



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES AERODINÁMICAS DEL PORSCHE 911 GT3 MEDIANTE TÉCNICAS CFD

AUTOR: BENEDITO TORRES, JULIO

TUTOR: IGLESIAS REY, PEDRO LUIS

Curso Académico: 2016-17

RESUMEN

Este trabajo consiste en el estudio de cómo afecta aerodinámicamente la implantación de un alerón con diferentes grados de incidencia sobre un coche. Para obtener los datos necesarios, se necesita un modelo en CAD del coche a estudiar y un programa de elementos finitos que calcule las fuerzas necesarias.

Partiendo del modelo en CAD, y para adecuarse a los límites que nos impondrá el programa de análisis, se procederá a modificar la geometría en el programa SolidWorks® hasta conseguir un sólido simplificado del modelo original. Tras este paso, se importará el sólido al programa de análisis ANSYS®. Con la extensión ANSYS Geometry®, se obtiene un volumen mediante la creación de un cubo de aire de donde se sustrae un espacio equivalente al sólido del vehículo. El siguiente paso es la creación de la malla con la extensión ANSYS Mesh®, primero se someterá el volumen de aire creado previamente a un estudio de malla para comprobar la relación entre el tamaño de malla y el resultado, y después se creará la malla que se utilizará en el análisis. Una vez mallado el volumen, se analizará en ANSYS Fluent®, donde se obtendrán las fuerzas que aparecen sobre el coche, de las que se obtienen los coeficientes aerodinámicos. Una vez se tienen estos datos, y mediante un modelo dinámico, se obtendrán las velocidades máximas de cada caso de estudio.

Con los datos de velocidades, se aplicarán estos datos al caso práctico del tiempo empleado en dar una vuelta a un circuito de carreras.

Palabras clave: SolidWorks®, ANSYS®, malla, coeficientes aerodinámicos.

RESUM

Aquest treball consisteix en l'estudi de com afecta aerodinàmicament la implantació d'un aleró amb diferents graus d'incidència sobre un cotxe. Per a obtenir les dades necessàries, es necessita un model en CAD del cotxe a estudiar i un programa d'elements finits que calcule les forces necessàries.

Partint del model en CAD, i per a adequar-se als límits que ens imposarà el programa d'anàlisi, es procedirà a modificar la geometria en el programa SolidWorks® fins a aconseguir un sòlid simplificat del model original. Després d'aquest pas, s'importarà el sòlid al programa d'anàlisi ANSYS®. Amb l'extensió ANSYS Geometry®, s'obté un volum per mitjà de la creació d'un cub d'aire d'on se sostrau un espai equivalent al sòlid del vehicle. El següent pas és la creació de la malla amb l'extensió ANSYS Mesh®, primer se sotmetrà el volum d'aire creat prèviament a un estudi de malla per a comprovar la relació entre la grandària de malla i el resultat, i després es crearà la malla que s'utilitzarà en l'anàlisi. Una vegada creada la malla del volum, s'analitzarà en ANSYS Fluent®, on s'obtidran les forces que apareixen sobre el cotxe, de les que s'obtenen els coeficients aerodinàmics. Una vegada es tenen aquestes dades, i per mitjà d'un model dinàmic, s'obtidran les velocitats màximes de cada cas d'estudi

Amb les dades de velocitats, s'aplicaran estes dades al cas pràctic del temps empleat a fer una volta a un circuit de carreres.

Paraules clau: SolidWorks®, ANSYS®, malla, coeficients aerodinàmics.

SUMMARY

This work consists on the study of how aerodynamically affects the implantation of a spoiler with different degrees of incidence on a car. To obtain the necessary data, it is necessary a CAD model of the car to study and a finite elements program that calculates the necessary forces.

Starting from the CAD model, and to fit in the limits imposed by the analysis program, the geometry will be modified in the SolidWorks® program until a simplified solid of the original model is obtained. After this step, the solid will be imported into the ANSYS® analysis program. With the extension ANSYS Geometry®, a volume is obtained by creating an air cube from a space equivalent to the solid of the vehicle is subtracted. The next step is to create the mesh with the ANSYS Mesh® extension, first the previously created volume of air will be subjected to a mesh study to check the relationship between the mesh size and the result, and then the mesh to be used in the analysis will be created. Once the volume is meshed, it will be analyzed in ANSYS Fluent®, where the forces that appear on the car will be obtained, from which the aerodynamic coefficients are acquired. Once these data are obtained, using a dynamic model, the maximum velocities of each case will be calculated.

With the velocity data, it will be applied to the practical case of the time spent in one lap on a race circuit.

Keywords: SolidWorks®, ANSYS®, mesh, aerodynamic coefficient.

Documentos contenidos en el proyecto

- Documento 1: Memoria.
- Documento 2: Presupuesto.
- Documento 3: Planos.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

**ANÁLISIS DE DIFERENTES
CONFIGURACIONES AERODINÁMICAS
DEL PORSCHE 911 GT3 MEDIANTE
TÉCNICAS CFD
(MEMORIA)**

AUTOR: BENEDITO TORRES, JULIO

TUTOR: IGLESIAS REY, PEDRO LUIS

Curso Académico: 2016-17

Índice de la memoria

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES	1
1.2	MOTIVACIÓN	3
1.3	OBJETIVO GENERAL	3
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.5	ALTERNATIVAS	4
2	MODELO DINÁMICO	7
2.1	FUERZAS	7
2.1.1	<i>Fuerzas en recta</i>	7
2.1.2	<i>Fuerzas en curva</i>	10
2.2	ECUACIONES	11
2.2.1	<i>Ecuaciones de la velocidad en recta</i>	11
2.2.2	<i>Ecuaciones de la velocidad en curva por el criterio de rozamiento</i>	12
2.2.3	<i>Ecuaciones de la velocidad en curva por el criterio de vuelco</i>	13
2.3	INTRODUCCIÓN DEL MODELO DINÁMICO EN UNA HOJA DE CÁLCULO	14
2.3.1	<i>Obtención de parámetros</i>	14
2.3.2	<i>Implementación de parámetros y fuerzas en la hoja de cálculo</i>	16
2.3.3	<i>Cálculo de coeficientes y velocidades en la hoja de cálculo</i>	17
3	MODELO GEOMÉTRICO	19
3.1	INTRODUCCIÓN	19
3.2	SIMPLIFICACIÓN INICIAL EN SOLIDWORKS®	20
3.3	SIMPLIFICACIÓN DE LAS RUEDAS	26
3.4	SIMPLIFICACIÓN FINAL DEL VEHÍCULO	28
3.5	MODELIZACIÓN DE LOS ALERONES	29
3.6	CREACIÓN DEL VOLUMEN DE AIRE A ESTUDIAR	31
4	MALLADO	35
4.1	INTRODUCCIÓN	35
4.2	ESTUDIO DE MALLA	35
4.3	CREACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LA MALLA	37
5	ESTUDIO AERODINÁMICO	41
5.1	INTRODUCCIÓN	41
5.2	PREPARACIÓN DEL ANÁLISIS EN ANSYS FLUENT®	41
5.3	OBTENCIÓN DE SOLUCIONES	43
6	RESULTADOS	45
6.1	INTRODUCCIÓN	45
6.2	COEFICIENTES AERODINÁMICOS	45
6.3	VELOCIDADES MÁXIMAS	47
6.4	INFLUENCIA DEL RADIO DE CURVA EN LA VELOCIDAD EN CURVA	49

7	CASOS PRÁCTICOS	53
7.1	INTRODUCCIÓN	53
7.2	CIRCUITO DE MONZA	56
7.3	CIRCUITO RICARDO TORMO	57
8	CONCLUSIONES.....	59
9	BIBLIOGRAFÍA	61

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La mecánica de fluidos es la rama de la física que estudia el comportamiento de los fluidos (tanto gases como líquidos) en reposo (estática) y en movimiento (dinámica), y las fuerzas que provocan y provocadas por este movimiento. Dentro de la mecánica de fluidos está la rama de la aerodinámica, la cual estudia las acciones que aparecen ante el movimiento relativo entre un cuerpo sólido y un gas que lo recubre (si se tratase de un líquido, estaríamos hablando de hidrodinámica).

La aerodinámica es un campo fundamental en el sector automovilístico, tanto en la competición como en los utilitarios. Más allá del apartado estético, el cuál es importante a la hora de vender, las formas de los vehículos son adquiridas tras un profundo estudio aerodinámico, con el fin de conseguir las fuerzas de agarre y sustentación óptimas (en función de la finalidad del vehículo se buscarán unos valores u otros). Estas fuerzas influyen en cualquier apartado técnico del vehículo: velocidad máxima, consumo de combustible, desgaste de componentes...

Los problemas aerodinámicos son complejos, ya que son problemas de una alta complejidad, haciéndolos imposibles de resolver mediante los métodos analíticos; por lo que la solución a estos problemas requiere de otros métodos, que nos da resultados aproximados.

Principalmente existen dos métodos de resolución de problemas aerodinámicos:

- Túnel de viento.
- Técnicas CFD (Computacional Fluid Dynamics).

El túnel de viento es, actualmente, el método óptimo para el problema presentado. No obstante, es el método más caro. Existen dos tipos principalmente, los túneles de viento a tamaño real y los túneles a escala reducida. Los túneles a tamaño real sólo son posibles en marcas capaces de invertir suficiente capital para poder construir las instalaciones necesarias y mantenerlas, como las grandes marcas automovilísticas. Los túneles a escala reducida son utilizados en instituciones más pequeñas, como universidades o centros técnicos, ya que estos son más económicos, aunque menos precisos que los anteriores.

Las técnicas CFD consiguen soluciones aproximadas mediante elementos finitos, que dividen la geometría a analizar en elementos simplificados, y aplicando en estos las ecuaciones de la aerodinámica de forma iterativa. Con este método se consiguen resultados muy próximos a las soluciones otorgadas por los túneles del viento utilizando un ordenador. Con la evolución tecnológica de los últimos años, la velocidad de procesamiento de los ordenadores ha crecido de forma exponencial, reduciendo así el tiempo requerido para realizar estos cálculos de forma notoria, por lo que actualmente se pueden resolver problemas de una alta complejidad en un tiempo corto y con soluciones fiables, popularizando así los CFD.

Como se ha comentado antes, la aerodinámica es uno de los principales elementos para tener en cuenta durante el desarrollo de un automóvil, ya que influye directamente en diversos aspectos, tanto mecánicos como estéticos. Las fuerzas aerodinámicas que ejerce el aire son extremadamente

importantes en el mundo de la competición, ya que con un buen diseño del vehículo se puede conseguir adecuar esas fuerzas a lo requerido. Mirando en la Fórmula 1, ya que esta competición es la que mayor desarrollo tecnológico presenta en el mundo, se puede ver en los últimos años un enorme desarrollo en la complejidad de los alerones tanto delanteros (Figura 1) como traseros, y otros sistemas que se ayudan de estas fuerzas para conseguir una mayor velocidad. Algunos ejemplos de estos sistemas son: el sistema DRS, que aumenta el ángulo de incidencia en curva para generar mayor agarre o lo disminuye consiguiendo mayores velocidades en recta, el conducto F del equipo McLaren, los escapes soplados de RedBull Racing o el doble difusor de la escudería Brawn en 2009.



Figura 1 Conducto F en F1 Referencia: <https://formula1techandart.files.wordpress.com>

Pero esta búsqueda de cómo aprovechar estas fuerzas aerodinámicas no son exclusivas de la F1, también se puede observar como en motociclismo (MotoGP), donde se añadieron unos pequeños alerones a las motos para intentar aprovechar los flujos de aire (Figura 2). Otro ejemplo es la IndyCar, donde existe un chasis diferente para los circuitos urbanos, donde se necesita un coche con alerones con altos grados de incidencia para conseguir una mayor velocidad en curva; y otro para los óvalos, donde se tiene un chasis con alerones que tienen incluso grados de incidencia negativos para conseguir mayor velocidad en recta, y donde existe mayor carga aerodinámica en el lado izquierdo del coche puesto que todas las curvas son a izquierda (Figura 3).



Figura 2 Alerones en MotoGP Referencia: <http://e04-marca.uecdn.es>



Figura 3 Diferencias entre IndyCar oval y urbano Referencia: <https://www.turbosquid.com>

Como se puede ver, la aerodinámica es un tema realmente importante, y es por ello que el objetivo de este proyecto se centra en conseguir los parámetros aerodinámicos necesarios para exportarlo luego a un caso práctico.

1.2 [Motivación](#)

La motivación personal detrás de este proyecto viene de una gran pasión en el automovilismo y la competición. La competición (principalmente la Fórmula 1, pero también otras como la DTM, la WTCC o MotoGP) consiguió fijar mi interés en la tecnología y en el mundo del motor, y este interés ha sido una de las principales razones de mi deseo por estudiar una ingeniería. De esta manera, este proyecto es la manera más atractiva de terminar el grado, aplicando el conocimiento adquirido durante el grado en un campo que siempre me ha apasionado.

1.3 [Objetivo general](#)

El objetivo principal de este proyecto es calcular las fuerzas de arrastre y de sustentación (las llamadas anteriormente fuerzas aerodinámicas) en un Porsche 911 GT3 con diferentes configuraciones aerodinámicas; y a través de estas dos fuerzas, obtener la velocidad máxima en curva y en recta de cada configuración.

1.4 Objetivos específicos

Para obtener todos los datos necesarios, se van a perseguir los siguientes objetivos:

1. Obtención de un modelo dinámico, implementado posteriormente en una hoja de cálculo con el fin de automatizar el proceso, mediante el cual poder calcular las velocidades a través de los datos obtenidos en el programa de CFD.
2. Una vez conseguido el modelo en CAD del vehículo a estudiar, simplificarlo y obtener un sólido simplificado manteniendo la forma original del coche. Posteriormente a esto, se añadirán todos los apéndices (en este caso alerones con diferentes grados de incidencia) para generar nuevos sólidos, todos estos con alerón. Todo esto se ha realizado en el programa de CAD SolidWorks®.
3. Con ANSYS Geometry®, se creará un volumen que simulará una habitación llena de aire de la que se sustraerá el sólido que representaría el hueco ocupado por el coche (se creará un volumen por cada sólido generado en el paso anterior con los alerones).
4. Se procederá a realizar el mallado del volumen de aire con la extensión Mesh de ANSYS®. Primero, se evaluará la influencia del tamaño de malla en el resultado final. Una vez realizado el estudio de malla, se mallará el volumen de la cámara de aire de la manera más óptima posible, respetando el límite de la licencia universitaria del programa de elementos finitos utilizado, ANSYS Fluent®.
5. Mediante el programa ANSYS Fluent®, se obtendrán tanto las fuerzas de arrastre y de sustentación (y con el modelo dinámico sacaremos los respectivos coeficientes y las velocidades máximas en recta y curva) como los mapas de velocidades y presiones en la cámara de aire, los cuales servirán de ayuda para comprobar si los resultados son o no correctos.
6. Con los datos de velocidades máximas en recta y curva obtenidos previamente, se estudiará la influencia de los alerones en dos circuitos diferentes.

1.5 Alternativas

Tal y como se ha dicho anteriormente, existen varias formas de afrontar este problema. La manera más sencilla y rápida sería mediante la obtención de los datos tras analizar un modelo de dimensión real en un túnel del viento; pero tal y como se dijo, resulta inviable para este caso debido a los altos costes. Otra opción sería someter un modelo a escala, que con la tecnología actual se podría imprimir con un gran nivel de detalle, e introducirlo en un túnel de viento reducido (sobre 30 centímetros de diámetro), obtener los datos que aerodinámicos, y comprobarlos con un estudio CFD del modelo en CAD del coche. Este método no sería tan rápido, pero la fiabilidad de los datos sería

realmente alta. Además, no es un método excesivamente caro, por lo que, si se tiene la posibilidad de resolver este problema mediante esta técnica, sería la manera óptima.

Por lo tanto, la única opción posible, con los recursos que se disponen, es calcular las fuerzas aerodinámicas con un estudio CFD. Pero dentro de esta posibilidad, también se tiene dos maneras de afrontarlo en función del tamaño de malla: a mayor tamaño de malla, menor tiempo de cálculo, pero menor fiabilidad en los datos; y a menor tamaño de malla, el tiempo de cálculo aumenta exponencialmente, pero también la fiabilidad de los resultados. La manera óptima consiste en realizar un mallado con un tamaño más pequeño cerca del coche, y lo más pequeño posible en el alerón y detrás del coche, ya que es ahí donde se observa la acción del alerón con el aire. Ésta es la solución que se va a adoptar en este trabajo, respetando la limitación de la versión educacional de ANSYS®, la cual nos permite un máximo de 512.000 celdas.

2 MODELO DINÁMICO

2.1 Fuerzas

En el mundo de la competición, la velocidad es lo más importante, y para ello se necesita encontrar la máxima velocidad posible tanto en recta como en curva. Como se verá más adelante, en función de las características del circuito, se necesitará un equilibrio diferente entre la velocidad en recta y la velocidad en curva. Este trabajo consiste en analizar cómo afectan aerodinámicamente diversos alerones en un vehículo, y la manera práctica de ver ese efecto es midiendo las velocidades máximas en curva y en recta para cada caso. Para ello, y con las fuerzas aerodinámicas que se calcularán en ANSYS Fluent®, se necesita un modelo dinámico que permita calcular las velocidades máximas a través de las fuerzas que aparecen en el vehículo.

Para estos cálculos, se harán unas hipótesis y simplificaciones (como por ejemplo suponer que la temperatura no afecta al problema), ya que el obtener los datos exactos de todos los parámetros requiere de sensores y equipos con una precisión alta, los cuales no se poseen; por lo que se tomarán unos valores de referencia fijos para algunas magnitudes. También hay que destacar que, como la finalidad del estudio es obtener la velocidad máxima, la aceleración será nula en ese instante de máxima velocidad, por lo que el coche en ese punto no sufrirá fuerza de inercia.

Como las fuerzas existentes cuando un vehículo corre en línea recta son diferentes de las que aparecen cuando el coche está en curva, abordaremos ambos casos por separados.

2.1.1 Fuerzas en recta

En la Figura 4 se pueden observar las fuerzas que aparecen en un coche en movimiento en recta. A continuación, se explicarán cada una de ellas. Las fórmulas necesarias para calcularlas y los parámetros que influyen en ellas. Para una mayor claridad están representadas en dos colores, en naranja están dibujadas las fuerzas verticales, y en azul las fuerzas horizontales.

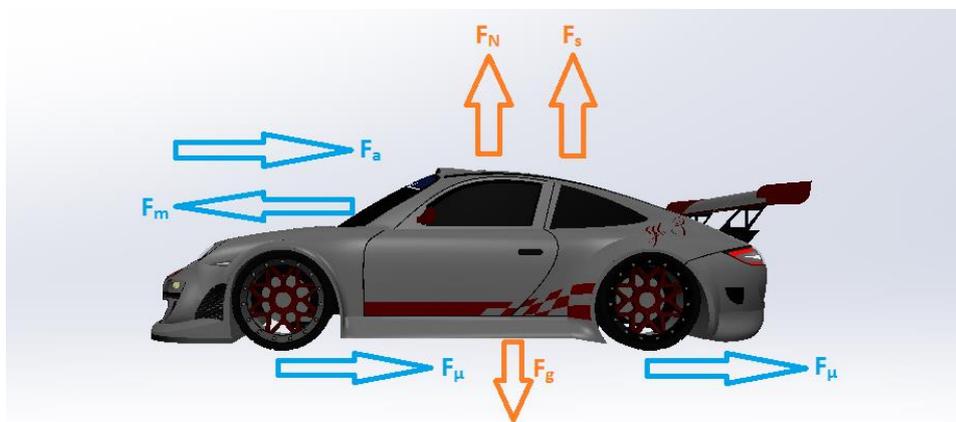


Figura 4 Fuerzas que aparecen en el coche en recta

- Fuerzas verticales:

- F_N (Fuerza normal): Esta fuerza es una reacción del suelo al coche por el peso de este último. Es una fuerza perpendicular al plano del suelo; en este caso se supone una carretera plana, por lo que es una fuerza que sólo tiene componente vertical.
- F_s (Fuerza de sustentación o lift): Es la fuerza que ejerce el aire sobre el coche verticalmente. Esta fuerza puede ir en cualquiera de los dos sentidos, en función del diseño del vehículo. En este caso está representada en sentido contrario a F_g , por lo que si esta fuerza es positiva significará que el aire ayudaría a que el coche despegase, y si es negativa significará que el aire empuja el coche hacia el suelo.

$$F_s = \frac{1}{2}AC_L\rho v^2 \quad (1)$$

- A: Área de referencia (m^2), es la misma área que aparece en la fuerza de agarre o drag.
 - C_L : Coeficiente de sustentación o lift (-).
 - ρ : Densidad del fluido, en este caso aire (kg/m^3).
 - v: Velocidad del vehículo (m/s).
- F_g (Fuerza de la gravedad): Es la fuerza del peso del coche generada por la gravedad.

$$F_g = mg \quad (2)$$

- m: Masa del vehículo (kg).
- g: Aceleración de la gravedad (m/s^2).

- Fuerzas horizontales:

- F_a (Fuerza de arrastre o drag): Es la fuerza aerodinámica que el aire ejerce horizontalmente sobre el coche.

$$F_a = \frac{1}{2}AC_D\rho v^2 \quad (3)$$

- A: Área de referencia (m^2), suele ser el área frontal.
 - C_D : Coeficiente de arrastre o drag (-).
 - ρ : Densidad del fluido, en este caso aire (kg/m^3).
 - v: Velocidad del vehículo (m/s).
- F_m (Fuerza del motor): Se trata de la fuerza que aporta la potencia del motor. Esta fuerza es muy importante, ya que es la responsable de que el vehículo se mueva; sin esta fuerza no habría movimiento. Esta fuerza es directamente proporcional a la potencia efectiva del motor, por lo que en la misma ficha técnica del vehículo podemos encontrar la potencia para así calcular la fuerza, pero hay que tener en cuenta la posible pérdida de potencia en caso de activación de los sistemas auxiliares del vehículo (como podría ser el aire acondicionado o la radio). En este caso de estudio, se supondrá que no habrá ningún sistema auxiliar activado y toda la potencia efectiva del motor es la que llega a las ruedas del vehículo.

$$F_m = \frac{P}{v} \quad (4)$$

- P: Potencia efectiva del motor (W).
 - v: Velocidad del motor (m/s).
- F_μ (Fuerza de rozamiento): Es la fuerza de fricción entre el neumático y el suelo. Al estar el neumático rodando sobre el suelo y no deslizando sobre éste, se tomará el coeficiente de rodadura y no el de deslizamiento.

$$F_\mu = C_{RR}F_N \quad (5)$$

- C_{RR} : Coeficiente de rodadura del neumático (-).
- F_N : Fuerza normal (N).

2.1.2 Fuerzas en curva

En la Figura 5 se pueden observar las fuerzas que aparecen en un coche durante su paso por una curva. Para una mayor claridad están representadas en dos colores, en naranja están dibujadas las fuerzas verticales y en azules las fuerzas horizontales. Las fuerzas verticales son las mismas que aparecen en una recta, por lo que no se volverán a explicar. También cabe destacar que las fuerzas longitudinales (las fuerzas horizontales en recta) que aparecen en recta también aparecen aquí; pero, al igual que antes, no volverán a ser explicadas. A continuación, se explicarán las fuerzas horizontales (las verticales son las mismas que aparecen durante la recta), las fórmulas necesarias para calcularlas y los parámetros que influyen en ellas.

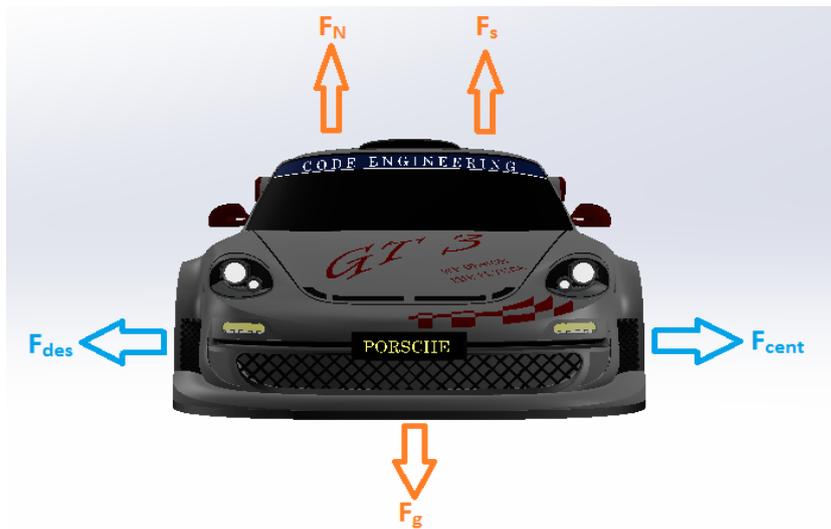


Figura 5 Fuerzas que aparecen en el coche en curva

- Fuerzas horizontales:

- F_{des} (Fuerza de deslizamiento): Se trata de la fuerza que se opone al deslizamiento lateral de las ruedas. Su sentido es hacia el interior de la curva.

$$F_{des} = \mu F_N \quad (6)$$

- F_N: Fuerza normal (N).
- μ : Coeficiente de rozamiento.

- F_{cent} (Fuerza centrípeta): Es la fuerza que se genera por la velocidad lineal y empuja el coche hacia el fuera de la curva, por lo que su sentido es hacia el exterior de ésta.

$$F_{cent} = \frac{v^2}{R} m \quad (7)$$

- v: Velocidad del vehículo por curva (m/s).
- R: Radio de la curva (m).
- m: Masa del coche (kg).

2.2 [Ecuaciones](#)

Una vez que se conocen las fuerzas existentes, hay que desarrollar las ecuaciones para así obtener las velocidades máximas en recta y en curva. Al ser un problema en el que la aceleración es nula, la suma de fuerzas ha de ser igual a 0; con esta premisa se procederá a despejar la velocidad tanto en recta como en curva. En curva, además, se tendrán en cuenta dos criterios: por un lado, se calculará la velocidad máxima que se podrá alcanzar en curva debido al deslizamiento de las ruedas ($\sum F = 0$), y por otro lado, la velocidad máxima que se podrá alcanzar antes de que el coche vuelque ($M_{est} \geq M_{des}$); una vez calculadas ambas velocidades máximas, se cogerá la menor de ambas, ya que será la limitante para cumplir ambas condiciones.

2.2.1 [Ecuaciones de la velocidad en recta](#)

En este apartado se hallará la ecuación con la que obtener la velocidad máxima en recta, para ello se empieza igualando a cero las fuerzas de cada eje que aparecen en la Figura 4:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_m - F_a - F_\mu = 0 \quad (8)$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_N + F_s - F_g = 0 \quad (9)$$

El siguiente paso es despejar F_N en la ecuación (10), para luego sustituirla en la ecuación 9 con los términos ya sustituidos:

$$F_N = F_g - F_s \quad (10)$$

$$F_m - F_a - F_\mu = \frac{P}{v} - \frac{1}{2} AC_D \rho v^2 - C_{RR} F_N = \frac{P}{v} - \frac{1}{2} AC_D \rho v^2 - C_{RR} (F_g - F_s) = 0 \quad (11)$$

A continuación, se sustituirán todas las fuerzas por los parámetros correspondientes:

$$\frac{P}{v} - \frac{1}{2}AC_D\rho v^2 - C_{RR}\left(mg - \frac{1}{2}AC_L\rho v^2\right) = \frac{P}{v} - \frac{1}{2}AC_D\rho v^2 - C_{RR}mg + C_{RR}\frac{1}{2}AC_L\rho v^2 = 0 \quad (12)$$

Por último, se agrupan los términos en función de la incógnita, la velocidad:

$$P - \frac{1}{2}AC_D\rho v^3 - C_{RR}mgv + C_{RR}\frac{1}{2}AC_L\rho v^3 = 0 \quad (13)$$

$$\left(C_{RR}\frac{1}{2}AC_L\rho - \frac{1}{2}AC_D\rho\right)v_r^3 - (C_{RR}mg)v_r + P = 0 \quad (14)$$

Con esta ecuación de tercer grado se calcula la velocidad máxima en recta, cálculo que se realizará posteriormente.

2.2.2 Ecuaciones de la velocidad en curva por el criterio de rozamiento

Para calcular la velocidad máxima en curva, se procederá de la misma forma que en el cálculo de la velocidad en recta, pero con las fuerzas que aparecen en la Figura 5:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_{cent} - F_{des} = 0 \quad (15)$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_N + F_s - F_g = 0 \quad (16)$$

A continuación, se despejará en ambas ecuaciones la fuerza normal, para posteriormente igualar ambas ecuaciones.

$$F_{cent} = F_{des} \rightarrow \frac{v^2}{R}m = \mu F_N \rightarrow F_N = \frac{v^2}{R\mu}m \quad (17)$$

$$F_N = F_g - F_s = mg - \frac{1}{2}AC_L\rho v^2 \rightarrow F_N = mg - \frac{1}{2}AC_L\rho v^2 \quad (18)$$

$$\frac{v^2}{R\mu}m = mg - \frac{1}{2}AC_L\rho v^2 \quad (19)$$

Por último, se despeja la velocidad para conseguir la fórmula final de la velocidad máxima en curva según el criterio del rozamiento:

$$\left(\frac{m}{R\mu} + \frac{1}{2}AC_L\rho\right)v^2 = mg \quad (20)$$

$$v_{c_r} = \sqrt{\frac{mg}{\left(\frac{m}{R\mu} + \frac{1}{2}AC_L\rho\right)}} \quad (21)$$

2.2.3 Ecuaciones de la velocidad en curva por el criterio de vuelco

En la Figura 6 se pueden ver las fuerzas que crean los momentos en el paso por curva de un coche. La fuerza normal no genera momento al ser una fuerza de reacción del suelo, y la fuerza de deslizamiento tampoco genera momento al ser paralelos el vector de esta fuerza con el vector de posición del punto de aplicación de la fuerza. En la Figura 6 están marcadas, por tanto, aquellas que sí generan momento, representadas de color naranja las fuerzas que ayudan al equilibrio (momento estabilizante), y de color azul aquellas fuerzas que generan un momento desestabilizante; además, también están marcadas las medidas que van a influir en el cálculo de estos momentos, siendo h_{cdg} la altura a la que está el centro de gravedad, y d_e la mitad de la anchura del coche.

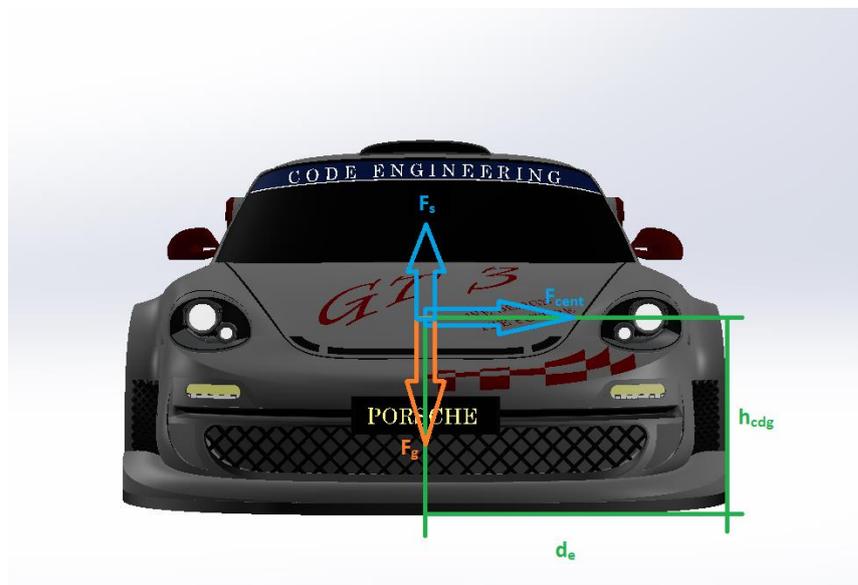


Figura 6 Momentos de vuelco en el vehículo

Para que el coche no llegue a volcar, se necesita que la suma de momentos estabilizantes siempre sea mayor o igual a la suma de los momentos desestabilizantes ($\sum M_{est} \geq \sum M_{desest}$), siendo el caso de la igualdad entre estos dos tipos de momentos la forma de obtener la velocidad máxima en curva bajo el criterio del vuelco:

$$F_g \frac{d_e}{2} = F_s \frac{d_e}{2} + F_{cent} h_{cdg} \quad (22)$$

Sustituyendo en la expresión las fuerzas por sus fórmulas:

$$mg \frac{d_e}{2} = \frac{1}{2} AC_L \rho v^2 \frac{d_e}{2} + \frac{v^2}{R} m h_{cdg} \quad (23)$$

Agrupando los términos en función de la velocidad:

$$\left(\frac{1}{2} AC_L \rho \frac{d_e}{2} + \frac{1}{R} m h_{cdg} \right) v^2 = mg \frac{d_e}{2} \quad (24)$$

Despejando la velocidad obtenemos la velocidad máxima que se puede alcanzar en una curva antes de que el coche llegue a volcar:

$$v_{c_v} = \sqrt{\frac{mg \frac{d_e}{2}}{\left(\frac{1}{R} m h_{cdg} + \frac{1}{2} AC_L \rho \frac{d_e}{2} \right)}} \quad (25)$$

Como se ha dicho anteriormente, la velocidad por curva máxima que podrá alcanzar el vehículo a estudiar será la menor entre v_{c_r} (ecuación (22)) y v_{c_v} (ecuación (26)).

2.3 Introducción del modelo dinámico en una hoja de cálculo

Con el fin de tener los datos de manera más organizada y accesible, es recomendable introducir todos los parámetros y fórmulas en un programa de hojas de cálculo (en este caso se ha optado por utilizar el programa Microsoft Excel®).

2.3.1 Obtención de parámetros

Los parámetros característicos del coche se han obtenido de la web <https://www.km77.com/>. Se trata de un Porsche 911 GT3 del año 2013 (aunque el modelo de estudio es del año 2010, esto no afectará en el resultado final, ya que los cambios entre estos dos modelos no afectan a la aerodinámica en gran medida ni en la potencia del motor), con 350 kW de potencia máxima, 3800 cm³ de cilindrada, 6 cilindros y 1505 kg de masa. El dato de la masa es la del vehículo vacío, pero éste estará conducido

por una persona, por lo que a los 1505 kg del coche se le sumarán 70 kg, haciendo una masa total entre el coche y el piloto de 1575 kg. Las dimensiones del vehículo también se podrían extraer de esta página, pero se optado por extraer los datos de las dimensiones del modelo 3D para ajustarse lo máximo posible al modelo de estudio. Otro dato que se va a extraer de la referencia es el área de referencia, llamada superficie frontal, cuyo valor será de 2,04 m².

La densidad del aire es una propiedad que varía en función de muchos parámetros como la altura, la presión, la humedad o la temperatura. En este caso, se ha optado por adoptar el valor de 1,225 kg/m³, que es el valor de la densidad del aire a presión atmosférica y a 15 °C. La aceleración de la gravedad es un parámetro que varía en función de la altura. A nivel del mar, su valor se establece en 9,807 m/s².

Otro parámetro por introducir en el programa es el radio de la curva de la cual se va a hallar la velocidad máxima. Como este dato varía, se ha optado por poner un valor estándar por el momento (60 metros), a la espera de llevarlo al caso práctico del circuito.

Los siguientes datos por introducir son los referidos a los neumáticos. Por un lado, está el coeficiente de rodadura, el cual, según la referencia: <http://www.engineeringtoolbox.com/>, un neumático sobre asfalto puede tener un coeficiente con un valor entre 0,01 y 0,02 en función de la calidad del asfalto, por lo que se ha elegido un valor medio de 0,015. El otro coeficiente es el de rozamiento, que según la referencia: <http://urfsae.blogspot.com.es/>, un neumático común tiene un coeficiente entre 0,7 y 0,8 y uno de competición tiene un coeficiente superior a 1,7; como se supone que se dispondrá de un neumático de alta calidad, se ha escogido un valor de 1,5, un valor cercano al de un neumático de competición.

Los últimos parámetros por introducir son los geométricos, para poder calcular los momentos. La anchura del coche, aunque se puede comprobar en la ficha técnica de la que se ha obtenido la potencia, masa, etc., se ha medido en el modelo en 3D dentro del programa de CAD SolidWorks®, para una mayor exactitud, con un valor de 1859,159 mm; se puede observar que la diferencia entre el dato aportado en la ficha técnica (1852 mm) y el valor medido (1859,159 mm) es muy pequeña, observando así que el modelo está correctamente escalado. El otro dato que obtener es la altura del centro de gravedad, el cual se puede obtener desde el programa de diseño SolidWorks®, este programa tiene una herramienta llamada "Propiedades físicas" en la pestaña "Calcular" en la cual nos indican el centro de masas del sólido seleccionado. Mediante esta herramienta se obtiene el centro de masas, el cual está a 0,525 metros del suelo. Hay que tener en cuenta que este valor no es real, ya que el sólido del cual se obtiene este dato es un sólido que supone un coche macizo, es decir, como si no hubiese habitáculo. Calculando esta vez la altura del centro de gravedad con el mismo modelo, pero con un modelo hueco, se obtiene una altura de 0,389 metros. Este valor es también incierto, ya que no tiene en cuenta el bloque motor o todos los componentes del habitáculo, aunque se acerca más a la realidad debido a que el habitáculo del coche en su mayoría está vacío, y que el bloque motor, que es la parte más pesada del vehículo, está situado en la mitad inferior. Además, al poseer un motor bóxer, el cual se caracteriza por disponer los cilindros de forma horizontal, el centro de gravedad se sitúa más bajo que si tuviese un motor en con cilindros dispuestos en línea o en V. Con todo esto, se ha decidido situar de manera orientativa el centro de gravedad en 0,4 metros.

2.3.2 Implementación de parámetros y fuerzas en la hoja de cálculo

Con el fin de tener los datos más organizados y accesibles, se ha utilizado el programa de hojas de cálculo Microsoft Excel®. Para empezar, se ha creado una columna con los parámetros principales del problema, como se puede ver en la Tabla 1.

Tabla 1 Parámetros

Datos		
Masa (m)	1575	kg
Potencia (P)	350000	W
Densidad aire (ρ)	1,225	kg/m ³
Área de referencia (A)	2,04	m ²
Coef Lift (C_L)	?	-
Coef Drag (C_D)	?	-
Coef Rodadura (C_{RR})	0,015	-
Coef Deslizamiento (μ)	1,5	-
g	9,807	m/s ²
Radio curvatura (R)	60	m
Altura cdg (h_{cdg})	0,4	m
Anchura (d_e)	1,859	m

Como se puede observar, los coeficientes de agarre y de sustentación aún no poseen ningún valor ya que aún es desconocido, por lo que se le ha puesto una incógnita, posteriormente se explicará cómo se calculará.

A continuación, se procederá a implementar todas las fuerzas en la hoja de cálculo, con las respectivas fórmulas. La Tabla 2 muestra la implementación de las fórmulas explicadas anteriormente en el apartado 2.1.1. Como se puede observar, la suma de las fuerzas en cada eje, explicadas en las ecuaciones (9) y (10), da 0. Los valores de los parámetros necesarios están en la Tabla 1, y tanto los coeficientes de arrastre y de sustentación utilizados como la velocidad utilizada serán calculadas posteriormente. En la Tabla 3 se muestran las fuerzas y momentos que aparecen en una curva implementados ya en Excel®. Al igual que en la Tabla 2, los datos de los parámetros son los que aparecen en la Tabla 1, y los coeficientes de arrastre y de sustentación y la velocidad han sido calculadas después. Todas las fórmulas de las fuerzas y los momentos han sido explicadas anteriormente, y $M_{total} = M_{est} - M_{desest}$. Se puede observar como M_{total} es mayor que 0, eso se debe a que la velocidad en curva no va a provocar vuelco ni es la condición que limita la velocidad en curva, por lo que el límite de la velocidad en curva con los datos aportados va a ser el deslizamiento de las ruedas (criterio de rozamiento). Si el limitante de la velocidad en curva fuera la condición de vuelco ($M_{est} = M_{desest}$), M_{total} sería igual a 0 obviamente, pero la suma de fuerzas en el eje X sería menor a 0 (si se diera el caso de que ambos casos son limitantes, tanto M_{total} como F_x valdrían 0), ya que la fuerza centrípeta sería menor (al tener una velocidad menor a la máxima por este criterio) que la fuerza de rozamiento lateral, la cual no está prácticamente influenciada por la velocidad.

Tabla 2 Fuerzas en recta

Fuerzas en recta					
Eje X			Eje Y		
F _m	3243,645	N	F _g	15450,75	N
F _a	3005,701	N	F _N	15862,920	N
F _μ	237,944	N	F _s	-412,170	N
F _X	2,741E-08	N	F _Y	0	N

Tabla 3 Fuerzas en curva

Fuerzas en curva								
Eje X			Eje Y			Momentos		
F _{des}	23215,26	N	F _g	15450,75	N	M _{est}	14362,699	Nm
F _{cent}	23215,26	N	F _N	15476,84	N	M _{desest}	9261,851	Nm
			F _s	-26,09	N			
F _X	0	N	F _Y	0	N	M _{total}	5100,847	Nm

2.3.3 Cálculo de coeficientes y velocidades en la hoja de cálculo

Una vez implementadas todos los parámetros y todas las fuerzas, sólo queda calcular los coeficientes de arrastre y de sustentación y las velocidades máximas. Para calcular los coeficientes de arrastre y de sustentación se han usado dos nuevas celdas en las cuales se van a introducir los valores de las fuerzas de arrastre y de sustentación obtenidas del programa ANSYS Fluent® al final del proceso (Figura 7, esquina superior derecha). Con esas dos fuerzas, y la velocidad usada en ANSYS Fluent®, se obtendrán directamente los coeficientes despejándolos de las ecuaciones (1) y (5), por lo que en las celdas de los coeficientes de arrastre y de sustentación la Tabla 1 mostrada anteriormente se escribirán las ecuaciones:

$$C_D = \frac{2F_a}{A\rho v^2} \quad (26)$$

$$C_L = \frac{2F_s}{A\rho v^2} \quad (27)$$

Una vez calculados los coeficientes, el último paso es calcular las velocidades máximas. Empezando por la velocidad máxima en recta, ésta se obtiene mediante la ecuación (15), que se trata de una ecuación de tercer grado, resuelta mediante la herramienta "Buscar objetivo" que implementa la hoja de cálculo.

Tabla 4 Cálculo de la velocidad máxima en recta

v^3	v^2	v	0	fórmula
-17,246	0	-15450,75	2,333E7	0
v_r	107,903	m/s	388,452	km/h

Por último, en dos celdas diferentes se calcularán las velocidades máximas en curva según el criterio de rozamiento y según el criterio de vuelco, implementando en la celda de la velocidad máxima en curva según el criterio de rozamiento la ecuación (22), e implementando en la celda de la velocidad máxima en curva según el criterio de vuelco la ecuación (26). Tras esto, con el fin de obtener la velocidad en curva definitiva, en una celda aparte se implementará la condición de que aparezca automáticamente la velocidad mínima de ambos criterios.

Tabla 5 Velocidad máxima en curva

v_c	27,148	m/s	=	97,731	km/h
$v_{c_{rozamiento}}$	27,148	m/s	=	97,731	km/h
$v_{c_{vuelco}}$	33,807	m/s	=	121,704	km/h

Para concluir con la hoja de cálculo, hasta que se obtengan las fuerzas correspondientes mediante el programa de simulación, se ha copiado esa hoja de cálculo tantas veces como modelos a estudiar se tengan (modelo sin alerón, modelo con alerón tipo 1, modelo con alerón tipo 2...), para no perder la información de los modelos calculados anteriormente y tenerla a mano cuando fuera necesario.

3 MODELO GEOMÉTRICO

3.1 Introducción

Este capítulo se va a centrar en cómo obtener la geometría final que posteriormente será mallada y analizada en ANSYS. Para empezar, la geometría a tratar se ha obtenido de la referencia: <https://www.grabcad.com/>. La Figura 7 muestra el modelo inicial del que se parte.



Figura 7 Modelo inicial

En ésta se puede ver el alto nivel de detalle del modelo: las manetas en las puertas, los detalles en los faros, las entradas de aire, etc. Todos estos detalles generarán un mallado más fino alrededor de estos, lo cual provocará un aumento en el tiempo de cálculo innecesario, debido a que todos estos elementos no tienen efecto aerodinámico. Ante este problema, es necesario simplificar el modelo en 3D. Esta simplificación se va a realizar en tres diferentes pasos. Primero, se realizará una eliminación inicial de todos los detalles sobrantes comentados anteriormente para dejar un modelo sin ningún detalle. El segundo paso tratará las ruedas; éstas están realmente detalladas, como se puede ver en los discos de freno, las llantas o el dibujo del neumático. Con el fin de eliminar cualquier geometría que pueda causar problemas en el cálculo, y ya que las ruedas no tienen efecto aerodinámico relevante, se ha optado por cerrar las ruedas, para posteriormente añadir una estructura que hará de apoyo entre el modelo y el suelo. El último paso consistirá en variar el diseño de la geometría, con el fin de crear el mínimo número de superficies lo más sencillas posibles, sin variar el propio diseño del modelo e intentando influir lo mínimo en la aerodinámica de éste.

3.2 Simplificación inicial en SolidWorks®

Para editar el modelo se utilizó el programa SolidWorks® debido a que es el programa de edición más utilizado. Una vez obtenido ya el modelo y escogido el software de edición, se procede a simplificar el modelo. Se empezará eliminando todos aquellos detalles que aumentan la complejidad del modelo, ya que una mayor complejidad requiere de un mallado más fino, lo que requiere un mayor tiempo de cálculo y podría superar el límite de elementos de malla.

Lo primero que se ha procedido a eliminar son todos los elementos del alerón trasero que incorpora el propio modelo, ya que el primer estudio es del vehículo sin ningún tipo de alerón y, posteriormente, se le añadirá el alerón con diferentes configuraciones. En la Figura 8 se puede ver el modelo una vez eliminado ya el alerón completamente.



Figura 8 Modelo sin alerón

Si se observa la lista de operaciones realizadas durante la creación en la columna de la izquierda, se puede observar que se han creado varios Split Line que son las que crean las líneas de diseño rojas. Dado que estos elementos no generan ningún beneficio aerodinámico si no que son elementos estéticos, también se eliminarán (Figura 9).



Figura 9 Eliminación líneas de diseño

Una vez se han eliminado estos elementos estéticos, se van a quitar por un lado los retrovisores, ya que estos no son elementos que afecten en exceso a la aerodinámica y aumentarán excesivamente la complejidad de la malla debido al pequeño tamaño de éstos. Por otro lado, también se eliminará la toma de aire superior, ya que este elemento tiene su principal función en la refrigeración y no tiene efecto aerodinámico (Figura 10 y Figura 11).



Figura 11 Toma de aire y retrovisores



Figura 10 Modelo sin toma de aire y retrovisores

A continuación, se empezará a editar por la parte delantera del modelo. El primer paso será eliminar las rejillas y el soporte para la matrícula (resaltados con los círculos azules y rojo respectivamente en la Figura 12 y Figura 13).

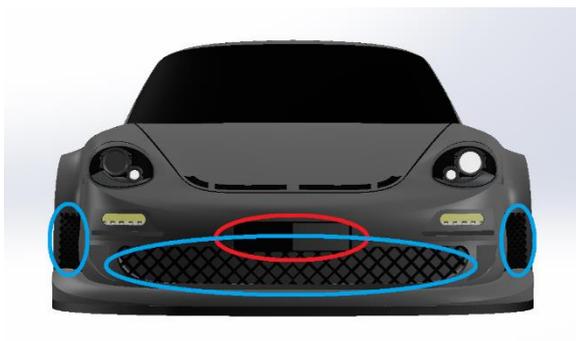


Figura 13 Elementos a eliminar

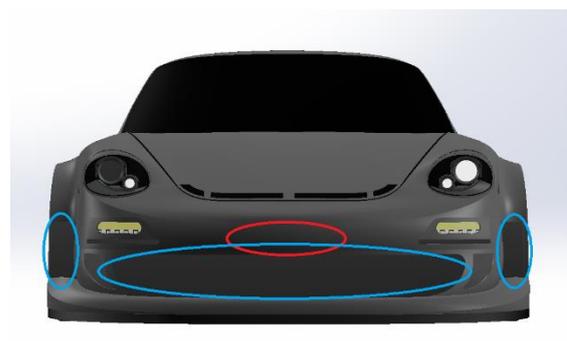


Figura 12 Elementos sin eliminar

Tras esto, se vaciarán los faros y los huecos resaltados en la Figura 14, para posteriormente, cerrar los huecos creados (Figura 15).

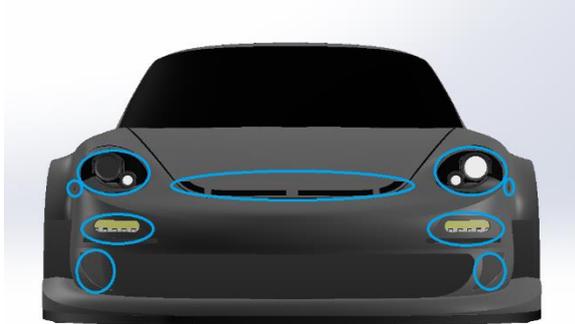


Figura 14 Elementos a vaciar



Figura 15 Huecos a rellenar

Tras crear las superficies necesarias para cerrar los huecos mostrados en la Figura 15, se termina la simplificación inicial de la parte delantera del modelo, quedando ésta como se muestra en la Figura 16.



Figura 16 Parte frontal tras la simplificación inicial

Yendo ahora a la parte trasera del modelo, se vaciará el interior de la luna trasera y de ambos faros traseros, resaltados en la Figura 17, quedando la geometría tal y como se muestra en la Figura 18.



Figura 18 Sigüientes elementos a simplificar



Figura 17 Elementos ya simplificados

El siguiente elemento por tratar será la parrilla que hay bajo la luna trasera, ya que no influye aerodinámicamente y generará una malla más pequeña a su alrededor, quedando la geometría como se muestra en la Figura 19.



Figura 19 Parrilla eliminada

Los siguientes elementos para simplificar son los inmediatamente inferiores, tanto el soporte de la matrícula trasera como los huecos laterales que están a los lados de este soporte. Estos elementos están destacados en la Figura 20, y en la Figura 21 se puede observar cómo quedará el modelo una vez ya simplificados estos elementos.

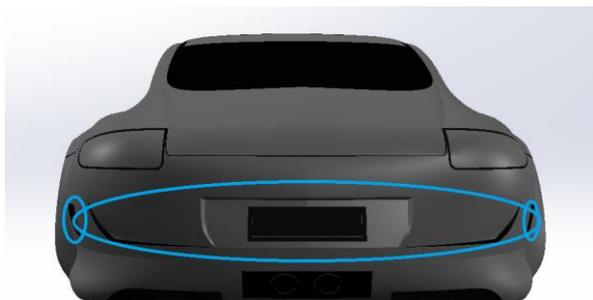


Figura 20 Elementos a modificar



Figura 21 Elementos simplificados

El último paso que realizar en la parte trasera del vehículo consiste en simplificar la parte inferior, es decir, los tubos de escape y el propio suelo del modelo, partiendo de la Figura 22 y quedando como resultado la Figura 23).

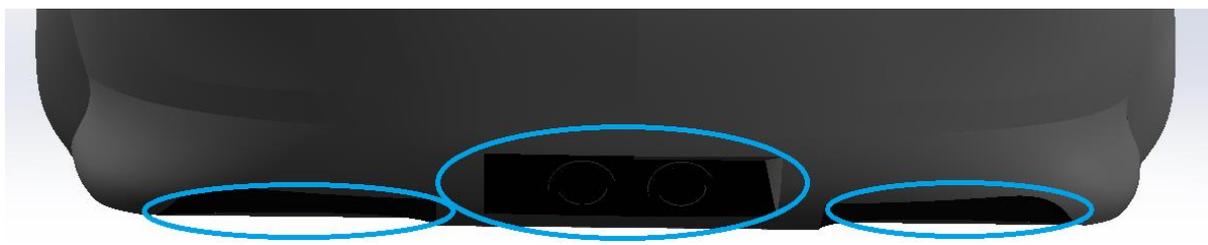


Figura 22 Elementos a simplificar

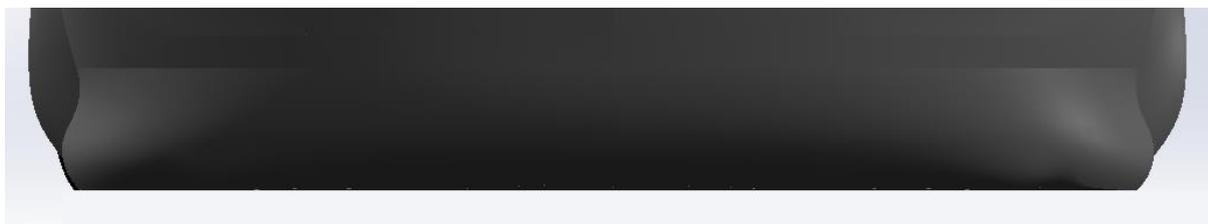


Figura 23 Parte inferior trasera simplificada

Una vez terminada la simplificación inicial de la parte tanto delantera como trasera del modelo, sólo queda el lateral. En el lateral, únicamente hay que editar la zona de las ventanas. A pesar de que a simple vista no se ve, si se comprueban las acciones realizadas en las ventanas, se puede ver que se han dividido éstas en superficies más pequeñas (Figura 24).

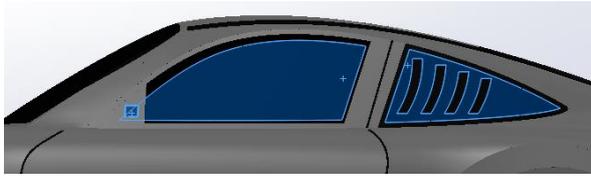


Figura 24 Superficies laterales a tratar

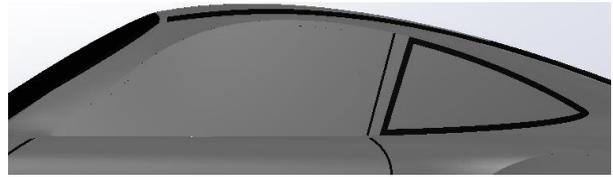


Figura 25 Superficies editadas

El último paso a realizar en esta simplificación inicial del modelo tratará de eliminar todas esas líneas negras que aparecen a lo largo del lateral y la zona trasera del vehículo, ya que su función es dividir el vehículo en diferentes partes, y lo que interesa para este trabajo es tener el mínimo número de superficies posibles, ya que un mayor número de superficies equivale a superficies de menor tamaño, y como se ha dicho anteriormente, superficies de menor tamaño requerirá de un mallado más fino y un mayor tiempo de cálculo. En la Figura 26 se pueden observar estas líneas a eliminar, y en la Figura 27 se muestra el modelo final tras la simplificación inicial:

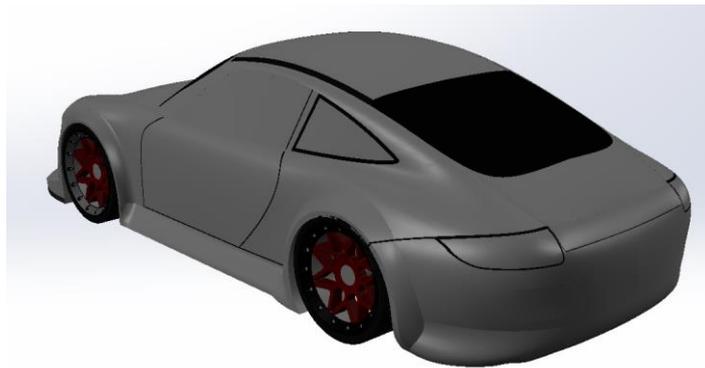


Figura 26 Líneas a eliminar

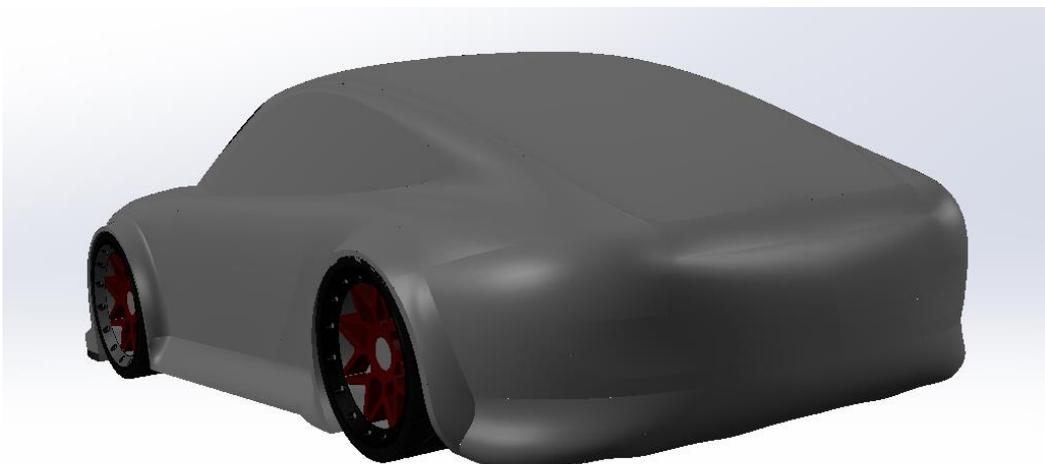


Figura 27 Modelo final tras la primera simplificación

3.3 Simplificación de las ruedas

Como se puede ver en la Figura 28, las ruedas son extremadamente complejas, así que se simplificarán.

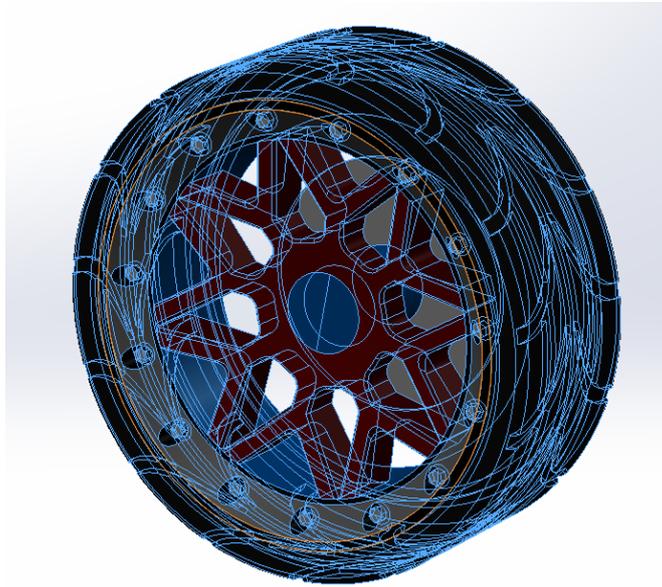


Figura 28 Rueda inicial

Como se ha dicho anteriormente, en lugar de simplificar el modelo de las ruedas, se ha optado por eliminarlas y hacer una carrocería que no incluya los huecos en los ejes para introducir las ruedas. Cabe destacar que este paso se ha realizado realmente al final de todo el proceso de edición. Para crear este modelo, se realizarán los siguientes pasos:

- El primer paso consistirá en eliminar las superficies arqueadas que hay en los ejes, destacadas en la Figura 29.

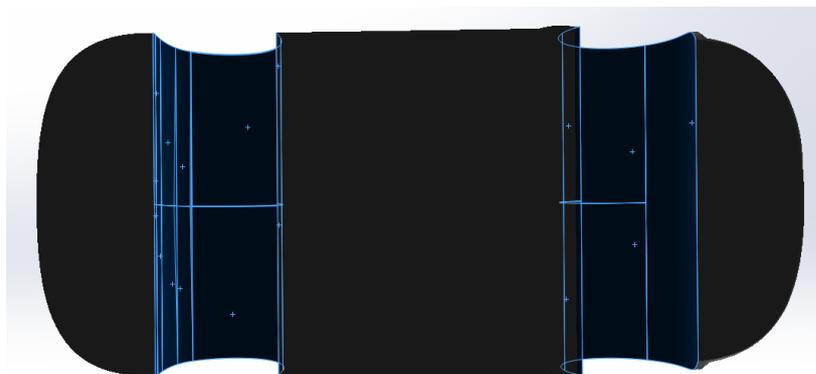


Figura 29 Elementos a eliminar

- Lo siguiente será cerrar completamente el suelo plano, y también cerrar los huecos donde deberían ir las ruedas, tal y como muestra la Figura 30.

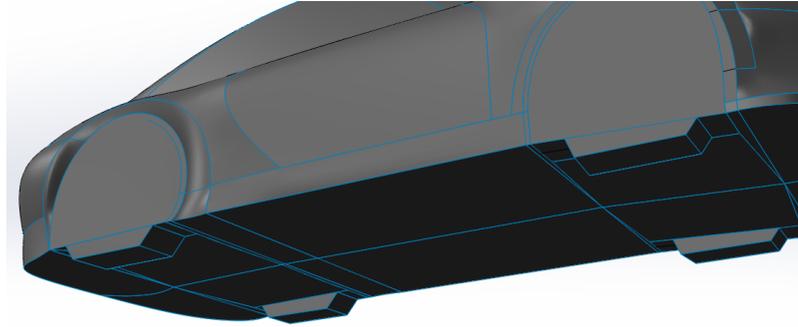


Figura 30 Suelo y ruedas cerradas

- Por último, se generará una base que haga una función de contacto entre el vehículo y el suelo. Se tendrá en cuenta para esto el motivo de la creación de las ruedas explicadas en el apartado 3.3.2. Es decir, que no tiene que generar un arco para imitar la forma de una rueda, ya que esto generaría una malla excesivamente fina alrededor del punto tangencial entre el arco de la rueda y el suelo, por lo que se generará un trapecio similar al creado en las ruedas creadas en dicho apartado. El resultado de esta operación, y el modelo definitivo de las ruedas (el vehículo se va a simplificar más) se puede observar en la Figura 31.

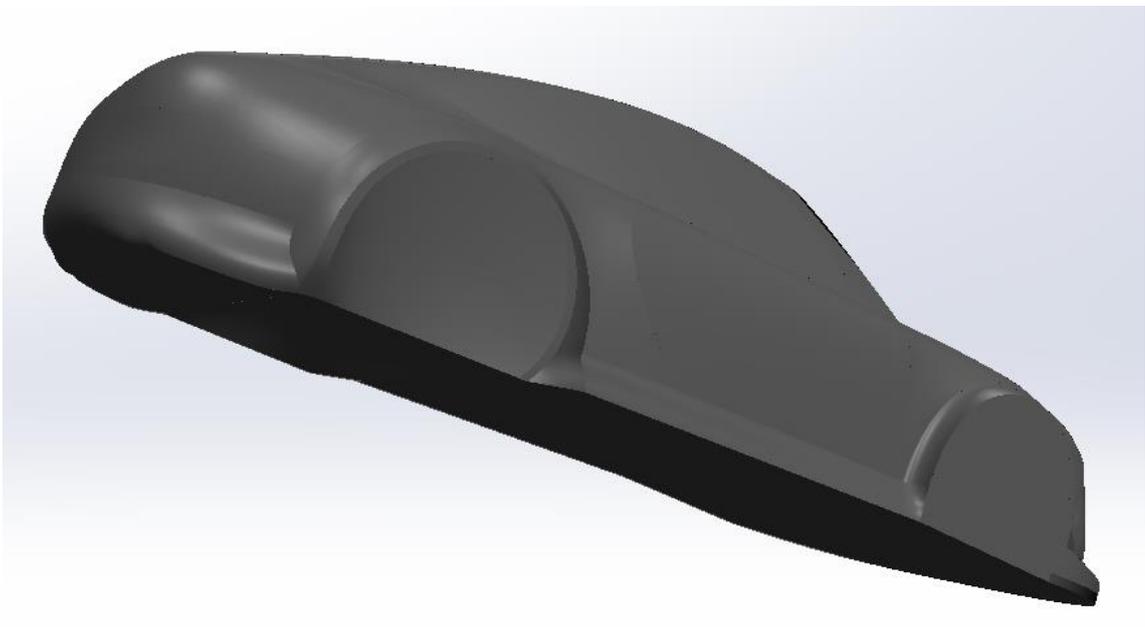


Figura 31 Modelo de ruedas definitivo

3.4 Simplificación final del vehículo

Como se ha dicho previamente, el vehículo se va a simplificar más aún ante la necesidad de reducir el número de superficies, y también de simplificar la geometría.

En este proceso de simplificación de la geometría se realizarán 4 cambios:

- En el primero de ellos, se editará el croquis del coche para eliminar los faldones del coche, tanto el delantero como los laterales, ya que, aunque esos faldones sí tengan una función aerodinámica, ya que reconducen el flujo del aire hacia la parte superior de este, generando así mayor presión en el techo del vehículo y menor bajo el fondo del coche, la malla necesaria para estudiar el flujo del aire correctamente alrededor de los faldones sería demasiado fina (representado en azul en la Figura 32 y en la Figura 33).
- El segundo cambio se centrará en cambiar el croquis que da forma a los faros delanteros para intentar hacer más plana la parte delantera. El cambio realizado está destacado de color naranja en la Figura 32 y en la Figura 33).

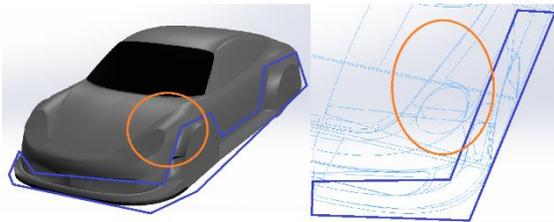


Figura 32 Elementos a editar

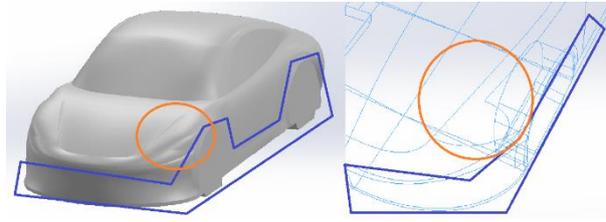


Figura 33 Elementos editados

- El tercer cambio que realizar está en la zona del eje trasero. Como se puede ver en la Figura 34, hay un saliente en el eje trasero. Aunque con las ruedas cerradas este saliente no tendría ningún problema, las ruedas se cerraron posteriormente, por lo que esta medida se adoptó antes de cerrar las ruedas. En la Figura 35 se puede ver cómo queda el saliente una vez editado.

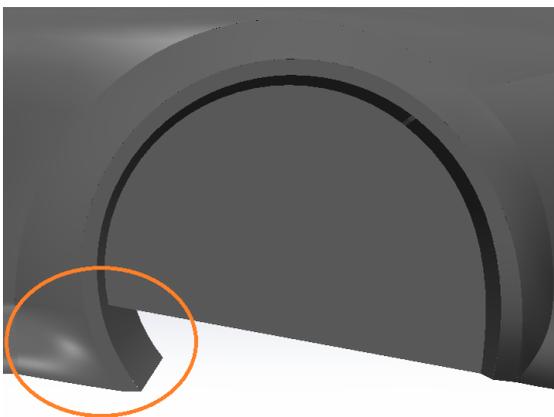


Figura 35 Saliente sin editar

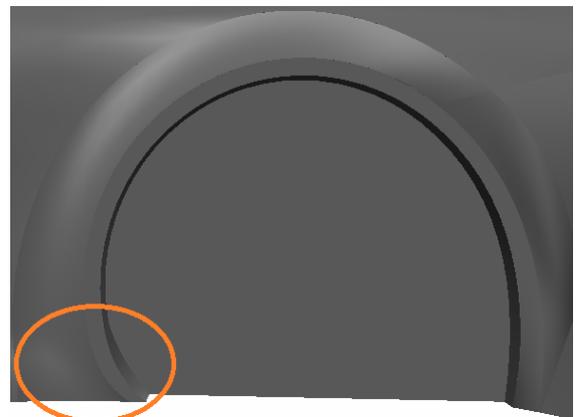


Figura 34 Saliente editado

- La cuarta y última simplificación tratará de sustituir las superficies más pequeñas para crear otras más grandes, reduciendo así posteriormente la complejidad de la malla. El primer método que se ha seguido es eliminar esas superficies más pequeñas y crear nuevas. Tras esto, se seleccionan todas las superficies existentes, y se cosen para tratar de que no haya huecos entre las superficies para poder crear el sólido correctamente. En la Figura 36 se puede observar el modelo definitivo que ha sido estudiado:

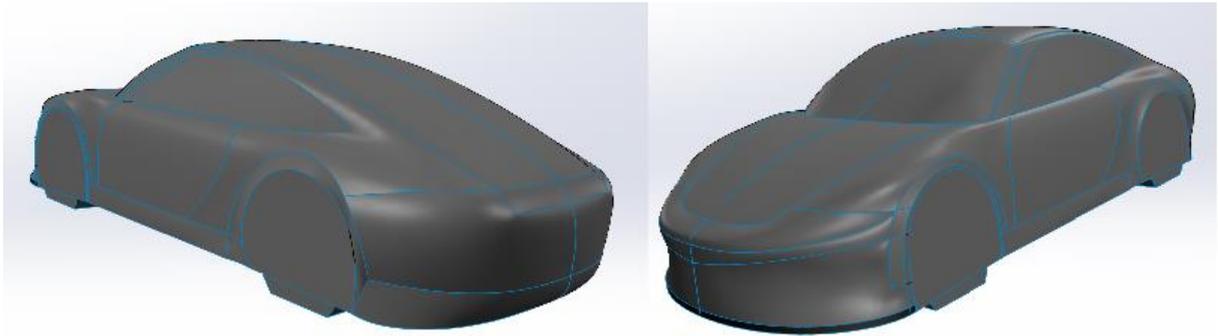


Figura 36 Modelo final

3.5 [Modelización de los alerones](#)

En este apartado se va a explicar los pasos que se han seguido para crear los diferentes alerones estudiados. Para empezar, el modelo del vehículo se ha creado primero por una mitad, para posteriormente generar la otra mitad aprovechando la simetría de la geometría del modelo. Aprovechando esto, se ha suprimido momentáneamente esta simetría para facilitar la creación del alerón. Lo primero se ha creado en la parte trasera del modelo, el cual es una copia del modelo final (habrá una copia para el modelo sin alerón y una copia para cada alerón diferente), un croquis con forma de rectángulo que cruce con el vehículo y extruirlo, tal y como se ve en la Figura 37.

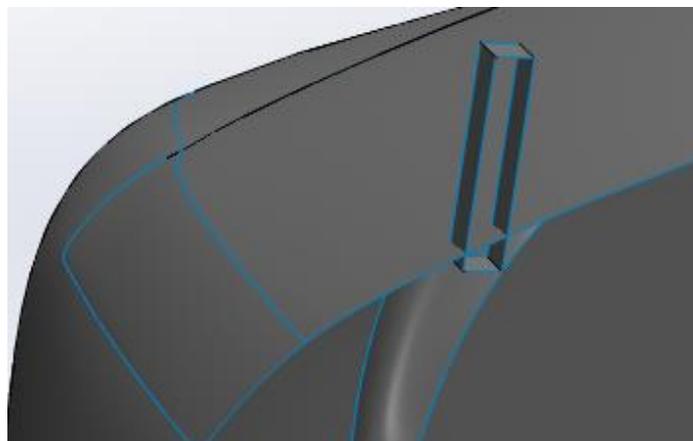


Figura 37 Creación de la base del alerón

Como este trabajo no va a calcular los esfuerzos mecánicos que tendrá que soportar el alerón, la base creada ha sido de pequeño tamaño para que tenga el menor impacto aerodinámico. Las dimensiones del rectángulo creado son 40 milímetros de largo y 200 de alto ya escalado. La extrusión realizada ha sido de 40 milímetros, por lo que la base medirá 80 milímetros de ancho. Tras la extrusión, se recortará la superficie que se encuentra en el interior del vehículo; y, tras este recorte, se generará una superficie con la herramienta "Rellenar Superficie" en lo que será la cara externa del alerón, y en caso de que sobresalga área por debajo, se recortará el sobrante, tal y como se ve en la Figura 38, representado de color morado.

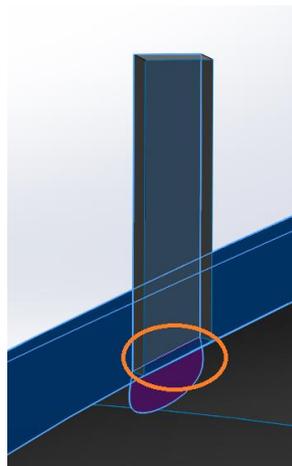


Figura 38 Elementos a recortar

Tras eliminar esa área sobrante, se recortará también el área que está resaltada con un círculo naranja en la Figura 50. Esto se hace para garantizar que, cuando se generen los sólidos de los modelos, se cree un único sólido posteriormente, ya que, si no se recorta esa área, se generarían dos sólidos divididos por esa área. Por un lado, se crearía el sólido del coche sin alerón; y, por otro lado, se crearía el sólido del alerón.

Lo siguiente es realizar el croquis que resultará ser el propio alerón. Para crearlo, se ha generado un triángulo en el que la base del triángulo, cuyo centro coincide con el centro de la superficie superior de la base, mide 250 milímetros; y cuya hipotenusa está 5 grados separada de la base. Después, se ha extruido 690 milímetros, por lo que el alerón tendrá una extensión total de 1380 milímetros. En la Figura 39 se puede ver el croquis utilizado.

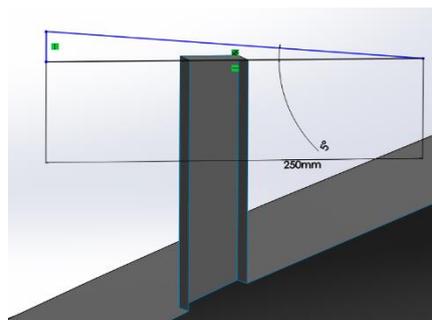


Figura 39 Croquis del alerón

Tras la extrusión, se ha creado una superficie en el extremo del alerón recién extruido para cerrarlo y, se han eliminado las dos superficies que hay en la parte superior de la base (una corresponde a la parte superior de la base, y la otra corresponde al alerón recién extruido). Por último, se reactiva la herramienta “Simetría”, añadiendo las superficies creadas para la modelización del alerón.

Se han creado nuevos modelos variando el ángulo existente entre la hipotenusa y la base del triángulo generador del alerón, generando así modelos (además del creado ahora de 5º) de 10º, 15º, 20º, 25º, 30º, 35º, 40º, 45º, 50º, 60º, 70º y 80º. Tras crearlos, se ha comprobado que los modelos de 60º, 70º y 80º sobresalen verticalmente en exceso, por lo que se han creado otros 3 modelos con estos ángulos, pero disminuyendo el tamaño de la base a 125 milímetros. Con este tamaño de base, los alerones de 60º y de 70º se acoplan correctamente en el eje vertical, pero el alerón de 80º se ha vuelto a disminuir por el mismo motivo que el anterior. El alerón de 80º grados se ha generado con una base de 40 milímetros. En la sección de planos se pueden ver todos los modelos utilizados.

Para crear los sólidos de todos los modelos realizados anteriormente, se han exportado todos en archivo iges (extensión .igs), generando así los sólidos automáticamente.

Tras esto, se ha terminado la edición del modelo en SolidWorks®.

3.6 [Creación del volumen de aire a estudiar](#)

Una vez finalizada la edición del modelo, se debe crear un nuevo proyecto en el programa de elementos finitos. La extensión ANSYS Geometry® se usará para crear un volumen que simulará el movimiento del aire alrededor del vehículo. Una vez abierto el editor, se importará el modelo del vehículo. Es importante indicar al importar el modelo que la operación sea “Add Frozen” y no “Add Material”, ya que, si se añade material, las futuras operaciones de creación del volumen de aire no se podrán realizar. Tal y como se ha dicho anteriormente, el modelo del vehículo no está a escala 1:1, por lo que se ha de escalar ahora. No se ha escalado el vehículo antes porque se estaban tratando superficies, y escalar superficies tiene dos problemas:

- Si existe alguna pequeña superficie, es posible que no se seleccione, quedando el modelo del vehículo incompleto y sin cerrar.
- Si el modelo no está perfectamente cerrado y existe algún espacio entre superficies, al escalar las superficies, los espacios entre estos también se escalarán, haciéndolos más problemáticos.

Con todo esto, se escalará el sólido importado desde el origen por los siguientes factores: el eje X (eje perpendicular) por 3,825, el eje Y (eje vertical) por 3,774, y el eje Z (eje longitudinal) por 3,878. Tras escalar el sólido, éste se traslada al punto -1 metro en el eje Z (eje longitudinal). El traslado en el eje Z se realiza para que la segunda extrusión a realizar (explicada más adelante) se realice desde el origen.

En los siguientes pasos se van a explicar la creación de las cámaras de aire. Para crearlas, se necesitan crear dos croquis, uno para cada una de las dos cámaras a crear. El motivo de la creación de dos cámaras es debido a la necesidad de crear una malla más fina cerca del vehículo, ya que es en el propio vehículo donde se necesitan las fuerzas que ejerce el aire sobre el coche. Ambos croquis han sido creados en el plano XY, y parten del origen; el croquis de la cámara menor mide 1,5 metros en el eje X y 2 metros en el eje Y, mientras que el croquis de la cámara mayor mide 2,2 metros en el eje X y 2,5 metros en el eje Y. Estas medidas se han adoptado con el fin de minimizar el tamaño del volumen creado, consiguiendo así menos elementos mallados, pero garantizando unos cálculos correctos. La Figura 40 muestra ambos croquis y el modelo del vehículo importado.

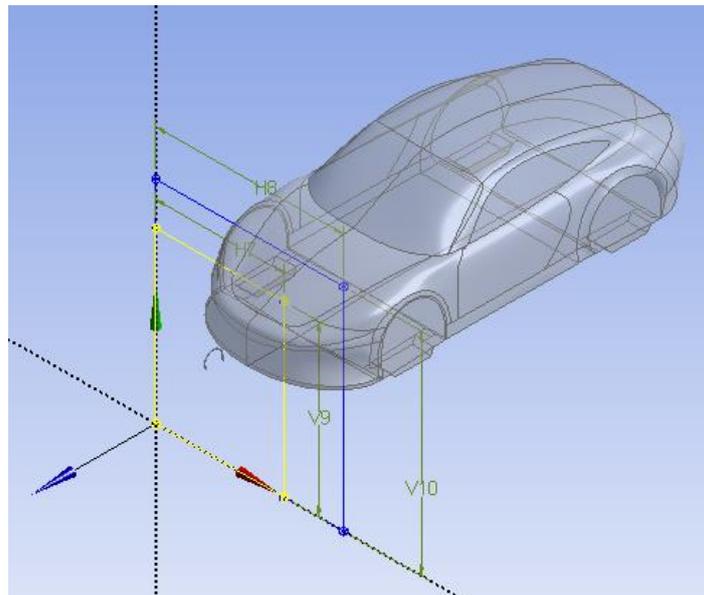


Figura 40 Croquis de las cámaras a crear

A continuación, se ha extruido el croquis mayor para generar el volumen que supondrá la cámara de aire en movimiento. Las medidas de esta extrusión son de 0,5 metros en el sentido positivo y 9,5 metros en el sentido negativo del eje longitudinal (eje Z). En esta operación es importante que se añada material, ya que el volumen que se va a generar mediante en esta extrusión es el volumen que se va estudiar finalmente. Tras este paso, se sustraerá el vehículo importado al principio del proceso, de la extrusión recién generada, quedando como resultado de la sustracción lo que muestra la Figura 41.

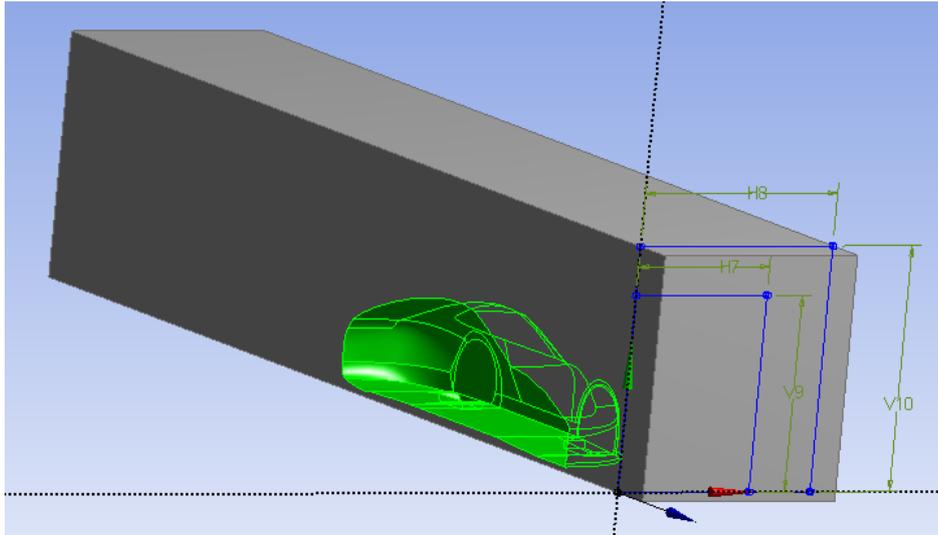


Figura 41 Resultado de la supresión del coche al volumen de aire

El siguiente paso consistirá en otra extrusión. Esta extrusión será con el otro croquis, el de la cámara interior, y la operación a realizar consistirá en partir el volumen creado en la Figura 41 en dos cámaras diferentes. La distancia de corte (extrusión) ha sido de 9,5 metros en el sentido negativo del eje longitudinal.

Por último, en el árbol de procesos realizados, se seleccionarán los dos sólidos existentes (cada uno hace referencia a cada una de las cámaras, la interior y la exterior), y formaremos una nueva parte que contenga ambos sólidos, ya que sin la creación de una sola parte que englobe toda la cámara en general, el programa es incapaz de calcular. Además, en cada uno de los sólidos existentes se indicará que, en realidad, se trata de un fluido y no un sólido.

En la Figura 42 se puede observar la geometría final de la cámara de aire que se mallará y estudiará en los siguientes capítulos.

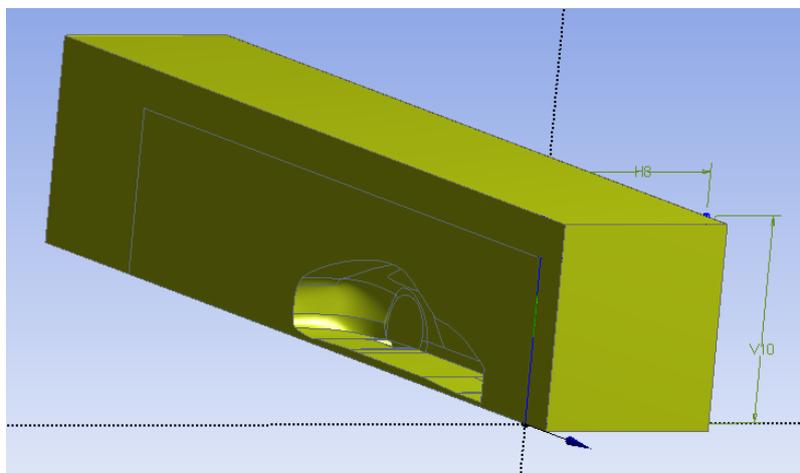


Figura 42 Volumen de estudio final

4 MALLADO

4.1 [Introducción](#)

El proceso de mallado es uno de los procesos más importantes en este trabajo, ya que va a afectar al resultado obtenido tras el estudio aerodinámico. A menor tamaño de malla, el tiempo de cálculo es mayor, pero la fiabilidad del resultado también aumenta. Por este hecho es importante hacer un estudio de malla, para observar cual es el mínimo número de celdas (mayor tamaño de malla) con el que se obtiene un resultado que sea considerado válido.

Una vez conseguida la geometría a estudiar, queda únicamente un último paso antes de calcular las fuerzas que aparecerán alrededor del vehículo. Como se ha dicho anteriormente, ANSYS® es un programa de elementos finitos, lo que significa que divide la geometría a estudiar en pequeños elementos, en los cuales se les asigna unas condiciones de contorno, y se calcula lo requerido en cada elemento.

La división en estos pequeños elementos es lo que se conoce como proceso de mallado, que es el proceso que se va a realizar a continuación para, posteriormente, calcular las fuerzas aerodinámicas que aparecerán sobre el modelo. Este proceso de mallado se realiza mediante la extensión Mesh®.

El proceso de mallado se va a realizar en dos pasos. Primero se va a hacer un estudio de malla, en el cual se estudiará la relación entre el tamaño de malla y los resultados obtenidos; y, después, se realizará una malla lo más óptima posible para realizar los cálculos pertinentes en Fluent®, con el fin de obtener los resultados más fiables.

4.2 [Estudio de malla](#)

Antes de crear la malla que se utilizará posteriormente, es necesario evaluar la incidencia que tiene la malla en el resultado final que se va a obtener después. Evaluar esta incidencia es lo que se conoce como estudio de malla.

La metodología empleada para realizar el estudio de malla es realizar varios estudios aerodinámicos, variando cada vez el tamaño de malla. La versión utilizada para realizar el estudio es la educacional, la cual tiene el límite de 512000 celdas como máximo. Ante este límite, se empieza seleccionando un tamaño de malla lo suficientemente grande sobre el que se realiza un primer estudio aerodinámico, y, tras esto, se van haciendo más estudios disminuyendo el tamaño de malla empleado hasta llegar al límite impuesto.

Se hicieron 2 estudios de malla de forma paralela y a tres velocidades diferentes (40 m/s, 60 m/s y 90 m/s), con el fin de recoger una mayor información. Un estudio se realizó sobre el modelo sin alerón y el otro sobre el modelo con alerón de 25°. En la Figura 43 se puede observar la variación en los coeficientes aerodinámicos en el modelo sin alerón, y en la Figura 44 se presenta la variación en el modelo con alerón de 25°.

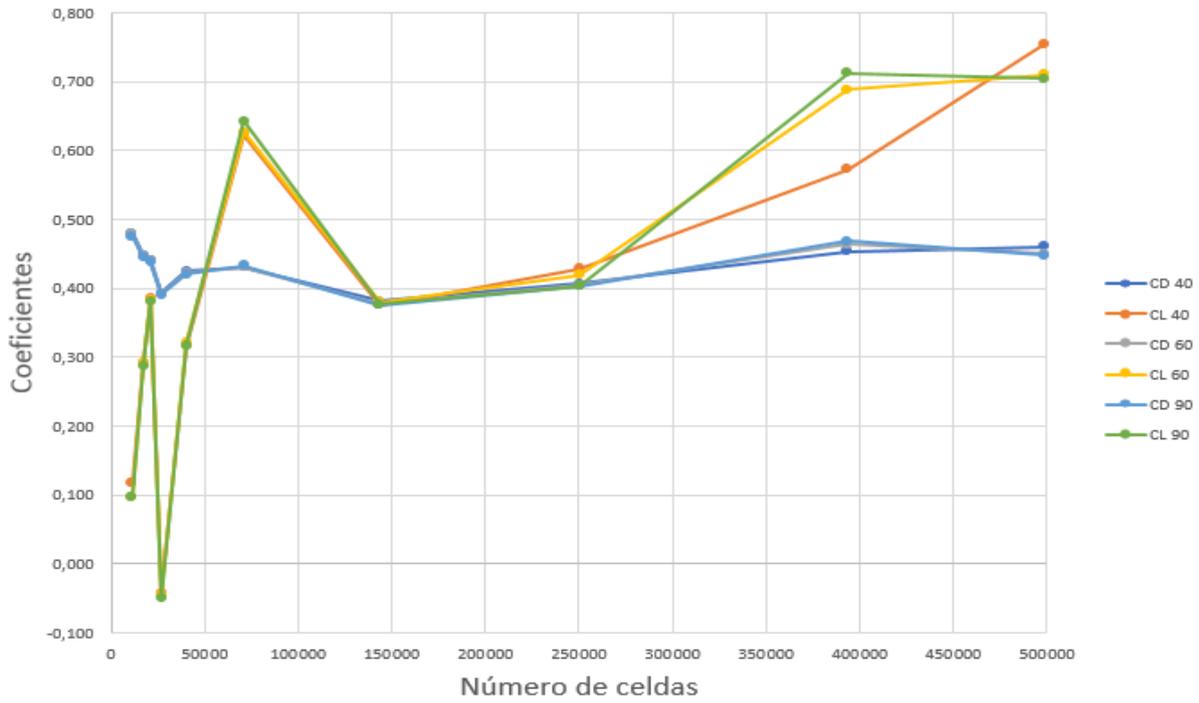


Figura 43 Estudio de malla del modelo sin alerón

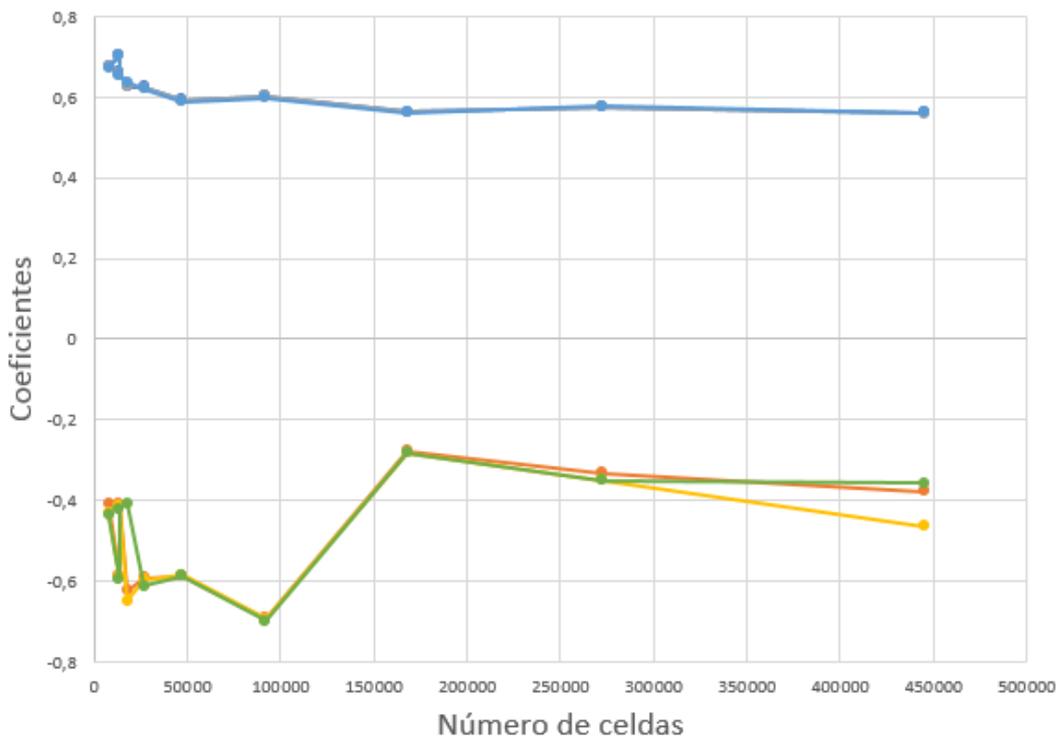


Figura 44 Estudio de malla del modelo con alerón de 25°

Observando ambas gráficas, se puede observar el efecto que tiene la cantidad de celdas utilizadas con el resultado obtenido. Se observa que, variando la velocidad de estudio, los resultados obtenidos no varían respecto a las otras, también se observa que el coeficiente de arrastre o drag es, en ambos casos, semejante a lo largo del barrido de los tamaños de malla. Respecto al coeficiente de sustentación o lift, éste es semejante a tamaños de malla medios o pequeños (a bajo número de celdas, el coeficiente oscila en exceso; esto es comprensible, ya que, al haber menos elementos, los resultados obtenidos son menos fiables). Como se puede comprobar con estos estudios de malla, el tamaño de malla, al menos garantizando un mínimo de celdas (unas 150000 como mínimo), no afecta prácticamente al resultado final.

Una vez comprobado y validado el estudio de malla, se procede con la creación y optimización de la malla utilizada en el cálculo aerodinámico.

4.3 [Creación y optimización de la malla](#)

Entrando ya en la creación de la malla, lo primero que hay que hacer es cambiar las características de la malla, indicando que este problema es de CFD y que se va a utilizar Fluent® para resolverlo.

Antes de optimizar la malla, se ha creado un nuevo sistema de coordenadas, el cual se usará posteriormente para ajustar el tamaño de malla alrededor de éste. Este nuevo sistema de coordenadas tiene su origen en, aproximadamente, la mitad del vehículo respecto al eje longitudinal (en este trabajo se ha situado exactamente en el origen del eje X y del eje Y, y a -3,8 metros del origen del eje Z), como se puede ver en la Figura 45.

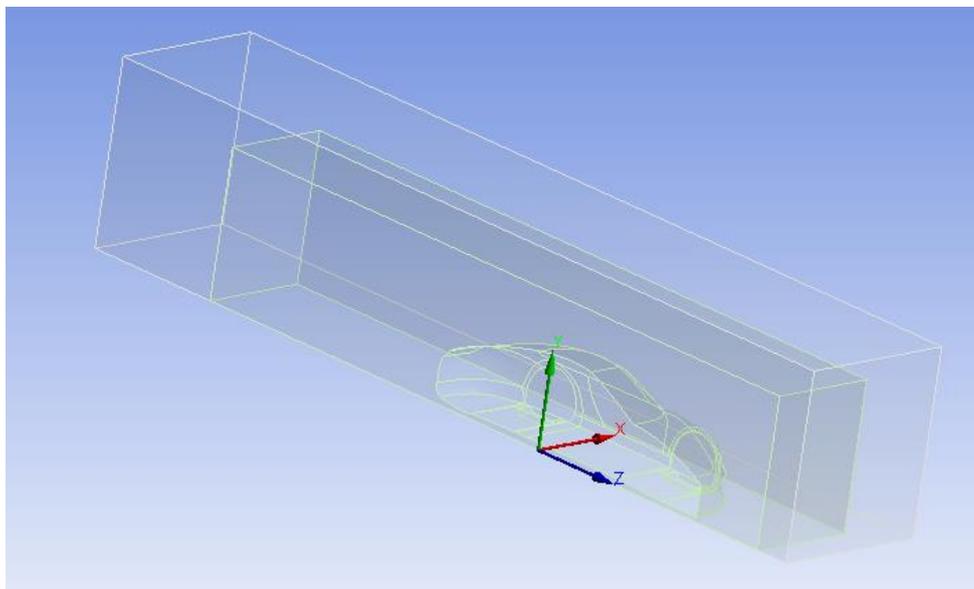


Figura 45 Nuevo sistema de coordenadas

Tras este proceso, se crea la malla. Lo primero es ajustar el tamaño de la malla general, en este trabajo se le ha asignado un tamaño de 0,15 metros. Después, en la parte externa de la cámara se fuerza que los elementos de la cámara externa sean cuadriláteros en lugar de triángulos, ya que estos ofrecen una mayor fiabilidad en los resultados, pero aumentando el número de elementos (motivo por el cual no se aplica en la cámara interna, ya que aumentaría excesivamente el número de elementos).

Por último, se aplicarán dos cambios en el tamaño de malla. El primero se aplica en la cámara interna, donde se aplicará un tamaño de malla inferior al usado en la cámara externa, ya que esta cámara necesitará un estudio más profundo y fiable; para este trabajo se ha impuesto un tamaño de malla para la cámara interna de 0,1 metro. El segundo se va a aplicar también en la cámara interna, pero respecto a una esfera de influencia alrededor del centro de coordenadas generado anteriormente (Figura 45), para disminuir más el tamaño de malla en la zona más cercana del lugar que ocupa el vehículo. En este trabajo se ha aplicado esta opción con un tamaño de malla de 0,065 metros en una esfera de radio 3,2 metros.

Tras esto, la malla estará terminada, resultando una malla como la mostrada en la Figura 46.

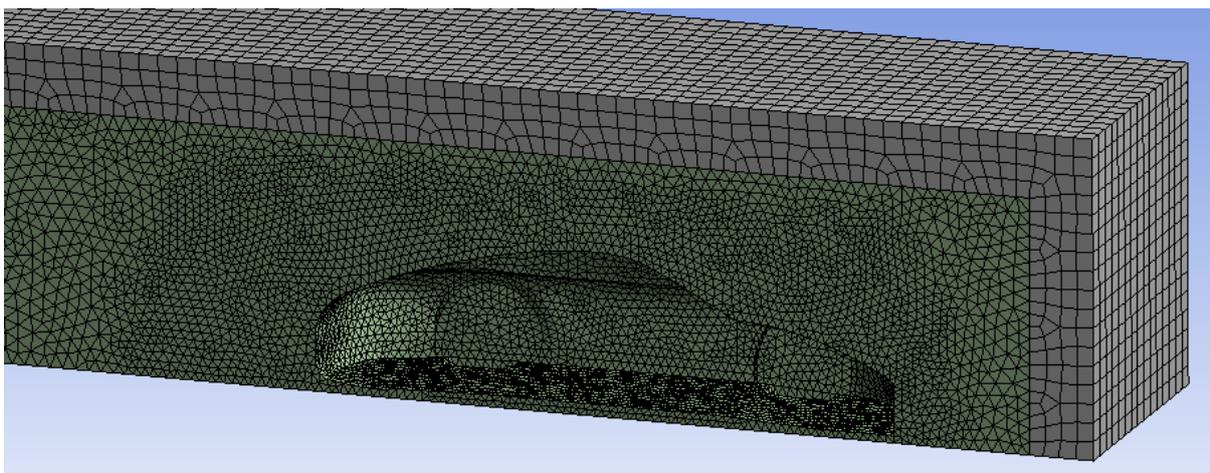


Figura 46 Malla final

Para comprobar la optimización, se comprueban dos parámetros que aparecen en las estadísticas de la malla:

- El primer aspecto que se comprobará será la ratio de aspecto. Este parámetro indica la diferencia que existe entre el lado más largo y el lado más corto de los elementos. El valor óptimo es 1, que indica que el lado más largo y el más corto son iguales, por lo que una buena malla debe aproximar el valor de su ratio de aspecto a 1. En la Figura 47 se puede ver la ratio de aspecto de la malla, con su valor máximo, mínimo y medio.

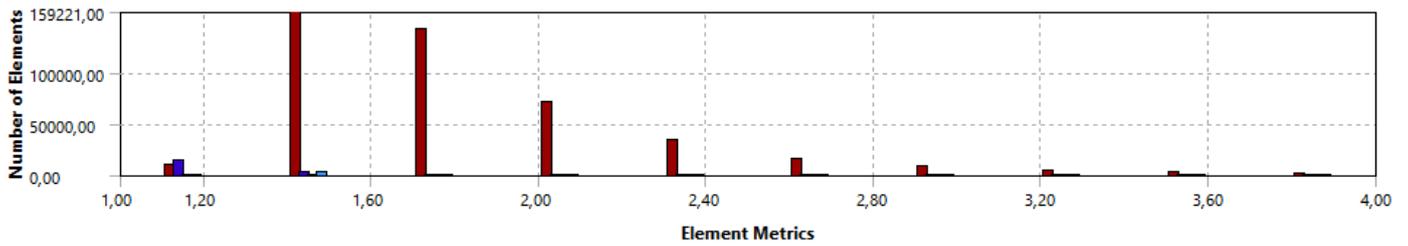


Figura 47 Ratio de aspecto

- El otro parámetro que comprobar es la asimetría (Skewness). La asimetría mide la desviación de los elementos de la malla, es decir, mide los ángulos de desviación de los vértices de los elementos. El valor óptimo en este caso sería 0, ya que esto significaría que no hay ninguna variación en los vértices; siendo menor a 0,25 un valor excelente y menor a 0,5 un valor aceptable. En la Figura 48 se puede comprobar la asimetría de la malla, con su valor máximo, su valor mínimo y su valor medio.

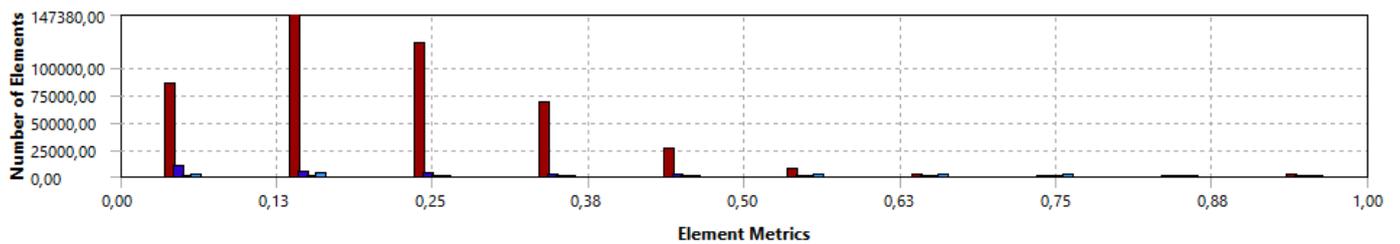


Figura 48 Asimetría

Como último paso a realizar en el programa de mallado, se deben nombrar varias zonas. Este proceso es necesario para establecer unas condiciones de contorno diferentes en cada zona del modelo. A la superficie que está delante de la parte delantera del vehículo se le llamará “velocity-inlet-Entrada”, a la superficie que está detrás de la parte trasera del coche se le llamará “pressure-outlet-Salida”, otra superficie a nombrar será “Suelo”, las 3 caras restantes de la cámara de aire se les llamará “symmetry-Techo”, “symmetry-EjeY” (correspondiente a la cara donde está el hueco correspondiente al vehículo) y “symmetry-Pared”. Por último, queda seleccionar todas las superficies que generan el hueco del vehículo, y llamarlas “Coche”.

5 ESTUDIO AERODINÁMICO

5.1 [Introducción](#)

Una vez realizado el mallado del volumen a estudiar, el siguiente paso será calcular ya las fuerzas aerodinámicas que aparecen alrededor del vehículo de estudio. Para resolver el problema aerodinámico, se utilizará la extensión ANSYS Fluent®, que es la extensión de ANSYS para resolver problemas de CFD.

5.2 [Preparación del análisis en ANSYS Fluent®](#)

Tras abrir el programa de cálculo de elementos finitos, y antes de lanzar el cálculo de las fuerzas aerodinámicas, es necesario cambiar los parámetros de estudio con el fin de ajustarlos a nuestro problema.

En la configuración de la solución, se tiene que escoger el tipo de modelo de cálculo, el cual se ha escogido un modelo viscoso del tipo k-epsilon Realizable.

El siguiente paso consiste en editar las condiciones de contorno (“Boundary Conditions”). Estas condiciones de contorno están aplicadas en las zonas que se nombraron al final de capítulo 4 (“Name Selection”), por lo que cada una de las 7 regiones nombradas tendrá sus propias condiciones de contorno. Estas condiciones de contorno son las siguientes:

- Las 3 zonas nombradas con “symmetry” (“symmetry-Techo”, “symmetry-EjeY” y “symmetry-Pared”) serán del tipo “symmetry”.
- “Coche” será del tipo “wall”.
- “Suelo”, por su parte, también será del tipo “wall”. En esta ocasión, se tienen que editar las condiciones de contorno. Debido a que el estudio simulará al coche en movimiento, pero éste realmente está parado, la manera de simular este movimiento es hacer que sea el propio suelo el que esté en movimiento (como si fuera una cinta) y “mover” también el aire a la velocidad de estudio desde la superficie frente al coche hacia la superficie de la parte trasera. Para indicar este movimiento del suelo, se selecciona la opción “Moving Wall”, seleccionando la opción “Absolute” para indicar el movimiento en la dirección deseada. Este movimiento será traslacional, en la dirección -1 del eje Z (eje longitudinal), y a la velocidad a la que se desee realizar el estudio, la cual ha sido de 40 m/s para este caso.
- “Pressure-outlet-Salida” será del tipo “pressure-outlet”. Este tipo de condición de contorno hace referencia a la presión que existirá en la región de salida. Al editar los parámetros de esta condición de contorno, se cambiarán los parámetros de turbulencia: el método específico se cambiará a “Intensity and Hydraulic Diameter”, y se cambiará el valor del campo “Backflow Hydraulic Diameter” por 0,585 metros. Este valor se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\text{Diámetro Hidráulico} = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}} = \frac{2,2 * 2,5}{2,2 * 2 + 2,5 * 2} \approx 0,585 \text{ m} \quad (28)$$

- Por último, queda la zona “velocity-inlet-Entrada”, que será del tipo “velocity-inlet”. Al editar las características de las condiciones de contorno, se cambiará el método de especificación de la velocidad para introducir la magnitud y la dirección absoluta de la velocidad. La velocidad será la de estudio, 40 m/s como se había dicho anteriormente es la elegida en este trabajo, y con dirección en el sentido negativo del eje Z (componente del eje Z = -1). Además de variar el método de especificación de la velocidad, se cambiarán también los parámetros de turbulencia, tal y como se había hecho en la zona de “pressure-outlet-Salida”. En este caso, el valor del diámetro hidráulico también tendrá un valor de 0,585 metros, ya que el área y el perímetro de este contorno son exactamente los mismos que en la sección que tiene la zona de “pressure-outlet-Salida”.

El siguiente campo que editar será “Solution Controls”, donde se cambiarán todos los campos a la mitad de su valor predeterminado a excepción de la presión y la densidad. Los valores introducidos son:

- Presión = 0,3
- Densidad = 1
- Fuerzas del cuerpo = 0,5
- Momento = 0,3
- Energía cinética turbulenta = 0,4
- Ratio de disipación turbulenta = 0,4
- Viscosidad turbulenta = 0,5

A continuación, se añadirán dos monitores para poder observar cómo van variando ambas fuerzas aerodinámicas alrededor del coche. El primero de ellos será de drag, activando la casilla “Plot” para así ver cómo varía a lo largo del cálculo, y cambiando el vector de fuerza a X=0, Y=0 y Z=-1. El segundo monitor será de lift y activando otra vez la casilla “Plot”.

Tras todos estos pasos, se inicializa la solución mediante el método estándar, se selecciona un número de iteraciones que garantice que el resultado haya convergido, y se lanza el cálculo. Para que la solución en ANSYS Fluent® converja, es necesario que los valores residuales de cálculo disminuyan a un valor inferior a 0,001 (valor predeterminado). Se ha observado que, para llegar a esos valores, en función del modelo, entre 1000 y 2000 iteraciones, en algunos incluso algunas más que 2000, por lo que, en el campo de número de iteraciones, habrá que indicar un número superior a esas más de 2000 iteraciones que necesitan algunos modelos.

5.3 Obtención de soluciones

Una vez lanzado el cálculo en ANSYS Fluent®, se podrá comprobar cómo van los datos residuales (para comprobar la convergencia, no convergencia o divergencia del resultado), y cómo van ambas fuerzas aerodinámicas. En la Figura 49 se puede observar la evolución de todos estos parámetros a lo largo de las iteraciones.

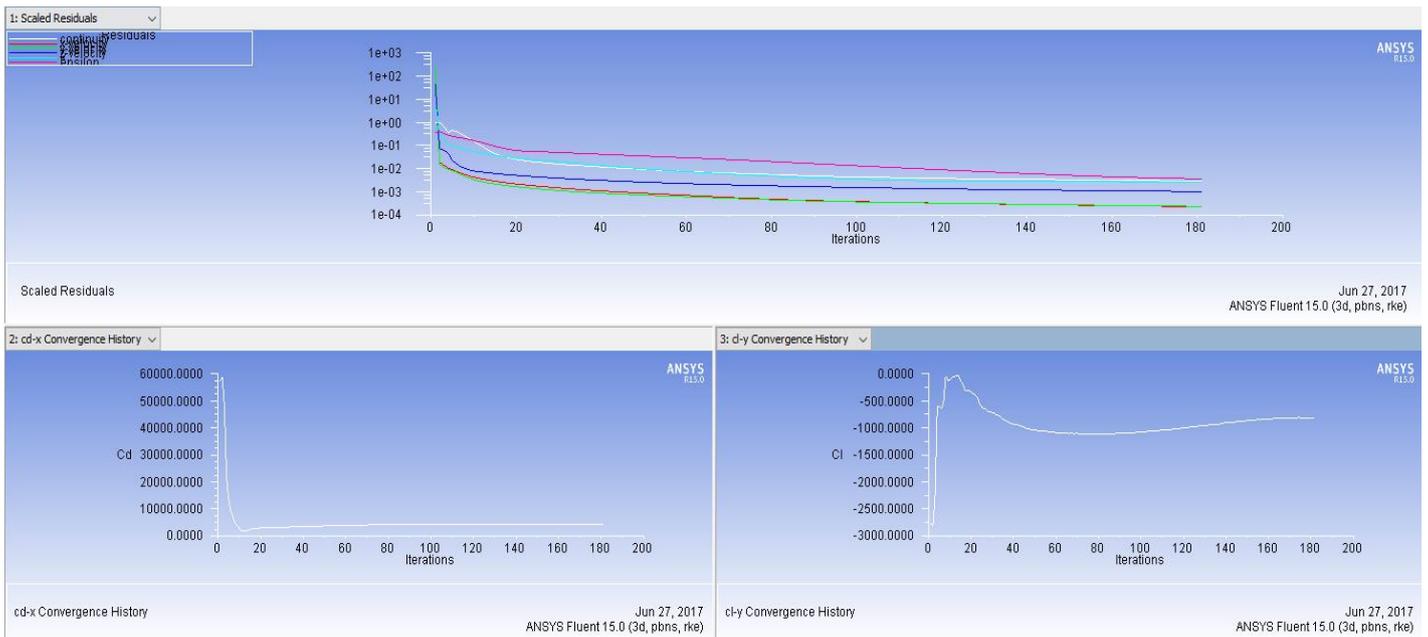


Figura 49 Valores residuales y fuerzas aerodinámicas a lo largo de las iteraciones

Como se puede observar en la Figura 49, tanto los valores residuales (pantalla superior) como ambas fuerzas aerodinámicas (pantallas inferiores) están convergiendo hacia un resultado. Cuando todos los valores residuales bajen del valor mínimo de 0,001, el programa terminará de calcular. Tras esto, ya se podrá extraer toda la información que se necesita. Primero, las fuerzas aerodinámicas, para así obtener los coeficientes aerodinámicos y, posteriormente las velocidades. Además de estas fuerzas, se pueden obtener mapas de presiones o de velocidades (Figura 50), mapas de vectores, e incluso animaciones del paso del aire alrededor del vehículo

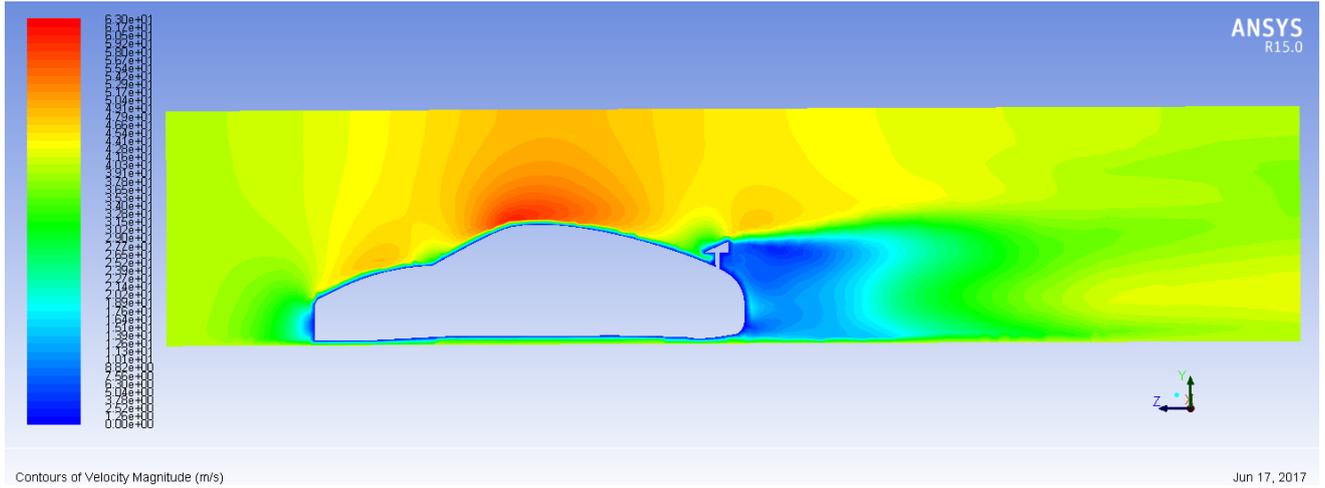


Figura 50 Mapa de velocidades

6 RESULTADOS

6.1 Introducción

En este capítulo se van a exponer los resultados de todos los modelos estudiados. Para ello, se necesita realizar los pasos explicados anteriormente (creación del volumen de aire, mallado y estudio aerodinámico) para todos los modelos de estudio. Es conveniente generar nuevos estudios para cada uno de los casos, ya que así se podrá acceder al resultado de cualquier modelo de alerón en cualquier momento.

6.2 Coeficientes aerodinámicos

Tras calcular todos los modelos, es momento de volver a la hoja de cálculo creada anteriormente, para introducir todos los valores obtenidos y calcular rápidamente los coeficientes aerodinámicos y las velocidades correspondientes. En la Tabla 6 se puede observar la comparativa de todas las fuerzas y coeficientes aerodinámicos en función del modelo.

Tabla 6 Fuerzas y coeficientes aerodinámicos

Resultados					
Base (mm)	Ángulo (º)	Fa (N)	Fs (N)	CD (-)	CL (-)
250	0	487,514	866,142	0,244	0,433
250	5	413,044	-56,641	0,207	-0,028
250	10	442,992	-104,738	0,221	-0,052
250	15	494,224	-194,252	0,247	-0,097
250	20	523,100	-209,680	0,262	-0,105
250	25	558,079	-322,861	0,279	-0,161
250	30	612,777	-386,795	0,307	-0,193
250	35	683,022	-391,060	0,342	-0,196
250	40	755,165	-523,133	0,3778	-0,262
250	45	826,919	-731,665	0,414	-0,366
250	50	933,785	-916,914	0,467	-0,459
250	60	1244,819	-1080,552	0,623	-0,540
250	70	2231,568	-1752,529	1,116	-0,877
250	80	2319,886	-3710,641	1,160	-1,856
125	60	782,255	-506,696	0,391	-0,253
125	70	1039,046	-695,978	0,52	-0,348
125	80	1210,468	-1440,960	0,605	-0,721
40	80	789,545	-460,865	0,395	-0,231

En la Figura 51 se puede ver gráficamente la comparación entre los coeficientes aerodinámicos:

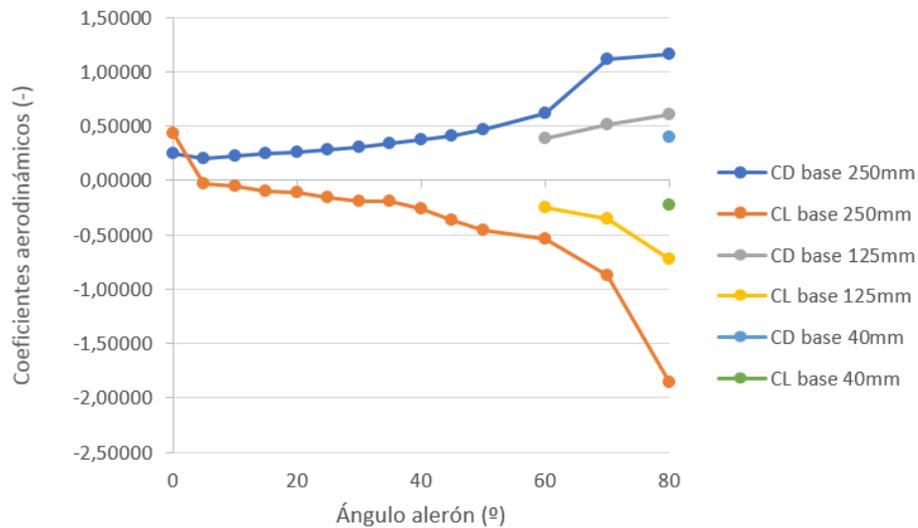


Figura 51 Comparación de coeficientes aerodinámicos

Como se puede observar, a mayor ángulo en el alerón, aumenta el coeficiente de agarre o drag y disminuye el de sustentación o lift. Esto tiene un efecto directo en las velocidades máximas tanto en recta o en curva. Como se puede comprobar en la ecuación (15), la velocidad en recta está afectada por ambos coeficientes, principalmente por el coeficiente de agarre. En las ecuaciones (22) y (26) se puede ver que la velocidad en curva, tanto en vuelco como en el criterio de deslizamiento, se ve afectada por el coeficiente de sustentación. Resumiendo, a mayor coeficiente de agarre habrá una menor velocidad en recta; y a un mayor coeficiente de sustentación habrá una mayor velocidad en recta. Debido a esto, y exportándolo al mundo de la competición, se debe encontrar el equilibrio más perfecto posible entre el coeficiente de agarre y el coeficiente de sustentación.

El aumento que se ve en ambos coeficientes se debe a dos motivos principales. El primero de ellos es el propio ángulo de incidencia, ya que el choque entre el aire y el alerón provocará una fuerza en el eje longitudinal y otra en el eje vertical que irán variando en función del ángulo. El segundo motivo de este aumento en los coeficientes es el aumento que se genera en el área de incidencia del alerón, ya que, al mantener la base con un valor constante, al variar el ángulo de incidencia, variará en consecuencia la altura del alerón. Se puede observar como con el mismo ángulo de incidencia, al disminuir la base del alerón y, con ello, el área de incidencia del alerón, los coeficientes también disminuyen.

6.3 Velocidades máximas

Como se ha explicado anteriormente, las velocidades máximas, tanto en curva como en recta, variarán al variar los coeficientes aerodinámicos. En la tabla 7 se puede comprobar esta variación en las velocidades en función de los coeficientes aerodinámicos.

Tabla 7 Velocidades máximas en función del modelo

Velocidades					
Base (mm)	Ángulo (º)	CD (-)	CL (-)	Vr (m/s)	Vc (m/s)
250	0	0,244	0,433	111,465	26,782
250	5	0,207	-0,028	107,903	27,148
250	10	0,222	-0,052	105,425	27,167
250	15	0,247	-0,097	101,66	27,203
250	20	0,262	-0,105	99,794	27,21
250	25	0,279	-0,161	97,627	27,256
250	30	0,307	-0,193	94,673	27,282
250	35	0,342	-0,196	91,406	27,284
250	40	0,378	-0,262	88,407	27,338
250	45	0,414	-0,366	85,744	27,425
250	50	0,467	-0,459	82,365	27,503
250	60	0,623	-0,540	75,009	27,572
250	70	1,116	-0,877	61,958	27,861
250	80	1,16	-1,856	60,932	28,759
125	60	0,391	-0,253	87,414	27,332
125	70	0,52	-0,348	79,657	27,41
125	80	0,606	-0,721	75,582	27,726
40	80	0,395	-0,230	87,177	27,313

En las Figuras 52 y 53 se puede observar la variación de las velocidades máximas en recta y en curva de forma gráfica.

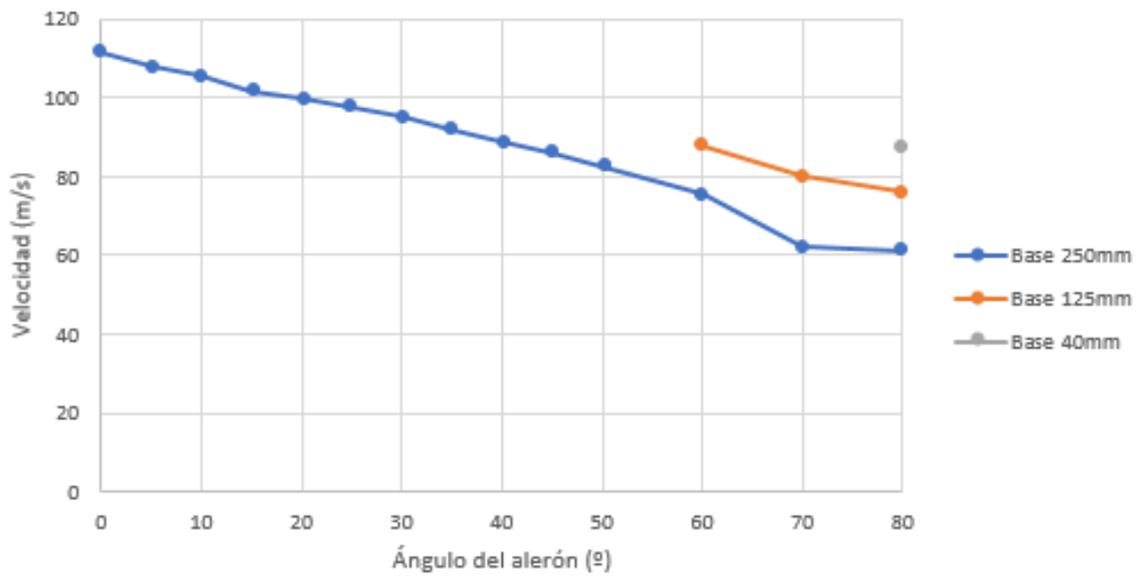


Figura 52 Velocidad máxima en recta en función del ángulo del alerón

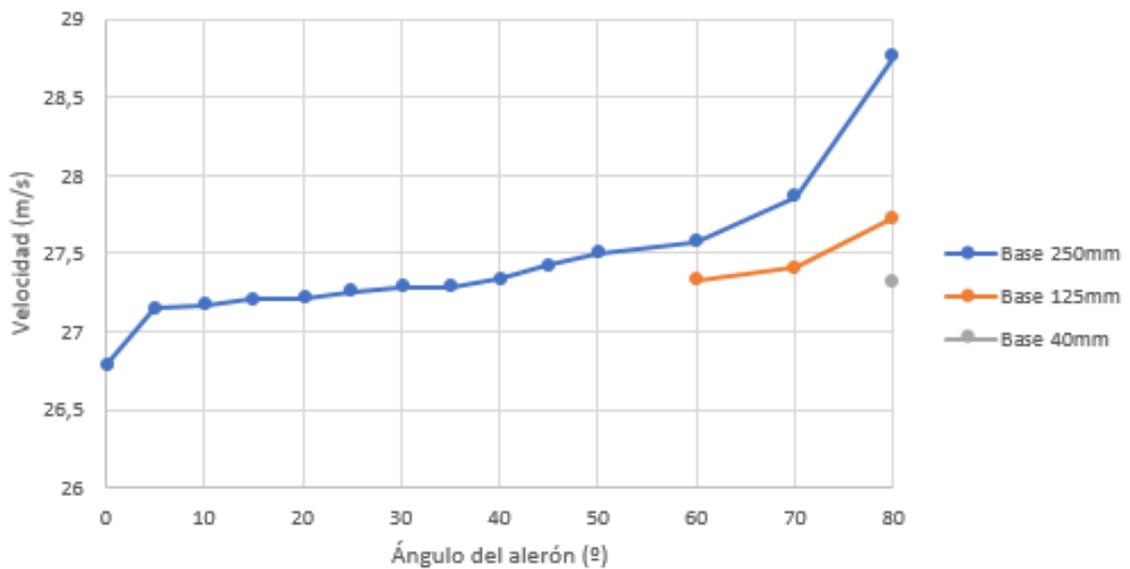


Figura 53 Velocidad máxima en curva en función del ángulo del alerón

En estas gráficas se puede observar perfectamente lo dicho anteriormente: a mayor ángulo de incidencia (mayor coeficiente de arrastre y menor coeficiente de sustentación), la velocidad en recta disminuye y aumenta la velocidad en curva. El problema es que la disminución de la velocidad en recta es muy superior al aumento que sufre la velocidad en curva, como se puede ver en la Figura 54.

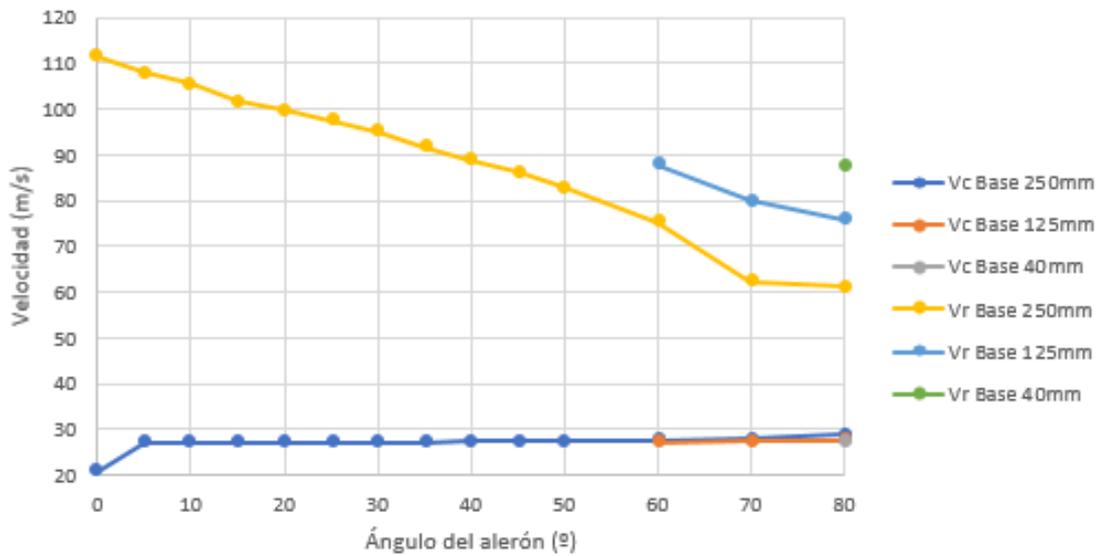


Figura 54 Comparativa de la variación de las velocidades

Como se ve en la Figura 54 y se ha dicho anteriormente, la variación entre las velocidades no es equitativa, y ahí es donde reside principalmente el problema de encontrar el equilibrio perfecto entre la mejor velocidad en recta y la mejor velocidad en curva según que circuito.

6.4 [Influencia del radio de curva en la velocidad en curva](#)

En este apartado se estudiará la influencia conjunta del grado de incidencia del alerón junto con una variación del radio de curva en la velocidad máxima en curva. En la Tabla 8 se puede comprobar cómo va aumentando la velocidad en curva cuando se aumenta el radio de la curva y el coeficiente de sustentación.

Tabla 8 Influencia del radio de curva y ángulo de incidencia en la velocidad máxima en curva

Velocidades					
R (m)		50	100	150	200
Base (mm)	Ángulo (°)				
250	0	26,782	37,408	45,264	51,652
250	5	27,148	38,425	47,101	54,433
250	10	27,167	38,48	47,203	54,59
250	15	27,203	38,584	47,394	54,888
250	20	27,21	38,602	47,427	54,939
250	25	27,256	38,734	47,674	55,323
250	30	27,282	38,81	47,814	55,543
250	35	27,284	38,815	47,824	55,558
250	40	27,338	38,972	48,119	56,022
250	45	27,425	39,224	48,595	56,779
250	50	27,503	39,452	49,031	57,477
250	60	27,572	39,657	49,426	58,116
250	70	27,861	40,532	51,154	60,983
250	80	28,759	43,459	57,453	72,607
125	60	27,332	38,952	48,082	55,964
125	70	27,41	39,18	48,513	56,647
125	80	27,726	40,119	50,33	59,602
40	80	27,313	38,897	47,979	55,802

En la Figura 55 se puede ver gráficamente la variación de la velocidad máxima en curva en función de estos dos parámetros.

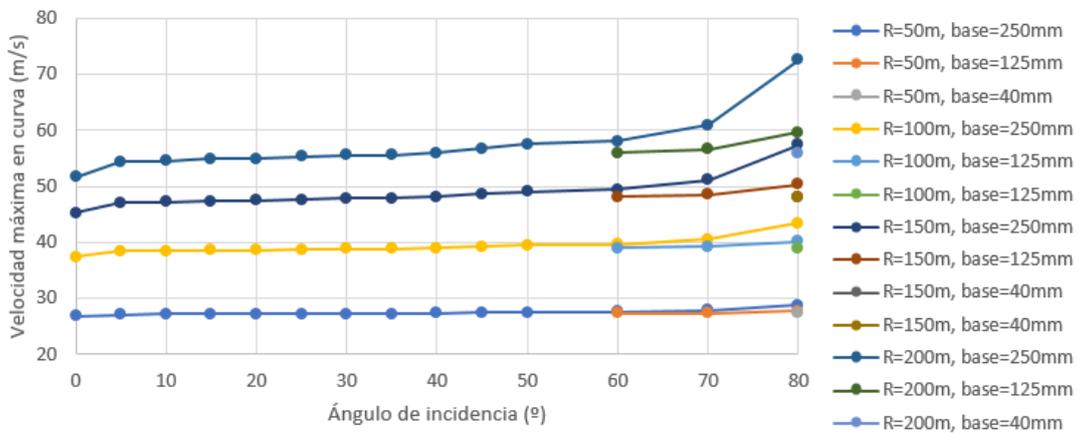


Figura 55 Influencia del radio de curva y del ángulo de incidencia del alerón en la velocidad en curva

En la Figura 55 se puede observar como a mayor radio de curva, la velocidad de paso por curva aumenta más significativamente que a radios de curva menores. Llevándolo a un caso práctico, como se verá a continuación, en un circuito de curvas rápidas (alto radio de curvatura), el coeficiente de sustentación influye en mayor medida que si el circuito presenta curvas mucho más lentas (radios de curvatura bajos).

7 CASOS PRÁCTICOS

7.1 Introducción

En este capítulo del trabajo se va a tratar de exportar los datos obtenidos anteriormente a un caso real, concretamente se va a intentar obtener de forma razonada el mejor modelo del vehículo en dos circuitos diferentes, calculando el tiempo que tardaría cada uno de ellos en dar una vuelta a estos dos circuitos. Se han escogido dos circuitos diferentes entre sí, por un lado, se ha escogido el circuito italiano de Monza, conocido como el templo de la velocidad, debido a sus largas rectas; y, por otro lado, se ha escogido el circuito Ricardo Tormo de Cheste, el cual no tiene largas rectas, pero sí curvas rápidas y lentas.

Para poder hacer el estudio correctamente, se necesitan los datos de ambos circuitos. Para conseguir estos datos, se han croquizado ambos en SolidWorks®, ya que, de esta manera los datos se obtienen directamente del mismo croquis. En la Figura 56 se puede observar el croquis del circuito de Monza, y en la Figura 57 el del circuito Ricardo Tormo.

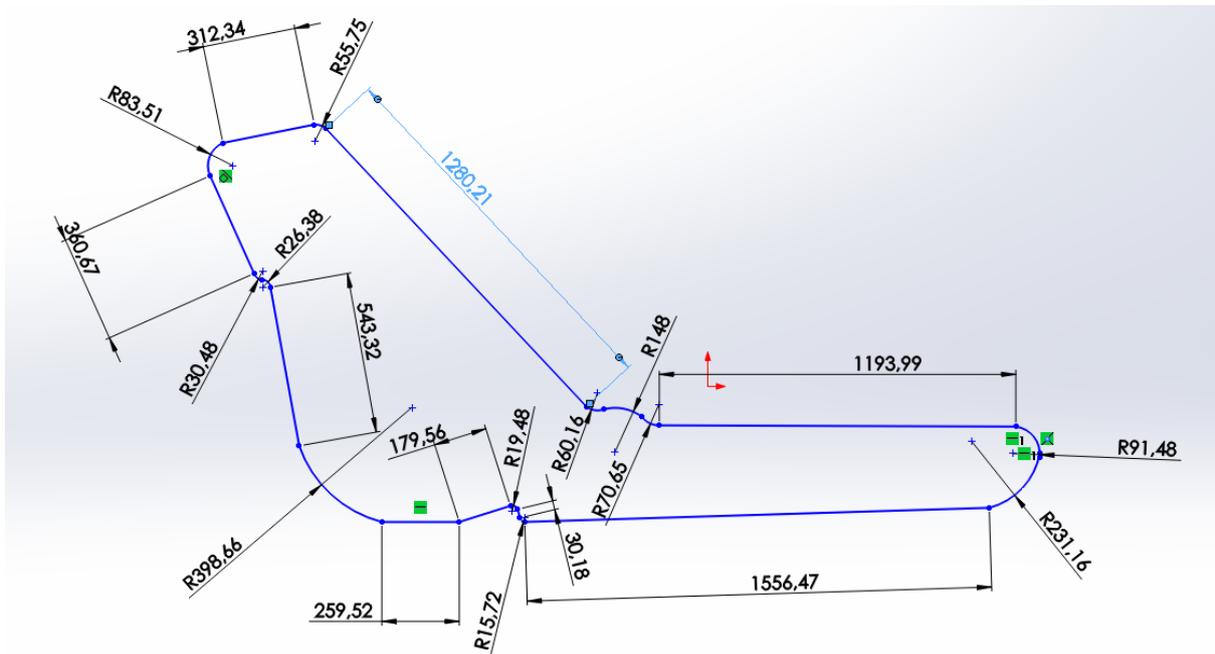


Figura 56 Croquis del circuito de Monza

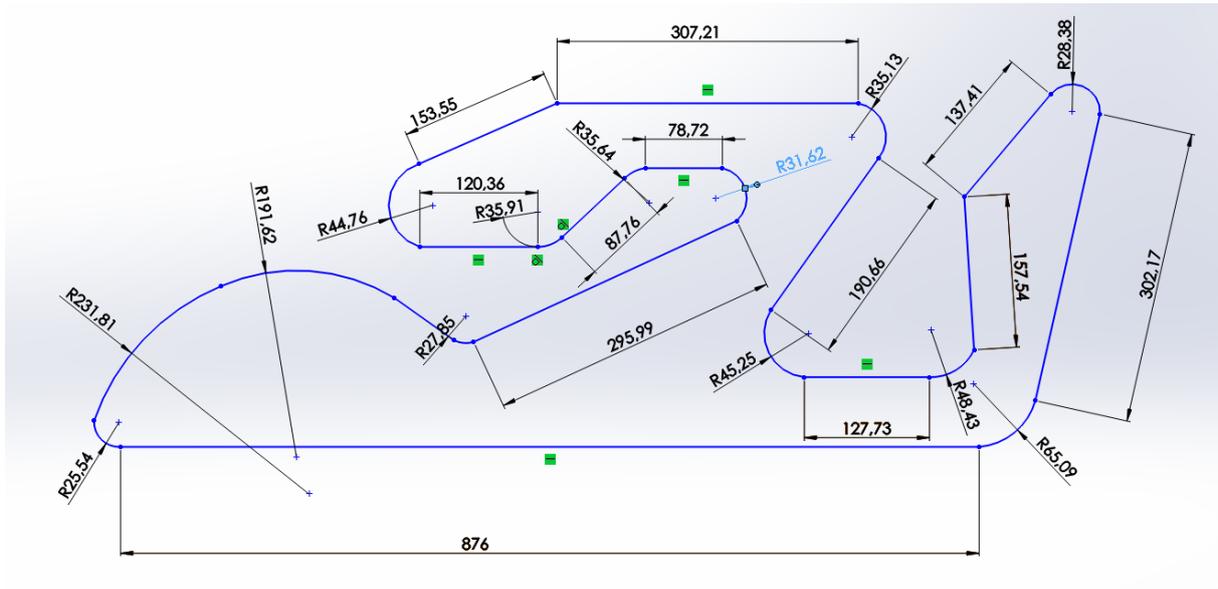


Figura 57 Croquis del circuito de Ricardo Tormo

Como se puede observar en las Figuras 56 y 57, las curvas número 3 y 7 del circuito de Ricardo Tormo y la curva 9 de Monza (la pequeña desviación en la recta que hay entre la curva Lesmo 2 y la variante Ascari) se han suprimido, uniendo así las dos rectas que unen cada una de estas curvas, ya que en el modelo de estudio tendrían un impacto muy grande, cosa que en la realidad no ocurre.

Antes de calcular, se van a hacer una serie de simplificaciones debido a la alta complejidad que tendría resolver el caso de la vuelta al circuito. No se han tenido en cuenta fuerzas de frenado, debido a la alta complejidad que adquiriría el estudio y, como se ha dicho anteriormente, a la alta complejidad que supondría este factor. Otra simplificación realizada es que se ha supuesto una aceleración constante en cada recta, en función de la velocidad que existía a la salida de la curva o la recta anterior, es decir, se ha calculado la aceleración y se ha calculado el tiempo que se tardaba en recorrer la recta mediante la fórmula de un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA), cuya incógnita era el tiempo:

$$x_f = x_o + v_o t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (29)$$

- x_f : Posición final, longitud total de la recta (m).
- x_o : Posición inicial, 0 (m).
- v_o : Velocidad inicial, la velocidad del paso por la curva anterior (m/s).
- t : Tiempo transcurrido (s).
- a : Aceleración (m/s²).

En caso de que la recta fuera lo suficientemente larga como para llegar a la velocidad máxima en recta, se ha calculado los metros recorridos durante el MRUA, y el resto de metros se ha calculado como un movimiento rectilíneo uniforme:

$$t = \frac{e}{v} \quad (30)$$

- t: Tiempo transcurrido (s).
- e: Espacio recorrido, distancia restante de la recta (m).
- v: Velocidad máxima en recta (m/s).

Para calcular la aceleración pertinente, se ha recurrido al modelo dinámico creado al inicio. En la hoja de Excel creada previamente, se ha calculado la fuerza de inercia existente en cada una de las velocidades de salida de cada tramo (la velocidad de entrada a la recta). Como la velocidad en recta no será la máxima, $\Sigma F_c \neq 0$; siendo esa componente sobrante la fuerza de inercia. Esta fuerza dividida por la masa del vehículo indicará la aceleración que tendrá el vehículo. La simplificación está en el mantener la aceleración constante a lo largo de la recta, ya que, a mayor velocidad, la aceleración cae exponencialmente, tal y como se puede comprobar en la Figura 58.

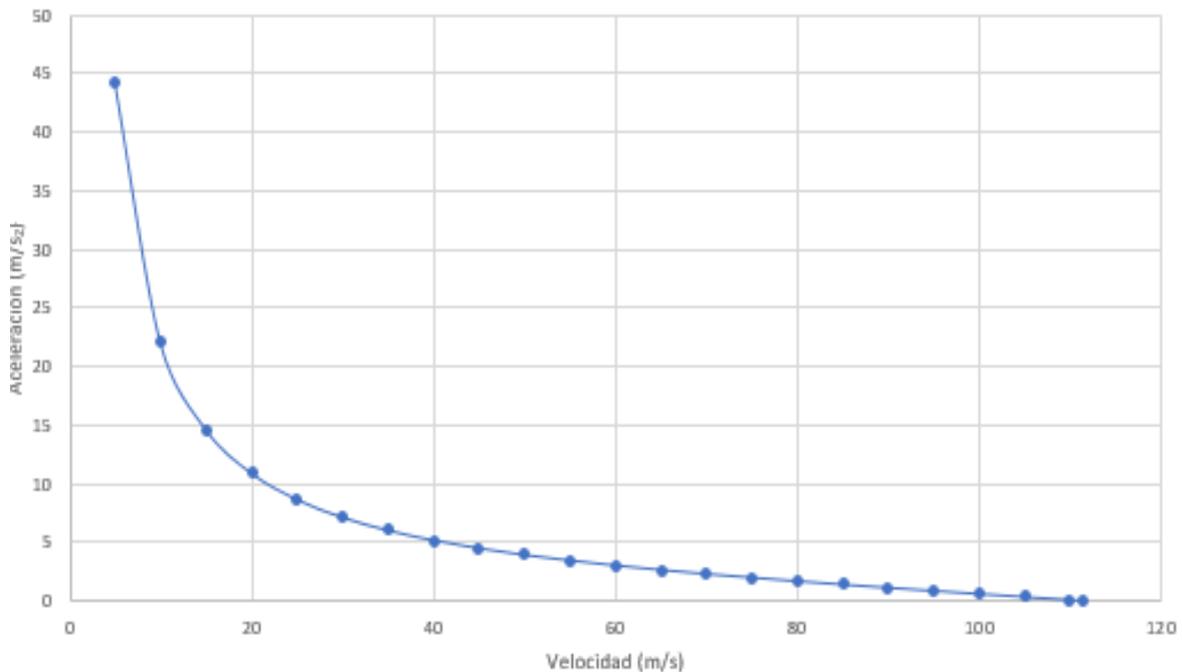


Figura 58 Variación de la aceleración en función de la velocidad

Tal y como se puede comprobar, la variación en la aceleración es muy pronunciada, por lo que asumirla constante a lo largo de toda una recta supondrá una pérdida de fiabilidad en los tiempos (se obtendrán tiempos más rápidos que en la realidad).

Con todo esto, estos son los resultados para cada circuito.

7.2 [Circuito de Monza](#)

Tras calcular los tiempos por vuelta, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 9:

Tabla 9 Tiempos por vuelta en Monza

0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
110,537	109,152	109,369	109,756	110,084	110,229	110,778	111,713	112,315
45°	50°	60°	70°	80°	60°	70°	80°	80°
112,68	113,55	118,872	131,51	140,188	112,725	115,551	119,76	112,952

Representando estos tiempos en una gráfica, se observa más claramente el modelo más rápido, tal como se ve en la Figura 59:

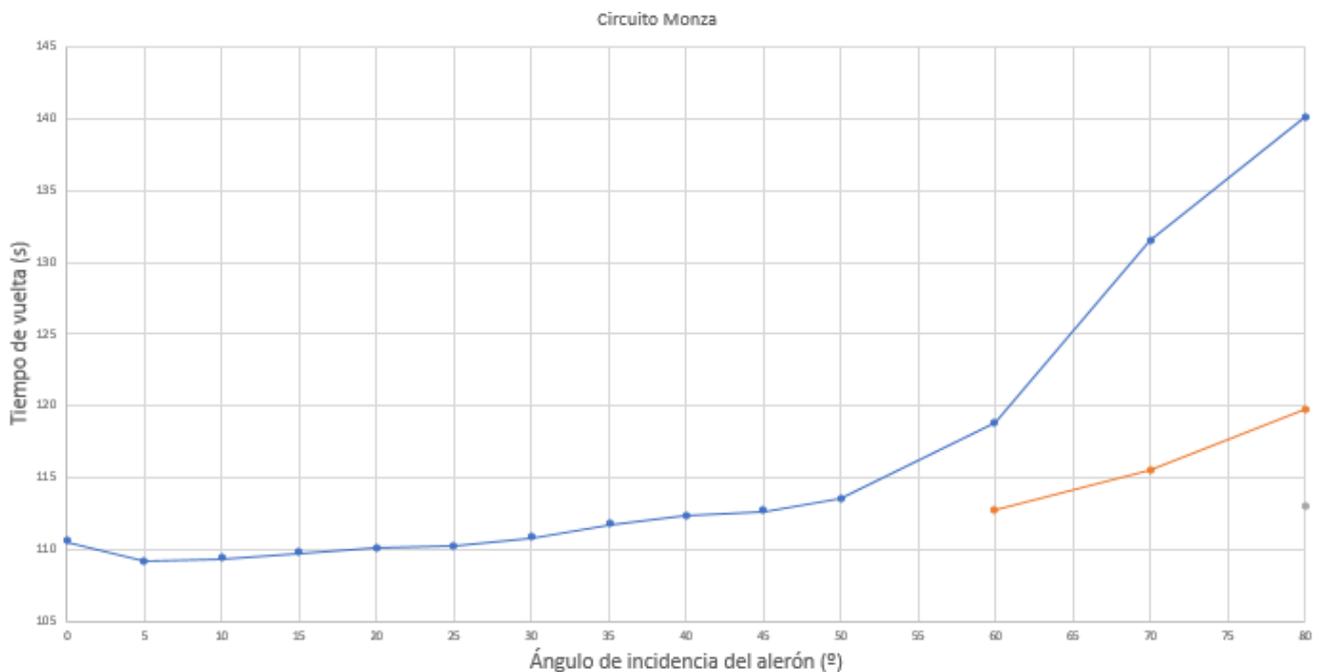


Figura 59 Tiempos por vuelta en Monza

7.3 Circuito Ricardo Tormo

De la misma forma que se ha procedido con el anterior circuito, se han realizado con los datos del circuito de Cheste. En la Tabla 10 se puede ver la comparación de los tiempos por vuelta:

Tabla 10 Tiempos por vuelta en el circuito Ricardo Tormo

0º	5º	10º	15º	20º	25º	30º	35º	40º
90,153	89,501	89,589	89,668	89,745	89,75	89,861	90,075	90,17
45º	50º	60º	70º	80º	60º	70º	80º	80º
90,185	90,316	91,033	93,154	92,271	90,267	90,828	90,583	90,332

Y en la Figura 60 se pueden observar de forma gráfica estos tiempos por vuelta:

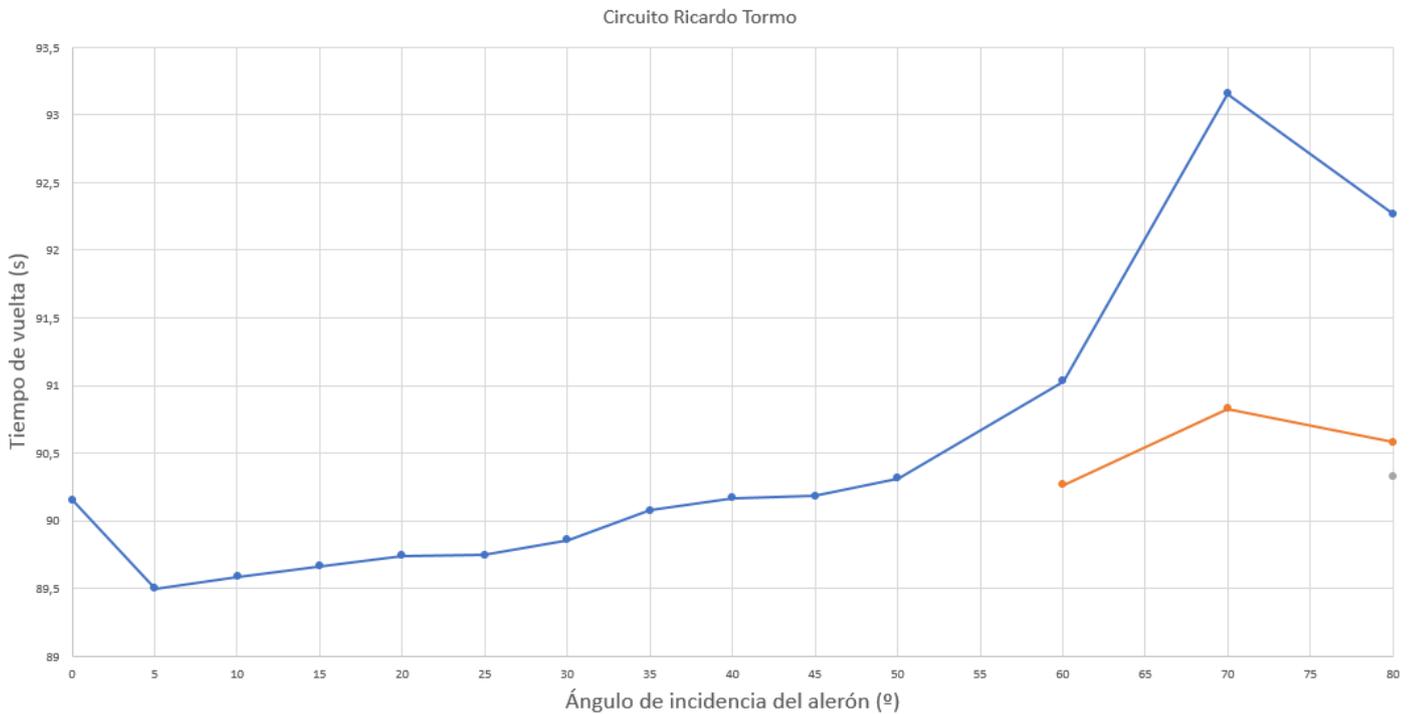


Figura 60 Tiempos por vuelta en el circuito Ricardo Tormo

Además, se puede ver en la Figura 61, la comparación de la diferencia de tiempos de vuelta en ambos circuitos:

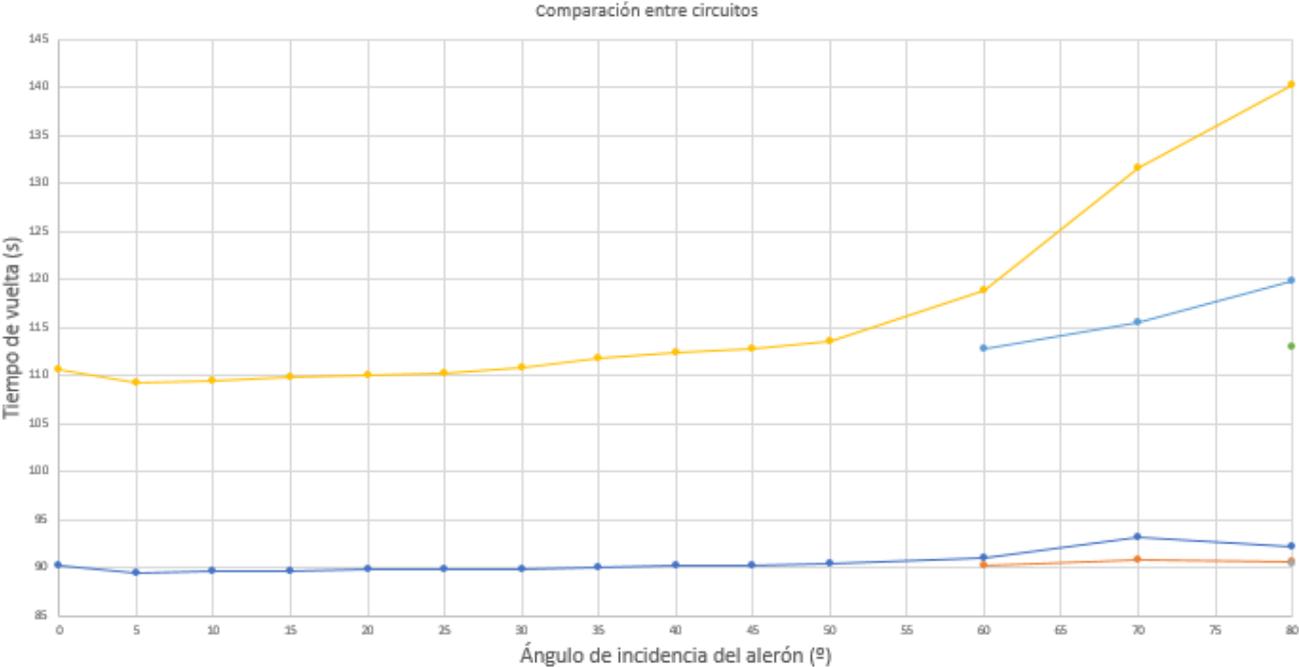


Figura 61 Comparación de tiempos de vuelta

8 CONCLUSIONES

Una vez obtenidos los tiempos empleados por cada modelo en cada uno de los dos circuitos, se puede observar el diferente efecto que tienen los alerones en los tiempos. En la Figura 59 y en la Tabla 9 se observa como primero disminuye el tiempo necesario en terminar una vuelta del modelo sin alerón al modelo con el alerón mínimo (5°), pero luego aumenta el tiempo a medida que se aumenta el ángulo del alerón. El hecho de que el modelo con el alerón mínimo sea el más rápido se corresponde a que es un circuito con largas rectas en las que prima tener una velocidad máxima en recta alta, pero también es necesario un paso por curva competitivo, objetivo que el modelo sin alerón no cumple, ya que tiene un coeficiente de sustentación demasiado alto, llegando a ser positivo.

En la Figura 60 y en la Tabla 10, al igual que en el circuito de Monza, se observa que el modelo sin alerón es ineficiente, debido a la baja velocidad en curva que tiene este modelo. A partir del modelo con el alerón más pequeño, vemos como el tiempo empleado en los modelos hasta el modelo con el alerón de 30° no varía prácticamente. Esto se debe a que las características del circuito, siendo un circuito con curvas más lentas que Monza y con rectas más cortas (haciendo menos influyente la velocidad máxima en recta), hacen de éste un circuito en el que son factibles diversas configuraciones aerodinámicas.

Cabe recordar que la aceleración se tomó como constante, y extraída a partir de la velocidad de salida de la curva anterior, por lo que en este circuito la aceleración es un factor más influyente que en Monza, debido a que la velocidad en las curvas generalmente es menor, provocando así una aceleración mayor que no se mantiene constante en la realidad. En la Figura 62 se puede comprobar la disminución de la aceleración en función de la velocidad respecto de los ángulos de los alerones de los modelos.

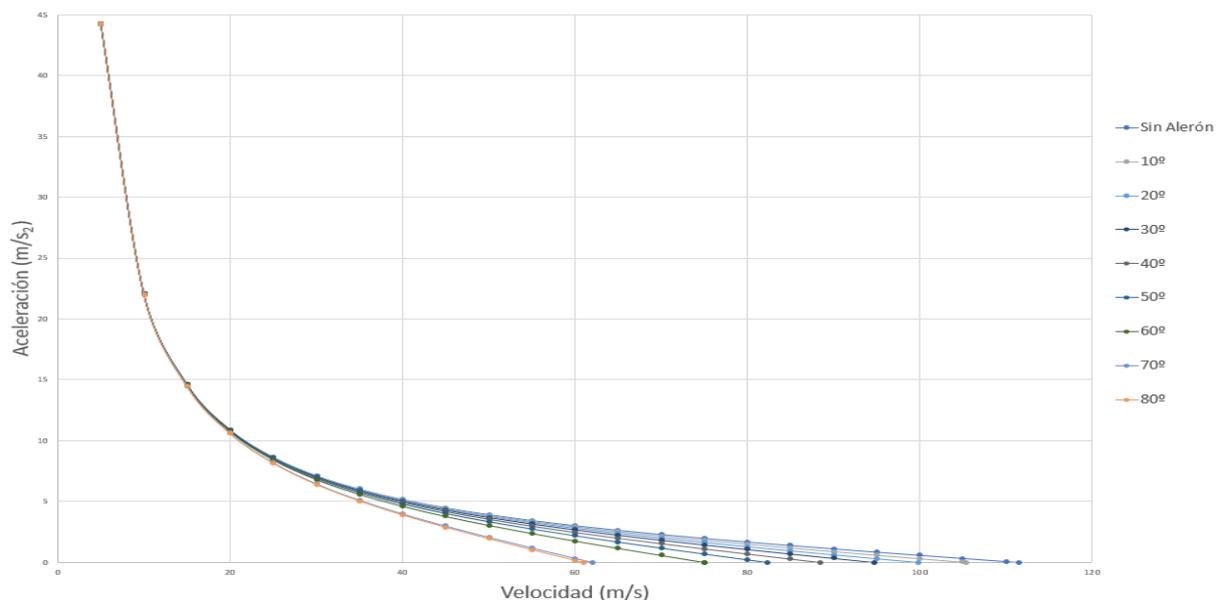


Figura 62 Variación de la aceleración en función de la velocidad según el ángulo del alerón del modelo

Como se puede ver en esta Figura, la aceleración que sufrirá el modelo a la salida de las curvas rápidas será menor cada vez que el alerón del modelo aumente, generando así un aumento de tiempo empleado en las rectas, además de la pérdida de velocidad máxima en recta. Como no se ha tenido en cuenta esta variación a lo largo de la recta, los tiempos son menores de los reales, e incluso pueden llevar a error, ya que los tiempos son semejantes en algunos modelos intermedios en ambos circuitos.

Si se observa la Figura 61, en la comparativa de los tiempos empleados de ambos circuitos, se puede ver que en Monza tiene mayor importancia la aerodinámica. Esto se debe principalmente a la propia longitud del circuito, pero también a las largas rectas y rápidas curvas del circuito, ya que con al aumentar el ángulo del alerón, disminuye la aceleración a velocidades altas, provocando así un aumento de tiempo en recta para estos modelos.

9 BIBLIOGRAFÍA

- GrabCad (2017): <https://grabcad.com/library/porsche-911-gt3-2010-1>
- Enginnering Toolbox (2017): <https://grabcad.com/library/porsche-911-gt3-2010-1>
- Blog URT (2011): <http://urfsae.blogspot.com.es/2011/11/estudio-de-neumaticos-utilizados-para.html>
- Km77 (2017): <https://www.km77.com/precios/comparador/comparar/47257/43288>
- Formula1 Tehc&Art (2017): <https://formula1techandart.files.wordpress.com/2010/12/mc-laren-f-duct-2.jpg>
- Diario Marca (2016): <http://e04-marca.uecdn.es/assets/multimedia/imagenes/2016/03/19/14583915963684.jpg>
- Turbosquid (2017): <https://www.turbosquid.com/3d-models/chevrolet-aero-kit-road-3d-fbx/918921>



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

**ANÁLISIS DE DIFERENTES
CONFIGURACIONES AERODINÁMICAS
DEL PORSCHE 911 GT3 MEDIANTE
TÉCNICAS CFD
(PRESUPUESTO)**

AUTOR: BENEDITO TORRES, JULIO

TUTOR: IGLESIAS REY, PEDRO LUIS

Curso Académico: 2016-17

Índice de planos

- Presupuestos descompuestos: Página 1
- Presupuesto final: Página 7

		Pág.: 1
	MEDICIONES Y PRESUPUESTO	Ref.: promyp5
	Modelo dinámico	Fec.:

Nº Orden	Descripción de las unidades de obra	Uds.	Longitud	Latitud	Altura	Medición	Precio	Importe
1	Modelo dinámico							
1.1	Estudio de fuerzas							
1.1	Hora trabajada							
	Total partida 1.1					1,00	21,50	21,50
	Total capítulo 1.1					10	21,5	215,00
1.2	Implementación del modelo en Excel							
1.1	Hora trabajada							
	Total partida 1.1					1,00	21,50	21,50
1.2	Hora de uso de ordenador							
	Total partida 1.2					1,00	9,26	9,26
	Total capítulo 1.2					8	30,76	246,08
1.3	Validación del modelo de Excel							
1.1	Hora trabajada							
	Total partida 1.1					1,00	21,50	21,50
1.2	Hora de uso de ordenador							
	Total partida 1.2					1,00	9,26	9,26
	Total capítulo 1.3					2	30,76	61,52
1.4	Estudio de casos prácticos							
1.1	Hora trabajada							
	Total partida 1.1					1,00	21,50	21,50
1.2	Hora de uso de ordenador							
	Total partida 1.2					1,00	9,26	9,26
	Total capítulo 1.4					15	30,76	461,40
	Total capítulo 1							984,00

		Pág.: 2
	MEDICIONES Y PRESUPUESTO	Ref.: promyp5
	Geometría	Fec.:

Nº Orden	Descripción de las unidades de obra	Uds.	Longitud	Latitud	Altura	Medición	Precio	Importe
2	Geometría							
2.1	Búsqueda de geometría							
1.1	Hora trabajada							
	Total partida 1.1					1,00	21,50	21,50
1.2	Hora de uso de ordenador							
	Total partida 1.2					1,00	9,26	9,26
	Total capítulo 2.1					2	30,76	61,52
2.2	Simplificación inicial de la geometría							
1.1	Hora trabajada							
	Total partida 1.1					1,00	21,50	21,50
1.2	Hora de uso de ordenador							
	Total partida 1.2					1,00	9,26	9,26
	Total capítulo 2.2					15	30,76	461,40
2.3	Edición de las ruedas							
1.1	Hora trabajada							
	Total partida 1.1					1,00	21,50	21,50
1.2	Hora de uso de ordenador							
	Total partida 1.2					1,00	9,26	9,26
	Total capítulo 2.3					5	30,76	153,80
2.4	Simplificación final de la geometría							
1.1	Hora trabajada							
	Total partida 1.1					1,00	21,50	21,50
1.2	Hora de uso de ordenador							
	Total partida 1.2					1,00	9,26	9,26
	Total capítulo 2.4					25	30,76	769,00
2.5	Modelización de alerones							
1.1	Hora trabajada							
	Total partida 1.1					1,00	21,50	21,50
1.2	Hora de uso de ordenador							
	Total partida 1.2					1,00	9,26	9,26
	Total capítulo 2.5					15	30,76	461,40
2.6	Generación del volumen de estudio1							
1.1	Hora trabajada							
	Total partida 1.1					1,00	21,50	21,50
1.2	Hora de uso de ordenador							
	Total partida 1.2					1,00	9,26	9,26
	Total capítulo 2.6					20	30,76	615,20

		Pág.: 3
	MEDICIONES Y PRESUPUESTO	Ref.: promyp5
	Generación del volumen de estudio1	Fec.:

Nº Orden	Descripción de las unidades de obra	Uds.	Longitud	Latitud	Altura	Medición	Precio	Importe
	Total capítulo 2							2.522,32

		Pág.: 4
	MEDICIONES Y PRESUPUESTO	Ref.: promyp5
	Mallado	Fec.:

Nº Orden	Descripción de las unidades de obra	Uds.	Longitud	Latitud	Altura	Medición	Precio	Importe
3	Mallado							
3.1	Estudio de malla							
1.1	Hora trabajada							
	Total partida 1.1					1,00	21,50	21,50
1.2	Hora de uso de ordenador							
	Total partida 1.2					1,00	9,26	9,26
	Total capítulo 3.1					15	30,76	461,40
3.2	Generación de malla							
1.1	Hora trabajada							
	Total partida 1.1					1,00	21,50	21,50
1.2	Hora de uso de ordenador							
	Total partida 1.2					1,00	9,26	9,26
	Total capítulo 3.2					10	30,76	307,60
3.3	ANSYS							
	Total capítulo 3.3							408,00
	Total capítulo 3							1.177,00

		Pág.: 5
	MEDICIONES Y PRESUPUESTO	Ref.: promyp5
	Estudio aerodinámico	Fec.:

Nº Orden	Descripción de las unidades de obra	Uds.	Longitud	Latitud	Altura	Medición	Precio	Importe
4	Estudio aerodinámico							
4.1	Preparación de las simulaciones							
1.1	Hora trabajada							
	Total partida 1.1					1,00	21,50	21,50
1.2	Hora de uso de ordenador							
	Total partida 1.2					1,00	9,26	9,26
	Total capítulo 4.1					10	30,76	307,60
4.2	Simulaciones							
1.2	Hora de uso de ordenador							
	Total partida 1.2					1,00	9,26	9,26
	Total capítulo 4.2					60	9,26	555,60
4.3	ANSYS							
	Total capítulo 4.3							408,00
	Total capítulo 4							1.271,20

		Pág.: 6
	MEDICIONES Y PRESUPUESTO	Ref.: promyp5
	Memoria	Fec.:

Nº Orden	Descripción de las unidades de obra	Uds.	Longitud	Latitud	Altura	Medición	Precio	Importe
5	Memoria							
5.1	Elaboración de la memoria							
1.1	Hora trabajada							
	Total partida 1.1					1,00	21,50	21,50
1.2	Hora de uso de ordenador							
	Total partida 1.2					1,00	9,26	9,26
	Total capítulo 5.1					80	30,76	2.460,80
	Total capítulo 5							2.460,80
	Total presupuesto							8.415,32

		Pág.: 7
	RESUMEN DE CAPÍTULOS	Ref.: prores1
		Fec.:

Nº Orden	Descripción de los capítulos	Importe
01	Modelo dinámico	984,00
02	Geometría	2.522,32
03	Mallado	1.177,00
04	Estudio aerodinámico	1.271,20
05	Memoria	2.460,80

TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL	8.415,32 €
13 % Gastos Generales	1.093,99 €
6 % Beneficio Industrial	504,92 €
TOTAL EJECUCIÓN POR CONTRATA	10.014,23 €
21 % I.V.A.	2.102,99 €
TOTAL PRESUPUESTO C/IVA	12.117,22 €

Asciende el presupuesto proyectado, a la expresada cantidad de:
DOCE MIL CIENTO DIECISIETE EUROS CON VEINTIDOS CÉNTIMOS

28 de Junio de 2017

LA PROPIEDAD

LA DIRECCIÓN TÉCNICA

LA CONSTRUCTORA

Fdo.:

Fdo.:

Fdo.:



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

**ANÁLISIS DE DIFERENTES
CONFIGURACIONES AERODINÁMICAS
DEL PORSCHE 911 GT3 MEDIANTE
TÉCNICAS CFD
(PLANOS)**

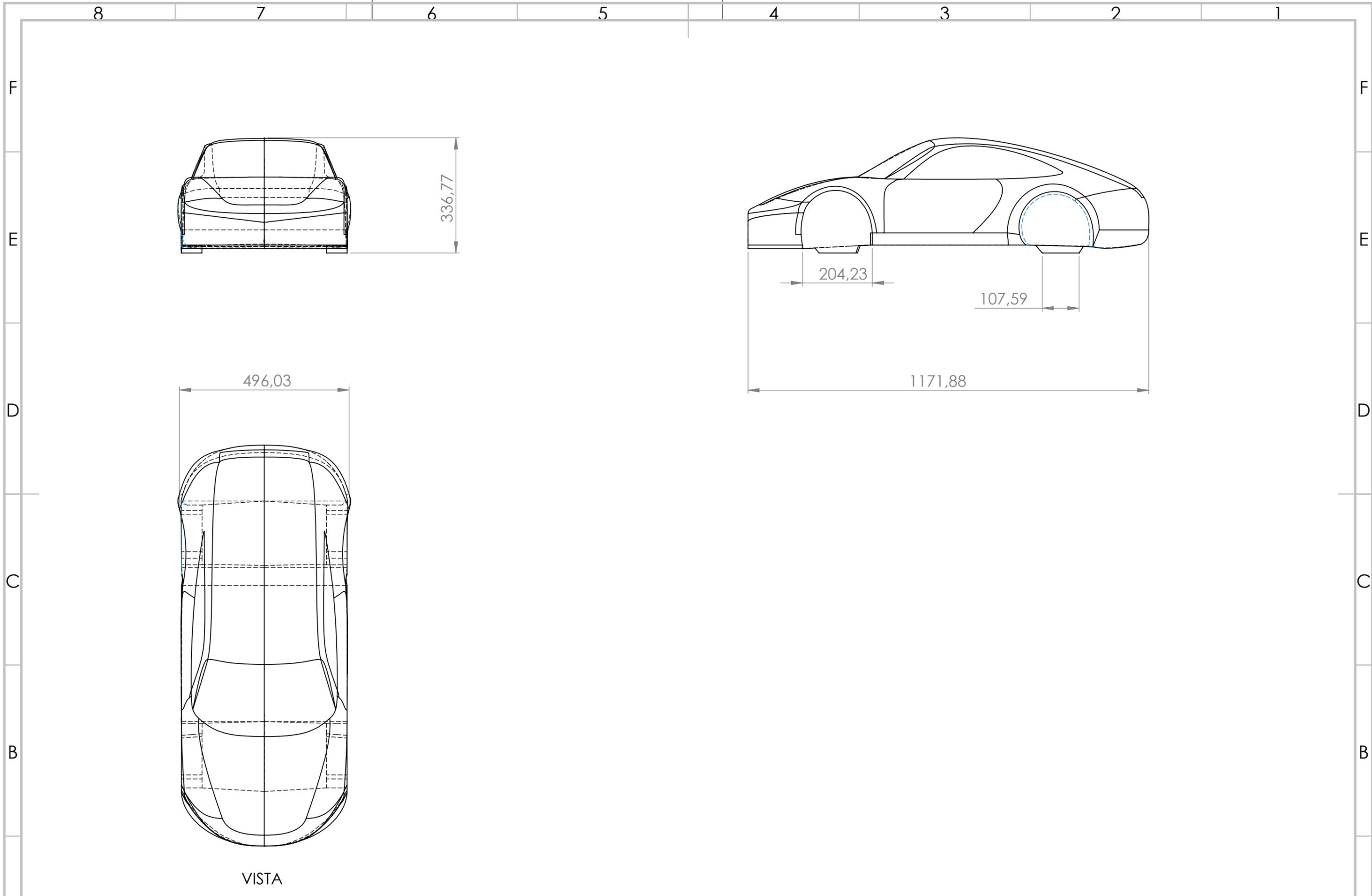
AUTOR: BENEDITO TORRES, JULIO

TUTOR: IGLESIAS REY, PEDRO LUIS

Curso Académico: 2016-17

Índice de planos

- Plano 1: Modelo sin alerón.
- Plano 2: Modelo con alerón de 25°.
- Plano 3: Modelo con alerón de 50°.



VISTA

A TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



Proyecto: ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES AERODINÁMICAS DEL PORSCHE 911 GT3 MEDIANTE TÉCNICAS CFD

Plano: Modelo sin alerón

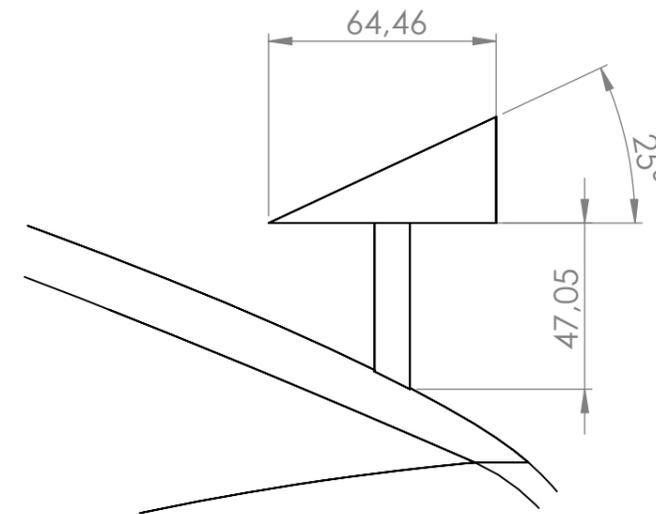
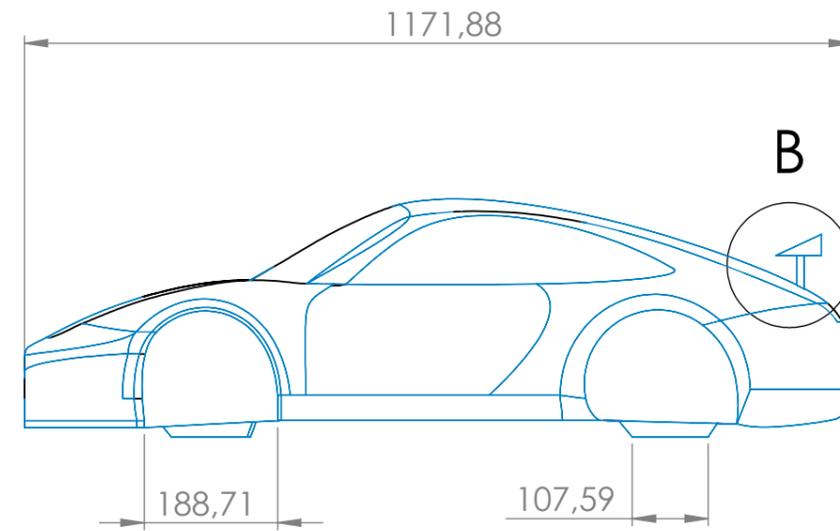
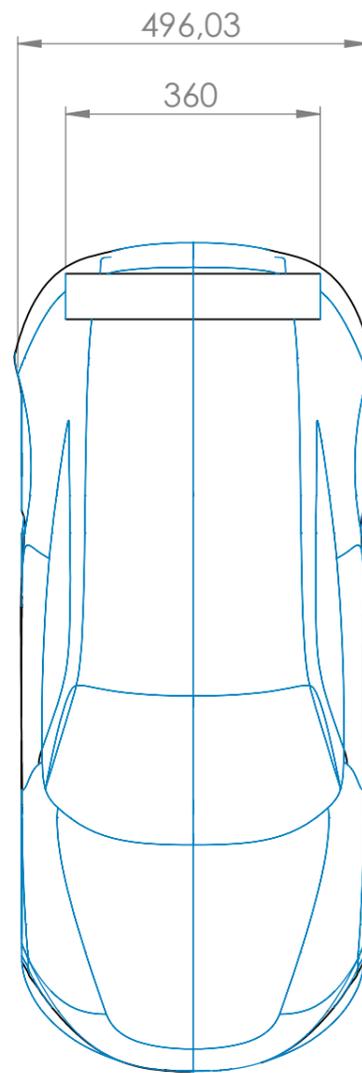
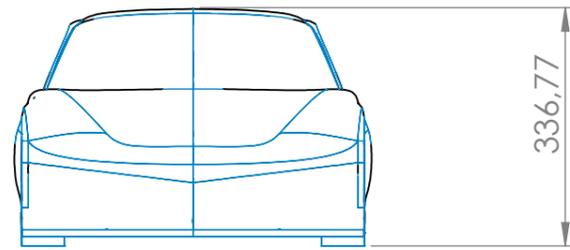
Autor: Julio Benedito Torres

Fecha: Julio 2017

Escala:

Nº Plano:

1



DETALLE B

ESCALA 1 : 2

