a lamentables incidentes, por ello actualmente, la seguridad es un requisito primordial y con este diseño de alerón variable, se comprueba distintas configuraciones de orientación, con el objetivo de elegir la alternativa más adecuada a las necesidades de agarre.

Es decir, el propósito de este proyecto es crear un diseño aerodinámico eficiente, simple y económico, que compensé la inestabilidad del viento consiguiendo una presión favorable que actué de forma adecuada sobre el automóvil para adquirir ventaja durante las curvas de un circuito.



## 1.2 Objetivos del proyecto

Los objetivos principales de este proyecto son:

- Lograr un eficaz rendimiento aerodinámico, variable en función de los requerimientos del vehículo.
- Conseguir una menor carga aerodinámica en rectas para minimizar la resistencia al aire y así ganar mayor velocidad.
- Adquirir mayor carga aerodinámica en zonas de curvas y frenadas para obtener un mayor agarre del coche al asfalto, de manera que permita aumentar la velocidad en las mismas.
- Aumentar la seguridad y estabilidad del vehículo al trazar curvas.
- Desarrollar un diseño simple y económico de fibra de carbono.
- Conseguir un ahorro en combustible, al no requerir reducir tanto la velocidad al tomar las curvas.

En el mundo de la competición se ha incrementado la velocidad en los últimos años, al mismo tiempo que los coches se fabrican más ligeros. Para asegurar un agarre suficiente en las curvas, la aerodinámica desempeña un papel fundamental aligerando el peso permanente en el vehículo, pero dando el agarre necesario con el apoyo de las fuerzas aerodinámicas generadas.

El objetivo fundamental del proyecto se basa en diseñar un alerón aerodinámico móvil, que actúe generando un momento angular y cuya función es facilitar al automóvil trazar las curvas a altas velocidades.

Con este dispositivo móvil se trata de ajustar la aerodinámica, manejando las corrientes de viento y alcanzar el máximo rendimiento en las curvas dando un apoyo en la sustentación del vehículo en el lado necesario según sea la dirección de giro.

Se realizará un detallado estudio numérico por ordenador mediante Ansys (CFD), que nos dará una idea muy aproximada de las características según las diferentes orientaciones del alerón.

Se examinarán conceptos más específicos y cuantificará en qué proporción los flaps generan un par angular para facilitar el giro, sin tener que reducir la velocidad al llegar a la curva.

Se pronosticará como afecta en la dinámica del vehículo este prototipo de alerón con el estudio y análisis de distintos ángulos, de tal manera, poder determinar la nueva velocidad máxima a la cual el vehículo pueda tomar la curva con total seguridad. Este incremento de velocidad está supeditado al límite de deslizamiento cuando actúa el alerón.

Se realizará una comparativa de todas las variables con y sin el apoyo aerodinámico del alerón, clave para la sustentación negativa del vehículo al girar.

Se estimará el grado de actuación del prototipo del alerón, adoptando una inclinación determinada en función del ángulo de giro del volante, proporcional al radio de curvatura y a la velocidad que tiene el vehículo en ese instante.

Obtenidos los resultados de las simulaciones, utilizando el CFD por el cual es posible resolver dichas operaciones de una forma simplificada, se puede mostrar un pequeño error, principalmente en la conversión de las variables continuas en discretas.

El alerón deberá actuar en función de los requerimientos de agarre del vehículo, buscando la condición más óptima, en la que cumpla la máxima carga aerodinámica y menor resistencia al avance, que nos dará la idea más aproximada de lo que pueda suceder en la realidad.

En resumen, con este prototipo móvil de alerón, se pretende aumentar la carga aerodinámica en función del momento y de cada giro en la pista, para que el coche, con este sistema, obtenga la capacidad de alcanzar la máxima velocidad, manteniendo la seguridad adecuada. Esto genera un ahorro de tiempo y combustible que mejora el rendimiento total en el circuito.

Este trabajo se ha dividido en varios capítulos, una primera parte donde se estudia el estado del arte, dando unas nociones recordatorias e históricas de la evolución del automóvil desde su concepción y diferentes etapas hasta la actualidad. Después se realiza otro apartado que trata de los orígenes de la aerodinámica en el mundo de la competición. Donde se observa que a lo largo del tiempo se le ha ido dando más importancia a la aerodinámica, diseñando y creando elementos para reducir la resistencia al viento. Se describen los principales principios de la aerodinámica, al igual que los parámetros con los que se cuantifican el efecto de la aerodinámica en el vehículo. Se explican las herramientas actuales para su estudio y simulación mediante programas informáticos y ensayos en el túnel de viento. Y para finalizar, esta sección, se enumeran y describen diferentes elementos aerodinámicos de un monoplaça.

En segundo lugar, otra parte donde se desarrollan diferentes diseños del carenado del vehículo y su respectivo alerón. Así como afecta las diferentes orientaciones y posiciones del alerón respecto del vehículo. Se analizará la aerodinámica en los diferentes casos.

Y por último se redactan las soluciones y conclusiones que se han obtenido de este proyecto.



**PARTE II**  
**ESTADO DEL ARTE**

## 1 ANTECEDENTES HISTORICOS

### 1.1 Historia del automovilismo

#### 1.1.1 Introducción

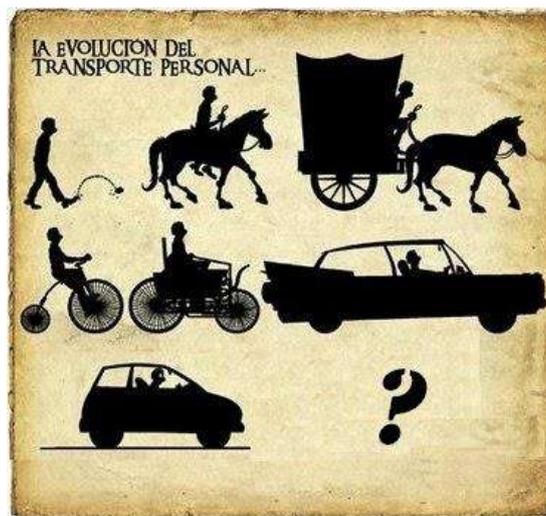


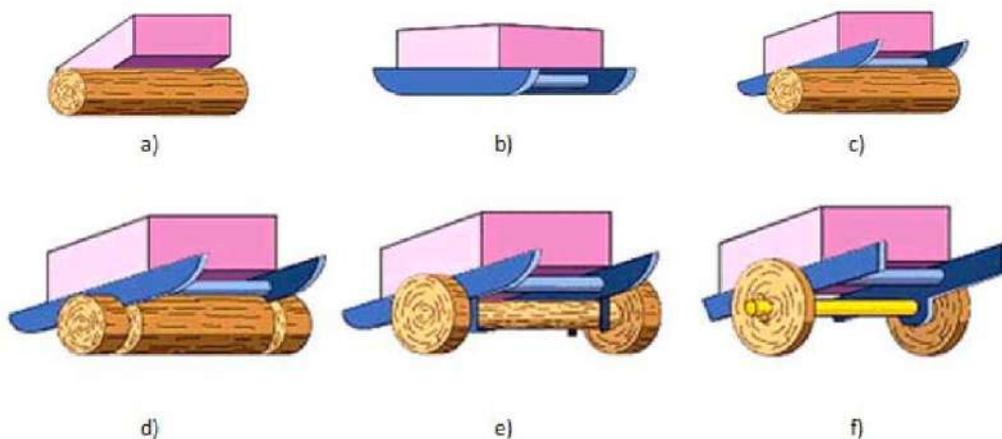
Ilustración 1.1 Historia del automóvil. Fuente: <http://1769-ultradeportivosenlahistoria.blogspot.com.es/p/la-historia-de-los-coches.html>

Los primeros pobladores de la Tierra, cazaban animales principalmente para alimentarse, pero también para domesticarlos, sirviéndose de ellos, aprovechando su fuerza, para trabajar las tierras y para desplazarse. El caballo fue el animal más utilizado, para recorrer distancias largas.

Se cree que una tribu de pastores de Asia Central, fueron los primeros hombres a quienes se les ocurrió, colocar piedras redondas o troncos de árboles, debajo de rocas grandes, para moverlas. Pues se tiene evidencia, de que los primeros humanos utilizaban rodillos debajo de objetos pesados para poder moverlos, más tarde comenzaron a usar patines para subir la carga de manera más fácil, pero observaron que cuanto más profundos eran los surcos que dejaban los rodillos, esta especie de trineo avanzaba mejor, por lo que los sustituyeron por unos discos con un agujero donde se insertaba un eje. Después esta especie de rueda rudimentaria fue mejorada por la cultura egipcia y por la cultura de Andronovo, quienes fabricaron la rueda con radios hacia el año 2.000 a.C.

Según Learning Company Inc (1977), la rueda siguió la siguiente evolución:

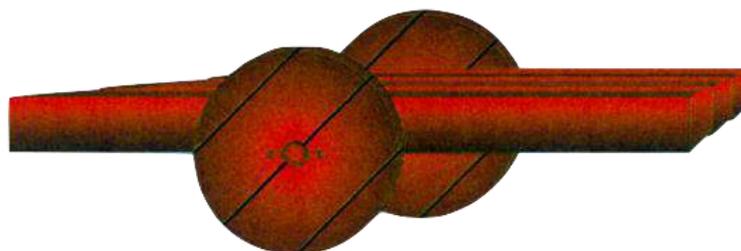
- 1.- Primero fue un rodillo
- 2.- Luego fue un trineo
- 3.- Después el trineo se colocó sobre un rodillo
- 4.- El trineo con el uso, provocaba ranuras en el rodillo, que originaba una especie de eje
- 5.- La rueda y el eje unidos en una única pieza por unas clavijas
- 6.- La rueda unida al eje con un cojinete muy rudimentario



**Ilustración 1.2** Concepción de la evolución de la rueda, según Learning Company Inc (1977). Referencia: <http://aulavirtual.utp.edu.pe/file/20102/it/R4/02/HA01/20102ITR402HA01T044.pdf>

Hacia el 1.400 a. C. la utilización de la rueda se extendió por Europa y la India. Fue un invento fundamental para la humanidad, por su utilidad en máquinas, transporte, alfarería, etc. Ciertamente, no se sabe con seguridad, quién inventó la rueda, pero según estudios existentes, se conoce quien fue el primero en patentarla, el abogado australiano John Keogh, describiéndola como un dispositivo circular para facilitar el transporte.

Se cree que el pueblo chino fue el primero en utilizar el carro pues existen pinturas donde se plasma una construcción de bambú, con un eje y una plataforma unido a unas grandes ruedas.



**Ilustración 1.3** Inicios del Carro. Fuente: [http://questgarden.com/05/46/9/051112220250/images/evial8\\_4.jpg](http://questgarden.com/05/46/9/051112220250/images/evial8_4.jpg)

En la cultura occidental, los primeros antecedentes del carro, los hallamos en las esculturas de Nínive y Persépolis, y también en las pinturas de las tumbas egipcias. En un principio se utilizaban como máquinas de guerra, donde combatían los guerreros. La mitología griega refleja muchas alusiones al carro. Los troyanos fueron los primeros en usar carros contruidos con cuatro ruedas. Más tarde, la cultura romana los perfeccionó, destacan las “brigas” tiradas por dos caballos, “trigas” por tres y “cuadrigas” por cuatro. También existían las populares carreras de carros. Había diversos modelos, incluso un antecedente de ambulancia “la arcera”; se construyeron varias calzadas en piedra y en tiempos de Julio Cesar, hasta se promulgo una ley, que limitaba el tránsito durante un período de tiempo.



**Ilustración 1.4** Carro tirado por caballo. *Fuente:*  
[https://i2.wp.com/www.pacocostas.com/images/uploads/evial8\\_5.jpg?zoom=2&resize=350%2C150](https://i2.wp.com/www.pacocostas.com/images/uploads/evial8_5.jpg?zoom=2&resize=350%2C150)

Al principio del siglo XI, Alberto de Itimiano, invento la carroza, “el carroccio”, un vehículo militar de gran tamaño, que tenía un carácter sagrado. Es en el siglo XII, cuando la carroza toma un carácter de lujo, se adornan con motivos de oro y plata, simbolizaba signo de poder económico y posición social. En el siglo XVII, en Italia, se mostraron las primeras carrozas con ventanales de vidrio.

Desde el siglo XVII, la curiosidad y ambición del hombre, le llevó a la búsqueda de una fuerza motriz que reemplazara a los carruajes de caballos; los primeros coches inventados se construían con las técnicas de los carruajes de la época, a los cuales se les añadía un motor colocado en los bajos. El automóvil pasa por tres etapas de los grandes medios de propulsión: vapor, electricidad y gasolina.

No es fácil precisar el inicio del origen del automóvil, pero su historia evidencia una evolución tecnológica, que abarca a cientos de inventos y patentes. De hecho, los primeros intentos imaginarios para un vehículo motorizado fueron concebidos por genios como Leonardo da Vinci e Isaac Newton.

La historia del automóvil se puede clasificar en las siguientes etapas:

### 1.1.2 Etapa de invención

La etapa de invención se podría dividir en dos partes, una etapa de diseño, donde los proyectos se quedan en bocetos gráficos, sin llegar a realizarse y otra segunda parte, que comprende desde el año 1768 hasta 1889, que, discrepa de la anterior, porque los proyectos no se quedan en la mesa de proyectos, sino que se llegan a fabricar y emplear para distintos fines.

Hacia el año 150 A.C. Herón de Alejandría, ingeniero y matemático griego, escribió un tratado denominado “Spiritaria seu Pneumatica”. Construyó una máquina a vapor que llamó “Eolípila”, basada en experimentos con vapor de agua, manifestando de forma primitiva la ley de acción y reacción.

La máquina constaba de un depósito de agua con una cámara de calor situada debajo y unas tuberías conectadas a una esfera hueca. Cuando este mecanismo se llenaba de agua y se le aplicaba calor, se generaba vapor, el cual salía por los tubos haciendo girar la esfera sobre su eje.

Este artilugio no fue científicamente estudiado, y durante mucho tiempo se utilizó simplemente como un juguete de entretenimiento, sin embargo, actualmente está considerada como la primera máquina térmica de la historia.



Ilustración 1.5 Eolípila de Herón. Fuente: <http://quhist.com/wp-content/uploads/2012/07/Eolipila-197x300.jpg>

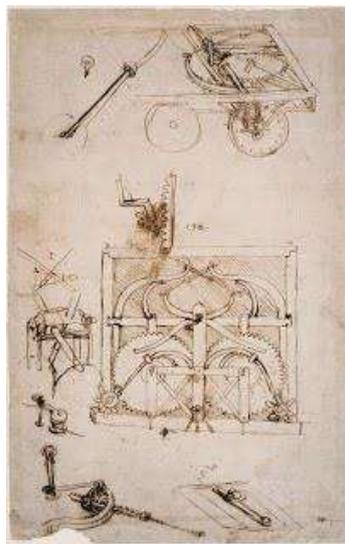
## PROYECTO FIN DE MÁSTER

### Timón aerodinámico para automoción

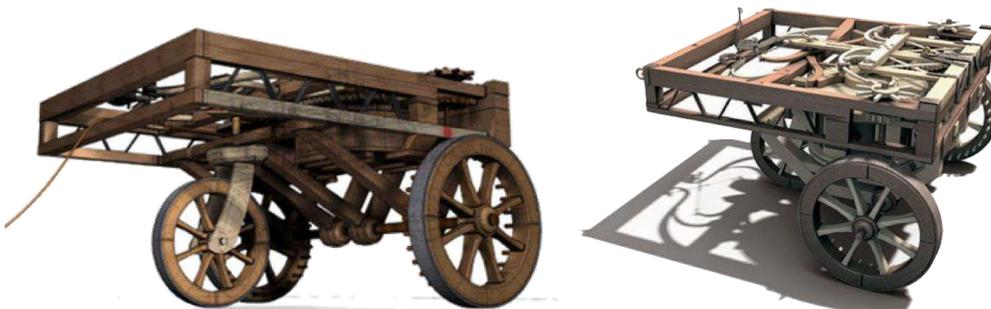
---

En 1478, el italiano Leonardo da Vinci, realiza el “Studio per carro automotore” (Estudio de un vehículo automotriz) y lo publicó en su obra “Códice del Atlántico”, aunque parece increíble, fue el pionero en el diseño del primer carro autopropulsado de la Historia, se trataba de un carro de madera de 1,68 metros de largo y 1,49 metros de ancho, contaba con varios muelles ballesta para regular el movimiento, se maniobraba por la actividad de unos resortes en espiral, que se conectaban a unas ruedas dentadas, que permitía desplazarse varios metros de manera autónoma, era semejante a un juguete de cuerda.

Este diseño no paso de los bocetos y nunca se logró recrear, fue en el siglo XX, cuando en el año 2004, unos científicos de un museo de Florencia, reprodujeron el vehículo siguiendo los planos originales y construyeron una réplica a escala 1:3, con medias de 50 cm por 60 cm, comprobando asombrados que funcionaba tal y como Leonardo Da Vinci esperaba. Este genio se adelantó 400 años a la invención del primer automóvil a combustión interna. Se supone que el objetivo de este artilugio era para impresionar a las personas de esa época, en los festivales cortesanos del Renacimiento, y no como finalidad de medio de transporte.



**Ilustración 1.6** Boceto de Leonardo Da Vinci. Fuente: <http://pelandintecno.blogspot.com.es/2011/04/carro-movil-de-leonardo-da-vinci.html>



**Ilustración 1.7** Vista de réplica carro de Leonardo Da Vinci. Fuente: <http://1769-ultradeportivosenlahistoria.blogspot.com.es/p/la-historia-de-los-coches.html>

En 1670, Isaac Newton, físico y matemático inglés, inspirándose en la “eolípila” de Herón, realizó un boceto de una máquina denominada el “carro de Vapor”. Basándose en la teoría de “la explosión trasera canalizada” apostó por la idea de conseguir que una máquina se moviera hacia delante. Este invento consistía en una simple caldera dispuesta sobre cuatro ruedas, con un sistema de propulsión, que se deslizaba debido a la reacción que sobre el aire actuaba un chorro de vapor a presión.

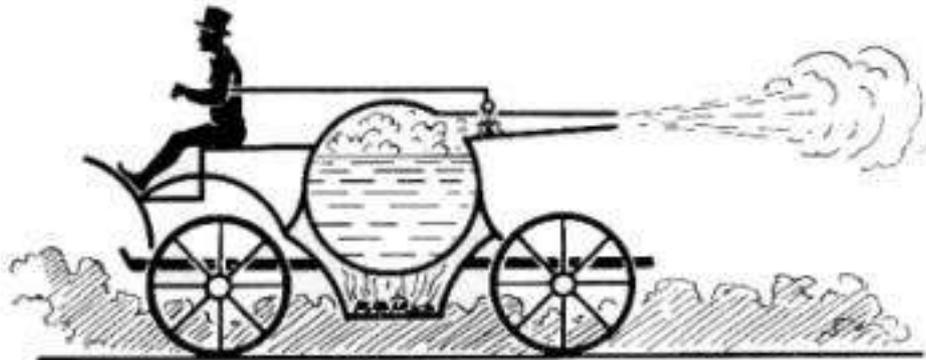


Ilustración 1.8 Boceto Carro de Vapor de Isacc Newtón. Fuente:  
<http://www.librosmaravillosos.com/inventos/capitulo09.html>

Se supone que el primer intento de vehículo propulsado a vapor fue en China, alrededor de 1672, por Ferdinand Verbiest, matemático y astrónomo, miembro de las misiones jesuitas, que describe en su libro “Astronomía Europea” un ingenioso dispositivo mecánico. Se trataba de una cámara esférica, que se calentaba por medio de un recipiente colocado en la base, el vapor que se generaba salía por un tubo con presión y velocidad suficiente para mover una rueda dentada, que a su vez hacía mover otras traseras conectadas a ésta. Se supone que la fabricación de esta especie de vehículo estaba destinado, simplemente, para ser un juguete del emperador chino.

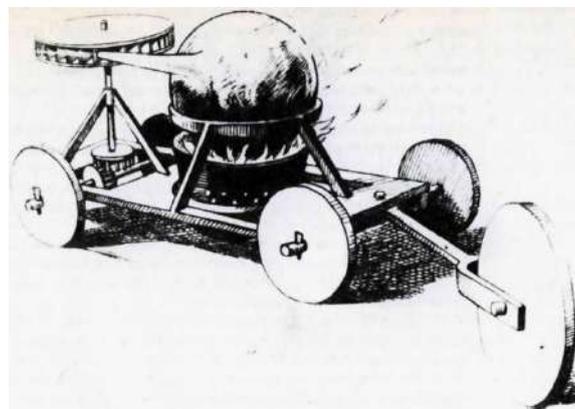
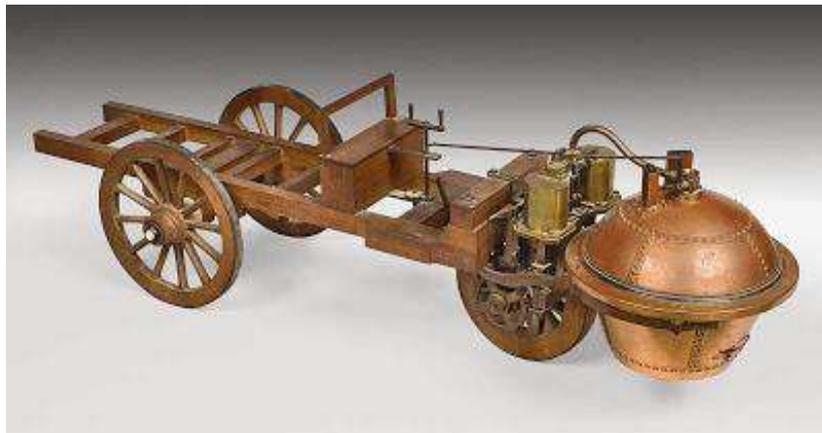


Ilustración 1.9 Carro de Ferdinand Verbiest Fuente:  
[http://www.autoviva.com/img/photos/658/ferdinand\\_verbiest\\_early\\_visionary\\_of\\_auto\\_motion\\_large\\_32658.jpg](http://www.autoviva.com/img/photos/658/ferdinand_verbiest_early_visionary_of_auto_motion_large_32658.jpg)

Según los historiadores y cronistas, los registros documentales más antiguos, acerca del uso de una fuerza motriz por el hombre, datan de 1769, cuando Nicolás-Joseph Cugnot, escritor e inventor, creó el “Fardier”, que significa “flotar”, primer vehículo movido por la fuerza del vapor, Cugnot era un ingeniero militar francés, que desde 1765, recibió instrucción por el Ejército Francés, de realizar diferentes pruebas de modelos de vehículos impulsados por motores de vapor con la finalidad de deslizar y transportar piezas de artillería.

El “Fardier a vapeur” era un triciclo ruidoso, y pesado, con ruedas de madera y llantas de hierro, sobre la rueda delantera tenía un enorme bidón que funcionaba como caldera de vapor, donde se introducía el carbón, por lo que se debía parar cada escasos metros, para rellenarla de nuevo. Era un coche enorme de 6 m de largo y 1m de ancho. A diferencia de los coches inventados después, curiosamente este vehículo contaba con freno y marcha atrás.



**Ilustración 1.10** Fardier versión 1769. Fuente: <http://1769-ultradeportivosenlahistoria.blogspot.com.es/p/la-historia-de-los-coches.html>

En 1770 construyó un segundo modelo, que permitía arrastrar 4,5 toneladas a una velocidad de 4 km/h, se dirigía mediante un timón, el movimiento de los pistones se transfería al eje, por medio de una rueda dentada, se trataba de un carro donde el motor estaba acoplado sobre los cigüeñales de las ruedas y su funcionalidad era el transportar cañones, constaba de tracción delantera y dos cilindros verticales. Esta segunda versión estaba mejorada porque el carbón se introducía de forma automática, era bastante más grande que la primera versión y arrastraba la misma cantidad de peso, pero provocaba menos humareda. Este prototipo, se destruyó al estrellarse contra una pared de ladrillo, considerándose el primer accidente automovilístico de la historia.



**Ilustración 1.11** Fardier versión 1770. Fuente: <http://1769-ultradeportivosenlahistoria.blogspot.com.es/p/la-historia-de-los-coches.html>



**Ilustración 1.12** Fardier versión 1771. Fuente: <http://tecnologia-lcp.orgfree.com/Documentos/Historia%20del%20automovil.pdf>

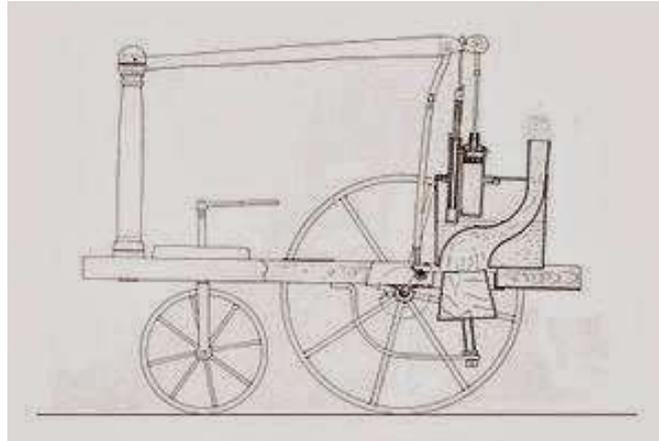
Pero en 1771, construyó una tercera y última versión, de menor tamaño que las anteriores versiones, pero no se sabe con seguridad que mejoras tenía respecto a las anteriores, los tres modelos se encuentran, en la actualidad expuestos en el Museo Nacional de la Técnica de París.

En 1784 el ingeniero e inventor William Murdoch diseñó un coche a vapor en Gran Bretaña, pero nunca se construyó, únicamente se realizó una reproducción a escala. Murdoch introdujo novedades como un cilindro oscilante que estaba metido parcialmente en la caldera y que contaba con una válvula de seguridad para evitar explosiones, y la iluminación de gas; hoy en día, podemos ver una miniatura de dicho vehículo, en el Museo Thinktank de ciencias de Birmingham.

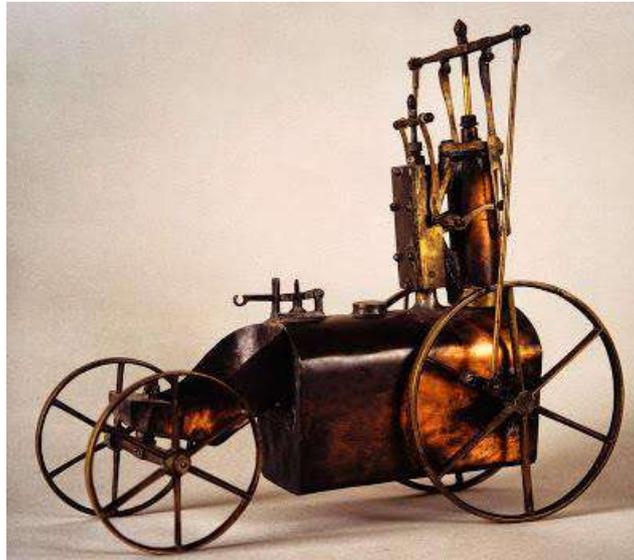
# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

---



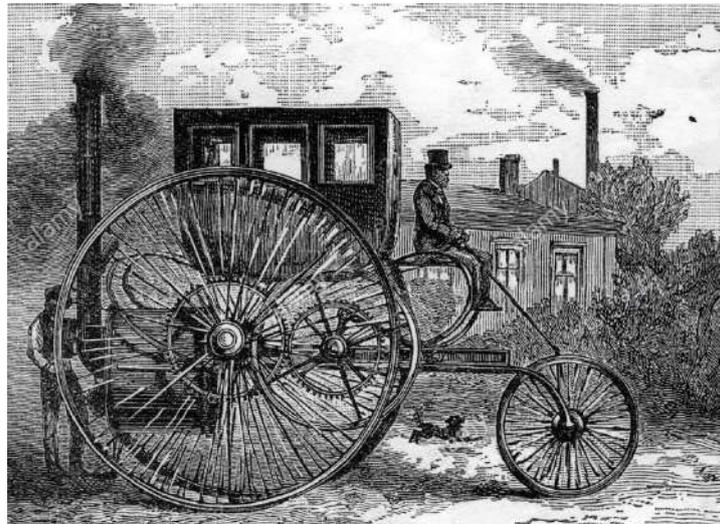
**Ilustración 1.13** Boceto del coche de Murdoch. Fuente: <http://1769-ultradeportivosenlahistoria.blogspot.com.es/p/la-historia-de-los-coches.html>



**Ilustración 1.14** Réplica del coche de Murdoch. Fuente: <http://1769-ultradeportivosenlahistoria.blogspot.com.es/p/la-historia-de-los-coches.html>

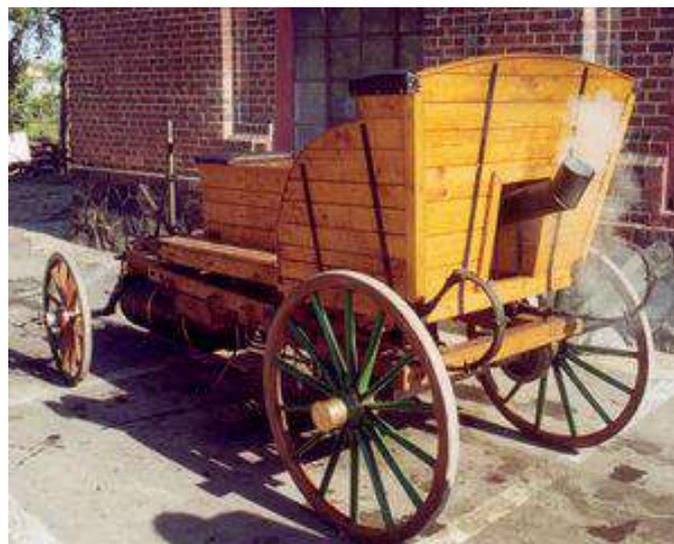
En 1797, Richard Trevithick, inventor británico, se inspiró en Murdoch y creó el primer vehículo a vapor, con buen rendimiento. Mediante una barra de hierro que estaba al rojo vivo, se metía en el tubo de calefacción y se calentaba la caldera. En 1801 transportó este mismo vehículo hasta Cambone (Reino Unido) y le colocó sobre ruedas, al cual llamó "Puffing Devil", que significa diablo humeante. Trevithick logró que el vapor que resultaba de los cilindros aflorara por la chimenea, de manera que, a través de este escape, se conseguía que el fuego se avivara. Pero este modelo perdía presión muy pronto, por lo que no era práctico y nunca fue sacado al mercado. La incorporación de una chimenea, si fue un invento importante para después, como idea en el desarrollo de la locomotora, cuando George Stephenson lo volvió a usar en 1816 en sus modelos.

En 1803 Trevithick construyó otro modelo, al cual llamó “London Steam Carriage”, inicialmente se trataba de una diligencia de correos. Este automóvil a vapor con forma de pequeña locomotora era más grande, silencioso, pesaba 1.520 Kgr. y alcanzaba una velocidad de 8 Km/h. Tenía capacidad para seis personas y era capaz de subir cuestas. Al público le gustó y tuvo buenas críticas de prensa, porque fue el primer coche con freno de mano, volante y velocidades, pero nunca se llegó a construir porque resultaba más caro que un carro de caballos.



**Ilustración 1.15** London Steam Carriage. Fuente: <http://www.alamy.com/stock-photo-trevithick-richard-1341771-2241833-british-engineer-inventor-his-steam-23528321.html>

En 1815 Josef Bozek, inventor checo, fabricó un automóvil, con motor propulsado con aceite, constaba de cuatro ruedas, lo mostró en Coto Real, Praga.



**Ilustración 1.16** Cuatro ruedas de Josef Bozek propulsado a aceite (1815). Fuente: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f1/Bozek%27s\\_steam\\_automobile.jpg/300px-Bozek%27s\\_steam\\_automobile.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f1/Bozek%27s_steam_automobile.jpg/300px-Bozek%27s_steam_automobile.jpg)

## PROYECTO FIN DE MÁSTER

### Timón aerodinámico para automoción

---

A partir de 1830, el inventor británico Walter Hancock, consiguió gran éxito con la construcción de un Faetón de cuatro plazas, impulsado por vapor, con una nueva caldera más sólida, manejable y eficiente, que soportaba altas presiones. Fue pionero del transporte público londinense, tenía funcionando dos vehículos a vapor, Era y Autopsy, que alcanzaban una velocidad de 32 km/h, y realizaban el recorrido entre Londres y Paddington.

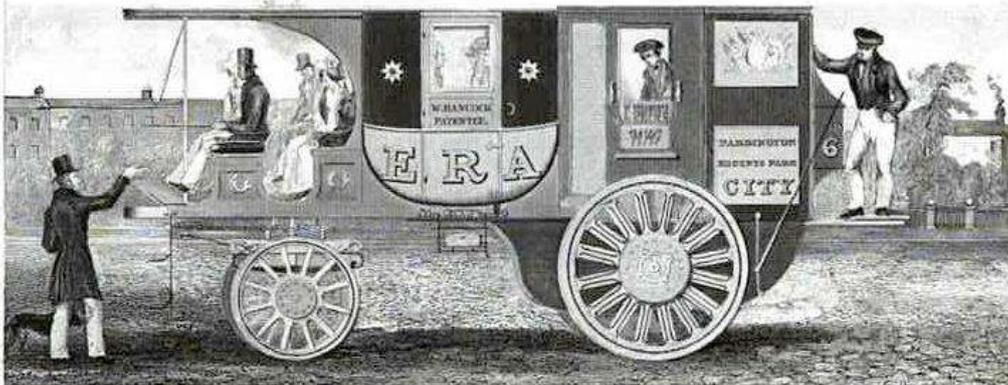


Ilustración 1.17 Coche a vapor de Walter Hancock. Fuente: <http://tourismisthenewblack.blogspot.com.es/2013/02/la-historia-del-automovil-foto-foto.html>

De 1832 a 1839, el inventor Robert Anderson creó un coche propulsado por células eléctricas, se trataba de un carruaje que constaba de un motor eléctrico que se alimentaba por una pila no recargable, llegaba alcanzar 6 Km/h. Se puede decir que fue el primer coche eléctrico de la historia.

En 1841, el escocés Robert Davidson, construyó una locomotora llamada "Galvani" que fue presentada en la Royal Scottish Society of Arts (Sociedad Real Escocesa de Artes). Era un vehículo de cuatro ruedas, de aproximadamente 7 toneladas de peso, que constaba de 2 pilas eléctricas que generaban electricidad a 8 electromagnetos fijos, que operaban sobre barras de hierro colocadas unidas a un cilindro de madera que estaba situado en cada eje de ruedas del vehículo, de tal manera conseguían girar. Era capaz de tirar una carga máxima de 6 toneladas y alcanzaba una velocidad de 6 km/h.

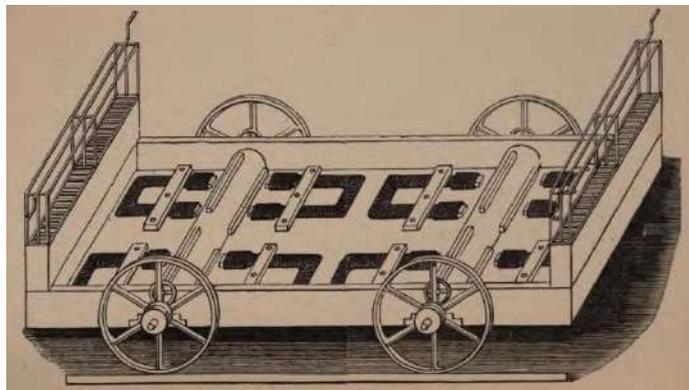


Ilustración 1.18 Locomotora de Robert Davidson. Fuente: [http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/402/vehiculo\\_electrico\\_robert\\_davidson\\_1841.jpg](http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/402/vehiculo_electrico_robert_davidson_1841.jpg)

En un principio, los vehículos tenían muchas semejanzas con los carruajes de caballos. Por ejemplo, las dimensiones de las ruedas, el pescante tan alto, la carrocería abombada, y el salpicadero, llamado así porque evitaba que las piedras que levantaban los caballos alcanzasen al cocherero. Actualmente, este nombre se ha reservado y se denomina así, al panel de instrumentos de un coche.

Los coches con motores a vapor presentaban ciertas complicaciones, debido al tiempo que se necesitaba en su inicio para su calentamiento, entonces se comienza a buscar una solución y sustitución para este tipo de motor a vapor.

A finales del 1859 y principios del 1860, Jean Joseph Étienne Lenoir, un belga inventó el primer motor de combustión de un cilindro y dos tiempos. Más tarde, en el año 1862, este motor lo acopló a un carro de tres ruedas, necesitaba como combustible gas hidrógeno, y lo denominó Hippomobile, que significa caballo móvil. Un año más tarde, realizó una prueba, viajando desde París a Joinville-le-Pont, localidad a 9 kilómetros de distancia, tardando 3 horas en ese recorrido.

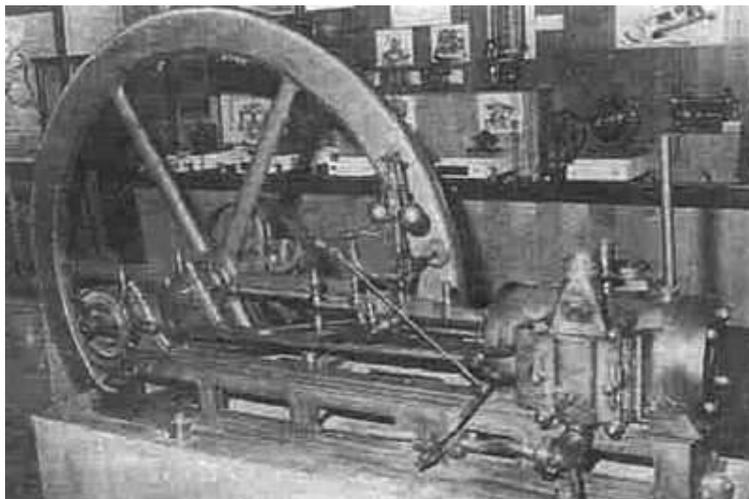


Ilustración 1.19 El motor de Lenoir en el Musée des Arts et Métiers, París. Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Jean\\_Joseph\\_Etienne\\_Lenoir#/media/File:Lenoir\\_Motor\\_2.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Jean_Joseph_Etienne_Lenoir#/media/File:Lenoir_Motor_2.jpg)

En 1863, fabricó otro carro con un motor de combustión interna mucho más eficiente, que funcionaba con benceno, un derivado de “hidrocarbón líquido” (petróleo). Muy importante es resaltar, que es el primer coche con un motor de combustión interna que requería como combustible petróleo. Efectuó otra prueba en el mismo recorrido, desde París a Joinville-le-Pont, consiguiendo realizar el trayecto en menor tiempo, pero este proyecto de motor, fracasó debido a varias causas como problemas en el sistema de encendido, su alto consumo, y la lenta velocidad del vehículo, pues no superaba a una persona caminando, tan solo, llegaba a una velocidad de 3,6 km/h, entonces abandonó el proyecto, dedicándose años después a desarrollar motores para barcos; sin embargo, años más tarde, nuevos inventores para crear sus modelos se inspiraron en estos motores.

## PROYECTO FIN DE MÁSTER

### Timón aerodinámico para automoción

---

Lenoir traspasó su patente a la Compañía Parisina de Gas, Compagnie Parisienne du Gaz.

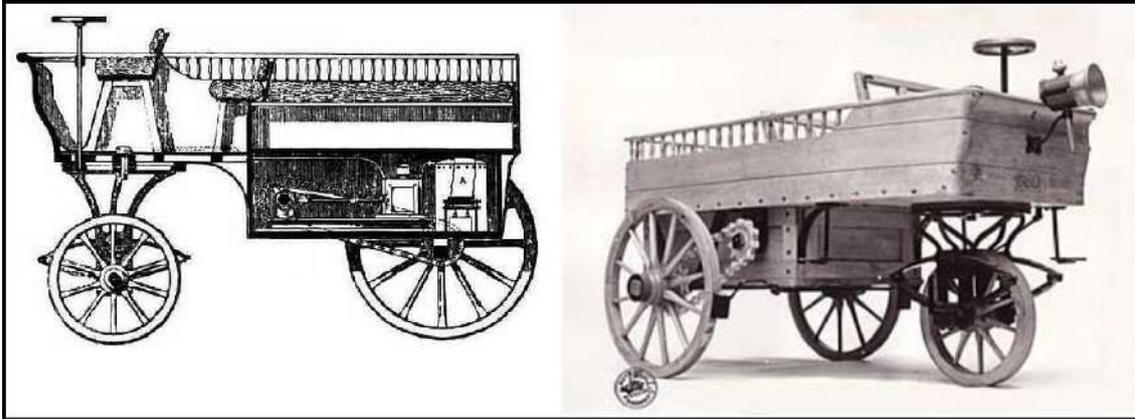


Ilustración 1.20 El hippomobile de Jean Joseph Etienne Lenoir. Año 1862. Fuente: [https://www.youbioit.com/files/newimages/5651/402/hippomobile\\_lenoir.jpg](https://www.youbioit.com/files/newimages/5651/402/hippomobile_lenoir.jpg)

En 1861, el alemán Nikolaus August Otto, conoció a Lenoir e inspirándose en el diseño de sus motores, realizó valiosos estudios sobre el motor de gas de carbón. En 1864, patentó el motor de combustión interna de dos tiempos, lo que le supuso, en la Exposición Mundial de París en 1867, el premio de una medalla de oro.

Fundó con otro ingeniero, Eugen Langen, la compañía NA Otto y cia. En 1876, Otto perfeccionó su motor de combustión interna a gasolina adaptando el motor de cuatro tiempos que había inventado Alphonse Beau de Rochas, ya que hasta entonces eran poco eficaces y gastaban mucho combustible.

En 1877 patentó su motor, en el cual un pistón se movía y mediante una válvula de admisión (1º tiempo), dejaba paso al combustible y aire en el cilindro, esta mezcla se comprimía cuando el pistón ascendía (2º tiempo), estando este pistón en el lugar más alto, el combustible entraba en combustión mediante una chispa que provocaba una explosión, de tal manera que empujaba el pistón hacia abajo produciéndose un movimiento mecánico de propulsión (3º tiempo), después a través de una válvula de escape, los gases del combustible quemado salían y se promovía la elevación del pistón (4º tiempo). A este proceso se le conoce como “Ciclo de Otto”; se repetía por medio de un sistema de bielas, que convertía el movimiento lineal del pistón en un movimiento circular de propulsión.

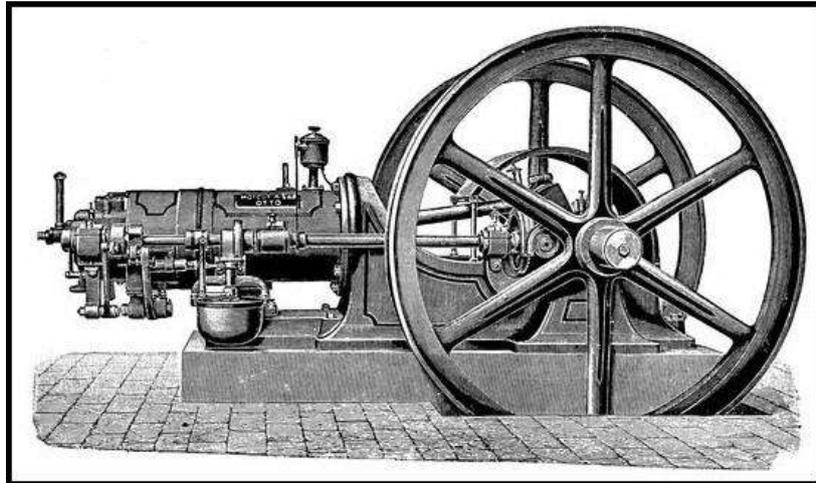


Ilustración 1.21 Primer motor de cuatro tiempos Otto. Fuente:  
[http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/403/primer\\_motor\\_otto.jpg](http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/403/primer_motor_otto.jpg)

En 1870, en Viena, según consta en documentos escritos y fotográficos, el inventor alemán-austriaco Siegfried Samuel Marcus, fue el primero que consiguió propulsar un carro de cuatro ruedas, con formato vertical y con un motor de combustión, usando gasolina. Le denominó "Marcus' first car", que significa primer coche de Marcus.



Ilustración 1.22 Marcus' first car 1870. Fuente:  
[http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/402/primer\\_siegfried\\_marcus.jpg](http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/402/primer_siegfried_marcus.jpg)

Esta nueva tecnología era mucho mejor en todos los aspectos, excepto en el sistema de arranque del vehículo, era lento y molesto, pues consistía en girar una manivela. Pero en 1883, Marcus lo mejoró mediante un sistema de ignición de bajo voltaje, llamado sistema magnético, el cual permitía generar una chispa rápidamente, evitando emplear demasiada fuerza en dicha manivela.

## PROYECTO FIN DE MÁSTER

### Timón aerodinámico para automoción

---

También estudió como remediar el excesivo gasto de combustible, desarrollando el motor de 4 tiempos. En el año 1887, Marcus se asocia con una empresa de origen moravo, Märky, Bromovsky & Shulz, el objetivo era producir motores de combustión interna a gasolina, en 1889, creó un nuevo modelo, al cual denominó Marcus' second car, que significa segundo coche de Marcos. Se presentó como un coche de madera y hierro, de cuatro ruedas para cuatro personas. Debido a su gran peso, bajo rendimiento y poco eficiente en terrenos accidentados, no llegó nunca a comercializarse. Actualmente se puede localizar en el Museo Tecnológico de Viena, en Austria.

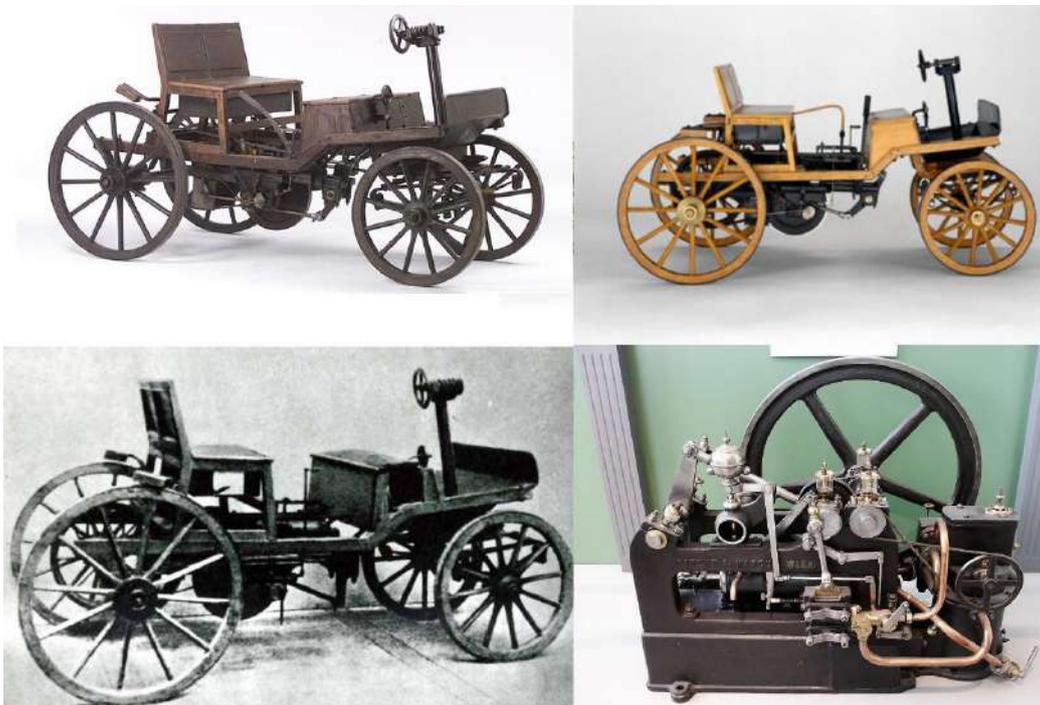


Ilustración 1.23 Marcus' second car 1888-1889 y motor. Fuente: [http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/402/segundo\\_automovil\\_siegfried\\_marcus.jpg](http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/402/segundo_automovil_siegfried_marcus.jpg)

En 1882, en Italia, un ingeniero Enrico Bernardi, patentó el diseño de un motor de combustión interna, de sólo 10 kg de peso, de ciclo Otto de cuatro tiempos y un tanque de combustible de 0,2 litros, lo instaló en una máquina de coser y lo llamó Motrice Pia (motor Pia); en 1884, construyó para su hijo, un triciclo al cual incorporó este motor de gasolina Motrice Pia, presentándolo en la Exposición Internacional de Turín, pero contaba con muy baja potencia, por lo que no tuvo éxito y no prosperó comercialmente.

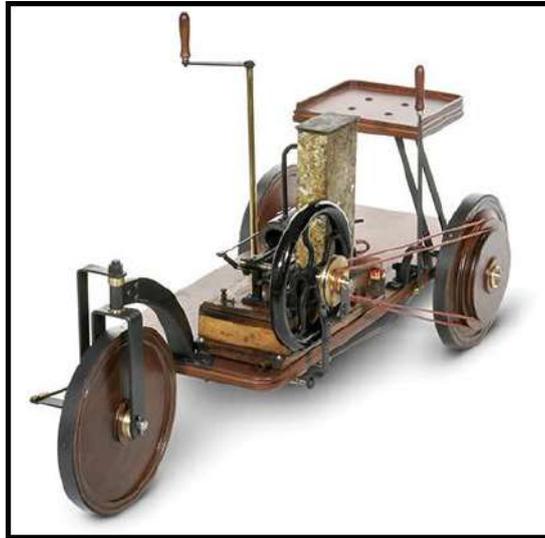


Ilustración 1.24 Motor Motrice Pia instalado en el triciclo de Bernardi. Fuente: [https://www.youbioit.com/es/article/25703/motrice-pia?size=\\_original](https://www.youbioit.com/es/article/25703/motrice-pia?size=_original)

El ingeniero alemán Karl Benz, impulsó el uso de motores de combustión interna a gasolina. Comenzó a desarrollar el motor de dos tiempos y en 1879 lo patentó. En 1882, en Manheim, fundó una fábrica de motores a gasolina con su esposa Bertha Ringer y Emil Bühler, pero Benz únicamente tenía el 5% de las acciones de la empresa y no se tenían en cuenta sus nuevos diseños, por lo que en 1883 dejó la empresa y el 1 de octubre de ese mismo año, junto a Max Kaspar Rose y Friedrich Eblinger, fundaron la empresa Benz & Company Rheinische Gasmotoren-Fabrik, donde obtuvo mayor seguridad y apoyo financiero, entonces Benz diseñó su primer coche con motor de combustión interna a gasolina, se trataba de un triciclo al que llamó Benz Patent-Motorwagen N 1 (Vehículo motorizado de Patente Benz), estaba equipado con un motor de Ciclo Otto de cuatro tiempos, colocado en la parte de atrás entre las dos ruedas

Este automóvil es catalogado como el primer vehículo propulsado por un motor de combustión interna, el más económico y eficiente hasta entonces inventado, alcanzaba 13 km/h de velocidad.

Actualmente, se puede ver el Museo Alemán Deutsches en Múnich. Benz obtuvo la patente el 29 de enero de 1886 y el 3 de julio lo enseñó al público.

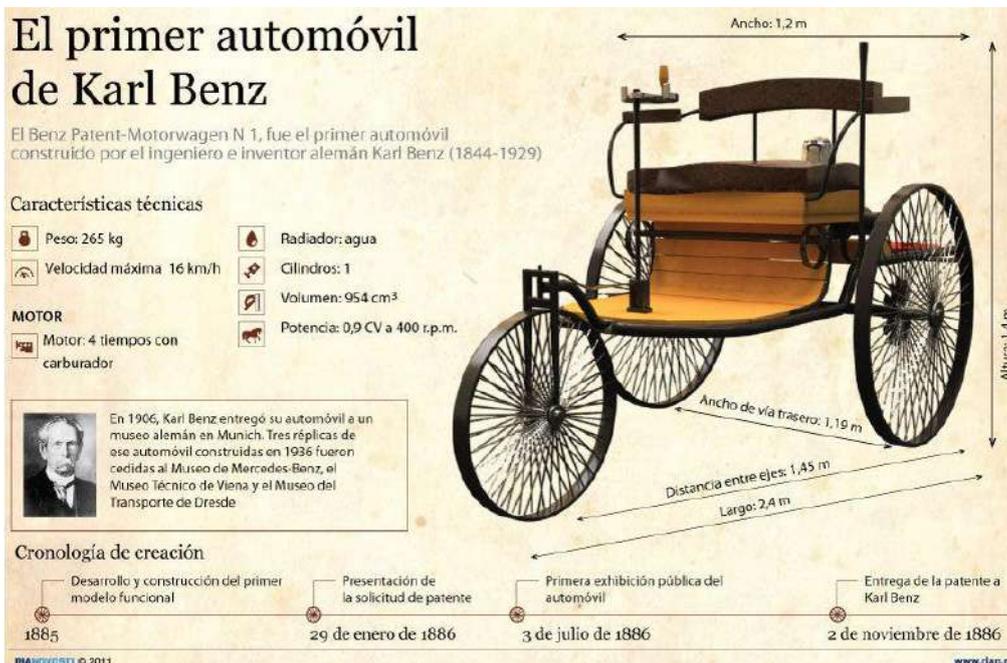


Ilustración 1.25 Patent-Motorwagen N 1. Fuente: <http://blogingenieria.com/wp-content/uploads/2012/03/Motorwagen-1886-Infografia.jpg>

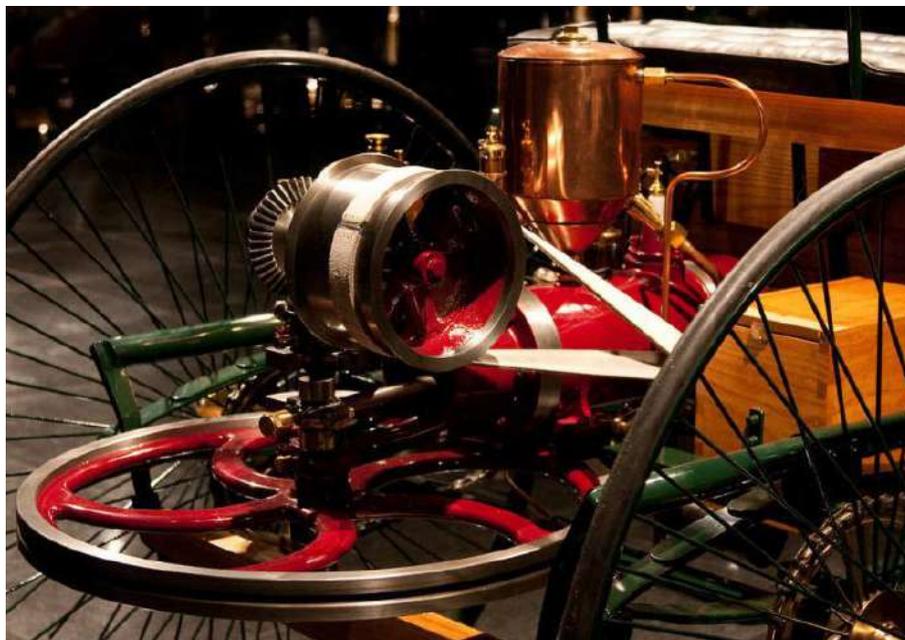


Ilustración 1.26 motor de Karl Benz. Fuente: <http://www.vix.com/es/btg/curiosidades/5911/quien-invento-el-primer-automovil-a-gasolina>

En 1886, Benz fabricó otro modelo con mejoras como la incorporación de un motor habilitado para producir 1,5 HP al cual llamó Motorwagen 2, más tarde en 1887 creó el Motorwagen 3, con un motor de 2 HP que conseguía alcanzar una velocidad de 16 Km/h. En 1889 fue expuesto en la Feria Universal de París.

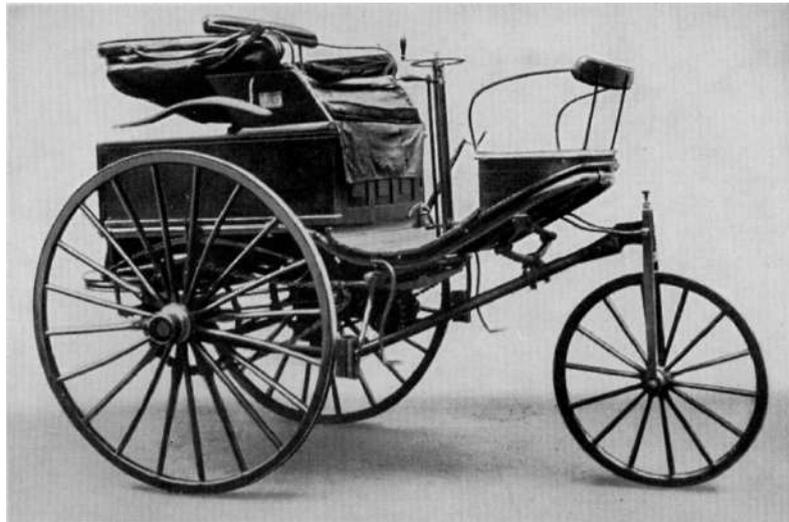


Ilustración 1.27 Benz Patent Motorwagen 3. Fuente:  
[http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/403/benz\\_motorwagen\\_3.jpg](http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/403/benz_motorwagen_3.jpg)

Los incipientes automóviles eran muy complicados de poner en marcha y dificultosos para su manejo. Pero según iban pasando los años, eran más prácticos y útiles. El automóvil se convirtió en un producto rentable. Se comienza a fabricar construcciones colectivas, en las que el propio inventor se encargaba de su construcción y después reparación. Los coches se empezaban a utilizar como medio de transporte, para reducir distancias y tiempos.

En Francia en 1888, sobresalieron fabricantes como Francois- René Panhard y Emile Levassor, pues crearon la empresa Panhard & Levassor fabricando motores de gasolina alemanes para Daimler. En 1891, desarrollaron el System Panhard, novedad que consistía en la disposición del motor en la parte delantera del vehículo, en frente del chasis; mediante un sistema de cadena se transmitía la tracción accionando las ruedas traseras. Este sistema fue todo un acierto y durante décadas fue copiado por otros fabricantes de coches.

En 1882, Daimler y Maybach fundaron un taller en Cannstatt, y tres años más tarde crearon un motor muy rentable, de combustión interna, con una fuerza de 1 Hp y 600 RPM. Tenía un formato vertical por lo que le denominó Standuhr, que significa reloj de pie.

## PROYECTO FIN DE MÁSTER

### Timón aerodinámico para automoción

---

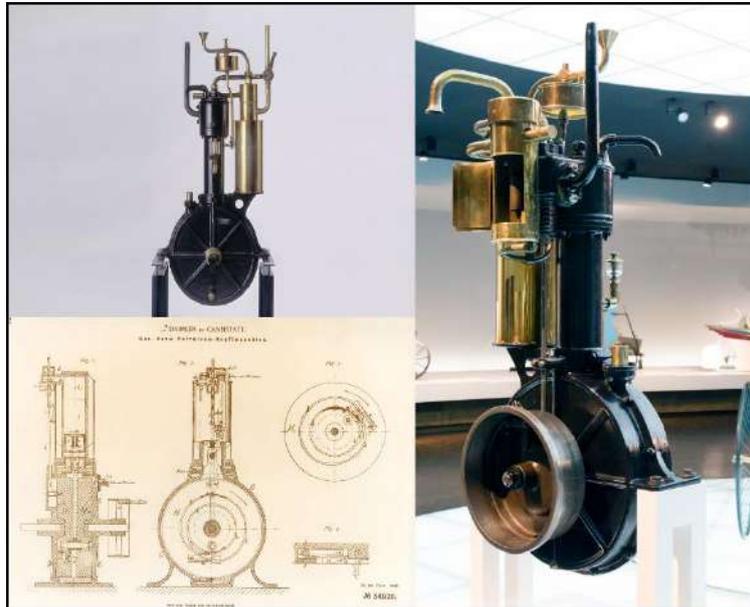


Ilustración 1.28 Primer motor a gasolina de Daimler y Maybach, el Standuhr (reloj de pie en alemán)  
Fuente: <http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/403/standuhr.jpg>

En 1885, con una versión más reducida de ese mismo motor lo instalaron en una especie de bicicleta, fabricando la primera motocicleta de la historia con motor de combustión interna, a la cual llamaron Reitwagen que quiere decir vehículo para montar. Más tarde, en 1889, Gottlieb Daimler y Wilhelm Maybach, de Stuttgart diseñaron un coche para ellos mismos.

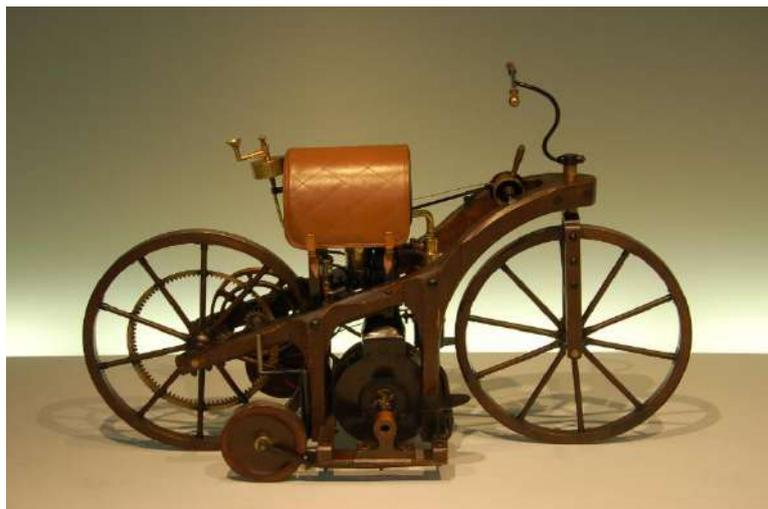


Ilustración 1.29 Reitwagen de Daimler y Maybach. Fuente: [http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/403/primera\\_motocicleta\\_reitwagen.jpg](http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/403/primera_motocicleta_reitwagen.jpg)

En 1886, Daimler y Maybach compraron una carroza de diligencia en la cual instalaron una versión más potente del motor Standuhr, además le añadieron una correa de transmisión, caja de velocidades y una palanca de dirección. Este vehículo llegaba a una velocidad de 18 km/h, siendo más rápido de aquella época.



Ilustración 1.30 Primer automóvil de Daimler-Maybach. Año 1886. Fuente: [http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/403/primer\\_automovil\\_daimler.jpg](http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/403/primer_automovil_daimler.jpg)

Tras el gran éxito de este coche, en 1887, Daimler y Maybach abrieron una empresa con 23 trabajadores donde fabricaban automóviles de manera masiva. En 1889 construyeron un automóvil muy liviano llamado Stahlrادwagen, que significa coche con ruedas de acero, fue presentado en la Feria Universal de Paris ese mismo año.

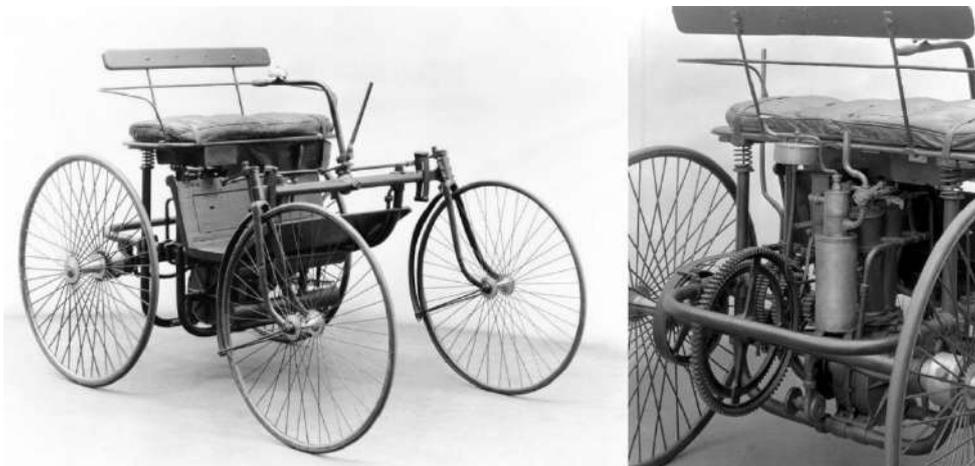


Ilustración 1.31 Daimler Stahlrادwagen del año 1889. Fuente: [http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/403/daimler\\_stahlrادwagen.jpg](http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/403/daimler_stahlrادwagen.jpg)

## PROYECTO FIN DE MÁSTER

### Timón aerodinámico para automoción

---

En 1890 fundaron la Daimler Motoren Gesellschaft, (Sociedad de Motores Daimler) o DMG, en Cannstatt, compañía que, 1899 años fabricó el primer automóvil de la marca Mercedes. Esta empresa se dedicaba a la fabricación de motores livianos y de alto rendimiento para vehículos de transporte terrestre, acuático y dirigibles aéreos, Daimler elaboró su representación plasmando una estrella de tres rayos, logotipo de la empresa que ha heredado Mercedes Benz.

En 1894, Maybach, Daimler y su hijo diseñaron un nuevo motor al que llamaron Phoenix (Fénix), que instalaron en 1897 a un nuevo vehículo para cuatro pasajeros, al cual llamaron Daimler Phoenix



Ilustración 1.32 Izquierda: Motro Phoenix. Derecha: Automóvil Daimler Phoenix. Fuente: [http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/403/daimler\\_phoenix.jpg](http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/403/daimler_phoenix.jpg)

Rudolf Diesel, un ingeniero alemán, trabajo en el perfeccionamiento de un motor que resultó más eficaz que los existentes hasta la época, consiguió que el encendido se produjera internamente, es decir, comprimía el aire en el interior de cilindro, lo calentaba hasta que el combustible que contactaba con el aire, se encendiera por sí mismo, justo antes del final de la etapa de compresión. En 1893 obtuvo la patente del motor que lleva su nombre, consistía en una combustión interna que trabaja sin bujías y disponía de autoencendido, algunos fabricantes utilizaron este motor y actualmente se sigue basando en su fundamento original.

En el año 1985, el francés Léon Bollé fabrica el primer automóvil con neumáticos de aire, al que llamó Voiturette, fue en esa época el coche más rápido.



Ilustración 1.33 Voiturette.1895. Fuente: <http://4.bp.blogspot.com/-ImAq6sNSKVg/UGBfUfv52oI/AAAAAAAAARY/mHgrLJzUbVE/s1600/1896-leon-bollee-voiturette.jpg>

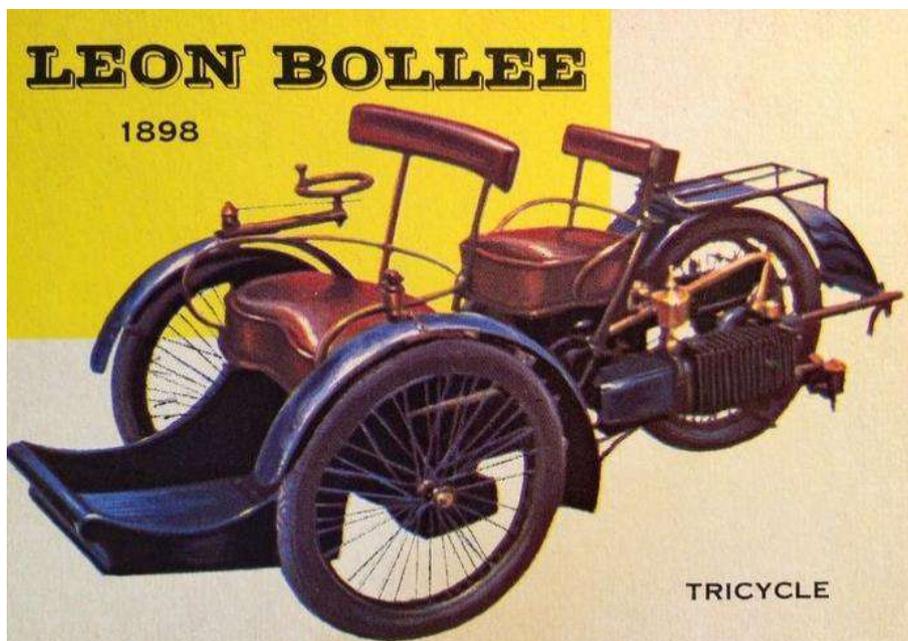


Ilustración 1.34 Primer coche con neumáticos de aire. Fuente: <https://i.pinimg.com/736x/2f/7b/a6/2f7ba61dc25261563e5dbdaab6a07bb0--tricycle-.jpg>

### 1.1.3 Etapa Veterana

Hacia 1900, la producción de automóviles empezó a masificarse, principalmente en Francia y Estados Unidos, se instituyen las primeras compañías como Panhard et Levassor (1889), Peugeot (1891), Renault, Opel y la italiana Automobili Torino (Fiat), a cargo de Giovanni Agnelli.

El 5 de agosto de 1888, Bertha Benz, sin conocimiento de su marido, realizó un viaje con sus hijos en el último modelo, Motorwagen 3, desde Mannheim a Pforzheim. Con este recorrido de 180 km, incluyendo la vuelta, demostró la viabilidad de este coche, puso de manifiesto el uso cotidiano del automóvil y surgió como efecto de campaña de publicidad. Como anécdota, redactar que tuvo que parar en una farmacia para comprar ligroína, también conocido como éter de petróleo, y recargar el tanque con este combustible. Desde entonces esta farmacia Stadt Apotheke, se supone como la primera estación de servicio de la historia y actualmente se puede visitar. La experiencia de este viaje, le sirvió a Benz para realizar mejoras en sus vehículos y un crecimiento de Benz y Cia, pues llegó a ser la fábrica de automóviles más grande del mundo. Karl Benz desde 1888, empezó a comercializar sus creaciones con mucho éxito, hasta llegar a ser una de las mayores empresas en la última década del siglo XIX.

Más tarde, en 1893, fabricó un modelo de cuatro ruedas, al cual llamo Benz Victoria y en 1895 creó un vehículo de tres ruedas, el Benz Velo. En 1899, se convirtió en un importante fabricante con una producción de 572 vehículos en Manheim.



Ilustración 1.35 Primera estación de servicio del mundo en Wiesloch, Alemania. Frente al edificio se encuentra un monumento conmemorativo del viaje de Bertha Benz. Fuente: [http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/403/primer\\_a\\_estacion\\_servicio.jpg](http://www.youbioit.com/files/newimages/5651/403/primer_a_estacion_servicio.jpg)

En Estados Unidos, Henry Ford, nacido en Detroit, pensó en un vehículo barato que fuese asequible para todo el mundo y no como hasta ahora, que el uso del automóvil, se reducía a unos pocos ricos. En 1908, La Ford Motor Company hizo realidad, este propósito con el Modelo T, contaba con un motor de cuatro cilindros, 20 CV de potencia, un peso de 540 Kg y podía alcanzar una velocidad de 71 Km/h. La clave del triunfo de Ford, fue la producción en serie, en una cadena de montaje, que abarató los costes, uso pintura negra, la más rápida en secar, por lo que se reducía también el tiempo de fabricación. Al principio, los trabajadores se iban moviendo por una línea de piezas y montajes donde cada obrero agregaba sólo un elemento o desarrollaba una tarea concreta. Pero algunos obreros resultaban más lentos y otros más rápidos, lo que entorpecía la producción. Debido a esto, Ford decidió trasladar el trabajo en lugar de los obreros, de tal manera que, estos trabajadores estaban situados en un puesto de trabajo y las piezas se movían en cintas transportadoras y llegaban hasta ellos. El vehículo en fabricación iba pasando entre los obreros sobre otra cinta transportadora y las diferentes piezas de carrocería se iban añadiendo en una línea, el motor y ruedas en otra, y así sucesivamente, hasta completar todo el coche, entonces se bajaba para unirlo al chasis en el suelo y así se realizaba el montaje final. Esta producción en serie, sustituyó al trabajo artesanal de los fabricantes y las cadenas de montaje se usaron mundialmente, terminando con las tradiciones artesanales que se habían dado durante siglos.

Las primicias de fabricación que utilizó Ford, es un sistema totalmente innovador, que prevalecen actualmente en la producción automovilística, en las modernas cadenas de montaje de hoy día, donde se emplean complejos robots para acelerar, abaratar y precisar cada operación.



Ilustración 1.36 Cadena de montaje. Fuente: <http://www.fierrosclasicos.com/wp-content/uploads/2014/10/V.jpg>

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

---



Ilustración 1.37 Modelo Ford de 1903. Fuente: [http://www.biografiasyvidas.com/monografia/ford/fotos/ford\\_1903.jpg](http://www.biografiasyvidas.com/monografia/ford/fotos/ford_1903.jpg)



Ilustración 1.38 Ford T. Fuente: <http://www.fierrosclasicos.com/wp-content/uploads/2014/10/DA2-e1412182019303.jpg>

Durante los primeros años del siglo XX, Francia era líder en la producción de la industria del automóvil, sin embargo, con la entrada de General Motors Corporation, ésta comenzó a absorber empresas y fábricas, llegando a adquirir más de veinte empresas, incluyendo Oldsmobile, Cadillac y Oakland, entonces Estados Unidos, se colocó a la cabeza. Durante gran parte de este siglo, esta empresa americana fue reconocida como el primer productor mundial de automóviles.

Se funda Chevrolet Motor Company, fue la firma Chevrolet, considerada la marca más vendida en ese siglo.

A mediados de siglo, los principales países productores de la industria del automóvil son: Estados Unidos, Francia, Gran Bretaña, Alemania e Italia.



Ilustración 1.39 Modelo Ford T año 1912. Fuente:  
<http://tourismisthenewblack.blogspot.com.es/2013/02/la-historia-del-automovil-foto-foto.html>



Ilustración 1.40 Modelo Ford T de 1914. Fuente:  
[http://www.biografiasyvidas.com/monografia/ford/fotos/ford\\_t\\_1914.jpg](http://www.biografiasyvidas.com/monografia/ford/fotos/ford_t_1914.jpg)

## PROYECTO FIN DE MÁSTER

### Timón aerodinámico para automoción

---

En 1898, Louis Renault abre un taller Paris, donde 60 empleados fabrican el modelo Voiturette Tipo A, llegando a producir 71 unidades.



Ilustración 1.41 Voiturette Tipo A. Fuente:

[http://bdc.autobild.es/sites/default/files/entities/1899\\_renault\\_type\\_a\\_voiturette.jpg](http://bdc.autobild.es/sites/default/files/entities/1899_renault_type_a_voiturette.jpg)

En 1898, los hijos de Adam Opel seguían la industria de su padre, con la construcción de bicicletas y máquinas de coser, pero debido a su desplome de ventas, deciden dedicarse a la fabricación de vehículos, y sacan un modelo el llamado Opel Patent Motorwagen, que supera los 100 C.V. En 1899, se crea la Fábrica Italiana Automobili Torino (FIAT).



Ilustración 1.42 Opel Patent Motorwagenque 1899. Fuente:

[http://bdc.autobild.es/sites/default/files/u266/1899\\_primer\\_opel\\_system\\_lutzmann .jpg](http://bdc.autobild.es/sites/default/files/u266/1899_primer_opel_system_lutzmann.jpg)

En 1924, se constituyó la compañía Daimler- Benz. En 1925, Ben & Cie y Daimler Motoren Gesellschaft se fusionaron de manera formal, adoptando el nombre de Daimler-Benz AG, pero a partir de esa fecha, acordaron que todas sus fábricas debían utilizar la marca de Mercedes-Benz en las futuras creaciones de automóviles.

### 1.1.4 Etapa del latón o Eduardiana

Este período se le conoce con este nombre, porque para la fabricación de las carrocerías de los automóviles era habitual el uso del material del latón.

Los vehículos que se construían en esta época contaban de elementos nuevos como parabrisas, morro etc. Pero sin embargo aún recordaban el diseño de los antiguos carruajes tirados por caballos.

En esta etapa se inició la producción de vehículos en cadena, esto promocionó y popularizó los automóviles, concretamente el Ford Model T, tras su éxito, llegó a la cifra de 1.800.000 unidades, un tercio de las ventas de todo el mundo.

En esta época Gottlieb Daimler construyó el primer camión de carga de la historia, que fabricó el mismo, para ello, usó un carro al que acopló un volante y un motor Phoenix de dos cilindros, la curiosidad de este motor es que podía utilizar tres tipos de combustibles: gasolina, queroseno y aceite de lámparas.



Ilustración 1.43 Cadillac TIPO T. Fuente: <http://2.bp.blogspot.com/-9BkExhKBZBk/UKefn-oj0PI/AAAAAAAAARg/NLo2g8WdO88/s1600/cadillac+type+t.jpg>

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

---



Ilustración 1.44 Renault AX de 1908. Fuente: <http://1769-ultradeportivosenlahistoria.blogspot.com.es/p/la-historia-de-los-coches.html>



Ilustración 1.45 Daimler-Motoren-Gesellschaft Truck. Fuente: <http://1769-ultradeportivosenlahistoria.blogspot.com.es/p/la-historia-de-los-coches.html>

### 1.1.5 Etapa de la Época

Este período se inicia al final de la Primera Guerra Mundial y llega hasta la Gran Depresión del 1929. Las fábricas de automóviles diseñan los automóviles desde cero, por lo que dejan de tener parecido con los carruajes de caballos. El primer vehículo que supuso un gran cambio con respecto al diseño de los anteriores fabricados fue el Cadillac Type 57, que constaba con un interior totalmente cerrado. Tal fue su éxito que se fabricaron varias versiones: 2 puertas con techo rígido cerrado, 4 puertas con techo de lona descapotable y 4 puertas con techo rígido cerrado.



Ilustración 1.46 Cadillac Type 57. Fuente: <http://hymanltd.com/wp-content/uploads/2016/12/5830.jpg>

En esta etapa los principales modelos que se fabricaron fueron:

- 1922 - 1939 Austin 7
- 1924 - 1929 Buggatti Type 35
- 1927 - 1931 Ford Model A
- 1930 Cadillac V-16



Ilustración 1.47 Austin 7. 1922-1939. Fuente: [https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/austin\\_seven\\_box\\_saloon\\_1933.jpg](https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/austin_seven_box_saloon_1933.jpg)

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

---



Ilustración 1.48 Bugatti Type 35 1924-1929. Fuente:  
[https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/bugatti\\_typ\\_35a\\_1925.jpg](https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/bugatti_typ_35a_1925.jpg)



Ilustración 1.49 Ford Model A. Fuente:  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0c/1928\\_Model\\_A\\_Ford.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0c/1928_Model_A_Ford.jpg)



Ilustración 1.50 Cadillac V-16. Fuente:  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1f/Cadillac\\_V-16\\_Roadster\\_1930.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1f/Cadillac_V-16_Roadster_1930.jpg)

### 1.1.6 Etapa Pre-Guerra

Esta etapa comprende desde el año 1929 hasta el 1949. En estos años se construyen los automóviles con distintas características, suelen ser cerrados y adoptan diseños con formas curvas y redondeadas.

Aunque Alemania no fue un país que destacará como primer productor de coches, fabricó en este período, en el año 1938, el modelo Volkswagen Käffer o también llamado Escarabajo, que fue calificado por muchas opiniones como el automóvil del siglo XX.

Durante la Segunda Guerra Mundial, surgen problemas económicos, sociales y políticos, existe un descenso ya que los fabricantes de automóviles disminuyen y reservan su producción, ya que la manufactura se dedica a material bélico.

Los vehículos más relevantes que podemos destacar son:

- 1932 - 1948 Ford B
- 1934 - 1940 Bugatti Type 57
- 1934 – 1956 Citroën Traction Avant
- 1938 – 2033 Volkswagen Beetle



Ilustración 1.51 Ford B. 1932-1948. Fuente:

[https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/250px-1932\\_ford\\_model\\_b\\_160\\_standard\\_fordor\\_sedan.jpg](https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/250px-1932_ford_model_b_160_standard_fordor_sedan.jpg)

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

---

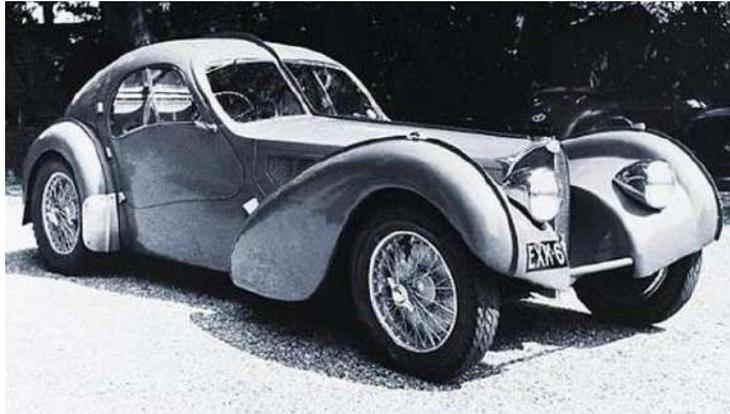


Ilustración 1.52 Bugatti 57. 1934-1940. Fuente:  
[https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/bugatti\\_t57\\_-4.jpg?w=600&h=400](https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/bugatti_t57_-4.jpg?w=600&h=400)



Ilustración 1.53 Citroën Traction Avant. 1934- 1956. Fuente:  
[https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/275px-traction\\_avant.jpg](https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/275px-traction_avant.jpg)



Ilustración 1.54 Volkswagen Tipo 1. 1938-2003. Fuente:  
[https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/vw\\_4.jpg](https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/vw_4.jpg)

### 1.1.7 Etapa Post Guerra

Este ciclo transcurre desde la Segunda Guerra Mundial, en 1948 hasta el inicio de la recuperación en la época moderna. Los automóviles de esta etapa son más seguros, robustos, rápidos y con unas prestaciones de funcionamiento más notables. Una vez acabada la guerra, las empresas norteamericanas Ford y General Motors aprovecharon para abstraer fabricantes más pequeños. Además, algunas marcas legendarias, con las dificultades de la post-guerra desaparecieron, también se caracterizan por fusiones y agrupaciones estratégicas, de las cuales algunas siguen actualmente.

Existen ya una gran variedad de modelos entre los que destacamos:

- 1948 – 1971 Morris Minor
- 1958 -1967 Chevrolet Impala
- 1959 – 2000 Mini
- 1961 -1975 Jaguar E-type
- 1962 -1977 BMC ADO16
- 1962 – 1964 Ferrari 250 GTO
- 1966 – 1972 Dodge Charger
- 1964 – 1970 Ford Mustang
- 1964 – 1974 Pontiac GTO
- 1954- presente Chevrolet Corvette
- 1969 Datsun 240Z



Ilustración 1.55 Morris Minor 1948 – 1971. Fuente:

[http://images.honestjohn.co.uk/imagecache/file/width/640/media/5558446/Morris%20Minor%201000%20\(1\).jpg](http://images.honestjohn.co.uk/imagecache/file/width/640/media/5558446/Morris%20Minor%201000%20(1).jpg)

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

---



Ilustración 1.56 Chevrolet Impala. Fuente: <https://sites.google.com/site/automovilhistoria/etapas-del-automovil>



Ilustración 1.57 Mini 1959 - 2000. Fuente: [http://www.carstyling.ru/resources/classic/1959\\_Austin\\_Mini\\_01.jpg](http://www.carstyling.ru/resources/classic/1959_Austin_Mini_01.jpg)



Ilustración 1.58 Jaguar E-type 1961 -1975. Fuente: <http://media.caranddriver.com/images/media/267321/1961-jaguar-e-type-road-test-review-car-and-driver-photo-568920-s-original.jpg>



Ilustración 1.59 BMC ADO16 1962 -1977. Fuente:

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/84/Austin 1300 GT 1971 Castle Hedingham 2008.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/84/Austin_1300_GT_1971_Castle_Hedingham_2008.JPG)



Ilustración 1.60 Ferrari 250 GTO 1962. Fuente:

[http://www.carstyling.ru/Static/SIMG/420\\_0\\_1\\_MC.jpg\\_W/resources/classic/large/62ferrari\\_250gto\\_7.jpg?C7762CCCC0350EA6F8C1D9FD3497FD3E](http://www.carstyling.ru/Static/SIMG/420_0_1_MC.jpg_W/resources/classic/large/62ferrari_250gto_7.jpg?C7762CCCC0350EA6F8C1D9FD3497FD3E)



Ilustración 1.61 Dodge Charger 1966. Fuente:

[https://static.cargurus.com/images/site/2007/03/30/17/30/1966\\_dodge\\_charger-pic-61301-640x480.jpeg](https://static.cargurus.com/images/site/2007/03/30/17/30/1966_dodge_charger-pic-61301-640x480.jpeg)

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

---



Ilustración 1.62 Ford Mustang 1964 – 1970. Fuente: <http://mustangsdaily.com/blog/wp-content/uploads/2013/08/1967-ford-mach-1-concept.jpg>



Ilustración 1.63 Pontiac GTO 1964. Fuente: <http://s.hswstatic.com/gif/1964-pontiac-gto-1.jpg>



Ilustración 1.64 Chevrolet Corvette 1954. Fuente: [https://www.minicar.es/large/Chevrolet-Corvette-\(1954\)-Autoart-118-i17750.jpg](https://www.minicar.es/large/Chevrolet-Corvette-(1954)-Autoart-118-i17750.jpg)

### 1.1.8 Etapa Moderna

La característica de esta época es que todos los modelos de automóviles fabricados constan de motores más eficientes, seguros, rentables y se buscan soluciones para que no provoquen apenas contaminación al medio ambiente.

Entre la gran variedad de modelos podemos destacar:

- 1948-1990 Citroën 2CV
- 1955-1975 Citroën DS primer automóvil con frenos de disco
- 1961-1992 Renault 4
- 1966 Dodge y Ford Mustang
- 1966 – presente Toyota Corolla
- 1970-presente Range Rover
- 1974–presente VW Golf
- 1975–1976 Cadillac Fleetwood Seventy-Five - uno de los autos más grandes fabricados.
- 1976–presente Honda Accord
- 1986–presente Ford Taurus
- 1993–presente Jeep Grand Cherokee



Ilustración 1.65 Citroën 2CV 1948-1990. Fuente:

<https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/250px-citroen2cvtf.jpg>



Ilustración 1.66 Citroën DS 1955-1975. Fuente:

[https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/250px-12-03-01-autostadtr-by-ralfr-25\\_6\\_7\\_8\\_9\\_fused\\_edit.jpg](https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/250px-12-03-01-autostadtr-by-ralfr-25_6_7_8_9_fused_edit.jpg)

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

---



Ilustración 1.67 Renault 4 1961-1992. Fuente:  
[https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/250px-renault\\_4\\_av.jpg](https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/250px-renault_4_av.jpg)



Ilustración 1.68 Toyota Corolla 1966. Fuente:  
[https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/250px-2014\\_toyota\\_corolla\\_le\\_eco.jpg](https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/250px-2014_toyota_corolla_le_eco.jpg)



Ilustración 1.69 Range Rover 1970. Fuente:  
<https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/r1bc1.jpg>



Ilustración 1.70 VW Golf 1974. Fuente: [https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/250px-vw\\_golf\\_1\\_v\\_sst.jpg](https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/250px-vw_golf_1_v_sst.jpg)



Ilustración 1.71 Cadillac Fleetwood Seventy-Five 1975-1976. Fuente: <https://marygarcia1661.files.wordpress.com/2015/02/descarga-2.jpg>



Ilustración 1.72 Honda Accord 1976-presente. Fuente: [http://static.cargurus.com/images/site/2008/05/25/00/26/1976\\_honda\\_accord-pic-22010.jpeg](http://static.cargurus.com/images/site/2008/05/25/00/26/1976_honda_accord-pic-22010.jpeg)



Ilustración 1.73 Ford Taurus 1986. Fuente: [http://momentcar.com/images600 /ford-taurus-1986-1.jpg](http://momentcar.com/images600/ford-taurus-1986-1.jpg)



Ilustración 1.74 Jeep Grand Cherokee 1993. Fuente: <https://manuals.co/desktop/images/info/694.jpg>

En la década de los 80, surge un nuevo mercado en la industria del automóvil, el japonés, que tomó tal importancia, que empresas norteamericanas y europeas adoptaron técnicas que usaban los técnicos orientales, para poder seguir en primera línea del mercado.

Surgen conceptos como la producción just-in-time (método justo a tiempo) que comenzó en las fábricas japonesas y consiste en producir bajo pedidos reales, es decir, fabricar las unidades que se necesitan en cada momento, y los principios Kaizen, paradigma japonés, que se basa en una filosofía de vida, donde siempre hay que pensar que debe existir mejoras, buscar objetivos en la calidad de los productos para alcanzar el éxito deseado, actualmente estos dos conceptos se emplean universalmente.

Hoy en día, se están realizando estudios para llegar a la perfección de vehículos híbridos, con motores eléctricos, donde el mercado oriental destaca.

Los motores eléctricos, en los últimos años han ido evolucionado positivamente, pues cada vez son más fiables.

Últimamente, se están desarrollando automóviles donde se prescindiría del conductor, utilización de motores de hidrógeno, etc.

Cada día se siguen estudiando nuevos proyectos para implantar mejoras en los distintos modelos de automóviles, así como progresos en la seguridad de las personas.



Ilustración 1.75 Coche híbridos y eléctricos. Fuente: <https://noticias.coches.com/wp-content/uploads/2015/05/GC-coches-hibridos.jpg>

### 1.1.9 Resumen de los principales acontecimientos de la historia del automóvil

- Siglo XV Leonardo da Vinci diseña un prototipo de automóvil.
- Siglo XVII Isaac Newton diseña un automóvil a vapor.
- Siglo XVIII Primer vehículo de vapor construido: se llamó Fardier
- Siglo XIX:
  - 1830 Se establecen líneas regulares de diligencias a vapor en Inglaterra
  - 1855 Primer automóvil a vapor en España: el locomóvil
  - 1864 Primer vehículo con motor de combustión interna
  - 1876 Primer motor de cuatro tiempos
  - 1883 Se crea Benz & Company
  - 1890 Se crea la Daimler Motor Company
  - 1893 Se crea la Ford Motor Company
  - 1898 Se crean Renault y Opel
  - 1899 Se crea la FIAT
- Siglo XX:
  - 1901 Se crea la Hispano-Suiza
  - 1908 Se empieza a producir el modelo T-Ford en serie.
  - 1914 La guerra trae consigo avances tecnológicos para la industria del automóvil
  - 1923 Se utilizan los primeros neumáticos de baja presión
  - 1926 Se crea en España el Circuito Nacional de Firmas Especiales, que agrupa las carreteras y regula su mantenimiento.
  - 1931 Con la Segunda República comienza en España el fenómeno de los domingueros y su consecuencia, los atascos.
  - 1934 Se aprueba el primer Código de la Circulación en España
  - 1950 Se crea la SEAT 1959 Nace la Dirección General de Tráfico
  - 1963 Primera autopista de peaje en España
  - 1973 Crisis del petróleo
  - 1989 Nuevo Plan General de Carreteras españolas
  - 2000 Carreteras inteligentes

---

Fuente: [http://www.aula-abierta-dgt.es/recursos/adultos/adultos\\_nivel3/nivel3\\_sociales\\_05.pdf](http://www.aula-abierta-dgt.es/recursos/adultos/adultos_nivel3/nivel3_sociales_05.pdf)

## 2 AERODINÁMICA

La palabra aerodinámica procede del griego: aerios, referente al aire y dynamis, relativo a fuerza. De tal manera que, se puede definir como la parte de la mecánica de fluidos, ciencia que estudia los fenómenos que se originan cuando existe un sólido en movimiento y le rodea un fluido gaseoso, como el aire, se determinan los diferentes fenómenos físicos y su interacción como las presiones y fuerzas que se generan en torno al cuerpo en movimiento.

El estudio de la naturaleza, ya había puesto de manifiesto con los pájaros y los peces el perfil idóneo para desplazarse en los fluidos, pero hubo que esperar varias décadas para que estos conocimientos se emplearan en la forma de las carrocerías de los coches.

Un coche para avanzar, debe desplazar un volumen considerable de aire y vencer la resistencia que éste le ofrece, además de facilitar que se vuelva a rellenar el vacío formado tras de sí. La aerodinámica se aplica al diseñar la carrocería de un vehículo, puesto que la forma de ésta, influye en mayor o menor facilidad para que el vehículo se desplace en una corriente de aire, pero además posee una importancia decisiva en otras cuestiones como las prestaciones, la estabilidad y el consumo del combustible.

El estudio de la resistencia al viento de los automóviles, la búsqueda de rendimiento y eficacia, a lo largo del tiempo, ha llevado a diferentes resultados estéticos en las carrocerías de los coches.

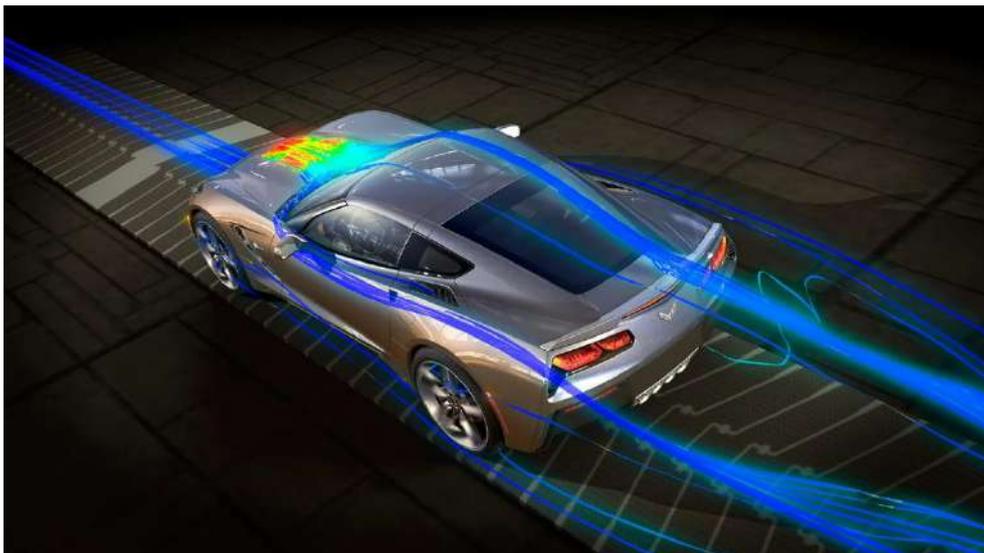


Ilustración 2.1 Aerodinámica del Chevrolet Corvette. Fuente: <http://2.bp.blogspot.com/-miHBeoTQKLk/UmFlqr2gu3I/AAAAAAAAAyY/w6dHN5Hwkqg/s1600/2014-Chevrolet-Corvette-012.jpg>

## 2.1 Historia de la aerodinámica

Los automóviles utilizados en competición son monoplazas con la última tecnología disponible, muchas de estas mejoras que se han ido desarrollando en la Formula 1, han acabado siendo aplicadas a vehículos comerciales, como el freno de disco, el cambio de levas o los conceptos aerodinámicos.

En el pasado, la industria automotriz enfocaba el diseño y construcción de un vehículo en un objetivo, conseguir mayor velocidad, por lo que únicamente se preocupaban de la fabricación de motores con mayor potencia. La historia de la aerodinámica comienza cuando se inicia la competencia entre vehículos, y se desea alcanzar record de velocidad, entonces los fabricantes prestan interés en el estudio de la forma de la carrocería para complementar a la potencia del motor y conseguir mejores resultados.

Se debe tener en cuenta que el nacimiento y desarrollo de la aerodinámica, donde tuvo su mayor avance fue en la industria de la aviación. Muchos ensayos y descubrimientos de inventores como Leonardo Da Vinci, Isaac Newton, George Cayley, Charles Renand, Wenham, los hermanos Wright, etc; fueron exponentes de esta ciencia.

A lo largo del tiempo, se han ido creando diferentes formas aerodinámicas, en los autos de competición, con el propósito de conseguir mayor velocidad, esto nos permite observar cronológicamente el avance que han ido teniendo los vehículos, los elementos aerodinámicos y la historia de los record de velocidad.

El primer indicio de carrocería con forma aerodinámica, fue en 1898 cuando un francés, el Conde Gastón de Chasseloup-Laubat utiliza un coche eléctrico, “el Jeantaud” y consigue el primer record con 92,696 km/h.

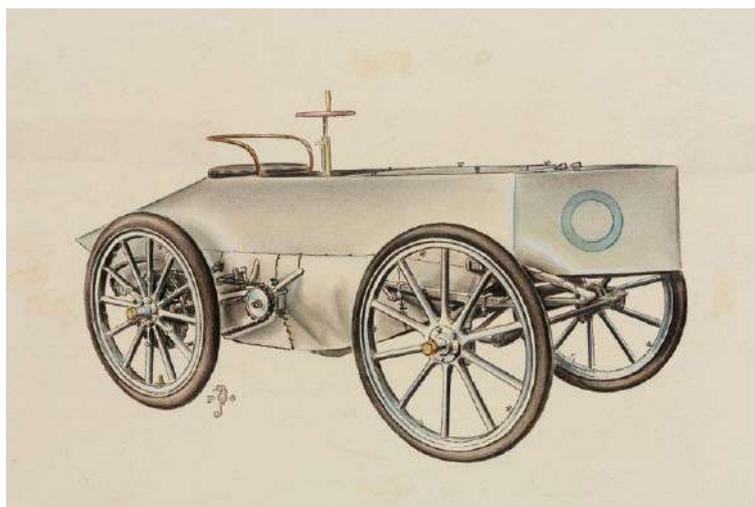


Ilustración 2.2 Jeantaud. Fuente:

<http://www.redbull.com/es/motorsports/stories/1331738647711/coches-mas-rapidos-del-mundo-historia-records-velocidad>

Después el 29 de abril de 1899, el belga Camille Jenatzy, un ingeniero de la Compañía Internacional de Transporte Automóviles, creó y pilotó un coche equipado con dos motores eléctricos, al que llamo “La Jamais Contente” (la Nunca Satisfecha), con una carrocería de aleación ligera de aluminio, tungsteno y magnesio, y una línea muy revolucionaria en esa época, ya que, tenía forma de bala o torpedo, su objetivo era hacerlo lo más aerodinámico posible, pero su alto chasis y la posición del piloto, contrarrestaron esta intención. Fue el primer coche que alcanzó los 100 km/h, alcanzando el record de 105,852 km/h. Actualmente se halla expuesto en el museo del automóvil de Compiègne, en Francia.

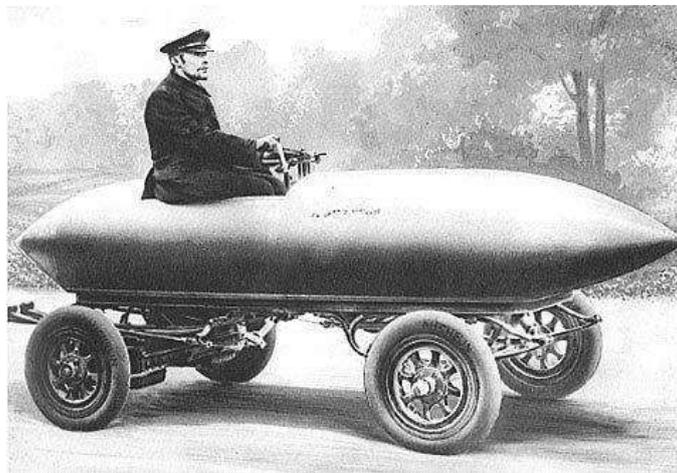


Ilustración 2.3 La Jamais Contente 1899. Fuente: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ea/Jamais\\_contente.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ea/Jamais_contente.jpg)

En 1902, Walter C. Baker, construyó un automóvil eléctrico de carreras con un formato de carrocería muy aerodinámico, en forma fusiforme, al que llamo “Torpedo”, el motor se alojaba detrás de los asientos, en el centro del coche. Fue el primer coche equipado con cinturones de seguridad y cabina protegida, alcanzaba los 120 km/h., pero lamentablemente quedó destruido porque tuvo un accidente, se salió de la carretera atropellando a dos espectadores.

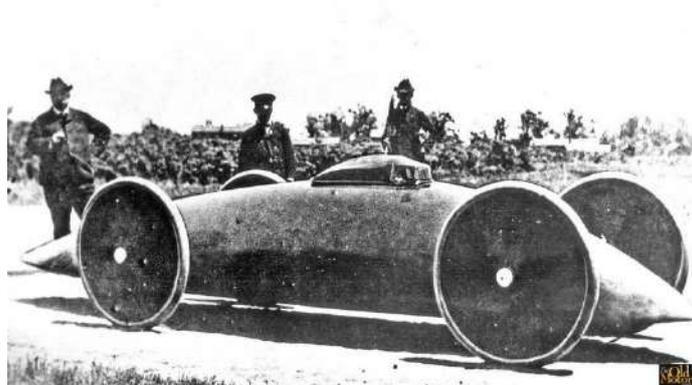


Ilustración 2.4 Torpedo 1902. Fuente: <http://theoldmotor.com/wp-content/uploads/2015/07/bk11-1080x650.jpg>

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

---

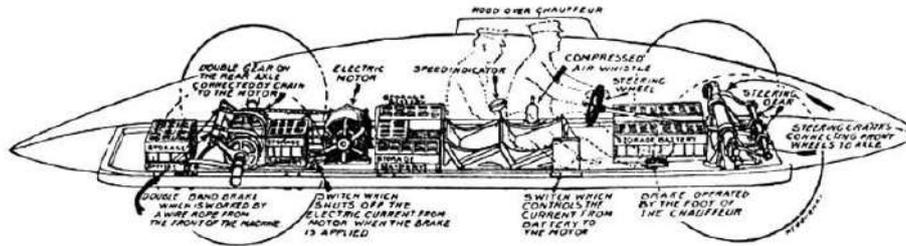


Ilustración 2.5 Detalles del modelo torpedo 1902. Fuente: <http://theoldmotor.com/wp-content/uploads/2015/07/mw.jp>

Al año siguiente Baker mejoro el primer modelo, creando el “Torpedo Kid”, una versión de menor tamaño, con el que consiguió bastantes éxitos en Estados Unidos.

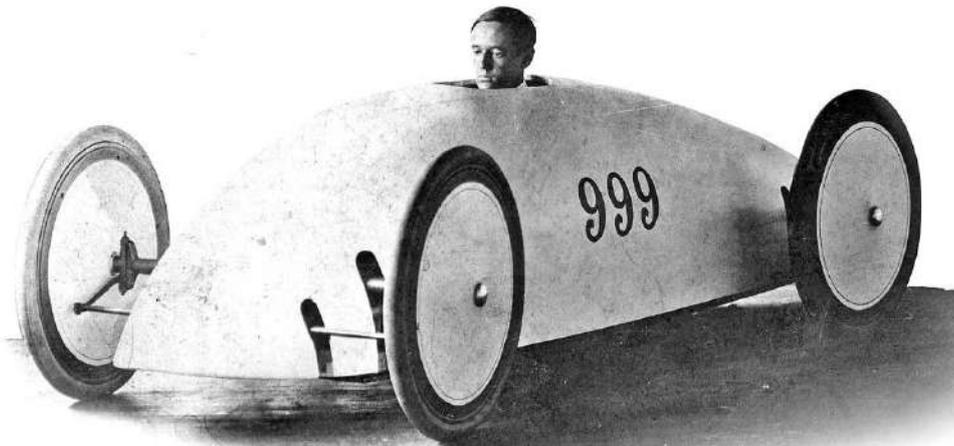


Ilustración 2.6 Torpedo kid 1903. Fuente: <http://theoldmotor.com/wp-content/uploads/2015/07/bk9.jpg>

En Julio de 1904, el piloto Rigolly Mors en Niza, conduciendo un automóvil llamado Gobron-Brillié, fabricado por la Societé des Moteurs Gobron-Brillié, superó los 161 km/h, constaba de un motor de naftalina de cuatro cilindros y una carrocería de diseño aerodinámico muy innovador, pues imitaba en la parte delantera la proa de un barco.



Ilustración 2.7 Gobron-Brillié 1904. Fuente: [http://image1.redbull.com/rbcom/010/2015-07-31/1331738383278\\_3/0010/1/1400/933/3/el-gobron-brilli%C3%A9-el-primer-coche-que-rompi%C3%B3-la-barrera-de-las-100-mph.jpg](http://image1.redbull.com/rbcom/010/2015-07-31/1331738383278_3/0010/1/1400/933/3/el-gobron-brilli%C3%A9-el-primer-coche-que-rompi%C3%B3-la-barrera-de-las-100-mph.jpg)

En 1906, el estadounidense Fred Marriott, logró el récord de velocidad de 205,5 km/h, en el Course Road Daytona Beach con el coche Stanley Rocket, el coche de vapor más rápido de la historia.



Ilustración 2.8 Stanley Rocket 1906. Fuente: [http://image3.redbull.com/rbcom/010/2015-07-31/1331738383571\\_3/0010/1/800/533/3/el-stanley-rocket-rompió-el-récord-de-velocidad-a-127-mph-en-1906.jpg](http://image3.redbull.com/rbcom/010/2015-07-31/1331738383571_3/0010/1/800/533/3/el-stanley-rocket-rompió-el-récord-de-velocidad-a-127-mph-en-1906.jpg)

En 1909, el Blitzen Benz, construido por Hans Nivel, diseñador de Benz & Cie en Mannheim, tenía una carrocería ancha y redondeada por abajo y puntiaguda por arriba, imitaba la forma de gota, constaba de una suave suspensión delantera, y llevaba ruedas lenticulares, un anexo muy precoz a su época.

## PROYECTO FIN DE MÁSTER

### Timón aerodinámico para automoción

---



Ilustración 2.9 Blitzen Benz 1910. Fuente: [http://www.3dtotal.com/admin/new\\_cropper/gallery\\_736/2013-06-24\(141185\)\\_001small.jpg](http://www.3dtotal.com/admin/new_cropper/gallery_736/2013-06-24(141185)_001small.jpg)

En 1923, se construyó el Bugatti Tank Type 32 “ala cortada” llamado popularmente, “el tanque de Tours”, se creó para disputar en el Gran Premio de Francia Tours. Se adelantó varias décadas a los primeros Formula 1 aerodinámicos, pues su diseño con un perfil en forma de un ala de avión, su escaso peso de la carrocería de aluminio completamente cerrada, mejoró su resistencia al aire, y determinó ser un coche muy aerodinámico y muy rápido, alcanzando la velocidad de 190 km/h. El problema de este diseño fue que, al llegar a altas velocidades, el coche tendía a elevarse de trompa.

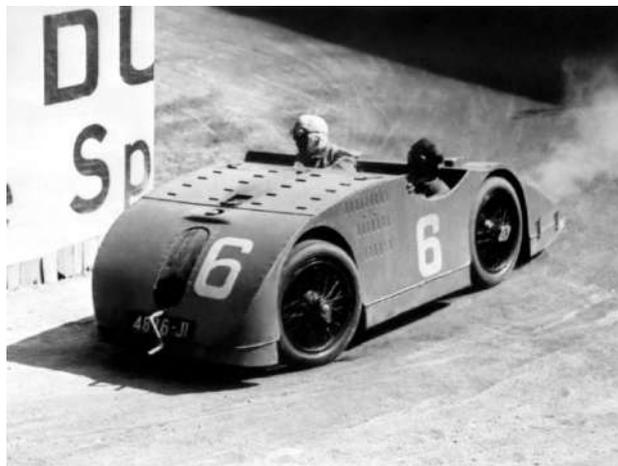


Ilustración 2.10 Bugatti Tipo 32. 1923. Fuente: <http://historygarage.com/wp-content/uploads/2016/07/1923-Bugatti-Type-32-Tank.jpg>

El Vousin Laboratoire, fue construido en 1923, por el constructor de aviones Gabriel Voisin y sus mejores ingenieros, André Lefebvre y Marius Bernard, para el Grand Prix del Automóvil Club de Francia. Inspirado en la aeronáutica fue el primer diseño de carrocería realizada de aluminio remachada directamente como la tecnología de las aeronaves. Su forma evidencia las teorías aerodinámicas de la época.



Ilustración 2.11 Voisin Laboratoire 1923. Fuente: <http://cdn.revivaler.com/wp-content/uploads/2016/01/1923-Voisin-C6-Laboratoire-1923-Voisin-C6-Laboratoire-recreation-auto100.com .jpg>

Ya en la década de los 30, se estableció una relación entre la ingeniería náutica y aeronáutica con el automóvil. Los técnicos de fabricación observaron que las formas menos angulosas y un perfil mucho más suave aportaba beneficios en el rendimiento del coche, se realiza el chasis con forma de gota, muy favorable en su resistencia al aire.



Ilustración 2.12 Chasis con forma de gota. Connaught A 1952. Fuente: <https://prezi.com/by9te9niqaqs/aerodinamica-en-la-formula-1/>

En 1930, el Benz Trophenwagen, fue un automóvil diseñado por Ferdinand Porsche y Willy Walb, fue el primer coche con el motor ubicado detrás del piloto, tenía aspecto de lágrima, con una carrocería de formas curvas, en el capo, habitáculo y cola. Fue construido en la fábrica de aviones Rumpler en Berlín y se le aplicó el streamlining como a los aviones de esa época

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

---

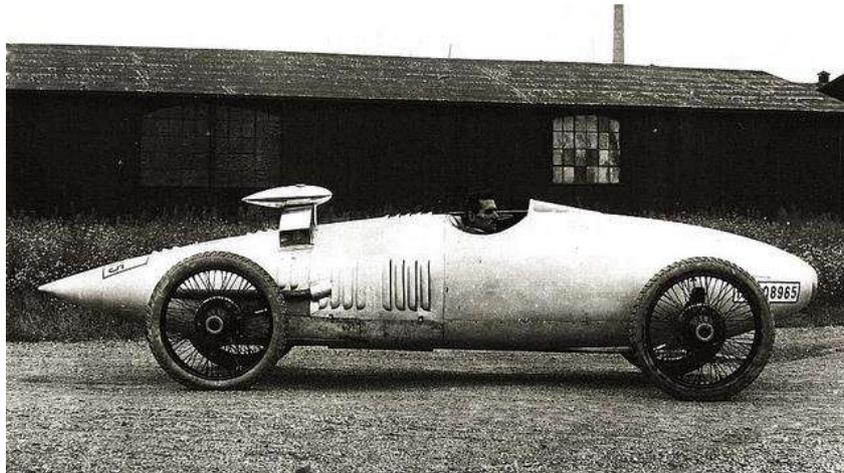
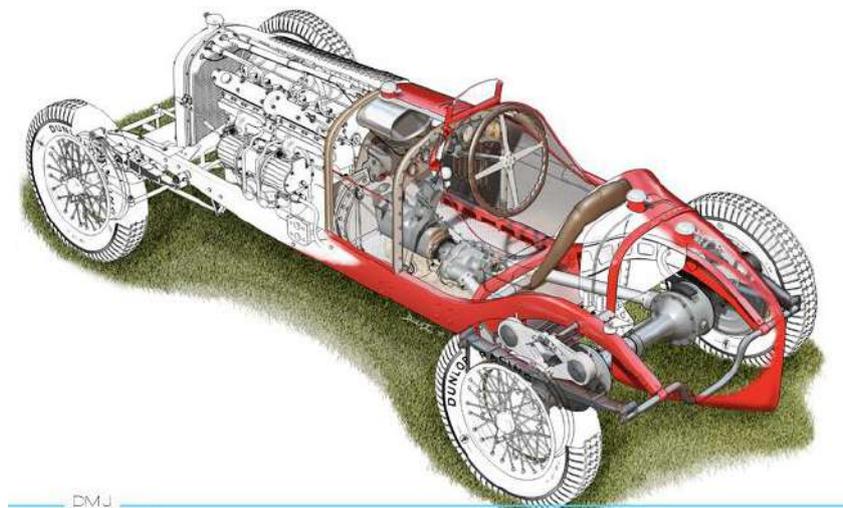


Ilustración 2.13 Benz Tropfenwagen RH 1930. Fuente: <https://cochesclasicosdehoy.files.wordpress.com/2013/01/1923-benz-tropfenwagen.jpg>

Empresas como Mercedes, Alfa Romeo y Ferrari, fabricaron automóviles con este mismo objetivo de diseño fisionómico, que influyeron en la evolución de la aerodinámica.



DMJ  
ILLUSTRATION

Ilustración 2.14 Alfa Romeo P3 1930. Fuente: [http://www.dmj-illustration.co.uk/illustrations/automotive/alfa\\_p3\\_01.jpg](http://www.dmj-illustration.co.uk/illustrations/automotive/alfa_p3_01.jpg)

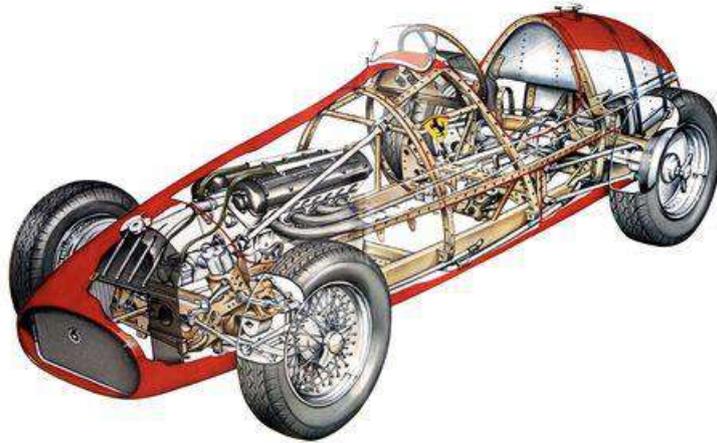


Ilustración 2.15 Ferrari 500 1952. Fuente: <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/474x/97/e8/8c/97e88c165b5e450c72b6b05b46410c7d.jpg>

Wunibald kamm, ingeniero alemán y diseñador de automóviles, demostró cual era el diseño más eficiente, denominada Kammback design, una carrocería de contornos suaves en forma de media lágrima que se remata en una cola que después se corta abruptamente, de tal manera que el aire fluye igual de suave, pero no se dan las turbulencias al final de la carrocería.



Ilustración 2.16 Vanwall GP 07 1957. Fuente: <http://www.grandprixhistory.org/images/vanwall.jpg>

En los años 50 se inicia el World Sport Car Championship, considerada la primera competición automovilística. Los diseñadores comienzan a mejorar el coeficiente aerodinámico y minimizar la resistencia con el aire, presentan proyectos con menor área frontal, tratan de esterilizar los automóviles y construirlos lo más bajos posibles; pero el problema surgía a altas velocidades que el coche se levantaba, entonces aparece un nuevo concepto a estudiar, que es la producción de una fuerza aerodinámica hacia abajo (sustentación negativa). Aflora la inclusión de los primeros elementos aerodinámicos, llegando a extremos porque no existía limitaciones reglamentarias.

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

---

En 1956, el ingeniero suizo Micheal May fue el primero que instaló un alerón invertido encima de su Porsche Type 550, con el objetivo de crear sustentación negativa que pegase el coche al suelo, e incrementar la velocidad en las curvas. Enseguida se dio cuenta de los beneficios que aportaba, sin embargo, los organizadores de la carrera no le permitieron correr alegando que el alerón reducía la visión a los demás pilotos que iban detrás de él. Este elemento aerodinámico obtuvo críticas negativas, por lo que los ingenieros desestimaron la idea y se dedicaron a mejorar la forma del automóvil.



Ilustración 2.17 Porsche Type 550 1956. Fuente: <http://type550.com/wp/wp-content/uploads/2009/10/May.jpg>

En 1959, Jack Brabham pilotó el Cooper Climax T51 en Monaco, fue el primer automóvil con el motor ubicado en la parte posterior. A partir de los años 60, comienza la revolución de los motores traseros, de tal manera que, esto potenció el estudio del diseño de la carrocería delantera del coche para optimizar la separación del fluido.

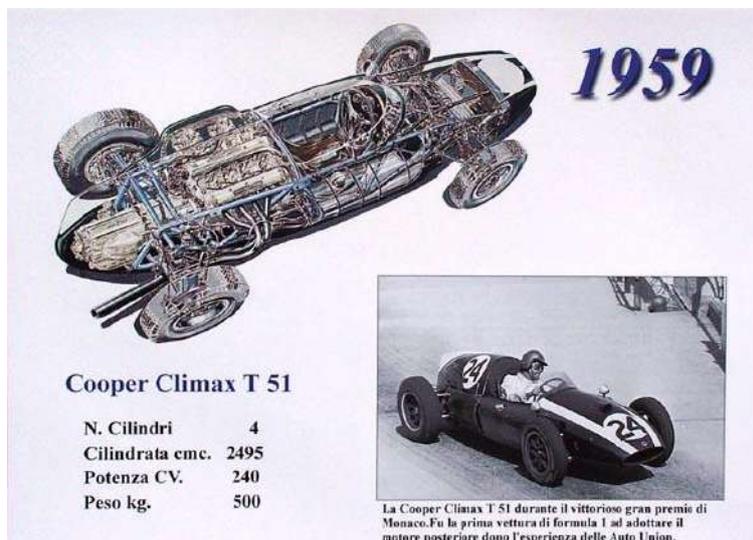


Ilustración 2.18 Cooper Climax T 51 1959. Fuente: <http://racem.org/wp-content/uploads/2015/02/Cooper-climax-4.jpg>



A inicios de los años 60, comienza la introducción de elementos aerodinámicos en los coches, la forma de la carrocería cuenta con diferentes formas y alerones para aumentar la eficiencia de los coches. No existe una reglamentación que imponga una limitación de estos anexos por lo que se dieron cambios exagerados, como el caso del modelo Mercedes Benz T-80, al que se incorporó un motor de avión, tal y como se utilizaba en los aviones de combate Messerschmitt Me 410. Contaba con un chasis tubular y la carrocería cubría por completo las ruedas delanteras con tapabarros redondeados, se le añadieron dos alas a la mitad del vehículo a modo de estabilizadores, para perfeccionar la carga aerodinámica.

Este coche contó con la aprobación de Adolf Hitler, al cual llamó “Pájaro negro”, quiso pintarlo con colores nacionalistas, incluyendo el águila alemana pero lamentablemente, estalló la guerra en Europa y el intento de récord se suspende. El motor del Mercedes T80 se quitó para servir como repuesto en una unidad de aviación, actualmente este coche se encuentra en el museo de Mercedes-Benz.

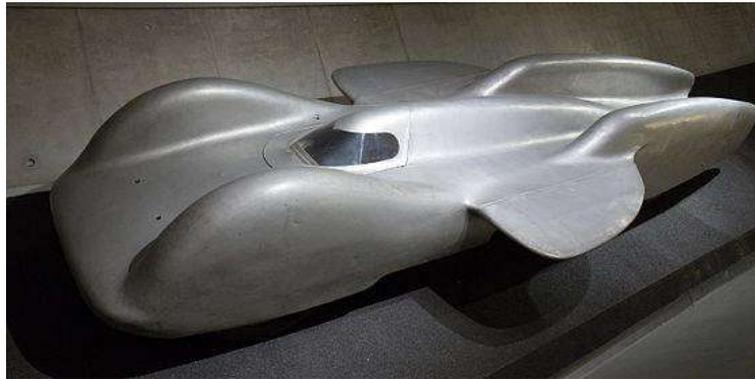


Ilustración 2.19 Mercedes-Benz T80. Fuente :

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8d/Mercedes-Benz\\_T80\\_front-left\\_Mercedes-Benz\\_Museum.jpg/560px-Mercedes-Benz\\_T80\\_front-left\\_Mercedes-Benz\\_Museum.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8d/Mercedes-Benz_T80_front-left_Mercedes-Benz_Museum.jpg/560px-Mercedes-Benz_T80_front-left_Mercedes-Benz_Museum.jpg)

Más tarde, a mediados de 1960, cambia la forma de la carrocería, los diseñadores buscaban un coeficiente de penetración mayor, entonces se plantea alargada y estrecha, lo que se llamó “forma de cigarrillo”. En esta década, la seguridad era pésima, los neumáticos eran altos, estrechos y carecían de agarre.

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

---



Ilustración 2.20 Forma de cigarro. Ferrari 312 1966. Fuente: <https://prezi.com/by9te9niqaqs/aerodinamica-en-la-formula-1/>

En 1962, Colin Chapman junto al experto en aerodinámica Fran Costin fabricaron el Lotus 25, el coche más rígido y más fuerte estructuralmente de la época. Fue el primer diseño de chasis monocasco.

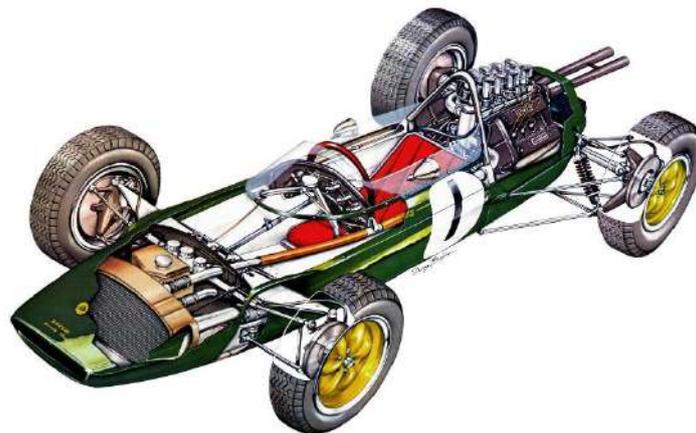
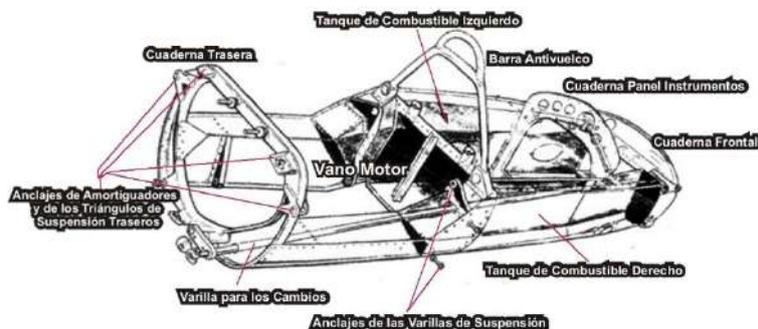


Ilustración 2.21 Lotus 25 1962. Fuente: <http://k38.kn3.net/6/1/E/B/C/2D.jpg>



cocho57

Ilustración 2.22 Chasis monocasco del Lotus 25. Fuente: <http://k42.kn3.net/6/9/0/6/9/F/BD7.jpg>

Los coches deportivos eran, cada vez, más potentes y alcanzaban velocidades hasta más de 300 km/h, pero tenían el peligro de que tendían a elevarse de trompa; por este motivo, los ingenieros indagaban por crear una fuerza de sustentación negativa, es decir, buscan un apoyo extra para que el coche se agarre al suelo.

El ingeniero Jim Hall, que diseñaba y pilotaba sus propios autos, en 1966, acopló un enorme alerón a su vehículo llamado “Chaparral”, el cual presentó en el circuito de Bridgehampton, en New York, este coche pasó a la historia como el primer coche de carreras con alerón. Después de visualizar y valorar los buenos resultados obtenidos, el alerón se comenzó a utilizar a nivel general.

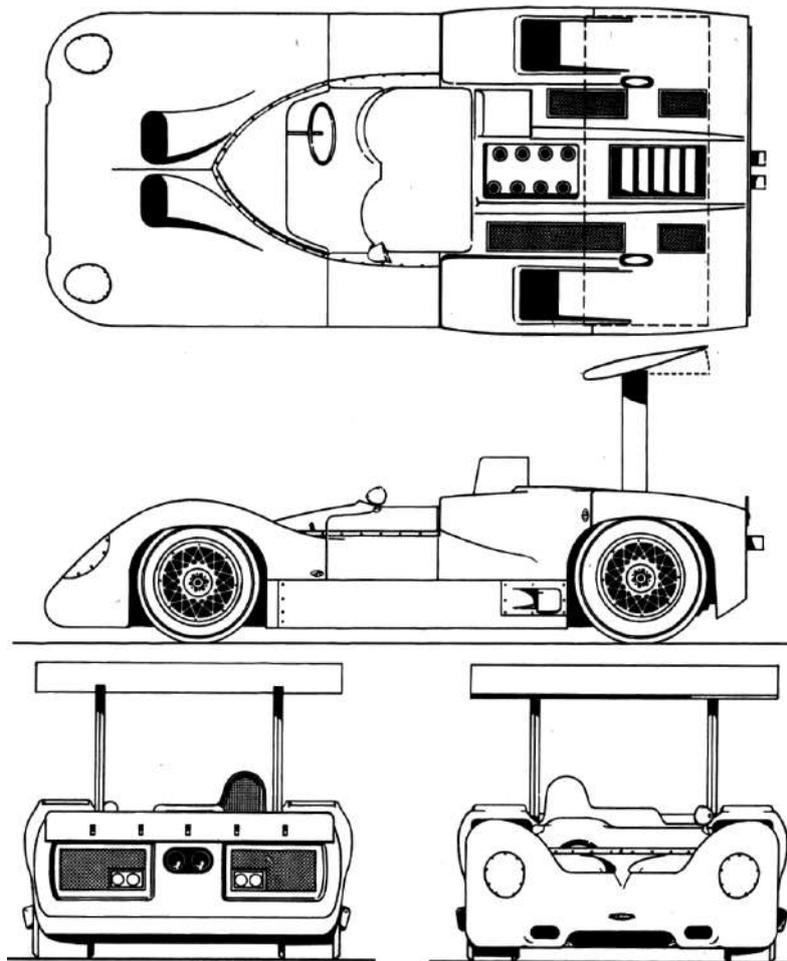


Ilustración 2.23 Chaparral 2 F 1966. Fuente: <http://www.taringa.net/posts/autos-motos/12127707/Los-alerones-en-la-Formula-1.html>



Ilustración 2.24 El Chaparral 2F 1966. Fuente:  
<http://m.forocoches.com/foro/showthread.php?t=4716122>

La Comisión Sportif Internationale, el brazo técnico de la FIA, autorizó la utilización de alerones, puesto que los coches de carreras alcanzaban mayor velocidad y era necesario una mayor estabilidad.

Escuderías como Brabham y Ferrari adoptaron rápidamente la idea, acoplando sólidos alerones traseros a sus coches, que proporcionaba mayor agarre. La mayoría de estos alerones, estaban fabricados por Rolls Royce en madera de roble.

A finales de los 60, se comienza a experimentar con diferentes modelos de alerones, los ingenieros tratan de generar una fuerza descendente para empujar al coche hacia el suelo, de tal manera que los monoplazas adquieran adherencia y pueden tomar las curvas a mayor velocidad, a esta fuerza se le llama downforce.

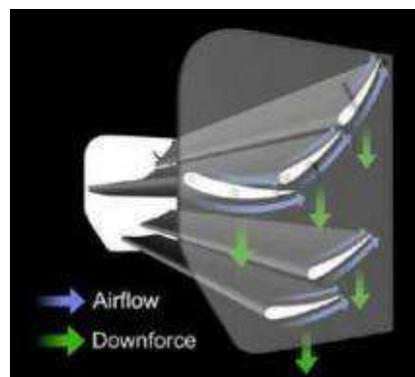


Ilustración 2.25 Efecto downforce. Fuente:  
<https://soloformula1.files.wordpress.com/2007/08/downforce.jpg?w=416&h=189>



Ilustración 2.26 Brabham Bt26 1968. Fuente: <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/26/91/99/269199e3ebcd6585a811eb5a9726e289.jpg>

Se dieron casos desmedidos, como en el elemento del coche Brabham F2, con un alerón biplano de exageradas medidas.



Ilustración 2.27 Brabham Bt26 GP 1968. Fuente: <http://www.papercraftsquare.com/wp-content/uploads/2016/05/F1-Paper-Model-1968-Red-Bull-Brabham-BT26-Paper-Car-Vehicle-Paper-Model.jpg>

El nacimiento del alerón trasero forzó a los ingenieros a tener que añadir otro en la parte delantera, surgió la aparición del alerón delantero. Pues el alerón trasero descompensaba al coche generando una falta de adherencia en el tren delantero, sobre todo al tomar las curvas, por este motivo se empezaron acoplar pequeños aditamentos metálicos muy simples, que con el paso del tiempo fueron evolucionando y cada vez surgen diseños más complejos y funcionales. El objetivo de los técnicos era organizar la mayor cantidad del flujo del aire posible, por encima del suelo, con la finalidad de que llegase a la parte trasera del vehículo y así aumentar la carga.

## PROYECTO FIN DE MÁSTER

### Timón aerodinámico para automoción

---

A partir de 1968, se incrementa la instalación de elementos aerodinámicos, como se pudo observar en el Gran Premio de Mónaco, con el coche de carreras Lotus 49, que poseía una carrocería alargada, se le añadió un alerón trasero y también tenía dos spoilers delanteros. Fue uno de los coches más revolucionarios de la historia de la Formula 1, tanto a nivel tecnológico como por todas las aportaciones técnicas que llevaba. Su creador el británico, Anthony Colin Bruce Chapman, fue un diseñador, que pasó a la historia como autor de ideas geniales y desafiantes ante los cánones establecidos, ideas que revolucionaron la técnica de la época. Sus conocimientos de las últimas tecnologías en ingeniería aeronáutica fueron vitales para aplicarlas a sus diseños automovilísticos.

En 1963, se empezó a construir coches con chasis monocasco construido de lámina de aluminio, pues una única unidad resultaba menos pesado y más efectivo, que la estructura formada por una serie de tubos como hasta entonces se fabricaba.

En 1967, Chapman revolucionó a los técnicos porque utilizó el motor como parte fundamental de la estructura del coche, hasta entonces estaba apoyado y sujeto al chasis, pero Chapman instaló el motor de manera que, sirviese como anclaje de la suspensión trasera, también fue el primero en eliminar el radiador del morro, y colocarlo en posiciones más óptimas para mejorar la aerodinámica; incorporó los alerones traseros y delanteros. Fue el promotor de la aerodinámica actual, con el “efecto suelo”.

Además, también destacó por su talante comercial, pues fue pionero en incorporar patrocinadores ajenos al automovilismo. Con la verificación de sus resultados, sus competidores acababan aplicando todas sus innovaciones al diseño de sus vehículos.



Ilustración 2.28 Lotus 49 1968. Fuente: [http://i.dailymail.co.uk/i/pix/2014/06/26/article-2671189-1F2464DF00000578-713\\_964x548.jpg](http://i.dailymail.co.uk/i/pix/2014/06/26/article-2671189-1F2464DF00000578-713_964x548.jpg)

En la década de los años 60, los neumáticos se convirtieron en una cubierta un poco más amplia, y particularmente los neumáticos traseros del monoplaza, eran más anchos, ambas tendencias continuarían con el avance de la década. También cabe destacar la introducción del alerón trasero con el ángulo de incidencia variable, novedad introducida por Mauro Forghieri, en modelos de Ferrari.

Los primeros experimentos con alerones móviles y las nuevas monturas causaron trágicos accidentes con muerte de varios pilotos, lo que provocó que la FIA, Federación Internacional de Automovilismo, en 1970 implantará nuevas regulaciones para limitar el tamaño y la ubicación de los alerones, además de ciertas medidas de seguridad, como el uso de casco obligatorio, los monos de los pilotos, que debían de ser ignífugos y la obligación del uso de arneses.

A partir de la década de los 70, el aspecto externo de los coches de competición cambia, los diseños de la carrocería adquieren forma de cuña, con este tipo de carrocería comenzó la era moderna de la aerodinámica, los autos empiezan a adquirir diseños muy distintos, pero todos tienen en común la forma de cuña, que facilita la entrada del fluido.



Ilustración 2.29 Forma de cuña. Lotus 72 D 1972. Fuente: <https://prezi.com/by9te9niqaqs/aerodinamica-en-la-formula-1/>

A principios de los años 70, los ingenieros se percataron que no solo los alerones servían para generar aerodinámica, sino que el propio monoplaza podía crear un efecto dowforce. Descubrieron el “efecto suelo”, incluso se llegó a colocar ventiladores debajo del coche como el caso del Chaparral 2J, creado por Jim Hall, su propósito de usar estos ventiladores fue exhibir como el monoplaza tendía a succionar todo el aire que entraba por la parte frontal creando así una zona de vacío en el eje trasero, que generaba una fuerza descendente para proporcionar apoyo aerodinámico, esto le aportó un mayor agarre en las curvas, que con los simples dispositivos aerodinámicos como los difusores y alerones, pudiendo manejar el auto a cualquier velocidad.

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

---

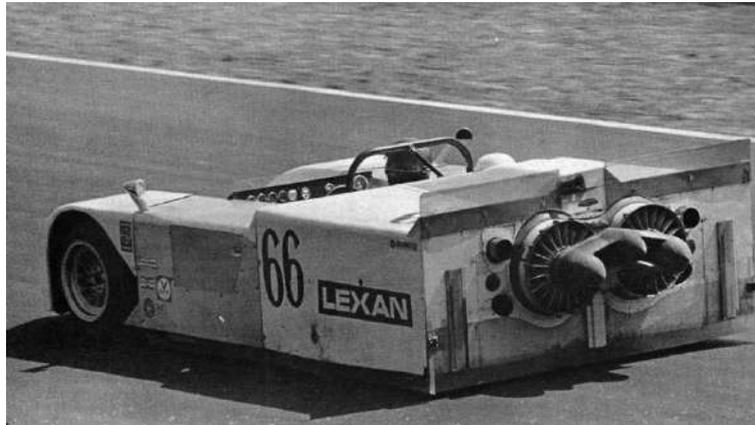


Ilustración 2.30 Chaparral 2J 1970. Fuente: <http://www.pistonudos.com/wp-content/uploads/2016/12/Chaparral-2J-3.jpg>

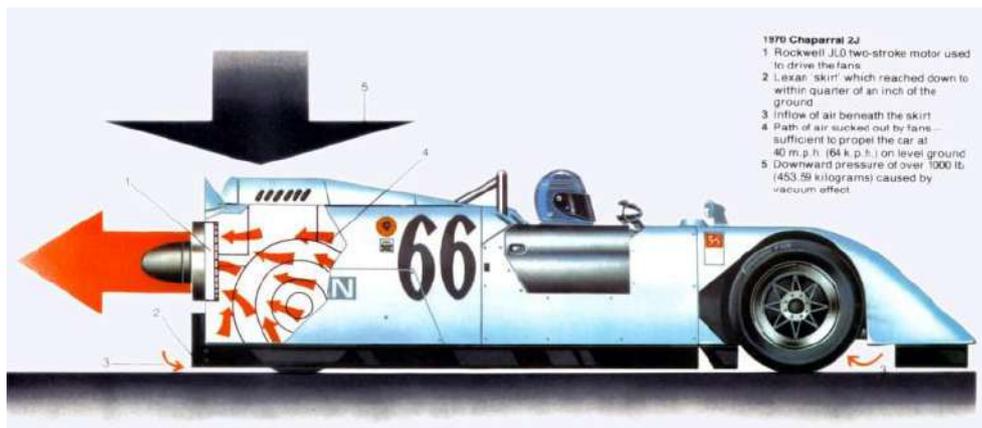


Ilustración 2.31 Esquema del Chaparral 2J 1970. Fuente: <http://www.pistonudos.com/wp-content/uploads/2016/12/Chaparral-2J-5.jpg>

En 1970, los diseñadores comienzan a estudiar y desarrollar también la aerodinámica interna, como Robin Herd en el coche llamado March 701, con el primer pontón de montaje lateral con una función aerodinámica, aprovechó el espacio interior de dichos pontones para colocar los tanques de combustible que se alojaban en el hueco entre las ruedas delanteras y las traseras, esta solución proporcionó ciertas mejoras, como por ejemplo el centro de gravedad del automóvil se traslada más próximo al suelo, desde la parte delantera se canaliza el aire mejor hasta la parte trasera y se consigue mejorar la penetración aerodinámica.

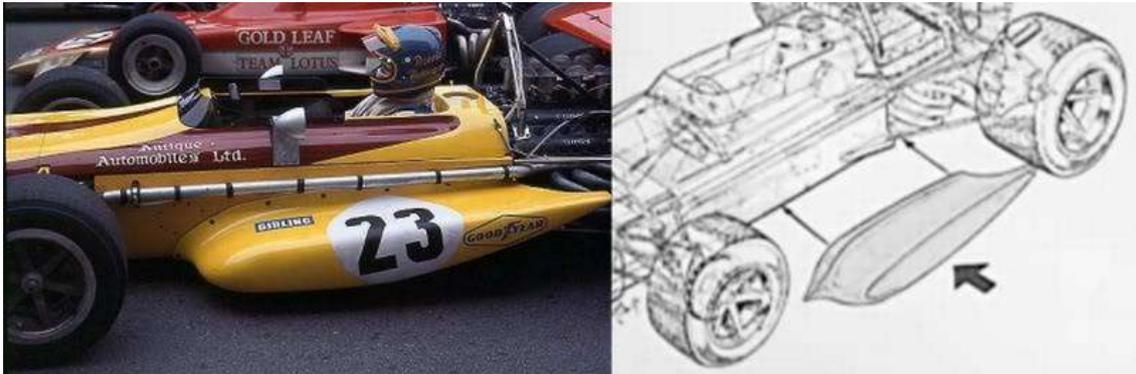


Ilustración 2.32 March 701 con los faldones laterales en forma de perfil alar 1070. Fuente: <http://i1180.photobucket.com/albums/x405/BT-44/8.jpg>

Durante la primera mitad de la década de 1970, los coches de carreras mostraron diversos diseños, buscando mejores recursos aerodinámicos y nuevos materiales para optimizar la estabilidad, estudiando las mejores ubicaciones, tamaños, pesos y ángulos de incidencia de los alerones; algunos fueron más efectivos que otros, pero el concepto del modelo Lotus 72 fue el que se decantó para la posteridad.



Ilustración 2.33 Brabham BT42 1974. Fuente: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/82/Brabham\\_BT42\\_livr%C3%A9\\_1974.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/82/Brabham_BT42_livr%C3%A9_1974.jpg)



Ilustración 2.34 McLaren M23 1975. Fuente: <https://s-media-cache-a0.pinnimg.com/originals/e0/81/5a/e0815a899e01e7651b692fea13a2f040.jpg>

## PROYECTO FIN DE MÁSTER

### Timón aerodinámico para automoción

---

Colin Chapman con su ingeniero Peter Wright mediante la escudería de Lotus pone en práctica la técnica denominada “Wing-car”, o también llamada “efecto ala”. El fondo de los vehículos era totalmente plano y las partes laterales no llegaban nunca al suelo; pero para utilizar de manera óptima, el efecto del aire se comenzó a utilizar el fondo del monoplaza como parte sustancial del elemento aerodinámico. El suelo de los coches dejó de ser plano para fijar en él una especie de recorrido por donde debía filtrarse el aire. Dicho aire penetraba por la parte baja del morro del automóvil, y en lugar de liberarse por los laterales y por la parte trasera, era obligado a pasar por una especie de camino previamente diseñado, así se forzaba el “efecto Venturi”. Para completar este sistema se añade los llamados “skirts” o “faldillas”, se trataba de un elemento aerodinámico que permitía que los pontones llegasen hasta el suelo, con el que rozaban mediante una fina cinta de cerámica.

La función de estas faldillas era que el aire que se succionaba por el morro no se desviase por los laterales que estaban cerrados, sino que era forzado a salir por la parte trasera. Con este proceso, se conseguía que el monoplaza se pegase al suelo, sobre todo a altas velocidades, y aumentó considerablemente la estabilidad en las curvas. Se tuvo que rediseñar las suspensiones y endurecerlas, porque todas las deficiencias del pavimento se transferían directamente al piloto; además el incremento de velocidad supuso riesgos para los pilotos.

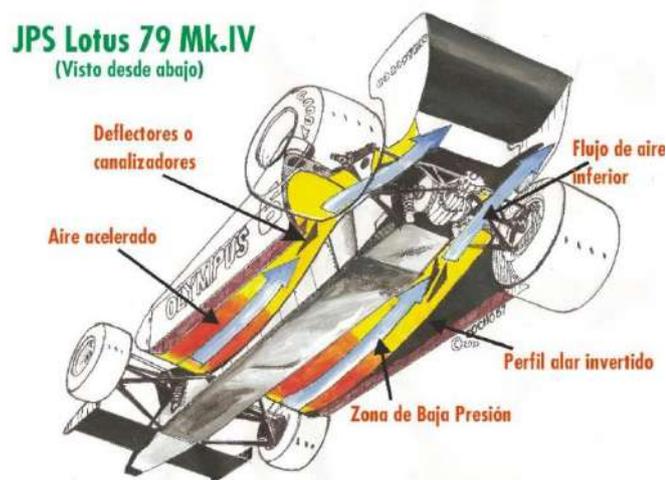


Ilustración 2.35 Esquema del paso del aire en Lotus 79 1978 con skirts rígidas. Fuente: <http://i1017.photobucket.com/albums/af300/cocho57/lotusjpg-1.jpg>

El ingeniero Gordon Murray, en el año 1978, basándose en el Chaparral 2J, diseñó el famoso Brabham BT46B, con un enorme ventilador situado horizontalmente, que aumentaba la extracción del flujo del aire debajo del monoplaza, esto generaba el “efecto Bernoulli”, por lo que acrecentaba la adherencia al suelo. Después, fue prohibido por la FIA.



Ilustración 2.36 Brabham BT46 B 1978. Fuente:

<http://www.early911sregistry.org/forums/showthread.php?96471-Brabham-BT46-B-quot-The-Fan-Car-quot-F1>

En la década de los 80, se eliminaron las escobillas y se prolongaron las alas de los pontones laterales y superiores. Los diseñadores estudiando los principios básicos de la aerodinámica comenzaron a utilizar la carrocería en forma de flecha para buscar tracción y efecto suelo. En 1981, se usó la fibra de carbono para crear chasis monocasco, ya que es un material que posee una alta resistencia, le presta ligereza al coche y seguridad, pues establecían una capsula de supervivencia contra choques y fuego. También se introdujeron los alerones con perfiles múltiples. Con esta combinación los coches conseguían mayores velocidades y mejores prestaciones.



Ilustración 2.37 Monocasco de fibra de carbono. Fuente:

[http://www.diariomotor.com/imagenes/picscache/1440x655c/monocasco-carbono-4\\_1440x655c.jpg](http://www.diariomotor.com/imagenes/picscache/1440x655c/monocasco-carbono-4_1440x655c.jpg)

Con el BT52, Brabham cambia la fisonomía del coche en forma de flecha, con un alerón trasero de gran tamaño. Fue el primer coche con motor turbo.



Ilustración 2.38 Forma de flecha. BT52 1983. Fuente: <https://prezi.com/by9te9nigaqs/aerodinamica-en-la-formula-1/>

Los alerones traseros aumentan de superficie, tendencia que inició Ferrari en los años que se utilizó el motor V12 Biturbo, según algunos ingenieros era un motor con demasiada potencia para la aerodinámica desarrollada en la época, entonces cuando dejaron de usarse dichos motores también desapareció la tendencia de los llamados “super alerones”.

Debido a que sucedieron graves accidentes, la FIA introdujo una regulación sobre el fondo plano de los monoplazas y reglamentó que el suelo debía ser plano y no con forma curva o ala invertida.

Este cambio permitió a los diseñadores prosperar en la evolución de los alerones, sobre todo en la parte delantera. Ferrari introdujo el perfil doble, pues unió dos efectos, suelo y reducción de resistencia.



Ilustración 2.39 Idea de perfil múltiple. Fuente: [http://www.caranddriverthef1.com/sites/default/files/imce/u25709/f126c3\\_1.jpg](http://www.caranddriverthef1.com/sites/default/files/imce/u25709/f126c3_1.jpg)

En esta década se muestran constantemente, nuevos elementos aerodinámicos debido a la intensa utilización de los túneles de viento, en 1987 el equipo de Lotus, presentó la suspensión activa, que garantizó un ángulo de flujo ideal.

En 1988, Adrian Newey con la escudería Leyton House Racing sacó un coche muy eficiente aerodinámicamente, con ciertas novedades, como laterales elevados para tratar el alerón frontal, subió el morro y utilizó el chasis como un elemento aerodinámico más, elaborando y desarrollando los difusores.



Ilustración 2.40 Leyton House March 881 1988. Fuente: <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/81/89/e6/8189e6fcd04834fd99974c11304461a5.jpg>

En la década de los 90, la tecnología evolucionó de forma exponencial, caja de cambios semiautomática, suspensión activa y control de tracción, fueron progresos que permitieron el aumento de velocidad. La aerodinámica se convirtió en interés central de los ingenieros de la Fórmula 1.

Los coches se optimizan elevando el morro, o lo que se llama nariz elevada, el objetivo era mejorar la circulación del flujo por debajo del coche. Destaca el monoplaza Williams FW16B, con una configuración muy competitiva y un rendimiento mejorado.



Ilustración 2.41 Williams FW16B 1994. Fuente: [http://fast-mag.com/wp-content/uploads/2015/04/056\\_002.jpg](http://fast-mag.com/wp-content/uploads/2015/04/056_002.jpg)

Los técnicos cuando actúan en la aerodinámica de una parte concreta del coche, deben realizar modificaciones sobre otras, para mantener el equilibrio.

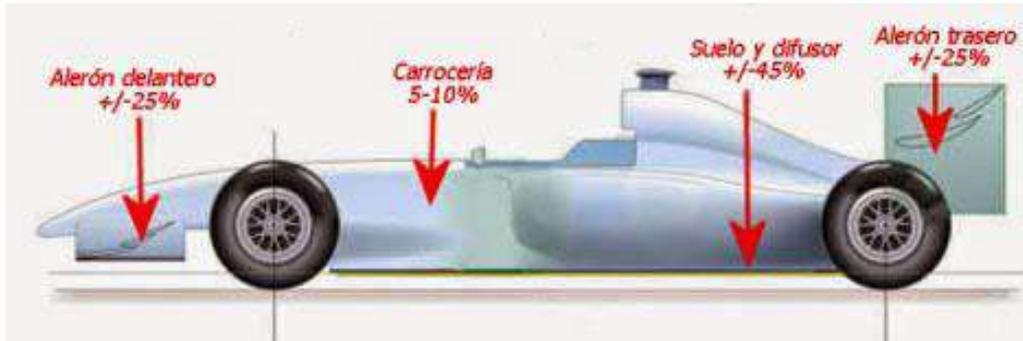


Ilustración 2.42 La carga aerodinámica en un F1. Fuente: <http://www.caranddriverthef1.com/sites/default/files/imce/u25709/downforce.jpg>

Con el transcurso de los años los ingenieros fueron elevando el morro cada vez más o reduciendo su geometría para dejar un mayor tránsito de aire por debajo del vehículo, se evolucionó tanto en prestaciones como en elegancia de los monoplazas.

A partir del 2000 hasta nuestros días, aparecen infinidad de aditamentos, perfiles, aletines, etc. La mayoría de las escuderías cuentan con su propio túnel de viento para realizar sus pruebas, además, existen programas de diseño asistidos por ordenador como CFD, CAD, etc., todo esto hace que los ingenieros moldeen la geometría de las piezas en función de sus necesidades para conseguir mejores prestaciones del monoplaza, después la FIA siempre atenta, las autoriza o desestima.

En el año 2005, se introdujo el segundo alerón trasero y las rejillas en los pontones, el primer coche con estas innovaciones, fue el Renault 25, conocido “branquias de tiburón”.

Con este monoplaza, Fernando Alonso, se convirtió en el primer español que ganó el Campeonato Mundial, y el piloto más joven en conseguirlo con 23 años.



Ilustración 2.43 Renault R25 2005. Fuente: [http://static.carmodel.com/photos/77955\\_1.jpg?1](http://static.carmodel.com/photos/77955_1.jpg?1)

Otra novedad de esta década, son los winglets con forma de cuerno, instalados en el McLaren MP4-20, el coche constaba de unas alas “cuerno” acopladas en la carrocería para ganar carga aerodinámica.



Ilustración 2.44 McLaren MP4-20.2005. Fuente: <https://i1.wp.com/www.fierasdelaingenieria.com/wp-content/uploads/2013/07/aerodinamica005.jpg?w=600>

En el 2009, hubo cambios muy notorios, el alerón trasero se estrechó y se elevó, sin embargo, el delantero se amplió, se eliminaron todos los elementos aerodinámicos de los pontones y se volvieron a utilizar los neumáticos lisos o “slicks”, que no se montaban desde 1997. Con todos estos cambios la aerodinámica se redujo un 40%, y muchos optaron por el doble difusor, pero más tarde en el 2011 quedó prohibido.

El difusor fue utilizado durante décadas, pero en los últimos años es un elemento que tomó protagonismo, consiste en un dispositivo situado bajo el alerón trasero del automóvil, que acelera el flujo aerodinámico entre la parte superior e inferior del monoplaza. De manera que cuanto mayor sea su tamaño, recibe más aire y mayor carga genera.

En el 2011 se cambió la normativa y el doble difusor se prohibió y se redujo la altura del monodifusor, se introdujo el Alerón Trasero Móvil conocido como DRS (Drag Reducción System), sistema para disminuir la carga aerodinámica o downforce permitiendo aumentar su velocidad para facilitar los adelantamientos. Se trataba de unas ranuras situadas en los laterales del alerón trasero, que funcionan por medio de un sistema hidráulico, permaneciendo tapadas hasta que el piloto lo activaba desde el volante o con un pedal situado al lado del freno, entonces estas ranuras, se descubren dejando pasar el aire entre ambos flaps, por lo que disminuía la carga aerodinámica, al reducir la resistencia al viento, y permitía ganar velocidad extra en el adelantamiento.

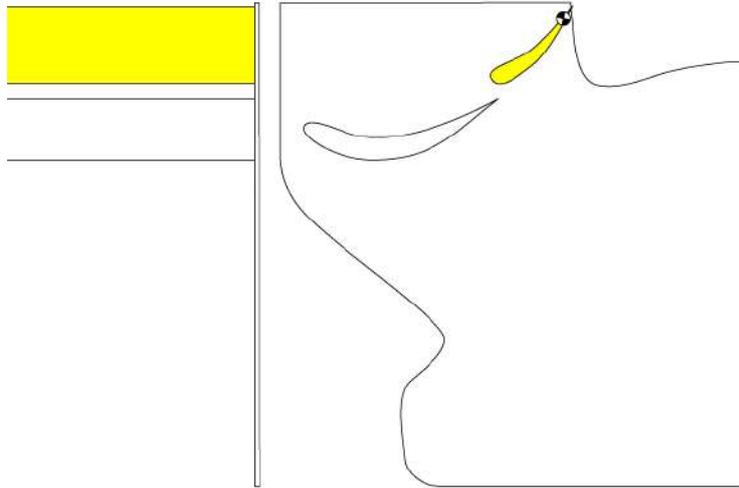


Ilustración 2.45 Aleta cerrada. Fuente:  
[https://scarbsf1.files.wordpress.com/2011/05/drs\\_smallflap\\_closed.jpg](https://scarbsf1.files.wordpress.com/2011/05/drs_smallflap_closed.jpg)

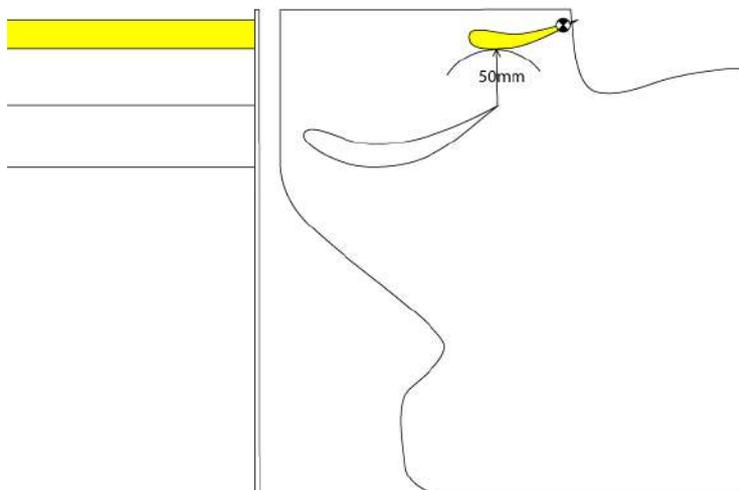


Ilustración 2.46 Aleta abierta. Fuente:  
[https://scarbsf1.files.wordpress.com/2011/05/drs\\_smallflap\\_open.jpg](https://scarbsf1.files.wordpress.com/2011/05/drs_smallflap_open.jpg)

Según reglamentación de la FIA, la disponibilidad del sistema era limitada electrónicamente, pudiéndose utilizar en los entrenamientos, pero durante la carrera, únicamente en el momento de adelantos. En el año 2013 quedo prohibido.

En el 2016, la FIA realizo algunas modificaciones, chasis y alerón trasero más anchos, más carga aerodinámica generada a través del suelo, por lo que el alerón delantero reduce importancia y neumáticos más anchos para incrementar la adherencia en las curvas.

Actualmente existen infinidad de diseños de alerones traseros, buscando las mejores prestaciones para conseguir monoplazas más rápidos y eficientes, porque la falta de agarre en las curvas sigue siendo un tema fundamental de estudio para ingenieros y técnicos.



Ilustración 2.47 McLaren MP4/29 alerón trasero vortex. Fuente: <https://cdn-5.motorsport.com/images/mgl/2doxbxL0/s8/f1-giorgio-piola-technical-analysis-2015-mclaren-mp4-29-rear-wing-vortex.jpg>

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

---



Ilustración 2.48 Mercedes W07 dentada principal de la aleta de la parte trasera del ala. Fuente: <https://cdn-2.motorsport.com/images/mgl/0qKzdzOY/s8/f1-giorgio-piola-technical-analysis-2016-mercedes-w07-serrated-main-flap-rear-wing.jpg>



Ilustración 2.49 Ferrari SF16-H serrada gurney flap del ala trasera. Fuente: <https://cdn-8.motorsport.com/images/mgl/YK5J4JD0/s8/f1-giorgio-piola-technical-analysis-2016-ferrari-sf16-h-serrated-gurney-flap-rear-wing.jpg>



Ilustración 2.50 Williams FW26 alerón trasero Monza Y Renault R26 alerón trasero Budapest.  
Fuente: <https://cdn-1.motorsport.com/images/mgl/YvBzdZ7Y/s8/f1-giorgio-piola-technical-analysis-2005-williams-fw26-rear-wing-monza-renault-r26-rear-wi.jpg>



Ilustración 2.51 S-Duct Mercedes. Fuente: [http://2.bp.blogspot.com/-m5zk\\_rELGM/T26k0xYKTJ/AAAAAAAAEV8/4RysdK1inAc/s1600/S-Duct+Mercedes+W03.jp](http://2.bp.blogspot.com/-m5zk_rELGM/T26k0xYKTJ/AAAAAAAAEV8/4RysdK1inAc/s1600/S-Duct+Mercedes+W03.jp)

## 2.2 Resumen de fechas de la historia de mejoras aerodinámicas en Formula 1



Ilustración 2.52 Fuente: [http://fast-mag.com/wp-content/uploads/2014/10/img-066\\_001.jpg](http://fast-mag.com/wp-content/uploads/2014/10/img-066_001.jpg)

**1954** Alberto Ascari con el Lancia D50 cuyos tanques de combustible cerraban la brecha entre los neumáticos para minimizar la turbulencia

**1954** En la arrancada del GP francés con sus rectas largas, Mercedes carena las llantas para hacer más veloces los autos, doblando un poco las reglas pues la F1 es para monoplasas de ruedas DESCUBIERTAS

**1960** Cooper le muestra al mundo que el motor atrás es el futuro y Jack Brabham es bicampeón con el T53 que además tiene una aleta dorsal para mejorar la penetración en el viento

**1962** Lotus trae el Tipo 25 que usa un monocasco que permite bajar el centro de gravedad y pone al piloto –Jim Clark en este caso– acostado para hacerlo lo más bajo posible.

**1966** Brabham pulió el modelo en forma de puro al regreso de los motores grandes y se coronó campeón con el BT20 con motor Repco de 3 litros.

**1968** Lucien Bianchi demuestra los nuevos alerones altos en la parte trasera del Cooper T86 BRM, mientras al frente usa canalizaciones para el aire



Ilustración 2.53. Fuente: [http://fast-mag.com/wp-content/uploads/2014/10/img-066\\_002.jpg](http://fast-mag.com/wp-content/uploads/2014/10/img-066_002.jpg)

**1968** Para final de la campaña en México los alerones se han vuelto la furia y se usan estrechos y altos atrás y amplios al frente como en el McLaren M7A de Hulme, mientras el BRM P138 de Pedro Rodríguez los usa más amplios y altos atrás y apenas los insinúa adelante y el Branhm BT28 de Rindt usa alerones altos atrás y adelante.

**1969** Los alerones altos han sido prohibidos y los equipos experimentan con apéndices encima del motor continuando la carrocería como en el Matra MS84 de tracción total de Servoz-Gavin, mientras el Ferrari 312/69 del NART que usa Pedro Rodríguez muestra la configuración preferida con inclinación leve en forma de cuña; y el BRM P133 de Jackie Oliver tiene alerones delanteros similares, pero su alerón trasero es de “caja” con limitadores laterales para más agarre, pero también mayor arrastre.

**1974** En la siguiente década los alerones traseros ya están detrás de las ruedas y las tomas de aire son la sensación pues fuerzan el aire al motor para lograr unos cuantos caballos más como en el 312B3.

**1976** También hubo experimentos de seis ruedas, que mejoraban la aerodinámica y curvado al frente, como este Tyrrell P34 cuando las tomas altas ya habían sido prohibidas.

**1978** Dos concepciones distintas: el Lotus 79 auto ala de Mario Andretti contra el Brabham BT46B aspiradora de Niki lauda. Este último fue prohibido.

**1979** Para sellar el paso del aire por debajo los autos usaban faldones laterales de hule provocando el efecto suelo de gran agarre como se aprecia en el Renault RS10.

## PROYECTO FIN DE MÁSTER

### Timón aerodinámico para automoción

---

**1979** Dos concepciones opuestas, motor Ferrari V12 de 3 litros Y motor Renault turbo de 1.5 litros.

**1986** El advenimiento de los motores turbo hizo necesarios los pontones con apertura amplia para alojar los radiadores, más alerones de varias secciones y limitadores verticales como en el Williams FW11 Honda.

**1988** La perfección de la era turbo llegó con el McLaren MP4/4 de perfil bajo que ganó 15 de 16 carreras.



Ilustración 2.54 Fuente: [http://fast-mag.com/wp-content/uploads/2014/10/img-066\\_003.jpg](http://fast-mag.com/wp-content/uploads/2014/10/img-066_003.jpg)

**1990** Para este año las narices rectas empezaron a ser en forma de bigotes con el centro levantado para mejor agarre al frente y mejor flujo de aire atrás, como muestra el Tyrrell 01.

**1998** Los alerones multiplanos son cada vez más exitosos y el alerón-pilar atrás mientras al frente el ala se cuelga de la nariz como en el McLaren MP4-1.

**2002** En el siglo XXI los pontones planos empezaron a ser curvos atrás para incrementar el agarre aerodinámico y el Ferrari F2002 fue particularmente exitoso.

**2004** Otra área de exploración para lograr mayor agarre fue la de los difusores traseros del monoplaza con el F2004 siendo muy eficiente en su diseño.



**2006** Por la reducción de motores a V8 de 2.4 litros, los pontones fueron esculpidos a fin de lograr más agarre y aparecieron aletas en muchos sitios como se aprecia en el Renault RS26 y el Ferrari F 248.

**2009** Las nuevas reglas trajeron alerones frontales del ancho de la huella del auto y difusor doble como el del Brawn BGP001, además de pontones planos en su parte superior.

**2013** El difusor sencillo o doble, pero soplado por los gases del escape fue la novedad en los años finales de los motores V8, pero las reglas trajeron las trompas de ornitorrinco, pero McLaren no siguió la tendencia y produjo el peor auto de su historia, el MP4-28.

**2014** El cambio a motores turbo de 1.6 litros con sistemas de recuperación de energía y tanques de 100 kilos ayudó a crear autos más compactos; el Mercedes W05 fue el que mejor interpretó las reglas.

## 2.3 Glosario de imágenes de vehículos en la historia de Formula 1



Fuente: <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/474x/57/c8/4b/57c84b79779484bf9d8fefa227c3a9cf.jpg>

## 2.4 Principios básicos aerodinámicos

La aerodinámica se fundamenta en los siguientes principios:

### 2.4.1 Principio de Bernoulli

El principio de Bernoulli, también designado ecuación de Bernoulli o trinomio de Bernoulli, se aplica a fluidos en movimiento y argumenta que un fluido ideal, sin viscosidad ni rozamiento, que circula por un conducto cerrado, su energía permanece constante a lo largo de todo el recorrido.

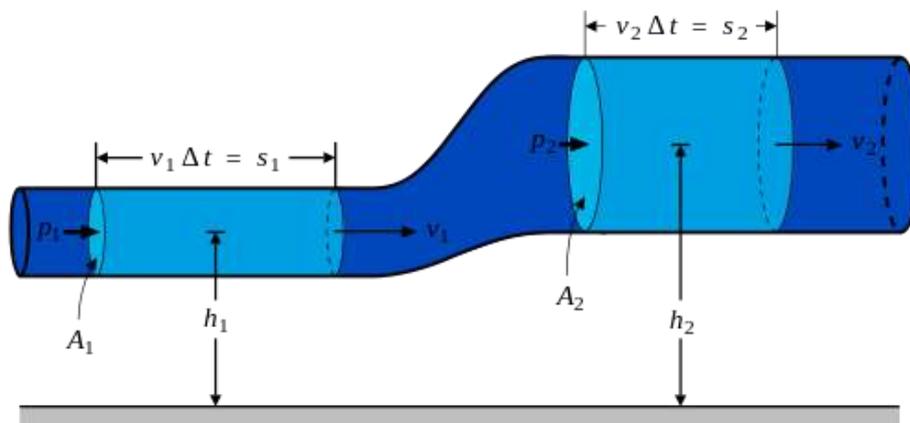


Ilustración 2.55 Esquema del principio de Bernoulli. Fuente:

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/20/BernoullisLawDerivationDiagram.svg/500px-BernoullisLawDerivationDiagram.svg.png>

Este principio fue expuesto por Daniel Bernoulli, en su obra Hidrodinámica (1738), en donde relata matemáticamente la relación directa entre presión y velocidad.

Cuando se origina un estrechamiento en la vía de circulación del fluido se genera un incremento de la velocidad en su flujo, pero también se origina un descenso de la presión del fluido. Esto se explica, porque un fluido está formado por infinidad de moléculas en constante movimiento, lo que produce el choque entre sí y con las paredes que las rodea intentando escapar.

La presión de un fluido aparece en relación con las reiteradas veces las moléculas se colisionan contra la pared, pues de ahí proviene la fuerza que se aplica contra las paredes por cada segundo. Pues se considera que la presión es la magnitud que evalúa la fuerza que se desempeña sobre una superficie.

Cuando estas partículas tienen una velocidad de tránsito lenta por el tubo, poseen un período más largo durante el choque y se genera una presión mayor del conjunto, mientras que cuando el movimiento de circulación es mucho más rápido, el ciclo de choque es mucho más reducido.

Por tanto, se deduce que:

- A mayor velocidad de un fluido menor presión
- A menor velocidad de un fluido mayor presión

En los coches el aire que circula por encima de los alerones y de todo el monoplaza fluye a menor velocidad, que el aire que pasa por debajo, de tal manera que se produce una depresión que logra empujar el auto hacia el suelo. Las alas generan deportancia no sólo porque el aire que circula por encima crea más presión, sino también hay que tener en cuenta su borde de ataque y el ángulo de ataque.

La energía total de un fluido en cualquier momento, consta de tres componentes, cinética, que es la energía debida a la velocidad que tenga el fluido, potencial, la altura a la que se encuentra el fluido y energía de presión o flujo, que es la presión que tiene.

La ecuación de Bernoulli se reduce a una simple relación entre la velocidad y la presión estática.

Ecuación de Bernoulli:

$$\frac{V^2 \cdot \rho}{2} + P + \rho \cdot g \cdot z = \text{constante}$$

V : velocidad el fluido

$\rho$  : densidad del fluido

P : presión a lo largo de la línea de corriente

g : gravedad

z : altura desde la cota de referencia

### 2.4.2 Efecto Venturi

El efecto Venturi radica en un fenómeno por el que el fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión, al aumentar su velocidad haciéndolo fluir por una sección de menor tamaño que por donde circulaba. Este efecto recibe el nombre de su descubridor el italiano Giovanni Battista Venturi, que lo demostró en el año 1797.

A la inversa, al salir el flujo del estrechamiento, aumenta su presión y disminuye la velocidad.

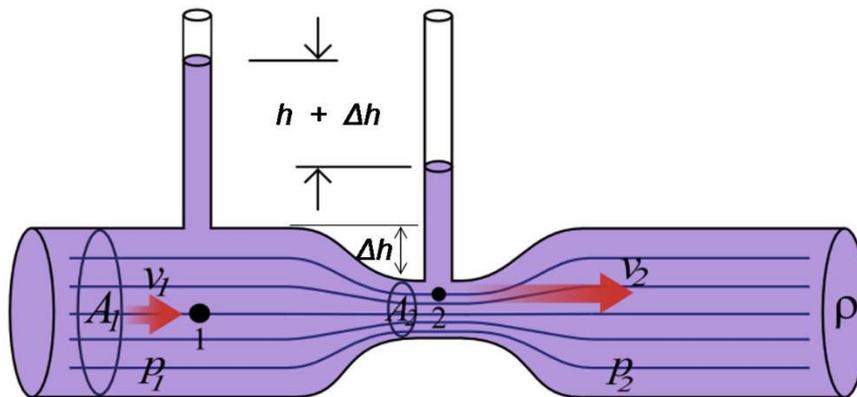


Ilustración 2.56 Esquema del efecto Venturi. Fuente:

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/54/Venturifixed2.PNG>

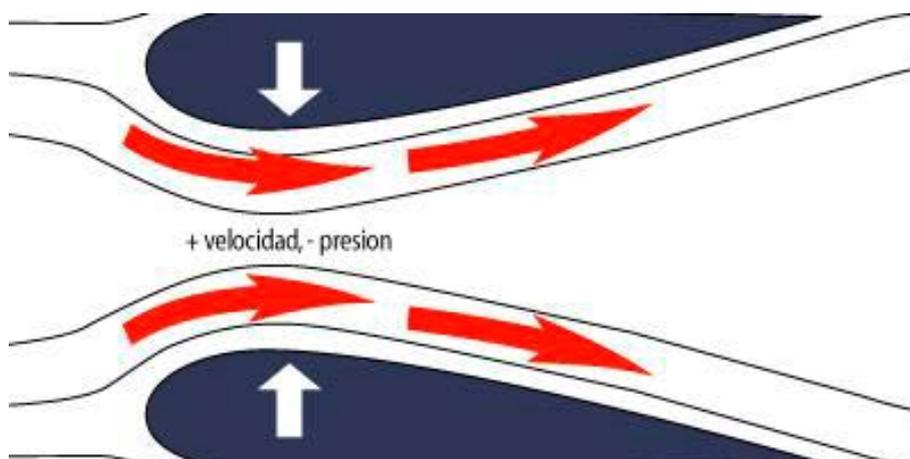


Ilustración 2.57 Cuando la sección disminuye aumenta la velocidad. Fuente:

<http://www.ecomextreme.com/img/venturi.jpg>

Aplicando este efecto a los monoplazas, así se explica el fondo plano y el difusor trasero. El fondo de plano sería el estrechamiento y el difusor la salida

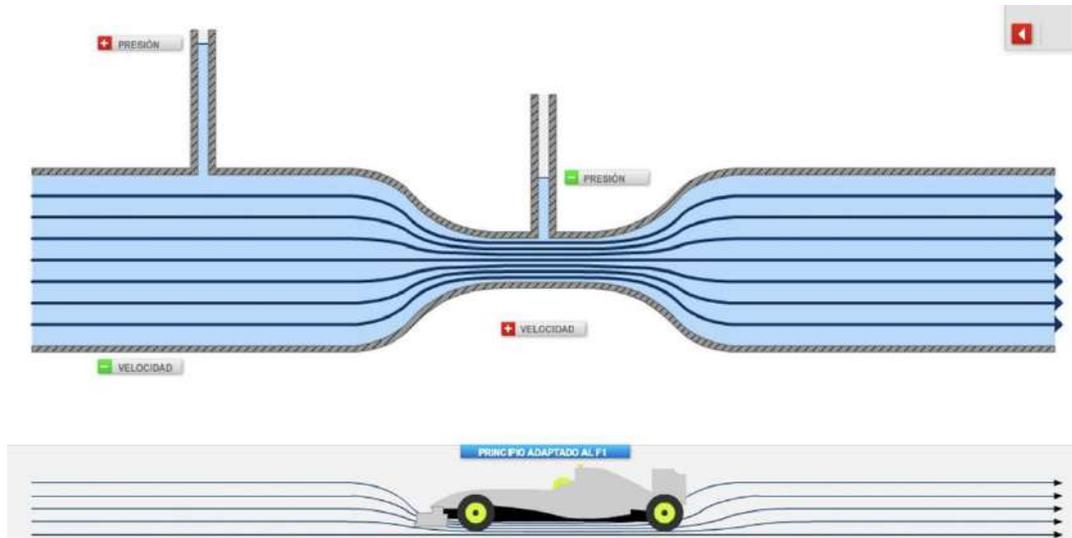


Ilustración 2.58 Efecto suelo. Fuente: [http://4.bp.blogspot.com/-viyKG12HJ1g/UhSdCWN-M6I/AAAAAAAAAGmM/o\\_Va-EKuGuU/s1600/VENTURI.jpg](http://4.bp.blogspot.com/-viyKG12HJ1g/UhSdCWN-M6I/AAAAAAAAAGmM/o_Va-EKuGuU/s1600/VENTURI.jpg)

El efecto suelo en una carrocería consiste en que el aire que pasa por el alerón delantero es dirigido a la zona inferior del automóvil, en esta parte el flujo del aire al ser comprimido aumenta su velocidad, creando una succión, por lo tanto, se forma una región de bajas presiones, que empuja al coche contra el asfalto.

Sin embargo, en la parte superior del coche, el aire circula de forma más pausada, creando una zona de altas presiones, pero según la Tercera Ley de Newton, este fenómeno, de igual forma, empuja al monoplaza contra la pista.

Por tanto, se puede decir que el efecto suelo, es un fenómeno aerodinámico, resultante de unas variaciones o modificaciones recirculando el aire para aprovechar los efectos y conseguir mejor rendimiento de un coche.

Un factor muy importante a considerar, es la distancia existente entre el coche y el pavimento, ya que cuanto más pequeña sea esta longitud, se producirá un mayor efecto.

### 2.4.3 Efecto Coanda

El efecto Coanda es un fenómeno físico que describe el comportamiento de una corriente de fluido, ya sea gaseoso o líquido, pues tiende a ser atraído por otras superficies próximas a su trayectoria. Su nombre se debe al ingeniero aeronáutico Henri Coanda, quien descubrió el efecto en su prototipo de un avión a reacción.

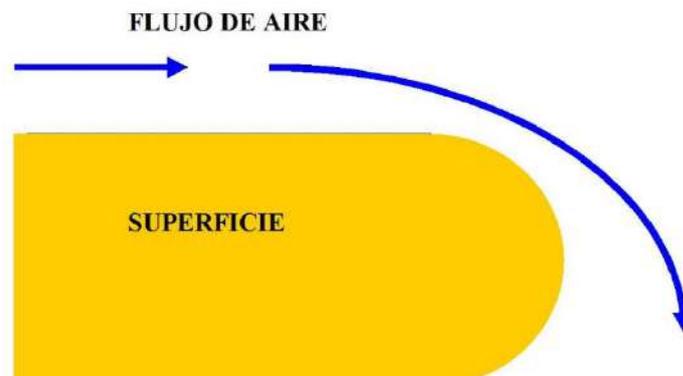


Ilustración 2.59 Efecto coanda. Fuente:

[http://1.bp.blogspot.com/\\_YMBuQ9t0Sj8/RwWdIEjBb5I/AAAAAAAAABI/I87IWTS11i0/w1200-h630-p-k-no-nu/2.JPG](http://1.bp.blogspot.com/_YMBuQ9t0Sj8/RwWdIEjBb5I/AAAAAAAAABI/I87IWTS11i0/w1200-h630-p-k-no-nu/2.JPG)

El principal agente de este efecto Coanda se debe a la viscosidad del fluido, que cuando choca con un cuerpo sólido curvo y suave, esta viscosidad hace que las partículas permanezcan temporalmente adheridas a la superficie de dicho cuerpo, estableciendo una lámina paralela y uniforme al contorno del sólido. Las progresivas partículas que posteriormente van impactando generan nuevas capas aparentemente invisibles, con este proceso se forma una progresiva desviación del trayecto del fluido.

El efecto Coanda es una de las claves de la moderna aerodinámica, especialmente como aplicación en campos como la aviación y el automovilismo; pues este fenómeno físico sirve para canalizar y desviar el aire en ciertas zonas del monoplaza, donde los ingenieros diseñan autos más eficientes.

La carrocería de los bólidos de Formula 1, se construyen con curvas suaves y uniformes, valiéndose del efecto Coanda, de tal manera, que se encauzan la mayor cantidad de flujo de aire posible hacia determinadas zonas del vehículo como los alerones, los difusores y el fondo plano.

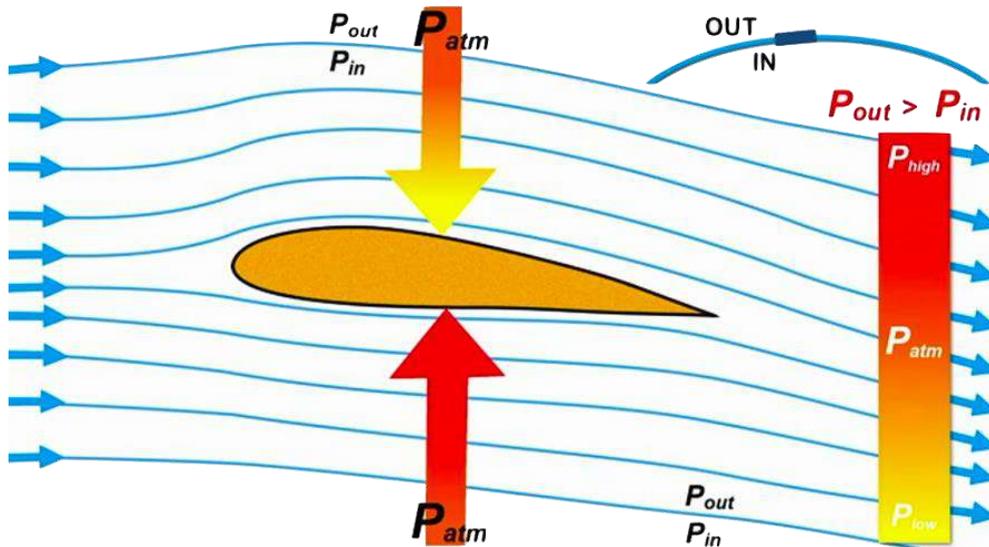


Ilustración 2.60 Capas efecto Coanda. Fuente: <https://i.stack.imgur.com/x7ALu.jpg>

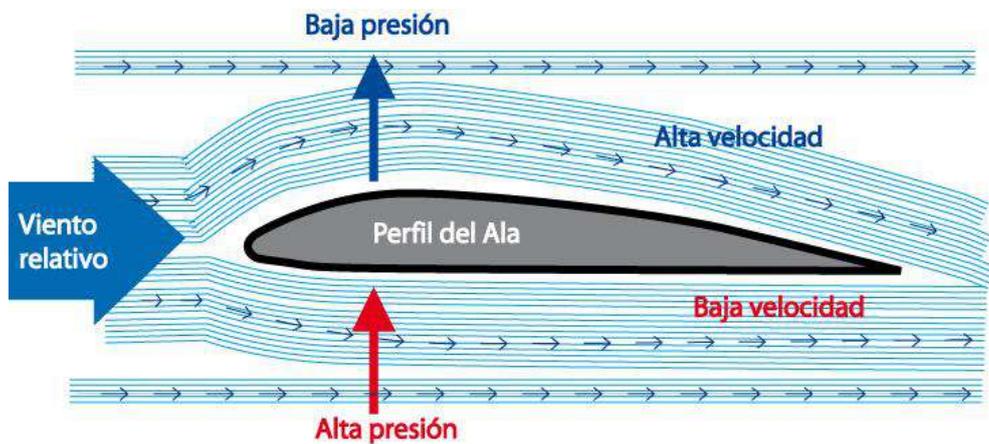


Ilustración 2.61 Efecto coanda. Fuente: <http://www.pasionporvolar.com/wp-content/uploads/05-blog/aerodinamica/aerodinamica-2.jpg>

## 2.5 Fuerzas aerodinámicas

Una fuerza aerodinámica se establece sobre un cuerpo cuando existe una corriente de aire, que circula por encima y por debajo de un perfil. Al punto donde la corriente se divide se le denomina punto de impacto o borde de ataque. La fuerza aerodinámica es la resultante de dos fuerzas, la sustentación y la resistencia al avance, que ejercen un papel primordial en un cuerpo.

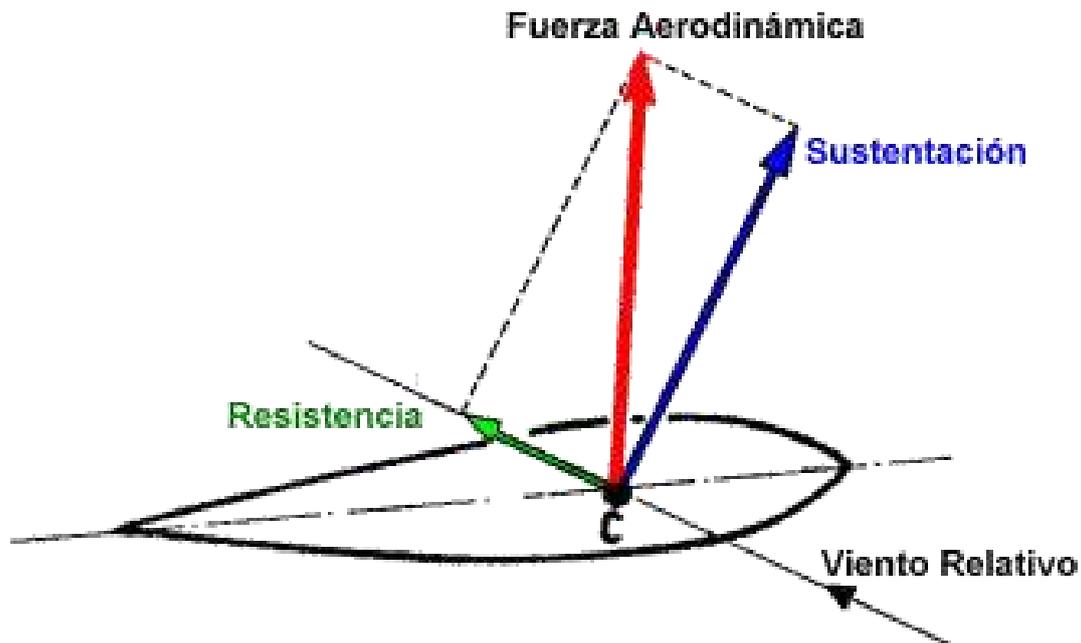


Ilustración 2.62 Descomposición de la fuerza aerodinámica. Fuente: <http://blade1.uniquindio.edu.co/uniquindio/ntic/trabajos/4/c4q2helimodelismo/subpaginas/aerodinamica/fuerza/image001.gif>

La sustentación es la fuerza generada de forma perpendicular a la velocidad de la corriente del viento, mientras que la resistencia siempre es de sentido opuesto, que se opone al avance de un cuerpo en movimiento en el aire.

La magnitud de las fuerzas aerodinámicas cuando un automóvil se desplaza, va depender tanto del aire como del sólido. Hay que tener presente dos propiedades del aire que son la viscosidad y la densidad, variables que influyen en la sustentación.

El diseño de la carrocería y la forma del coche, es determinante en la calidad de su aerodinámica, es importante estudiar la rugosidad superficial, el área de contacto de los distintos elementos con el aire y la velocidad relativa existente entre el auto y el aire.

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

Existen dos cualidades básicas de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre un coche. Una es la resistencia al avance, que se genera en sentido opuesto al movimiento del auto y otra es la fuerza que actúa perpendicularmente al plano en el que se dirige el coche, esta se llama sustentación, pero se define carga aerodinámica en el campo de la automoción.

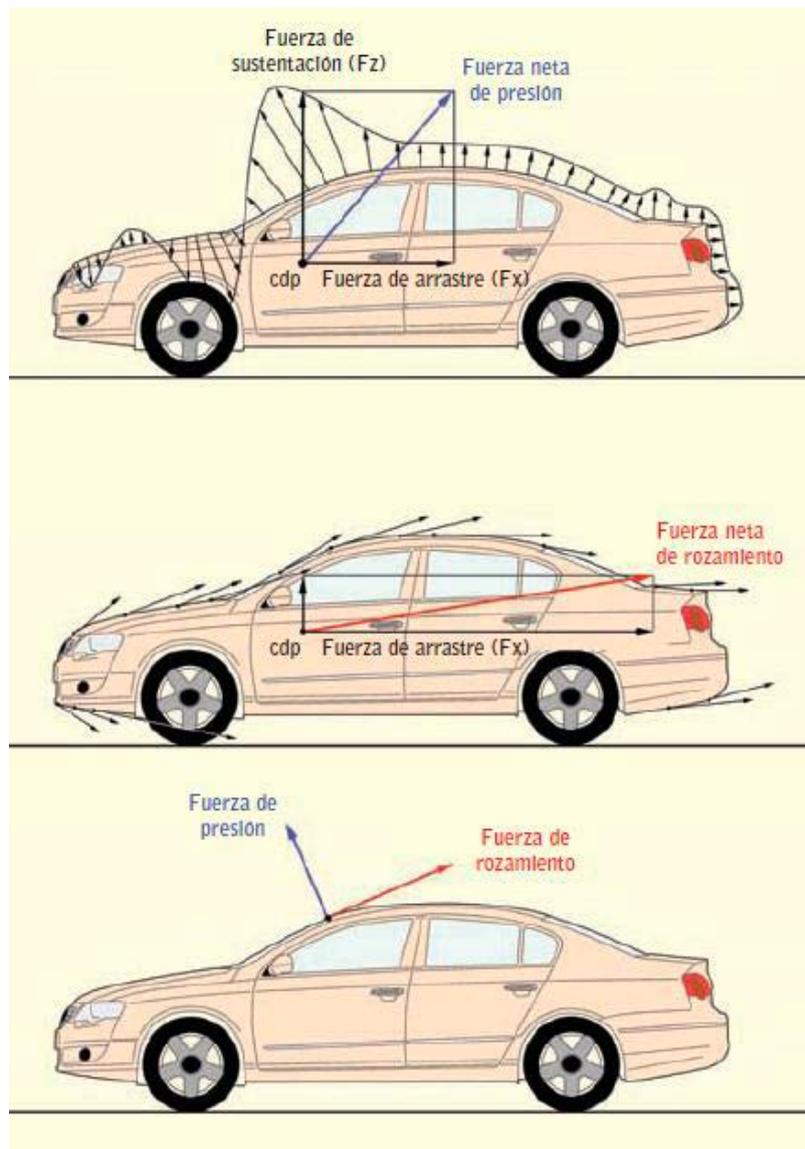


Ilustración 2.63 Fuerzas aerodinámicas. Fuente: [http://www.technicalcourses.net/portal/imagenes/editorhtml/z\\_aerodinamica%20car.png](http://www.technicalcourses.net/portal/imagenes/editorhtml/z_aerodinamica%20car.png)



Se obtiene una fuerza neta total cuando se suman todas las fuerzas de presión, que se generan sobre distintos elementos de superficie, dicha fuerza se aplica en un punto imaginario, al cual se denomina centro de presiones

Cuando se establece la dirección del movimiento del fluido y descomponemos dicha fuerza neta en dos componentes, una en la dirección del movimiento y otra en su perpendicular, el resultado que se deduce, es que la primera de esas componentes, es la fuerza de arrastre que se resiste al avance del coche y la segunda, denominada fuerza de sustentación o adherencia, permite que el coche se pegue al suelo.

Por otra parte, cuando se suman todas las fuerzas de rozamiento que intervienen en distintos elementos de la superficie, se obtiene una resultante total, aplicada en el centro de presiones.

Si la descomponemos en dos direcciones, se obtiene en la dirección del movimiento del fluido una fuerza de arrastre que se opone al avance del vehículo.

El flujo del aire cuando actúa sobre un coche es bastante complejo, para facilitar su estudio, estas relaciones dependen de unas variables, a las cuales llamamos coeficientes.

Dichos coeficientes nos permiten valorar en un prototipo semejante, los distintos efectos aerodinámicos.

Como ya se ha dicho, la fuerza de resistencia al avance viene determinada cuando se ejerce una fricción entre el perfil del cuerpo y el aire.

Las partículas en contacto con el sólido en movimiento se pegan al cuerpo, debido a la existencia de la viscosidad, que es una propiedad que posee cualquier fluido, de tal manera que, las partículas más próximas también son frenadas creando de esta manera el fenómeno que forma la llamada capa límite.

Por lo tanto, se podría definir la capa límite, como la capa fronteriza donde el flujo del fluido varía de movimiento, pasando de una corriente laminar a turbulenta.

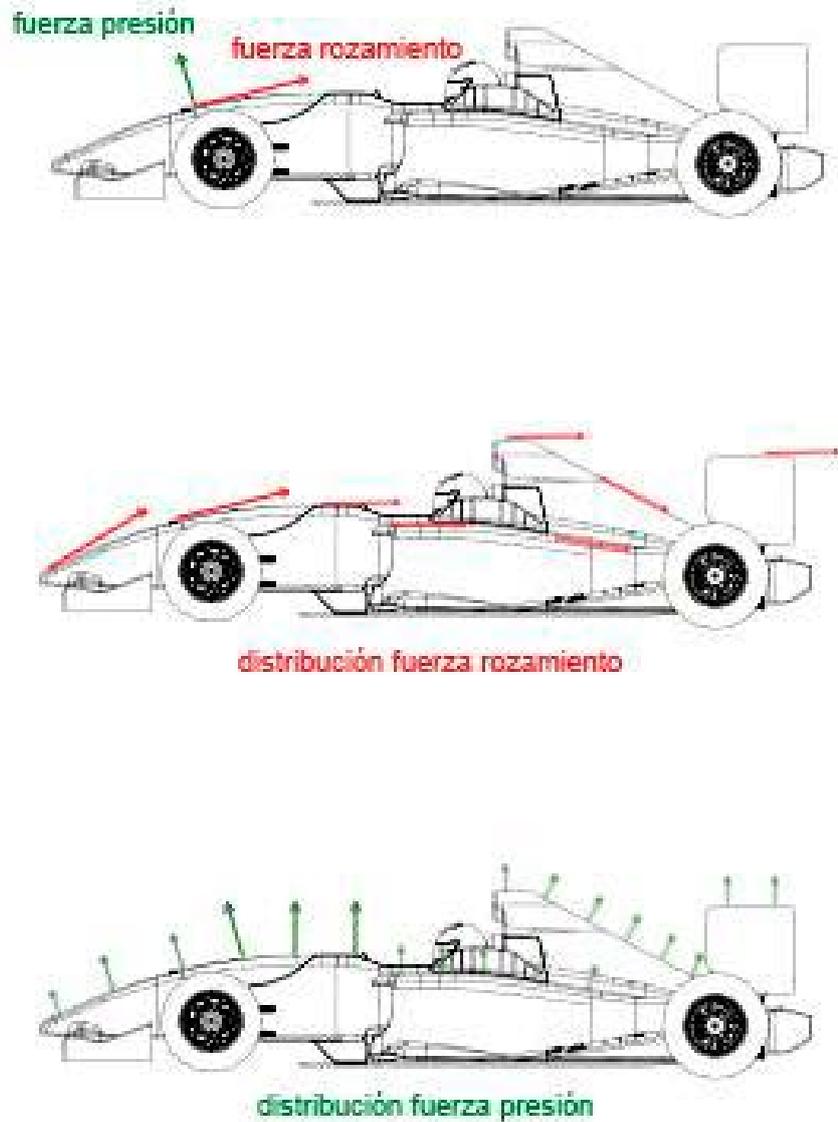


Ilustración 2.64 Esquema de fuerzas en monoplace F1. Fuente: <http://www.que-formula1.com/wp-content/uploads/2009/03/distribucion-fuerzas.jpg>

Principalmente, en los coches de competición actúan cuatro fuerzas:

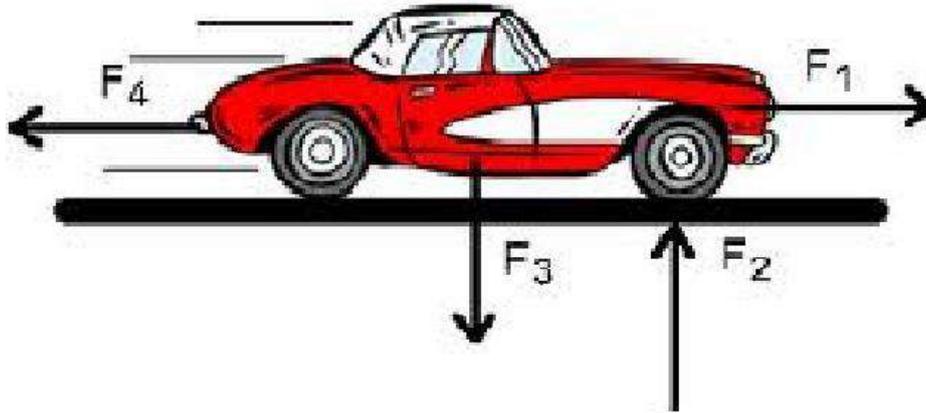


Ilustración 2.65 Fuerzas en coche de competición. Fuente:  
[https://www.razine.com/assets/images/content/razine\\_2013/junio\\_2013/macana.1.jpg](https://www.razine.com/assets/images/content/razine_2013/junio_2013/macana.1.jpg)

- $F_1$  = Thrust o fuerza de propulsión
- $F_2$  = Lift o fuerza ascendente
- $F_3$  = Downforce o fuerza descendente
- $F_4$  = Drag o fuerza de arrastre

1.- La Fuerza de propulsión, es proporcionada por el motor del auto.

2.- Lift o fuerza ascendente, se genera por el flujo del aire que transita debajo del vehículo, cuando no es reconducido hacia la parte trasera y se escapa por los laterales del fondo del auto. A esta fuerza también se la conoce como fuerza de resistencia inducida.

Los ingenieros poseen una labor fundamental en estudiar y conducir el aire que fluye por el fondo del coche hacia el difusor trasero, evitando que se escape por los laterales, para solucionarlo, deben conseguir aumentar la velocidad del aire y crear succión.

Es decir, deben generar downforce para contrarrestar la fuerza ascendente, pues cuanto menos fuerza descendente o sustentación tenga un coche será menos manejable y muy peligroso.

Los monoplazas de Formula 1 constan de formas afiladas y muy aerodinámicas que a máxima velocidad poseen la inercia de elevarse por sí solos, para evitarlo, es de vital importancia adosar carga aerodinámica.



Ilustración 2.66 Accidente cuando la fuerza ascendente es mayor que el downforce. Fuente: [https://www.razine.com/assets/images/content/razine\\_2013/junio\\_2013/macana.4.jpg](https://www.razine.com/assets/images/content/razine_2013/junio_2013/macana.4.jpg)

3.- Downforcé, como su nombre indica es la fuerza producida hacia abajo, es la más importante a considerar en el mundo de competición, porque empuja al coche hacia la pista.

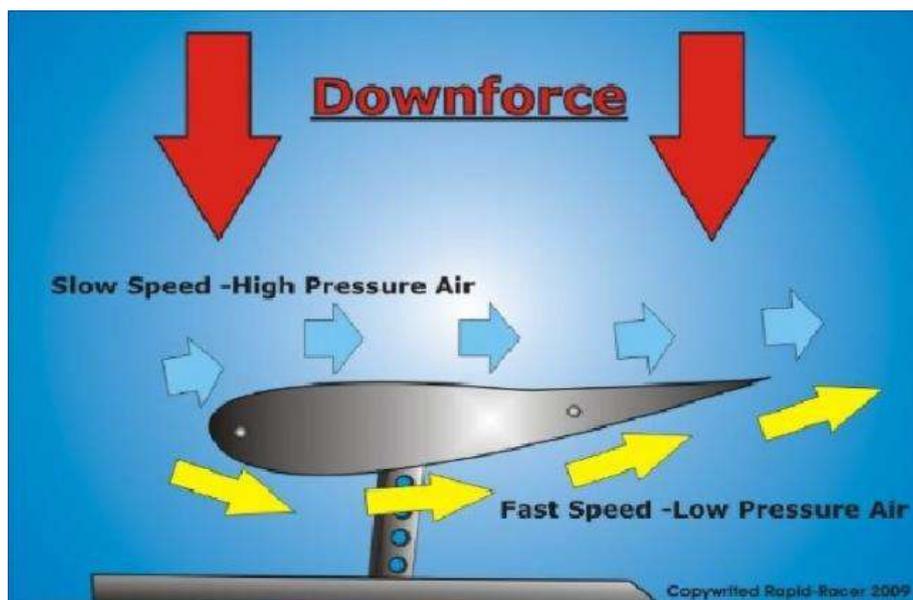


Ilustración 2.67 Downforce o fuerza descendente. Fuente: [https://www.razine.com/assets/images/content/razine\\_2013/junio\\_2013/macana.2.jpg](https://www.razine.com/assets/images/content/razine_2013/junio_2013/macana.2.jpg)

4.- Drag o fuerza al avance, es la resistencia o fuerza que se opone al avance cuando un cuerpo progresa a través del aire, siempre es de sentido contrario a la fuerza de propulsión.

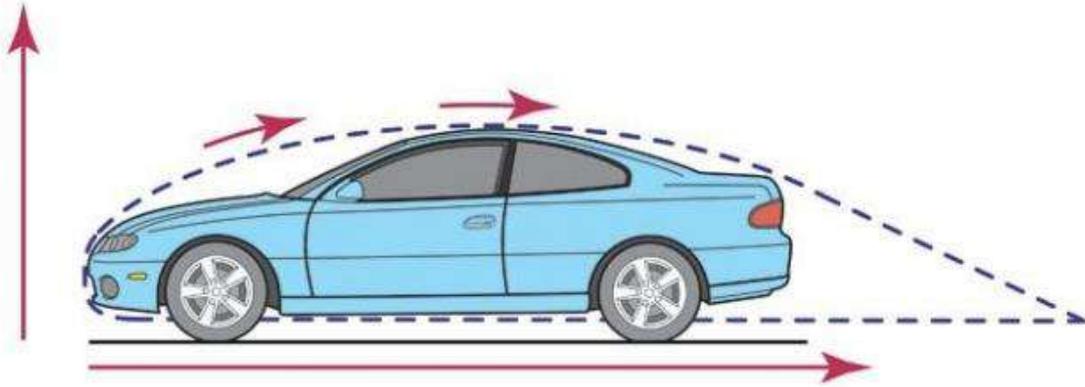


Ilustración 2.68 Esquema de resistencia al avance. Fuente: [https://www.razine.com/assets/images/content/razine\\_2013/junio\\_2013/macana.3.jpg](https://www.razine.com/assets/images/content/razine_2013/junio_2013/macana.3.jpg)

En la competición, tanto la resistencia aerodinámica (drag) y la carga aerodinámica (lift) son de vital importancia, son objetivo de los diseñadores de monoplazas porque deben conseguir la máxima carga aerodinámica (downforce) y minimizar la resistencia al avance (drag), es decir, llegar a un equilibrio entre ambas. A continuación, se detallan ampliamente.

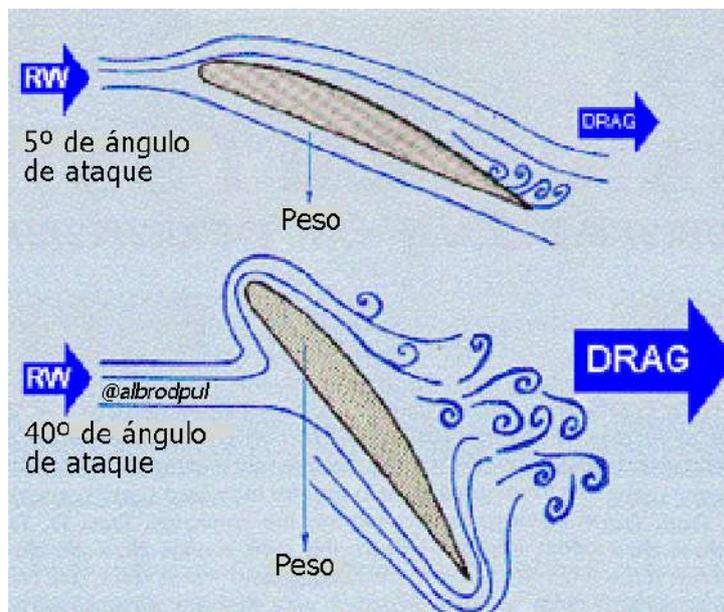


Ilustración 2.69 Drag. Fuente: <https://albrodpul1.files.wordpress.com/2014/07/drag.png>

### 2.5.1 Carga aerodinámica

La carga aerodinámica ( $F_z$ ) o también llamada downforce, es una fuerza vertical, que empuja al coche hacia el asfalto produciendo un mayor agarre.

Se define:

$$N = m \cdot g - F_L$$
$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot c_L$$

Donde:

- $F_L$ = Fuerza debida a la carga aerodinámica
- $\rho$ = densidad
- $v$ = velocidad
- $A$ = área
- $C_L$ = coeficiente de sustentación (lift)

Cuando se añade una carga aerodinámica sobre el coche, la normal se incrementa debido a la suma del peso y de la carga, esto genera un aumento en la fuerza de agarre; permitiendo alcanzar altas velocidades en las curvas y un mayor agarre.

Para añadir carga aerodinámica se añaden una serie de aditamentos como los alerones, que realizan la misma función que las alas de un avión, pero al revés. El aire circula a distintas velocidades por las dos caras del alerón y tiene que recorrer distancias desiguales, lo que crea un contraste en las presiones. Se basa en el principio de Bernoulli el cual define que, entre la cara intradós y la cara extradós de un perfil, existe una discrepancia de presiones. Cuando se acrecienta la velocidad del aire en el intradós disminuye la presión (efecto Vénturi) y por tanto, aumenta en el extradós.

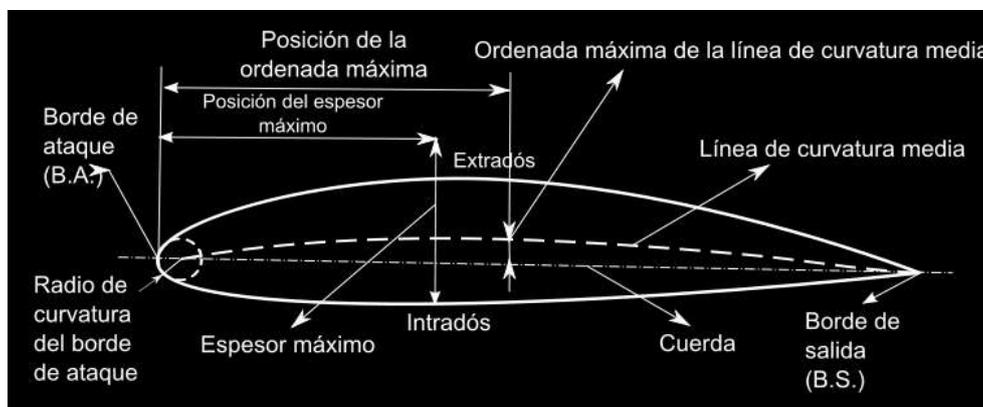


Ilustración 2.70 Esquema de un perfil alar. Fuente: <http://docplayer.es/docs-images/31/14891006/images/37-0.png>

Cuando el ángulo de inclinación del alerón con respecto a la dirección del flujo del aire disminuye, el aire se despega del intradós (efecto coanda). A medida que el ángulo de ataque se acrecienta, también aumenta el coeficiente de sustentación, es decir, aumenta el downforce que es la fuerza responsable de aumentar la adherencia del coche y por lo tanto poder incrementar la velocidad en las curvas teniendo mayor estabilidad, pues en coches de poco peso como los de F1, la inercia lateral tiende a sacarlo de la trazada.

Resumiendo, se podría decir que el principal factor que mayor efecto determina en la carga aerodinámica es la velocidad, pues está elevada al cuadrado, siguiendo después con el ángulo de ataque, el diseño del perfil, la superficie del alerón, la densidad del aire y del coeficiente de sustentación.

La sustentación se designa como la fuerza generada por el aire en dirección perpendicular al movimiento del cuerpo. Dicha sustentación en los aviones es positiva, mientras que en los automóviles es negativa, denominándose deportancia, downforce o antisustentación.

A todos los elementos aerodinámicos de un monoplace que se instalan para producir agarre, se le denomina con el término “grip” aerodinámico. Dichos elementos son los alerones tanto delantero como traseros, el difusor, los flaps, los winglets, etc, existen infinidad de aditamentos distribuidos por todo el vehículo, para generar mayor carga aerodinámica.

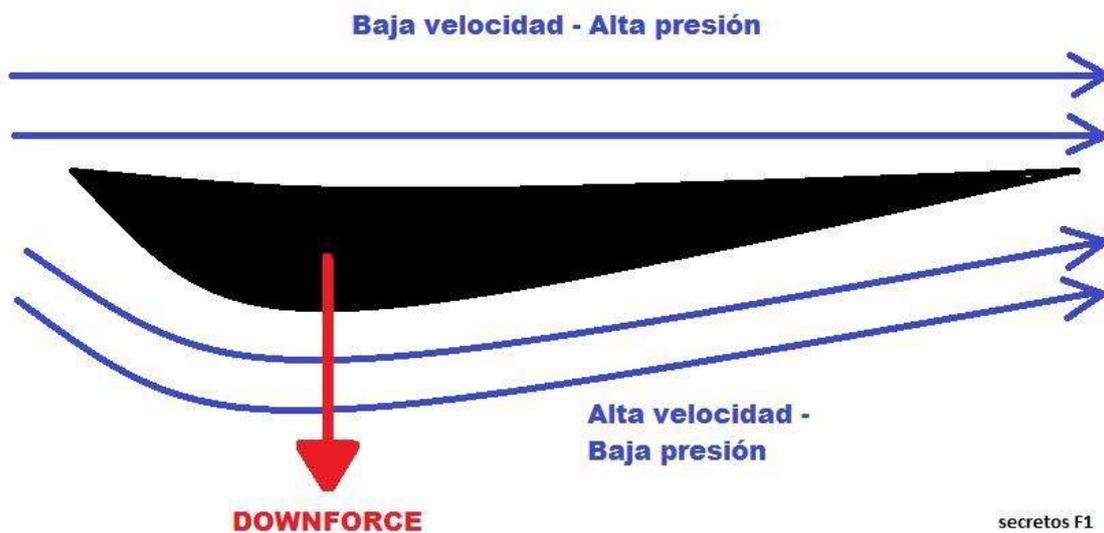


Ilustración 2.71 Carga aerodinámica. Fuente:  
<https://secretosf1.files.wordpress.com/2010/03/perfil.jpg>

### 2.5.2 Resistencia aerodinámica

La resistencia aerodinámica ( $F_D$ ), también se denomina drag es la fuerza resultante que experimenta un sólido en movimiento a través del aire. Es de dirección opuesta a la velocidad del cuerpo, por lo que se dice que se opone al avance de éste.

Se define:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot c_D$$

Donde:

- $F_D$ = Fuerza debida a la resistencia aerodinámica
- $\rho$ = densidad
- $v$ = velocidad
- $A$ = área
- $C_D$ = coeficiente de arrastre (drag)

El aire es un fluido y todo cuerpo en movimiento que lo atraviese genera una resistencia, esta fuerza se origina cuando el sólido choca contra las moléculas del fluido, por lo tanto, se deduce que, esta magnitud depende directamente de la forma y tamaño del cuerpo, así como de su velocidad. Cuanto mayor sea el tamaño y más rápido se mueva, se chocará con más moléculas.

Lo mismo que ocurre con otras fuerzas aerodinámicas, para comprobar la eficacia de un cuerpo en movimiento atravesando el aire, se usan coeficientes aerodinámicos. El coeficiente asociado a la resistencia se denomina coeficiente de penetración o coeficiente de resistencia.

La forma del vehículo influye en el valor del coeficiente de resistencia aerodinámica, además tras ciertos estudios también se ha demostrado que la reducción del coeficiente entre 0,5 a 0,3 provoca una disminución de casi un 23% en el consumo del carburante.

Dos automóviles asignados con el mismo coeficiente, pero con perfiles diferentes, circulando a la misma velocidad, pueden dar resistencias distintas.

La carga aerodinámica y la resistencia son dos fuerzas dependientes, porque si se aumenta el downforce, también se incrementa la resistencia y si se disminuye el dowforce también se reduce la resistencia, por lo que se puede decir que son directamente proporcionales.

Sin embargo, el objetivo de los ingenieros en Formula 1, es conseguir aumentar la carga aerodinámica o downforce pero disminuir la resistencia o drag.



## 2.6 Los números adimensionales

Un número adimensional es un número puro que no posee unidades físicas, por lo tanto, se determinan como productos o cocientes de cantidades que sí tienen unidades, de tal forma que, todas éstas se simplifican. Para realizar un examen más esmerado de las ecuaciones del movimiento, mediante el análisis dimensional, nos lleva a considerar otros parámetros adimensionales.

Los números adimensionales con sus correspondientes dimensiones incluyen varias propiedades, se usan, con un único parámetro se es capaz de controlar varias características.

Los números adimensionales más utilizados en el mundo de la aerodinámica son el número de Reynolds y el número de Mach.

### 2.6.1 El número de Reynolds

El número de Reynolds (Re) se especifica como la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de rozamiento en el flujo de un fluido dotado de viscosidad; en la práctica representa todos los movimientos relativos entre un fluido y un sólido. Es un parámetro cuyo valor nos indica si el flujo sigue un módulo laminar cuando es bajo el número de Reynolds mientras que es turbulento, para valores altos.

Se define:

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

Donde:

- $\rho$  = la densidad del aire
- $v$  = la velocidad relativa
- $L$  = longitud total del sólido
- $\mu$  = representa la viscosidad dinámica

Cuando el número de Reynolds es superior a 4000 el flujo es turbulento, mientras que para más bajos de 2000 el flujo es laminar. En el caso de que el número de Reynolds se encuentre entre los valores de 2000 y 4000, se indica que el flujo está en transición y no se precisa su comportamiento.

El Flujo Laminar, es aquel en el cual las partículas del aire se desplazan en líneas uniformes en capas homogéneas, deslizándose una capa sobre la adyacente, sin existir mezcla o intercambio transversal entre ellas.

El Flujo turbulento se define cuando las partículas del fluido se desplazan en de forma muy irregular, en trayectorias distintas, lo que origina un intercambio del movimiento de una zona a otra del fluido.

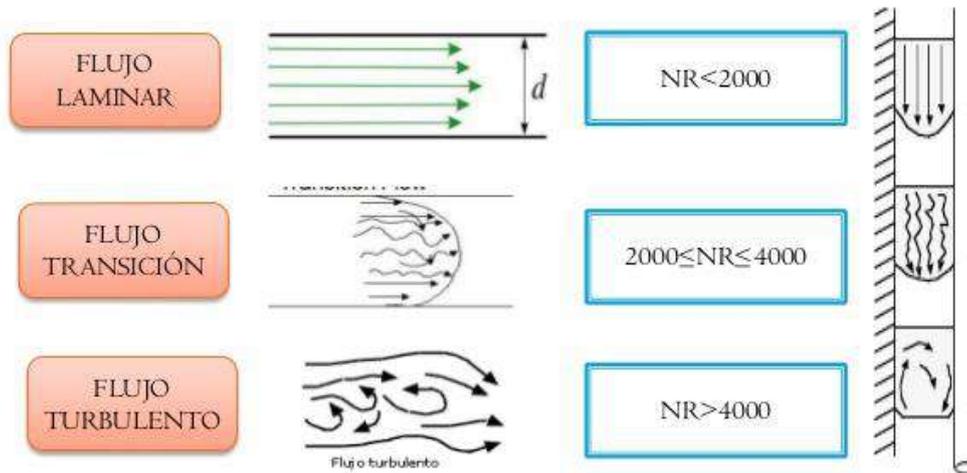


Ilustración 2.72 Clasificación del flujo de un fluido. Fuente:  
<https://image.slidesharecdn.com/cinematicadefluidos-141118193622-conversion-gate01/95/cinematica-de-fluidos-14-638.jpg?cb=1416777521>

Uno de los mayores conflictos de la aerodinámica es la turbulencia, se ocasiona debido a los desniveles de presión y diferencias de velocidad que se encuentran alrededor de un sólido. La capa más próxima a la superficie del cuerpo, mantiene una velocidad nula, mientras que las capas según se van alejando de la superficie van adquiriendo velocidad, puesto que tienen menor fricción, hasta llegado el punto donde la capa de flujo no percibe la existencia de la superficie y su velocidad varía, adoptando la misma velocidad que el flujo libre. De tal manera que, se genera un flujo turbulento donde hay cambios en la presión y en la velocidad y por tanto el movimiento de las partículas es aleatorio formando remolinos.



Ilustración 2.73 Esquema del flujo del fluido y Capa límite. Fuente:  
[http://www.caranddriverthef1.com/sites/default/files/imce/u25709/flujo-turbulento\\_0.jpg](http://www.caranddriverthef1.com/sites/default/files/imce/u25709/flujo-turbulento_0.jpg)



### 2.6.2 El número de Mach

El número de Mach ( $Ma$ ) es uno de los parámetros más relevantes de los flujos unidimensionales que se muestran en el análisis de flujo compresible.

Es una medida de velocidad relativa que se especifica como el cociente entre la velocidad de un objeto y la velocidad del sonido en el medio en el cual se mueve dicho objeto.

En el sentido de las fuerzas, el número de Mach, es la relación que existe entre las fuerzas de inercia y las fuerzas que se originan por la compresibilidad del fluido.

Es un término muy usado por los técnicos, para estudiar y analizar el movimiento de los fluidos en torno a los sólidos.

Principalmente, se usa para describir la velocidad de los aviones.

Se define:

$$Ma = V/c$$

Donde:

$V$  = velocidad local

$c$  = velocidad del sonido

Para valores bajos del número de Mach (hasta 0,3) se considera que el fluido alrededor del perfil es incompresible, mientras que para cifras mayores (hasta 0,8 – 0,9), se supone que el fluido es compresible en las características del perfil.

## 2.7 Coeficientes aerodinámicos

Los coeficientes aerodinámicos son números adimensionales que se usan para estudiar la aerodinámica de las fuerzas y los momentos que soporta cualquier cuerpo en movimiento a través del aire.

Algunos de los coeficientes más conocidos son:

- El coeficiente de sustentación  $C_L$
- El coeficiente de resistencia  $C_D$
- El coeficiente de penetración  $C_X$

Dichos coeficientes se usan en el mundo de la automoción, pero se les da una notación diferente a la que se utiliza en la aeronáutica, usando como subíndices los ejes de referencia del automóvil, siendo X en sentido longitudinal, Y en sentido trasversal y Z en sentido vertical.

- El coeficiente de resistencia aerodinámica se denomina  $C_X$ , en lugar de  $C_D$ . Se emplea como superficie de referencia el área frontal del vehículo.
- El coeficiente de sustentación se le llama  $C_Z$ , en vez de  $C_L$ . Y también se utiliza el coeficiente de antisustentación, que es un componente en sentido descendente de la fuerza aerodinámica.
- El coeficiente de empuje lateral se simboliza como  $C_Y$ , exactamente igual que en aeronáutica, y se toma como referencia el área frontal del coche.
- El coeficiente de arrastre, es un valor muy usual en el diseño de coches. Teniendo en cuenta que la resistencia aerodinámica incrementa con el cuadrado de la velocidad, para los coches de competición es preferible un valor bajo a uno alto.

En Formula 1 a la fuerza de resistencia al avance se le llama dragforcé y a la fuerza de sustentación liftforcé.

Entonces, otra forma de mencionar al coeficiente de penetración  $C_X$  es  $C_D$  debido a la letra inicial de drag y al coeficiente de elevación  $C_L$  por lift.

### 2.7.1 Coeficiente de resistencia $C_x$ o $C_D$ (drag) (arrastre) (resistencia aerodinámica)

El Coeficiente de resistencia aerodinámica  $C_D$ , es un número adimensional, es decir, no posee un valor como unidad, es una magnitud que se consigue de forma experimental con pruebas en túneles de viento.

Actualmente también se puede calcular por medio de programas de ordenador que contienen variadas y complejas operaciones matemáticas y que dan resultados con un margen de error del 0,1%.

Este coeficiente no posee un valor numérico constante, sino que depende de la forma y el tamaño del cuerpo, de la velocidad con la que atraviesa el fluido, la dirección del flujo, la densidad y la viscosidad del fluido.

La forma del cuerpo influye en el coeficiente provocando más o menos resistencia.

Shape	Drag Coefficient
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Cone	0.50
Cube	1.05
Angled Cube	0.80
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04
Streamlined Half-body	0.09

Measured Drag Coefficients

Ilustración 2.74 Coeficiente de arrastre para diferentes formas geométricas. Fuente: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/37/14ilf1l.svg/440px-14ilf1l.svg.png>

Dependiendo de la forma del cuerpo que atraviesa el fluido, ofrecerá más o menos resistencia:

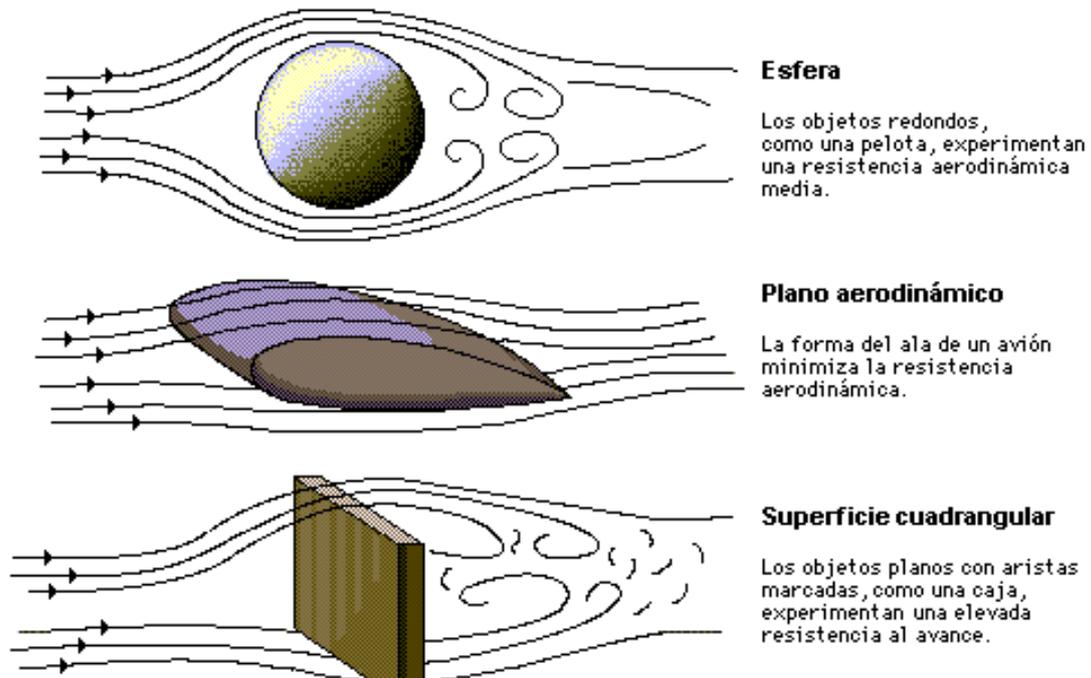


Ilustración 2.75 Resistencia aerodinámica. Fuente:  
<http://www.angelfire.com/scifi2/coheteria/aerodinamica/Image8.gif>

Además, está asociado al número de Reynolds, pues a números de Re altos, los coeficientes de arrastre son constantes, más o menos en la mayoría de las geometrías. Esto se explica porque para valores altos de números Re, el flujo se vuelve turbulento.

Para hallar el coeficiente de resistencia se define la siguiente formula:

$$c_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}$$

Donde:

$F_d$ = fuerza drag  
 $\rho$ = densidad  
 $v$ = velocidad  
 $A$ = área

### 2.7.2 Coeficiente de sustentación $C_z$ o $C_L$ (lift) (carga aerodinámica) (sustentación)

En automovilismo el coeficiente de sustentación es al contrario que en aeronáutica, pues lo que se trata es de conseguir una elevada presión por encima del vehículo y por debajo una baja, pues lo que se busca es una fuerza que genere esta diferencia de presiones, y así empuje al vehículo hacia el asfalto. Por este motivo los valores de  $C_L$  negativos mejoran el dowforce, efecto deseado en la competición, por lo tanto, estaríamos hablando de antisustentación.

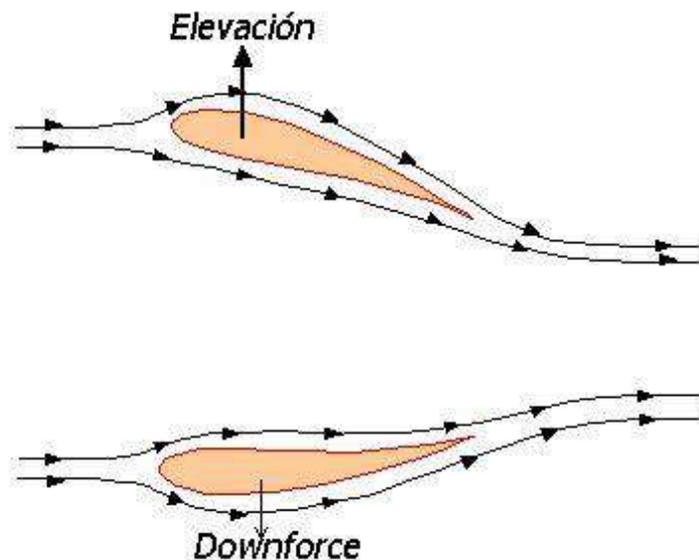


Ilustración 2.76 Carga aerodinámica o downforce. Fuente: <https://albrodpulf1.files.wordpress.com/2014/07/croppercapture2.jpg>

La carga aerodinámica depende de factores como la densidad del aire, la velocidad del flujo al cuadrado, de la superficie del alerón y del ángulo de ataque de éste y el coeficiente de sustentación.

Se define:

$$c_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}$$

Donde:

$F_L$ = fuerza lift  
 $\rho$ = densidad  
 $v$ = velocidad  
 $A$ = área

Los monoplazas son muy ligeros, para incrementar el peso, se le añaden fuentes productoras de downforce como son, en la parte frontal, los alerones, splitters (prolongación del fondo plano), endplates (parte lateral de los alerones delantero y trasero), generadores de vórtices y la parte inferior conectada con el difusor; en la zona central del coche se colocan pontones, bargeboards (placas verticales curvas entre las ruedas delanteras y la entrada del aire en los pontones), turning vanes (deflector pequeño colocado entre las ruedas y el monocasco), vórtices generadores y roll hoops (arcos antivuelco); en la parte trasera, el alerón y el difusor.

El principal factor que provoca más efecto en la carga aerodinámica es la velocidad, pero además se debe tener en cuenta, el ángulo de ataque del alerón, pues se trata del ángulo que se establece entre la horizontal del perfil y la horizontal del fluido, que según se vaya aumentando también se incrementa el coeficiente de sustentación.

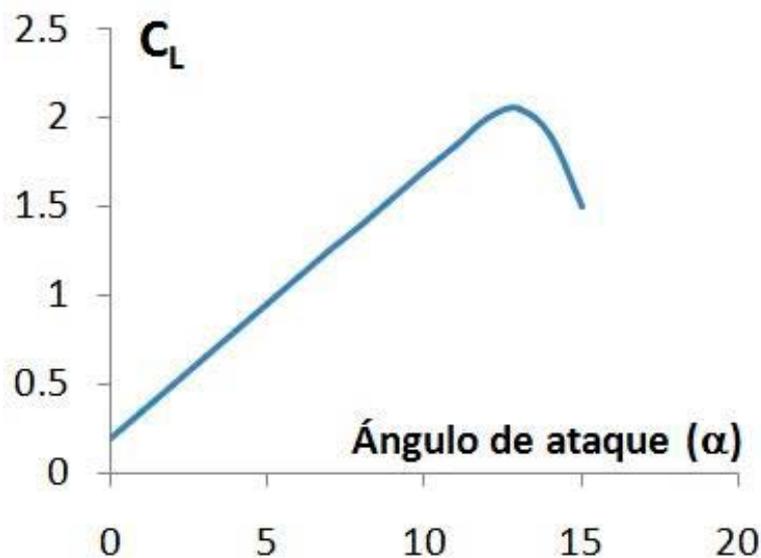


Ilustración 2.77 Gráfica de ángulo de ataque. Fuente: <https://secretosf1.files.wordpress.com/2010/03/grafico-cl-alfa.jpg>



### 2.7.3 Coeficiente de empuje lateral ( $C_Y$ )

Existe una fuerza lateral, que aparece debido al viento lateral, en ocasiones muy peligroso, porque tiende a que el vehículo gire alrededor del eje vertical, es decir, puede provocar el vuelco del coche.

La fuerza de empuje lateral se incrementa cuando velocidad del viento va en aumento, y además es determinante cuanto mayor es el tamaño del coche.

Se define:

$$c_Y = \frac{F_Y}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}$$

Donde:

$F_Y$ = fuerza lateral  
 $\rho$ = densidad  
 $v$ = velocidad  
 $A$ = área

### 2.7.4 Eficiencia aerodinámica

Se denomina eficiencia aerodinámica a la relación entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de resistencia aerodinámica

Se define:

$$e = \frac{c_z}{c_x} = \frac{c_L}{c_D}$$

Para conseguir una óptima eficiencia aerodinámica en un vehículo, se debe lograr un equilibrio entre la carga aerodinámica y la resistencia al avance, es decir, conseguir la mayor cantidad de carga aerodinámica posible con la menor fuerza de resistencia al avance o drag, pues desde el punto de vista de un monoplaza de competición, lo que se trata es conseguir una celeridad mayor en las curvas, pero sin sacrificar velocidad punta en las rectas.

## 2.8 Estudio de la aerodinámica

Para calcular y valorar la aerodinámica de un vehículo, se dispone de dos herramientas, el túnel de viento y el CFD, que se suelen emplear de forma simultánea para adquirir resultados más rápidamente.

En los túneles de viento se realizan ensayos con un prototipo del vehículo, donde se determina el valor de los coeficientes ( $C_x$ ,  $C_z$ ,  $F_x$ , etc), en un entorno controlado, donde es posible conocer, la densidad del aire, el coeficiente de sustentación, el área de referencia, la velocidad, la fuerza de arrastre, etc.

Las instalaciones de los túneles de viento suelen ser muy costosas, se necesita crear un prototipo del coche, lo que resulta muy laborioso y costoso, además los defectos que se desvelen deben ser corregidos, mediante modificaciones en el modelo.

Debido a esto, durante el desarrollo del diseño, se utiliza software CFD (Computacional Fluid Dynamics), para realizar cálculos numéricos, estudios muy rápidos con un presupuesto muy inferior a los costes del túnel de viento.

En la actualidad, existen diversos programas que utilizan códigos CFD como son CFdesingn, Fluent, CD-Adapco, Star CCM+, Ansys, Flow Science, Metacomp, Technologies, FieldView de Intelligent Light y OpenFOAM.



Ilustración 2.78 Aerodinámica en un coche. Fuente: <https://www.emaze.com/@AWCCTIFC/Aerodinamica-Automotriz-copy1>

### 2.8.1 CFD (Computacional Fluid Dynamics)

La Dinámica de fluidos computacional es una de las ramas de la mecánica de fluidos, que mediante ciertos métodos numéricos y algoritmos se soluciona y examina el comportamiento del flujo de sustancias. Es decir, se efectúan un conjunto de técnicas matemáticas y numéricas, para realizar una simulación en ordenador, de manera que se pueda estudiar y analizar la interacción de un fluido con diversas superficies de un sólido.

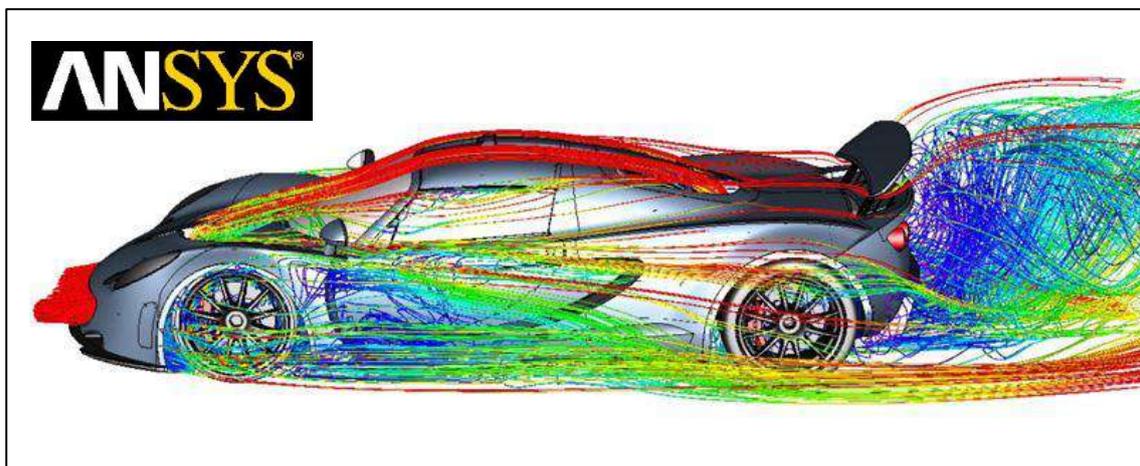


Ilustración 2.79 Aerodinámica del Bugatti Veyron. Fuente: [http://www.motor.es/fotos-noticias/2011/06/venom-qt-a-por-el-bugatti-veyron-2943\\_3.jpg](http://www.motor.es/fotos-noticias/2011/06/venom-qt-a-por-el-bugatti-veyron-2943_3.jpg)

La utilización del CFD para solventar problemas de flujo de fluidos ha sufrido un rápido crecimiento en muchas áreas de la ingeniería. Se usa en numerosas aplicaciones como en la industria automotriz, aeronáutica, aeroespacial, aerodinámica del deporte, construcciones arquitectónicas, etc.

El CFD aporta un análisis cualitativo de los flujos de fluidos por medio de un modelado matemático a base de complejas ecuaciones diferenciales parciales, se utilizan métodos numéricos para dar técnicas de solución, es decir, estas simulaciones por ordenador, permite a los ingenieros crear un laboratorio de flujo virtual para mejorar las características aerodinámicas del vehículo.

La técnica radica en discretizar una región del espacio, formando una malla espacial, y dividiendo la región del espacio en mínimos volúmenes de control. Permite visualizar y precisar un análisis de la información a detalle, para evaluar distintas configuraciones y experimentar con aquellas soluciones más competentes.

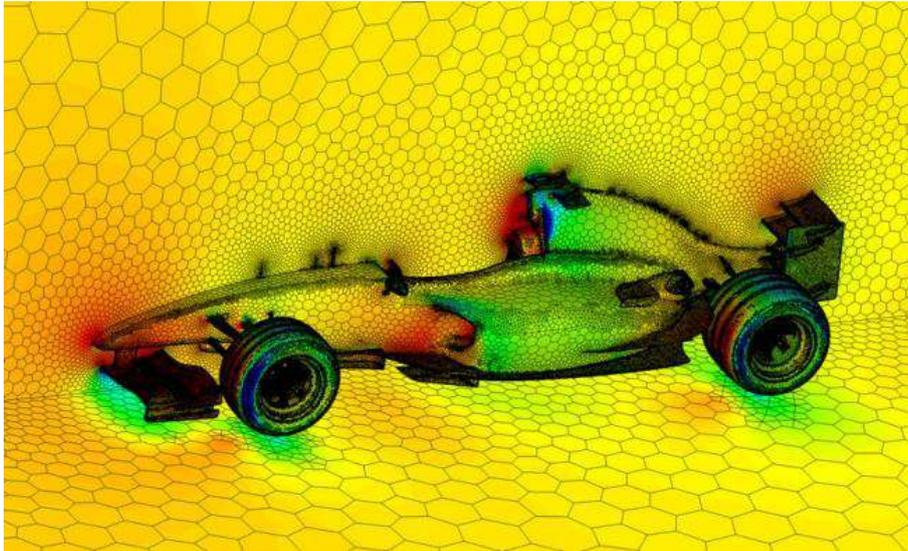


Ilustración 2.80 Malla de simulación sobre la que se realizan los cálculos a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes. Fuente: [https://www.motor.es/fotos-noticias/2015/05/min652x435/dinamica-computacional-fluidos-complemento-201521393\\_2.jpg](https://www.motor.es/fotos-noticias/2015/05/min652x435/dinamica-computacional-fluidos-complemento-201521393_2.jpg)

Después, una vez obtenidos los datos mediante CFD, se verifican en los túneles de viento utilizando modelos a escala. Pues se trata de un método complementario y estrechamente interrelacionado con el trabajo en el túnel de viento.

La ventaja de esta herramienta es que se pueden evaluar varias configuraciones y someter a prueba en un tiempo breve, por ejemplo, se pueden comprobar diferentes derivas laterales para un mismo alerón. Una vez comprobado todos los resultados, se llevan a la sesión de prueba del túnel, únicamente las soluciones más prometedoras, ahorrando así tiempo y costes.

Para los equipos de Formula 1, el CFD tiene principalmente las siguientes ventajas:

- **Visión:** proporciona una visión del diseño de un dispositivo que fabricando el prototipo puede resultar difícil o muy costoso para la experimentación. Además, existen numerosos fenómenos que se observan a través del CFD, y que no sería posible su visión a través de otro medio.
- **Previsión:** se trata de una herramienta que rápidamente consigue predecir el comportamiento de un diseño, en un conjunto de condiciones de contorno, contrastando y probando diversas variaciones hasta obtener el resultado más óptimo, antes de fabricar el prototipo físico.
- **Eficiencia:** la previsión que se consigue con el CFD permite llegar al desarrollo del diseño con mayor resolución, y de un modo más rápido. Esto admite el ahorro de costes, y la garantía de respetar normas y reglamentos de la FIA.

## 2.8.2 Túnel de viento

El túnel de viento consiste en un complejo dispositivo experimental, en forma de tubo, diseñado para desarrollar el estudio de los efectos que produce el flujo del aire al circular en torno a diferentes cuerpos sólidos.

Existen numerosas aplicaciones en las que las prestaciones del túnel de viento son competitivas, como ingeniería aeronáutica, ingeniería automovilística, ingeniería civil, arquitectura, energías renovables, entrenamiento deportivo, etc.

Actualmente, la función del túnel de viento es secundaria, es decir, sirve para comprobar y ratificar todo aquello que los ingenieros de aerodinámica, han diseñado mediante los programas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

Los túneles de viento aerodinámicos, que se usan en la industria automovilística, mantienen una infraestructura básica, son estructuras cerradas, en la cuales una turbina introduce aire acelerado a distintas velocidades en un departamento, en el cual el modelo permanece estacionario. En la superficie de la maqueta, se le adaptan unos sensores de presión para calcular numéricamente fuerzas aerodinámicas, centro de presiones, coeficientes aerodinámicos y momentos aerodinámicos.

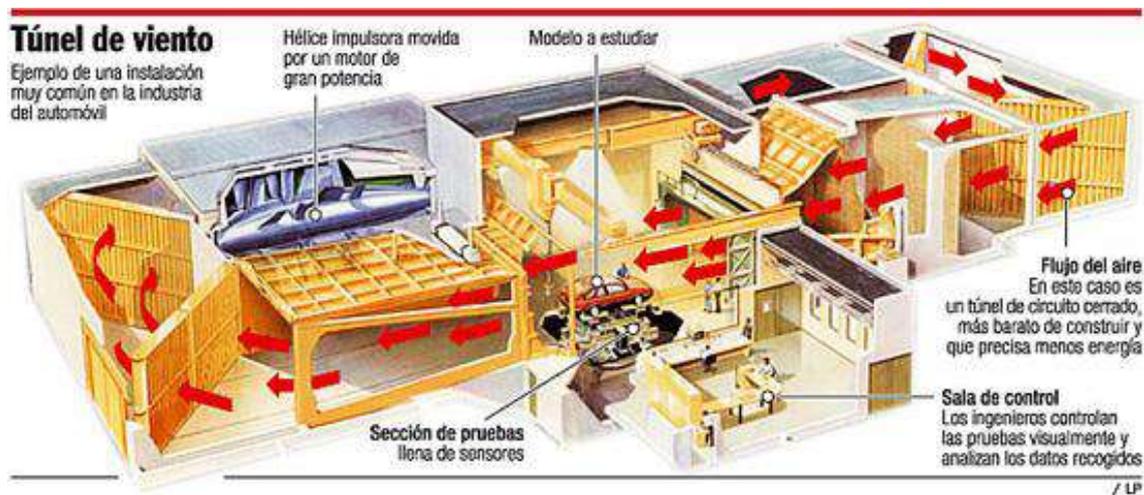


Ilustración 2.81 Túnel de viento. Fuente: <http://www.que-formula1.com/wp-content/uploads/2009/03/tunel-viento-01.jpg>

En Formula 1, es una herramienta imprescindible, y las escuderías invierten gran cantidad de dinero y tiempo, utilizando los túneles de viento durante el desarrollo de sus diseños. Los equipos con recursos intentan poseer el túnel de viento más avanzado, y los equipos más humildes lo alquilan para comprobar si un monoplaza se compone de las prestaciones aerodinámicas deseadas.

El aire es impulsado por un enorme ventilador y es soplado a lo largo de un conducto provisto de unas rejillas estabilizadoras o deflectores laterales, para certificar que el aire que llega a la sección de test, tenga un flujo laminar y homogéneo, aunque también se pueden colocar obstáculos, si se desea trabajar con flujo turbulento. Una vez controlado el aire, (normalmente se usa el flujo laminar), se pasa a una sección de prueba llamada garganta, donde las paredes son transparentes para poder observar o filmar, y se coloca la maqueta en una superficie llamada balanza. Esta es una cinta móvil que simula el movimiento del coche, y que consta de unos sensores, los cuales nos proporcionan información y datos necesarios para deducir los coeficientes de sustentación y de resistencia aerodinámica que se forman en el prototipo, y así conocer si es viable emplear el modelo en situaciones reales. Además, en la superficie de dicho modelo, se colocan dispositivos o sensores para registrar la diferencia de presiones.

El modelo de ensayo permanece inmóvil, es el suelo rodante sobre el que se deposita, lo que se mueve y el aire que circula a su alrededor, al contrario que lo que sucede en el circuito. Las mediciones serán más fiables, cuanto mayor sea la escala del modelo en pruebas y la separación de las paredes laterales del túnel respecto a éste.

A veces el modelo puede llegar a ser de tamaño real, dependiendo de la capacidad del túnel, la cinta móvil, el sistema de sujeción y medida de las cargas que se someten al prototipo.

Es de vital importancia, que la maqueta sea idéntica al modelo real, incluso elementos como los neumáticos, creados por fabricantes externos, para que los datos resultantes sean válidos y fiables.

Para visualizar el flujo, se utilizan diversas técnicas para analizar y contrastar los datos recopilados mediante la tecnología Computational Fluid Dynamics:

- Se pueden fijar unas hebras de lana o papel a la superficie del modelo, para mostrar la dirección del aire, de una manera óptima y su velocidad relativa.
- Se suelen emplear inyecciones de tintes o humo previamente coloreado que se mezcla con el flujo del aire, de tal manera que se puede visualizar de forma más clara, el comportamiento de las partículas y su movimiento al rozar la superficie del modelo de ensayo. Concretamente, con estos tintes se pueden visualizar mejor las turbulencias. Dichas turbulencias manifiestan las diferentes presiones que se producen por las corrientes de aire, los datos obtenidos se pueden registrar en dispositivos electrónicos para después descifrar en un ordenador consiguiendo tablas del perfil aerodinámico.
- También se pueden insertar sondas estratégicamente, en puntos específicos del flujo del aire, del tal manera que se puede medir la presión estática o dinámica del aire



Ilustración 2.82 Túnel de viento de Ferrari. Fuente: <http://virutasf1.com/wp-content/uploads/2013/09/tunel-viento-ferrari.jpg>

Los resultados prácticos obtenidos en los ensayos de prueba, deben ser contrastados con los resultados teóricos, y muy importante a determinar es la comparación con el Numero de Reynols y el Número Mach, que establecen los criterios de validación en los ensayos realizados en el túnel, con las maquetas a escala.

Para conseguir un desarrollo de modelado y una óptima simulación debe cumplirse la Teoría de las semejanzas, que se utiliza para trabajar con modelos a escala. Esta teoría requiere que entre el modelo y el objeto real haya tres semejanzas relacionadas entre sí, para que los resultados en el ensayo sean lo más similar a la realidad:

- Semejanza geométrica: Se dice que dos objetos son semejantes si sus dimensiones son proporcionales.
- Semejanza cinemática: Dos objetos son semejantes cinemáticamente, si son semejantes geométricamente y si sus vectores de velocidad son proporcionales y su dirección es la misma. Este dato viene determinado por el ángulo de colocación del cuerpo respecto al vector de velocidad del flujo.
- Semejanza dinámica: Dos objetos son semejantes dinámicamente cuando los dos son semejantes cinemáticamente, su orientación es la misma y los vectores de fuerza son proporcionales.

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

---

En resumen, se podría manifestar que dos cuerpos son semejantes aerodinámicamente, si tienen las fuerzas de rozamiento y presión proporcionales.



Ilustración 2.83 Modelo a escala en túnel de viento. Fuente: <http://4.bp.blogspot.com/-uK8IT7Msfos/Uc8eFog8R9I/AAAAAAAAAHs/9DV1VAf4J8c/s320/203232078-19361523122009.jpg>



Ilustración 2.84 Modelo real en túnel de viento. Fuente: <http://www.blogcdn.com/es.autoblog.com/media/2010/08/a42b.jpg>

### 2.8.2.1 Tipos de túnel de viento

Los túneles de viento se pueden clasificar en varios tipos, cada uno de ellos posee ventajas e inconvenientes y según para las aplicaciones que se use, así se adopta la mejor elección del tipo de túnel.

#### 1. Circuito abierto o cerrado:

Esta clasificación se realiza según el criterio de la circulación del flujo del aire. Se llama túnel de viento abierto, cuando el aire se toma de la atmosfera del exterior, y una vez recorrido el túnel, vuelve a salir al exterior, por lo que el mayor inconveniente que existe es la dependencia de las condiciones externas.

El circuito cerrado posee la salida de aire conectada con la entrada, el aire se recicla y pasa por la cámara varias veces, recuperando la energía fluida por medio de un difusor. Una gran ventaja de este tipo de túnel, es que permite controlar las variables termodinámica, (presión, temperatura y densidad). Además, en el circuito cerrado se obtiene la ventaja de tener menos pérdidas que en el circuito abierto, sin embargo, el inconveniente de éste, es que se necesita una instalación más compleja y de mayor tamaño, por lo que se deriva en un mayor coste.

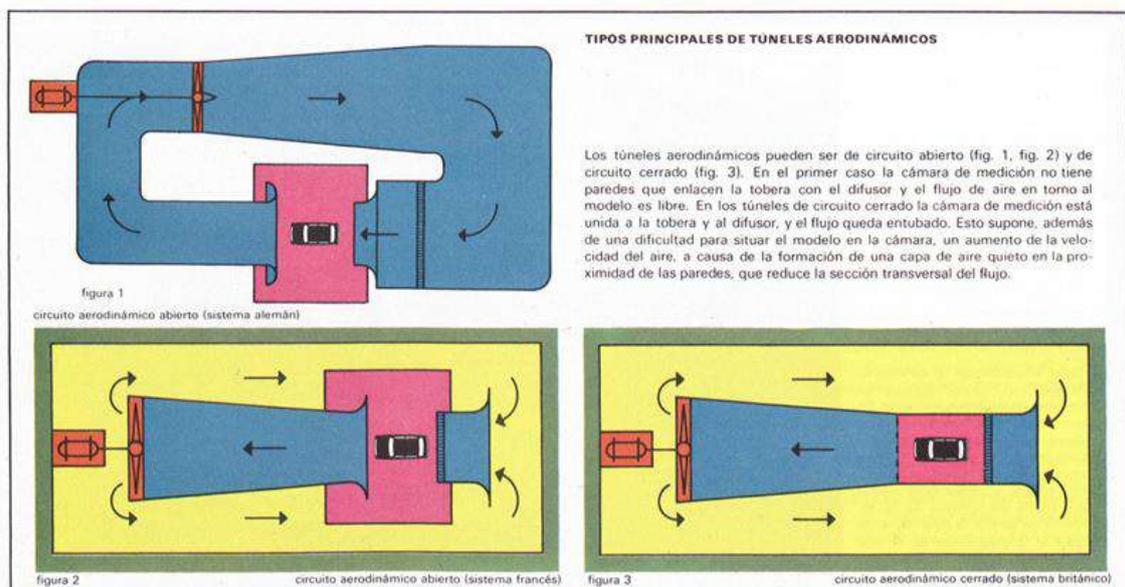


Ilustración 2.85 Esquema de túnel cerrado y abierto. Fuente:

<https://motorgiga.com/cargadatos/fotos2/diccionario/infografias-y-curiosidades/800px/tunel-aerodinamico.jpg>

## 2. Con cámara de ensayos abierta o cerrada:

La elección entre cámara abierta o cerrada, depende del tamaño del modelo de pruebas. En un túnel con cámara abierta permite prototipos de grandes dimensiones, sin embargo, el inconveniente que existe es que el flujo del aire se controla en menor medida y se genera un aumento de pérdidas de aire.

## 3. Soplado o aspirado:

Esta clasificación se refiere a la disposición en la que se encuentran colocados los ventiladores en el túnel, y como se impulse el aire sobre el modelo de pruebas. En el túnel soplado, los ventiladores se ubican delante del modelo, antes de la cámara de ensayos, y éstos generan una mayor velocidad, pero el flujo se vuelve turbulento, mientras que, en el túnel aspirado, los ventiladores se encuentran detrás de la cámara de ensayo, por lo tanto, detrás del modelo, estos proporcionan menor velocidad, sin embargo, el flujo del aire es laminar, mucho más regular y uniforme.

## 4. Respecto a la velocidad que alcance el flujo del fluido:

Túnel Subsónico, ( $Mach < 1$ ), velocidad menor que la del sonido

Túnel Transónico, ( $Mach = 1$ ), velocidad entre los 930 y 1230

Túnel supersónico, ( $Mach > 1$ ), velocidad superior a la del sonido

Túnel hipersónico ( $Mach > 5$ ), velocidad 5 o más vez mayor que la del sonido

Régimen de Velocidad	Flujo Típico (Modelo)	Sección de Entrada	Radio de Compresión	Motor o sistemas de motor
Subsónico ( $M=0 - 0.7$ )			1.0+	
Transónico ( $M=0.7 - 1.2$ )			1.1	
Supersónico ( $M=1.2 - 5$ )			2 ( $M=2$ )	
Hipersónico ( $M > 5$ )			20 ( $M=5$ )	

Ilustración 2.86 Tipo de túneles aerodinámicos por su velocidad. Fuente: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6e/Tipo\\_tuneles\\_velocidad.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6e/Tipo_tuneles_velocidad.png)



## **5. Tamaño y capacidad**

Existen túneles de diversos tamaños, unos de pequeñas dimensiones hablando de centímetros, para aquellas pequeñas maquetas hechas a escala y otros enormes, con capacidad de admitir un avión real de 22 metros, por ejemplo, el Ames Research Center en Moffet Fiel (California, EEUU), perteneciente a la NASA.

El inconveniente que tienen los túneles de vientos radica en el tamaño de la sección transversal, pues cuanto mayor sea dicha unidad, resulta más dificultoso establecer y conservar los flujos de aire a una alta velocidad.

## **6. Túneles especiales**

Túneles aerodinámicos especiales para naves espaciales supersónicas que, durante el vuelo, el rozamiento que tienen genera mucho calor.

El estudio de estos efectos se realiza en túneles especiales, en los cuales se emplea un chorro de gases calientes que rodean al modelo a escala, mientras que, una cadena de dispositivos mide el movimiento del gas y la generación de calor.

Existen túneles capaces de realizar simulaciones de gran altitud, como el Flight Propulsión Laboratory de la Nasa en Cleveland (Ohio) en el cual se realizan pruebas con reactores reales, con ensayos a velocidades que pueden llegar a 3.900 Km/h y altitudes de más de 30.000 metros.

Túneles denominados de calibración, que poseen mucha precisión, para realizar pruebas de modelos muy rigurosas.

En el túnel de viento vertical, el aire se mueve en una columna vertical dentro de un tubo cristalino aproximadamente a una velocidad de 195 km/h.

Este tipo de túnel sirve como simulador de paracaidismo, y se le denomina de diferentes maneras, indoor skydiving, o bodyflying.

### 2.8.2.2 Partes de un túnel

En general, la composición general de los túneles de viento consta de:

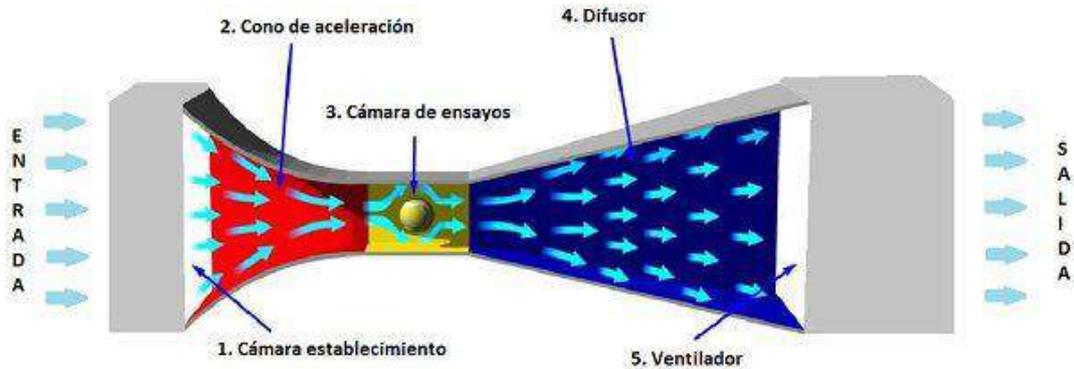


Ilustración 2.87 Partes de un túnel de circuito abierto. Fuente: [http://www.f1aldia.com/photos/10600/10650/002\\_small.jpg](http://www.f1aldia.com/photos/10600/10650/002_small.jpg)

#### 1. Cámara de acomodación o establecimiento:

El objetivo de esta cámara es encauzar y uniformizar el flujo del aire. Consta de una estructura de panel y esto sirve para fragmentar el aire en múltiples flujos independientes, que más tarde se vuelven a unificar en el cono de aceleración. Este paso es muy eficaz para reducir posibles remolinos de aire en circulación por el túnel.

#### 2. Cono de contracción o de aceleración:

Esta parte del túnel de viento se destina para incrementar la velocidad del flujo de aire. El cono de contracción capta un volumen grande de aire de baja velocidad, y lo comprime a un volumen pequeño de flujo de aire de alta velocidad sin formar turbulencias. Se llama cono de aceleración porque en esta zona, el flujo se acelera, pero se mantiene ordenado y uniforme para pasar después a la cámara de ensayos. Se manifiesta el efecto venturi y el trabajo del ventilador se recorta.

#### 3. Sección de prueba o cámara de ensayos:

Es el tramo donde se ubica el prototipo experimental de prueba. En esta zona se coloca el cuerpo que se va a proceder en estudio y donde se realizan las mediciones del ensayo. Es fundamental que el flujo de aire en esta parte del túnel sea lo más uniforme posible, pues en el caso de existir turbulencias, se obtendrían datos erróneos.

El tamaño de esta cámara en el túnel de viento es fundamental, porque si consta de unas dimensiones grandes, se puede ensayar con modelos a escalas más cercanas al cuerpo original, esto conlleva mantener de manera más sencilla, el valor de semejanza del número de Reynolds.

Actualmente se puede encontrar dos tipos de cámara, abiertas o cerradas, la elección se debe al tamaño del modelo a examinar, pues en las cámaras abiertas se pueden ubicar prototipos de dimensiones mayores, sin embargo, tiene la desventaja de que el flujo en este tipo de cámaras, concurre menos controlado que en las cámaras cerradas donde se registra mejor.



Ilustración 2.88 Sección de prueba del túnel de Toyota. Fuente: <http://1.bp.blogspot.com/-vO7zLTKZ5GE/UiGbMxGqINI/AAAAAAAAAB7o/NLHaqOfL45c/s640/tunel-viento-toyota-f1-salida.jpg>

#### 4. Difusor:

El objetivo de esta zona del túnel es reducir la velocidad del flujo, expandirlo y recuperar una presión estática. El difusor es muy sensible a errores de diseño, aunque sean pequeños, se puede generar un abandono de la capa límite, de forma alterna o estable, que resulta complicado de detectar, ocasionando oscilación en el ventilador, vibraciones y variación en la velocidad de la sección de prueba. El flujo de aire que sale de la cámara de ensayos deja de ser laminar, no es uniforme y complica el trabajo del difusor.

En resumen, se podría decir, que el aire que sale de la cámara de ensayos, el difusor debido a su perfil divergente consigue disminuir su velocidad. Pues es importante que el aire salga a la mínima velocidad, así no se crean pérdidas.

## 5. Ventilador:

Es el mecanismo impulsor que genera la fuerza para dar velocidad a la corriente de aire del circuito para moverse a través del túnel de viento. Dicha velocidad debe ser proporcional al experimento a realizar para conseguir una medición correcta. Normalmente se adjuntan dispositivos electrónicos para poder modificar la velocidad y así los ingenieros puedan predecir las condiciones deseadas para realizar los ensayos oportunos.



Ilustración 2.89 Ventilador. Fuente: [http://www.f1aldia.com/photos/10600/10650/001\\_small.jpg](http://www.f1aldia.com/photos/10600/10650/001_small.jpg)

## 6. Suelo:

Es un elemento muy valioso para ensayos de vehículos. Se puede encontrar túneles de viento con suelos rodantes y otros con suelo estático. En el caso de los rodantes los datos de las pruebas son más precisos, puesto que estos se asemejan más a la realidad.



Ilustración 2.90 Modelo en suelo rodante. Fuente: <http://www.abc.es/Media/201507/05/tunel-viento--644x362.jpg>

### 7. Estabilizadores de corriente tras el ventilador:

Son unos dispositivos que tienen la función de evitar la rotación de la corriente que orienta el ventilador.

### 8. Ventanillas anti-pompaje:

Son unas rejillas que tienen la función de conformar el equilibrio de las presiones.

Estabilizan el flujo del aire e impiden las oscilaciones críticas que pueden aparecer en dichas presiones.

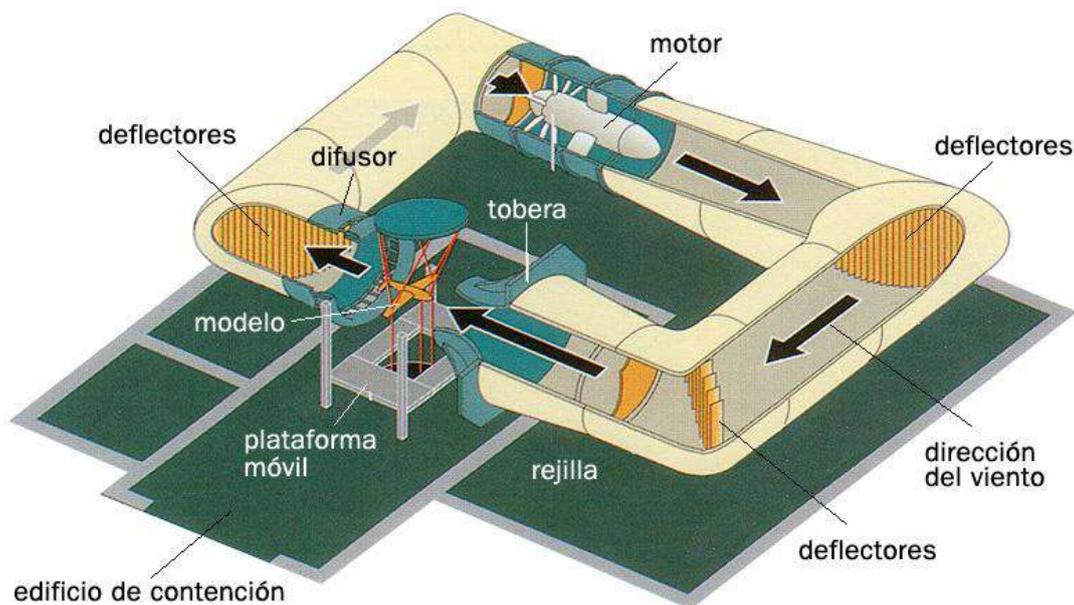


Ilustración 2.91 Partes de Túnel de circuito cerrado. Fuente: [http://3.bp.blogspot.com/-jp5h76V\\_I3A/UIGbOEi7qcl/AAAAAAAAAB70/CBMWHTk5mOs/s1600/tunelGR.jpg](http://3.bp.blogspot.com/-jp5h76V_I3A/UIGbOEi7qcl/AAAAAAAAAB70/CBMWHTk5mOs/s1600/tunelGR.jpg)

## 2.9 Elementos de la aerodinámica en un monoplaza de Formula1

Los ingenieros y técnicos llevan años estudiando la aerodinámica de un coche de carreras, para generar agarre, limpiar flujos, canalizarlos, tratar la temperatura de los componentes mecánicos, y conseguir un automóvil más escurridizo.

Profesionales expertos siguen en continuo proceso de evolución y cada escudería realiza su diseño particular, según las necesidades que desean, los elementos más importantes que contribuyen en la aerodinámica de un monoplaza son:

1. Alerón delantero
2. Carenado
3. Aletas de nariz
4. Deflectores laterales
5. Toma de admisión
6. Pontones
7. Aletas de pontón
8. Alerón trasero
9. Fondo plano
10. Difusor
11. Casco

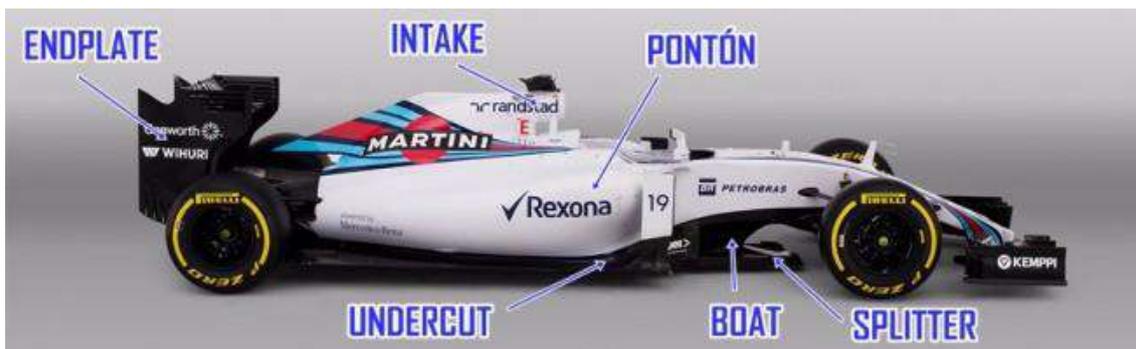
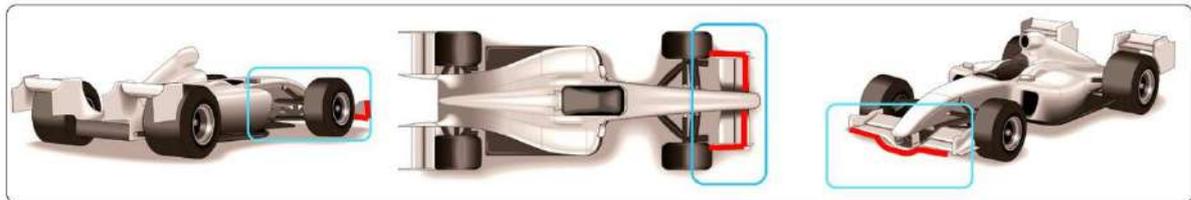


Ilustración 2.92 Partes aerodinámicas de un monoplaza. Fuente: [https://static.motor.es/fotos-noticias/2015/03/min652x435/el-diccionario-de-la-formula-1-las-partes-de-un-f1-y-los-neumaticos-201520437\\_3.jpg](https://static.motor.es/fotos-noticias/2015/03/min652x435/el-diccionario-de-la-formula-1-las-partes-de-un-f1-y-los-neumaticos-201520437_3.jpg)

A continuación, se describe cada uno de los elementos aerodinámicos:

### 2.9.1 Alerón delantero



El alerón delantero es el primer elemento del coche que contacta con el flujo del aire, que entra desorganizado y turbulento. Es uno de los elementos principales del coche de competición, pues genera un tercio de toda la carga aerodinámica. Es el pilar sobre el que se basa la eficiencia y el equilibrio aerodinámico, pues gestiona el flujo de aire alrededor del monoplaza; fundamentalmente tiene las funciones de proporcionar la carga aerodinámica necesaria para permitir agarre al eje delantero y control completo de la dirección del monoplaza evitando el subviraje, conducir y organizar el flujo aerodinámico a través del automóvil, consiguiendo que sea lo más limpio posible y dirigir ese flujo a las partes adecuadas hacia abajo del coche y hacia atrás. Este alerón se diseña para producir downforce (fuerza de adherencia/agarre).

Se compone del plano principal, y las diversas secciones posteriores conocidas como los flaps y los winglets que son apéndices aerodinámicos de pequeño tamaño, que se utilizan para dirigir el aire una vez, pasados los neumáticos delanteros hacia las entradas del radiador y el fondo del monoplaza.

Respecto a la dirección del aire, el plano principal y los flaps forman un ángulo de  $90^\circ$ , se debe tener en cuenta que se crea más carga aerodinámica cuanto mayor sea este ángulo.

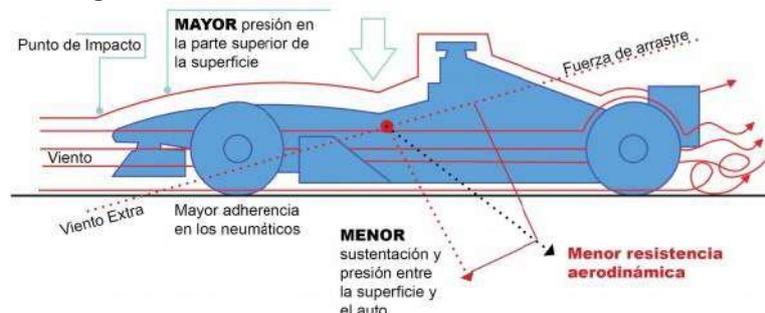


Ilustración 2.94 Líneas de viento (rojas) horizontales y el efecto que produce al chocar contra el alerón (discontinua negra). Fuente: [http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/f/f4/Analisis\\_f1.01.jpg/600px-Analisis\\_f1.01.jpg](http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/f/f4/Analisis_f1.01.jpg/600px-Analisis_f1.01.jpg)

La eficacia del alerón viene determinada por tres parámetros básicos, el alargamiento, el ángulo de ataque y la resistencia:

- A. El alargamiento: Las medidas del alerón influyen en la producción de downforce, cuanto mayor sea el alerón mayor será la fuerza de adherencia. Se denomina alargamiento a la relación entre longitud y anchura. Cuanto mayor sea el alargamiento de un monoplaza, menor es la resistencia creada por los vórtices en las puntas de los alerones. El alargamiento es la dimensión alargada, es decir, la longitud que es perpendicular al flujo del aire dividida por su cuerda que es la medida que va paralela al flujo.
- B. El ángulo de ataque: Se define como el ángulo que establece el suelo con una línea recta que se forma desde el borde inferior de la carrocería a las ruedas. Este parámetro influye en la eficiencia y capacidad de generar sustentación, cuanto mayor es el ángulo de ataque, produce mayor downforce.
- C. La resistencia: Al aumentar el downforce en un alerón, también se incrementa la resistencia. El alerón genera una carga de agarre en sentido vertical dirigida hacia el asfalto, mientras que la resistencia evoluciona en sentido opuesto a la dirección flujo del aire. Los neumáticos tanto delanteros como traseros ejercen la mayor resistencia de un coche de competición, generando hasta un 60% de ineficiencia aerodinámica. Para solucionar este problema, el alerón delantero consta de unas placas perpendiculares en sus bordes laterales llamadas endplates o derivas, que sirven para reducir la turbulencia existente en las ruedas y dirigir la circulación del aire hacia los radiadores y hacia los frenos para mejorar su refrigeración.

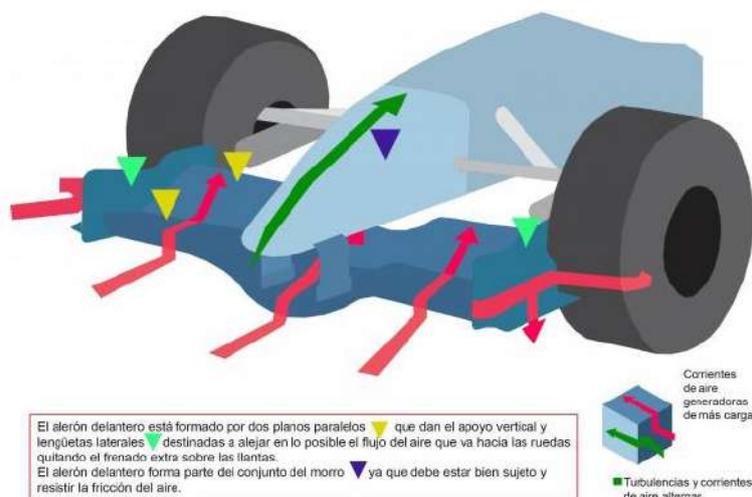


Ilustración 2.95 Esquema aerodinámico del alerón delantero. Fuente: [http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/8/81/Aleron\\_delantero\\_esquema.jpg/600px-Aleron\\_delantero\\_esquema.jpg](http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/8/81/Aleron_delantero_esquema.jpg/600px-Aleron_delantero_esquema.jpg)

## 2.9.2 Carenado

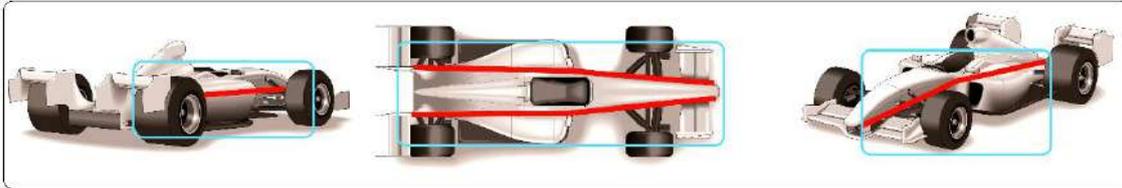


Ilustración 2.96 Carenado. Fuente:

[http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/7/74/CHASIS\\_VISTAS.jpg/1520px-CHASIS\\_VISTAS.jpg](http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/7/74/CHASIS_VISTAS.jpg/1520px-CHASIS_VISTAS.jpg)

El carenado se define como el revestimiento o caparazón externo del coche, tiene connotaciones estéticas, pero principalmente su finalidad es aerodinámica.

Protege el motor y elementos internos de los fenómenos meteorológicos para su conservación y evitar su degradación.

El carenado de un coche de competición se estudia y diseña para determinar un mejor deslizamiento, para mejor penetración aerodinámica.

El objetivo de los especialistas y diseñadores es crear la menor resistencia, pero siempre con el objetivo de conseguir el máximo downforce.

Para ello, se estudia la parte superior del vehículo, de tal manera que, el aire pase lo más suavemente posible, mientras que la parte inferior del coche se perfila para reconducir el flujo y establecer una zona de baja presión entre el auto y el asfalto.

El chasis del monoplaza es una estructura fabricada en fibra de carbono, en la cual se acoplan y sujetan los demás componentes.

Este elemento debe fundamentarse en tres parámetros: ligereza, para no restar potencia ni velocidad al coche, rigidez, para ser resistente a los impactos y por último, económico.

Cuando por motivos de seguridad, el efecto ala invertida fue restringido, se impuso un fondo plano para los autos de competición, lo que llevó a los ingenieros a introducir los sidepods o pontones, que contenían los radiadores y metían el aire debajo del coche para producir succión hacia el suelo.

### 2.9.3 Aletas de nariz

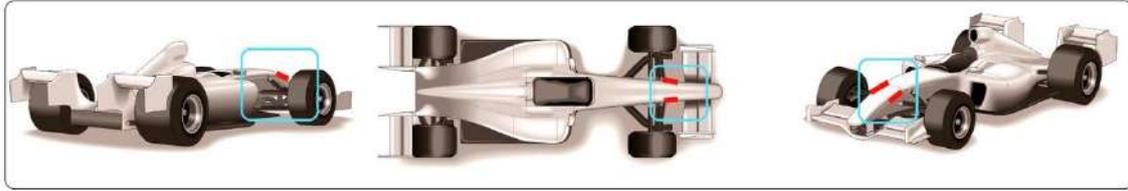
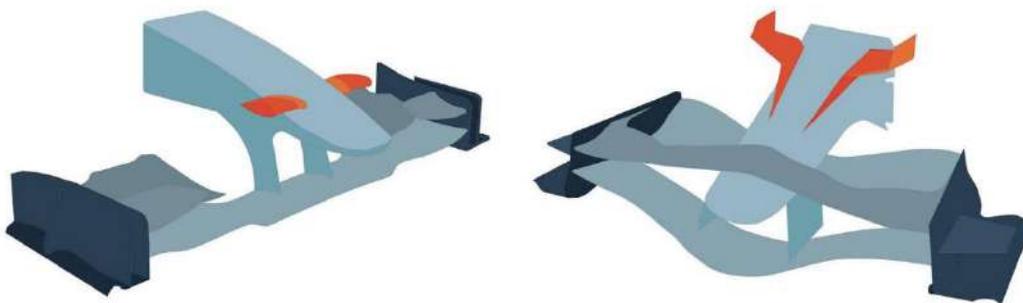


Ilustración 2.97 Aletas de nariz. Fuente:  
[http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/0/0f/ALETAS\\_DE\\_CONO\\_VISTAS.jpg/1520px-ALETAS\\_DE\\_CONO\\_VISTAS.jpg](http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/0/0f/ALETAS_DE_CONO_VISTAS.jpg/1520px-ALETAS_DE_CONO_VISTAS.jpg)

Estos aditamentos se utilizan para la corrección de los flujos del fluido que transitan desde el morro hacia la parte media y la trasera del vehículo. Su función es redirigir, dividir o repartir el flujo de aire que incide sobre estas aletas, para solucionar vibraciones, inestabilidades o descensos de rendimientos en el flujo del aire en los elementos ubicados por detrás.

Son elementos que se añaden tras detectar una anomalía en alguna parte trasera del monoplaza, por lo que son específicas para cada problema y para cada coche.

Las aletas se ubican en los laterales del frontal, y proporcionan tres ventajas, reordenar el aire sucio de tal manera que, el flujo del auto incida limpio y active positivamente sobre el agarre en las curvas y, por último, su sección divisoria del chasis elimina las turbulencias desde el carenado al alerón.



A la izquierda en color naranja, aletas de cono. A la derecha, aletas tipo orejas.

Ilustración 2.98 Tipos de aletas. Fuente:  
[http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/7/77/Aletas\\_de\\_cono.jpg/1460px-Aletas\\_de\\_cono.jpg](http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/7/77/Aletas_de_cono.jpg/1460px-Aletas_de_cono.jpg)

## 2.9.4 Deflectores laterales

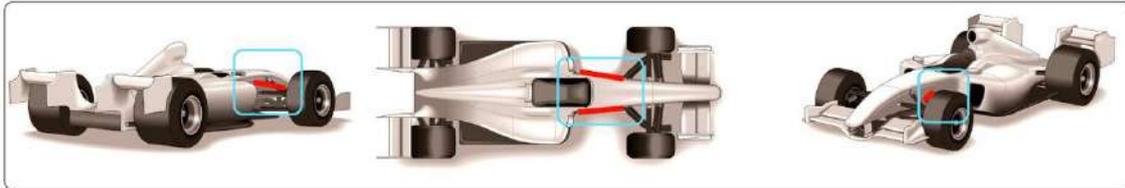
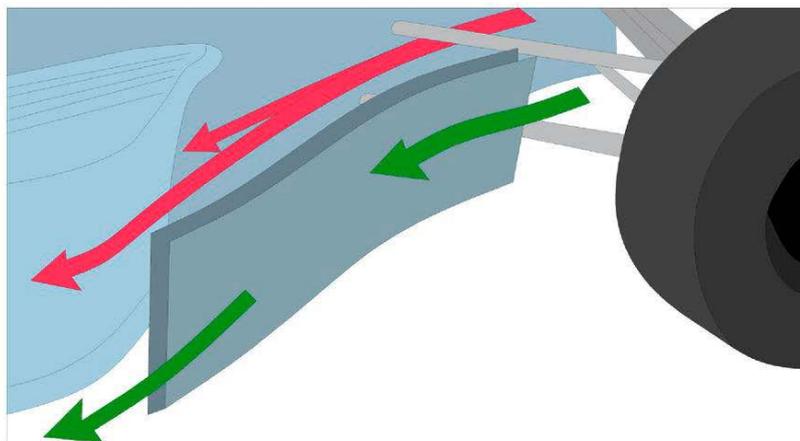
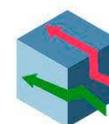


Ilustración 2.99 Deflectores. Fuente:  
[http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/6/65/DEFLECTORES\\_VISTAS.jpg/1520px-DEFLECTORES\\_VISTAS.jpg](http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/6/65/DEFLECTORES_VISTAS.jpg/1520px-DEFLECTORES_VISTAS.jpg)

Los deflectores sirven para distribuir los flujos de aire, canalizan y lo dirigen hacia los pontones para mejorar la refrigeración, los deflectores copian la forma del chasis y suelen sujetarse en la esquina inferior de la zona externa del pontón. La funcionalidad de los deflectores es redirigir el aire sucio y turbulento que se desprende de las ruedas y canalizarlo orientándolo al exterior de los pontones, desviar aire limpio y dirigirlo en dirección a la toma de los radiadores situados en los pontones, sellar el fondo para incrementar el efecto suelo y producir un empuje leve en los extremos.



Los deflectores laterales están diseñados para canalizar el aire hacia los **pontones** en donde se encuentran los *radiadores* que refrigeran el motor, y guían las ráfagas sobrantes por debajo del automóvil.



Corrientes de aire generadoras de más carga

Turbulencias y corrientes de aire alternas

Ilustración 2.100 Esquema de deflectores laterales. Fuente:  
[http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/d/dc/Difusores\\_laterales\\_esquema.jpg/1200px-Difusores\\_laterales\\_esquema.jpg](http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/d/dc/Difusores_laterales_esquema.jpg/1200px-Difusores_laterales_esquema.jpg)

### 2.9.5 Toma de admisión

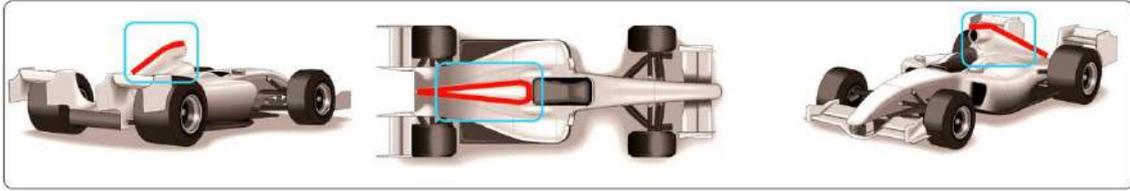


Ilustración 2.101 Toma de admisión y Anclaje para grúa. Fuente:  
[http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/2/29/TOMA\\_VISTAS.jpg/1520px-TOMA\\_VISTAS.jpg](http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/2/29/TOMA_VISTAS.jpg/1520px-TOMA_VISTAS.jpg)

También se llama anclaje para grúa, o intake, es una toma que alimenta de aire al motor y a la transmisión, generalmente está situada por encima de la cabeza del piloto, consta de un acceso de aire, que se remata por el alerón superior de la cámara. Su fisonomía y dimensiones son importantes, porque deben refrigerar suficientemente, pero tampoco ser excesivamente grande para no crear resistencia aerodinámica. La apertura debe tener las medidas impuestas por las normas, en caso necesario, sirve para elevar el monoplaza mediante una grúa. En esta parte, se suelen colocar aletas para proporcionar diferentes funciones como son: reconducir la circulación del aire hacia el alerón trasero, producir un alto empuje en la zona central y corregir vibraciones e inestabilidades.

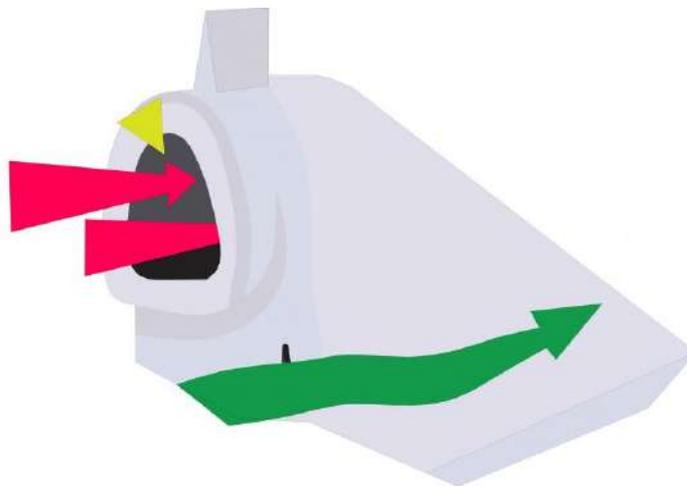


Ilustración 2.102 Esquema Toma de admisión. Fuente:  
[http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/6/6d/TOMA\\_ADMISION.jpg/800px-TOMA\\_ADMISION.jpg](http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/6/6d/TOMA_ADMISION.jpg/800px-TOMA_ADMISION.jpg)

## 2.9.6 Pontones

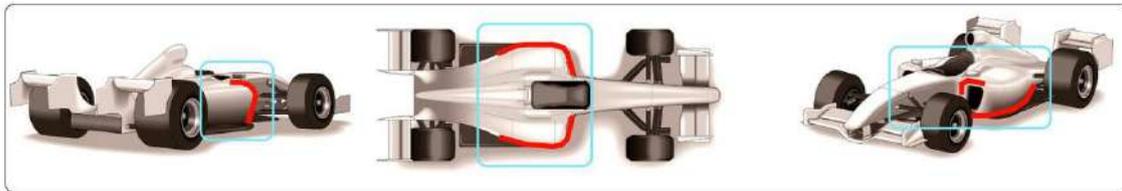


Ilustración 2.103 Pontones. Fuente:

[http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/1/10/PONTONES\\_VISTAS.jpg/1520px-PONTONES\\_VISTAS.jpg](http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/1/10/PONTONES_VISTAS.jpg/1520px-PONTONES_VISTAS.jpg)

Los pontones también llamados sidepod, son unas estructuras laterales, paneles que se colocan en la zona ancha y baja de la carrocería, se sitúan a cada lado del habitáculo del piloto y se extienden desde esta parte hasta el extremo final de los radiadores. Desde esta zona se van estrechando hacia la llegar a la parte central trasera, describiendo una forma de botella o embudo a la silueta del coche. Este perfil o forma, se fundamenta en una regla del diseño aeronáutico, la llamada “Regla del área”, que consiste en reducir las oscilaciones bruscas de esta sección transversal, dando al automóvil estabilidad estructural.

La forma que tienen los pontones cumple la función aerodinámica y determina en gran parte la eficiencia de la zona trasera porque ayudan a reducir la fricción y mejorar el flujo del aire sobre el difusor.

Los pontones además de proporcionar seguridad ante los impactos, sirven para alojar los radiadores de agua y de aceite para enfriar el motor. En ellos se guarda gran parte de la electrónica, la batería y los radiadores de la caja de cambios. En estos elementos se colocan aditamentos como las famosas branquias de refrigeración, los escapes y las aletas de pontón.

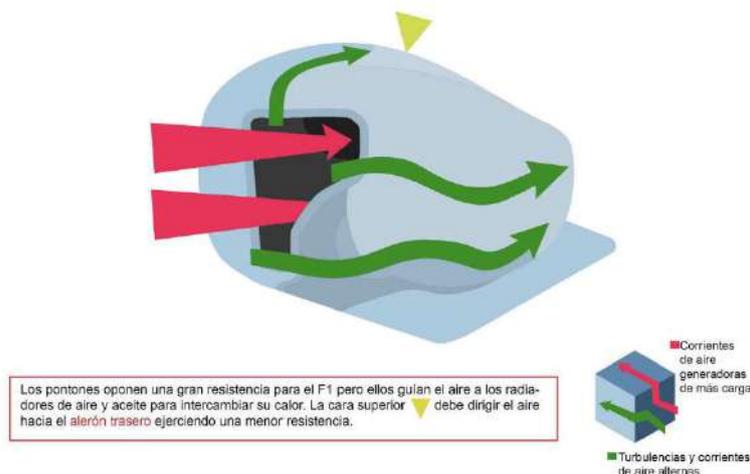


Ilustración 2.104 Esquema de Pontón. Fuente:

<http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/6/6f/Ponton.jpg/1200px-Ponton.jpg>

### 2.9.7 Aletas de pontón

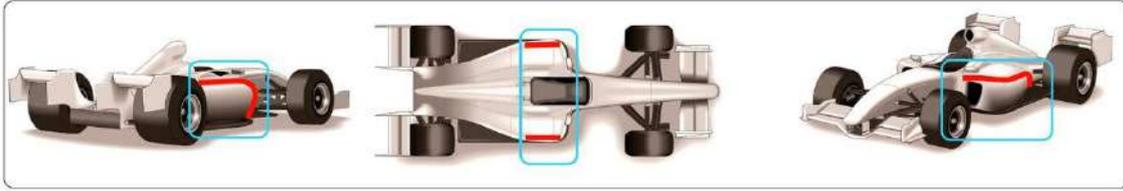


Ilustración 2.105 Aletas de pontón. Fuente: [http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/8/8e/ALETAS\\_PONTON\\_VISTAS.jpg/1520px-ALETAS\\_PONTON\\_VISTAS.jpg](http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/8/8e/ALETAS_PONTON_VISTAS.jpg/1520px-ALETAS_PONTON_VISTAS.jpg)

Las aletas de pontón son una o varios elementos aerodinámicos que producen gran cantidad de empuje. Son dispositivos del monoplaza que sirven para dirigir el flujo del aire y conseguir mayor fluidez aerodinámica en la zona trasera.

Las diferentes escuderías diseñan múltiples variaciones y estudian las mejores ubicaciones para sus monoplazas ubicándolas estratégicamente.

Los beneficios o servicios que debe cumplir esta zona son:

1. Reconducir mejor el aire en la entrada de los radiadores
2. Separar el flujo de aire incidente en las ruedas traseras
3. Evacuar el flujo del aire ya caliente que sale de los radiadores
4. Impedir que los flujos de aire incidan en el chorro de los gases de escape
5. Dirigir el flujo del aire hacia el alerón trasero
6. Aplicar generación de empuje vertical



Ilustración 2.106 Aletas de pontón. Fuente: [https://static.motor.es/fotos-noticias/2017/10/min652x435/video-analisis-tecnico-gp-malasia-f1-201739944\\_2.jpg](https://static.motor.es/fotos-noticias/2017/10/min652x435/video-analisis-tecnico-gp-malasia-f1-201739944_2.jpg)

### 2.9.8 Fondo plano

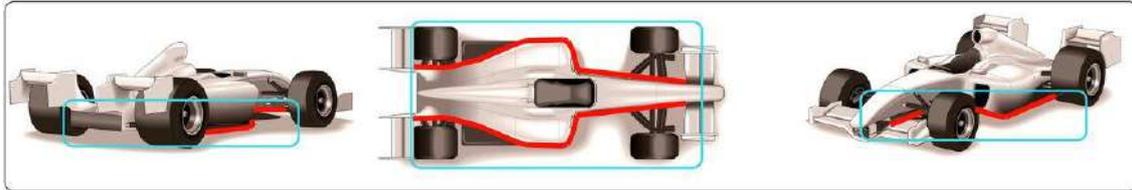


Ilustración 2.107 Fondo. Fuente:

[http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/b/b3/FONDO\\_PLANO.jpg/1200px-FONDO\\_PLANO.jpg](http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/b/b3/FONDO_PLANO.jpg/1200px-FONDO_PLANO.jpg)

El fondo plano, es uno de los elementos aerodinámicos más importante del vehículo, corresponde a la parte baja, la más cercana al suelo. Esta parte está moldeada en una sola pieza, fabricada en fibra de carbono, su principal funcionalidad es reducir la cantidad de flujo de aire que transita por debajo del coche, pero conducirlo uniformemente a la mayor velocidad posible, para producir una zona de baja presión, crear mayor downforce, y así el monoplaza se adhiera al suelo.

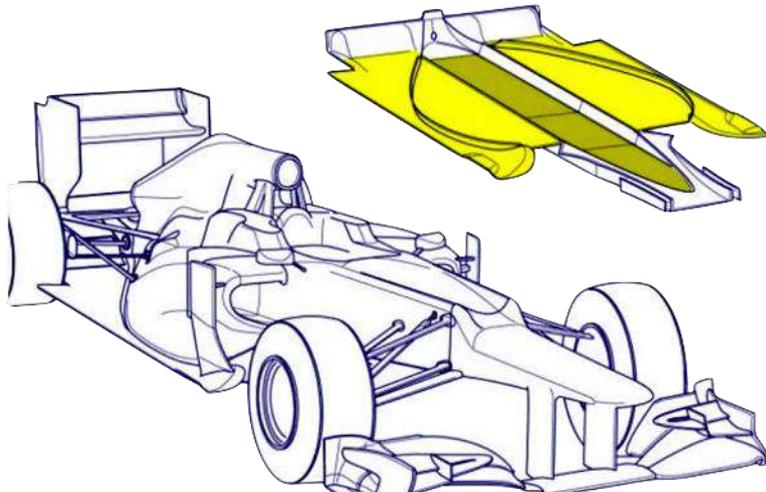


Ilustración 2.108 El moldeado del piso escalonado. Fuente: <http://k36.kn3.net/7A174D3D0.jpg>

El piso del monoplaza es una estructura rígida, que se atornilla a la parte inferior del monocasco, del motor y de la caja de cambios, A menudo, se coloca toda la electrónica, sensores y cableado. También se fijan los largueros de protección al impacto lateral que protegen la cabina del piloto.



Ilustración 2.109 Fondo plano. Fuente: <http://4.bp.blogspot.com/-Pec9ldiAsHY/UX0w6dgQPPI/AAAAAAAAAfk/3v0BSVOU98w/s200/fondo+plano.jpg>

Según la reglamentación de la FIA, el piso debe ser escalonado, con una línea baja a lo largo del centro del coche, y esta parte inferior del coche se toma como punto de referencia para acotar cualquier dimensión de la carrocería.

Es decir, la parte más baja de la planta del monoplaza, sin tener en cuenta la tabla de madera es el punto de referencia y a esto se le denomina plano de referencia. Esta cresta recorre el fondo del monoplaza, extendiéndose desde las ruedas delanteras hasta la línea del eje trasero, su superficie debe ser completamente lisa para no generar ningún beneficio aerodinámico y suele variar entre unas dimensiones de 30 a 50 cm de anchura.

Sobre el plano de referencia, se encuentra el piso principal del monoplaza, que suele ser el piso de los pontones. Esta superficie, se la conoce como plano de paso, según la normativa, debe ser plana y colocarse a una distancia de 5 cm por encima del plano de referencia. El plano de paso siempre suele ser corto que el plano de referencia.

Debajo del fondo o plano de referencia, según las normativas de la FIA, es obligatorio colocar una tabla de deslizamiento o tablón, idea propuesta para evitar que los monoplazas circulen demasiados bajos y se obtenga una ventaja aerodinámica.

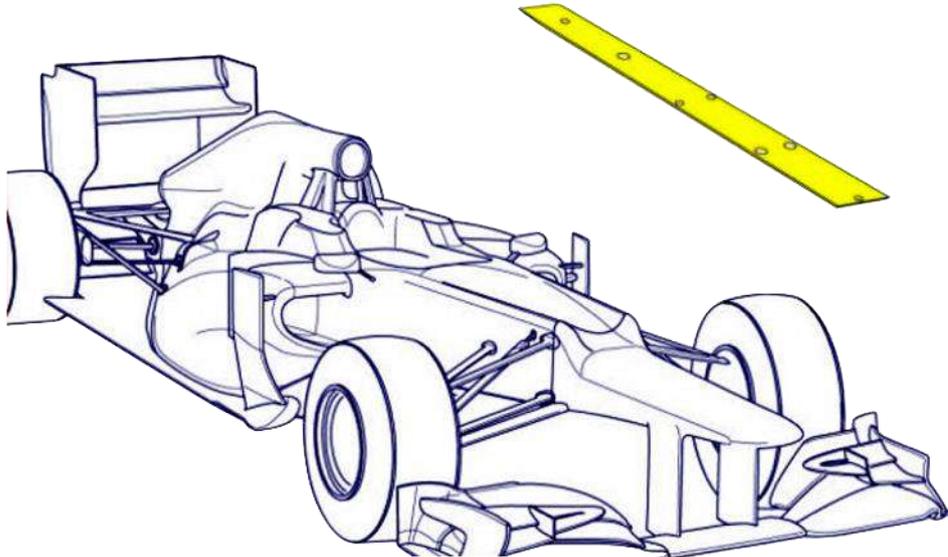


Ilustración 2.110 Tabla de deslizamiento. Fuente: <http://k32.kn3.net/3C8B0A2E3.jpg>

Normalmente, esta tabla se fabrica de madera de haya laminada y no es su desgaste lo que descarta al coche de la carrera, según se cree, sino el deterioro o desgaste de las piezas de titanio que están colocadas en los orificios específicos de la tabla.

Las escuderías disponen sensores de temperatura en estas piezas de titanio, o mejor dicho en los bloques de deslizamiento, para detectar si rozan con la superficie de la pista, de manera que, si el bloque se calienta demasiado manda una señal.

Cuando en los años 80, los técnicos diseñaron la elevación de nariz en los coches, fue necesario introducir una sección del piso debajo de la parte delantera del monocasco para acatar la normativa del fondo plano. Por lo tanto, el divisor básico se instala con la finalidad de formar el plano de referencia hasta la línea imaginaria de los neumáticos delanteros.

Las escuderías han conseguido que también el divisor realice funciones aerodinámicas, dirigiendo el flujo del aire que pasa por encima, debajo y a cada lado del coche. Actualmente, los equipos colocan el divisor expuesto, con aletas que flanquean sus bordes y que facilitan el paso del aire que circula por debajo del monoplaza.

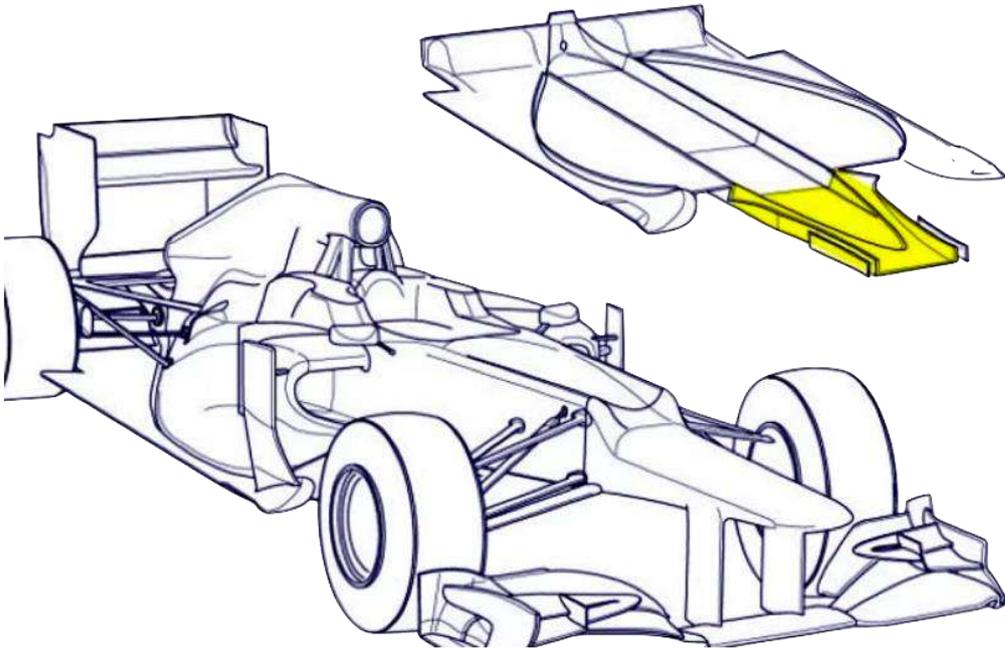


Ilustración 2.111 Divisor o Splitter. Fuente: <http://k37.kn3.net/94D64A0F1.jpg>

Los técnicos siguiendo las reglas de distribución de peso obligatorios, intentan aumentar el peso sobre las ruedas delanteras, entonces fabrican el divisor como parte separada del piso y lo mecanizan con metales pesados, de tal manera que, actúa como lastre que montado en una posición muy baja es capaz de bajar el centro de gravedad de los coches.

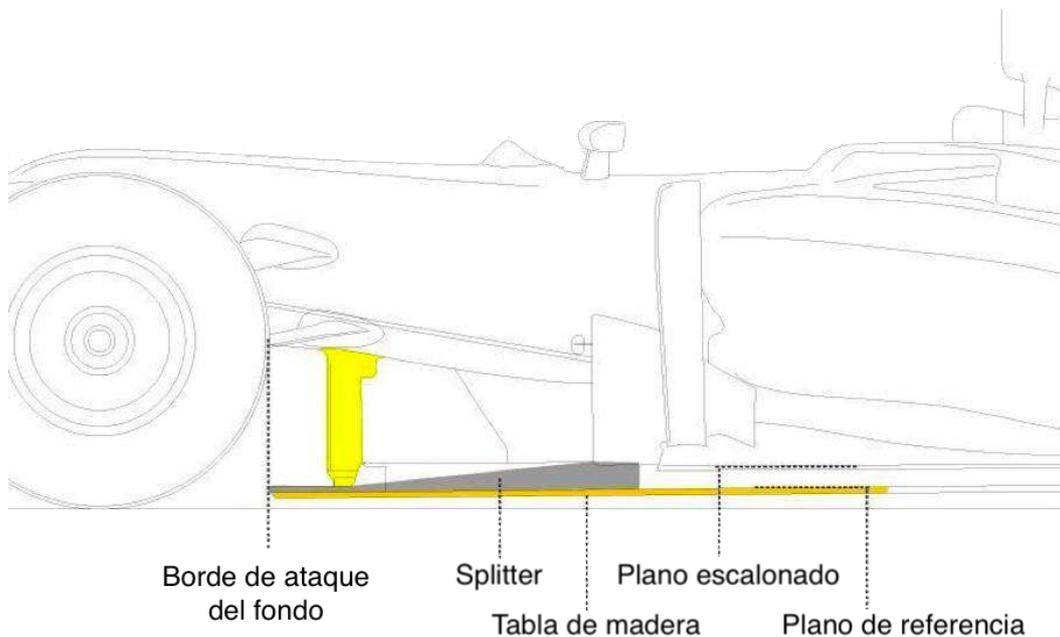


Ilustración 2.112 Esquema de fondo plano. Fuente: <https://www.formulaf1.es/wp-content/uploads/2013/04/0splitter2.jpg>

### 2.9.9 Difusor

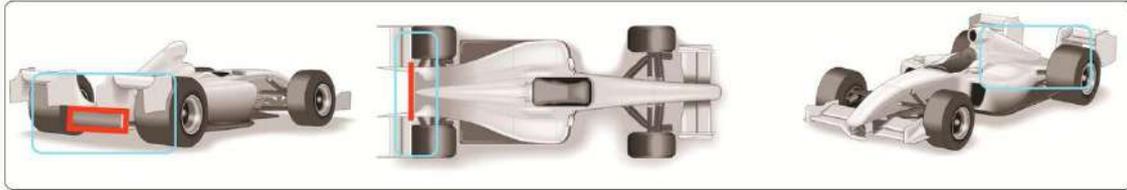


Ilustración 2.113 Difusor. Fuente:

[http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/8/87/DIFUSOR\\_VISTAS.jpg/1520px-DIFUSOR\\_VISTAS.jpg](http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/8/87/DIFUSOR_VISTAS.jpg/1520px-DIFUSOR_VISTAS.jpg)

El difusor es un dispositivo para la salida del flujo del aire que se ubica en la parte trasera inferior del monoplaza, entre los neumáticos y bajo el alerón trasero. Al salir el aire de una forma controlada se genera un downforce, crítico en las curvas rápidas.

Este elemento tiene como función acelerar el tránsito del aire que pasa por debajo del automóvil, pues, cuanto más rápido circule, menor presión genera, y como ya se ha repetido en varias ocasiones, es la diferencia de presiones, de encima y de debajo del suelo, lo que produce un mayor soporte para que el vehículo se pegue al asfalto.

El diseño del difusor es de vital relevancia, ya que lo que se pretende es que el aire sea capaz de salir lo más rápido posible del automóvil. Cuando el difusor, tiene unas dimensiones grandes, adquiere más potencial para lograr una mayor carga aerodinámica, debido a esto, la FIA reglamenta el tamaño y su posición. Actualmente la normativa lo limitan a un metro de ancho, 35 cm de longitud y 12,5 cm de altura máxima.

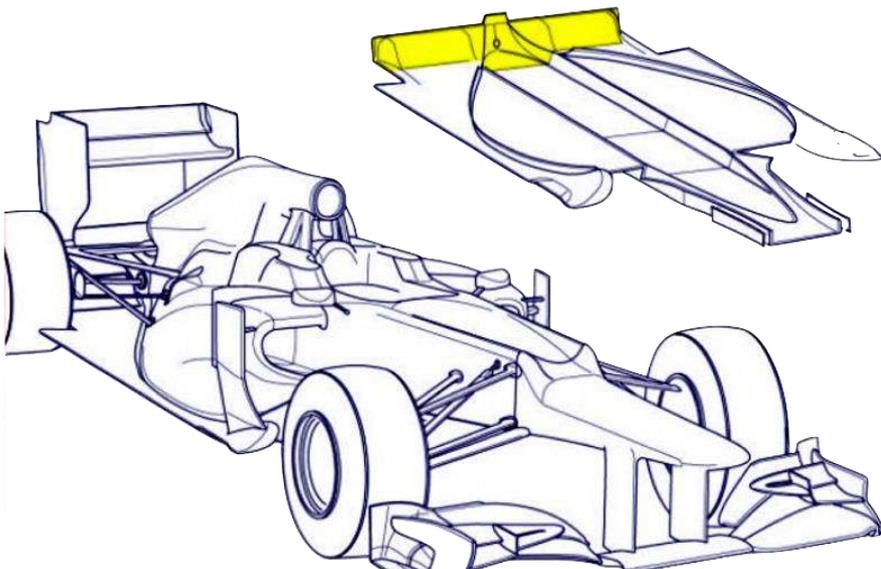


Ilustración 2.114 Difusor. Fuente: : <http://k37.kn3.net/252E307BF.jpg>

Cuando el aire se va propagando por el interior del difusor, a veces, se puede perder la baja presión, por ejemplo, el coche se balancea en las curvas y permite pasar el aire del exterior por el lateral, para solucionar esto, se instalan nervios dentro del difusor y así mantener la baja la presión en compartimentos separados, de tal manera que, el apoyo organizado sea más estable.

El difusor es un elemento clave en el fondo de un monoplace, pero verdaderamente el apoyo aerodinámico se crea en dos puntos del fondo plano, donde el aire circula rápidamente y existe menor presión. Estos puntos fundamentales son el borde de ataque del fondo, que se localiza en la zona delantera de los pontones y el borde de ataque del difusor, que se encuentra entre el fondo y el difusor

Todas las piezas aerodinámicas del spoiler, los deflectores y el borde anterior del piso moldeado se diseñan detenidamente, para conseguir una óptima eficiencia del difusor y conserven una correcta circulación del flujo del aire.

El difusor, en combinación con la superficie de sustentación baja del alerón trasero, permite una mayor masa de aire, y llega a generar entre un 40% y un 50% de carga aerodinámica en un coche de competición.

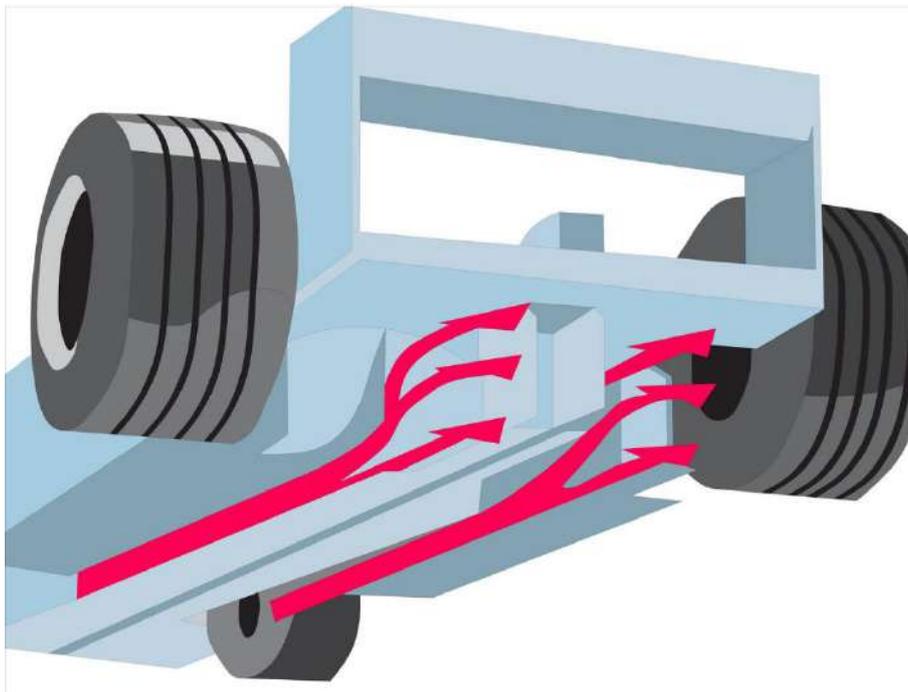


Ilustración 2.115 Esquema difusor. Fuente: <http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/e/e5/DIFUSOR.jpg/1200px-DIFUSOR.jpg>

## 2.9.10 Casco

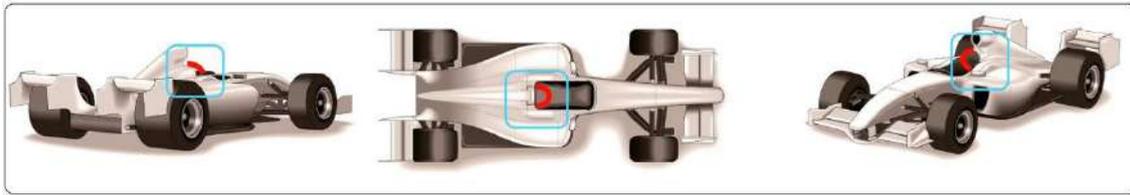


Ilustración 2.116 Casco. Fuente:

[http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/a/a4/CASCO\\_VISTAS.jpg/1520px-CASCO\\_VISTAS.jpg](http://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/a/a4/CASCO_VISTAS.jpg/1520px-CASCO_VISTAS.jpg)

El casco se dispone en el lugar, que determina en dos aspectos:

1. Adaptando el flujo del aire y reconducirlo a la toma de admisión.
2. Canalizando el flujo del aire llevándolo hasta el alerón trasero y el difusor, pues las eficiencias de estos elementos aumentan considerablemente.

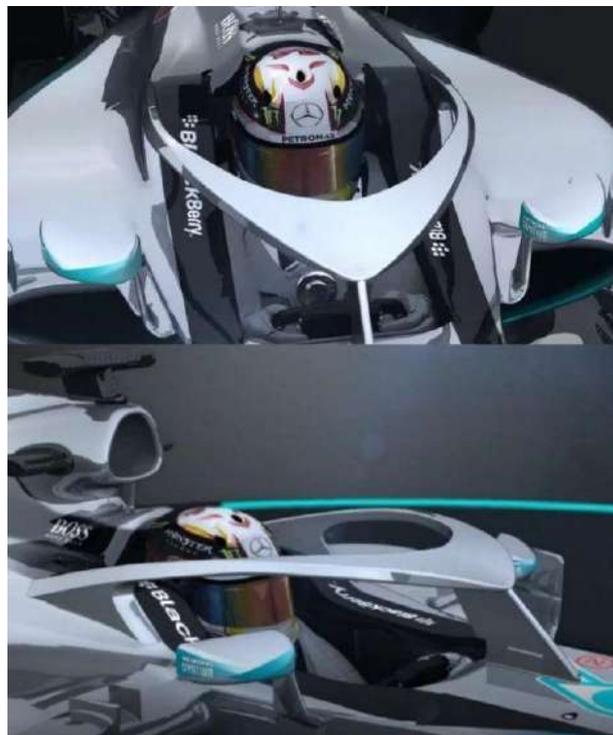


Ilustración 2.117 Casco. Fuente:

<https://www.ecestaticos.com/imagetatic/clipping/006/8e9/0068e98a45e14aa2faf9333291d7f79f/el-concepto-actual-de-un-coche-de-formula-1-tiene-sus-dias-contados.jpg?mtime=1453833759>

## 2.9.11 Alerón trasero



Ilustración 2.118 Alerón trasero. Fuente: <http://k40.kn3.net/14BD3E19C.jpg>

El alerón es un elemento dispuesto en la parte alta trasera de la carrocería de un monoplace para crear apoyo aerodinámico en las ruedas traseras, para un mejor rendimiento al trazar la curva, mayor tracción y mejor frenada. Fundamentalmente, asume dos funciones, reducir la resistencia que ofrece el aire y generar mucha carga aerodinámica, pero con el mínimo arrastre y vibración.

Su función principal es crear downforce y para ello se sirve de dos métodos:

### 1. Mediante empuje:

El diseño y la forma del alerón provoca un cambio en la dirección del flujo del aire que incide sobre él, de tal manera que crea un empuje que pega al coche sobre el suelo. Para comprender esto, hay que recordar la tercera ley de Newton, que establece que toda fuerza ejercida sobre un objeto (acción), recibe otra fuerza de igual magnitud, pero en sentido contrario (reacción). En el alerón, cuando las partículas del flujo del aire inciden sobre su superficie, estas son empujadas verticalmente hacia arriba (acción), mientras que en respuesta (reacción), el aire empuja el coche hacia abajo pegándolo al asfalto.

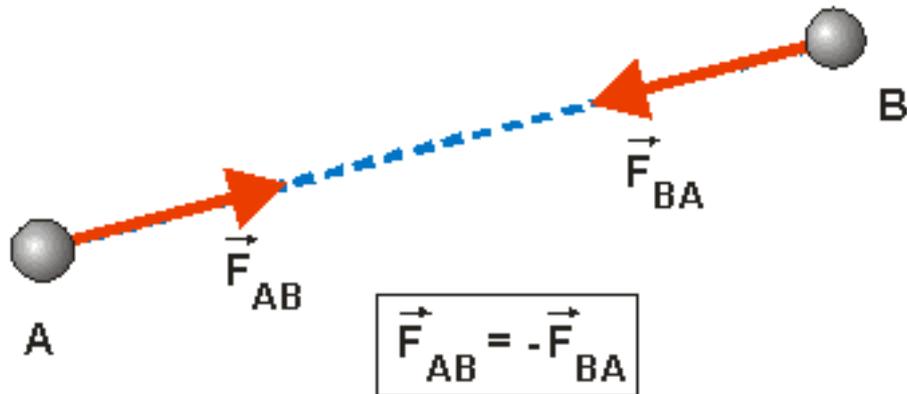


Ilustración 2.119 Tercera ley de Newton. Fuente: [https://baquerojuancamilo.files.wordpress.com/2015/05/b7165-principio\\_accion\\_reaccion.gif?w=700](https://baquerojuancamilo.files.wordpress.com/2015/05/b7165-principio_accion_reaccion.gif?w=700)

## 2. Mediante diferenciales de presión

Los alerones son diseñados mediante un perfil, donde la zona de bajas presiones se sitúa debajo y las de altas presiones en la cara superior o parte alta. Por la parte inferior, el flujo del aire circula a mayor velocidad que por la parte superior, de modo que se crea un vacío, lo que determina una depresión que empuja al vehículo hacia el suelo produciendo más downforce o carga aerodinámica.

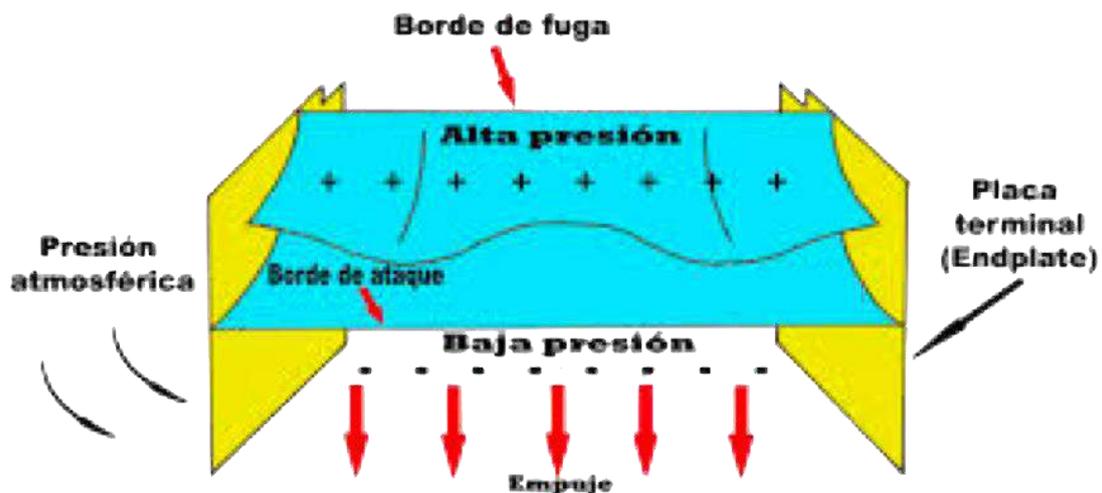


Ilustración 2.120 Esquema de presiones del alerón trasero. Fuente: [https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ0IZ5c0-3\\_2Cqra1W9CzNfxJSI4iYcqWunOLjSXkv2nUmP5YO](https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ0IZ5c0-3_2Cqra1W9CzNfxJSI4iYcqWunOLjSXkv2nUmP5YO)

El alerón trasero se debe colocar en un ángulo determinado para conseguir un equilibrio, normalmente suele ser a unos 15 grados, pues hay que moderar una proporcionalidad entre sus dimensiones y el empuje. Además, también es lógico, disponer una prudente armonía entre el alerón delantero y el trasero.

Un monoplace de Formula 1 a máxima velocidad, genera un dowforce de 5 veces su peso forzado hacia el suelo, procedente del difusor, los alerones y deflectores que se instalan en el coche.

Pero es de vital importancia que la carga aerodinámica este equilibrada tanto atrás como delante y a izquierda como a derecha. Esta última se lleva a cabo estrictamente con una simetría del coche, pero el equilibrio entre la parte trasera y delantera resulta más difícil, porque demasiada carga en la parte delantera provoca sobreviraje (el coche tiende a meterse por inercia demasiado en el giro de una curva) y demasiada carga en la parte trasera produce subviraje (el bólido tiende a desarrollar una trayectoria hacia el exterior de una curva, saliéndose del giro).

El fin óptimo es llegar a una resolución eficaz y equilibrada del drag y del dowforce.

Las prestaciones del alerón delantero son muchas, pero hay que tener en cuenta que es más favorable, cuanto mayor sea y cuando su posición este lo más cercana posible al suelo, sin embargo, en los alerones traseros, la eficacia más óptima, es que sean altos, pues de esta manera, el flujo del aire limpio se puede aprovechar sin turbulencias.

La normativa y reglamentaciones para la adaptación del alerón trasero, son muy precisas y estrictas, obliga a tener unas alturas y dimensiones específicas, adquirir una flexión limitada, su fabricación en unos materiales concretos, etc.

Actualmente, La FIA ha disminuido el tamaño del alerón trasero y reducido su eficacia para delimitar la velocidad en las curvas de los circuitos.

Según la ordenanza, su dimensión se implanta a 75 cm de ancho y se restringen los elementos que se pueden aplicar, pues según el reglamento únicamente debe tener dos secciones de perfil.

Se denomina Flap al dispositivo fijo o articulado que compone el alerón y que, junto al ala principal, su función es generar sustentación negativa.

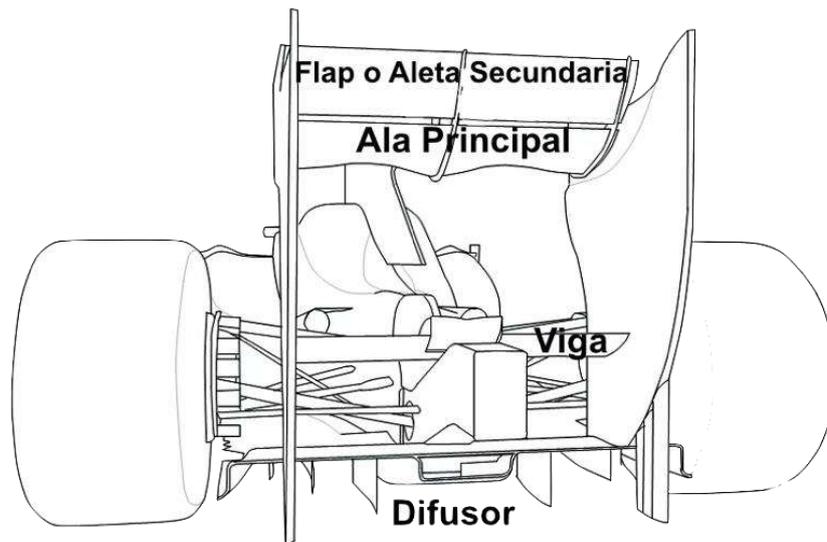


Ilustración 2.121 Esquema de alerón trasero. Fuente: <http://k35.kn3.net/13A939654.jpg>

En un alerón el ángulo de ataque se puede cambiar; según el circuito, los distintos equipos estudian y analizan el efecto de resistencia de dicho alerón en una velocidad punta en línea recta, para corregirlo y ajustarlo según las necesidades. Siempre es más ventajoso, un ángulo de alerón trasero alto para pistas lentas, sin embargo, para circuitos rápidos es aconsejable un perfil más bajo.

En las siguientes imágenes generadas mediante CFD, según el tamaño del alerón, se puede visualizar los diferentes efectos que se producen. Para un alerón de mayor superficie, se genera más carga aerodinámica y se desvía gran cantidad de flujo de aire, mientras que, para un alerón de menor superficie, se produce una baja carga y una menor desviación. Por lo tanto, se deduce que, calculando la superficie del alerón trasero, se puede modificar la carga aerodinámica de un coche.

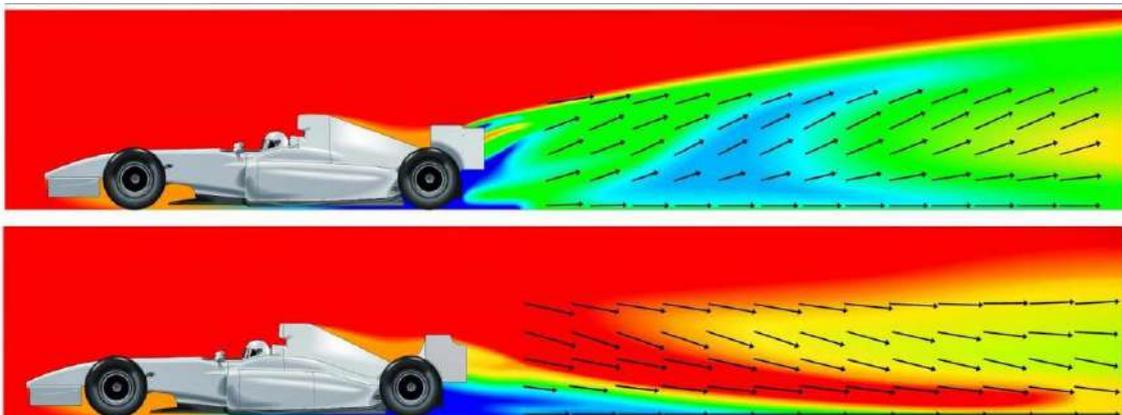


Ilustración 2.122 Estela de flujo de aire según superficie del alerón. Fuente: [http://www.caranddriverthef1.com/sites/default/files/imce/u25709/1306371943\\_cdg\\_air\\_flow\\_graph\\_ic1.jpg](http://www.caranddriverthef1.com/sites/default/files/imce/u25709/1306371943_cdg_air_flow_graph_ic1.jpg)

El Gurney Flap es un suplemento de pequeño tamaño, que se coloca en ángulo recto, en el borde final del alerón aumentando y mejorando su eficacia. Su función es generar por detrás de este elemento, una región de baja presión, y así absorber el aire que circula por debajo del alerón para que el flujo pase a una mayor velocidad.

El Flap Gurney debe su nombre a Dan Gurney, quien fue el primero en usarlo en el año 1971. Este aditamento aerodinámico crea un vacío detrás de sí, forzando al flujo del aire que circula por debajo del alerón a llenarlo, de tal forma que permite que el flujo de la parte superior y de la parte inferior se fusionen o unifiquen.

El flap Gurney es un elemento muy simple pero eficaz, se trata de una tira fabricada normalmente de aluminio o fibra de carbono, que induce una mejora del rendimiento en el elemento, en algunos casos hasta de un 25 % de carga aerodinámica adicional.

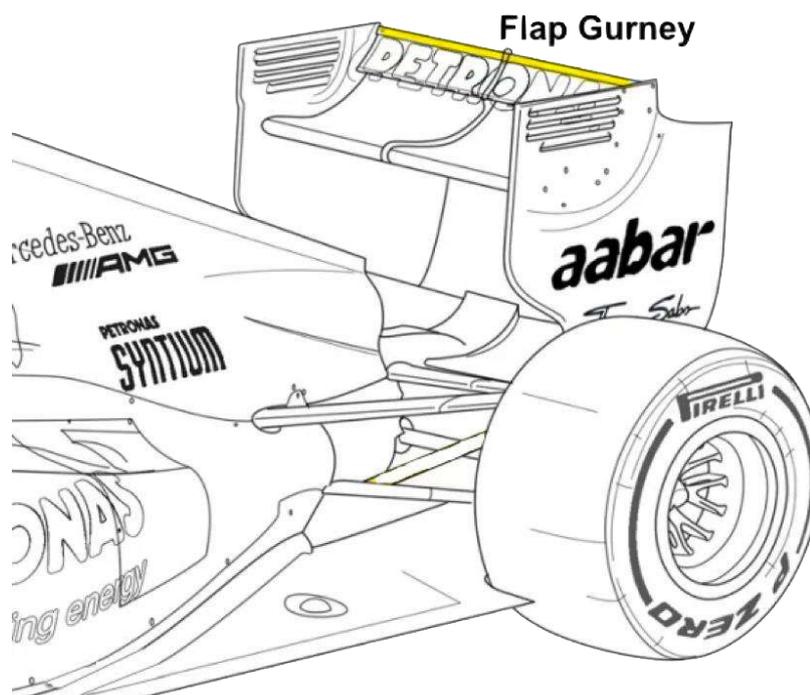


Ilustración 2.123 Flap Gurney. Fuente: <http://k41.kn3.net/F6E2579AB.jpg>

Cuando se determina un ángulo de incidencia muy acusado en el alerón trasero, es posible tener problemas, el flujo no pueda seguir el contorno y correr el peligro de que el flujo del aire se despegue demasiado pronto de la parte inferior de la superficie, lo que provocaría pérdida de carga aerodinámica y un aumento de resistencia al aire.

Sin embargo, con el uso del flap Gurney este problema se minimiza, y favorece la instalación de mayores ángulos, lo que genera una mayor carga aerodinámica.

Esto se explica porque ayuda a mantener la capa límite pegada a la superficie del coche hasta llegar al borde final, donde se ubica el flap, ya que incrementa la presión en la parte superior del alerón, después, se producen dos vórtices detrás del flap, que giran en sentido contrario y une el flujo de la zona superior e inferior. Mediante este elemento se retrasa la separación de las capas del flujo del aire, y esto se suma al efecto de succión.

El tamaño de este elemento y su dimensión en altura se disponen dependiendo de las necesidades y los resultados que se quieran conseguir. En un principio, la utilización del flap Gurney se limitó al alerón trasero, pero actualmente se usa en diversos aditamentos aerodinámicos del coche.

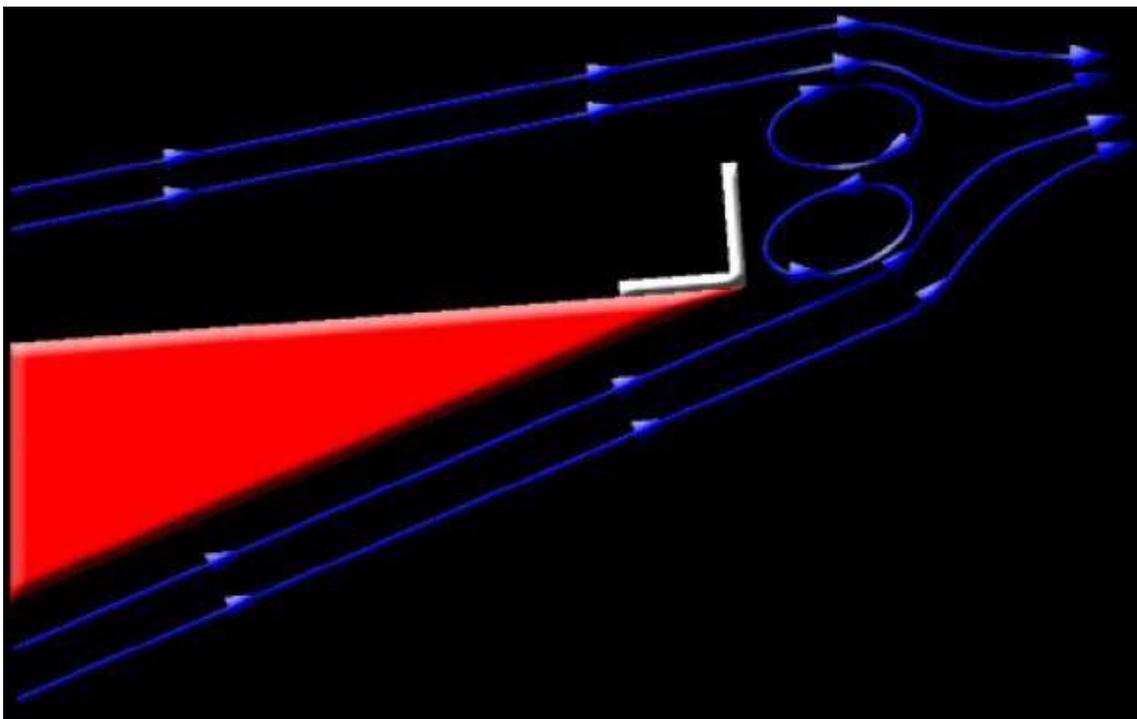


Ilustración 2.124 Efecto del flujo con Flap Gurney. Fuente: [https://static.motor.es/fotos-noticias/2015/04/min652x435/el-flap-gurney-sencillo-pero-muy-efectivo-201521169\\_2.jpg](https://static.motor.es/fotos-noticias/2015/04/min652x435/el-flap-gurney-sencillo-pero-muy-efectivo-201521169_2.jpg)

El alerón trasero provoca al monoplaza agarre y carga en la parte trasera, concretamente una tercera parte del total, además de la mitad del apoyo aerodinámico que tienen las ruedas traseras, y la otra mitad lo crea el difusor. No obstante, para incrementar o gestionar mejor el downforce, se incorporan diferentes elementos como las derivas, branquias o rejillas y el DRS o Drag Reducción System.

Las derivas o endplates, son unos dispositivos verticales que se disponen en los extremos laterales del alerón.

Estos elementos se emplean para optimizar la gestión del aire y mejorar la circulación del flujo.

Su funcionalidad es impedir que el aire que pasa por la parte superior del alerón se desvíe hacia la zona de abajo y al mismo tiempo, que el aire circulante por la zona exterior sea succionado por los laterales debajo del alerón, lo que ocasionaría una lamentable perdida de carga.

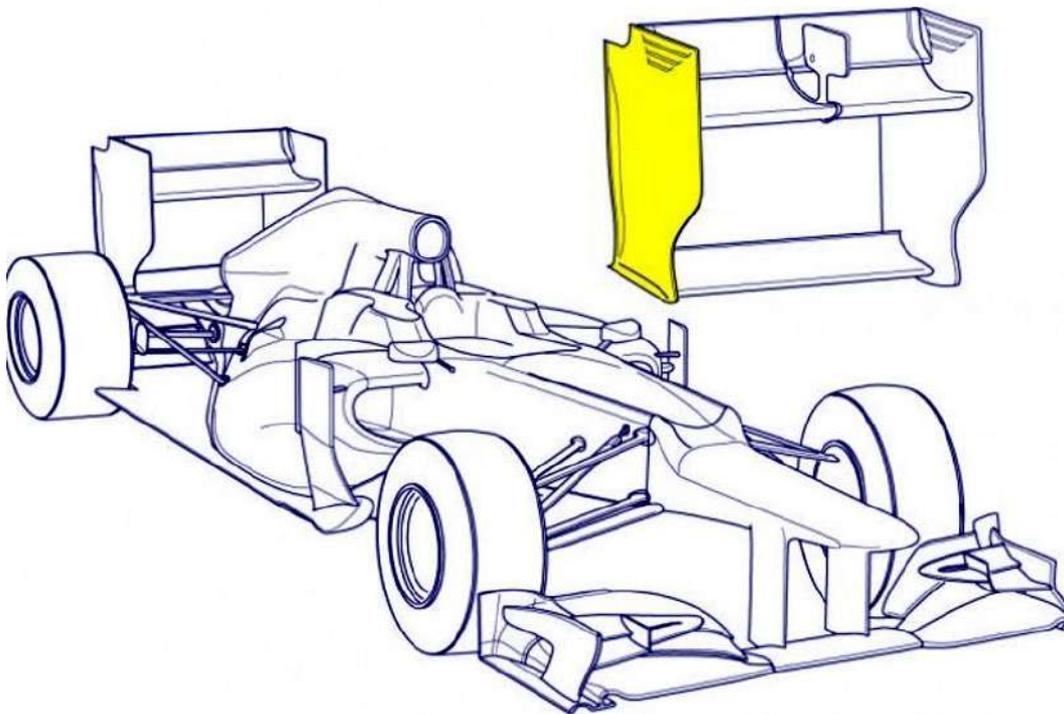


Ilustración 2.125 Placa o deriva terminal. Fuente: <http://k45.kn3.net/083A0CA28.jpg>

Las derivas también sirven como soporte para instalar el alerón, aunque no sólo tiene un papel estructural, sino determinan un granito más en la aerodinámica del coche junto a la adición de otros elementos.

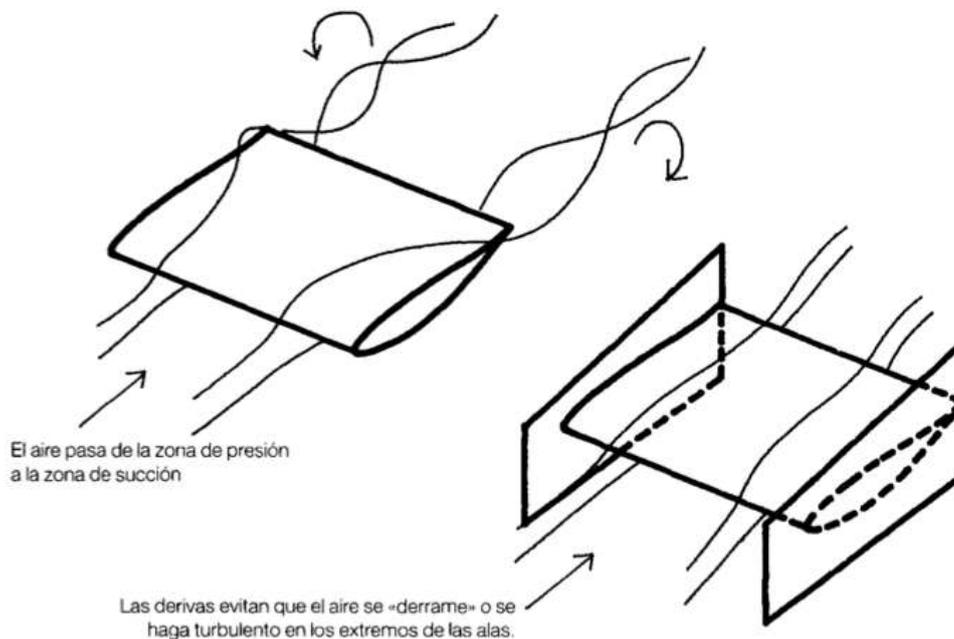


Ilustración 2.126 Flujo de aire con derivas. Fuente: <http://3.bp.blogspot.com/D1sA4m4d-Zq/StWwXTxyMOI/AAAAAAAAAJc/OmJXjKLSn88/s1600/derivas-laterales.jpg>

A estas derivas del alerón se les aplica unas normas, pues se debe designar unas placas terminales con la sección transversal mínima, aunque actualmente los equipos tienden a implantar placas de unas grandes dimensiones, pero siempre limitándose y considerando la reglamentación.

Estas derivas pueden llevar unas ranuras, llamadas rejillas de ventilación, ubicadas en la parte superior de la placa terminal. Su función es rebajar la fricción, por lo tanto, reducir la resistencia que se establece en el ala para reconducir el flujo del aire que transita por la parte exterior y encauzarlo, dirigiéndolo a la punta del ala.



Ilustración 2.127 Aletas con rejillas. Fuente: <https://pbs.twimg.com/media/CmNvvCHWAAA2z5t.jpg:large>

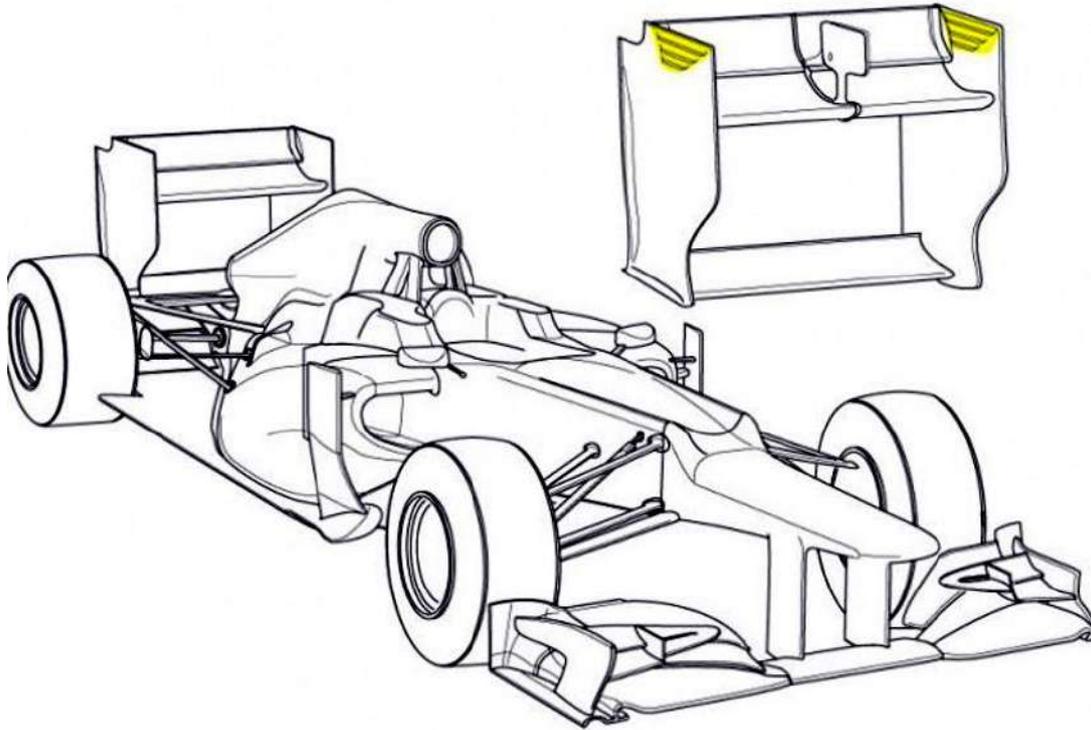


Ilustración 2.128 Rejillas de ventilación en derivas. Fuente: <http://k35.kn3.net/4177AC7CF.jpg>

El aire que circula a alta presión sobre la superficie del alerón tiende a juntarse con el aire que pasa por debajo y laterales del ala, que fluye a menor presión, esto origina trayectorias helicoidales, o lo que se denomina vórtices.

Un vórtice es una corriente de flujo de aire que gira en espiral, concretamente, se podría definir como una espiral de corrientes turbulentas del aire. Dichos flujos se unifican en la parte trasera del alerón, en el punto más extremo, dispersándose en espiral.

Estos vórtices o remolinos generan una gran cantidad de arrastre que influye en frenar el coche en línea recta, para evitar y solucionar este problema, se utilizan las persianas o lumbreras en la placa terminal, que tratan igualar y uniformar la presión en la punta del ala.

Los ingenieros estudian que estos vórtices sean controlados y que su potencia sea pequeña, para ello se instalan las rejillas o ranuras en la placa terminal, pues no se evita totalmente la creación del vórtice, pero se crea unas condiciones mucho más favorables, porque se controla su potencia, y así se producen menos perjuicios.

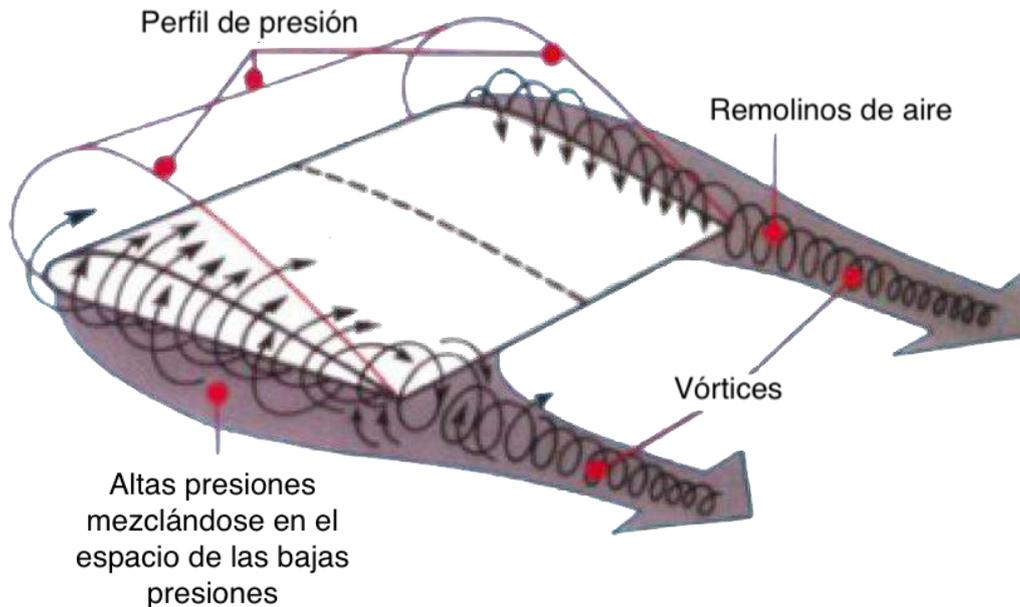


Ilustración 2.129 Esquema de generación de vórtices. Fuente: <https://albrodpulf1.files.wordpress.com/2014/10/vortex2.jpg>

Un factor importante, es establecer la colocación, el número y la forma de ranuras, ya que, siempre dependerá de las condiciones de carga aerodinámica del alerón.

Cuantas más ranuras tenga la deriva del alerón para evacuar el aire hacia fuera, menor presión se queda en la parte superior, por lo tanto, produce un descenso de los valores de la carga aerodinámica.

La solución radica en buscar un equilibrio donde se logre alcanzar el máximo de carga con el vórtice, pero a su vez, lo más debilitado posible para que el beneficio sea superior a la pérdida.

Los equipos de las diversas escuderías suelen realizar modificaciones en las placas dependiendo de las características de las pistas de los circuitos.

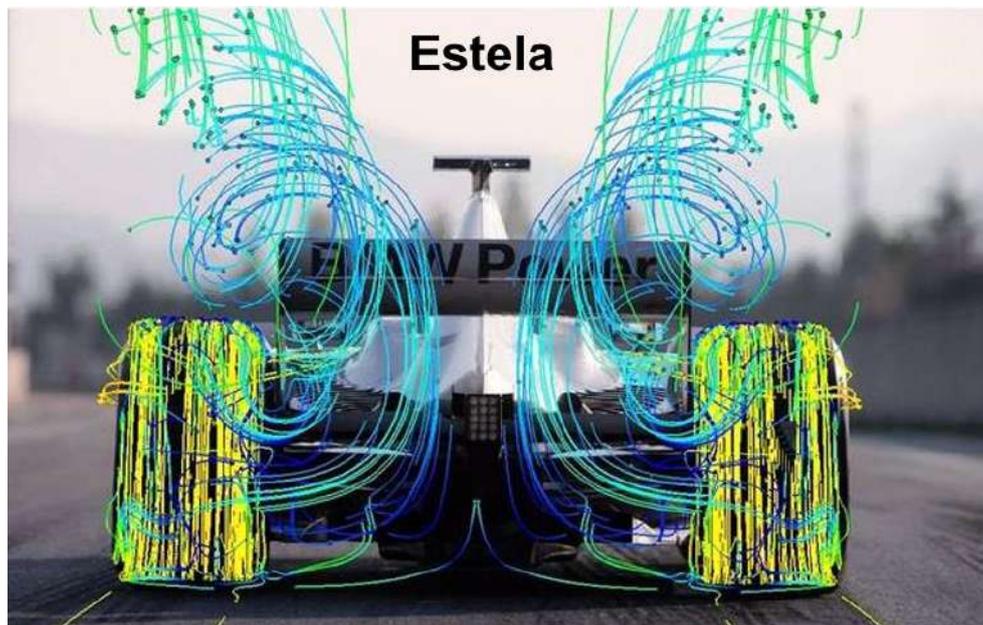


Ilustración 2.130 Estela de vórtices. Fuente: <http://k45.kn3.net/7E8A33B17.jpg>

En un automóvil existen diversas superficies como ruedas, casco del piloto, alerones, pontones, etc., que generan una resistencia al aire, ya sea en mayor o menor medida. El aire al tropezar con estas superficies, comienza a formar distintas laminas o capas, según el grado de incidencia del elemento con el cual se choca, cada una de estas capas posee distinta velocidad, siendo la menor la que se encuentra más cerca de la superficie.

Debido a este problema, la forma de la superficie y de su resistencia al aire, se crean capas de aire que retroceden o se quedan detenidas, obstruyendo o dificultando el aire que circula correctamente, creando turbulencias, que pueden frenarlo o modificar su trayectoria.

Por este motivo, los ingenieros aerodinámicos crean generadores de vórtices, que modifican el comportamiento y la dirección del flujo del aire. Estos generadores afectan a la dinámica del flujo, son elementos que sirven para redirigir el aire hacia zonas determinadas, conseguir eliminar o controlar las turbulencias, alimentar una zona concreta del coche destinando el aire hacia ella, sellar aerodinámicamente algunas partes concretas del monoplaza, remediar e impedir que la capa límite se rompa, incrementar el dowforce, reducir el drag de las partes donde el aire choca con su superficie, como por ejemplo los pontones, etc.

Un monoplaza de Formula 1 lleva instalado diversos generadores de vórtices a lo largo de toda su superficie, los principales se ubican en la parte alta de los pontones, en las partes bajas del coche, en el alerón delantero, en los laterales del alerón trasero y en la salida central de los difusores.

Existen diversos tipos de vórtices que se producen en un coche, unos se desean evitar y otros se necesitan provocar o utilizar para separar fluidos, y sellar alguna zona aerodinámica.

Para ello, se disponen los generadores de vórtices, según la funcionalidad que se les destine, pero el objetivo principal de un generador de vórtice es limitar o evitar la formación de turbulencias y reconducir el flujo del aire.

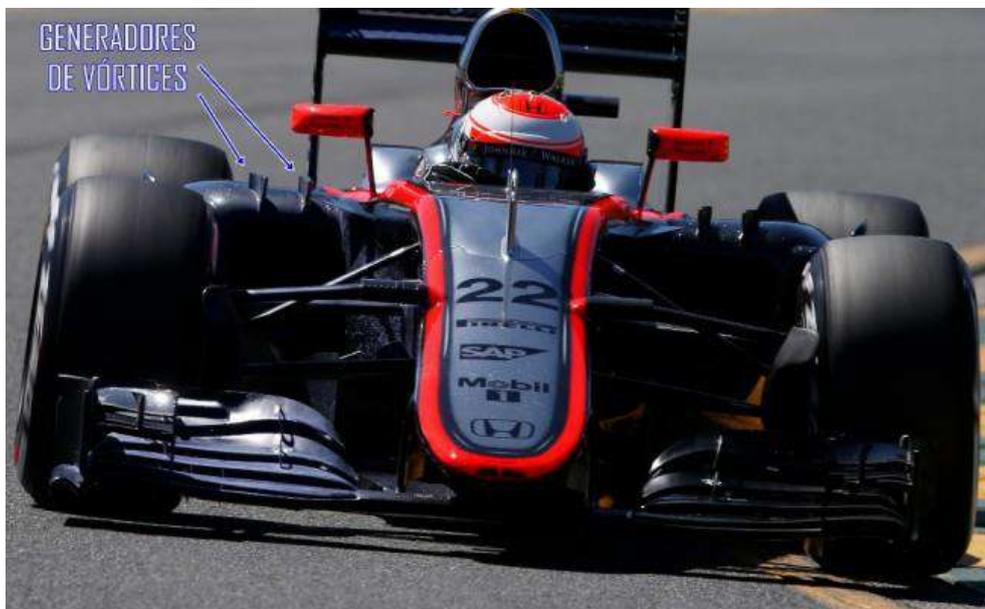


Ilustración 2.131 Generadores de vórtices. Fuente: [https://static.motor.es/fotos-noticias/2015/03/min652x435/generadores-de-vortices-que-son-y-como-trabajan-201520675\\_1.jpg](https://static.motor.es/fotos-noticias/2015/03/min652x435/generadores-de-vortices-que-son-y-como-trabajan-201520675_1.jpg)

El alerón se sujeta con un elemento fabricado en fibra de carbono llamada viga de perfil alar, ubicada por encima de la caja de cambios.

Esta pieza está limitada a fabricarse únicamente y estrictamente en una sola pieza y debe pasar un control de sus dimensiones. Se ajusta con la estructura de choque trasero donde existe un área libre en la cual se suelen disponer además algunas pequeñas aletas extras.

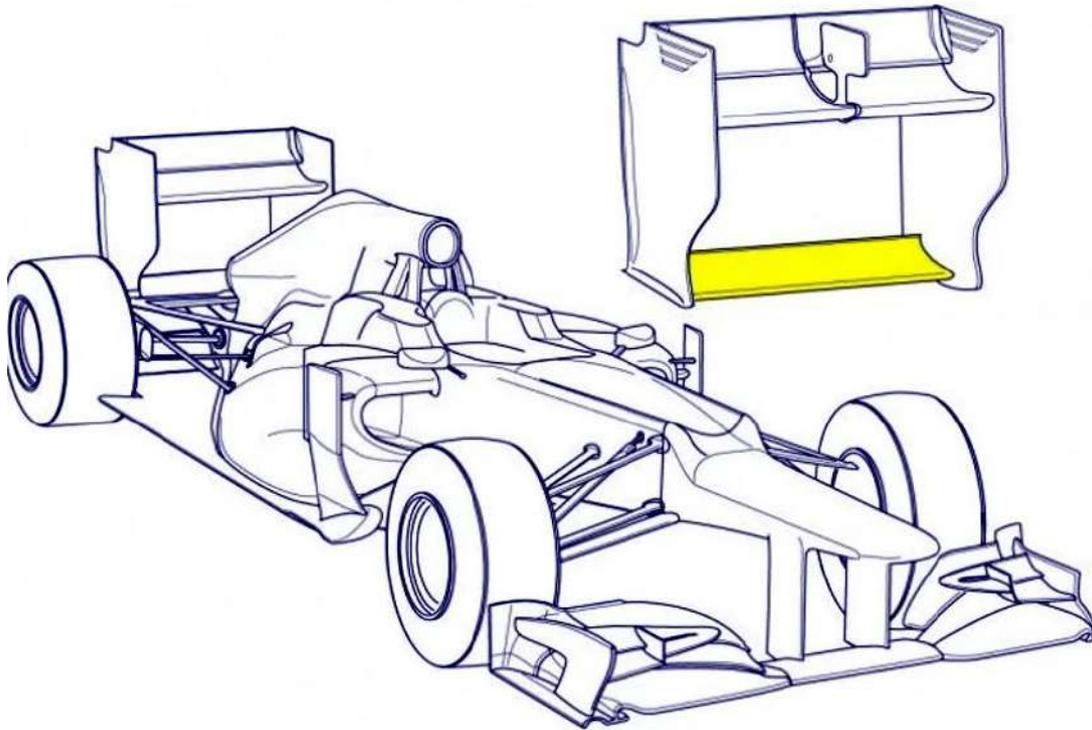


Ilustración 2.132 Viga de soporte del alerón. Fuente: <http://k40.kn3.net/ED205E56B.jpg>

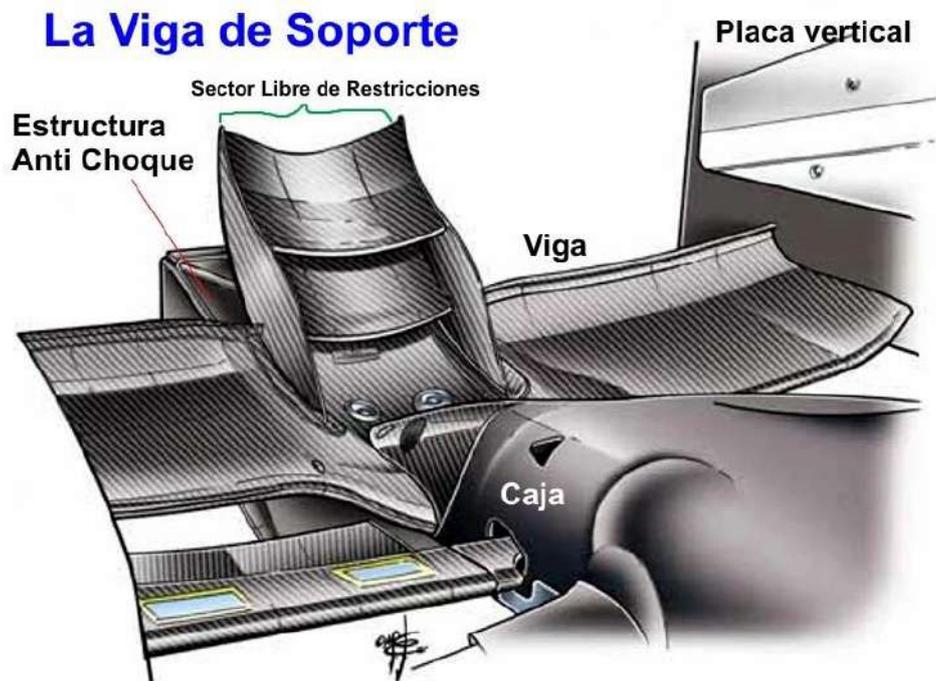


Ilustración 2.133 Viga de soporte. Fuente: <http://k41.kn3.net/DB4DDF113.jpg>

En un monoplaza cuando adquiere altas velocidades, el alerón le supone una resistencia aerodinámica, siendo esto un inconveniente. Para solucionar este problema en los adelantamientos se desarrolló el sistema DRS (Drag Reduction System), mediante el cual se puede variar el ángulo del flap, en ciertos puntos de un circuito. En el momento concreto que se desee activar este sistema, se realiza con un actuador hidráulico en menos de un segundo, que provoca el movimiento del ala, variando la posición, de cerrada a otra más alta o abierta.

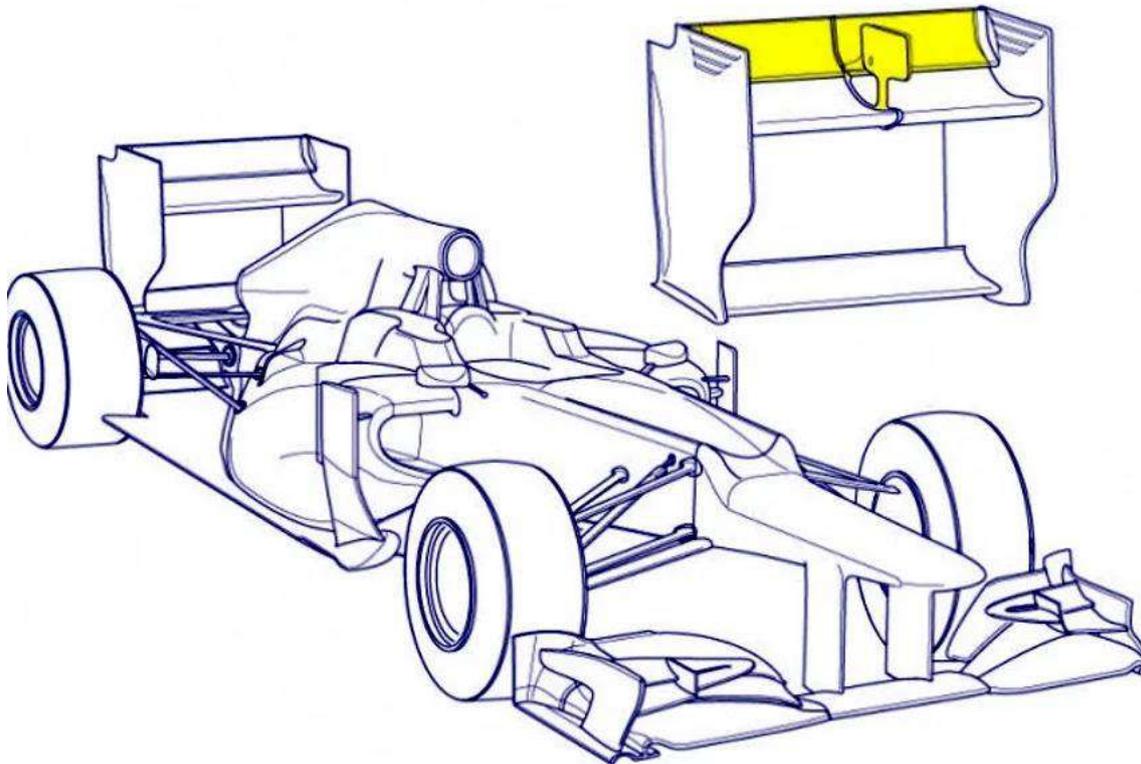


Ilustración 2.134 Flap del DRS. Fuente: <http://k40.kn3.net/E431A706A.jpg>

Este sistema, DRS o también llamado Alerón Trasero Móvil fue integrado en los coches, en la temporada del 2011, con el objetivo de reducir la carga aerodinámica en las altas velocidades que se cogen en rectas, ayudando y facilitando los adelantamientos.

Se fundamenta en una variación del alerón trasero, ajustándolo según las necesidades del momento, la mitad superior se gira hacia delante, dejando libre una apertura por donde se permite el paso del flujo del aire, esto reduce la resistencia aerodinámica y se logra aumentar la velocidad.

El piloto, en el momento que prevea sea necesario, activa el DRS generalmente, a través, de un botón situado en el volante o mediante un pedal que se localiza a la izquierda del freno; una vez empleado este sistema, se desactiva cuando el piloto usa el freno.

Existe una normativa que reglamenta el diseño de este sistema de reducción del arrastre, el flap debe pivotar siempre en su extremo posterior, y la distancia del espacio que se origina entre la aleta y el plano principal del ala posterior no debe sobrepasar más de 50 mm.



Ilustración 2.135 DRS cerrado. Fuente: <http://k31.kn3.net/C0F5840CB.jpg>



Ilustración 2.136 DRS abierto. Fuente: <http://k44.kn3.net/FEC175D95.jpg>

En las siguientes imágenes se puede observar el cambio que se genera en la dirección de la estela aerodinámica del flujo del aire, cuando se activa el DRS, pues adopta un ángulo más horizontal.

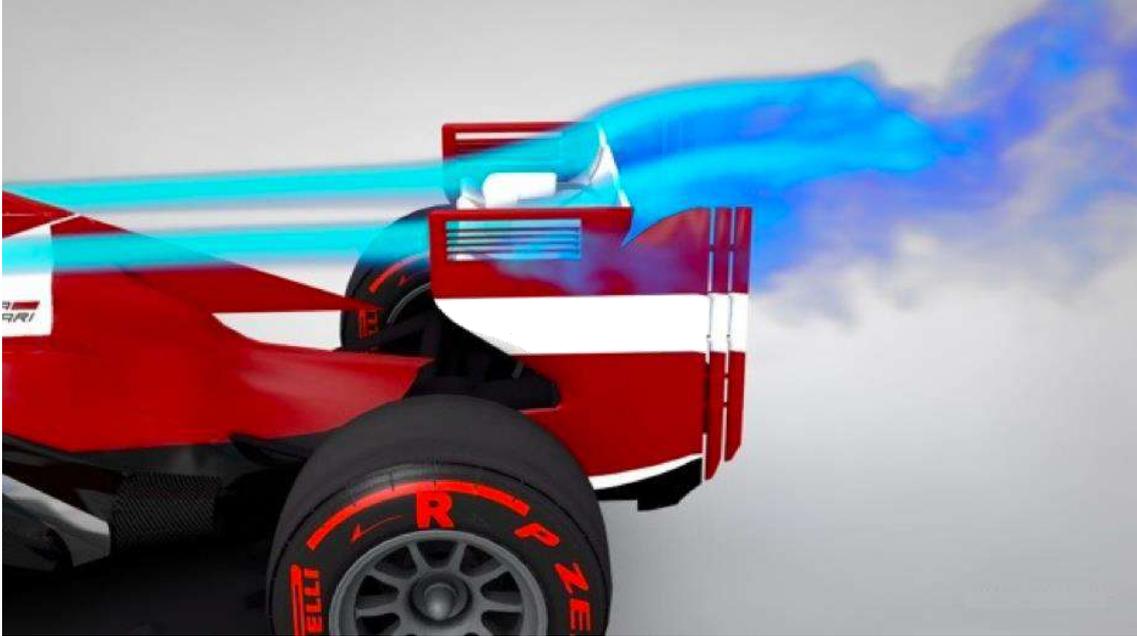


Ilustración 2.137 Estela de flujo sin conectar el DRS. Fuente:  
<https://safetycast.files.wordpress.com/2013/03/20130328-113315.jpg>

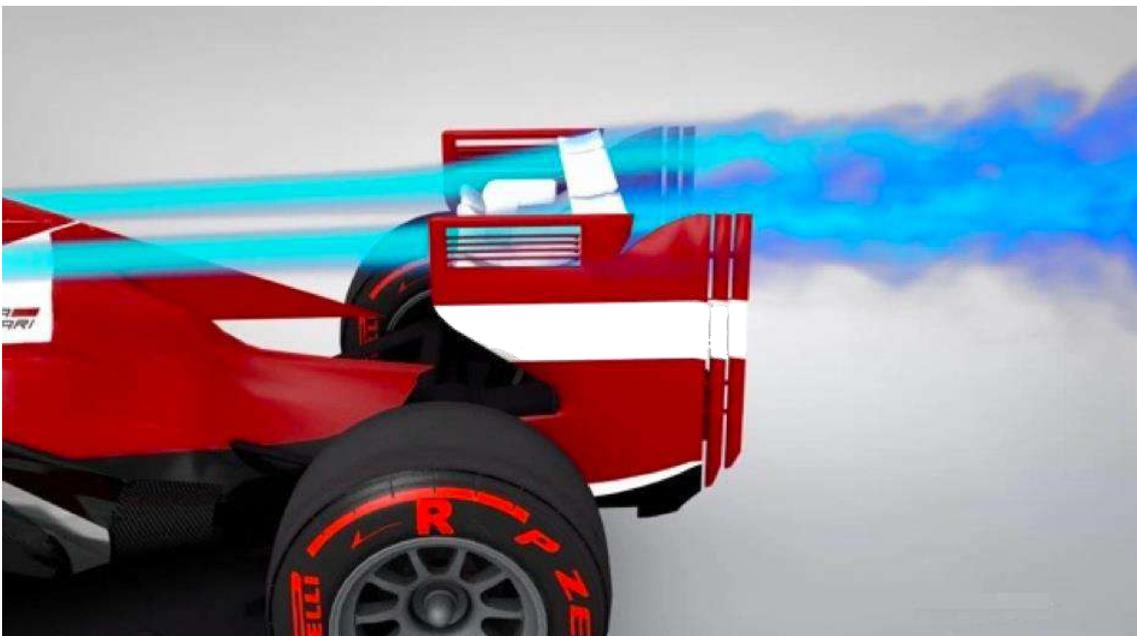


Ilustración 2.138 Estela de flujo con DRS activado. Fuente:  
<https://safetycast.files.wordpress.com/2013/03/20130328-113407.jpg?w=640>

La utilización de este sistema esta rigurosamente reglamentado, la FIA designó varias limitaciones:

1. El DRS solamente es posible usarlo cuando el piloto que lo desea activar, se halla en un lapso de menos de un segundo y justo detrás del monoplaza que quiere adelantar, en el crítico momento que ambos coches corren por la zona de detección, pues la FIA determina y suele marcar dos zonas en los circuitos, normalmente en rectas.
2. El DSR queda prohibido en ciertos momentos puntuales, como en las dos primeras vueltas del circuito durante la carrera, en caso de suceder un incidente y se impongan las banderillas amarillas en la zona destinada al DRS, por último, no se puede habilitar cuando las condiciones climatológicas no sean favorables.
3. Los pilotos deben ajustarse a la activación el sistema, únicamente, una vez por vuelta del circuito.

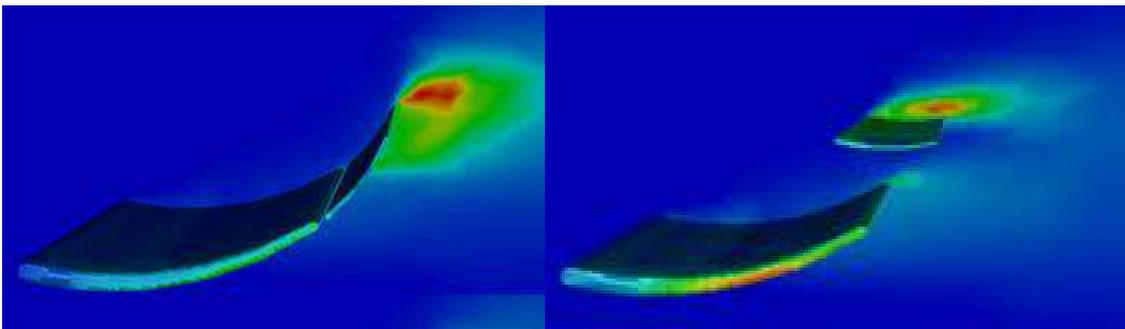


Ilustración 2.139. Simulación del DRS [*Drag Reduction System*] de un Fórmula 1. Fuente: <https://jasf1961.wordpress.com/tag/coeficiente-drag/>



Ilustración 2.140. DRS [*Drag Reduction System*] de un Fórmula 1. Fuente: <http://vignette1.wikia.nocookie.net/f1wikia/images/3/3b/DRS.png/revision/latest?cb=2012041722213>



**PARTE III**  
**DISEÑO Y SIMULACIÓN**

## 1 Diseño del carenado

Al inicio del proyecto, se planteó la opción de comenzar un diseño partiendo desde cero, para crear un prototipo completamente nuevo, lo cual resultaba muy arriesgado. El diseño de la carrocería de un vehículo es un proceso muy costoso, presenta ciertas dificultades y requiere de muchos diseñadores trabajando a la vez, por lo que, finalmente se decidió buscar la geometría de un modelo real existente en el mercado cuyo potencial aerodinámico presentará unas prestaciones óptimas.

Se han planteado diferentes estructuras geométricas. Después de compararlas y analizarlas se ha decidido el perfil más conveniente, eligiendo la carrocería del coche Pagani Huayra el cual tiene una línea muy esterilizada, y se ha considerado la mejor opción, para modificar, según las exigencias.

De esta forma, en este proyecto únicamente se centrará en el diseño del alerón trasero, analizando sus efectos, modificando dimensiones y comparando distintos ángulos, hasta llegar a la disposición más competente y eficiente.

Para el diseño del carenado del vehículo se han barajado diferentes propuestas, buscando un perfil con una geometría que fuera optima aerodinámicamente, con buenas prestaciones, pero económico y de fácil construcción para no tener que realizar muchas iteraciones del modelo, y así poder centrarse en el análisis del efecto del alerón.

El Pagani Huayra es un automóvil súper deportivo, diseñado por el argentino Horacio Pagani, que le impuso el nombre de “huayra” que significa “viento” en la lengua quechua. Se trata de un biplaza con carrocería tipo coupé, muy ligero en su peso. En cuanto a sus prestaciones aerodinámicas, se le incorporan unos planos activos, cuatro alerones (flaps) que modifican su geometría en función de diferentes parámetros, estas se manipulan desde una unidad de control, la cual maneja otros datos e informaciones que supondrá aprovechar las fuerzas aerodinámicas para reducir el tiempo al tomar una curva.

Esta aerodinámica activa permite generar fuerzas aerodinámicas en función de las necesidades del automóvil, siempre concibiendo las mayores prestaciones y estabilidad al vehículo.

## 1.1 Boceto del diseño del Ferrari LaFerrari

### 1.1.1 Herramienta utilizada:

Antes del diseño del carenado del vehículo se realiza una fase previa analizando una gran variedad de bocetos.

En el mercado existen diversidad de programas que permiten realizar un boceto, con lápices, tintas y marcadores que crean infinidad de figuras y texturas. En este proyecto se ha escogido como asistente el Sketchbook, herramienta actualmente muy valorada por diseñadores automotrices e industriales.



Ilustración 1.1 Imagen del Ferrari LaFerrari. Fuente: <https://www.diariomotor.com/coche/ferrari-laferrari/>



Ilustración 1.2 Boceto del Ferrari LaFerrari. Fuente: Propia

## 1.2 Datos del Pagani Huayra:

<b>Datos</b>	<b>Cantidad</b>
Largo	4,605 mm
Ancho	2,036 mm
Altura	1,169 mm
Distancia entre ejes	2,795 mm
Peso	1,280 kg
Distribución del peso	44 % delantero
Coeficiente drag	0.31 a 0.37
Cilindros	V12 (60°)
Cilindrada	6 litros 5980 cc (498.33 cc)
Potencia máxima	764 PS (754 bhp) (562 kW) a 6200 rpm
Potencia	126.1 bhp/litro
Par máximo	1000 Nm (738 ft·lb) (102 kgm) a 2400 rpm
Par	167.22 Nm/litro 2.02 ft·lb/cu <sup>3</sup>
bmp (brake mean effective pressure)	2101.4 kPa
Potencia / peso	597.25 PS/tonelada 439.26 kW/tonelada 589.06 bhp/tonelada

Tabla 1.1 Datos del Pagani Huayra. Fuente:  
<https://www.carfolio.com/specifications/models/car/?car=510125>

### 1.3 Fotografías del Pagani Huayra:

Se ha empleado la técnica de ingeniería inversa para obtener la geometría del vehículo, para ello se han buscado las mejores imágenes del modelo elegido.

A partir de tres fotografías del coche a estudiar, capturadas las imágenes de la planta, alzado y perfil del vehículo. Mediante esta técnica se permite obtener a groso modo los planos del perímetro de la geometría, para obtener un modelo tridimensional del diseño y su posterior simulación.

Estudiando todas las partes estructurales y con ayuda de programas de diseño informático, se ha elegido este procedimiento para ir modificando el gráfico según nuestras necesidades.



Ilustración 1.3 Alzado delantero y trasero, perfil y planta del Pgani Huayra. Fuente: [https://www.diariomotor.com/2011/01/26/pagani-huayra/pagani\\_huayra\\_lat\\_sx\\_web/](https://www.diariomotor.com/2011/01/26/pagani-huayra/pagani_huayra_lat_sx_web/)

## 1.4 Herramienta utilizada

Para la ejecución de la geometría de las superficies del carenado se ha debatido en cómo realizarla. Pues actualmente, existen diferentes programas como CAD (diseño asistido por ordenador), CATIA, Solidwork o PTC Creo Parametric.

Finalmente se ha decantado por el uso del programa Solidworks, debido al manejo y experiencia obtenida en trabajos anteriores. Este programa cubre aspectos del proceso del desarrollo, permite integrar piezas y diseños para compartir la información.

Para el diseño de todos los elementos del carenado se ha utilizado el programa Solid-Works, creando las superficies que nos resultaran muy útiles para las simulaciones aerodinámicas, logrando una considerada similitud a la realidad.

La parte más complicada de este proyecto, ha sido el trabajo de desarrollar y encajar las diferentes posibilidades de orientación y disposición del alerón, para comprobar cuál es el resultado más óptimo, para ello, se ha empleado el programa Ansys realizando diferentes simulaciones donde se describen los resultados obtenidos.

## 1.5 Geometría 3D

### 1.5.1 Proceso de elaboración

Para conseguir una geometría aproximada de la carrocería del vehículo, se ejecutan los siguientes pasos:

- [1] Inicialmente se colocarán las imágenes obtenidas en los tres planos de referencia.
- [2] Se generan las líneas del contorno de las superficies.
- [3] Se extruyen las líneas curvas. Tanto la del perfil, como la del alzado.
- [4] Se genera la intersección entre los dos planos generados.
- [5] Se modifican algunas superficies para adecuarlo más a la realidad.

1. Croquis de las líneas curvas:

Se crean dos líneas “splines” (curvas) del contorno de la geometría.  
Primero en el perfil del dibujo:



Ilustración 1.4 Boceto en el perfil de la curva superior de la ventana. Fuente: Propia.

A continuación, en la planta del dibujo:

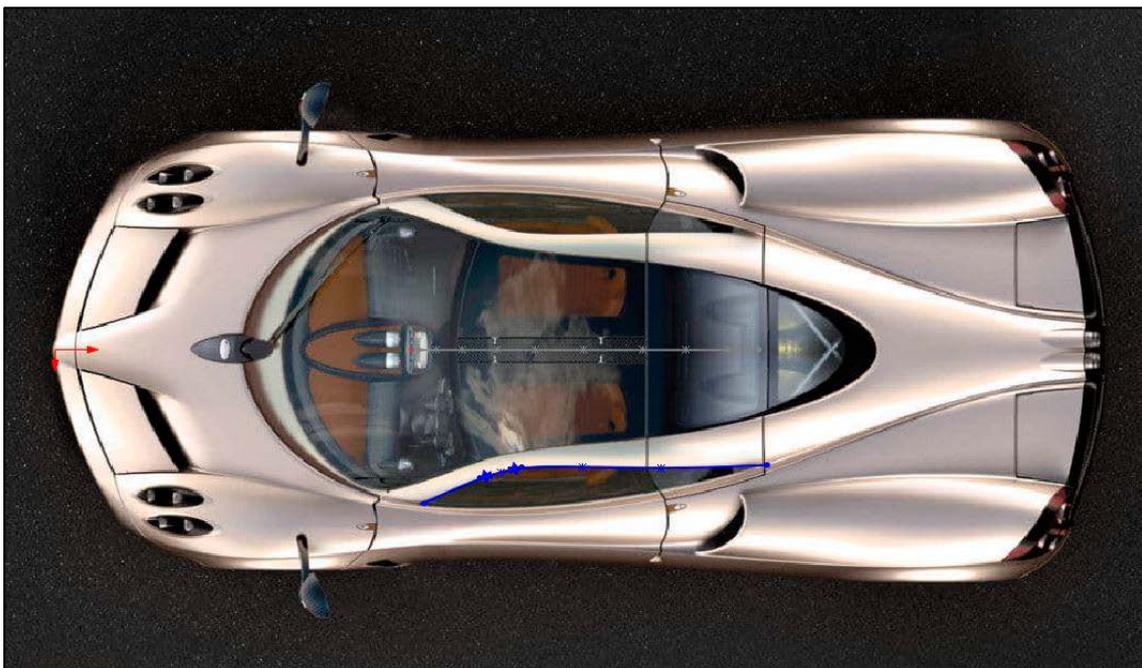
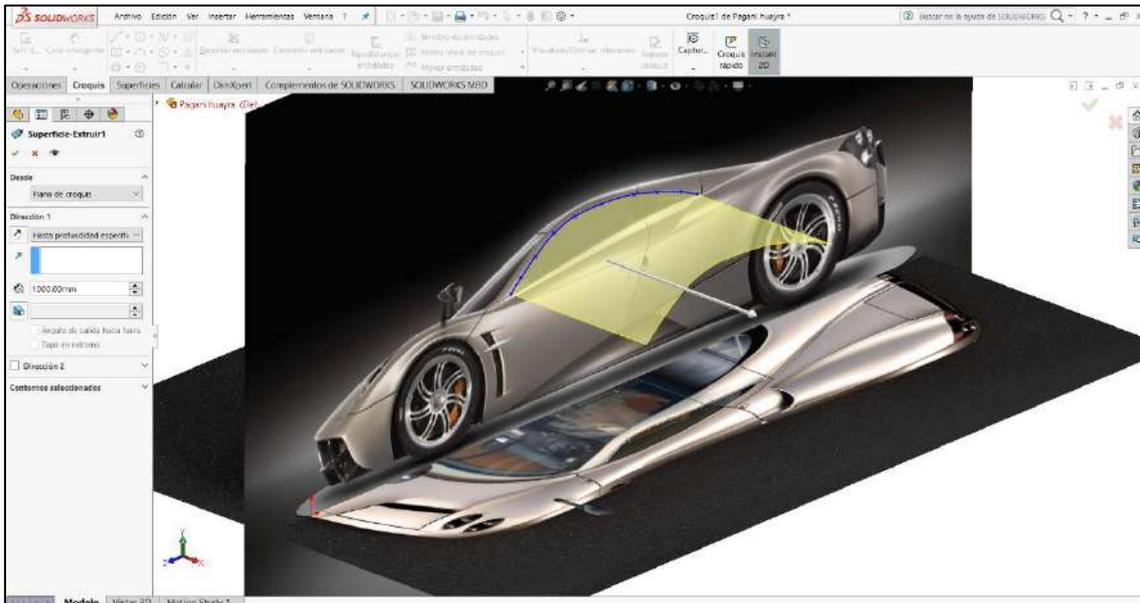


Ilustración 1.5 Boceto en la planta de la curva superior de la ventana. Fuente: Propia.

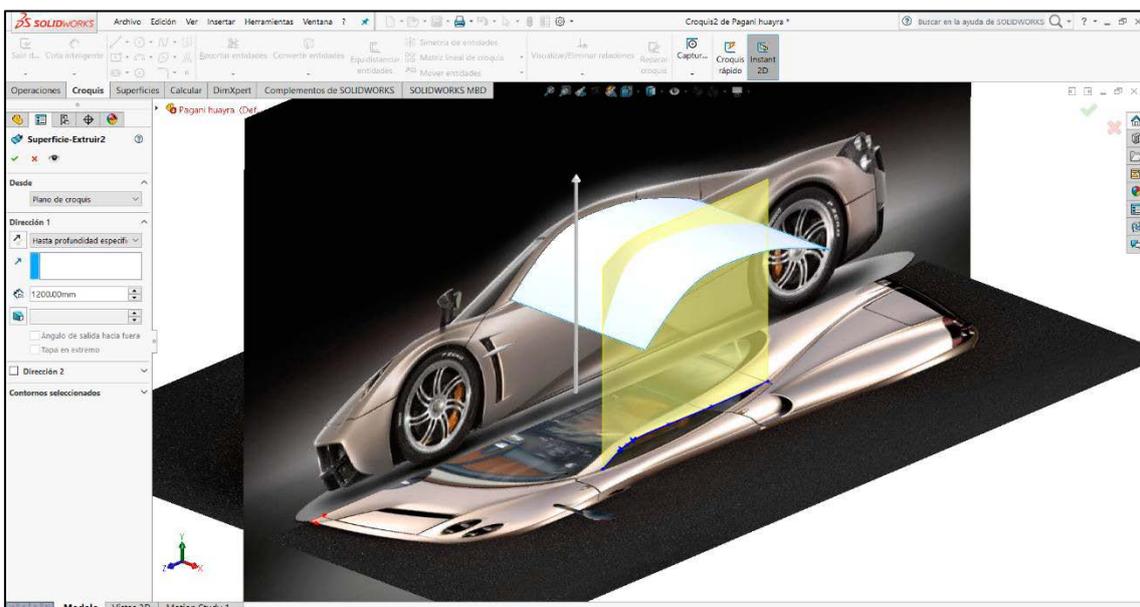
2. Se extruye el plano de esas curvas:

Se extruye la curva del perfil:



**Ilustración 1.6** Plano extruido del perfil de la curva superior de la ventana. Fuente: Propia.

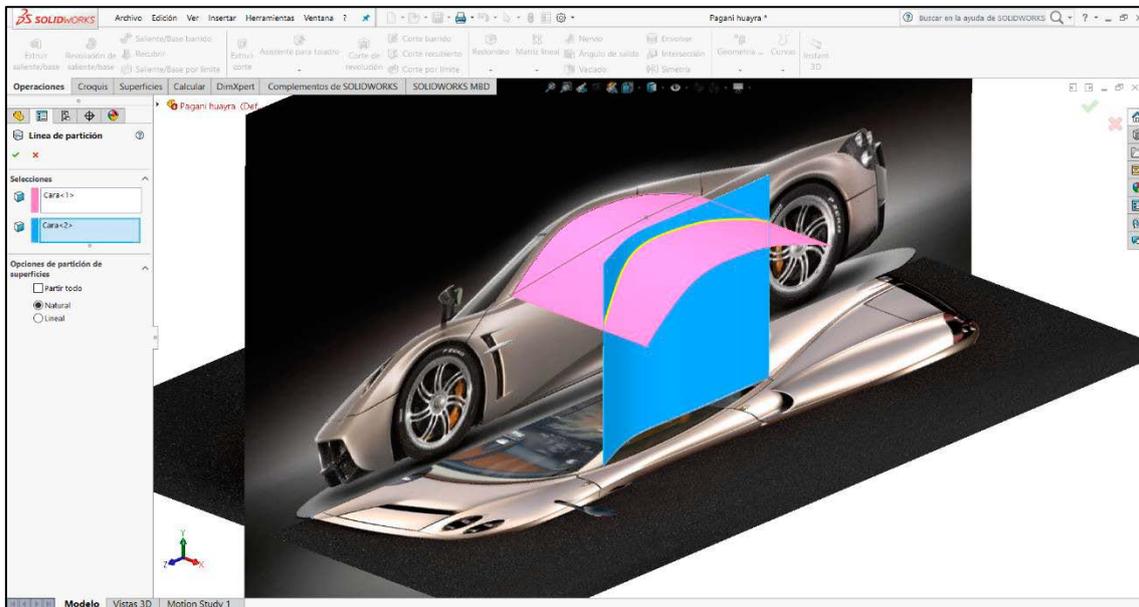
Se extruye la curva de la planta:



**Ilustración 1.7** Plano extruido de la planta de la curva superior de la ventana. Fuente: Propia.

3. Se obtiene la línea intersección:

Se crea la línea curva de la intersección entre los dos planos.



**Ilustración 1.8** Intersección de planos para la generación de la curva superior de la ventana.  
Fuente: Propia.

## PROYECTO FIN DE MÁSTER

### Timón aerodinámico para automoción

---

Se vuelve a realizar el mismo procedimiento con la línea inferior de la ventanilla. Primero se boceta la curva del perfil:



Ilustración 1.9 Boceto en el perfil de la curva inferior de la ventana. Fuente: Propia.

Después se realiza el boceto de la planta:

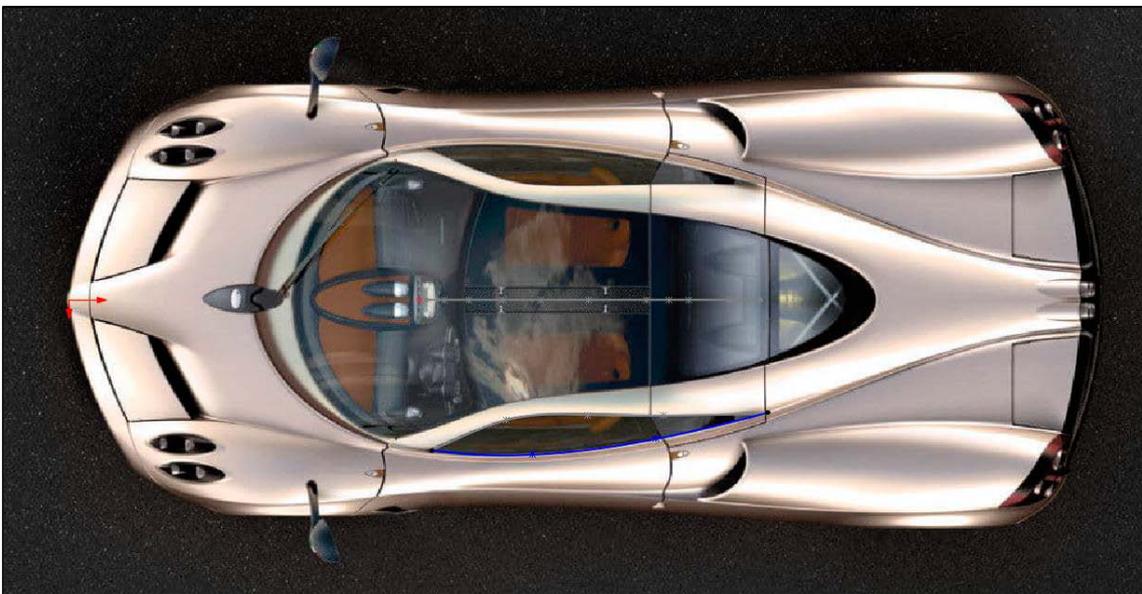
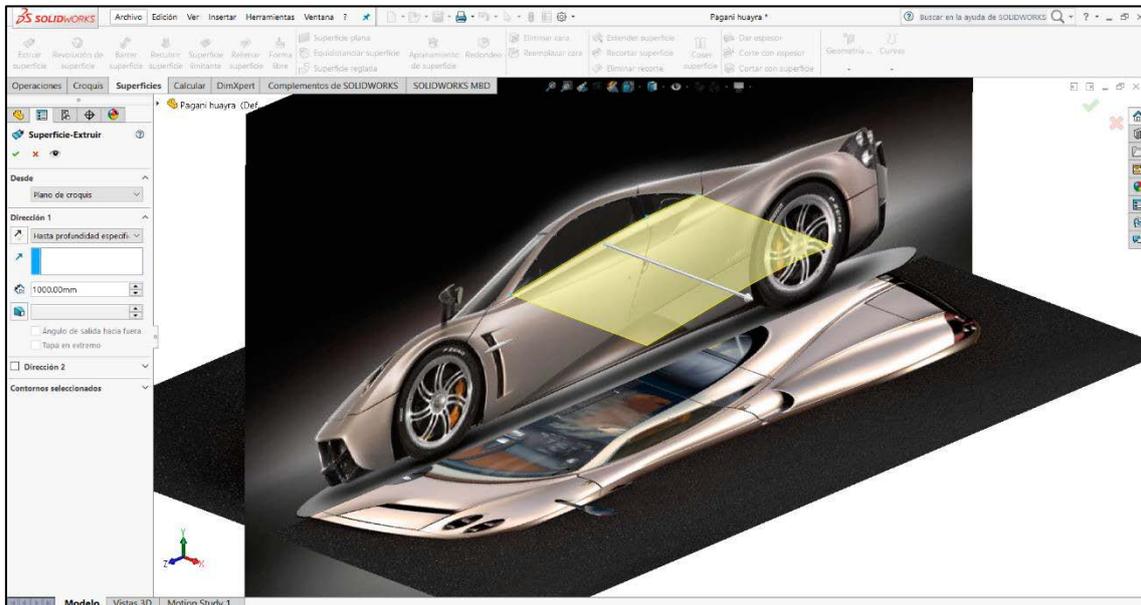


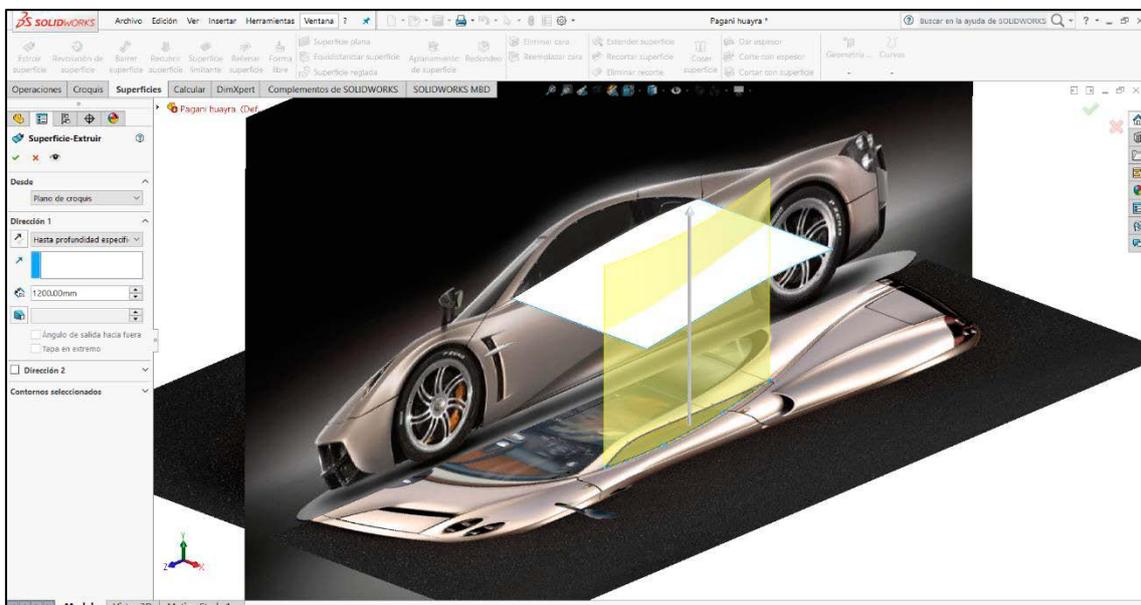
Ilustración 1.10 Boceto de la planta de la curva inferior de la ventana. Fuente: Propia.

A continuación, se extruyen los planos de las líneas curvas generadas. Primero del perfil:



**Ilustración 1.11** Plano extruido del perfil de la curva inferior de la ventana. Fuente: Propia.

En segundo lugar, de la línea de la planta:



**Ilustración 1.12** Plano extruido de la planta de la curva inferior de la ventana. Fuente: Propia.

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

Se genera la línea intersección entre los dos planos:

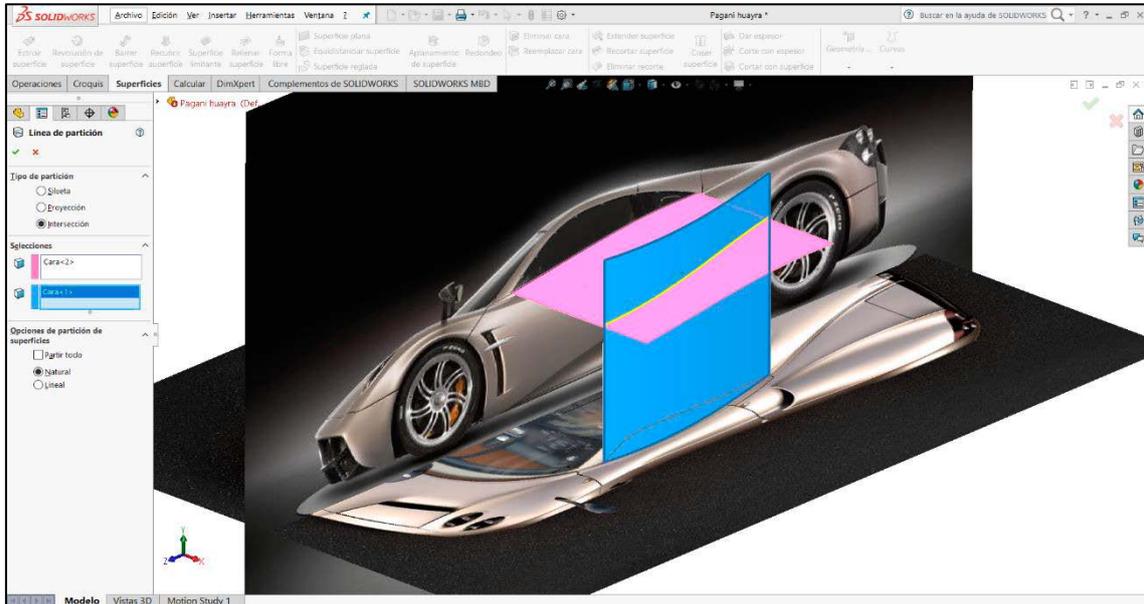


Ilustración 1.13 Intersección de planos para la generación de la curva inferior de la ventana.  
Fuente: Propia.

Se genera la superficie de la ventana lateral del coche:

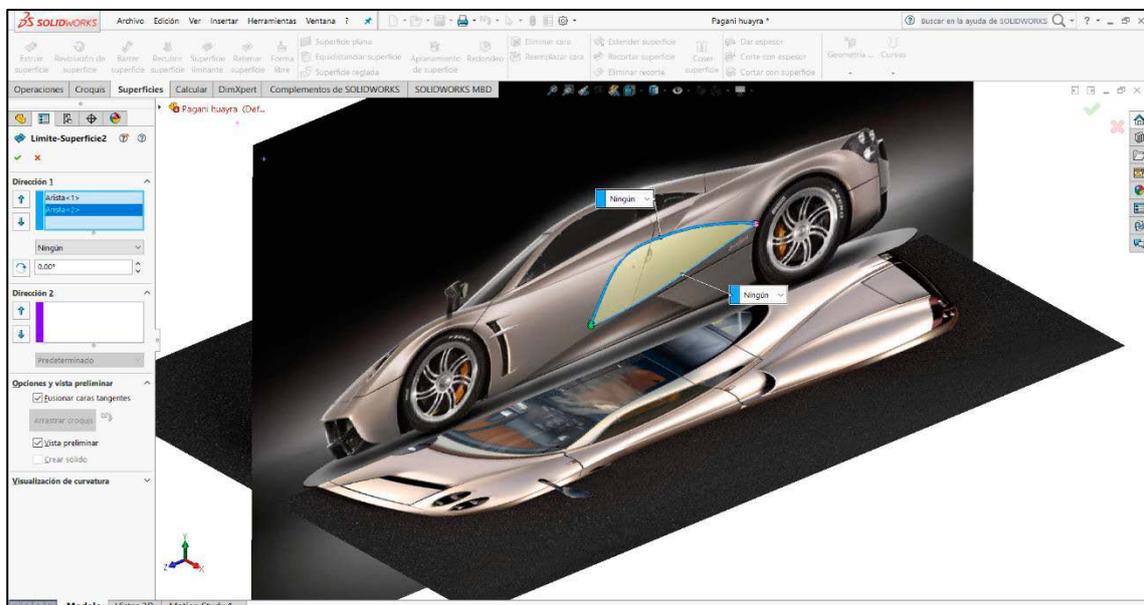


Ilustración 1.14 Generación del plano de la ventana lateral del vehículo. Fuente: Propia.

### 1.5.2 Croquis obtenidos:

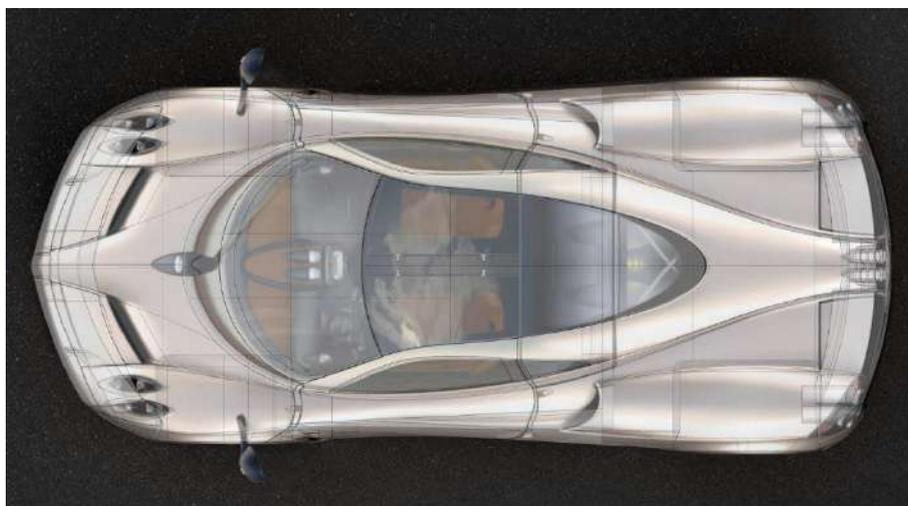
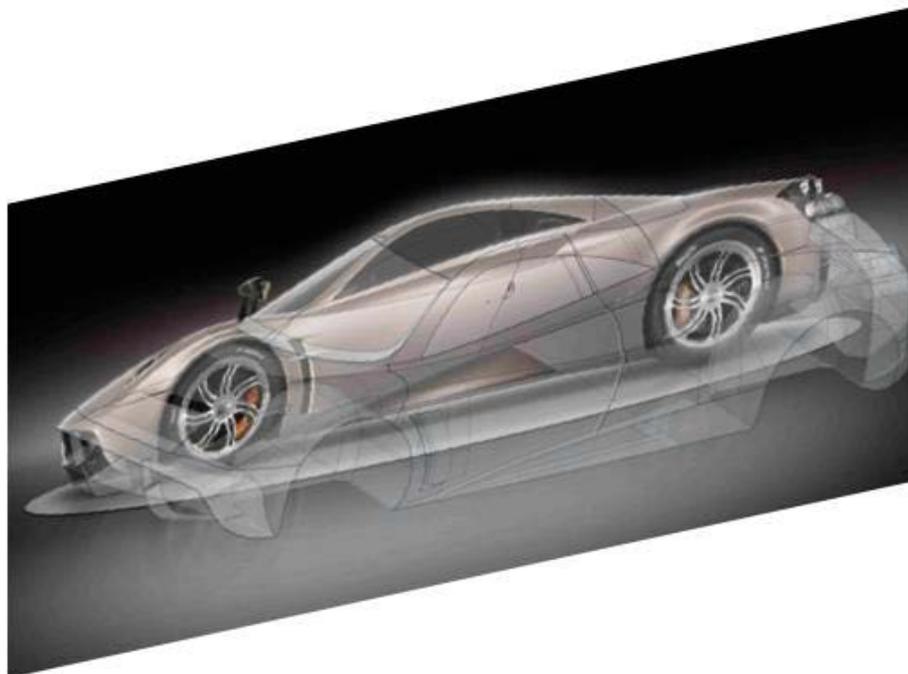
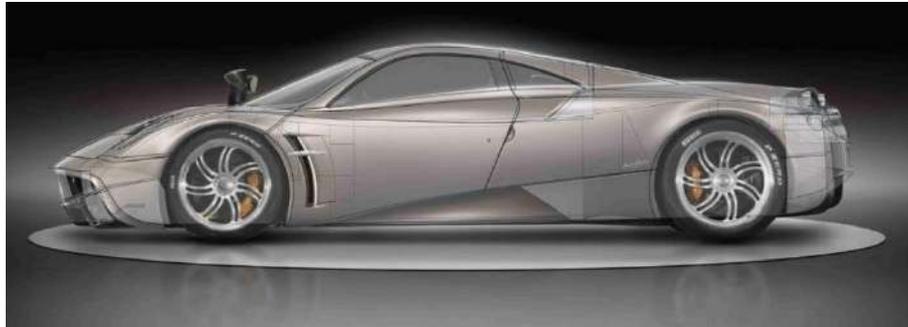
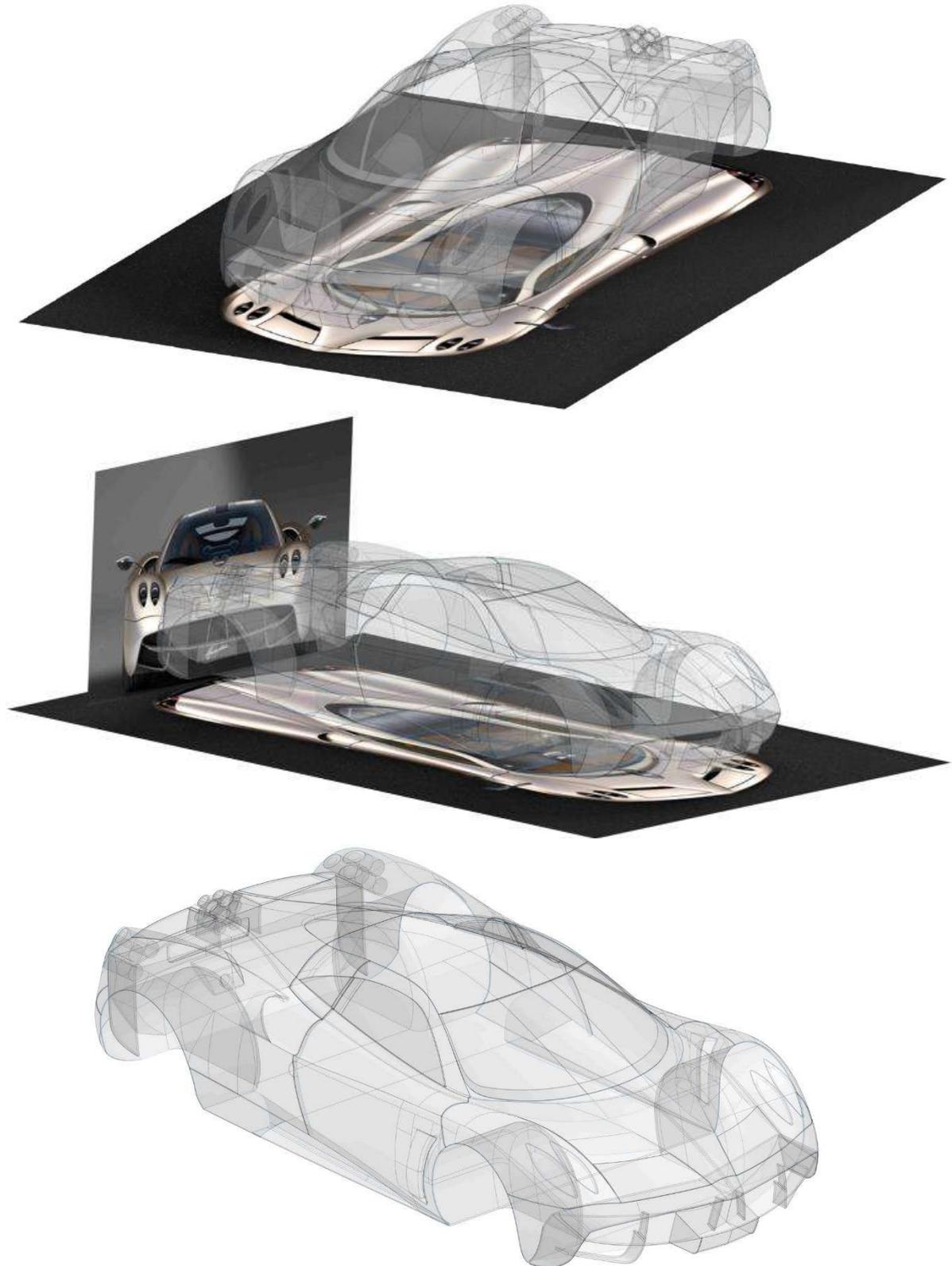


Ilustración 1.15 Croquis del perfil y la planta del Pagani Huayra. Fuente: Propia.

**1.5.3 Resultados obtenidos:**



**Ilustración 1.16** Imágenes del resultado obtenido del cadenado del Pagani Huayra. Fuente: Propia.

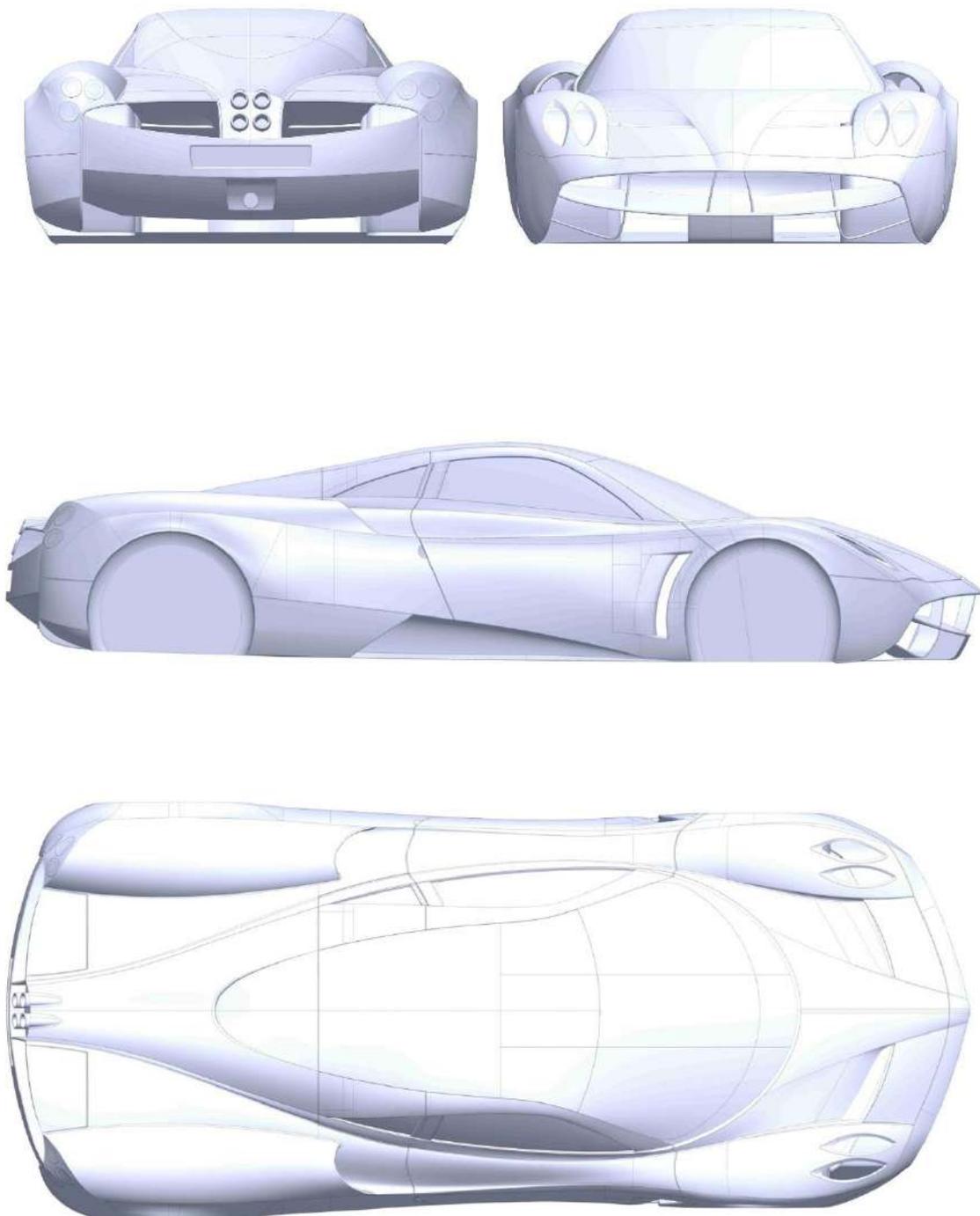


Ilustración 1.17 Alzado delantero y trasero, perfil y planta del Pagani Huayra. Fuente: Propia.

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

---

Se muestran las siguientes imágenes tridimensionales de la geometría del carenado del Pagani Huayra:

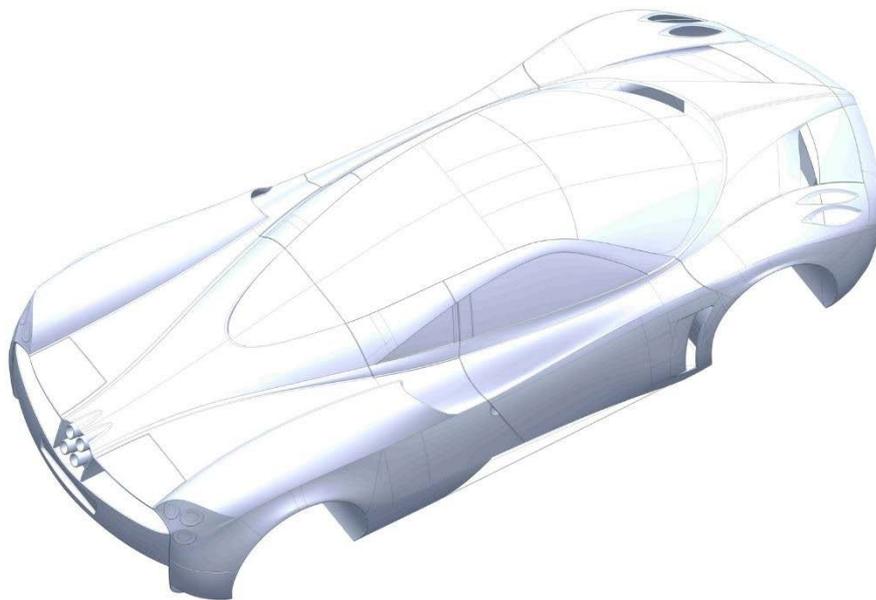
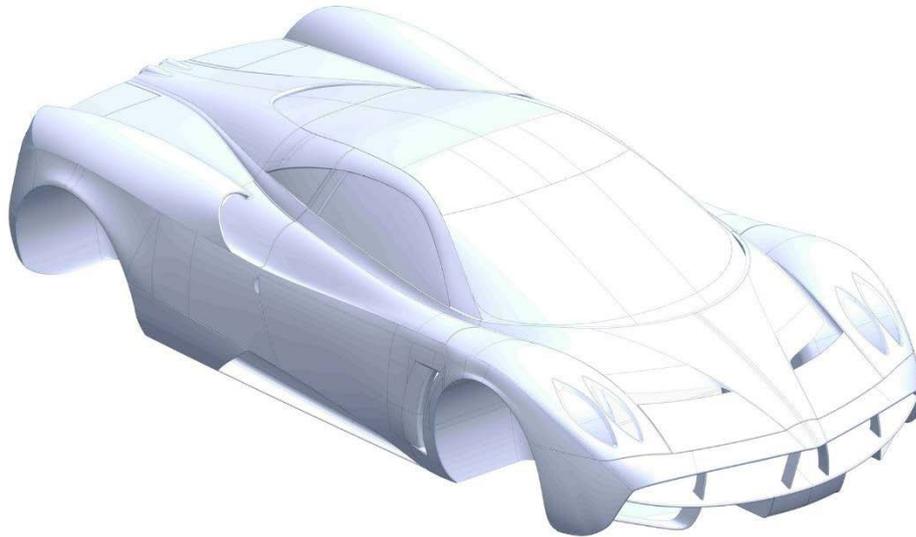


Ilustración 1.18 Imágenes tridimensionales del cadenado del Pagani Huayra. Fuente: Propia.



## 1.6 Geometría 2D

Para simplificar los cálculos se ha decidido tomar una geometría en dos dimensiones, tomando una imagen bidimensional del perfil aerodinámico del modelo. Esta representación es más asequible su resolución.

En esta sección se ha trabajado de la misma manera que en el anterior apartado, pero en este caso es mucho más sencillo su elaboración, ya que a partir de una sola fotografía del perfil se puede obtener el contorno de la carrocería del vehículo.

Se generan los diferentes “splines” (curvas) del contorno de la geometría, para una vez elaborado el perfil del vehículo proceder al estudio y realización del diseño del alerón.

Para ello, se van a plantear diferentes posibilidades geométricas, montadas sobre la base del monoplaza elegido, con diferentes tamaños, posiciones y ángulos de orientación.

Estas geometrías generadas del contorno del automóvil se importarán al programa Ansys para proceder a realizar la simulación de cada caso.

La intención es realizar una serie de comparaciones, colocando el alerón en diferentes posiciones propuestas. Se analizará los resultados para obtener cuál es la disposición más práctica y rentable del alerón respecto del vehículo.

### 1.6.1 Diferentes propuestas de alerón (flap)

Se ha realizado diferentes configuraciones tanto de dimensiones, como de posiciones; buscando la geometría más eficiente aerodinámica en posición de reposo y en su posición de actuación.

En ocasiones, las simulaciones revelaban posibles mejoras, tras una simulación previa se ha optado por el alerón de menor tamaño, el cual describe y presenta unas mejores prestaciones que intentan mejorar el diseño y rendimiento del vehículo.

Con este modelo dimensionado de alerón se han barajado tres posiciones respecto del coche, estudiando desde la posición más alejada a la más cercana del borde trasero.

Alerón grande:



Ilustración 1.19 Diseño de alerón grande. Fuente: Propia.

Alerón pequeño:



Ilustración 1.20 Diseño de alerón pequeño. Fuente: Propia.

### 1.6.2 Diseños con el alerón en diferentes posiciones

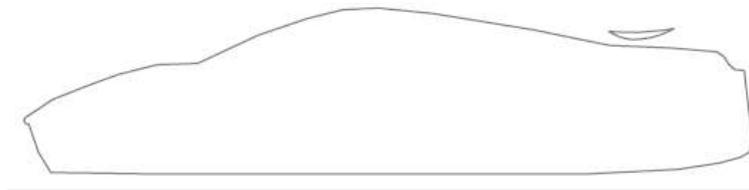
Tal y como se ha citado anteriormente, para percibir cómo afecta el diseño del alerón en la aerodinámica del vehículo, se han propuesto tres posiciones respecto del vehículo.

La primera posición es aquella donde el alerón se ubica más alejado del borde trasero del automóvil. Después se ha propuesto una situación intermedia. Y finalmente se ha colocado en la zona más extrema, donde el alerón se sitúa al borde de la carrocería.

A su vez, en las distintas posiciones descritas, se han establecido variaciones en los ángulos, de tal manera nos indique cual es la inclinación para que el flujo del aire proporcione la mayor carga aerodinámica.

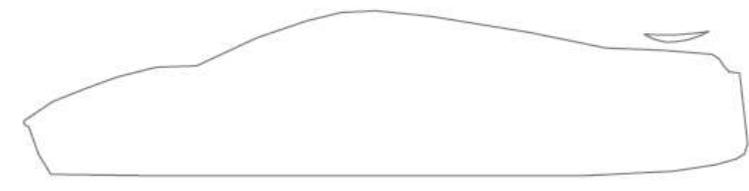
En las siguientes imágenes, se pueden visualizar las distintas posiciones a estudiar:

Posición-1:



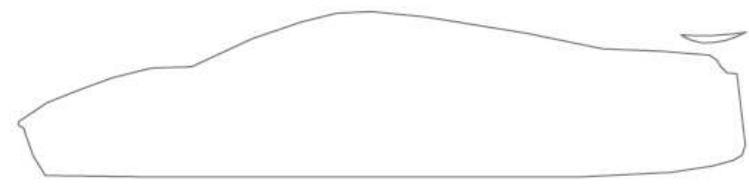
**Ilustración 1.21 Posición-1. Fuente: Propia.**

Posición-2:



**Ilustración 1.22 Posición-2. Fuente: Propia.**

Posición-3:



**Ilustración 1.23 Posición-3. Fuente: Propia.**

**Posición-1:**

Ángulo=0°

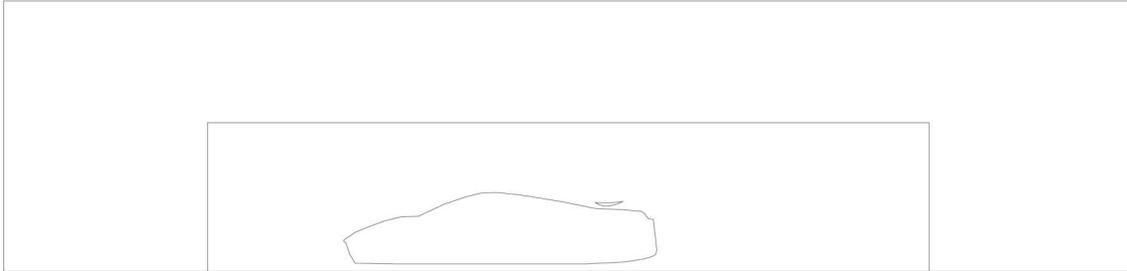


Ilustración 1.24 Posición-1. Ángulo 0°. Fuente: Propia.

Ángulo=10°

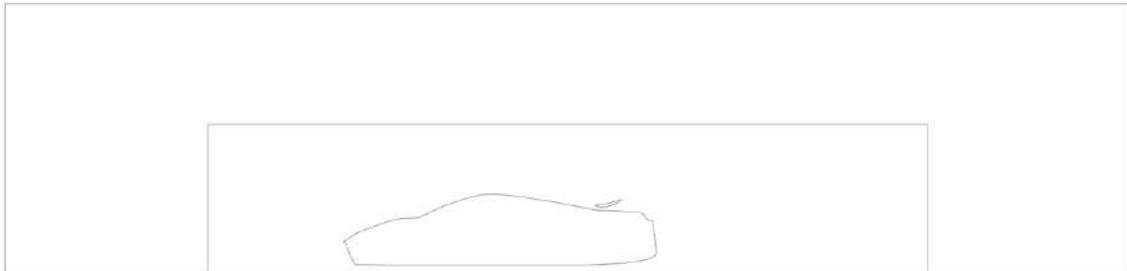


Ilustración 1.25 Posición-1. Ángulo 10°. Fuente: Propia.

Ángulo=20°

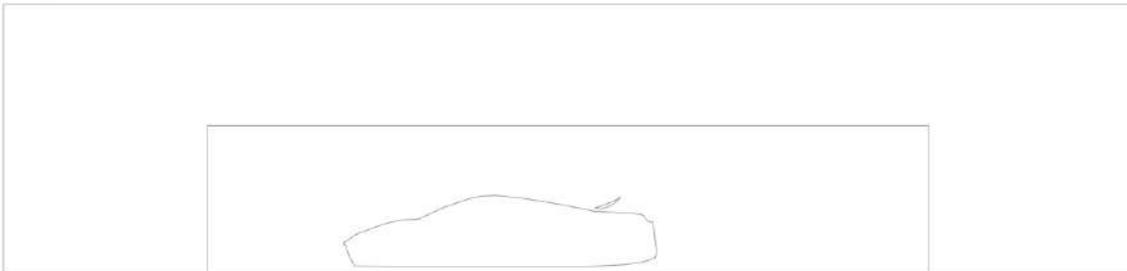


Ilustración 1.26 Posición-1. Ángulo 20°. Fuente: Propia.

Ángulo=30°

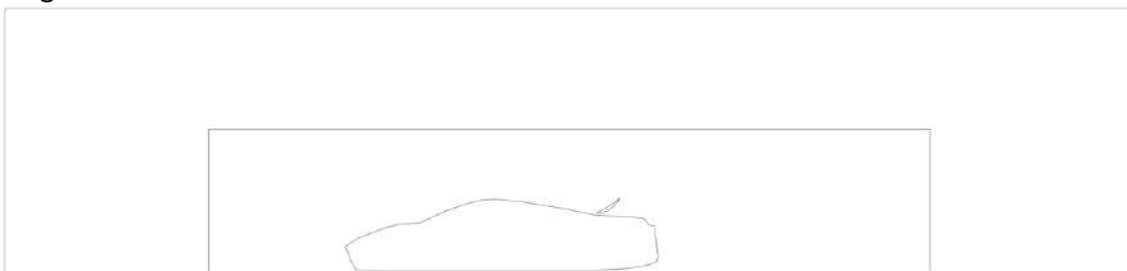


Ilustración 1.27 Posición-1. Ángulo 30°. Fuente: Propia.

**Posición-2:**

Ángulo=0°

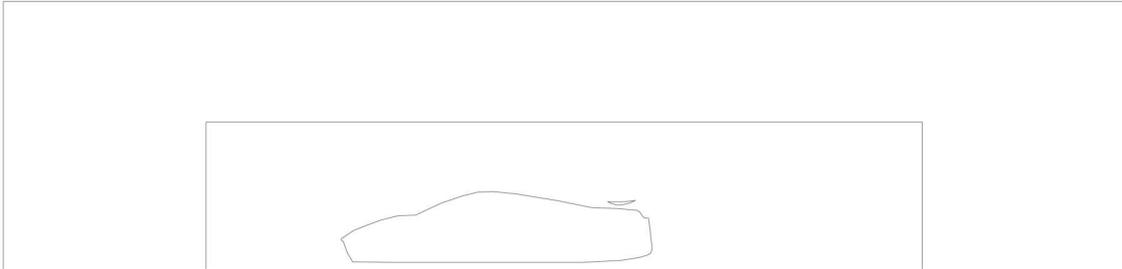


Ilustración 1.28 Posición-2. Ángulo 0°. Fuente: Propia.

Ángulo=10°



Ilustración 1.29 Posición-2. Ángulo 10°. Fuente: Propia.

Ángulo=20°

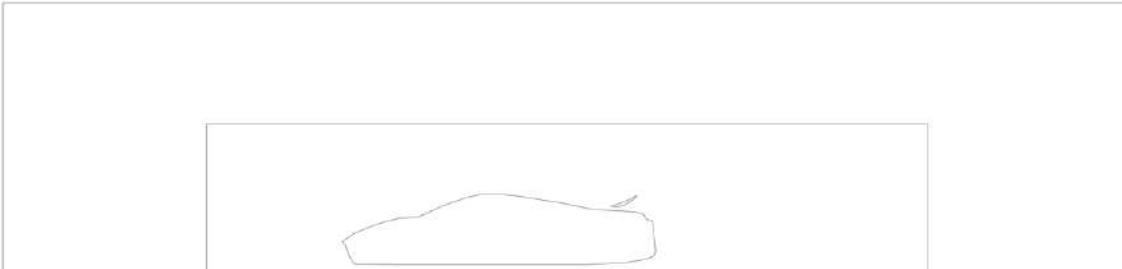


Ilustración 1.30 Posición-2. Ángulo 20°. Fuente: Propia.

Ángulo=30°

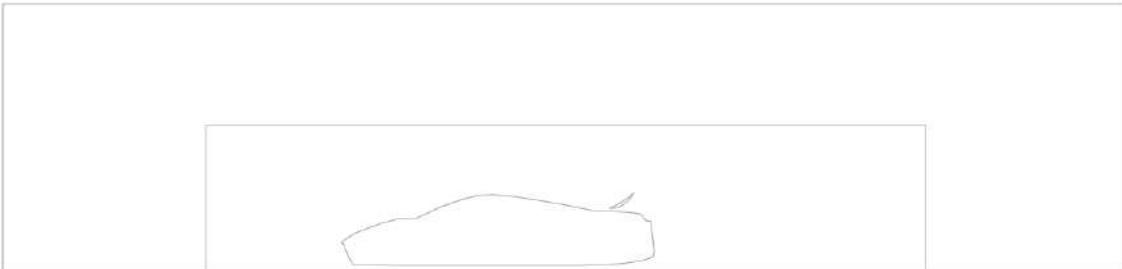


Ilustración 1.31 Posición-2. Ángulo 30°. Fuente: Propia.

**Posición-3:**

Ángulo=0°

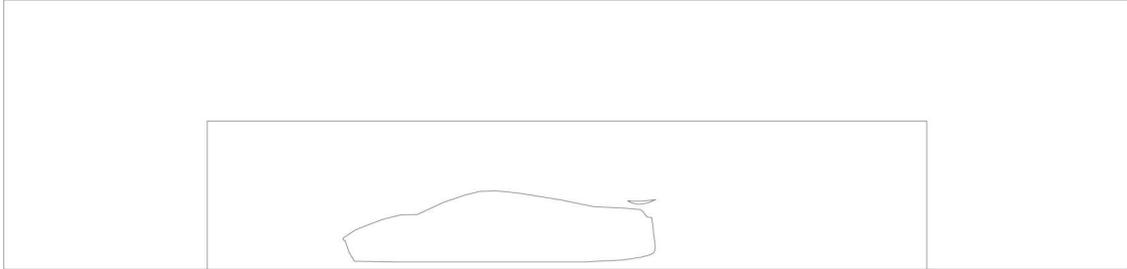


Ilustración 1.32 Posición-3. Ángulo 0°. Fuente: Propia.

Ángulo=10°

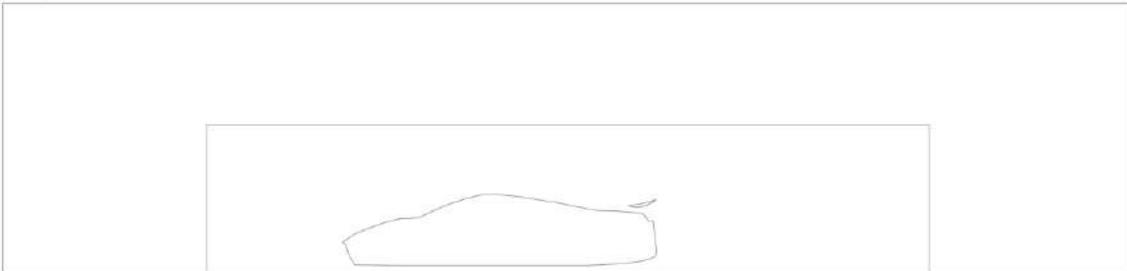


Ilustración 1.33 Posición-3. Ángulo 10°. Fuente: Propia.

Ángulo=20°

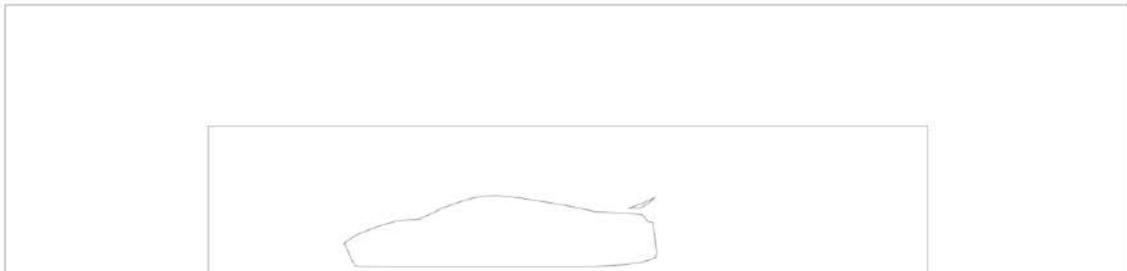


Ilustración 1.34 Posición-3. Ángulo 20°. Fuente: Propia.

Ángulo=30°

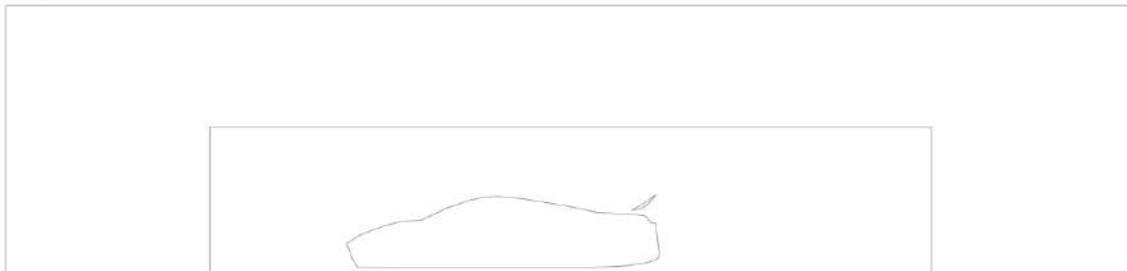


Ilustración 1.35 Posición-3. Ángulo 30°. Fuente: Propia.



## 2 Simulación

La simulación de la dinámica de fluidos computacional (CFD, Computational fluid dynamics), permite observar la interacción del fluido sobre el contorno del prototipo. Esta analítica de la aerodinámica se realiza mediante cálculos numéricos de elementos finitos. Admite rehacer modificaciones en el modelo anticipadamente a su fabricación, logrando ahorrar elevados costes de producción.

Esta herramienta es muy útil, pero una vez resuelto el análisis de dicho software, se complementa y se verifica en el túnel de viento, unas instalaciones más complejas, que requiere de un modelo material para efectuar el ensayo, tanto que se haya fabricado a escala o a tamaño real.

Se utilizan diversas técnicas para visualizar el paso del flujo alrededor de la superficie y compararlo con los datos teóricos, pero además se realizan varios ensayos en la pista para optimizar.

### 2.1 Herramienta utilizada

La herramienta utilizada para simular la dinámica del fluido por elementos finitos es el programa más utilizado en la industria, por su precisión y potencia de cálculo.

Los requerimientos de computación de dicho programa son muy elevados, cuando el número de elementos y nodos de la malla aumentan considerablemente.

### 2.2 Simulación dinámica

Para comprobar el efecto de la activación de dicho alerón en una situación real, se ha procedido a analizar la dinámica de la actuación de dicho alerón. En este caso se ha optado por la ubicación del flap en la primera posición, es decir, la más alejada del borde de la carrocería. Esta simulación dinámica engloba los cuatro casos con diferentes ángulos ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  y  $30^\circ$ ), de la simulación estática en la posición 1, que más adelante se describirá.

Se ha impuesto para la simulación una potencia constante al actuador hidráulico del mecanismo de apertura del alerón. Existen cilindros hidráulicos que poseen la capacidad de actuar en milésimas de segundos, dotando al automóvil la particularidad, de que el alerón se coloque en la posición deseada; mediante una centralita se analizará las necesidades de agarre del vehículo y en función de diferentes variables se determinará el ángulo óptimo.

### 2.2.1 Geometría

Se han generado las diferentes superficies de control mediante el comando “ENCLOSURE”, organizando las superficies con las siguientes disposiciones: mallado exterior, mallado interior, vehículo y alerón.

Mediante el comando “BOOLEAN” se ha procedido a eliminar la superficie interior del vehículo y del alerón. Una vez concebidas individualmente, todas superficies se unificarán como un sólo conjunto, que facilitará el trabajo al realizar la simulación.

De esta manera, se consigue las tres superficies que representan el fluido aire alrededor del automóvil.

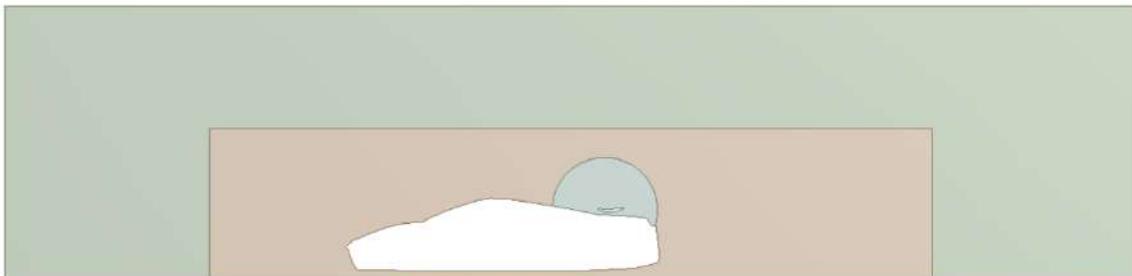


Ilustración 2.1 Geometría para la simulación dinámica. Fuente: Propia.

Se procede a denominar cada una de las regiones y líneas de contorno:

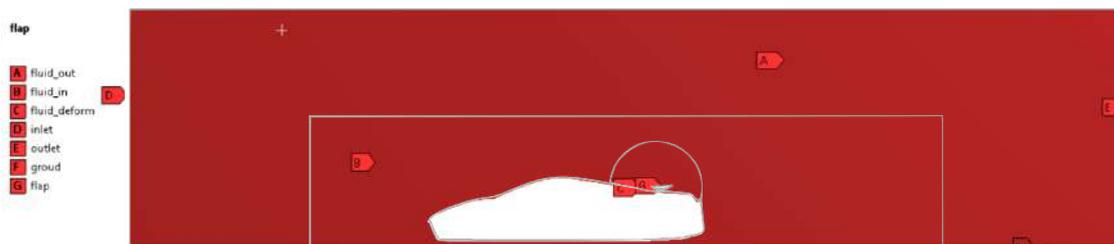


Ilustración 2.2 Denominación de las superficies y líneas de la geometría. Fuente: Propia.

Se pueden diferenciar tres regiones del fluido denominada “fluid\_out”, “fluid\_in” y “fluid\_deform”.

## 2.2.2 Mallado

Se ha tratado con gran calidad, para establecer un minucioso refinado en el tamaño de la malla que representa el fluido aire al igual que en el caso anterior, de la simulación estática. La única diferencia es que existe una tercera región.

Una vez conforme con el tipo de malla, se puede apreciar que, según el análisis aerodinámico, el mallado más fino es el más próximo al alerón, coincidente con la tercera región de este caso.

Para realizar esto, se han realizado los siguientes pasos:

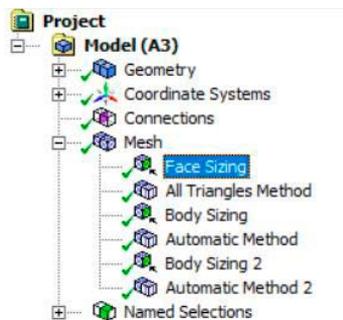


Ilustración 2.3 Árbol de las operaciones del mallado. Fuente: Propia.

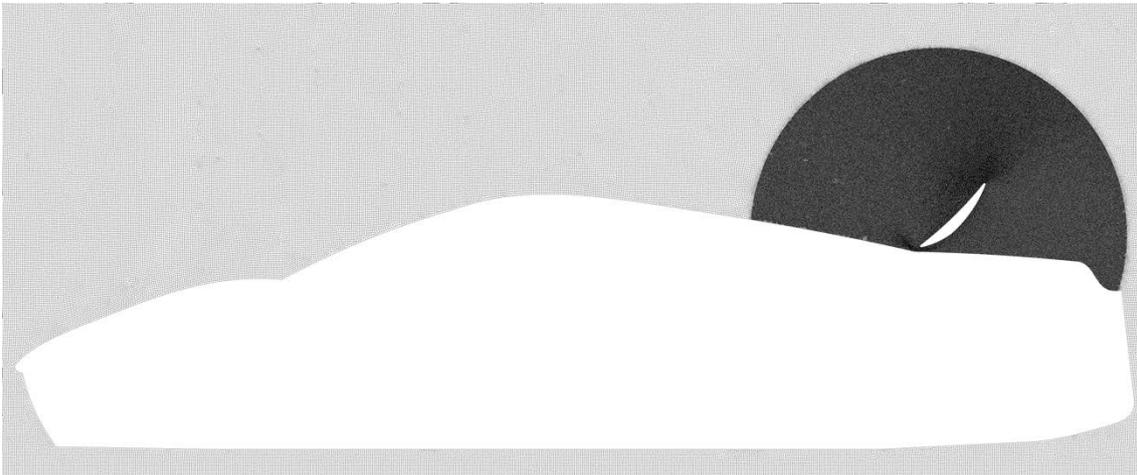
- 1.- Se ha mallado la región más cercana al alerón, ésta va a ser deformable con un tamaño de elemento de 3 mm.
- 2.- En esta malla deformable, a través del comando “ALL TRIANGLES METHOD”, se ha generado una mallado con todos los elementos en forma triangular, pues como se ha mencionado ya en apartados anteriores, en esta zona de turbulencias, este tipo de celda mejora la calidad.
- 3.- Mediante “BODY SIZING” se ha refinado la malla intermedia entre la región deformable y la zona exterior, con un tamaño de celda de 4 mm.
- 4.- Se ha empleado el comando “AUTOMATIC METHOD”, para diseñar la malla intermedia, cuyos nodos adquieren una geometría de cuadriláteros, también llamados “quad”, para un flujo más homogéneo.
- 5.- Para el diseño de la malla exterior, se ha usado “BODY SIZING” con un tamaño de celda de 10 mm.
- 6.- También para la creación de la malla exterior se ha utilizado el comando “AUTOMATIC METHOD”, dando elementos de forma cuadrada.

En las siguientes imágenes, se puede apreciar los diferentes tipos de mallados descritos anteriormente:



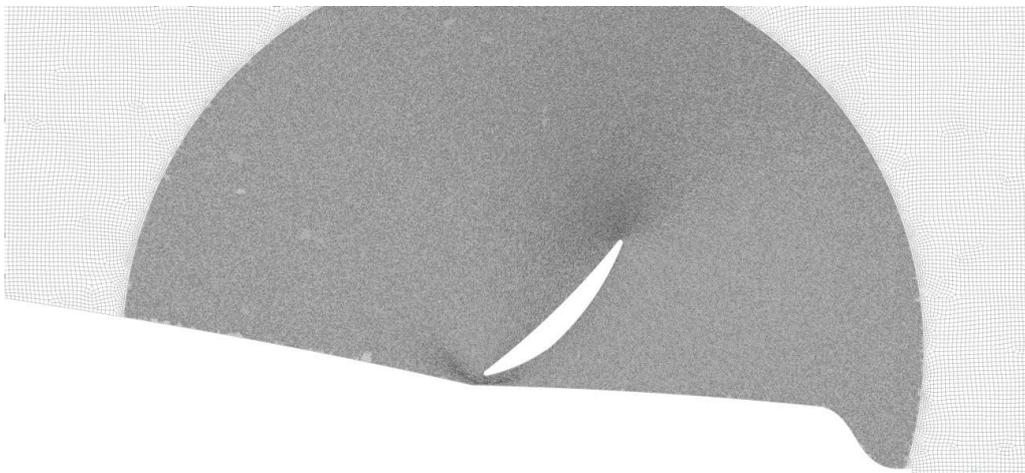
**Ilustración 2.4. Vista general del mallado. Fuente: Propia.**

Destaca la zona más próxima al alerón, siendo un mallado de máximo refinamiento y calidad.



**Ilustración 2.5 Vista en detalle del mallado alrededor del automóvil. Fuente: Propia.**

Se puede apreciar con detalle, la diferencia del reticulado de mallas, siendo la zona deformable triangular y la exterior cuadrada.



**Ilustración 2.6 Vista en detalle del mallado alrededor del alerón. Fuente: Propia.**

### 2.2.3 Calidad del mallado

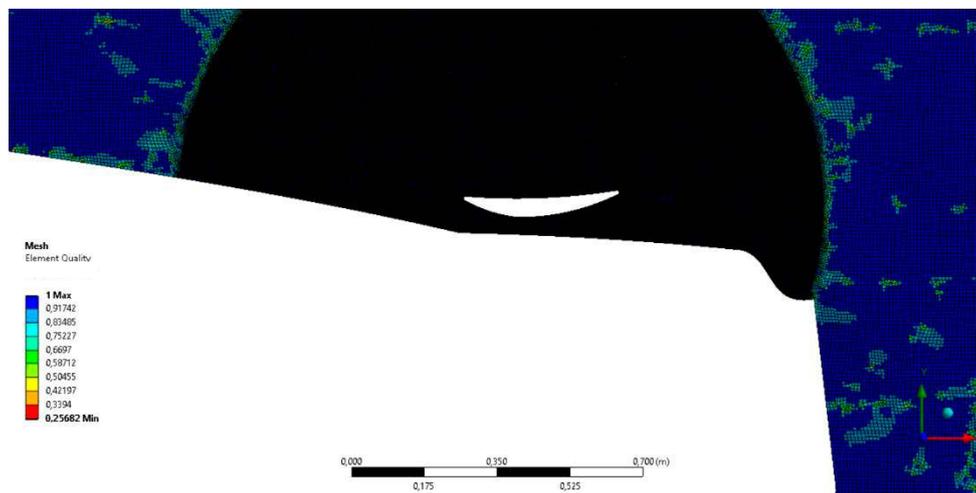
La calidad del mallado en la zona más cercana al alerón móvil en estudio, es de máxima calidad, puesto que en esta zona deformable se genera un flujo turbulento.



**Ilustración 2.7** Calidad del mallado para simulación dinámica. Fuente: Propia.

En la siguiente imagen de detalle, no se plasma correctamente el color, debido al mallado tan sumamente fino, pero la zona que rodea el flap es de color azul intenso, que en la ilustración parece negro, teniendo la malla una óptima calidad.

Son calculadas las propiedades físicas del fluido, en cada uno de los nodos de la malla y entre ellos se promedia el resultado, por lo tanto, reducir su tamaño, genera una disminución de la distancia y esto deduce que, la interpolación entre los nodos sea buena, desencadenando en un resultado más exacto.



**Ilustración 2.8** Vista en detalle de la calidad del mallado para simulación dinámica. Fuente: Propia.

<b>Datos estadísticos del mallado</b>	
Número de nodos	859,661
Número de elementos	977,499
Elementos peores	982 (0.10046 %)
Mala ortogonalidad	0.739258

**Tabla 2.1** Datos estadísticos del mallado en la simulación dinámica. Fuente: Propia.

## 2.2.4 Configuración

En esta simulación se configura un régimen transitorio, ya que el alerón varía de orientación en función del tiempo.

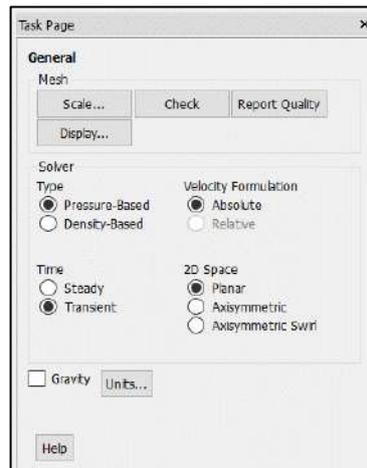


Ilustración 2.9 Configuración del régimen transitorio. Fuente: Propia.

El modelo de turbulencia escogido es el k-epsilon, los valores predeterminados, siendo éste el más usual.

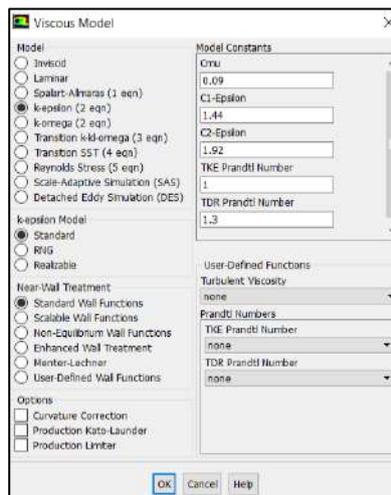


Ilustración 2.10. Configuración del modelo de turbulencia. Fuente: Propia.

En esta configuración se detallan los datos de las condiciones de contorno de la entrada y salida del fluido, que son los mismos parámetros descritos en la simulación estática. La velocidad de entrada es de 50 m/s (180 km/h) y la presión de salida es nula.

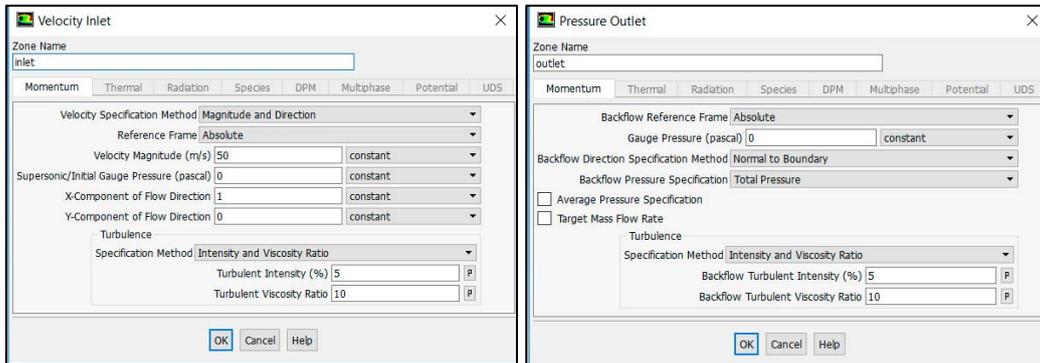


Ilustración 2.11 Configuración de las condiciones de contorno de la entrada y salida. Fuente: Propia.

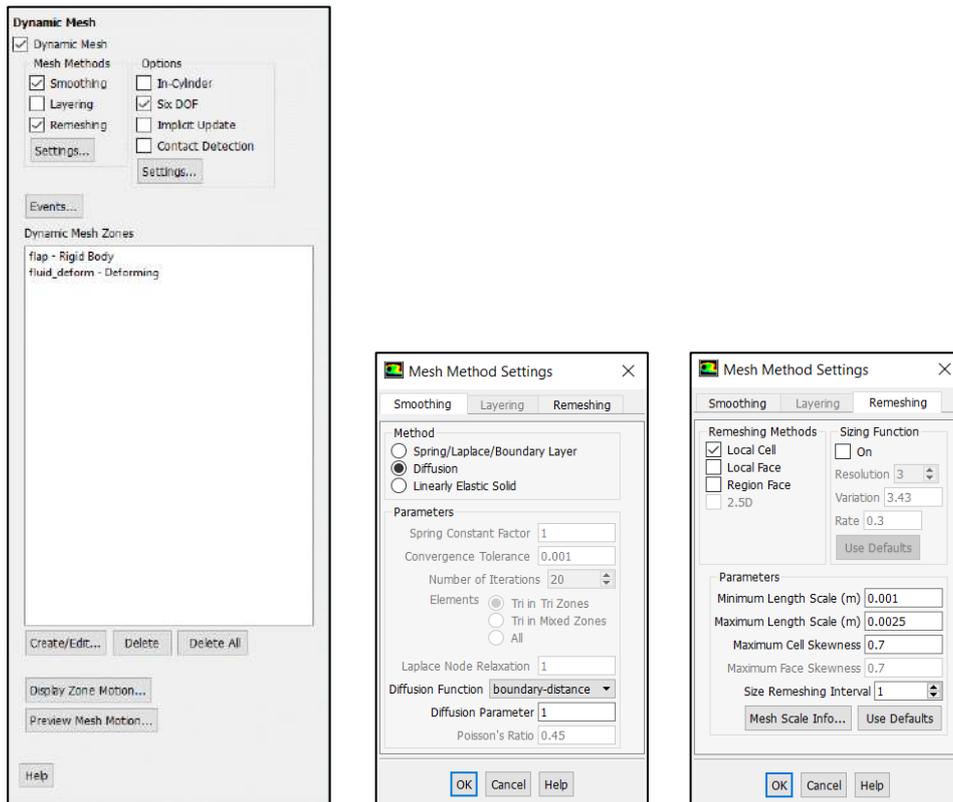
Se programa el siguiente código para generar el giro del alerón, dejando libre para el movimiento de rotación el eje z.

```
1 #include "udf.h"
2 #include "math.h"
3
4
5 DEFINE_SDOF_PROPERTIES(Valve_6dof, prop, dt, time, dtime)
6 {
7     prop[SDOF_MASS] = 4;
8     prop[SDOF_IZZ] = 1.332e-3;
9     prop[SDOF_ZERO_TRANS_X] = TRUE;
10    prop[SDOF_ZERO_TRANS_Y] = TRUE;
11    prop[SDOF_ZERO_TRANS_Z] = TRUE;
12    prop[SDOF_ZERO_ROT_X] = TRUE;
13    prop[SDOF_ZERO_ROT_Y] = TRUE;
14    prop[SDOF_ZERO_ROT_Z] = FALSE;
15    prop[SDOF_LOAD_M_Z] = 200;
16 }
17
```

Ilustración 2.12 Configuración del movimiento de rotación. Fuente: Propia.

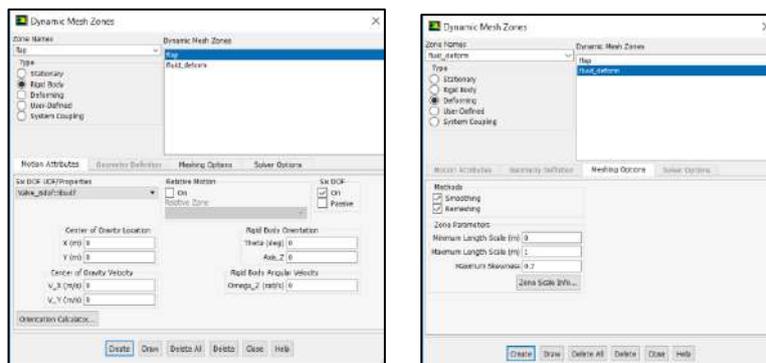
En las siguientes imágenes se muestra la configuración de una malla dinámica, introduciendo la orden de que el alerón sea un sólido rígido en movimiento, y que la malla que lo rodea, sea deformable, como se ha relatado anteriormente.

Los parámetros que se exponen a continuación han sido fruto de diferentes iteraciones hasta llegar a lograr una malla dinámica funcional, la cual posee la cualidad de generarse automáticamente, en cada intervalo de la resolución.



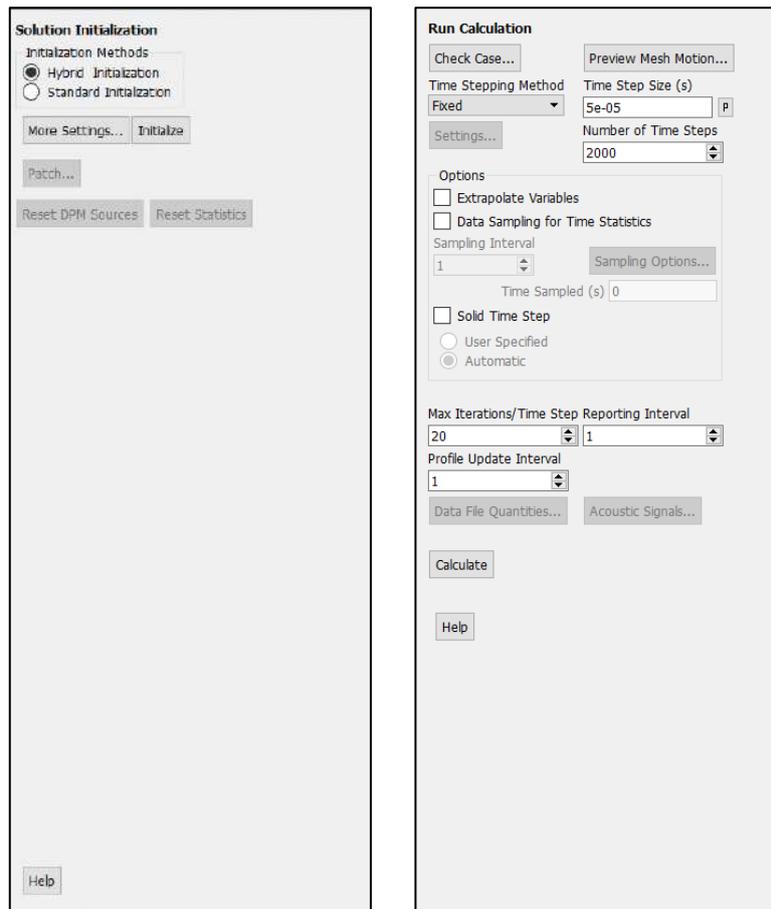
**Ilustración 2.13 Configuración de la malla dinámica. Fuente: Propia.**

Se ha vinculado la geometría del alerón (flap) con la función programada que organiza el movimiento. De tal manera, que se reciben las órdenes para crear un movimiento de rotación con un par dinámico constante.



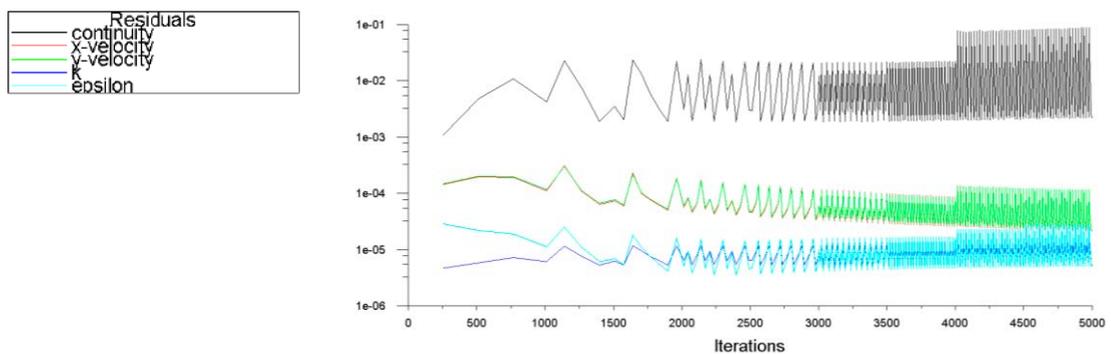
**Ilustración 2.14 Configuración de la geometría en movimiento. Fuente: Propia.**

En la tabla de la izquierda se representa una inicialización híbrida de todas las variables, ya que la resolución al problema es más compleja. En la tabla de la derecha se muestra la configuración para el proceso del cálculo, mostrando el número de iteraciones, el tiempo de cada paso y el máximo número de iteraciones por cada paso.



**Ilustración 2.15 Configuración de la inicialización y el cálculo. Fuente: Propia.**

### Residuos



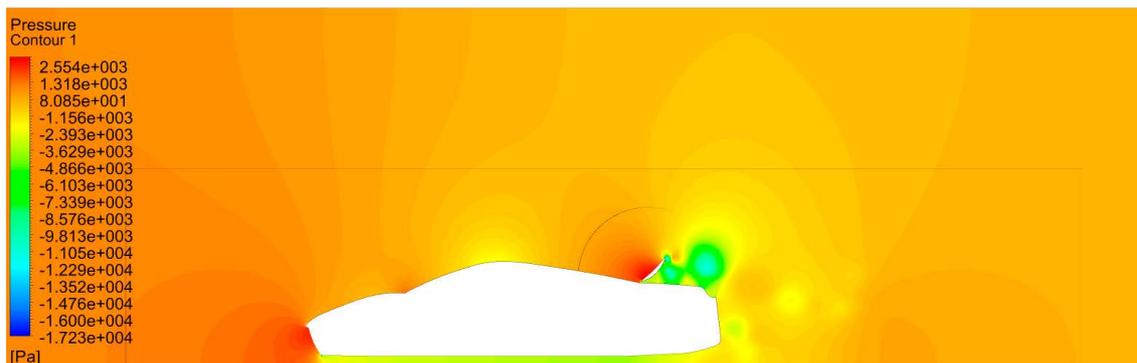
**Ilustración 2.16 Evolución de los residuos durante la simulación. Fuente: Propia.**

## 2.2.5 Resultados obtenidos

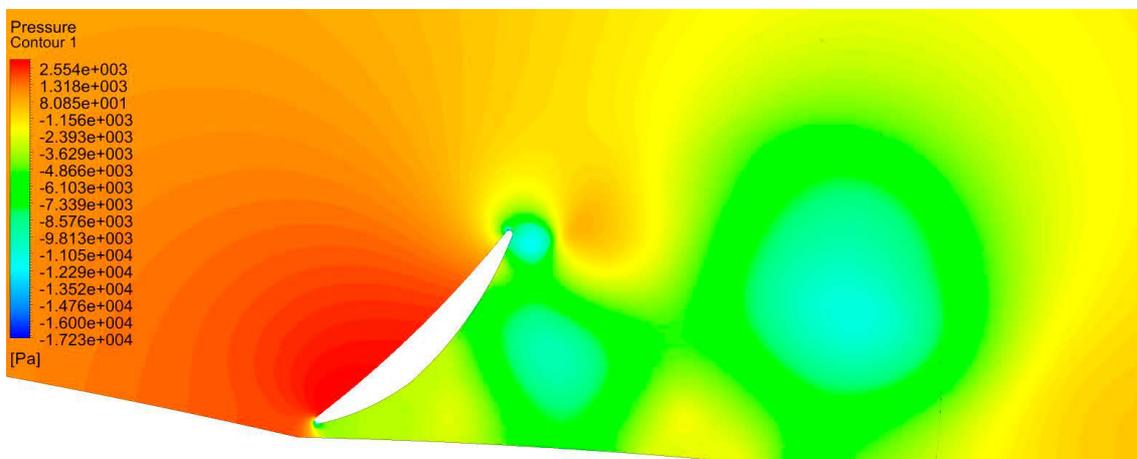
### 2.2.5.1 Presión

En la siguiente imagen se muestra el mapa con la disposición de presiones según va recorriendo el flujo del aire alrededor del vehículo.

En este fotograma se percibe un área de elevada presión en la zona delantera del automóvil y en la parte superior del alerón en su posición más elevada. Sin embargo, en la zona trasera del alerón se observa una disminución de la presión. Tal y como se ha comentado anteriormente, esta diferencia de presiones provoca diversas fuerzas aerodinámicas, ya sean de resistencia como de sustentación. Siendo la primera negativa en nuestro caso, porque resta potencia al motor mientras que, la de sustentación aumenta el agarre del vehículo en situaciones deseadas como de frenada o al trazar las curvas.



Se muestra a detalle la representación anterior, pero en esta imagen se visualiza con mejor calidad las diferentes presiones alrededor del alerón móvil.



### 2.2.5.2 Velocidad

En la imagen se comprueba con bastante claridad, que la estela que deja el automóvil, es de color azul oscuro, lo cual describe velocidad nula del fluido. El alerón en su posición más alta, ofrece una mayor resistencia al aire, mientras y en la parte posterior, el paso del flujo deja unas ciertas turbulencias.

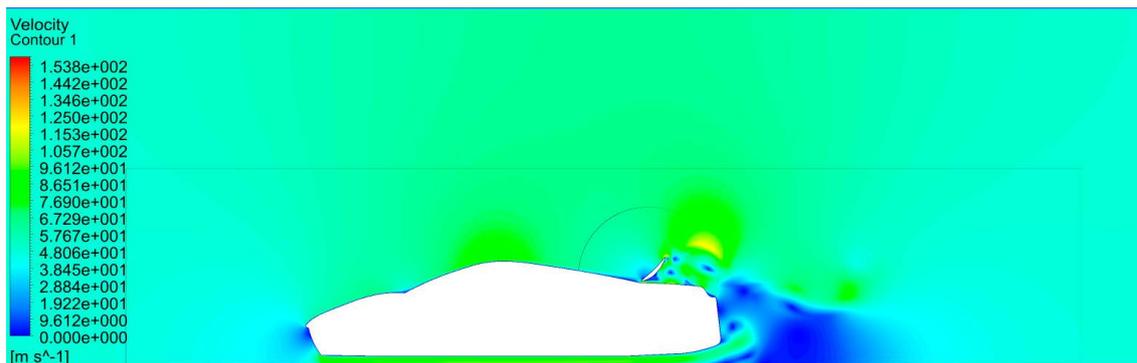


Ilustración 2.19 Diagrama de velocidades. Fuente: Propia.

En esta vista a detalle, se visualizan los puntos azul oscuro, que son las zonas donde se ubica el centro del vórtice.

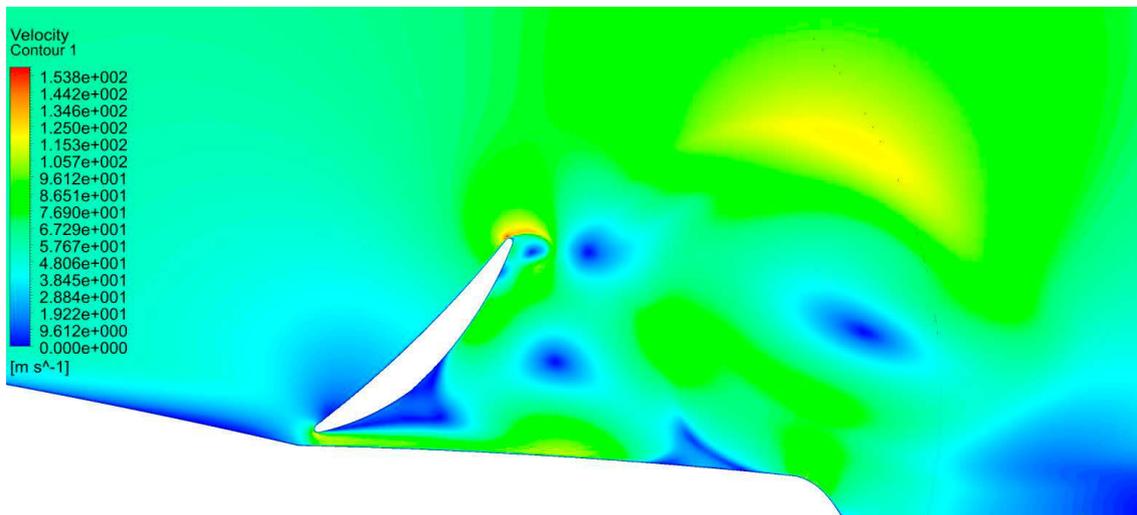


Ilustración 2.20 Vista en detalle del diagrama de velocidades. Fuente: Propia.

### 2.2.5.3 Flujo de velocidad

La imagen siguiente corresponde al mapa del flujo de velocidad, que expone la variación de la trayectoria del fluido cuando choca con el alerón, modificándose la dirección y su velocidad.

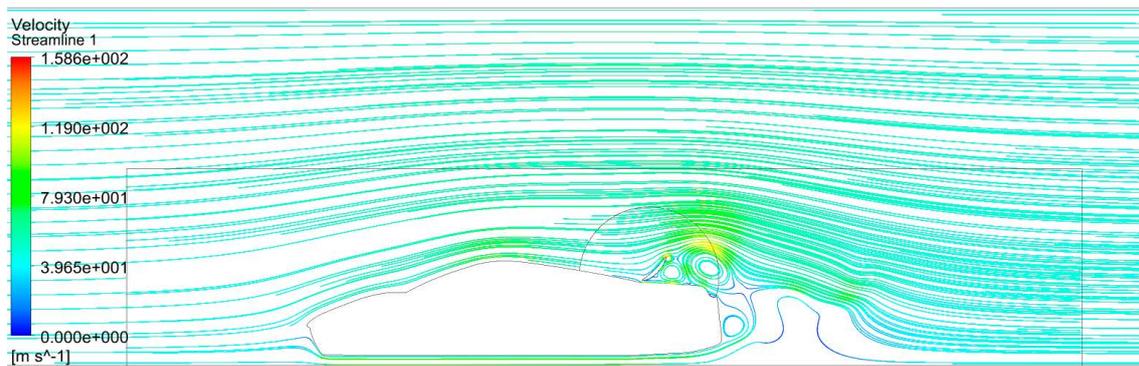


Ilustración 2.21 Diagrama del flujo de velocidad. Fuente: Propia.

En la vista de detalle, se comprueba con más exactitud, los remolinos o vórtices que se generan en la parte trasera del alerón. También se distinguen las disposiciones de las líneas del flujo, en ciertas zonas están más próximas, lo cual indica que aumenta la velocidad del fluido.

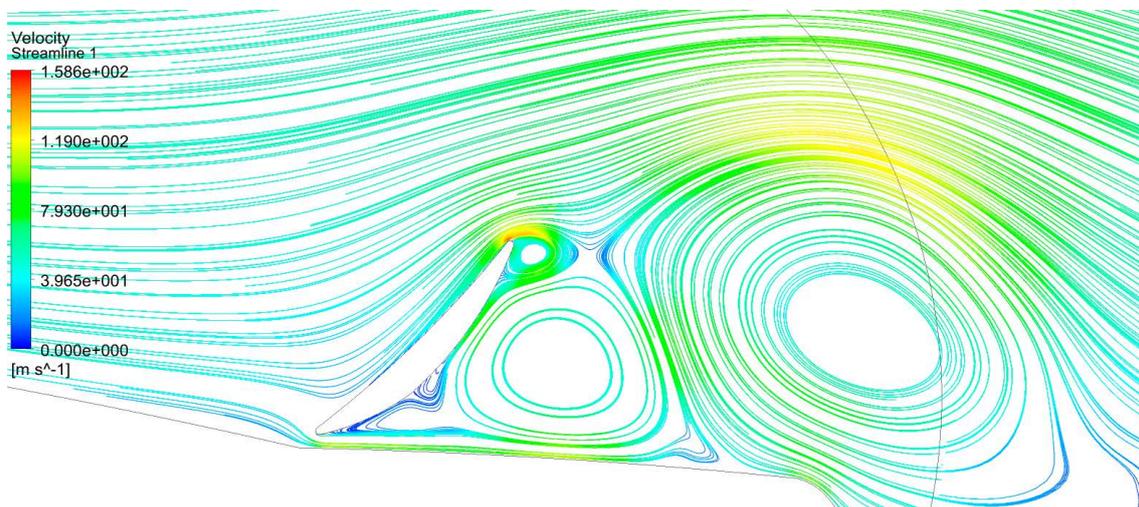


Ilustración 2.22 Vista en detalle del diagrama del flujo de velocidad. Fuente: Propia.

### 2.2.5.4 Turbulencia

En la imagen se visualiza turbulencias que se originan cuando el fluido mantiene un movimiento desordenado, esto se produce detrás del alerón, después de chocar con su superficie y pasar a un movimiento irregular donde el fluido cambia rápidamente su presión y velocidad, describiendo trayectorias sinuosas y formando torbellinos

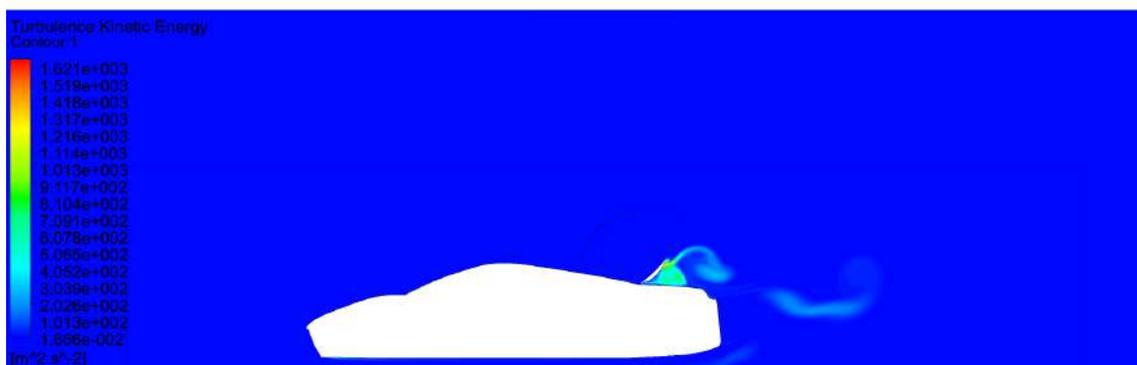


Ilustración 2.23 Diagrama de turbulencias. Fuente: Propia.

En la siguiente vista a detalle, se aprecia con mayor claridad, el cambio de dirección del flujo y el alto nivel de energía cinética generado por las turbulencias.

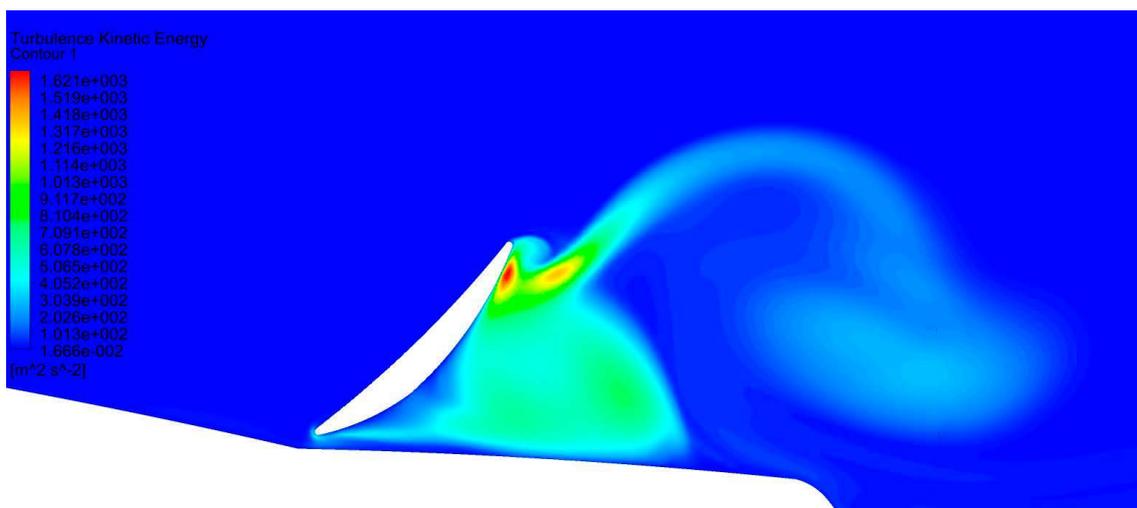


Ilustración 2.24 Vista en detalle del diagrama de turbulencias. Fuente: Propia.

## 2.3 Simulación estática

Con el diseño de la geometría del vehículo en CAD, se procede a realizar la simulación en CFD

Se ha simulado estáticamente la geometría del vehículo con las tres posiciones del alerón respecto del vehículo, anteriormente descritas. Y en cada situación, se han estudiado diferentes orientaciones del alerón con los siguientes ángulos ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ), a una velocidad de entrada de aire de 60 m/s (216 km/h).

Para recrear un comportamiento lo más parecido a la realidad, en la simulación se ha planteado un suelo que mantiene la misma velocidad que el vehículo, igual que en la mayoría de los túneles de viento que poseen unas cintas para simular el movimiento del vehículo respecto del suelo, pues es de vital importancia crear una semejanza a la realidad.

Posteriormente se mostrará a modo de resumen, todos los resultados de coeficientes aerodinámicos de cada uno de los casos, pero para centrarnos en una determinada situación, se ha elegido la tercera posición, donde el alerón se ubica más cerca del borde de la carrocería del vehículo, ya que se ha observado, es el punto donde se obtienen mejores resultados.

A continuación, se mostrará la geometría, mallado, procedimiento y resultados para el caso de la geometría del alerón, en la tercera posición, con un ángulo de orientación de  $30^\circ$  con una velocidad de entrada de 60 m/s (216 km/h).

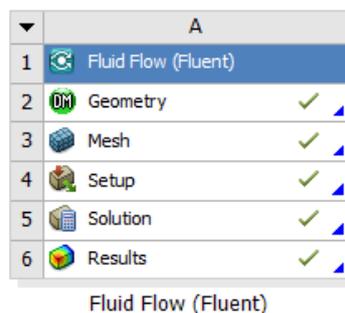
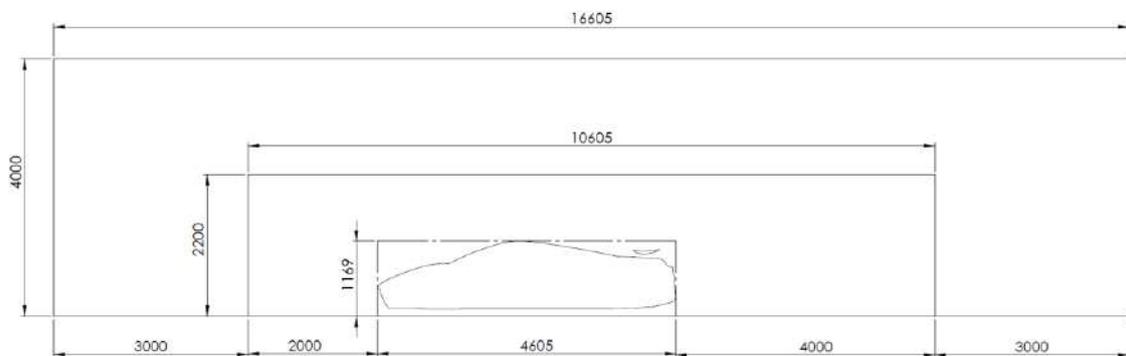


Ilustración 2.25 Árbol de operaciones de Ansys Fluid Flow (Fluent). Fuente: Propia

### 2.3.1 Geometría

En primer lugar, se ha realizado una geometría del vehículo, con el alerón colocado en la tercera posición elegida y con ángulo de orientación de  $30^\circ$ . Se ha utilizado Solidwork para generar el contorno de la geometría y después importarla a Ansys mediante el formato compatible .IGES, que únicamente, importa las líneas del contorno.

Se ha propuesto encerrar al automóvil en una malla dividida en dos partes. Una más alejada y otra malla más cercana. Sus dimensiones son las siguientes:



**Ilustración 2.26** Dimisiones de las regiones de las mallas. Fuente: Propia.

Para generar las líneas del contorno de esta simulación dinámica se ha utilizado el mismo programa de Solidwork e importadas a Ansys en formato .IGES. aplicando los mismos procedimientos del caso de simulación estática, se ha obtenido la siguiente geometría. La única diferencia es que se ha añadido una tercera región de malla que será deformable.



**Ilustración 2.27** Geometría de la simulación estática. Posición-3. Ángulo  $30^\circ$ . Fuente: Propia.

Las denominaciones de diferentes superficies y líneas de contorno son:

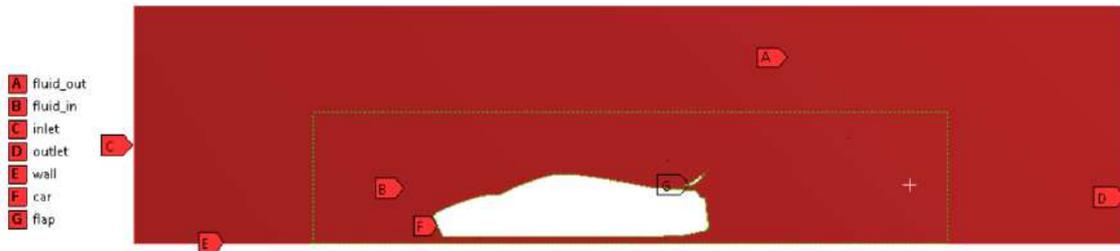


Ilustración 2.28 Denominación de las diferentes partes. Fuente: Propia.

### 2.3.2 Mallado

El mallado es uno de los pasos más relevantes en el proceso de la simulación, puesto que, es una representación discretizada del modelo, para obtener unos resultados más semejantes a la realidad. Tras realizar varias pruebas de mallado, se ha buscado un tipo de malla muy fina, precisa y refinada, donde el número de nodos y elementos sea muy elevado.

Se ha creado dos mallas independientes, una interior y otra exterior. Los pasos que se han ejecutado para llegar al diseño de esta malla de gran calidad, han sido los siguientes:

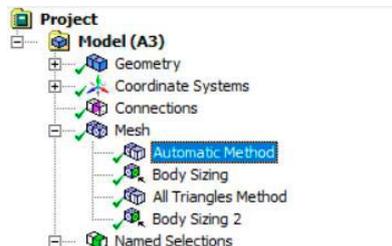


Ilustración 2.29 Árbol de las operaciones del mallado. Fuente: Propia.

1.- Se ha utilizado el comando “AUTOMATIC METHOD”, para establecer una malla exterior, en la cual predominen elementos iguales con forma cuadrilateral, puesto que en esta zona el fluido es más laminar y lineal.

2.- Después mediante “BODY SIZING” se ha refinado la malla exterior, con un tamaño de celda de 10 mm.

3.- En la malla interior, a través del comando “ALL TRIANGLES METHOD”, se ha generado una malla con todos los elementos en forma triangular, también denominados “tria”, debido a que en esta zona el flujo de aire es más turbulento y aleatorio, por lo que es más conveniente esta forma de celda.

4.-Por último, con el comando “BODY SIZING” se ha refinado la malla interior, con un tamaño de celda de 5 mm.

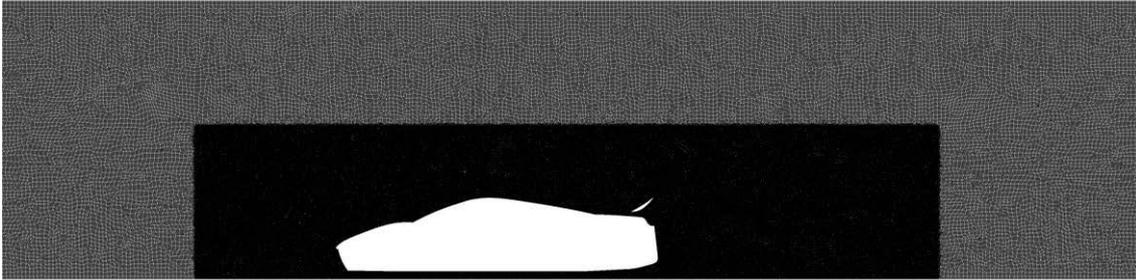


Ilustración 2.30 Vista general del mallado. Fuente: Propia.

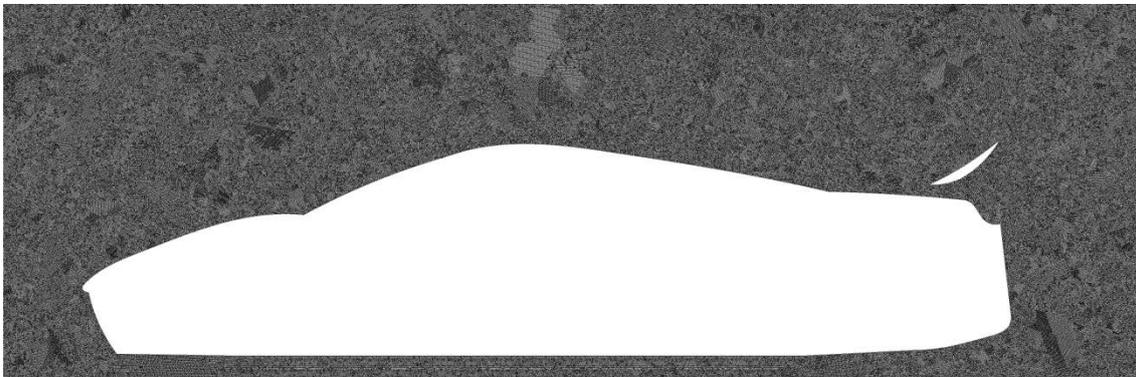


Ilustración 2.31 Vista en detalle del mallado alrededor del automóvil. Fuente: Propia.

En la ilustración de la izquierda, se advierte el tipo de malla con una estructura más refinada, alrededor del alerón. Mientras que en la otra imagen se percibe la diferencia del tipo y tamaño de la malla exterior cuadrada y más gruesa, con la interior más fina y triangular.

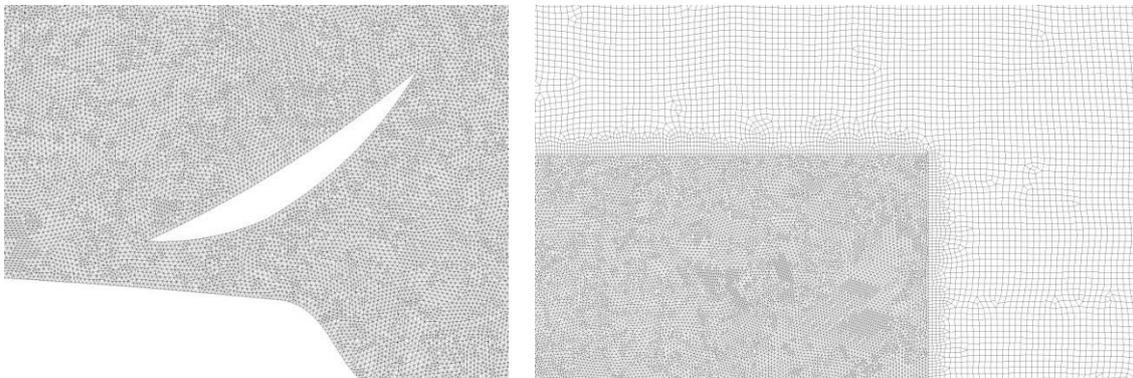


Ilustración 2.32 Vista en detalle del mallado alrededor del alerón y diferencias entre mallas. Fuente: Propia.

### 2.3.3 Calidad del mallado

Se ha apreciado que la malla triangular a lo largo de nuestro cuerpo en estudio, es uniforme, con un número de nodos elevados, lo cual implica una buena resolución.

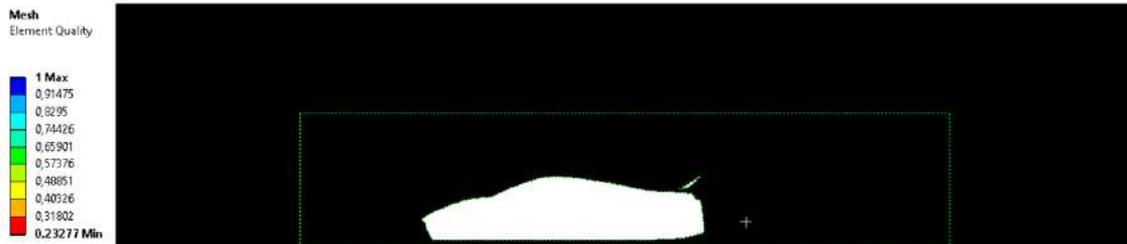


Ilustración 2.33 Calidad del mallado para simulación estática. Fuente: Propia.

En la siguiente imagen, se puede distinguir como en el mallado que se distribuye alrededor del alerón, predomina el color azul oscuro, característica de calidad máxima en los elementos del mallado.

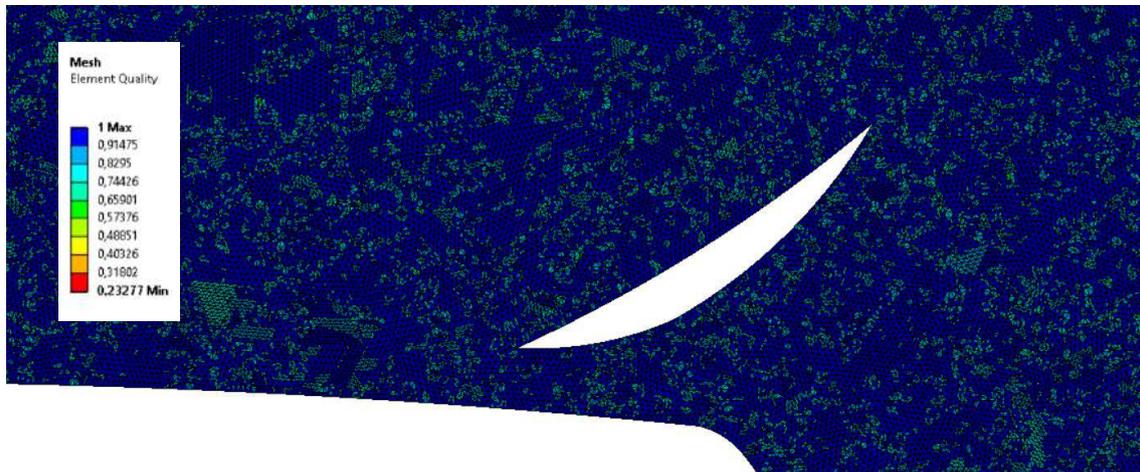


Ilustración 2.34 Vista en detalle de la calidad del mallado para simulación estática. Fuente: Propia.

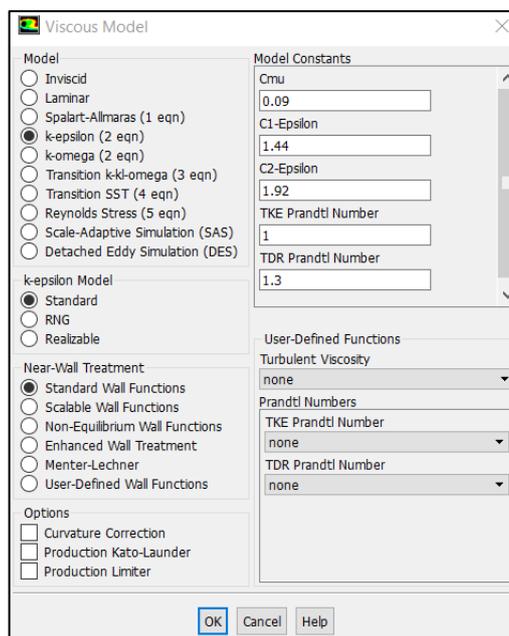
Datos estadísticos del mallado	
Número de nodos	1,266,641
Número de elementos	2,077,763
Elementos peores	2,084 (0.1003 %)
Mala ortogonalidad	0.443359

Tabla 2.2 Datos estadísticos del mallado en la simulación estática. Fuente: Propia.

### 2.3.4 Configuración:

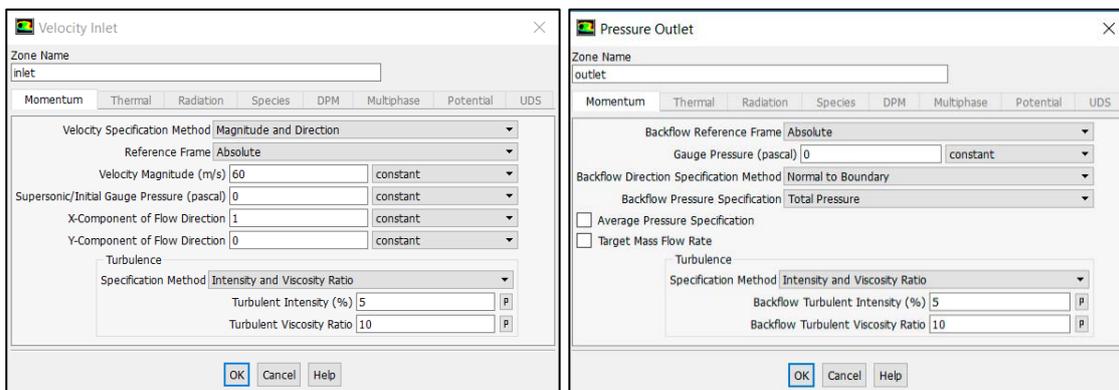
En esta sección, se realiza la configuración de las diferentes variables del modelo de simulación. Se ha escogido un régimen estacionario, ya que el modelo físico no varía en función del tiempo.

En la siguiente tabla se muestra el modelo de turbulencia escogido, k-epsilon con los valores predeterminados, siendo el más usual en el mundo de la simulación para la automoción.



**Ilustración 2.35 Configuración del modelo de turbulencia. Fuente: Propia.**

En la siguiente tabla se muestra la configuración de las condiciones de contorno que rodean al sistema físico. Se ha especificado con una entrada de aire a velocidad 60 m/s y una salida a una presión relativa nula, que corresponde a la presión atmosférica.



**Ilustración 2.36 Configuración de las condiciones de contorno de la entrada y salida. Fuente: Propia.**

Se introducen unos valores de presión, temperatura y viscosidad dinámica del fluido aire estándar.

Para que la simulación sea lo más semejante a la realidad, se ha supuesto la hipótesis de mantener el suelo en movimiento relativo respecto al modelo, a la misma velocidad de la entrada del fluido aire a 60 m/s.

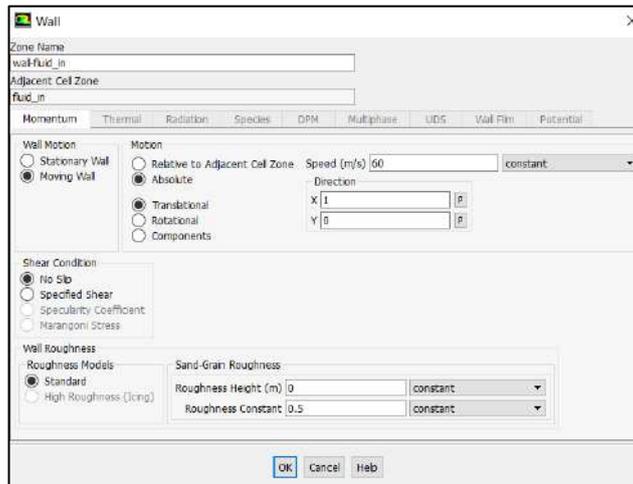


Ilustración 2.37 Configuración de las condiciones de contorno del suelo. Fuente: Propia.

En las siguientes imágenes se muestra la configuración para monitorizar los diferentes coeficientes aerodinámicos. Se ha modelado la actuación de las fuerzas aerodinámicas de sustentación y arrastre, tanto en el caso de del alerón como en el conjunto completo (alerón más vehículo). De tal manera que, en los resultados obtenidos se valorará el porcentaje de actuación y en qué proporción beneficia el rendimiento del vehículo.

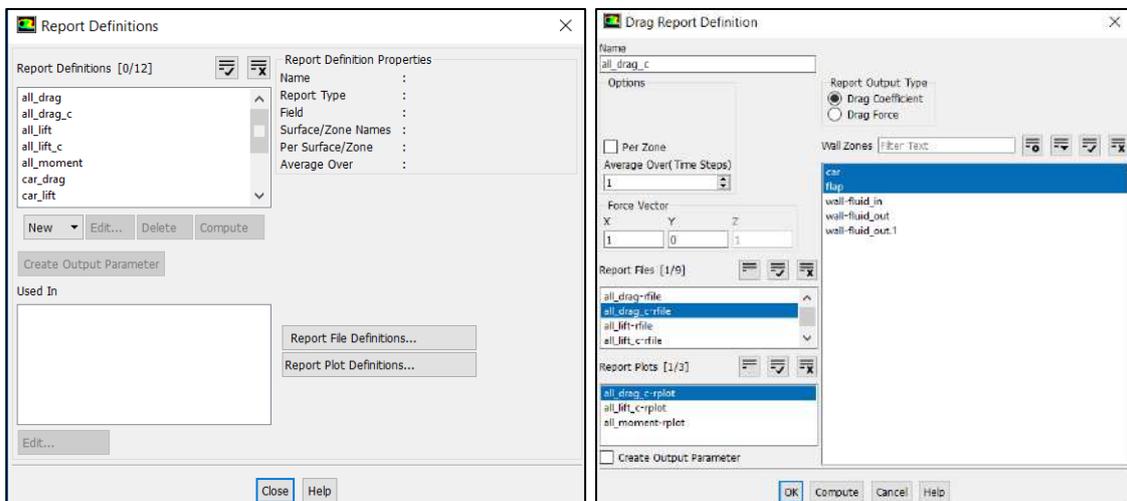


Ilustración 2.38 Configuración de la monitorización de los coeficientes aerodinámicos. Fuente: Propia.

A continuación, la tabla de la izquierda, muestra cómo se establece la inicialización de todas las variables en cada zona, partiendo para su cálculo de un valor nulo. Mientras que, la tabla de la derecha nos configura, el proceso de cálculo, estableciendo el número de iteraciones, el tiempo de cada paso y el valor máximo de iteraciones por cada paso.

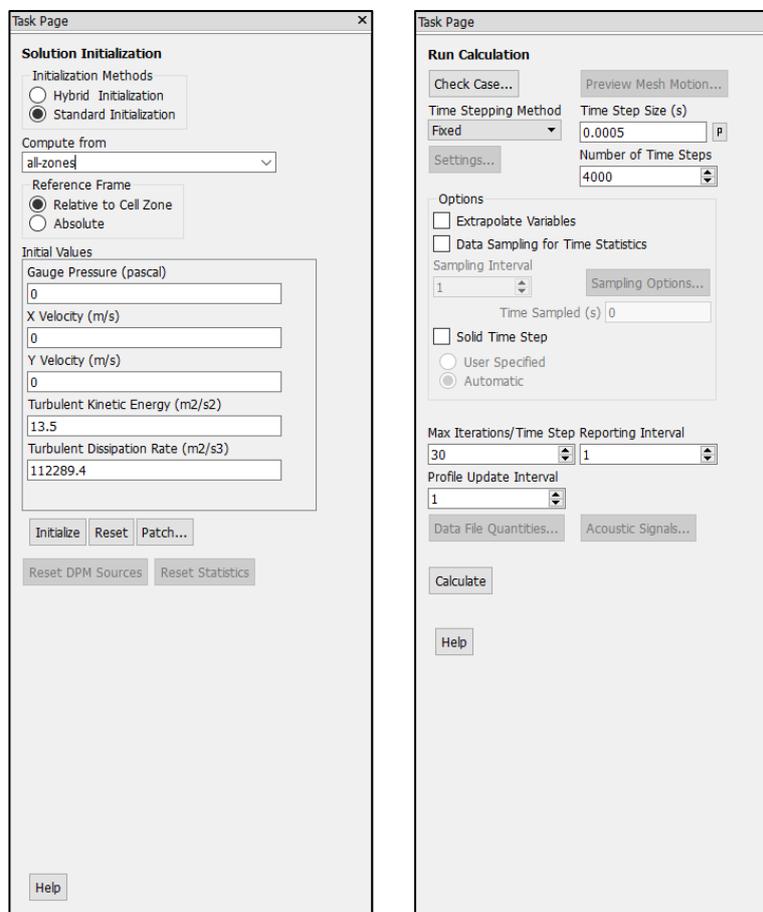


Ilustración 2.39 Configuración de la inicialización y el cálculo. Fuente: Propia.

## 2.3.5 Resultados obtenidos

### 2.3.5.1 Presión

Según estos resultados obtenidos se puede observar diferentes zonas que corresponden a distintos valores de presión del fluido aire, alrededor del cuerpo a medida que el aire avanza sobre la superficie del sólido.

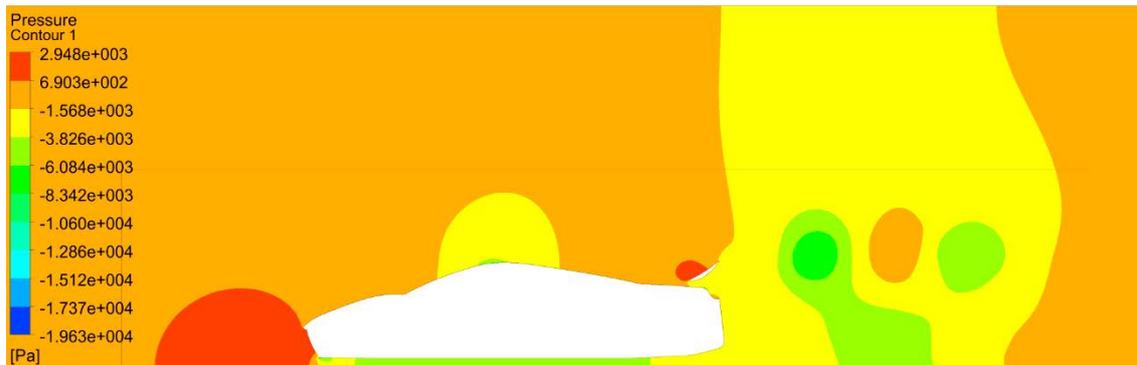


Ilustración 2.40 Diagrama de presiones. Fuente: Propia.

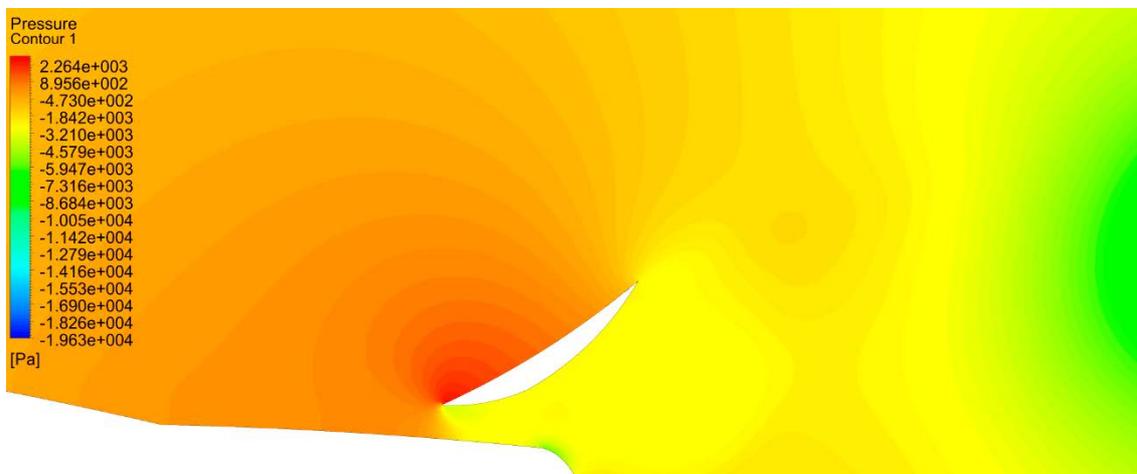


Ilustración 2.41 Vista en detalle del diagrama de presiones. Fuente: Propia.

En el fotograma se muestra regiones naranjas en la zona superior del alerón, que nos indica una elevada presión, mientras que por debajo del alerón se refleja una zona de color amarillo donde el flujo pasa a menor presión. Esta diferencia de presiones genera fuerzas aerodinámicas, la presión más alta en la parte frontal que en la trasera, supone una desventaja en contra del avance del vehículo, pero también se manifiesta una fuerza de sustentación, que refuerza el agarre del coche con el pavimento.

### 2.3.5.2 Velocidad

En los siguientes gráficos se muestran las turbulencias que se originan cuando la posición del alerón se establece en un ángulo de 30°. En el fotograma se aprecia una zona de color verde, donde el flujo del aire se manifiesta a una velocidad más o menos cercana a 60 m/s, similar a la impuesta en la de entrada del fluido.

Por otra parte, se observa una estela de color azul que deja el vehículo, esto quiere decir que, la velocidad del aire es próxima al valor nulo. Pero en la gráfica se muestra pequeñas zonas de color amarillo, que significan elevadas velocidades.

Se puede definir que en la zona de color azul el flujo de aire es irregular con rotación en espiral, creando unos vórtices y cuyo centro se localiza en los puntos de color azul más oscuro, mientras que en las regiones amarillas el flujo es lineal y son las más alejadas del vórtice con elevadas velocidades.

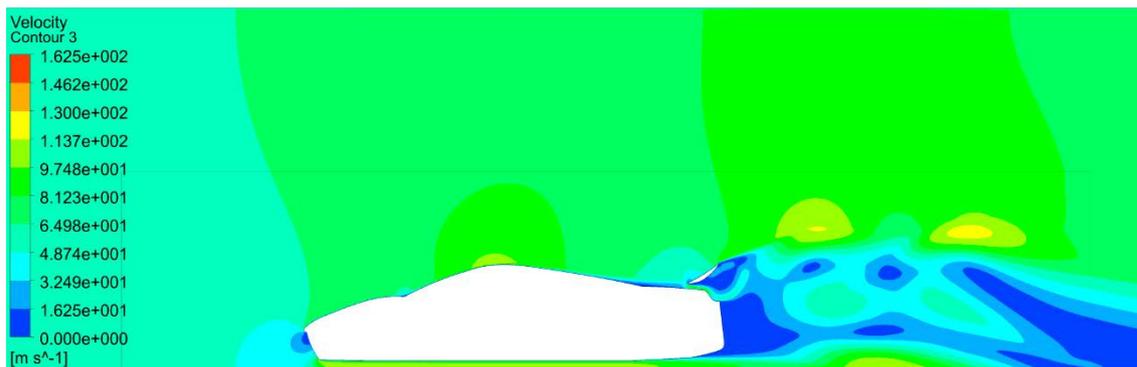


Ilustración 2.42 Diagrama de velocidad. Fuente: Propia.

En el siguiente fotograma se indican las líneas de flujo que muestran la velocidad y trayectoria del fluido al atravesar el cuerpo del vehículo y alerón, modificando su valor a lo largo de su recorrido.

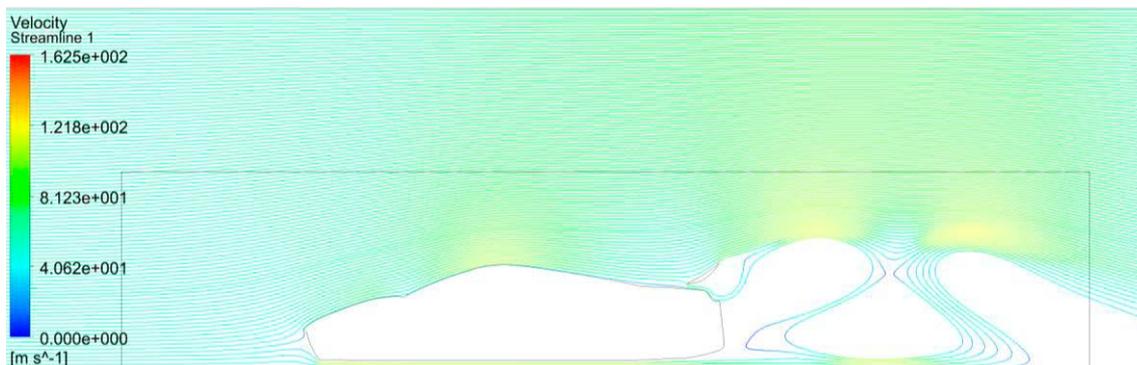


Ilustración 2.43 Diagrama del flujo de velocidad. Fuente: Propia.

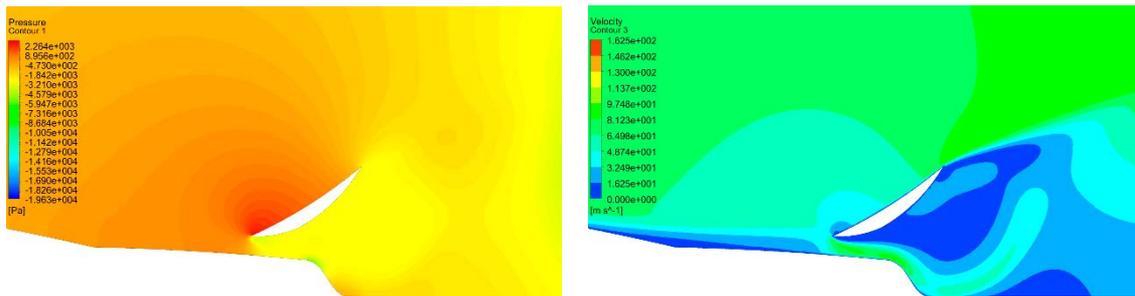


Ilustración 2.44 Vista en detalle del diagrama de presiones y velocidades. Fuente: Propia.

Existe una relación entre la velocidad y la presión, ya que en las zonas donde hay menor presión es donde mayor velocidad existe y, al contrario. Esto se debe al principio fundamental de la dinámica de fluidos de Bernoulli:

$$\frac{V^2 \cdot \rho}{2} + P = \text{constante}$$

### 2.3.5.3 Turbulencia de energía cinética

En la siguiente ilustración se pueden observar zonas de elevada turbulencia y energía cinética. Se define la estela con vórtices que deja el alerón cuando está en una orientación de 30°.

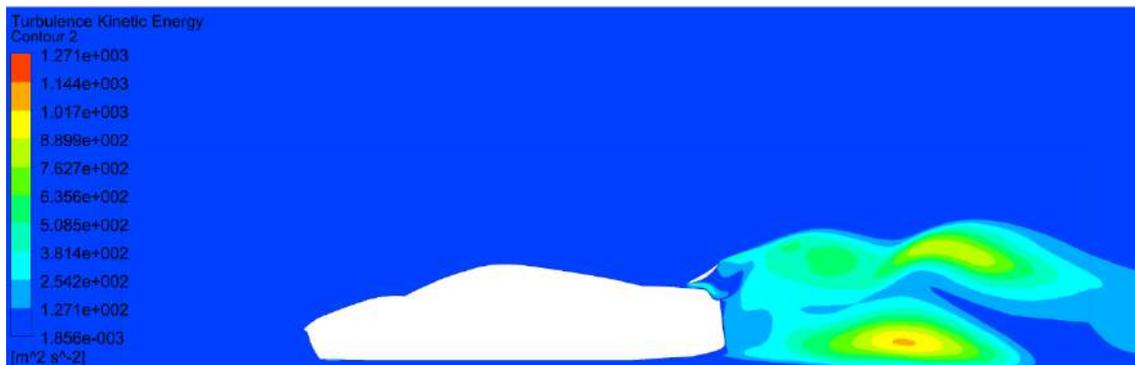


Ilustración 2.45 Diagrama de turbulencias. Fuente: Propia.

La presión del aire en el vórtice es mucho menor en la zona central y se incrementa según se va distanciando de dicho centro. Esto es debido al principio de Bernoulli.

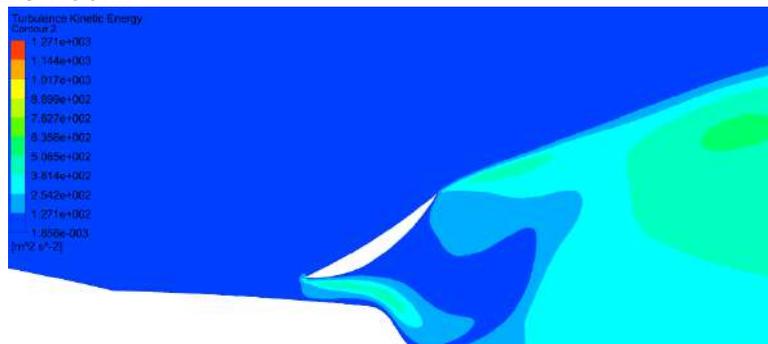


Ilustración 2.46 Vista en detalle del diagrama de turbulencias. Fuente: Propia.

### 2.3.6 Coeficientes aerodinámicos obtenidos

En las siguientes imágenes se muestra el proceso de cálculo, hasta que las soluciones convergen y se mantienen en un valor estable durante las últimas iteraciones. Se representan los datos obtenidos de la monitorización de los coeficientes aerodinámicos, en el caso de la última simulación aerodinámica, en la cual el alerón se sitúa en la tercera posición propuesta y con una inclinación de 30°.

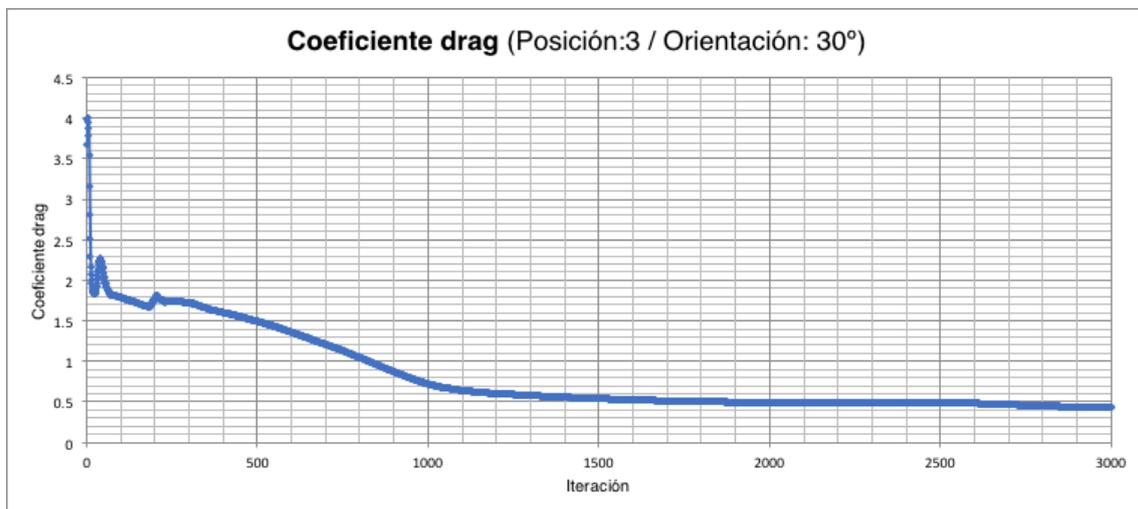


Ilustración 2.47 Evolución del coeficiente drag. Fuente: Propia.

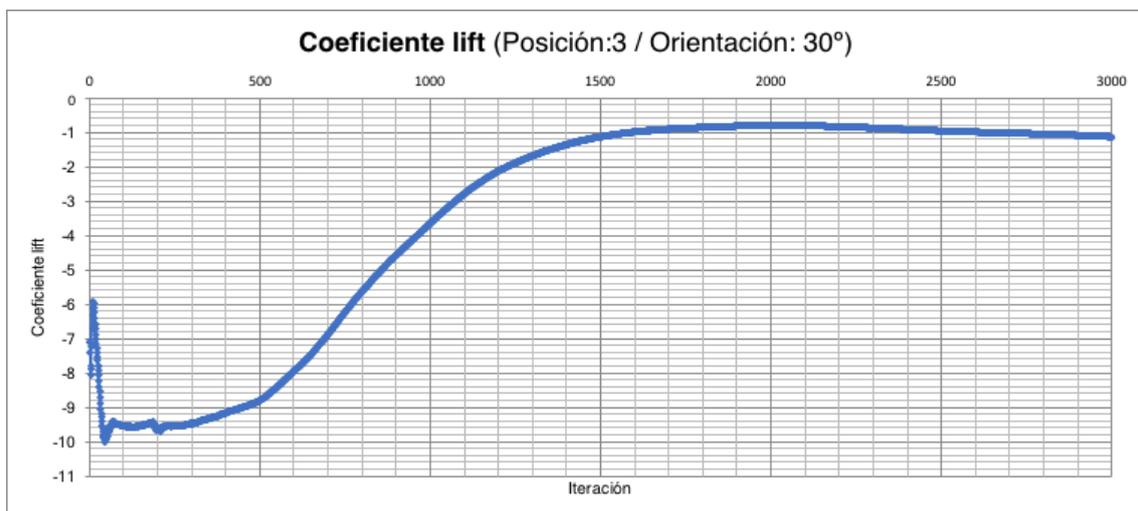


Ilustración 2.48 Evolución del coeficiente lift. Fuente: Propia.

Coeficiente	Valor
Drag	0.431
Lift	-1.129

Tabla 2.3 Coeficientes drag y lift en posición-3 con ángulo de 30°. Fuente: Propia.

### 2.3.7 Agrupación de todos los resultados

Sin ningún alerón

Ángulo	Drag	Lift
ninguno	0.289	-0.308

Tabla 2.4 Coeficientes drag y lift sin alerón. Fuente: Propia.

Alerón en posición-1

Ángulo	Drag	Lift
0°	0.299	-0.401
10°	0.311	-0.651
20°	0.338	-0.872
30°	0.360	-0.987

Tabla 2.5 Coeficientes drag y lift en posición-1. Fuente: Propia.

Alerón en posición-2

Ángulo	Drag	Lift
0°	0.314	-0.491
10°	0.327	-0.702
20°	0.350	-0.851
30°	0.395	-1.073

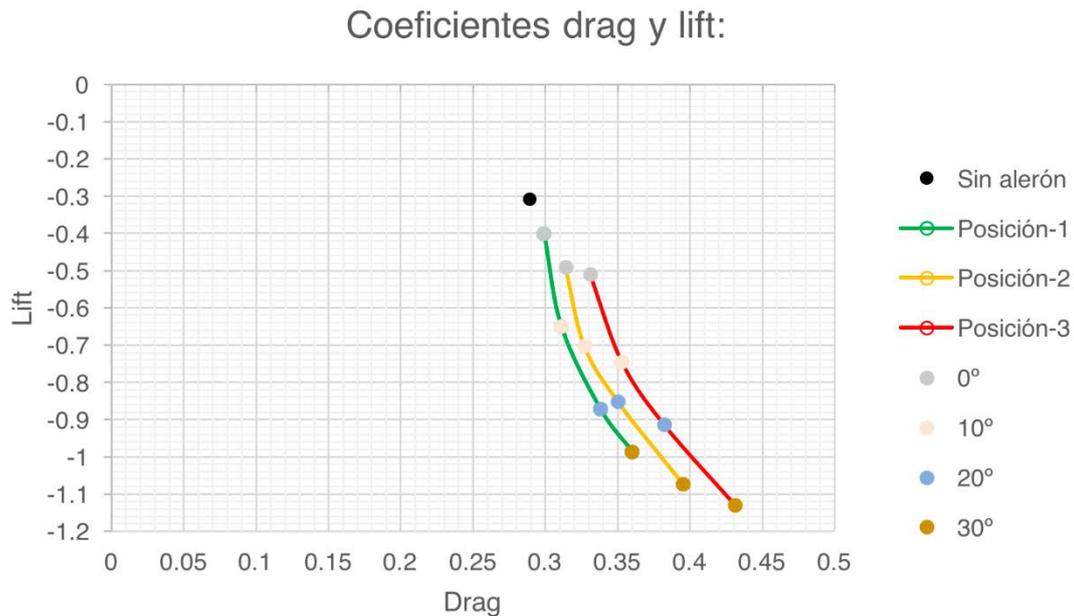
Tabla 2.6 Coeficientes drag y lift en posición-2. Fuente: Propia.

Alerón en posición-3

Ángulo	Drag	Lift
0°	0.331	-0.509
10°	0.353	-0.745
20°	0.382	-0.913
30°	0.431	-1.129

Tabla 2.7 Coeficientes drag y lift en posición-3. Fuente: Propia.

En la siguiente gráfica, se muestran los coeficientes aerodinámicos obtenidos tras la simulación estática de todas las posiciones del alerón y en cada una de ellas, se analiza los diferentes ángulos tomados.



Gráfica 2.1 Coeficientes drag y lift. Fuente: Propia.

Se observa, según las métricas obtenidas, que según la posición que va adoptando el alerón, van incrementando los coeficientes aerodinámicos, siendo la tercera posición donde se generan mayores fuerzas.

Se muestra como se incrementa el arrastre con el alerón y a medida que su orientación se enfrenta más perpendicularmente al flujo aumentando exponencialmente. A medida que varía el ángulo, también aumenta en mayor proporción la carga aerodinámica, incrementando el agarre con la calzada.

### 3 Análisis de resultados

#### 3.1 Cálculo de la resistencia aerodinámica

A continuación, se detallan tablas con los valores tras realizar los debidos cálculos

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_{frontal} \cdot c_D$$

Suponiendo como variables contantes las siguientes:

$$A_{frontal} = 2.13 \text{ m}^2$$

$$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

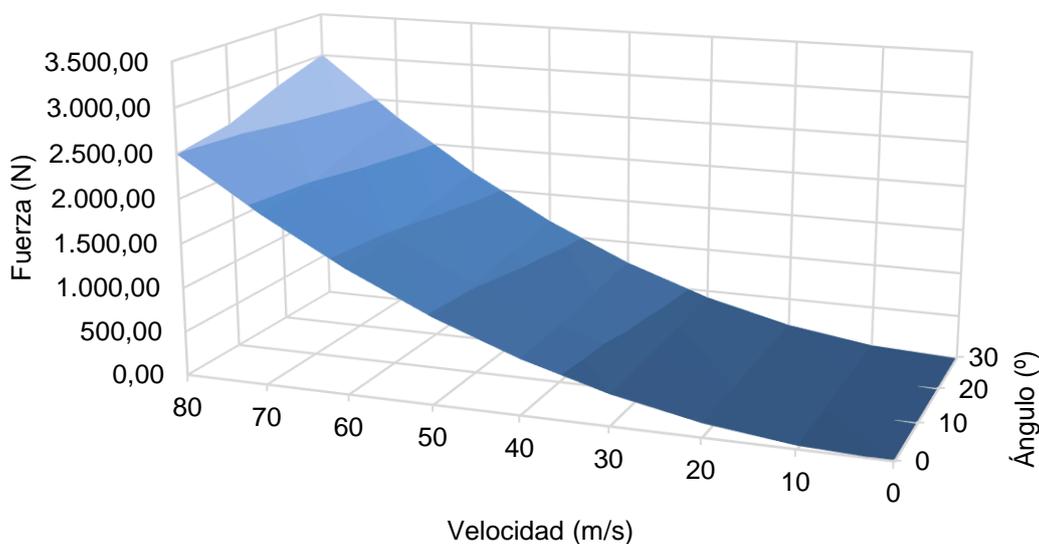
##### 3.1.1 Posición-1

Se calcula la resistencia aerodinámica en función de la velocidad del coche y de la orientación del alerón, en la primera posición:

Fuerza (N)		Velocidad (m/s)								
		0	10	20	30	40	50	60	70	80
Ángulo (°)	0	0.00	39.01	156.03	351.07	624.13	975.21	1,404.30	1,911.41	2,496.53
	10	0.00	40.57	162.30	365.16	649.18	1,014.35	1,460.66	1,988.12	2,596.73
	20	0.00	44.10	176.39	396.87	705.54	1,102.41	1,587.47	2,160.72	2,822.16
	30	0.00	46.97	187.87	422.70	751.46	1,174.16	1,690.79	2,301.36	3,005.86

Tabla 3.1 Resistencia aerodinámica en posición-1. Fuente: Propia.

Resistencia aerodinámica (drag) (Posición-1)



Gráfica 3.1 Resistencia aerodinámica (drag) (Posición-1). Fuente: Propia.

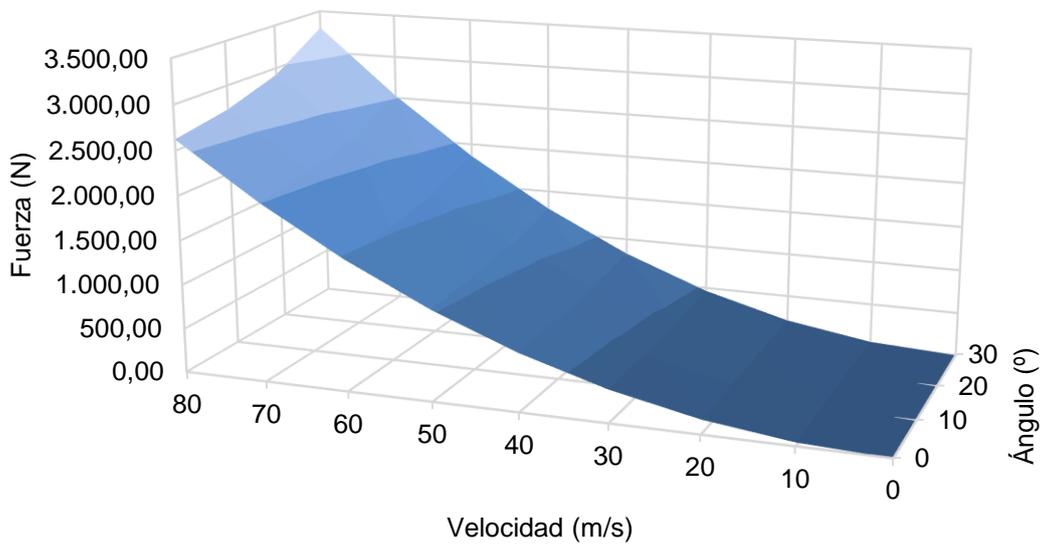
### 3.1.2 Posición-2

Se calcula la resistencia aerodinámica en función de la velocidad del monoplaza y de la orientación del alerón, en la segunda posición:

Fuerza (N)		Velocidad (m/s)								
		0	10	20	30	40	50	60	70	80
Ángulo (°)	0	0.00	40.97	163.86	368.69	655.44	1,024.13	1,474.75	2,007.30	2,621.77
	10	0.00	42.66	170.64	383.95	682.58	1,066.53	1,535.80	2,090.40	2,730.32
	20	0.00	45.66	182.65	410.96	730.59	1,141.55	1,643.83	2,237.43	2,922.36
	30	0.00	51.53	206.13	463.79	824.52	1,288.32	1,855.18	2,525.10	3,298.09

Tabla 3.2 Resistencia aerodinámica en posición-2. Fuente: Propia.

Resistencia aerodinámica (drag) (Posición-2)



Gráfica 3.2 Resistencia aerodinámica (drag) (Posición-2). Fuente: Propia.

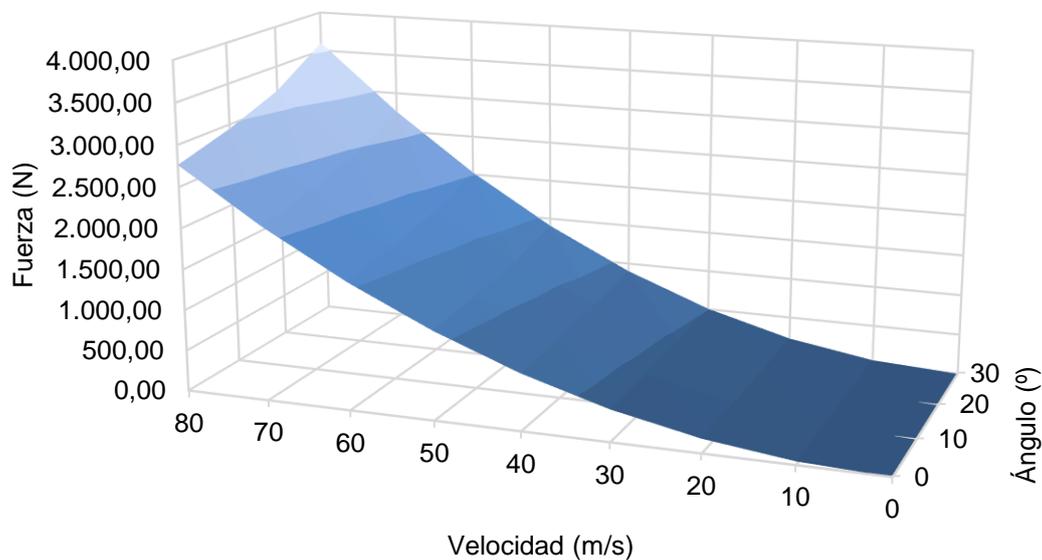
### 3.1.3 Posición-3

Se calcula la resistencia aerodinámica en función de la velocidad del automóvil y de la orientación del alerón, en la tercera posición:

Fuerza (N)		Velocidad (m/s)								
		0	10	20	30	40	50	60	70	80
Ángulo (°)	0	0.00	43.18	172.73	388.65	690.93	1,079.58	1,554.59	2,115.97	2,763.72
	10	0.00	46.05	184.21	414.48	736.85	1,151.33	1,657.92	2,256.61	2,947.41
	20	0.00	49.84	199.35	448.53	797.39	1,245.92	1,794.12	2,442.00	3,189.55
	30	0.00	56.23	224.92	506.06	899.67	1,405.73	2,024.26	2,755.24	3,598.68

Tabla 3.3 Resistencia aerodinámica en posición-3. Fuente: Propia.

Resistencia aerodinámica (drag) (Posición-3)



Gráfica 3.3 Resistencia aerodinámica (drag) (Posición-3). Fuente: Propia.

### 3.2 Cálculo de la carga aerodinámica

La fuerza normal resultante es la suma del peso del automóvil más el apoyo de la fuerza de sustentación aerodinámica en valor absoluto.

$$N = m \cdot g + |F_L|$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot c_L$$

Las siguientes variables se mantienen constantes:

$$A_{longitudinal} = 4.6 \text{ m}^2$$

$$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

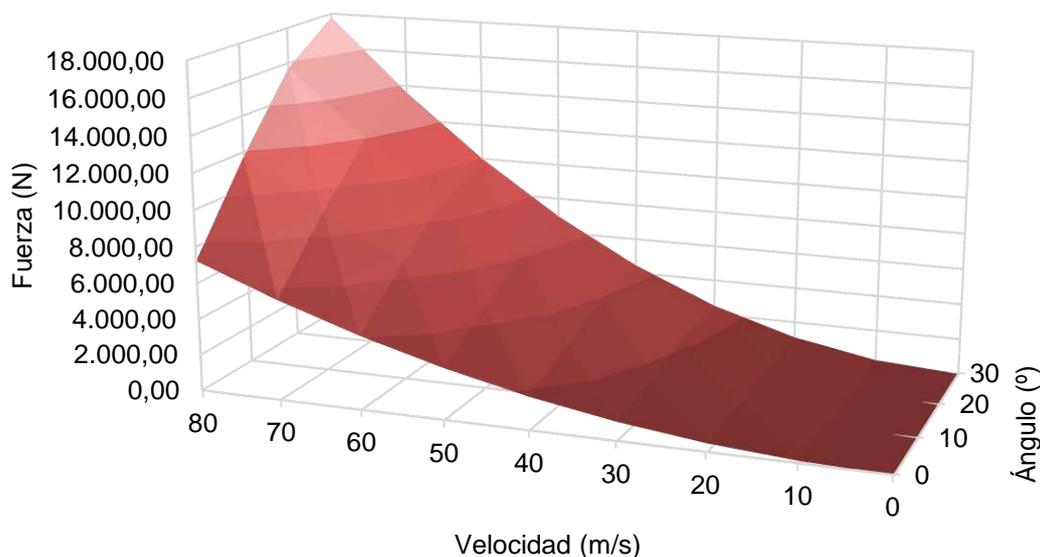
#### 3.2.1 Posición-1

Se calcula la carga aerodinámica en función de la velocidad del automóvil y de la orientación del alerón, en la primera posición:

Fuerza (N)		Velocidad (m/s)								
		0	10	20	30	40	50	60	70	80
Ángulo (°)	0	0.00	112.98	451.93	1,016.84	1,807.71	2,824.54	4,067.34	5,536.11	7,230.83
	10	0.00	183.42	733.68	1,650.77	2,934.71	4,585.48	6,603.09	8,987.54	11,738.83
	20	0.00	245.69	982.74	2,211.17	3,930.98	6,142.15	8,844.70	12,038.61	15,723.90
	30	0.00	278.09	1,112.35	2,502.79	4,449.40	6,952.18	10,011.14	13,626.28	17,797.58

Tabla 3.4 Carga aerodinámica en posición-1. Fuente: Propia.

Carga aerodinámica (lift) (Posición-1)



Gráfica 3.4 Resistencia aerodinámica (lift) (Posición-1). Fuente: Propia.

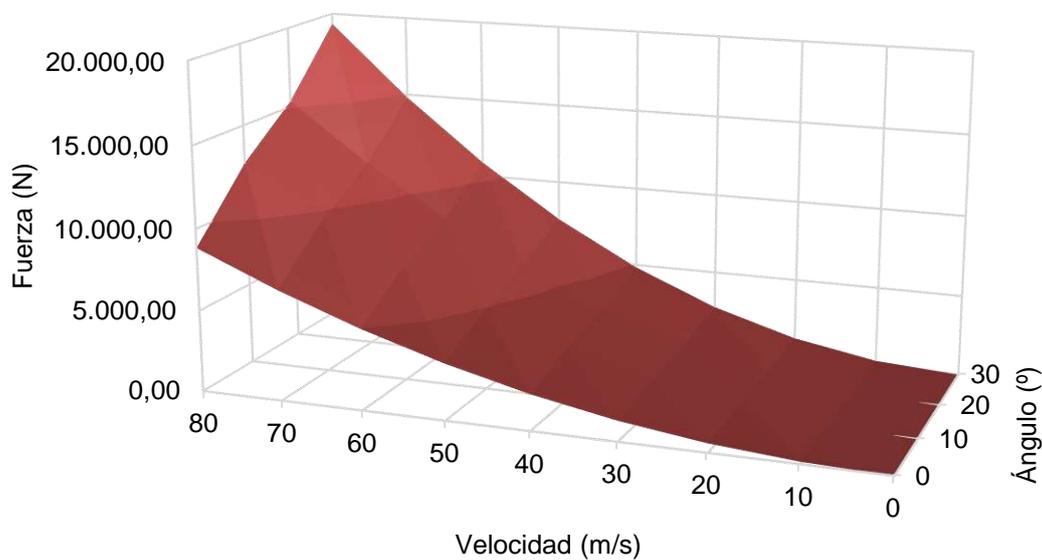
### 3.2.2 Posición-2

Se calcula la carga aerodinámica en función de la velocidad del automóvil y de la orientación del alerón, en la segunda posición:

Fuerza (N)		Velocidad (m/s)								
		0	10	20	30	40	50	60	70	80
Ángulo (°)	0	0.00	138.34	553.36	1,245.05	2,213.43	3,458.48	4,980.21	6,778.62	8,853.71
	10	0.00	197.79	791.15	1,780.10	3,164.62	4,944.71	7,120.39	9,691.64	12,658.46
	20	0.00	239.77	959.08	2,157.92	3,836.31	5,994.23	8,631.69	11,748.69	15,345.23
	30	0.00	302.32	1,209.27	2,720.86	4,837.08	7,557.94	10,883.44	14,813.57	19,348.34

Tabla 3.5 Carga aerodinámica en posición-2. Fuente: Propia.

Carga aerodinámica (lift) (Posición-2)



Gráfica 3.5 Resistencia aerodinámica (lift) (Posición-2). Fuente: Propia.

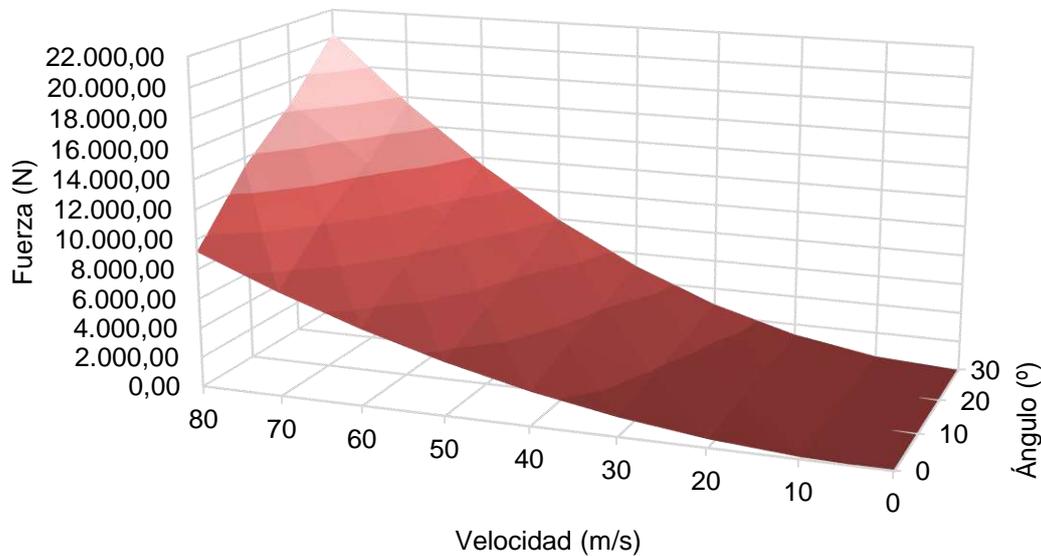
### 3.2.3 Posición-3

Se calcula la carga aerodinámica en función de la velocidad del automóvil y de la orientación del alerón, en la tercera posición:

Fuerza (N)		Velocidad (m/s)								
		0	10	20	30	40	50	60	70	80
Ángulo (°)	0	0.00	143.41	573.64	1,290.70	2,294.57	3,585.27	5,162.79	7,027.13	9,178.29
	10	0.00	209.90	839.62	1,889.13	3,358.46	5,247.59	7,556.54	10,285.28	13,433.84
	20	0.00	257.24	1,028.95	2,315.14	4,115.80	6,430.94	9,260.56	12,604.65	16,463.22
	30	0.00	318.10	1,272.38	2,862.86	5,089.53	7,952.39	11,451.45	15,586.69	20,358.13

Tabla 3.6 Carga aerodinámica en posición-3. Fuente: Propia.

Carga aerodinámica (lift) (Posición-3)

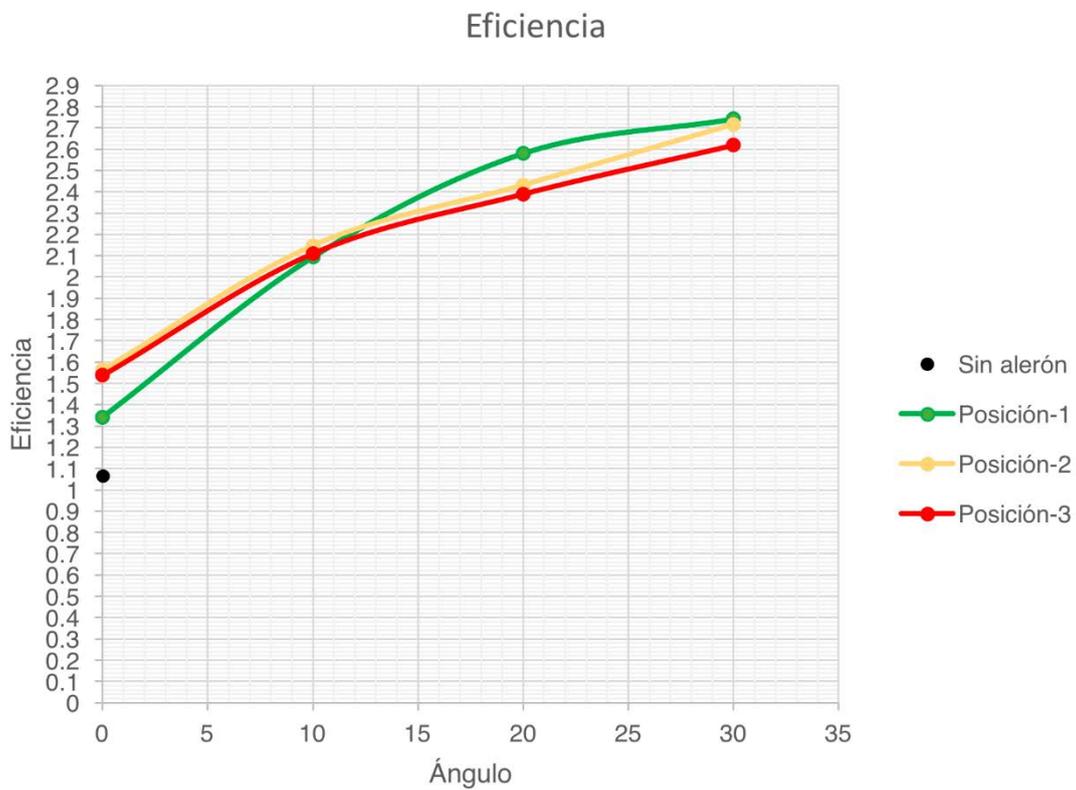


Gráfica 3.6 Resistencia aerodinámica (lift) (Posición-3). Fuente: Propia.

### 3.3 Eficiencia aerodinámica

La eficiencia aerodinámica es el cociente que resulta del coeficiente aerodinámico lift entre el coeficiente drag. Nos indica el grado de beneficio de cada una de las situaciones planteadas:

$$e = \frac{c_z}{c_x} = \frac{c_L}{c_D}$$



Gráfica 3.7 Eficiencia. Fuente: Propia.



Sin alerón			
Ángulo (°)	Drag	Lift	Eficiencia
none	0.289	-0.308	1.066

Posición - 1			
Ángulo (°)	Drag	Lift	Eficiencia
0	0.299	-0.401	1.341
10	0.311	-0.651	2.093
20	0.338	-0.872	2.580
30	0.360	-0.987	2.742

Posición - 2			
Ángulo (°)	Drag	Lift	Eficiencia
0	0.314	-0.491	1.564
10	0.327	-0.702	2.147
20	0.350	-0.851	2.431
30	0.395	-1.073	2.716

Posición - 3			
Ángulo (°)	Drag	Lift	Eficiencia
0	0.331	-0.509	1.538
10	0.353	-0.745	2.110
20	0.382	-0.913	2.390
30	0.431	-1.129	2.619

Tabla 3.7 Cálculo de la eficiencia en caso. Fuente: Propia.

## 4 Análisis de estabilidad

Se representan en el perfil las fuerzas que actúan en el automóvil

Las de color verde representa a las fuerzas aerodinámicas que están aplicadas sobre el centro de presión. Las fuerzas de color azul definen la actuación del alerón, que varía su módulo en función de su ángulo de orientación.

Tanto en peso como las fuerzas inerciales resultantes de la frenada y aceleración se aplican en el centro de gravedad.

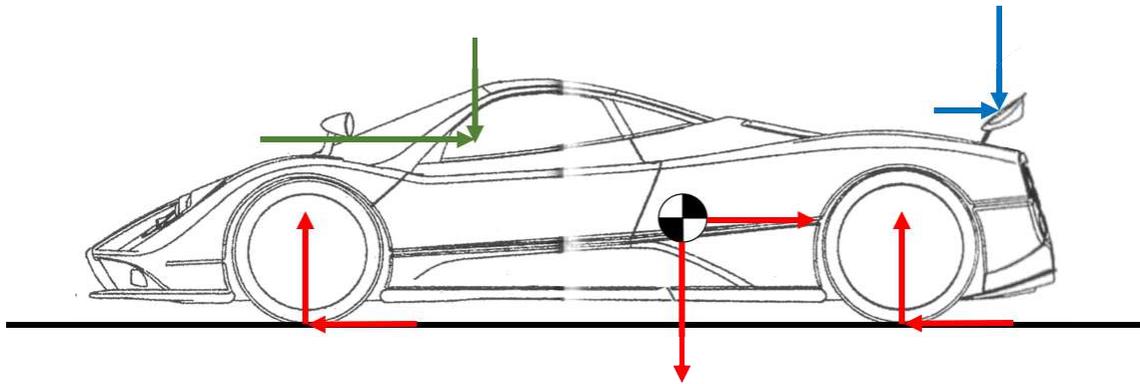


Ilustración 4.1 Diagrama de fuerzas en el perfil. Fuente: Propia.

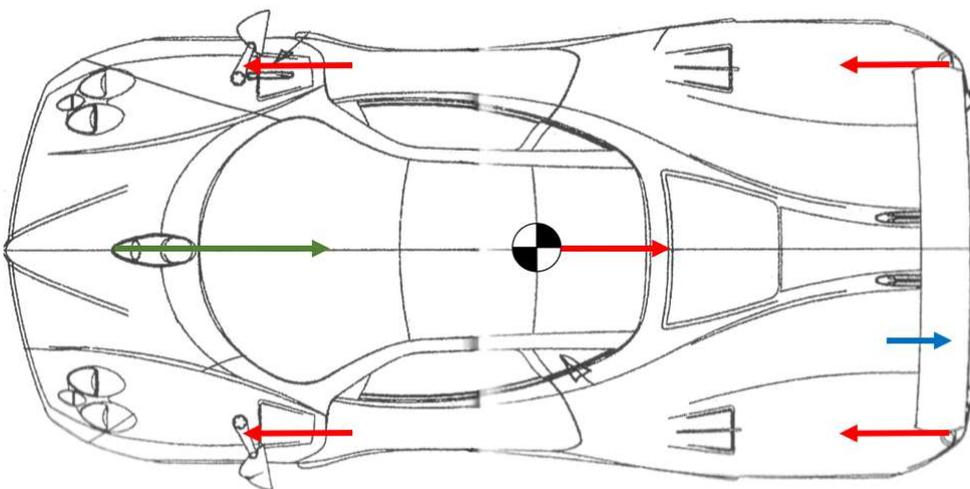


Ilustración 4.2 Diagrama de fuerzas en la planta. Fuente: Propia.

Se muestra un diagrama del alzado del vehículo con fuerzas que actúan.

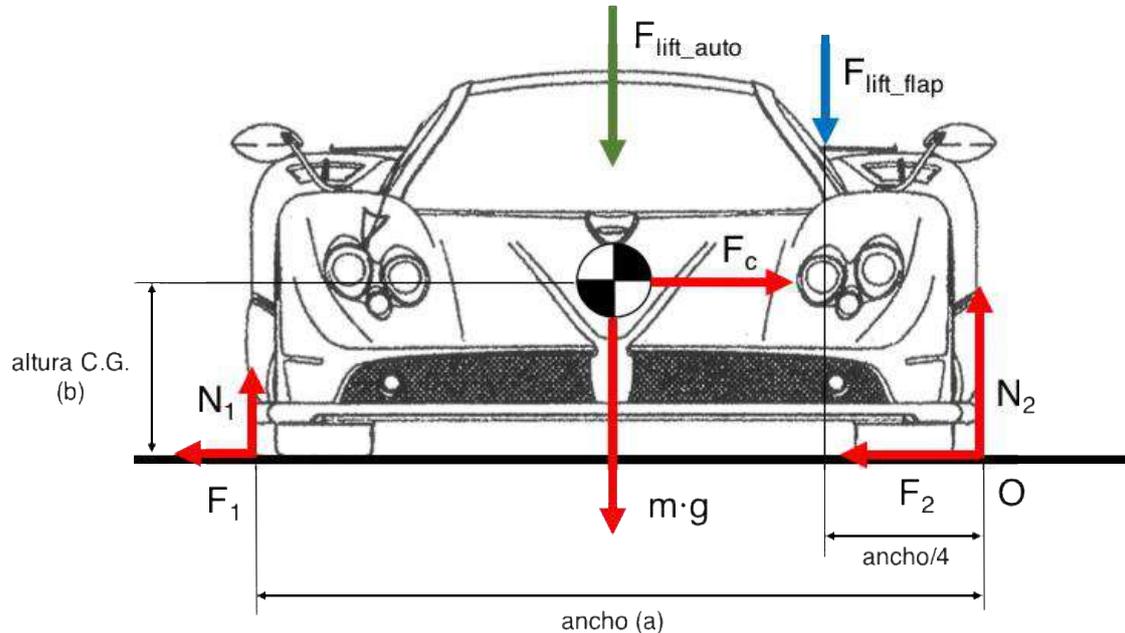


Ilustración 4.3 Diagrama de fuerzas en el alzado. Fuente: Propia.

**Equilibrio de fuerzas:**

$$F_{lift\_flap} + F_{lift\_auto} + m \cdot g = N_1 + N_2$$

$$F_c = F_1 + F_2$$

**Equilibrio de momentos respecto de O:**

$$F_{lift\_flap} \cdot \frac{a}{4} + F_{lift\_auto} \cdot \frac{a}{2} + m \cdot g \cdot \frac{a}{2} - N_1 \cdot a - F_c \cdot b = 0$$

$$N_1 = F_c \cdot \frac{b}{a} - F_{lift\_flap} \cdot \frac{1}{4} - F_{lift\_auto} \cdot \frac{1}{2} - m \cdot g \cdot \frac{1}{2}$$

$$F_c = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

## 4.1 El vehículo vuelca

Se impone la condición en la que la normal se anula en la rueda más alejada de la curva.

$$N_1 = 0$$

$$0 = m \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \frac{b}{a} - F_{lift_{flap}} \cdot \frac{1}{4} - F_{lift_{auto}} \cdot \frac{1}{2} - m \cdot g \cdot \frac{1}{2}$$

Despejamos el radio (R):

$$R = \frac{m \cdot v^2 \cdot \frac{b}{a}}{F_{lift_{flap}} \cdot \frac{1}{4} + F_{lift_{auto}} \cdot \frac{1}{2} + m \cdot g \cdot \frac{1}{2}}$$

Variable	Valor
m (kg)	1280
g (m/s <sup>2</sup> )	9.8
a (m)	2.036
b (m)	0.390
μ	1

Tabla 4.1 Parámetros constantes. Fuente: Propia.

Fuerza (N)		Velocidad (m/s)								
		0	10	20	30	40	50	60	70	80
Vehículo + Alerón	0°	0.00	143.41	573.64	1,290.70	2,294.57	3,585.27	5,162.79	7,027.13	9,178.29
Vehículo + Alerón	30°	0.00	318.10	1,272.38	2,862.86	5,089.53	7,952.39	11,451.45	15,586.69	20,358.13
Alerón	30°	0.00	174.69	698.74	1,572.17	2,794.96	4,367.13	6,288.66	8,559.57	11,179.84

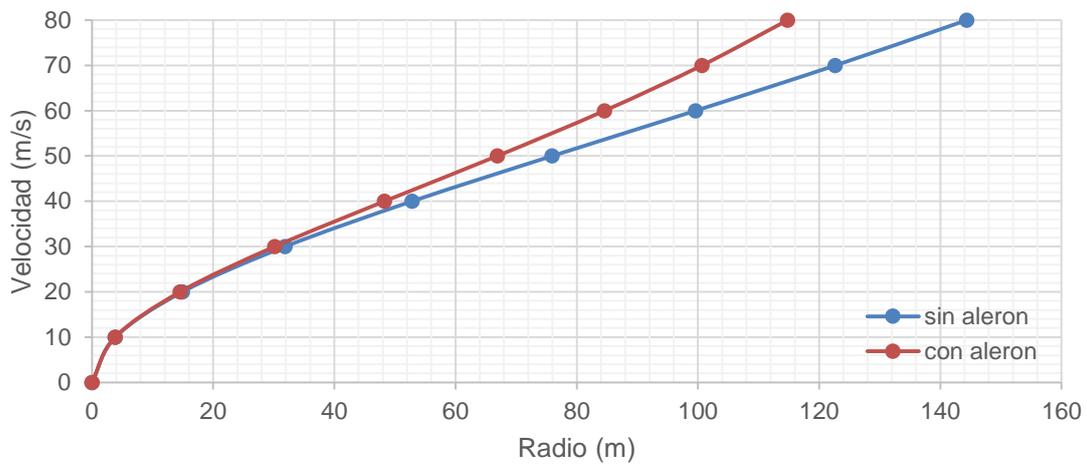
Tabla 4.2 Carga aerodinámica en posición-3. Aporte del vehículo y alerón. Fuente: Propia.



Velocidad (m/s)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Radio máximo sin alerón (m)	0.0	3.9	14.9	31.9	52.8	75.9	99.6	122.7	144.4
Radio máximo con alerón (m)	0.0	3.8	14.6	30.2	48.3	66.9	84.6	100.7	114.8

Tabla 4.3 Radio de la curva para no volcar con y sin alerón. Fuente: Propia.

Velocidad límite en curva para no volcar con y sin alerón:



Gráfica 4.1 Velocidad en función del radio de la curva para no volcar con y sin alerón. Fuente: Propia.

## 4.2 El vehículo desliza

Cuando la fuerza centrífuga al tomar la curva supera a las de rozamiento de las ruedas, se empieza a producir el deslizamiento lateral.

$$F_1 + F_2 = F_c$$

$$m \cdot \frac{v^2}{R} = F_1 + F_2$$

$$F_1 = \mu \cdot N_1$$

$$F_2 = \mu \cdot N_2$$

$$m \cdot \frac{v^2}{R} = \mu \cdot (N_1 + N_2)$$

$$m \cdot \frac{v^2}{R} = \mu \cdot (F_{lift\_flap} + F_{lift\_auto} + m \cdot g)$$

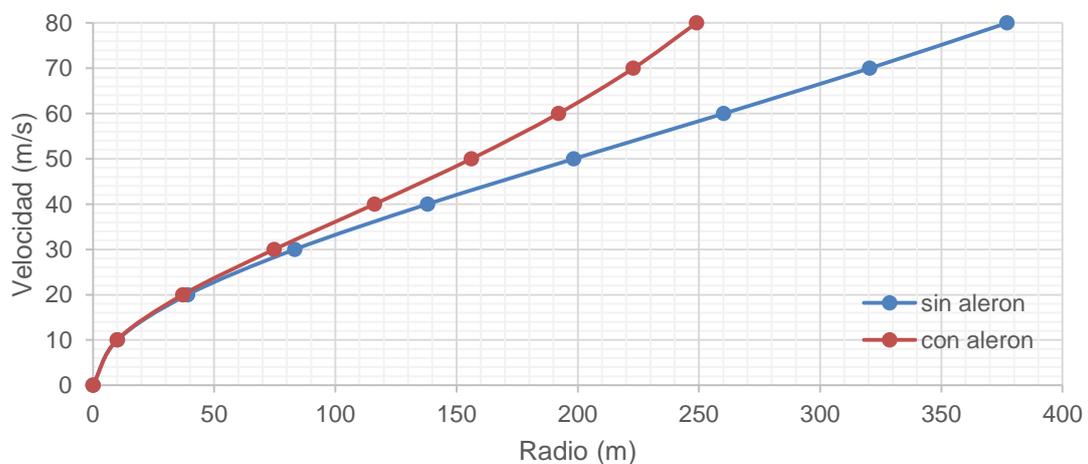
Despejamos el radio (R):

$$R = \frac{m \cdot v^2}{\mu \cdot (F_{lift\_flap} + F_{lift\_auto} + m \cdot g)}$$

Velocidad (m/s)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Radio máximo sin alerón (m)	0.0	10.1	39.0	83.3	138.0	198.4	260.2	320.5	377.1
Radio máximo con alerón (m)	0.0	10.0	37.1	74.8	116.1	156.1	192.0	223.0	249.0

Tabla 4.4 Radio de la curva para no deslizar con y sin alerón. Fuente: Propia.

Velocidad límite en curva para no deslizar con y sin alerón:



Gráfica 4.2 Velocidad en función del radio de la curva para no deslizar con y sin alerón. Fuente: Propia.

### 4.3 Límite de velocidad máxima

Límite de velocidad antes del deslizamiento en función del radio

Velocidad (m/s)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Radio máximo con alerón (vuelca) (m)	0.0	3.8	14.6	30.2	48.3	66.9	84.6	100.7	114.8
Radio máximo con alerón (desliza) (m)	0.0	10.0	37.1	74.8	116.1	156.1	192.0	223.0	249.0

Tabla 4.5 Radio de la curva para no volcar o deslizar con alerón. Fuente: Propia.



Gráfica 4.3 Velocidad límite en función del radio de la curva para no deslizar o volcar con y sin alerón. Fuente: Propia.

### 4.4 Conclusiones del análisis de la estabilidad

En la anterior gráfica se puede observar que es mucho más restrictiva la situación en la que el vehículo llegue a deslizarse, esto se debe a la baja posición del centro de gravedad del automóvil. De tal manera, se deduce que existe elevada dificultad para que el vehículo llegue a volcar, ya que antes se produciría un deslizamiento lateral.

A medida que aumenta la velocidad se aprecia que el apoyo de agarre del alerón del automóvil, crece de forma exponencial, por lo que se puede comprobar que la funcionalidad del alerón es muy positiva.

## 5 Simulación de la dinámica del vehículo

Una vez obtenido todos los coeficientes aerodinámicos, es posible analizar la dinámica del vehículo para ver su comportamiento en situaciones reales.

Se pueden obtener diferentes datos de los circuitos, como la longitud de las rectas o los radios de curvatura, así como sus desniveles.

Existen en el mercado diferentes herramientas eficaces, que permiten simular los resultados de tiempo por vuelta (Lap Time), introduciendo tanto los parámetros del vehículo, como los del circuito.

### 5.1 Herramienta utilizada

La herramienta que se ha escogido es TESIS veDYNA Entry , es un software para simular la dinámica del vehículo, modelando virtualmente el comportamiento del coche con gran precisión.



Ilustración 5.1 Logo TESIS veDYNA. Fuente: [https://lh5.googleusercontent.com/-KKdAU-Vi52Q/AAAAAAAAAAI/AAAAAAAAAD8/ZO08S\\_S3A2o/photo.jpg](https://lh5.googleusercontent.com/-KKdAU-Vi52Q/AAAAAAAAAAI/AAAAAAAAAD8/ZO08S_S3A2o/photo.jpg)

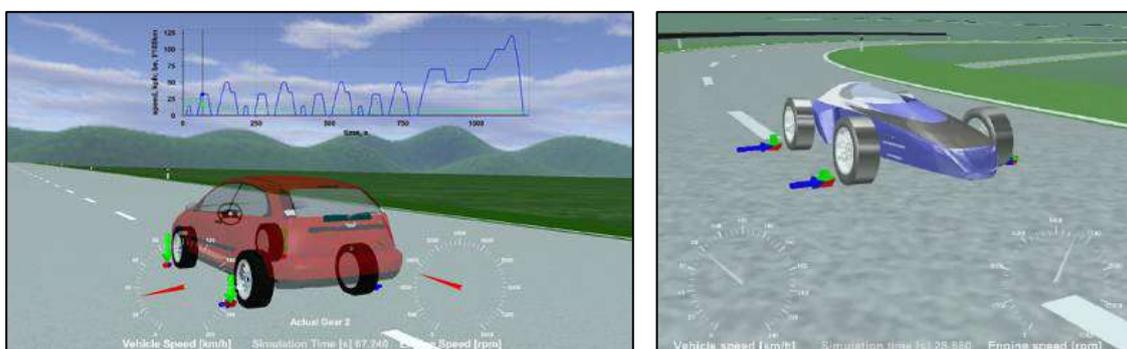


Ilustración 5.2. Simulación de la dinámica del vehículo. Fuentes: <http://www.magna.com/images/default-source/popups/vedyna-simulation-of-the-mveg-cycle.jpg?sfvrsn=16> y [https://www.thesis-dynaware.com/fileadmin/content-pics/Hauptnavigation\\_Bilder/Formula Student Race Car Simulation4.png](https://www.thesis-dynaware.com/fileadmin/content-pics/Hauptnavigation_Bilder/Formula Student Race Car Simulation4.png)

Este software proporciona una interfaz para meter todos los datos de entrada del modelo de la dinámica del vehículo. Sus cálculos de simulación se basan en Matlab, como herramienta de cálculo y procesamiento de toda la información.

A pesar de las elevadas posibilidades que permite dicho software solo nos centraremos en el análisis de la dinámica del vehículo al tomar una curva de radio constante. Se comparará los efectos sin utilizar el alerón, y al utilizar el alerón del lado más cercano al centro del radio de curvatura.

## 5.2 Modelo

Una vez obtenidos los coeficientes de arrastre y sustentación en función de la inclinación se simulará la dinámica del vehículo.

En la siguiente imagen se representa el diagrama de bloques del modelo del comportamiento de la dinámica del vehículo en simulink de Matlab.

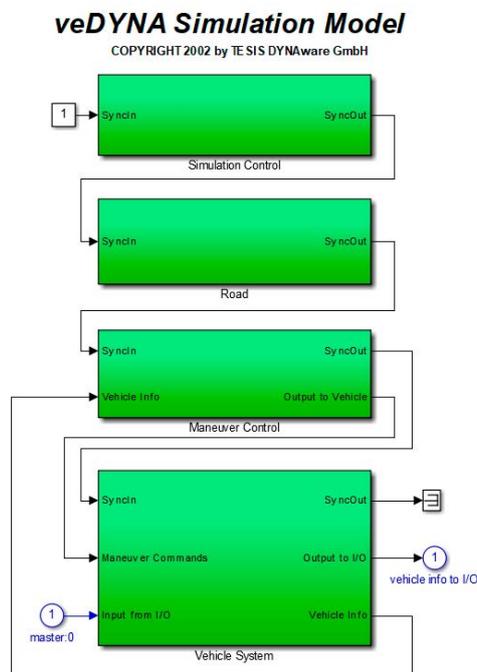


Ilustración 5.3 Diagrama de bloques del modelo del vehículo. Fuente: Propia.

### 5.3 Modificación del modelo

En la ilustración se refleja cómo se ha modificado el modelo del vehículo para introducir unas fuerzas y momentos dinámicos externos. La fuerza aerodinámica del alerón se aplica en el centro de gravedad del automóvil, por lo que es necesario desplazarla en forma de fuerza y momento dinámico.

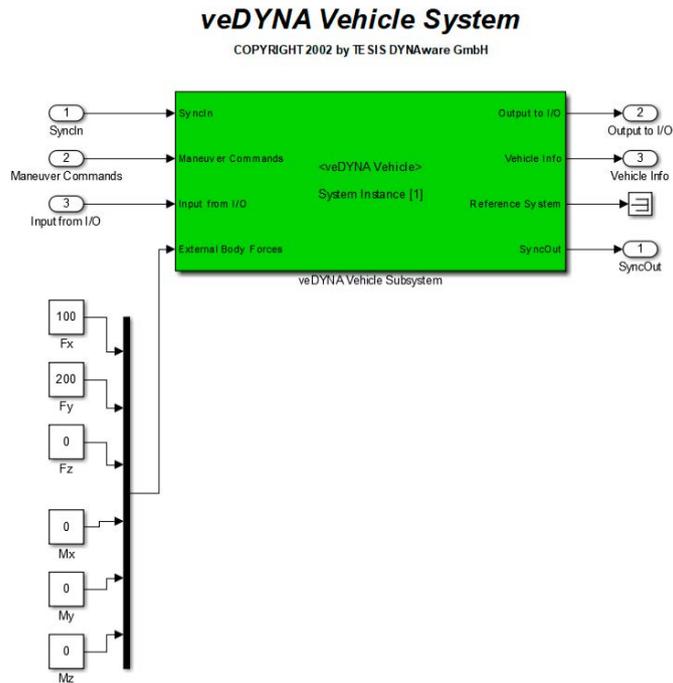


Ilustración 5.4 Adición de fuerzas y momentos en el modelo del vehículo. Fuente: Propia.

Para poder realizar dicha modificación fue necesario solicitar una licencia de ampliación a modo de prueba durante unos meses.

## 5.4 Parámetros de entrada

La transmisión del automóvil se puede simular como delantera, trasera o en todas las ruedas.

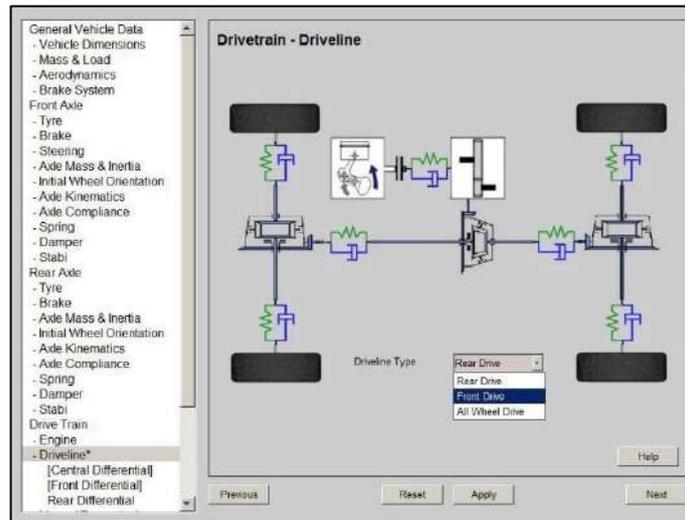


Ilustración 5.5 Configuración de la transmisión. Fuente: Propia.

Además, es también viable modificar el tipo de neumático del vehículo, ya que los de competición tienen un menor flanco (ancho).

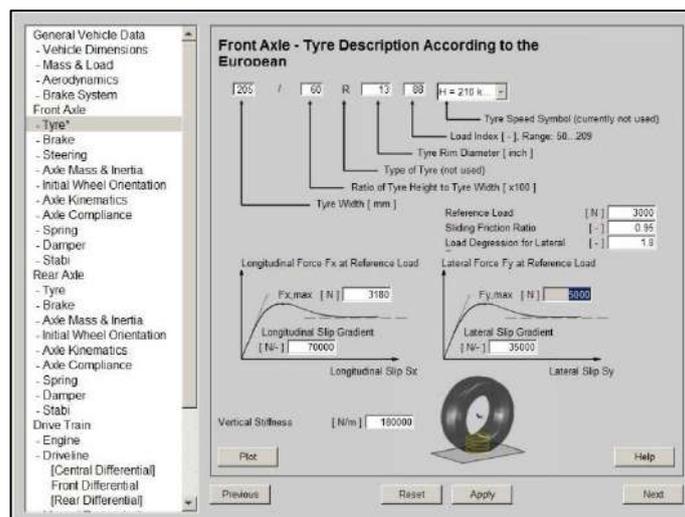


Ilustración 5.6 Configuración de los neumáticos. Fuente: Propia.

# PROYECTO FIN DE MÁSTER

## Timón aerodinámico para automoción

Se introducen en el programa informático, todos los datos y dimensiones del modelo elegido Pagani Huayra. Las longitudes principales del vehículo, distancia entre ejes, así como, su peso y distribución en las ruedas.

Datos	Cantidad
Largo	4,605 mm
Ancho	2,036 mm
Altura	1,169 mm
Distancia entre ejes	2,795 mm
Peso	1,280 kg
Distribución del peso	44 % delantero

Tabla 5.1 Principales datos del Pagani Huayra. Fuente: Propia.

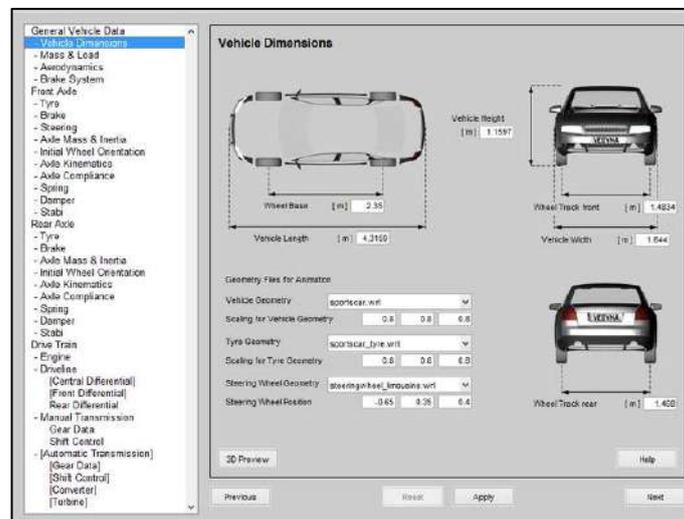


Ilustración 5.7 Configuración de las dimensiones. Fuente: Propia.

Entre los principales datos, ya es conocido en este modelo de coche, que el 44% del peso se distribuye en las ruedas delanteras, de tal manera que, se puede obtener fácilmente, la ubicación del centro de gravedad del vehículo.

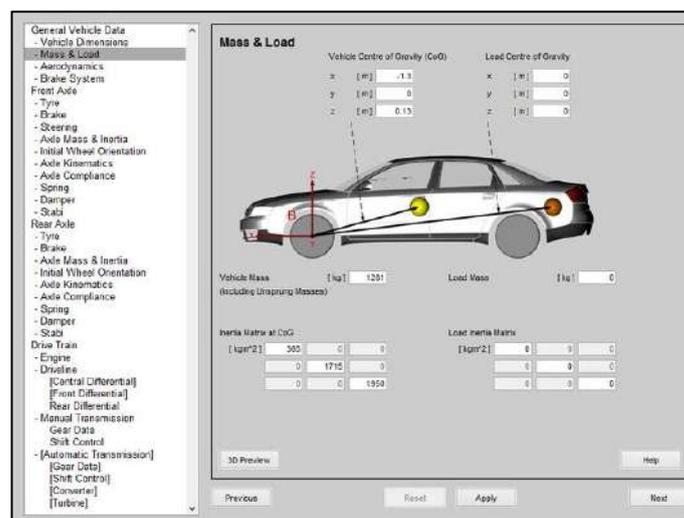


Ilustración 5.8 Configuración del centro de gravedad. Fuente: Propia.

## 5.5 Simulación

Se procederá a simular la dinámica en la situación del trazado de una curva de radio constante.

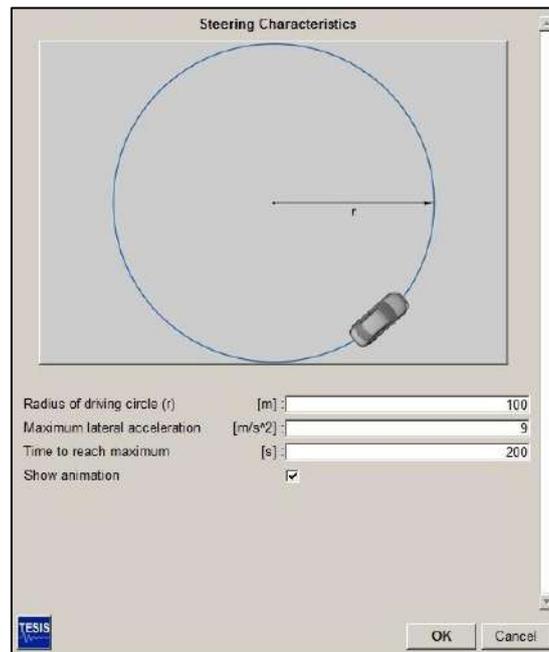


Ilustración 5.9 Configuración curva como circunferencia. Fuente: Propia.

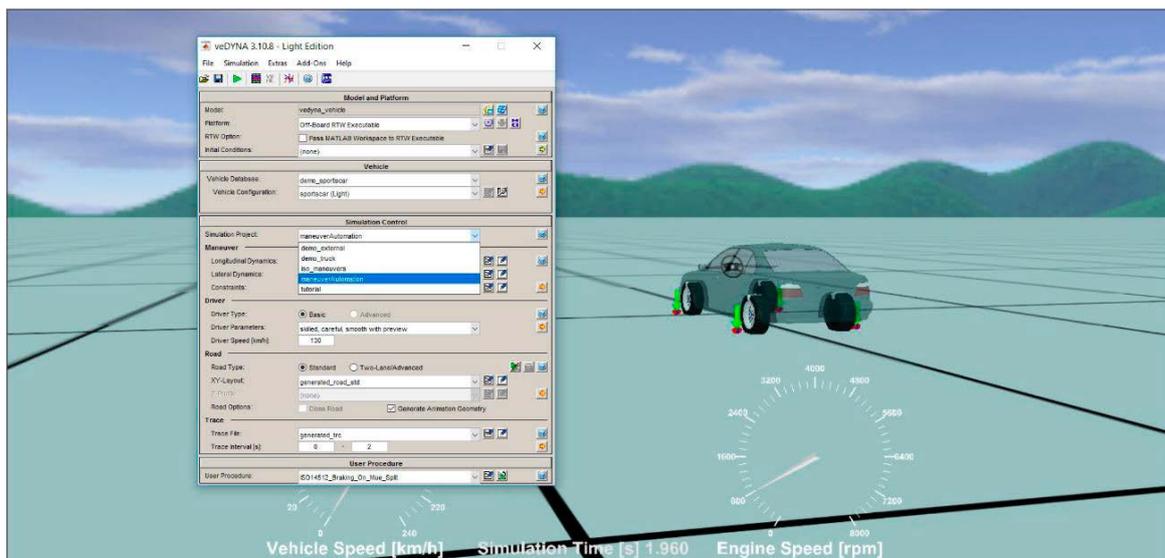


Ilustración 5.10 Vista de la animación de la simulación. Fuente: Propia.

## 5.6 Resultados

Se ha repetido el mismo procedimiento en sucesivos momentos, hasta llegar al deslizamiento de las ruedas, siendo éste, el límite máximo de velocidad, a la que se puede tomar una curva.

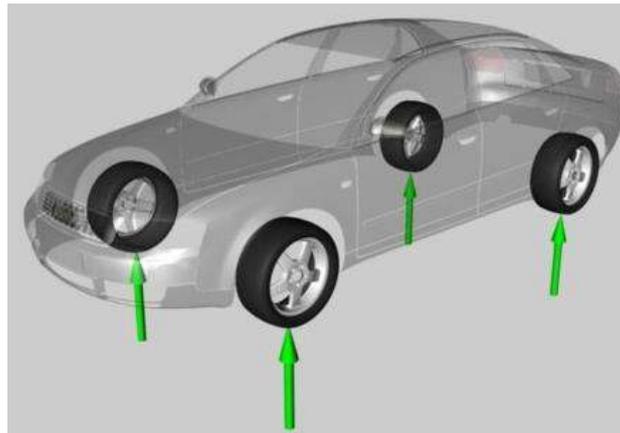


Ilustración 5.11 Fuerzas normales sobre el suelo. Fuente: Propia.

Para ello se ha realizado una comparativa de dos situaciones, una sin alerón y otra con la máxima actuación de la parte del alerón más cercana al interior de la curva.

Tiempo obtenido sin deslizamiento (R=25m)	
Sin alerón	10.45 s
Con actuación del alerón	8.92 s

Tabla 5.2 Tiempo obtenido de la simulación de la dinámica del vehículo. Fuente: Propia.

Se puede observar que en el vehículo elegido se ha logrado una intensa mejoría, pues en primer lugar se ha conseguido un mayor agarre en la trayectoria, las ruedas interiores consiguen una mejor adherencia en la curva, siendo éstas las más propensas al deslizamiento. Además, también se ha generado un momento dinámico, que se complementa con la dirección del vehículo, siendo un aspecto muy positivo a considerar.

Por otra parte, el alerón diseñado produce una carga aerodinámica mayor, lo que se pretendía en este proyecto, pero además también provoca una fuerza de arrastre, lo que dota al vehículo de mayor potencia, disponible para frenar de una forma más rápida y brusca cuando se ejecute la acción del alerón, al entrar en la curva. Esto supone un ahorro de tiempo cuando el vehículo desacelere hasta alcanzar la velocidad deseada.

## 6 Proceso de Fabricación

### 6.1 Introducción

El origen de este material, se remonta a finales del siglo XIX, cuando Thomas Alva Edison en 1878, transformo fibras de algodón en carbono dando un uso más tecnológico a esta fibra, concretamente lo que hizo fue perfeccionar la lámpara incandescente con filamento de carbono, aunque no era realmente lo que hoy en día se conoce como fibra de carbono.

Es en siglo XX, en la década de los años 50, se vuelve a interesar por las propiedades de este material, y es la industria de la aeronáutica quien introduce las primeras aplicaciones, obteniendo tan buenos resultados que el mundo de la competición automovilística, siempre preocupados por mejorar en todos sus aspectos observando las cualidades de este material comenzó a utilizarla, de tal manera que, el uso de la fibra de carbono se ha ido incrementando y actualmente es un material muy empleado en diversas aplicaciones, debido a sus propiedades de resistencia y ligereza.

La fibra de carbono también conocida como CFRP (Carbón Fiber Reinforced Plastic) es una fibra sintética, un material compuesto de átomos de carbono que forman finos filamentos muy delgados, menos que el diámetro de un cabello humano, de 5 a 10 micrones. Estas fibras se entrelazan entre sí, de tal manera que se crean hilos muy resistentes y ligeros, pues cada fibra de carbono es la unión de miles de filamentos. Estos hilos se encadenan con otros cientos de hilos para formar una especie de tela de fibra de carbono que es la base del material para fabricar piezas.



Ilustración 6.1. Imagen de tela de fibra de carbono. Fuente:  
[http://img.directindustry.com/images\\_di/photo-g/37814-4813329.jpg](http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/37814-4813329.jpg)

La densidad de la fibra de carbono es de  $1,75 \text{ g/cm}^3$ , mientras que el acero tiene  $7,85 \text{ g/cm}^3$  y el aluminio de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ . La resistencia a la tracción es unas 3 veces mayor que la del aluminio (resistencia a ser estirado) y mayor que la de muchos aceros. Tiene una gran resiliencia, que es la capacidad de absorción de impactos y gran resistencia a la fatiga, es decir, resistencia a romperse por esfuerzos repetitivos.

Entre los principales rasgos de la fibra de carbono compuesto, del CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic), destaca:

- Muy elevada resistencia a lo mecánico, con un módulo de elasticidad muy elevado.
- Baja densidad.
- Resistencia a agentes externos, no presenta corrosión.
- Muy ligera, poco peso, por lo que permite usar menor cantidad de material para la misma resistencia que necesitaría una pieza metálica.
- Gran resistencia a altas temperaturas, conserva su forma y también consta de una baja expansión térmica.
- Alta flexibilidad.
- Propiedades ignífugas.
- Buena conductibilidad de la electricidad.

Las desventajas que tiene la fibra de carbono es el precio, y que es un material complicado de producción y elaboración, porque necesita un proceso largo, además, es un material difícil de reciclar. Pero a pesar de estos inconvenientes, muchos equipos la consideran como el material del futuro, pues posee muchos requisitos que los fabricantes buscan en la fabricación de coches.

En Formula 1 el primer coche con chasis monocasco en fibra de carbono fue en 1891, con el McLaren MP4/1, construido íntegramente en fibra de carbono. Las primeras pruebas revelaron una rigidez 2,5 veces superior a un chasis comparable de aluminio, que era entonces el material por norma, por lo que aumentaba la seguridad al piloto, lo más importante.

A partir de entonces, las demás escuderías fueron incorporando este material en la construcción de los coches, actualmente la fibra de carbono es un material usado en chasis, alerones, tapa del motor y demás piezas adyacentes.

En Formula 1, el chasis monocasco está fabricado entero de este material, para soportar altas velocidades y bruscas aceleraciones, pero siempre con la suficiente resistencia para el caso de impacto libere energía y proteja al piloto.

## 6.2 Diseño

Para que el alerón soporte la presión del aire, se ha simulado la situación más desfavorable, en la que el vehículo circula a 400 km/h y le viene en contra el viento a 200 km/h

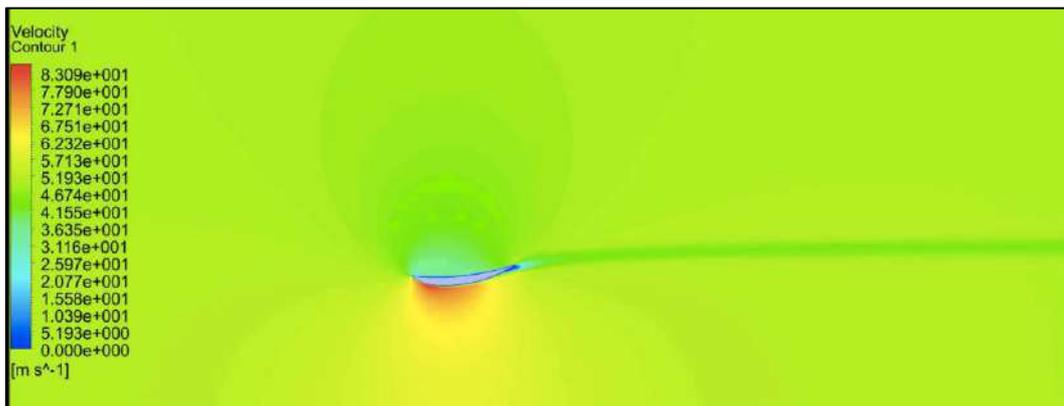


Ilustración 6.2. Flujo de velocidad a través del flap. Fuente: Propia.

Se ha dibujado una silueta de un automóvil con buen coeficiente aerodinámico.

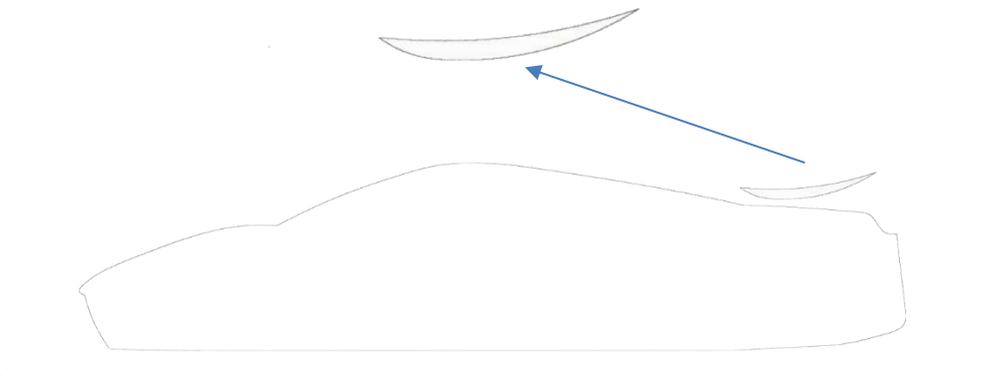


Ilustración 6.3. Boceto de la geometría del vehículo con el flap. Fuente: Propia.

Cuanto mayor sea la fuerza aerodinámica que genere el alerón, mayor será el agarre del vehículo con la calzada.

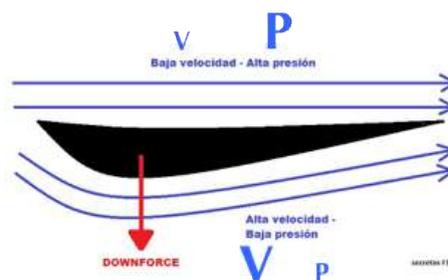


Ilustración 6.4 Downforce, debida al Teorema de Bernoulli.

### 6.3 Fabricación

Para crear piezas que necesiten un alto grado de resistencia, se necesita un proceso de elaboración; el más conocido y usado es el de presión y vacío, que consiste en diseñar un molde de la pieza a construir y colocar dentro la tela de fibra. Después esta tela es tratada con una serie de resinas termoestables y se pasa a un proceso de vacío, donde se elimina el aire y se adapta la tela al molde de una manera más precisa, entonces las resinas se compactan. Por último, se le aplica calor en un horno, y ya una vez seco, se obtiene la pieza de fibra de carbono que, si se necesita, deberá manipularse limando y puliendo los bordes.

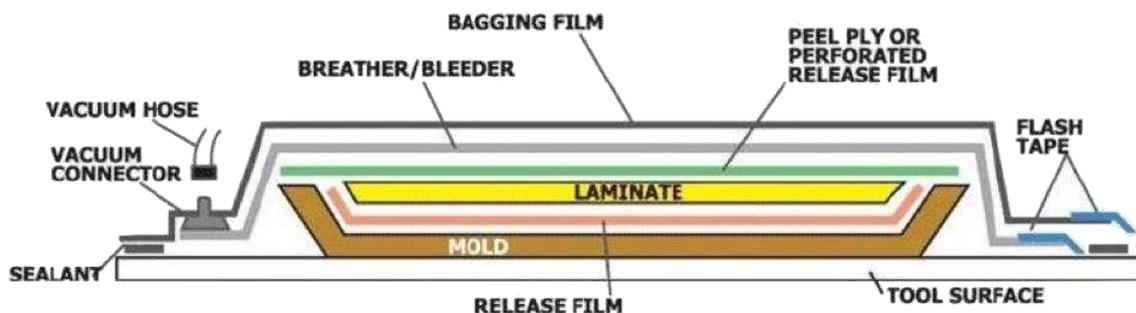


Ilustración 6.5 Proceso de vacío en molde para fabricación de pieza en fibra de carbono.

La fibra de carbono, por sí sola no tiene utilidad, necesita de otros materiales, como las resinas y los endurecedores o catalizadores para formar el material compuesto.

Todos los materiales compuestos constan de una matriz orgánica y un refuerzo. En el caso de la fibra de carbono la matriz, puede ser rayón, breá o PAN (poliacrilonitrilo), aunque los dos primeros poseen un bajo módulo elástico, por lo que en el caso de los coches de competición se suele usar el tercer componente.

La fibra de carbono es un polímero parecido al grafito, se trata de una fibra sintética que se obtiene después de una reacción entre propano y amoníaco, de donde se obtiene acrilonitrilo, este se transforma en poliacrilonitrilo, después de la polimerización. Este material se refuerza con polímeros termoestables, que son aquellos que sus propiedades no varían con la temperatura, aunque ésta incrementa hasta el límite de la degradación o fusión. El refuerzo que normalmente suele usarse es la resina epoxi, aunque también puede asociarse a otros polímeros como el poliéster o el viniléster.

Una vez obtenido el polímero se procede al estiramiento de éste para conseguir el eje de fibra, después se oxida a unos 300°C para eliminar el hidrógeno y se agrega oxígeno a la molécula. En este proceso el polímero toma el color negro.



El siguiente paso es purificarlo por carbonización, que se trata de calentar el polímero a unos 2.500 °C en un entorno rico en nitrógeno para que expulse todas las impurezas, y el contenido del polímero sea de un 95-100% de fibra de carbono, esto va en función de la calidad de la fibra.

Para terminar el proceso, se entrelazan las fibras en unas máquinas tejedoras complejas y así conseguir el entrecruzado deseado, de tal manera que se obtiene un rollo de fibra de carbono con un aspecto de tela. A esta tela se le añade la resina epoxy y se crea una variante pre-impregnada, es decir, ya viene preparada y lista para su uso. La unión de este compuesto, le proporciona a la fibra de carbono la propiedad de una alta resistencia a la tracción y al impacto, pero a su vez una gran ligereza.

Debe conservarse en cámaras frigoríficas a una temperatura constante de -18°C y los técnicos tienen que sacarla unas horas antes de manipularla. Una vez descongelada, se coloca en máquinas automáticas de corte, donde se recortan las plantillas para moldear las piezas deseadas del coche.

La colocación de las fibras en una posición adecuada es bastante compleja, por lo que actualmente, se utilizan programas de diseño por ordenador para fijarlas correctamente y para realizar cálculos de resistencia.

Para la elaboración de la fibra de carbono se necesitan de ciertas técnicas avanzadas, como de hornos autoclave, que son elementos en los que a la temperatura se le suma una presión elevada para conseguir compuestos que a presión atmosférica no se pueden conseguir. Después la cocción de los materiales se dispone a temperaturas altas y se suele realizar en atmosfera rica en nitrógeno, para realizar una limpieza de impurezas que causarían debilidad al material.

## 6.4 SIMULACIÓN EN ANSYS

La geometría ha sido importada desde Solidwork, que se lleva al módulo de ACP (Pre) para preparar el material que se desea. Posteriormente en el módulo de Static Structural, se implantará las cargas a las que se somete la pieza, para después analizar los esfuerzos en el módulo ACP (Post).

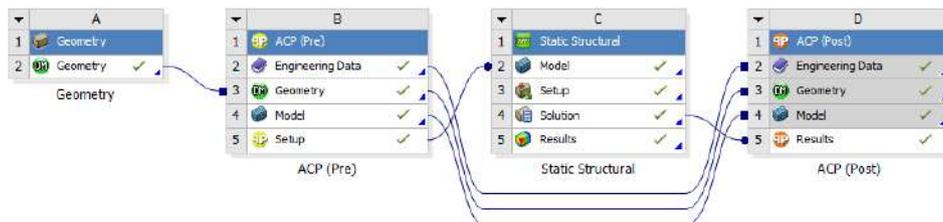


Ilustración 6.6. Esquema de bloques en Ansys. Fuente: Propia.

### 6.4.1 ACP (Pre)

En este módulo de Ansys se introducirá el material elegido, pudiendo realizar un sándwich de varias capas con diferentes materiales y orientaciones de las fibras.

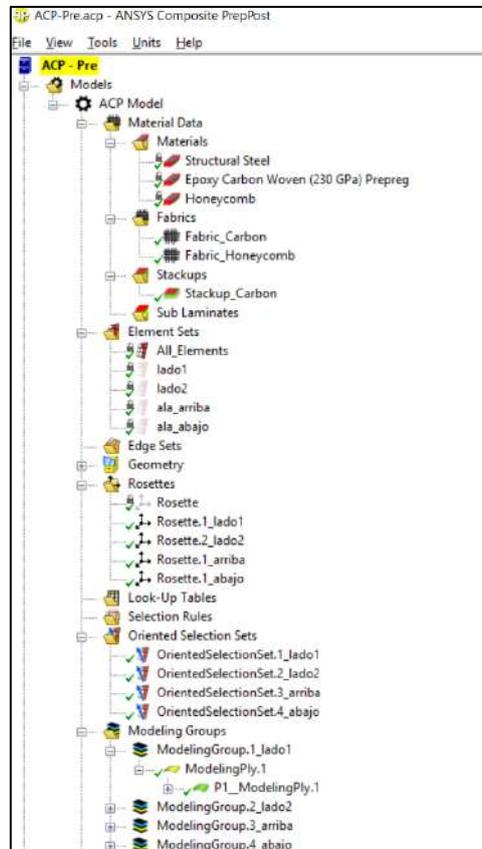


Ilustración 6.7. Árbol de operaciones en ACP-Pre. Fuente: Propia.

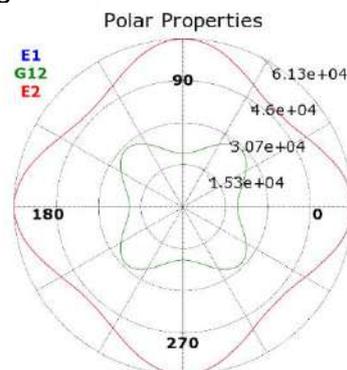
### 6.4.1.1 Propiedades del material:

El material escogido para la fabricación de la pieza es Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Prepreg.

Properties of Outline Row 3: Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Prepreg			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	1,42E-09	mm <sup>-3</sup> t
3	Orthotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
4	Coefficient of Thermal Expansion		
5	Coefficient of Thermal Expansion X direction	2,2E-06	C <sup>-1</sup>
6	Coefficient of Thermal Expansion Y direction	2,2E-06	C <sup>-1</sup>
7	Coefficient of Thermal Expansion Z direction	1E-05	C <sup>-1</sup>
8	Orthotropic Elasticity		
9	Young's Modulus X direction	61340	MPa
10	Young's Modulus Y direction	61340	MPa
11	Young's Modulus Z direction	6900	MPa
12	Poisson's Ratio XY	0,04	
13	Poisson's Ratio YZ	0,3	
14	Poisson's Ratio XZ	0,3	
15	Shear Modulus XY	19500	MPa
16	Shear Modulus YZ	2700	MPa
17	Shear Modulus XZ	2700	MPa
18	Orthotropic Stress Limits		
19	Tensile X direction	805	MPa
20	Tensile Y direction	805	MPa
21	Tensile Z direction	50	MPa
22	Compressive X direction	-509	MPa
23	Compressive Y direction	-509	MPa
24	Compressive Z direction	-170	MPa
25	Shear XY	125	MPa
26	Shear YZ	65	MPa
27	Shear XZ	65	MPa
28	Orthotropic Strain Limits		
29	Tensile X direction	0,0126	
30	Tensile Y direction	0,0126	
31	Tensile Z direction	0,008	
32	Compressive X direction	-0,0102	
33	Compressive Y direction	-0,0102	
34	Compressive Z direction	-0,012	
35	Shear XY	0,022	
36	Shear YZ	0,019	
37	Shear XZ	0,019	
38	Tsai-Wu Constants		
39	Coupling Coefficient XY	-1	
40	Coupling Coefficient YZ	-1	
41	Coupling Coefficient XZ	-1	
42	Ply Type		
43	Type	Woven	

**Ilustración 6.8. Propiedades de: Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Prepreg. Fuente: Propia.**

En el siguiente diagrama se puede observar como el material posee mejores características mecánicas en la dirección de las fibras. Se combinarán capas con diferentes ángulos, según las necesidades mecánicas de la pieza.



**Ilustración 6.9. Diagrama Polar de las propiedades del material. Fuente: Propia.**

### 6.4.1.2 Apilamiento de capas:

Se ha realizado una disposición de apilamiento simétrico del material, cada una de las capas tiene un espesor de 0,2 mm. Por lo tanto el material compuesto final será balanceado.

[0,-45,45,90]s

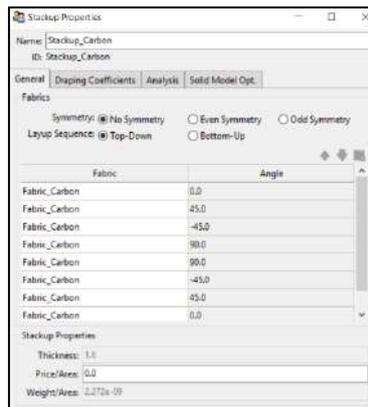


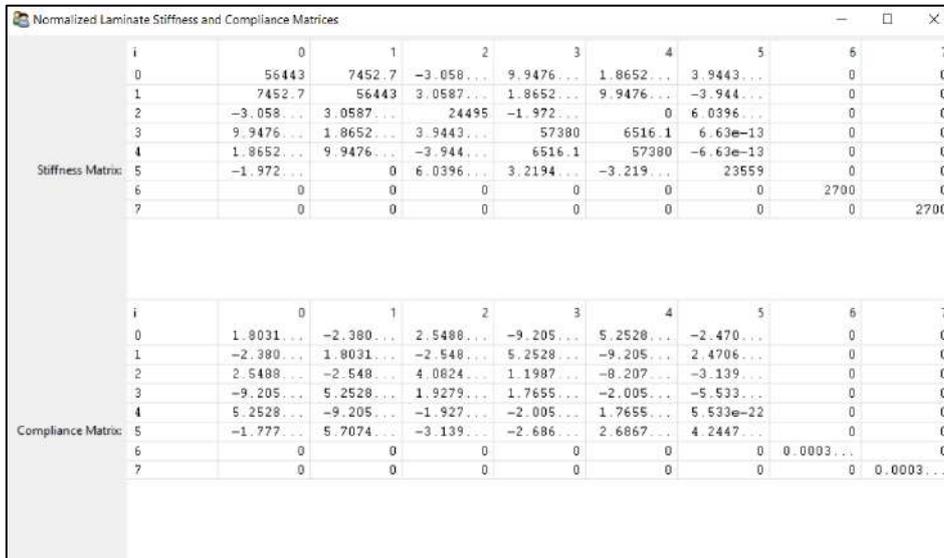
Ilustración 6.10. Apilamiento de capas de 0.2 mm en diferentes ángulos. Fuente: Propia.

En la siguiente ilustración se muestran las matrices del laminado de stiffness y conformidad.

Laminate Stiffness and Compliance Matrices										
	i	0	1	2	3	4	5	6	7	
Stiffness Matrix:	0		90309	11924	-4.893...	1.2733...	2.3874...	5.0487...	0	0
	1		11924	90309	4.8939...	2.3874...	1.2733...	-5.048...	0	0
	2		-4.893...	4.8939...	39192	-2.524...	0	7.7307...	0	0
	3		1.2733...	2.3874...	5.0487...	19586	2224.2	2.2631...	0	0
	4		2.3874...	1.2733...	-5.048...	2224.2	19586	-2.263...	0	0
	5		-2.524...	0	7.7307...	1.0989...	-1.098...	8041.3	0	0
	6		0	0	0	0	0	0	4320	0
	7		0	0	0	0	0	0	0	4320
Compliance Matrix:	i	0	1	2	3	4	5	6	7	
	0		1.127e-05	-1.488...	1.593e-22	-7.191...	4.1037...	-1.930...	0	0
	1		-1.488...	1.127e-05	-1.593...	4.1037...	-7.191...	1.9301...	0	0
	2		1.593e-22	-1.593...	2.5515...	9.3651...	-6.411...	-2.453...	0	0
	3		-7.191...	4.1037...	1.5062...	5.1725...	-5.874...	-1.621...	0	0
	4		4.1037...	-7.191...	-1.506...	-5.874...	5.1725...	1.621e-21	0	0
	5		-1.388...	4.4589...	-2.453...	-7.871...	7.8713...	0.0001...	0	0
	6		0	0	0	0	0	0	0.0002...	0
7		0	0	0	0	0	0	0	0.0002...	

Ilustración 6.11. Matriz Laminado de Stiffness y conformidad. Fuente: Propia.

En la siguiente ilustración se muestran las matrices normalizadas del laminado de stiffness y conformidad.

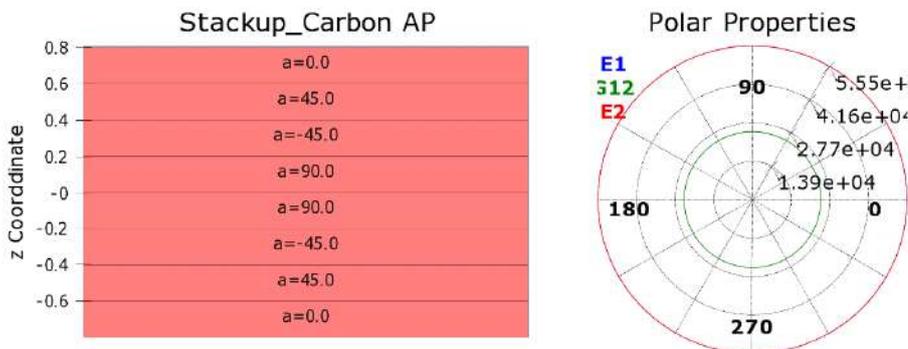


**Ilustración 6.12. Matriz Normalizada de Stiffness y conformidad. Fuente: Propia.**

Property	Value
Flexural Laminate Shear Stiffness	23558.6
Flexural Laminate Stiffness E1	56639.7
Flexural Laminate Stiffness E2	56639.7
Laminate Shear Stiffness	24495.2
Laminate Stiffness E1	55459.1
Laminate Stiffness E2	55459.1
Out of Plane Shear G23	2282.57
Out of Plane Shear G31	2282.57
Shear Correction Factor k44 (G23)	0.845397
Shear Correction Factor k55 (G31)	0.845397

**Ilustración 6.13. Propiedades del apilamiento de capas. Fuente: Propia.**

Se muestra la distribución de las sucesivas capas con su orientación de las fibras, obtenido un mapa polar con círculos debido a la simetría de las láminas.



**Ilustración 6.14. Diagrama Polar de apilamiento de capas. Fuente: Propia.**

Apilando las capas en ángulos simétricos, las propiedades del material resultan homogéneas en todas las direcciones.

## 6.4.2 Análisis estructural estático: Fibra de carbono

### 6.4.2.1 Malla:

Se ha buscado un mallado lo más refinado posible siendo homogéneo por todas las caras. El tipo de elementos es de geometría triangular. En las siguientes ilustraciones se muestra el mallado obtenido de las diferentes caras y del perfil.

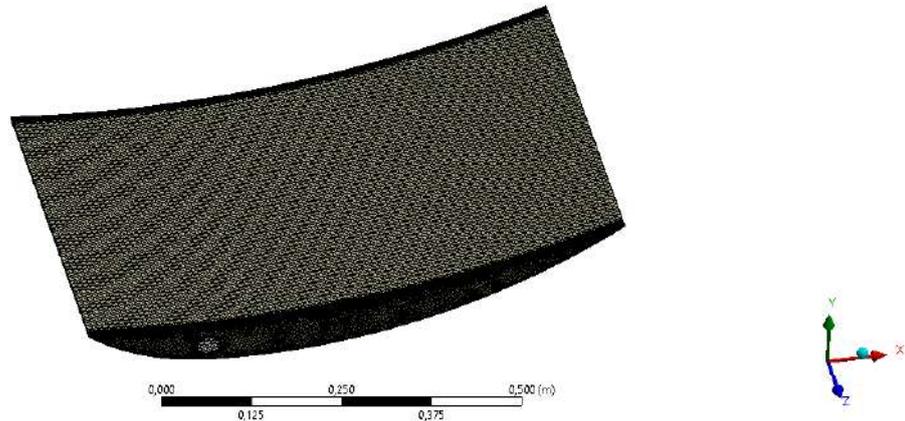


Ilustración 6.15. Malla, parte superior. Fuente: Propia.

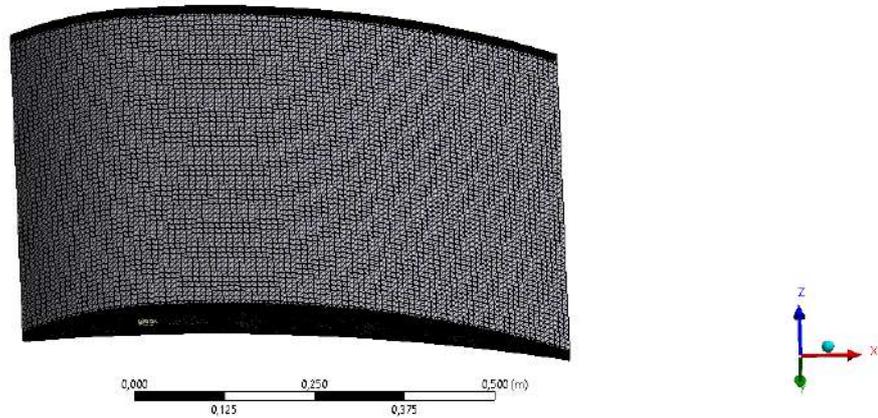


Ilustración 6.16. Malla, parte inferior. Fuente: Propia.

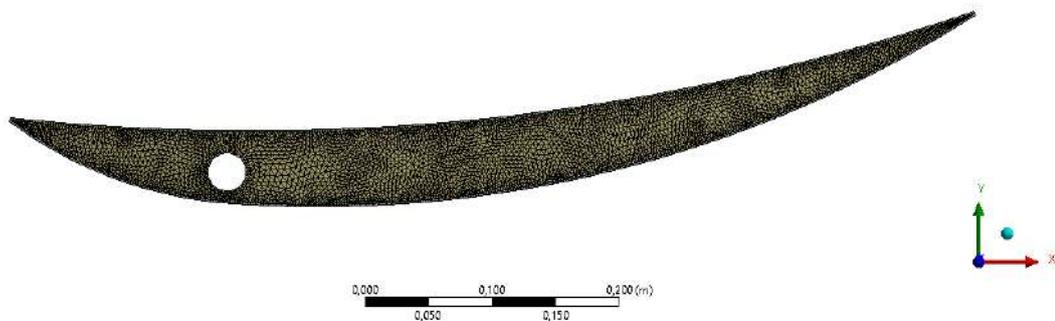
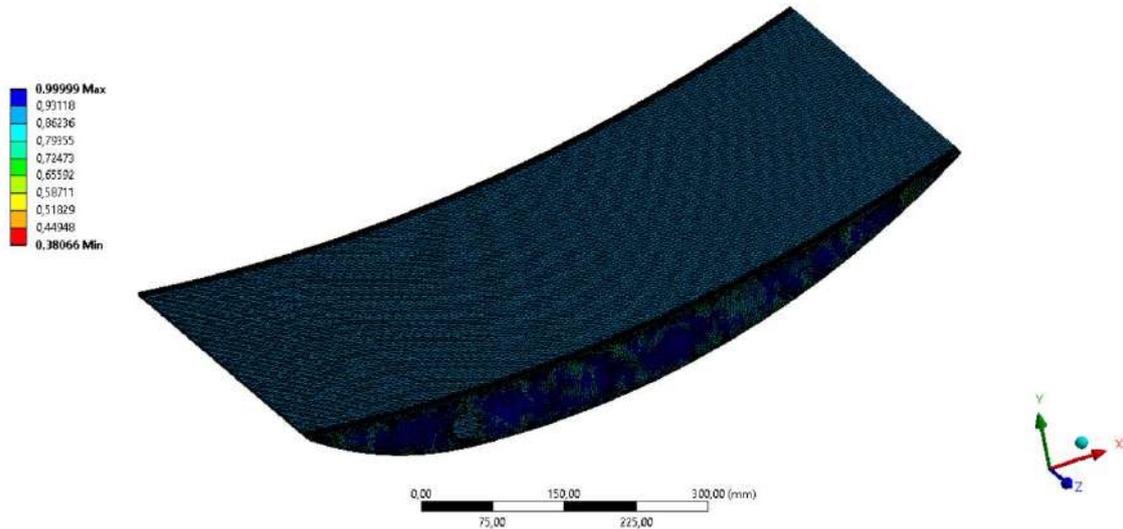
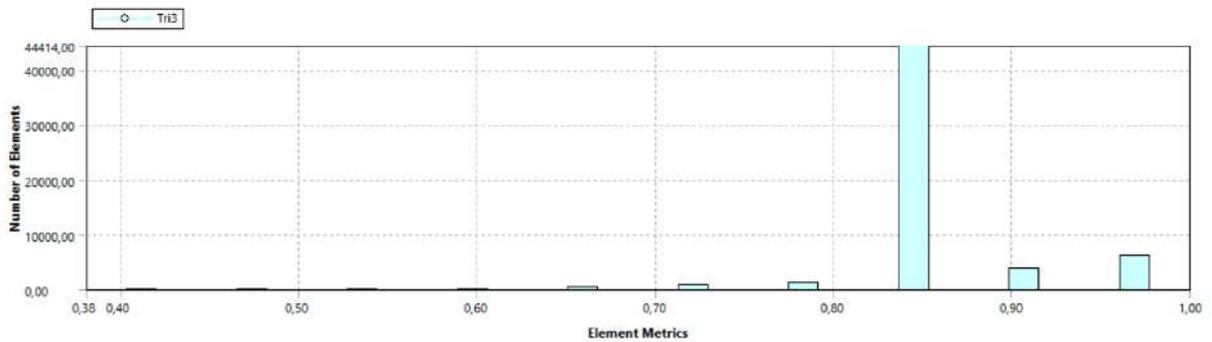


Ilustración 6.17. Malla, perfil. Fuente: Propia.

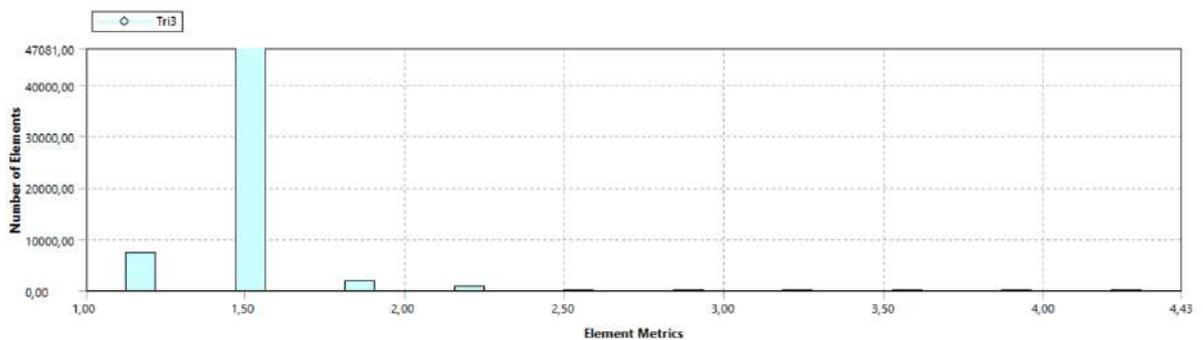
Para analizar la calidad de la malla obtenida, se muestran las siguientes gráficas:



**Ilustración 6.18. Calidad de los elementos. Fuente: Propia.**



**Ilustración 6.19. Distribución del número de elementos. Fuente: Propia.**



**Ilustración 6.20. Relación de aspecto. Fuente: Propia.**

Como se puede observar los parámetros estadísticos nos revelan la calidad del mallado.

### 6.4.2.2 Cargas:

Se ha procedido a colocar las condiciones de contorno para resolver las cargas que va soportar el alerón, para ello se ha impuesto un soporte fijo en el eje de rotación y una presión de 3,000 Pa en la cara superior del flap.

#### Soporte fijo:

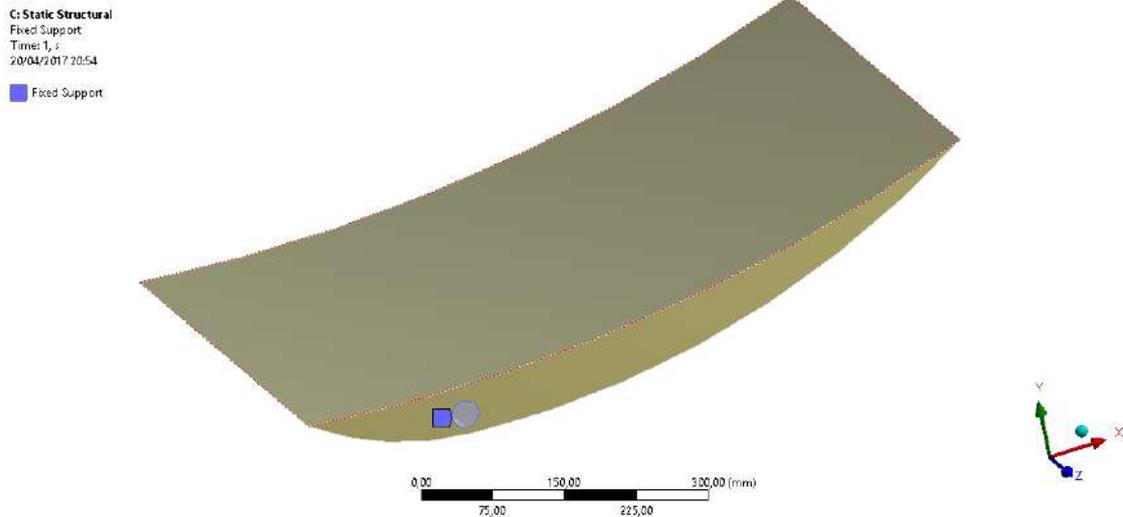


Ilustración 6.21. Soporte Fijo en el eje. Fuente: Propia.

#### Presión: 3,000 Pa

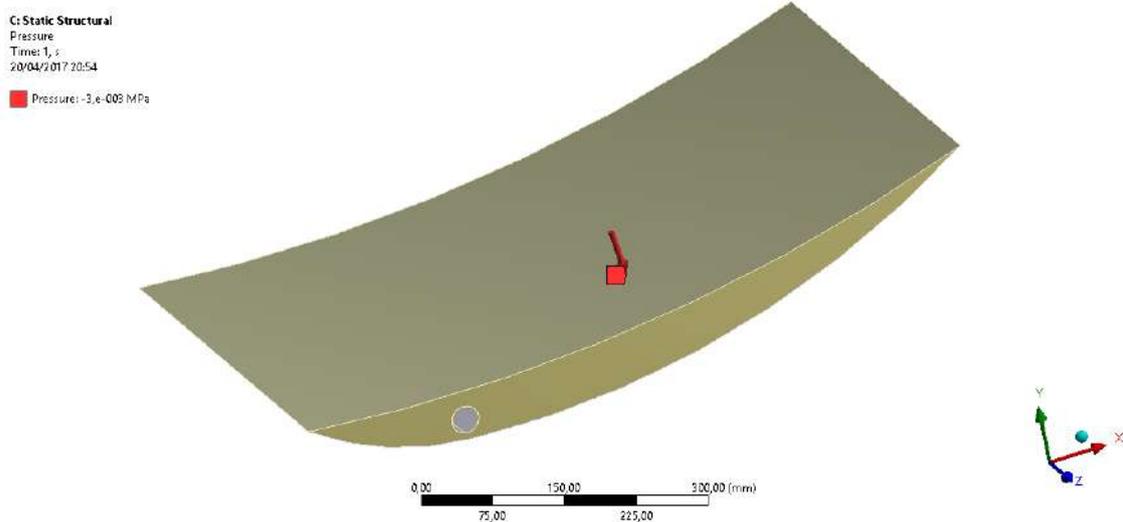


Ilustración 6.22. Presión máxima del aire obtenida en Ansys Fluent. Fuente: Propia.

Resultados del módulo de análisis estructural estático:

La mayor deformación, como era de esperar se produce en la zona más alejada del eje de rotación del alerón.

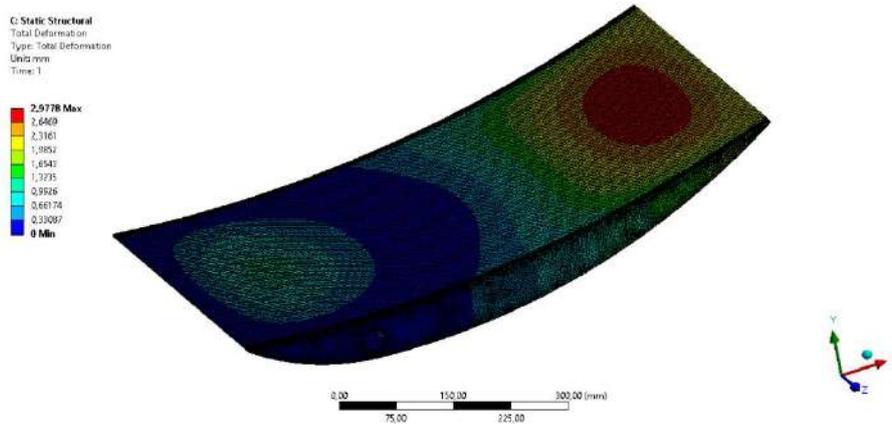


Ilustración 6.23. Deformación [mm]. Fuente: Propia.

Alrededor del eje es donde se localizan las mayores tensiones, siendo adecuado reforzar esta zona con más capas de material o con otros elementos metálicos.

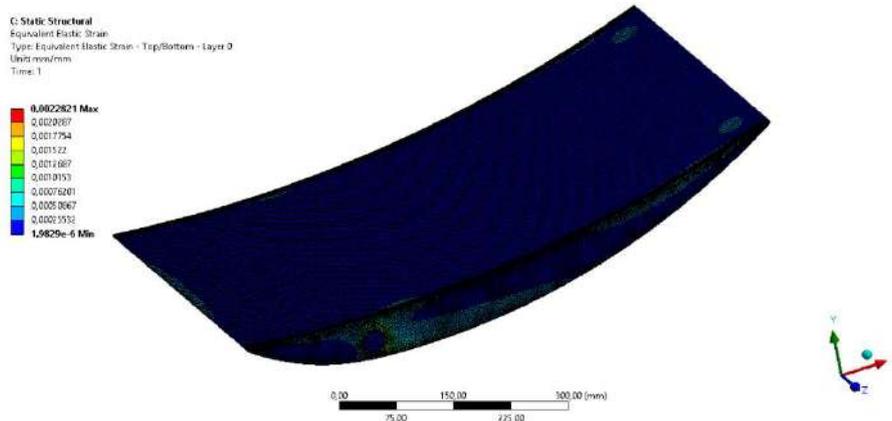


Ilustración 6.24 Equivalent Elastic Strain [mm/mm]. Fuente: Propia.

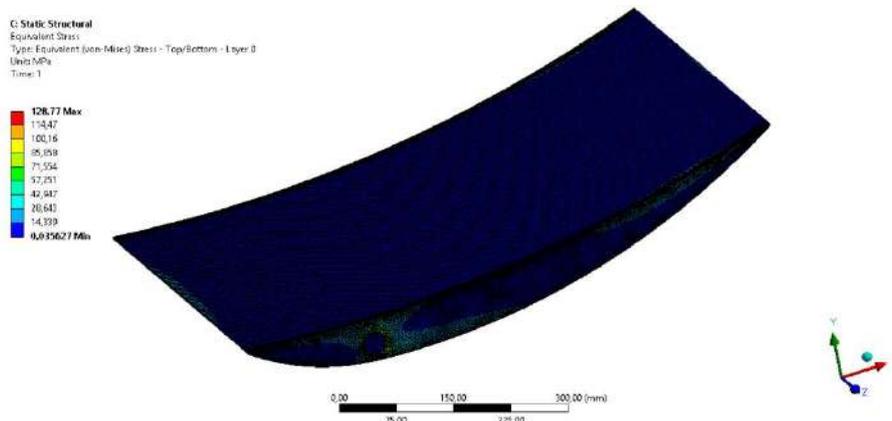


Ilustración 6.25. Tensión Mecánica [MPa]. Fuente: Propia.

### 6.4.3 ACP (Post)

En esta sección de la simulación del proceso de fabricación se va a analizar cada uno de los esfuerzos en las sucesivas capas mediante el módulo denominado: ACP (Post).

Inicialmente, se introducen todos los materiales que se van a emplear. Posteriormente se crea la tela de dicho material. Finalmente se hace un apilamiento de las diferentes capas, en cada una se introduce la orientación de las fibras.

Se seleccionan las caras de los planos a partir de los cuales se apilan las diferentes láminas de fibra de carbono, así como la orientación en las que se superponen.

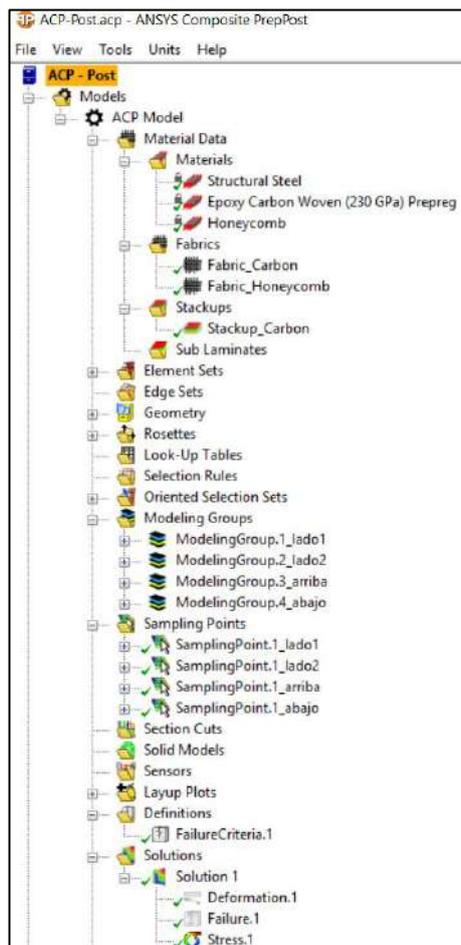


Ilustración 6.26. Árbol de operaciones en ACP-Post. Fuente: Propia.

### 6.4.3.1 Deformación [mm]

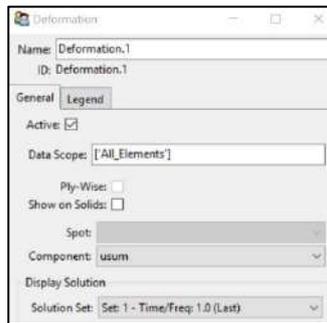


Ilustración 6.27. Parámetros para deformación. Fuente: Propia.

La zona más vulnerable a la deformación se representa en color rojo, coincide con la región más alejada del eje de rotación del alerón, y es la parte más expuesta al flujo del aire.

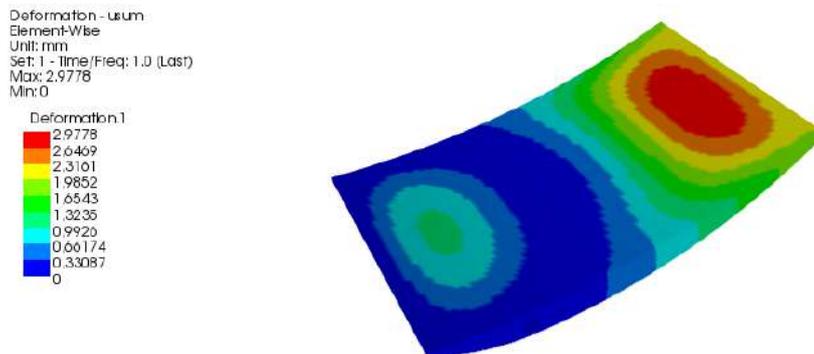


Ilustración 6.28. Deformación [mm] de la parte superior. Fuente: Propia.

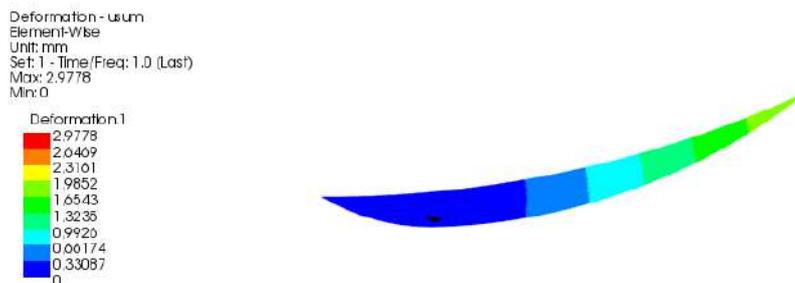


Ilustración 6.29. Deformación [mm] del perfil. Fuente: Propia.

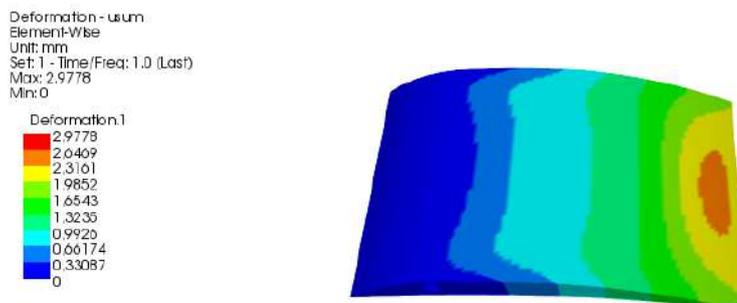


Ilustración 6.30. Deformación [mm] de la parte inferior. Fuente: Propia.

### 6.4.3.2 Criterio de fallo:

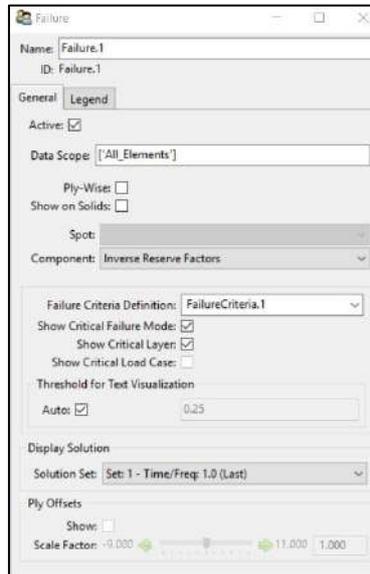


Ilustración 6.31. Parámetros para criterio de fallo. Fuente: Propia.



Ilustración 6.32. Criterio de fallo. Fuente: Propia.

Se utiliza el criterio de fallo para determinar si soporta los esfuerzos dinámicos a los que está expuesta la pieza configurada con el suficiente número de capas de material. En caso de que el criterio de fallo nos salga positivo, será necesario aumentar la cantidad de láminas hasta que sea el apropiado para resistir las cargas a las que ha sido sometida.

El resultado del criterio de fallo es nulo, predominando el color azul oscuro como se observa en la imagen, por lo que es correcto el número de capas previsto.

### 6.4.3.3 Tensión:

Preparado el material en una disposición de capas superpuestas, se procede al análisis de tensiones de cada lamina, sometidas a las cargas.

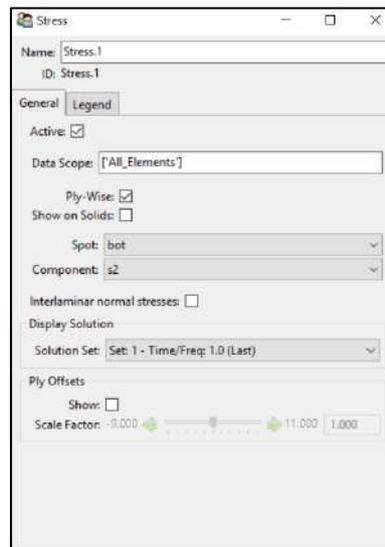


Ilustración 6.33. Parámetros para la tensión. Fuente: Propia.

Capa:	Angulo [°]	Máxima tensión mecánica [MPa]
1	0	51.9
2	45	47.5
3	-45	81.1
4	90	72.8
5	90	72.5
6	-45	77.7
7	45	56.5
8	0	55.6

Tabla 6.1 Máxima tensión mecánica [MPa]. Fuente: Propia.

La máxima tensión mecánica se produce en las capas internas. Las peores zonas, en donde se encuentra la tensión mayor es en las zonas próximas al orificio, donde irá el eje para la rotación del flap. En definitiva, la capa 3 [-45] es la que más sufre en general, por lo que se podría publicar esta capa en esa dirección.

6.4.3.3.1 Perfil del flap

En las siguientes gráficas se muestra la distribución de la tensión por las diferentes capas, localizándose la máxima tensión en las proximidades al eje de rotación. La máxima tensión se ejerce en la tercera capa con un valor de 81.1 MPa y con una orientación de las fibras de  $-45^\circ$ .

Stress - s2 - bot  
Ply-Wise  
Unit: MPa  
Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)  
Max: 51.919  
Min: -54.807

Selection:  
AP - P1L1\_ModelingPly.2

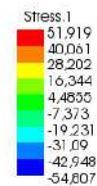


Ilustración 6.34. Perfil del flap. Capa-1. Fuente: Propia.

Stress - s2 - bot  
Ply-Wise  
Unit: MPa  
Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)  
Max: 47.482  
Min: -91.708

Selection:  
AP - P1L2\_ModelingPly.2

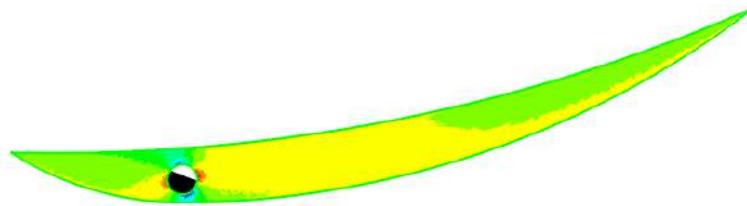
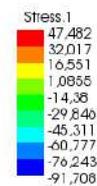


Ilustración 6.35. Perfil del flap. Capa-2. Fuente: Propia.

Stress - s2 - bot  
Ply-Wise  
Unit: MPa  
Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)  
Max: 81.123  
Min: -74.867

Selection:  
AP - P1L3\_ModelingPly.2

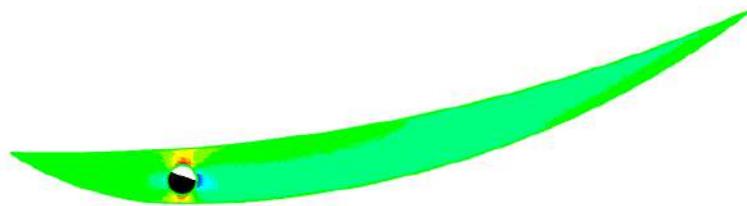
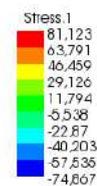


Ilustración 6.36. Perfil del flap. Capa-3. Fuente: Propia.

Stress - s2 - bot  
Ply-Wise  
Unit: MPa  
Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)  
Max: 72.77  
Min: -98.777

Selection:  
AP - P1L4\_ModelingPly.2

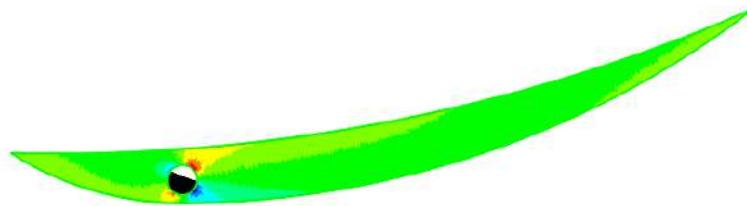
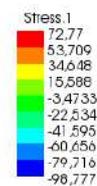
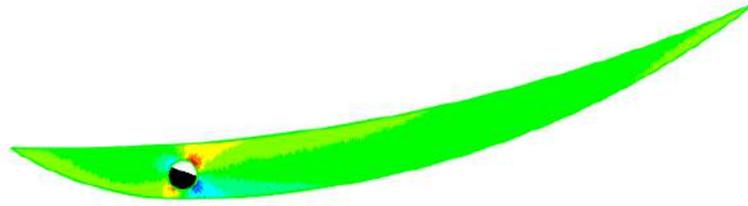
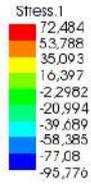


Ilustración 6.37. Perfil del flap. Capa-4. Fuente: Propia.

Stress - s2 - bot  
 Ply-Wke  
 Unit: MPa  
 Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)  
 Max: 72.484  
 Min: -95.776

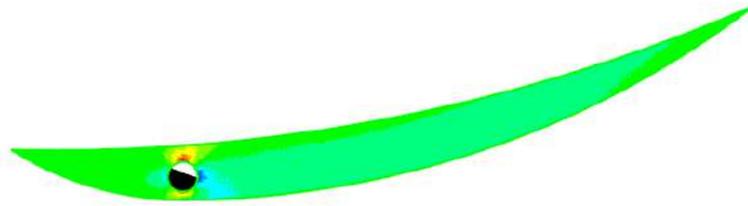
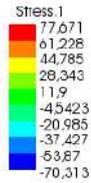
Selection:  
 AP - P1L5\_ModelingPly.2



**Ilustración 6.38. Perfil del flap. Capa-5. Fuente: Propia.**

Stress - s2 - bot  
 Ply-Wke  
 Unit: MPa  
 Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)  
 Max: 77.671  
 Min: -70.313

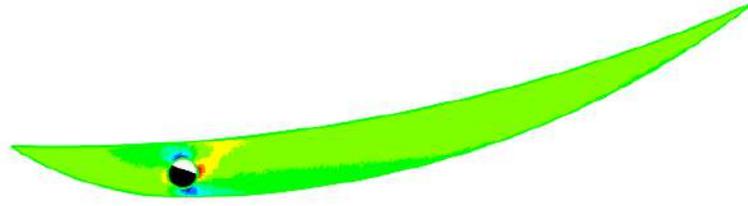
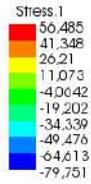
Selection:  
 AP - P1L6\_ModelingPly.2



**Ilustración 6.39. Perfil del flap. Capa-6. Fuente: Propia.**

Stress - s2 - bot  
 Ply-Wke  
 Unit: MPa  
 Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)  
 Max: 60.485  
 Min: -79.751

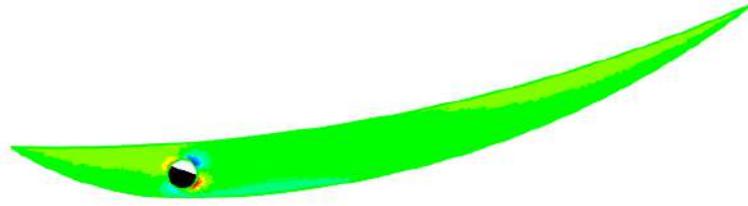
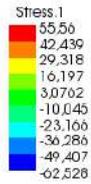
Selection:  
 AP - P1L7\_ModelingPly.2



**Ilustración 6.40. Perfil del flap. Capa-7. Fuente: Propia.**

Stress - s2 - bot  
 Ply-Wke  
 Unit: MPa  
 Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)  
 Max: 55.56  
 Min: -62.528

Selection:  
 AP - P1L8\_ModelingPly.2



**Ilustración 6.41. Perfil del flap. Capa-8. Fuente: Propia.**

6.4.3.3.2 Parte superior del flap

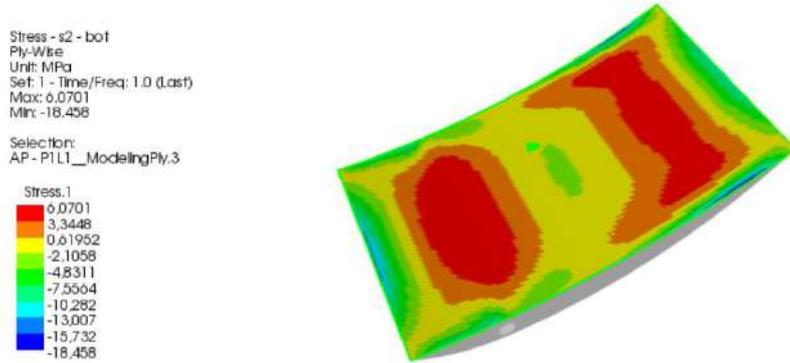


Ilustración 6.42. Parte superior del flap. Capa-1. Fuente: Propia.

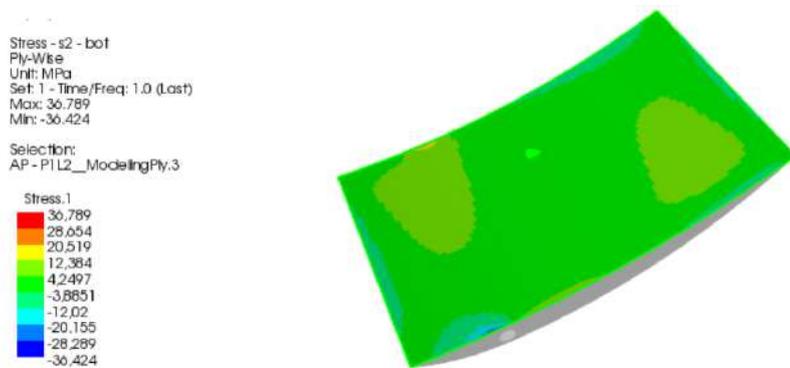


Ilustración 6.43. Parte superior del flap. Capa-2. Fuente: Propia.

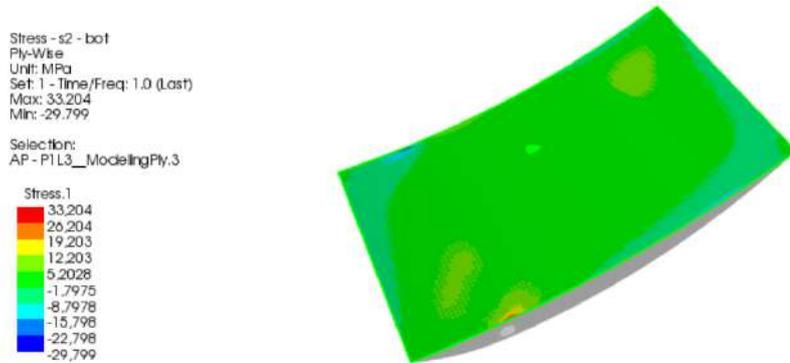


Ilustración 6.44. Parte superior del flap. Capa-3. Fuente: Propia.

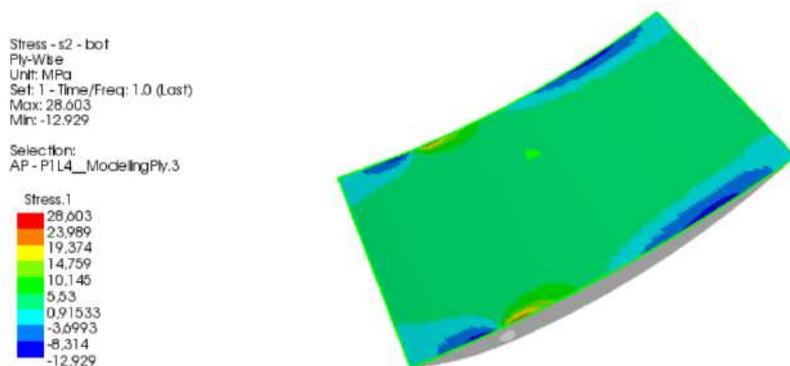


Ilustración 6.45. Parte superior del flap. Capa-4. Fuente: Propia.

Stress - s2 - bot  
 Ply-Wise  
 Unit: MPa  
 Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)  
 Max: 28.093  
 Min: -12.734

Selection:  
 AP - P1L5\_ModelingPly.3

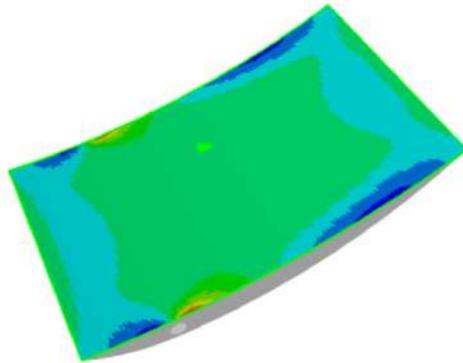
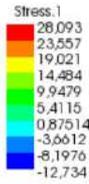


Ilustración 6.46. Parte superior del flap. Capa-5. Fuente: Propia.

Stress - s2 - bot  
 Ply-Wise  
 Unit: MPa  
 Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)  
 Max: 22.649  
 Min: -11.258

Selection:  
 AP - P1L6\_ModelingPly.3

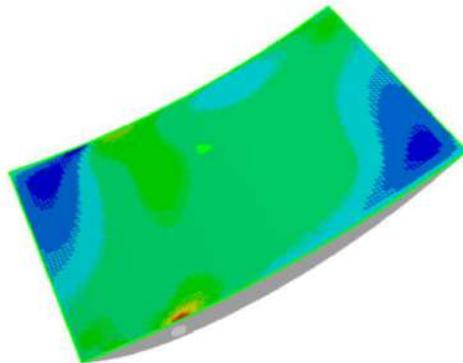
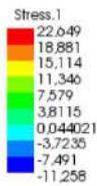


Ilustración 6.47. Parte superior del flap. Capa-6. Fuente: Propia.

Stress - s2 - bot  
 Ply-Wise  
 Unit: MPa  
 Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)  
 Max: 20.409  
 Min: -10.762

Selection:  
 AP - P1L7\_ModelingPly.3

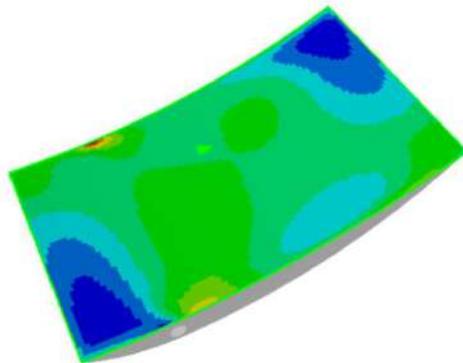
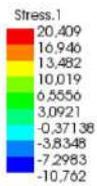


Ilustración 6.48. Parte superior del flap. Capa-7. Fuente: Propia.

Stress - s2 - bot  
 Ply-Wise  
 Unit: MPa  
 Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)  
 Max: 25.739  
 Min: -14.077

Selection:  
 AP - P1L8\_ModelingPly.3

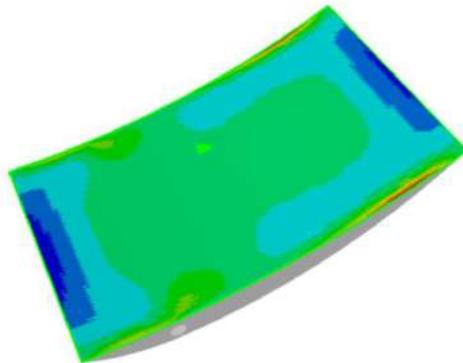
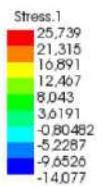


Ilustración 6.49. Parte superior del flap. Capa-8. Fuente: Propia.

## 6.4.4 Análisis estructural estático: Acero [e=2 mm]

### 6.4.4.1 Deformación [mm]

La deformación se define como la variación de las respectivas posiciones de las partículas en reposo de la pieza ejercida por fuerzas externas, en este caso la presión que desempeña el flujo del aire.

En los siguientes fotogramas, se comprueba que la región con mayor deformación, se muestra en color rojo, coincide con la parte de máxima exposición al flujo y la más alejada del soporte o apoyo del eje de rotación.

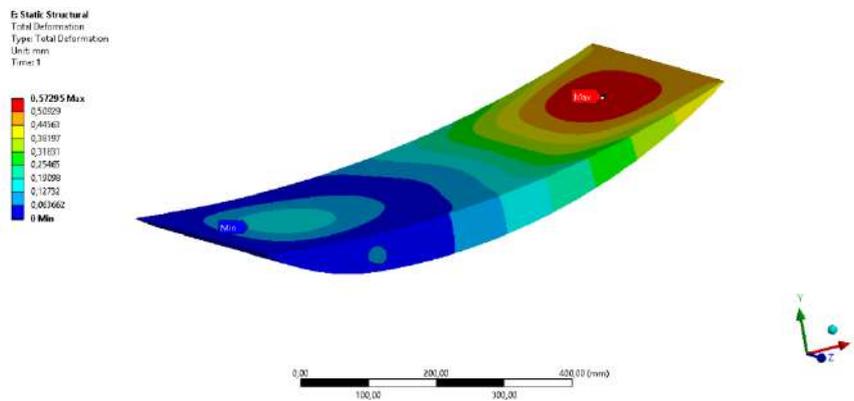


Ilustración 6.50. Deformación en parte superior del flap. Fuente: Propia.

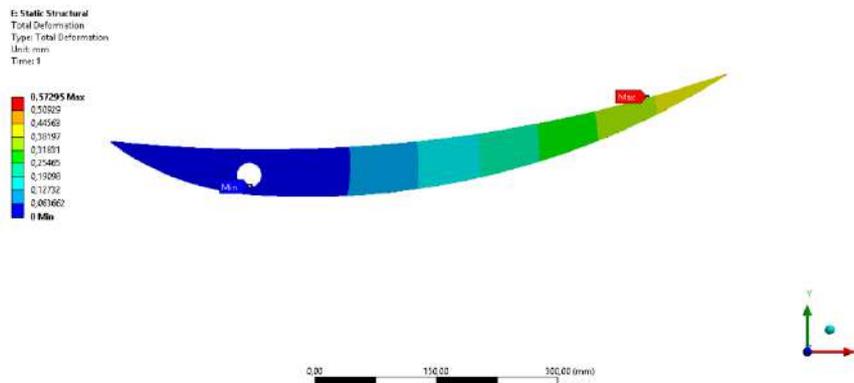


Ilustración 6.51. Deformación en perfil del flap. Fuente: Propia.

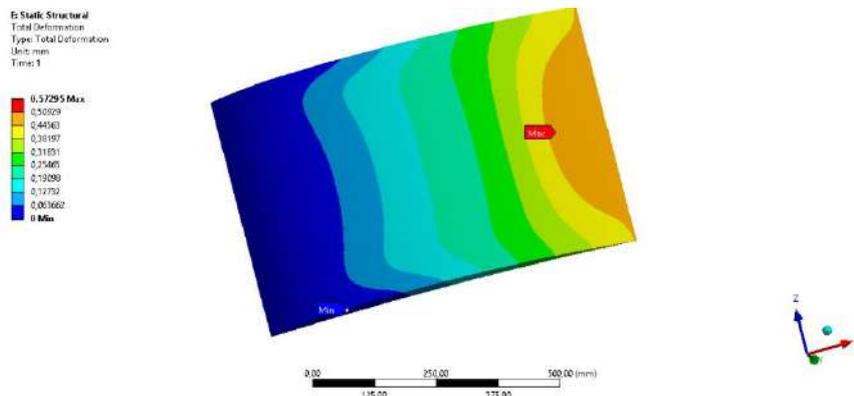


Ilustración 6.52. Deformación en parte inferior del flap. Fuente: Propia.

#### 6.4.4.2 Tensión Mecánica:

Para el análisis estructural de la tensión se ha utilizado el criterio de Von Mises que es un indicativo del trabajo que realizan las fuerzas exteriores por dicha deformación.

A continuación, en las imágenes se visualiza en color rojo, una pequeña región de la superficie de la pieza en estudio, la cual está sometida a la máxima tensión. Localizada en el eje de rotación de la pieza.

Según los cálculos efectuados el resultado de la tensión mecánica en este punto es de 89.5 MPa.

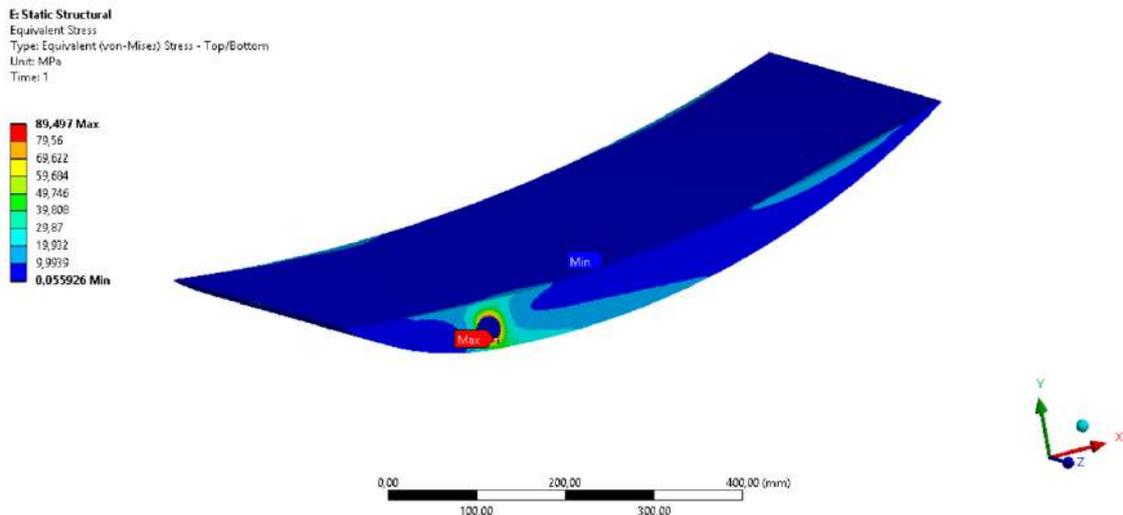


Ilustración 6.53. Tensión mecánica en flap. Fuente: Propia.

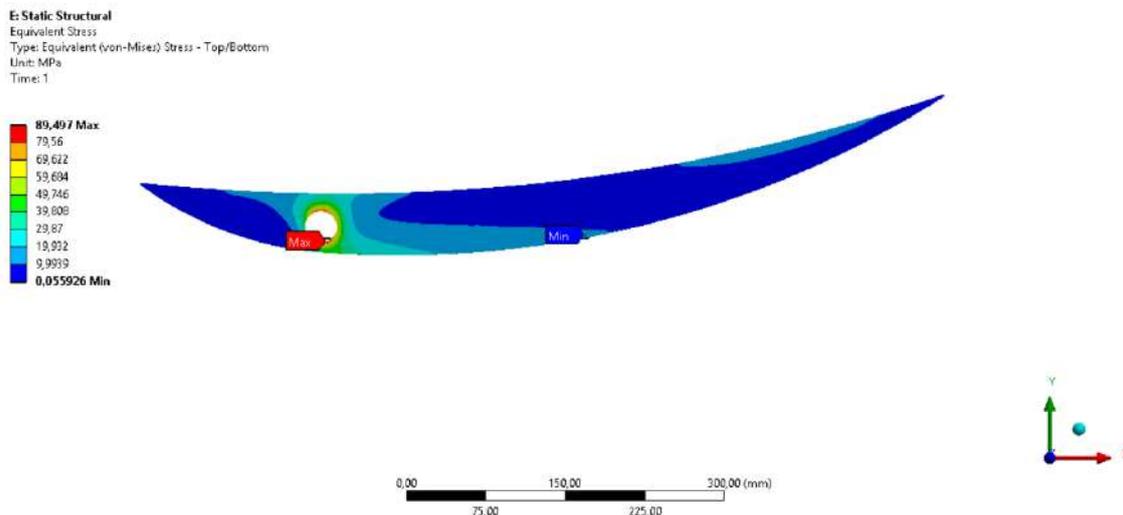


Ilustración 6.54. Tensión mecánica del perfil del flap. Fuente: Propia.

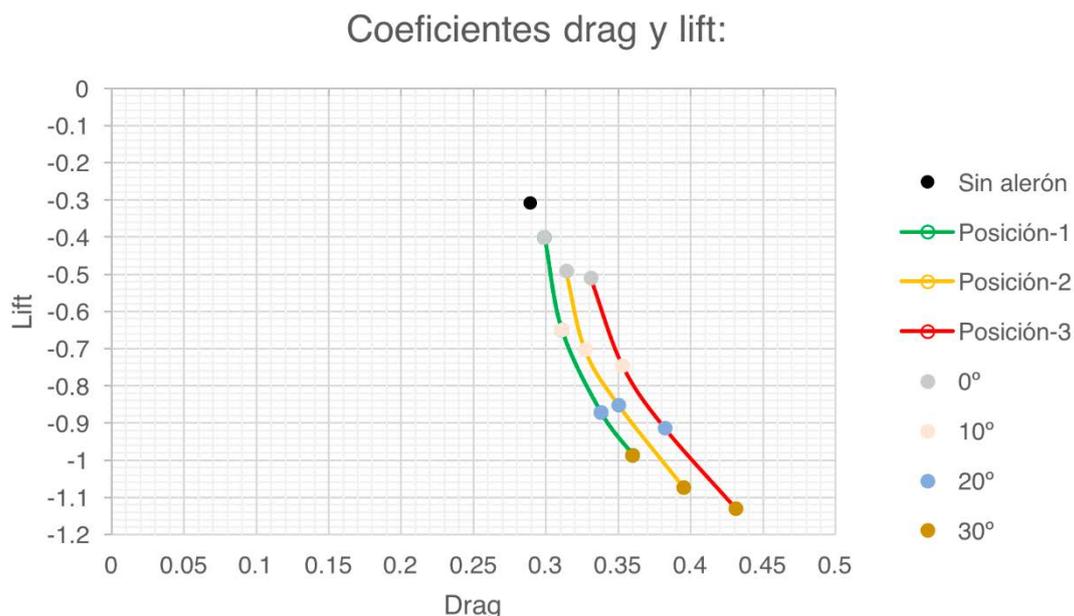


## 7 Conclusiones

Después de analizar los diferentes resultados obtenidos, se ha podido comprobar que el objetivo fundamental que se pretendía en este proyecto se ha cumplido, porque la actuación del alerón en diferentes situaciones puede mejorar la dinámica, concretamente el agarre del vehículo en las frenadas y en el trazado de curvas.

Se ha realizado dos tipos de simulaciones, para conocer el régimen del fluido alrededor del perfil del vehículo y del alerón; en el modelo dinámico se ha ido modificando la orientación del alerón respecto del vehículo, y se evidencia que este giro brusco del flap genera un aumento de vórtices y remolinos justo debajo del mismo. En comparativa con la simulación estática, el alerón permanece en una posición constante en el tiempo, resultando el flujo más homogéneo y con menos turbulencias. También se puede deducir que la simulación dinámica es más realista, observando el efecto del alerón al cambiar su posición rápidamente con la actuación de un sistema hidráulico a una potencia constante.

En la simulación estática se ha estudiado la aerodinámica, colocando el alerón en tres posiciones diferentes con respecto al vehículo, y de cada una de estas disposiciones se analiza el alerón con cuatro tipos de orientación ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  y  $30^\circ$ ). Dando como resultados los coeficientes aerodinámicos en la siguiente gráfica:



Gráfica 7.1 Coeficientes drag y lift. Fuente: Propia.

Como se puede observar, a medida que el alerón se sitúa más próximo al borde trasero del vehículo, aumentan considerablemente los coeficientes aerodinámicos, tanto el drag como el lift; variando en mayor proporción el coeficiente lift que el drag. Esto es debido a que detrás del vehículo se generan grandes depresiones, deduciendo que cuanto más cercano se disponga el alerón del borde, la diferencia de presión entre la parte superior e inferior será mucho más considerable. Después de procesar las distintas disposiciones del alerón y sus respectivas orientaciones, se concluye que en la tercera posición con una orientación de  $30^\circ$ , es la situación en la que se obtienen mayores fuerzas aerodinámicas. Es decir, cuando el alerón está más próximo al borde y en un ángulo mayor, se genera un elevado arrastre y mejor sustentación o agarre del coche con el pavimento.

Tanto en la aceleración como en la frenada lo más beneficioso es conseguir el máximo agarre, para evitar que las ruedas deslicen. En la aceleración se intenta obtener el menor arrastre, mientras que, en la frenada se quiere conseguir el máximo arrastre para aumentar la potencia de frenada.

Con este alerón móvil dividido en dos partes, se ha comprobado que, en las rectas, cuando la orientación esta en reposo o de  $0^\circ$ , se consigue el menor arrastre, mientras que, al tomar una curva se levanta el flap correspondiente, situado en la posición más cercana al centro de giro, para generar las fuerzas y momentos dinámicos que dotan al vehículo de la capacidad para trazar la curva a una mayor velocidad.

En los casos de simulación con la orientación de  $30^\circ$ , la tercera posición es la que menor eficiencia posee, eso se debe a que tiene el menor cociente entre los coeficientes aerodinámicos lift y drag. A pesar de la ventaja de este tipo de alerón en las curvas, es necesario frenar antes de trazar la curva, por lo que se desea maximizar tanto el arrastre como el agarre. La gráfica de eficiencia puede generar confusión, ya que el escenario óptimo es el máximo de ambos coeficientes aerodinámicos, siendo la tercera posición en la que se generan mayores fuerzas aerodinámicas.

Para el análisis de la estabilidad, se han tenido en cuenta todas las fuerzas que actúan en la dinámica del vehículo. Se han considerado la fuerza centrífuga debido a la curva, el peso del vehículo, las respectivas normales y fuerzas de rozamiento con el suelo. Se ha mantenido la hipótesis de simetría respecto las fuerzas de las ruedas delanteras y traseras, sin embargo, entre el lado izquierdo y derecho, se define diferencias debido a la trayectoria curva.

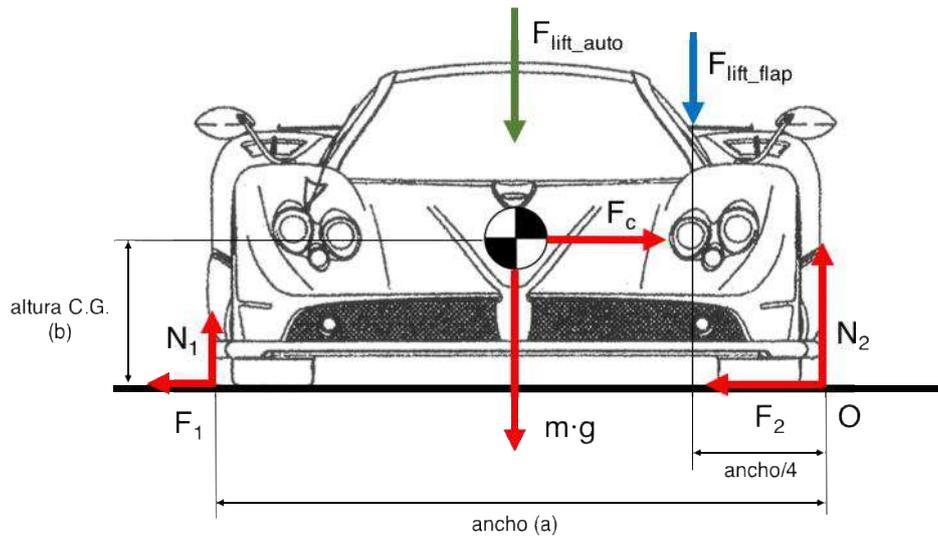


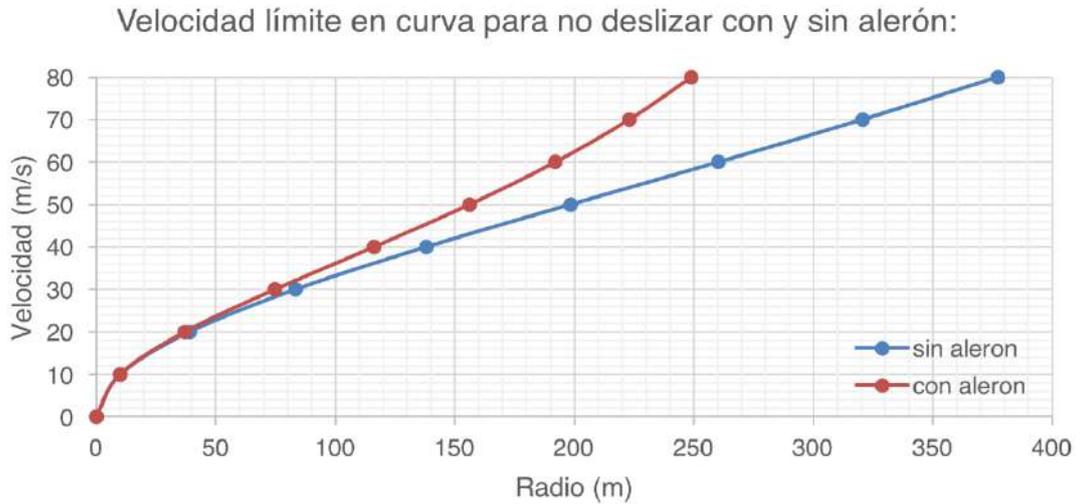
Ilustración 7.1 Diagrama de fuerzas en el alzado. Fuente: Propia.

Respecto a las fuerzas aerodinámicas, se distinguen las que actúan debido a la geometría del coche y las que actúan en el alerón; considerado estas últimas como la diferencia entre las fuerzas generadas en la posición de orientación de cero grados, con la máxima de treinta grados.

Para el análisis de la estabilidad del vehículo, se ha estudiado el caso de deslizamiento y vuelco. La condición para que el vehículo no deslice es que las fuerzas de rozamiento sean superiores a la fuerza centrífuga, considerando la situación límite antes del deslizamiento en la cual se igualan. Por otro lado, la condición límite para que el vehículo comience a volcar, es aquella cuando la normal se anula en las ruedas más alejadas del centro de la curva.

Para la posición de máxima actuación del alerón con orientación de  $30^\circ$ , se ha concluido que existe un mayor peligro de deslizamiento, y no de vuelco, pues el estudio realizado determina que, a velocidades máximas en función del radio de curvatura, el resultado es muy restrictivo, limitando la velocidad en el trazado de la curva. Esta analítica se establece cuando el centro de gravedad se sitúa muy próximo al suelo, mientras que, en una posición más alta, se llegaría antes al vuelco.

Se puede comprobar que la actuación del alerón crece exponencialmente a medida que la velocidad se incrementa, de lo cual se concluye que a altas velocidades su efecto es bastante considerable, aumentando hasta un 20% la velocidad máxima para evitar deslizamiento en un mismo radio de curva. Sin embargo, a bajas velocidades se puede considerar su efecto como despreciable debido a las inapreciables fuerzas aerodinámicas que genera el alerón.



**Gráfica 7.2 Velocidad en función del radio de la curva para no deslizar con y sin alerón. Fuente: Propia.**

Para recrear un escenario semejante a la realidad, se ha efectuado una simulación mediante el programa veDYNA donde se establece una situación de una curva con un radio constante, concretamente, una circunferencia con radio de 25 m. Ha sido necesario aplicar al modelo del vehículo, unas fuerzas y momentos externos, que son las proporcionadas por la actuación del alerón. Los resultados de los tiempos obtenidos, para completar la circunferencia, son considerablemente de menor valor cuando el alerón se activa mientras que en el caso de estar en orientación nula. Para considerar una mayor semejanza a la realidad de un circuito con los efectos del alerón, es necesario incrementar el número de parámetros, tanto del vehículo como del circuito.

El material propuesto para la fabricación del alerón, es la fibra de carbono, puesto que, es el más adecuado por su elevada resistencia y ligereza de peso. Este material tan liviano implica que el alerón pueda variar su orientación más rápidamente y con menor potencia del sistema de la actuación hidráulica. El único inconveniente que se procede es el elevado precio del proceso de fabricación, ya que es necesario fabricar un molde específico con el negativo de la geometría.



## 8 Futuros desarrollos

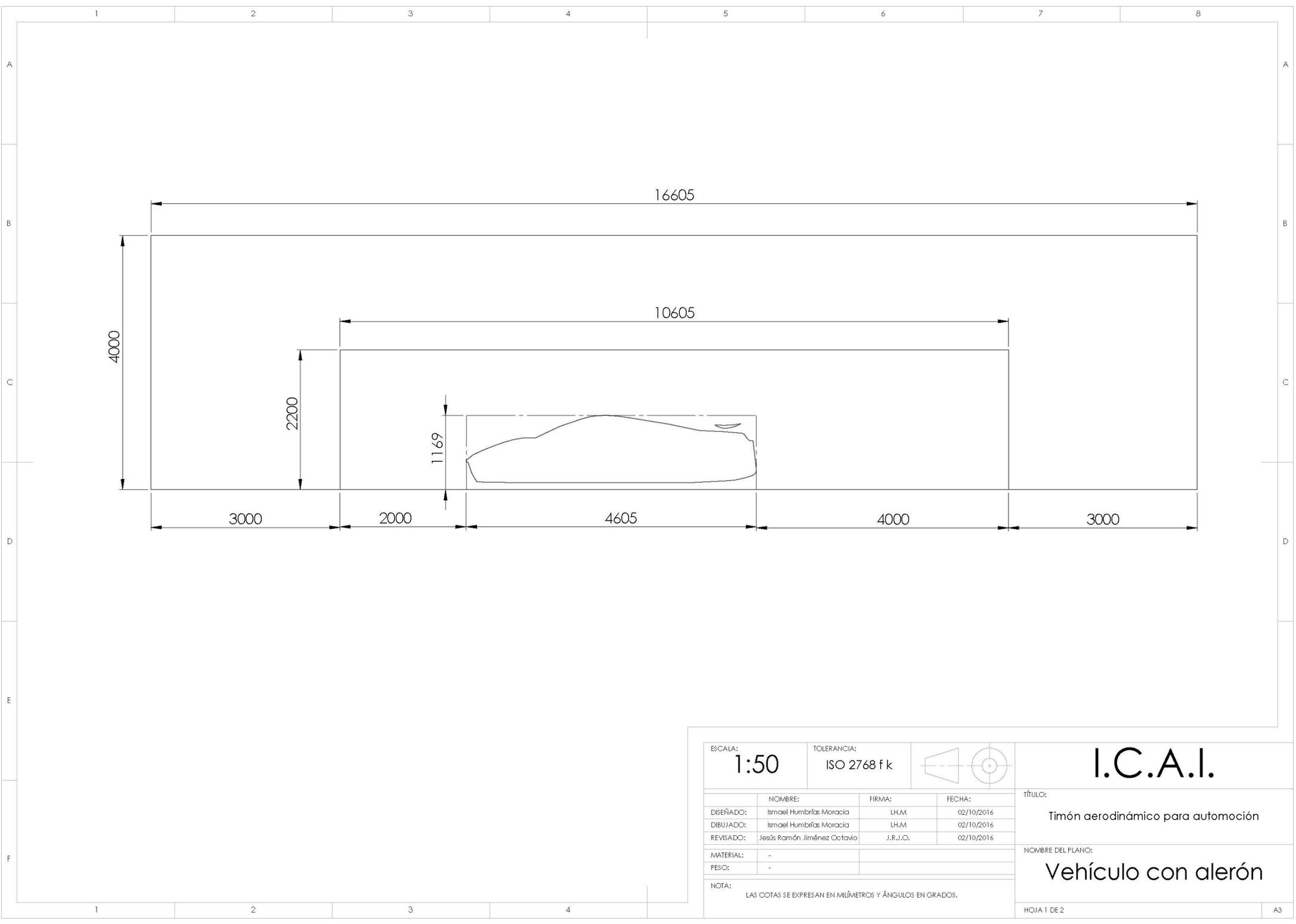
En un futuro se podrían efectuar una serie de mejoras al presente proyecto, que nos daría un resultado más cercano a la situación real, como pueden ser:

- Emplear herramientas de computación más potentes, de tal manera que, se podría simular la geometría en tres dimensiones (3D), consiguiendo analíticas más complejas, que darían resultados más certeros y semejantes a la realidad.
- También sería posible aumentar el número de simulaciones dinámicas para comprobar el efecto real del alerón en su actuación.
- Con la simulación de la dinámica del vehículo, se visualizaría el resultado del tiempo por vuelta en circuitos reales, pero sería necesario, introducir muchísimos más parámetros.
- Crear el modelo de la dinámica del vehículo para la centralita del automóvil, en la cual se tomará la decisión de la orientación más apropiada del alerón. Esta se determinará siempre, en función de unos determinados parámetros, como pueden ser la falta de agarre que reflejan ciertos neumáticos, el grado de inclinación de la dirección, la velocidad, el radio de curvatura respecto a la trayectoria tomada en la curva que puede ser obtenida por el registro de datos del navegador GPS.
- Analizar las vibraciones del alerón en su actuación, que pueden generar variaciones en los resultados obtenidos de la simulación.
- Plantear otros escenarios con unas diferentes condiciones ambientales. Así como adversidades climatológicas de lluvia, nieve, ráfagas de viento, etc.

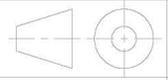




**PARTE IV**  
**PLANOS**



ESCALA: **1:50** TOLERANCIA: ISO 2768 f k



**I.C.A.I.**

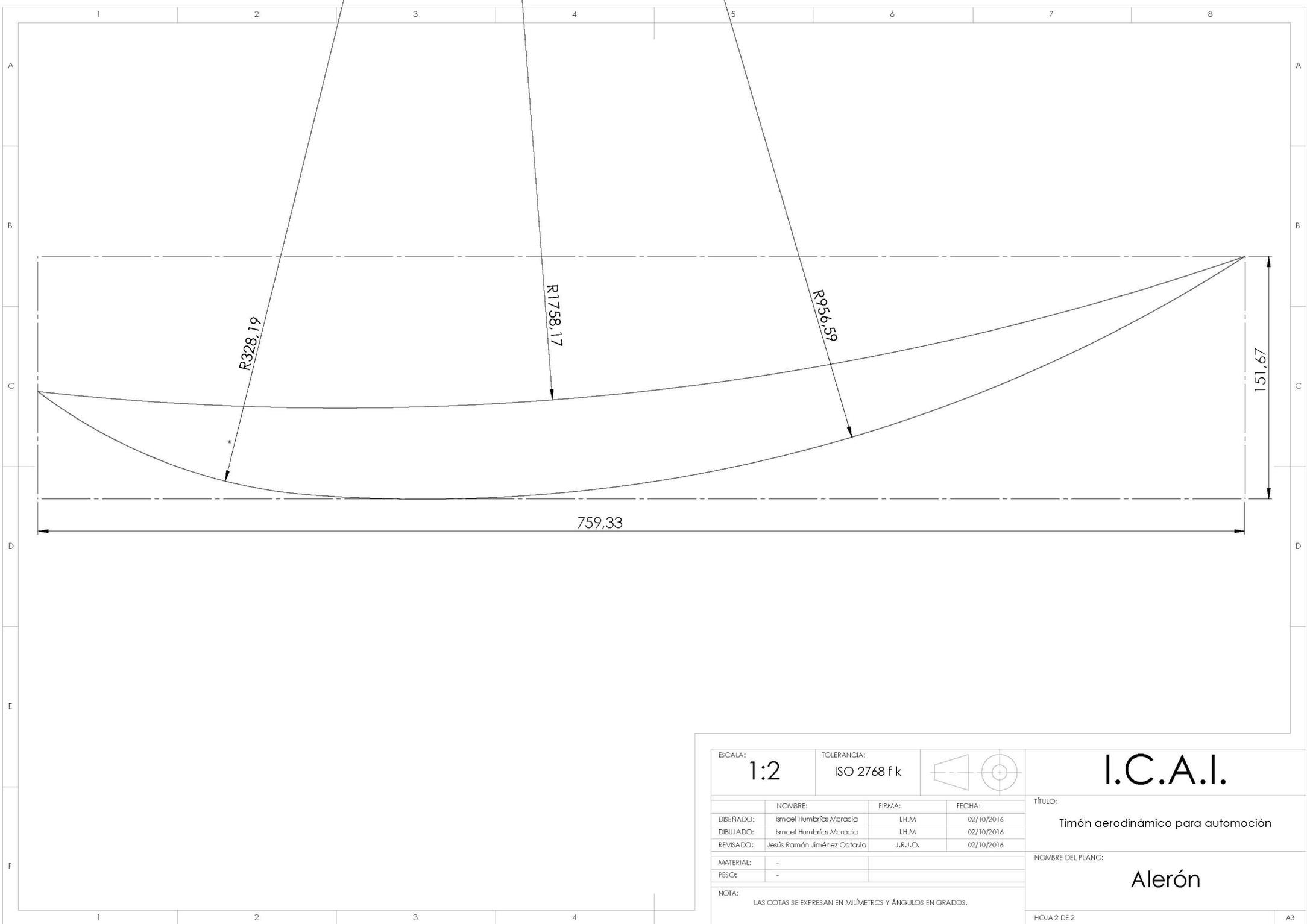
	NOMBRE:	FIRMA:	FECHA:
DISEÑADO:	Ismael Humberías Moracia	I.H.M.	02/10/2016
DIBUJADO:	Ismael Humberías Moracia	I.H.M.	02/10/2016
REVISADO:	Jesús Ramón Jiménez Octavio	J.R.J.O.	02/10/2016

TÍTULO: **Timón aerodinámico para automoción**

MATERIAL: -  
 PESO: -

NOMBRE DEL PLANO: **Vehículo con alerón**

NOTA: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MILÍMETROS Y ÁNGULOS EN GRADOS.



ESCALA: <b>1:2</b>		TOLERANCIA: ISO 2768 f k				<b>I.C.A.I.</b>	
DISEÑADO: Ismael Humberías Moracia		FIRMA: I.H.M.		FECHA: 02/10/2016		TÍTULO: Timón aerodinámico para automoción	
DIBUJADO: Ismael Humberías Moracia		FIRMA: I.H.M.		FECHA: 02/10/2016		NOMBRE DEL PLANO: <b>Alerón</b>	
REVISADO: Jesús Ramón Jiménez Octavio		FIRMA: J.R.J.O.		FECHA: 02/10/2016			
MATERIAL: -							
PESO: -							
NOTA: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MILÍMETROS Y ÁNGULOS EN GRADOS.							
						HOJA 2 DE 2	
						A3	





## Bibliografía

### Libros

**[ISID15]** Aníbal Isidoro Carmona “Aerodinámica y actuaciones del avión” (13ª edición) Editorial: Ediciones Paraninfo S.A. , Madrid 2015. ISBN: 9788428337458

**[WHIT08]** Frank M. White “Mecánica de Fluidos” (6ª edición) Editorial: McGraw-Hill/Interamericana de España S.A.U. , Madrid 2008. ISBN:9780072938449

**[MCBE05]** Simon McBeath “Aerodinámica del automóvil de competición”  
Editorial: CEAC , Barcelona 2005. ISBN: 9788432911675

**[MILL95]** William F. Milliken and Douglas L. Milliken “Race Car Vehicle Dynamics” Editor: Society of Automotive Engineers, 1995. ISBN: 1560915269, 9781560915263

**[HUCH98]** Wolf-Heinrich Hucho. “Aerodynamics of Road Vehicles”  
Editor: SAE, 1998. ISBN: 9781483102078

**[PAUW14]** Joop Pauwelussen. “Vehicle Dynamics, Stability and Control” Editor: Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN: 0081000588, 9780081000588

**[GILL92]** Thomas Gillespie “Fundamentals of Vehicle Dynamics” Editor: Society of Automotive Engineers, 1992. ISBN: 1560911999

**[LUQU04]** Pablo Luque Rodríguez, Daniel Álvarez Mántaras, Carlos Vera. Publisher, “Ingeniería del Automóvil: Sistemas y Comportamiento Dinámico” Editorial: Ediciones Paraninfo S.A., 2004. ISBN: 9788497322829

## Artículos técnicos:

- [1] Optimización aerodinámica de los flaps trasero y delantero en un coche (Mayo, 2016):  
<http://www.dicat.unige.it/jpralits/AF2015/Relazione-A-Giannoni.pdf>
- [2] Análisis numérico de las características aerodinámicas de un coche a altas velocidades con partes móviles (2015):  
[http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-e5f2adcb-5e1c-4250-bacd-363559b0ceed/c/Janson\\_Piechna\\_Numerical\\_analysis\\_of\\_aerodynamic\\_Archive\\_of\\_Mechan\\_Eng\\_Vol\\_LXII\\_nr\\_4\\_2015.pdf](http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-e5f2adcb-5e1c-4250-bacd-363559b0ceed/c/Janson_Piechna_Numerical_analysis_of_aerodynamic_Archive_of_Mechan_Eng_Vol_LXII_nr_4_2015.pdf)
- [3] Alas sin uniones: desarrollo de materiales flexibles sin partes móviles (Noviembre, 2014):  
<http://www.industrytap.com/nasas-new-flap-jointless-wings/24581>
- [4] Estudio de investigación de los flaps en el modelo de ala, NACA 0036 (Marzo, 2011):  
<http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1554&context=theses>
- [5] Simulación de la aerodinámica de un flap para un ala (Enero, 2004)  
[http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1024&context=aero\\_fac](http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1024&context=aero_fac)
- [6] Análisis aerodinámico de un vehículo urbano mediante dinámica de fluidos computacionales aplicado a la competencia de Shell Eco Marathon (2014):  
<http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/83567.pdf>
- [7] Análisis de las propiedades aerodinámicas, efecto suelo y su aplicación en vehículos convencionales específicamente en el Chevrolet Aveo sedán como forma para aumentar la seguridad activa <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6380/1/AC-ESPEL-CDT-0995.pdf>
- [8] Elementos y dispositivos aerodinámicos en la Fórmula 1: parte central del vehículo.  
<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/24755/TFG%20memoria.pdf?sequence=1>
- [9] Diseño de un alerón de un vehículo de competición: comparación de la simulación aerodinámica numérica y la simulación aerodinámica experimental.  
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/5359/memoria.pdf>
- [10] Los túneles de viento en la fórmula 1 y estudio de un elemento aerodinámico de un coche.  
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/81501/Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>



## Patentes

- [1] Dispositivo aerodinámico variable (Febrero, 2015):  
<https://patents.google.com/patent/US8944489B2/en?q=car&q=aerodynamic&q=braking&page=1>
- [2] Dispositivo de guía del aire montado en la parte trasera de un vehículo de motor (Abril, 2007):  
<https://patents.google.com/patent/US7201432B2/en?q=car&q=aerodynamic&q=braking&page=1>
- [3] Fuerza de frenado actuado por estabilizador aerodinámico (Octubre, 2004):  
<https://patents.google.com/patent/US6805399B1/en?q=aerodynamic&q=car&q=braking&q=airflow&q=B62D37%2f02>
- [4] Sistema aerodinámico de spoiler para la seguridad de los vehículos (Octubre, 1995):  
<https://patents.google.com/patent/US5454619A/en?q=aerodynamic&q=car&q=braking&q=airflow&q=B62D37%2f02>
- [5] Dispositivo spoiler de aire (Mayo, 1990):  
<https://patents.google.com/patent/EP0367230A2/en?q=car&q=MOVABLE&q=BODYWORK>
- [6] Accionamiento móvil del estabilizador del automóvil (Julio, 1987):  
<https://patents.google.com/patent/EP0226778A2/en?q=car&q=MOVABLE&q=BODYWORK>
- [7] Estructura de la rejilla móvil del radiador (Octubre, 1983):  
<https://patents.google.com/patent/US4410032A/en?q=car&q=aerodynamic&q=braking&page=1>
- [8] Ala aerodinámica para coches de carreras (Mayo, 1970):  
<https://patents.google.com/patent/US3512825A/en?q=car&q=curve&q=movable&q=aerodynamic>

## Enlaces de interés

- [1] La carrera por construir súper autos que rompan el récord de los 500 km por hora. [http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/04/150323\\_vert\\_aut\\_carrera\\_por\\_500\\_kph\\_y\\_v](http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/04/150323_vert_aut_carrera_por_500_kph_y_v)
- [2] 10 coches cazarrécords. ¡Abrochate el cinturón! <https://www.redbull.com/pe-es/coches-mas-rapidos-del-mundo-historia-records-velocidad>
- [3] Así eran los primeros coches de carreras. <http://noticias.coches.com/noticias-motor/primeros-coches-de-carreras/206823>
- [4] Maravillas de la competición: los Fórmula 1 más especiales de la historia. <https://hipertextual.com/2015/10/mejores-coches-formula-1>
- [5] Dossier aerodinámico. <http://www.dgt.es/revista/archivo/pdf/num156-2002-dossier.pdf>
- [6] ¿Cuál es la utilidad del alerón en un automóvil? <https://www.guioteca.com/autos/cual-es-la-utilidad-del-aleron-en-un-automovil/>
- [7] La influencia de la aerodinámica. El comienzo de la era espacial. <http://f1pastandpresent.blogspot.com.es/2008/05/para-comenzar-entender-la-formula-uno.html>
- [8] La historia del automóvil foto a foto. <http://tourismisthenewblack.blogspot.com.es/2013/02/la-historia-del-automovil-foto-foto.html>
- [9] Historia del automóvil. <http://lahistoriadelautomovil.blogspot.com.es/>
- [10] Historia del automóvil. <http://www.monografias.com/trabajos15/automovil-historia/automovil-historia.shtml#ixzz4aQuEQNC>
- [11] El primer coche de la historia fue eléctrico. <https://www.ecointeligencia.com/2011/09/el-primer-coche-de-la-historia-fue-electrico/>
- [12] Etapas del automóvil. <https://sites.google.com/site/automovilhistoria/etapas-del-automovil>
- [13] Historia de la automoción. <http://1769-ultradeportivosenlahistoria.blogspot.com.es/p/la-historia-de-los-coches.html>
- [14] ¿Quién inventó el primer automóvil a gasolina? <http://www.vix.com/es/btg/curiosidades/5911/quien-invento-el-primer-automovil-a-gasolina>
- [15] Aerodinámica. <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/aerodinamica-definicion-significado/gmx-niv15-con73.htm>
- [16] Técnica: Lo que hay que saber sobre un F1. <http://www.taringa.net/posts/autos-motos/15314272/Tecnica-Lo-que-hay-que-saber-sobre-un-F1-P2.html>
- [17] Car and driver. <http://www.caranddriverthef1.com/formula1/blogs/angelesf1/las-placas-terminales-endplate-el-domador-vortices>
- [18] Los alerones en la Fórmula 1. <http://www.taringa.net/posts/autos-motos/12127707/Los-alerones-en-la-Formula-1.html>
- [19] No mirando a nuestro daño. <http://pilotosmuertos.blogspot.com.es/2013/08/francis-edgar-stanley-1849-1918-usa.html>
- [20] Los 34 coches más influyentes de todos los tiempos. <https://www.motorpasion.com/clasicos/los-34-coches-mas-influyentes-de-todos-los-tiempos>



- [21] Cinco elementos clave en la aerodinámica de los autos de carrera.  
<http://noticias.espanol.autocosmos.com/2015/02/06/5-elementos-clave-en-la-aerodinamica-de-los-autos-de-carrera>
- [22] Aerodinámica.  
<http://foroctr.com/docs/competicion/Aerodinamica%20del%20automovil%20de%20competicion.pdf>
- [23] Aerodinámica en la Fórmula 1. <https://prezi.com/by9te9niqaqs/aerodinamica-en-la-formula-1/>
- [24] Estudio de la aerodinámica de un vehículo.  
[http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog\\_entrada.php?entrada\\_id=89](http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog_entrada.php?entrada_id=89)
- [25] Análisis técnico – Carga aerodinámica – Downforce.  
<https://albrodpulf1.wordpress.com/2014/07/24/analisis-carga-aerodinamica-downforce/>
- [26] Determinación de tipos de flujo según Reynolds.  
<https://es.slideshare.net/edosilva/laboratorio-1-determinacin-de-tipos-de-flujo-segn-reynolds>
- [27] Ingeniería Automotriz. <http://rjose1994.blogspot.com.es/2013/07/aerodinamica-de-autos.html>
- [28] Diseño de un Formula1. <https://jasf1961.wordpress.com/tag/aleron/>
- [29] Túnel de viento, aerodinámica y Fórmula 1. <http://www.que-formula1.com/index.php/articulos-tecnicos/tunel-de-viento-aerodinamica-y-formula-1-2/>
- [30] Túnel de viento. <http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/1174435>
- [31] Túnel de viento. <http://www.f1aldia.com/10650/tuneles-de-viento-i/>
- [32] Túnel de viento. [https://es.wikipedia.org/wiki/T%C3%BAnel\\_de\\_viento](https://es.wikipedia.org/wiki/T%C3%BAnel_de_viento)
- [33] Aerodinámica. [https://es.slideshare.net/djsoti/aerodinamica-20244221?next\\_slideshow=1](https://es.slideshare.net/djsoti/aerodinamica-20244221?next_slideshow=1)
- [34] Alerones. [http://safetycar-uniradio.blogspot.com.es/2009\\_10\\_01\\_archive.html](http://safetycar-uniradio.blogspot.com.es/2009_10_01_archive.html)
- [35] Cuáles son las fuerzas que intervienen en un auto de competencia.  
<https://www.razine.com/do/espanol/contenido/fuerzas-que-intervienen-en-un-auto-de-competencia.html>
- [36] Aerodinámica básica aplicada a la F1. <https://www.formulaf1.es/4620/aerodinamica-basica-aplicada-a-la-f1/>
- [37] Dinámica de fluidos computacional.  
<https://translate.google.es/translate?hl=es&sl=en&u=http://www.formula1-dictionary.net/cfd.html&prev=search>
- [38] Túnel aerodinámico. [https://www.ecured.cu/T%C3%BAnel\\_aerodin%C3%A1mico](https://www.ecured.cu/T%C3%BAnel_aerodin%C3%A1mico)
- [39] ¿Qué es un túnel de viento? <https://www.windoor-realfly.com/es/contents/:slug-3>
- [40] El túnel de viento, el gran desconocido.  
<http://angelesenlacabeza.blogspot.com.es/2012/10/tuneles-de-viento-ese-grandesconocido.html>
- [41] Alerón. <http://www.pedrodelarosa.com/foro/index.php?showtopic=10695>
- [42] La fuerza centrífuga y la estabilidad de un vehículo.  
[http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/dinamica/circular/din\\_circular.htm](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/dinamica/circular/din_circular.htm)

## Glosario

- [1] Aerodinámica: Rama de la mecánica de fluidos que estudia la interacción entre los cuerpos sólidos y los fluidos a través de los cuales se desplaza. En este caso los cuerpos sólidos a tratar serán los vehículos y difusores, y el fluido a través del cual se mueven el aire.
- [2] Alerón: Pieza saliente que se coloca en la carrocería de ciertos automóviles para hacerlos más aerodinámicos. En el caso de los monoplazas de F1 hay un alerón en la parte delantera y otro en la parte trasera.
- [3] Altura de rodadura: Distancia entre el chasis del vehículo y el suelo. Se mide en dos puntos, uno en el eje delantero y otro en el trasero.
- [4] Área frontal: Área del vehículo visto desde la vista frontal. Es el área del vehículo que se ve afectada por la fuerza de resistencia al avance una vez en movimiento.
- [5] Capa límite: Zona donde el movimiento de un fluido es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto. La capa límite se entiende como aquella en la que la velocidad del fluido respecto al sólido en movimiento varía desde cero hasta el 99% de la velocidad de la corriente no perturbada.
- [6] Carga aerodinámica: Es la configuración aerodinámica que da fuerza contra el asfalto para mantener la adherencia del coche. Cuanta más carga, más adherencia, pero menos velocidad. Es una fuerza en dirección vertical descendente.
- [7] Centro de presión: Punto de un cuerpo sobre el cual se debe aplicar la resultante de todas las presiones ejercidas sobre ese cuerpo para que el efecto de la resultante sea igual a la suma de los efectos de las presiones.
- [8] Coeficiente de resistencia al avance  $C_D$ : Coeficiente que indica relativamente la resistencia que sufre un cuerpo al movimiento en la dirección de éste.
- [9] Coeficiente de sustentación  $C_L$ : Coeficiente que indica la capacidad de crear una fuerza en dirección perpendicular a la de la velocidad de movimiento. En el caso de la F1 interesa que esta fuerza tenga una dirección vertical hacia abajo, y se le denominará carga aerodinámica, considerándola positiva en el caso de ir hacia abajo.
- [10] Cuerda: Distancia entre el borde de ataque y el borde de fuga de un ala.



- [11] Deflector: Elemento aerodinámico utilizado para variar la dirección de un fluido, en este caso el aire, y conseguir la fuerza de sustentación y resistencia al avance deseada.
- [12] Efecto suelo: Es el fenómeno aerodinámico que sucede cuando un cuerpo, con una diferencia de presiones entre la zona que hay por encima de él y la que hay por debajo, está muy cerca de la superficie terrestre, lo que provoca unas alteraciones en el flujo de aire que pueden aprovecharse en diversos campos.
- [13] Estela: Rastro de aire que deja un vehículo al desplazarse.
- [14] Fuerza de resistencia al avance: Fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, de dirección paralela a la de la velocidad del corriente incidente.
- [15] Fuerza de sustentación: Fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, de dirección perpendicular a la de la velocidad del corriente incidente.
- [16] Línea de corriente: Lugar geométrico de los puntos tangentes al vector velocidad de las partículas de fluido en un instante  $t$  determinado.
- [17] Número de Reynolds: Número adimensional utilizado para caracterizar el movimiento de un fluido.
- [18] Principio de Bernoulli: Describe el comportamiento de un fluido. De aquí se deduce que los puntos con máxima velocidad son a su vez los de menor presión y viceversa.
- [19] Resistencia aerodinámica: Fuerza que sufre un cuerpo al moverse a través del aire. Es la fuerza de resistencia al avance en la dirección de la velocidad del vehículo.
- [20] Spoiler: Elemento aerodinámico con la finalidad es deshacerse del flujo de alta presión para reducir la fuerza de sustentación.
- [21] Túnel de viento: herramienta de investigación desarrollada para ayudar en el estudio de los efectos del movimiento del aire alrededor de cuerpos sólidos.

