

ANÁLISIS AERODINÁMICO DE LA INFLUENCIA DEL USO DE ALERONES CON  
PERFILES TIPO NACA EN UN MERCEDES AMG GT – 2015 MEDIANTE CFD

JUAN SEBASTIAN RADA REY

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
FLORIDABLANCA  
2020

TESIS DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

JUAN SEBASTIAN RADA REY

Dr. ROLANDO ENRIQUE GUZMAN LOPEZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
FLORIDABLANCA  
2020

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** ANÁLISIS AERODINÁMICO DE LA INFLUENCIA DEL USO DE ALERONES CON PERFILES TIPO NACA EN UN MERCEDES AMG GT-2015 MEDIANTE CFD

**AUTOR(ES):** Juan Sebastian Rada Rey

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR(A):** Rolando Guzmán López

### RESUMEN

El presente documento contiene una descripción de la teoría y el procedimiento que se usaron para testear, por medio de dinámica computacional de fluidos, la influencia que tiene usar un alerón con perfil NACA 2412, NACA 4412 y NACA 6409 en las velocidades máximas de un Mercedes AMG GT - 2015. Para esto se usaron ecuaciones de la mecánica clásica y la aerodinámica, software de modelado 3D (SolidWorks) y software de mecánica computacional de fluidos (ANSYS FLUENT).

### PALABRAS CLAVE:

Modelado 3d, CFD, Carga aerodinámica, NACA, Aerodinámica del automóvil.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO



## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE:** AERODYNAMIC ANALYSIS OF NACA SECTION AILERONS ON A 2015 MERCEDES AMG GT WITH CFD

**AUTHOR(S):** Juan Sebastian Rada Rey

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR:** Rolando Guzmán López

### ABSTRACT

This document contains a description of the theory and the procedure used to test, using computational fluid dynamics, the influence that using a spoiler with a NACA 2412, NACA 4412 or NACA 6409 profile has on maximum speeds of a Mercedes AMG GT - 2015. For this, classic mechanical and aerodynamics equations, 3D CAD modeling software (SOLIDWORKS), and computational fluid dynamics software (ANSYS FLUENT) fluent were used.

### KEYWORDS:

3D CAD Modeling, CFD Down-force, NACA, Car Aerodynamics.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned below the text 'V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK'.

## 1. INTRODUCCIÓN

La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que estudia la interacción del movimiento del aire con las cosas. Sr Isaac Newton fue la primera persona en desarrollar una teoría de la resistencia del aire en 1726, pero fue hasta que Jowkowski en 1907 examinó el problema de las “trazadas de flujo” que pudieron encontrarse resultados coherentes entre la teoría y la experimentación<sup>1</sup>.

Para la década de los 60 se pensaba que el desempeño de un automóvil dependía principalmente de su motor, “La aerodinámica es para fracasados que no saben hacer motores” – Enzo Ferrari. Sin embargo, en esos años se empezaban a desarrollar automóviles con menor área frontal y formas más afiladas para reducir el drag; así como también se popularizó el uso de alerones en la fórmula 1 para aumentar la velocidad en curva, aunque redujeran la velocidad máxima y en los 70 se introdujo el concepto de efecto suelo en los coches de competición. Estos acontecimientos hicieron que se prestara especial atención al diseño aerodinámico de los vehículos<sup>2</sup>. Hoy la aerodinámica es un elemento importantísimo en el diseño de vehículos pensados para alcanzar grandes velocidades y para lograr diseños más eficientes y seguros.

---

<sup>1</sup> MCBEATH, Simon. Aerodinámica del automóvil de competición. Barcelona: CEAC, 2005. p. 19 – 20.

<sup>2</sup> Ibid., p. 30.

## Contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	5
2. ESTADO DEL ARTE .....	8
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	11
3.2 JUSTIFICACIÓN.....	11
4. OBJETIVOS .....	12
4.1 OBJETIVO GENERAL .....	12
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
5. ALCANCE .....	13
6. METODOLOGÍA.....	14
7. MARCO TEÓRICO.....	15
7.1 AERODINÁMICA EN VEHÍCULOS.....	15
7.1.1 FONDOS PLANOS .....	15
7.1.2 DIFUSORES .....	15
7.1.3 ALERONES.....	16
7.2 MÉTODOS PARA EVALUAR LA AERODINÁMICA DE LOS VEHÍCULOS 16	
7.2.1 ANÁLISIS CFD.....	17
7.2.2 TÚNEL DE VIENTO .....	17
7.2.3 PRUEBAS EN PISTA.....	17
7.3 FUERZA AERODINÁMICA.....	17
7.4 COEFICIENTES DE LIFT Y DE DRAG .....	18
7.5 EFICIENCIA AERODINÁMICA .....	19
7.6 CÁLCULO DE LAS VELOCIDADES MÁXIMAS .....	19
7.6.1 ECUACIONES EN RECTA.....	20
7.6.2 ECUACIONES EN CURVA .....	20
7.6.3 ECUACIONES EN VUELCO .....	21
7.7 EL PERFIL ALAR Y LA NOMENCLATURA NACA DE 4 DÍGITOS .....	21
7.8 ECUACIONES PARA OBTENER LOS PERFILES NACA DE 4 DIGITOS 23	
8. TRATAMIENTO DE LA GEOMETRÍA.....	25
8.1 FRENTE .....	26
8.2 LATERAL.....	28

8.3	PARTE POSTERIOR.....	31
8.4	FONDO.....	32
8.5	SELLADO DE HUECOS.....	32
8.6	CREACIÓN DEL MODELO SÓLIDO.....	33
8.7	GENERACIÓN DE LOS DIFERENTES MODELOS CON ALAS.....	34
9.	SIMULACIONES EN ANSYS FLUENT.....	37
9.1	PREPARACIÓN DE LOS MODELOS.....	37
9.1.1	CORRECCIÓN DEL ESPEJO.....	37
9.1.2	RECINTO Y CUERPO DE INFLUENCIA.....	38
9.1.3	NOMBRAMIENTO DE LAS CARAS.....	39
9.2	MALLADO DE LAS GEOMETRÍAS.....	39
9.2.1	ESPECIFICACIONES DEL MALLADO.....	39
9.2.2	INDEPENDENCIA DE LA MALLA.....	40
9.3	ALISTAMIENTO DE LAS SIMULACIONES.....	40
9.4	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES.....	43
10.	CÁLCULO DE LAS VELOCIDADES MÁXIMAS Y ANÁLISIS.....	46
11.	CONCLUSIONES.....	50
12.	BIBLIOGRAFÍA.....	51

## 2. ESTADO DEL ARTE

En la tesis de grado “Análisis de diferentes configuraciones aerodinámicas de un Audi R8 mediante técnicas CFD” se midió el efecto de añadir un alerón recto al que se le varía el ángulo de ataque de 5° a 80° aumentando de a 5°. La geometría se simplificó en SolidWorks y se usó FLUENT para realizar las simulaciones y medir los coeficientes aerodinámicos. En la malla se usaron 3 zonas: la más grande envolvía en una caja a todo el vehículo con mucho espacio de sobra, otra caja envolvía justamente al vehículo y otra más pequeña contenía al alerón, cada una con tamaño de elementos más pequeño que la anterior; se realizó también estudio de la malla haciendo que el tamaño de los elementos fuera cada vez más pequeño mirando como esto afectaba a la malla. Finalmente se calculó, haciendo uso un modelo de fuerzas propuesto, cómo el cambio de los coeficientes aerodinámicos al variar el ángulo afectaba a las velocidades máximas del coche.<sup>3</sup>

En el artículo “La influencia de diferentes configuraciones aerodinámicas en el mejoramiento del frenado de carros deportivos” (título traducido) se investigó, usando CFD y túnel de viento, cómo usar elementos aerodinámicos que al activarse ayuden al frenado. Se mostró cómo al aumentar el ángulo de ataque de un alerón se aumenta el drag y se facilita el frenado. También se mostró cómo las diferentes ubicaciones del alerón afectan a las cargas de los ejes delantero y trasero, y se estudió una manera alternativa de producir carga aerodinámica usando pequeños elementos móviles fáciles de ocultar en la silueta del vehículo. Se usó ANSYS FLUENT con el modelo de turbulencia k- $\omega$  para correr las simulaciones. Se obtuvo que al usar estos elementos el aumento del drag es bastante significativo, lo que reduce la distancia de frenado hasta un 31%.<sup>4</sup>

En el reporte técnico “Simulación del flujo alrededor de un alerón para automóvil en ANSYS Fluent CFD” (título traducido) se buscó calcular la carga aerodinámica que genera un alerón cuando se mueve a 96 km/h con variaciones angulares de 0 a 45° aumentando de a 5°. El tamaño de malla usado fue de 12mm y se usó inflación alrededor del ala. El modelo de turbulencia usado fue k- $\omega$  y los residuales que se buscaron fueron 0.001 en cada una de las variables. Finalmente se presentaron las fuerzas generadas en una tabla y se graficaron los valores obtenidos generando una curva con ellos, de la curva puede observarse que hay un pico en los 11°, que la curva cae hasta los 20 grados, que tiene un máximo relativo en 25° después del cuál vuelve a caer y que después de los 30° grados crece de a poco; se puede inferir

---

<sup>3</sup> CARBONELL ROMERO, Pablo. Análisis de diferentes configuraciones aerodinámicas de un Audi R8 mediante técnicas CFD. Valencia, 2015, 81p. Trabajo fin de grado en ingeniería en tecnologías industriales. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela técnica superior ingenieros industriales Valencia.

<sup>4</sup> KUREC, Krzysztof; REMER, Michal y Janusz Piechna. The influence of different aerodynamic setups on enhancing a sports car's braking. En: International Journal of Mechanical Sciences. Vol. 164, No 105140 (Dic 2019).

que el valor óptimo está en los  $11^\circ$  porque aunque la curva toma un valor un poco mayor en los  $45^\circ$  el drag generado debe ser muchísimo mayor debido al aumento del área que se da en ese ángulo.<sup>5</sup>

En el artículo “Estudio aerodinámico de un automóvil de fórmula SAE” (título traducido) se buscó investigar las características aerodinámicas de un automóvil de fórmula SAE con alerón delantero, sin alerón delantero y con un agujero en la pared del asiento (para reducir drag). Se usó el paquete de ANSYS Fluent, el modelo de turbulencia empleado fue k- $\epsilon$  y se usó la simetría en el eje longitudinal para reducir el costo computacional. Para la malla se usaron elementos triangulares y 1.119.641 elementos. Se obtuvo que al añadir el alerón delantero y hacer la ranura en la parte superior del asiento el coeficiente de drag se reduce de 0.85 a 0.7 mientras que el lift negativo incrementa de 0.2 a 0.25.<sup>6</sup>

En el artículo “Estudio de CFD de los efectos aerodinámicos del perfil NACA 2412 como alerón trasero en carro deportivo” (título traducido), se modeló la geometría usando SolidWorks y se realizaron dos simulaciones, la primera era un modelo a escala simplificado de auto deportivo y la segunda era el mismo modelo con un alerón que tenía el perfil NACA 2412. Se usó ANSYS Fluent con el modelo de turbulencia k- $\epsilon$ . Se obtuvieron las gráficas del flujo del aire, la distribución de presión y la turbulencia de la energía cinética. Para el estudio de la malla se realizaron 3 pruebas y se paró ahí porque la diferencia entre la tercera y la segunda era muy pequeña. Se encontró en ambos modelos que tras el coche hay una zona de recirculación del aire debido a la alta turbulencia, que la zona con más presión en el vehículo debido al aire es la parte inferior frontal y en el modelo con alerón también hay alta presión en este, y que la turbulencia de la energía cinética aumenta en el modelo que tiene alerón debajo del alerón. En cuanto a las fuerzas aerodinámicas, el lift cambio de 1.7N a -0.03N con un aumento del drag de 2.92N a 3.6N (Los valores son pequeños porque el modelo usado estaba en escala 1:24).<sup>7</sup>

En el trabajo “Estudio aerodinámico del drag de un vehículo SUV por experimentación y métodos numéricos” se buscó medir el drag a diferentes velocidades de un SUV a escala 1:32. Para la experimentación se usó un túnel de viento a escala con medidas 1m\*0.3m\*0.3m. Para el estudio numérico se usó Gambit como preprocesador y Fluent como postprocesador, el modelo de turbulencia usado fue k- $\epsilon$ . El resultado obtenido fueron 14 valores del drag en las

---

<sup>5</sup> KAR, Anurag. Simulation of Flow Around a Car Wing in ANSYS FLUENT CFD. Praga. 2018. 4p.

<sup>6</sup> HETAWAL, Sneh; GOPHANE, Mandar; B. K., Ajay. y MUKKAMALA, Yagnavalya. Aerodynamic Study of Formula SAE Car. En: 12th GLOBAL CONGRESS ON MANUFACTURING AND MANAGEMENT (12 : 2014 : Vellore). Procedia Engineering 97. Vellore : Procedia Engineering, 2014. p. 1198 - 1207.

<sup>7</sup> DEY, Shamudra & SAHA, Ranabir. CFD Study on Aerodynamic Effects of NACA 2412 Airfoil as Rear Wing on a Sports Car. En: International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering 2018 (5 : 2018 : Khulana). ICMIEE18-125. Khaluna : Department of Mechanical Engineering, Shahjalal University of Science & Technology and Department of Mechanical Engineering, Bangladesh University of Engineering & Technology, 2018. No 125.

pruebas experimentales para velocidades que aumentaban desde los 5.46m/s hasta los 20.4m/s, estos se replicaron en el software y se obtuvo una precisión bastante buena en todos los intervalos del rango probado.<sup>8</sup>

En el artículo “Diseñando un modelo 3d de carrocería de un vehículo con bajo coeficiente de drag y alta carga aerodinámica” (título traducido) se examina la influencia de la carrocería buscando una buena eficiencia aerodinámica mediante el uso de un difusor. El modelo se desarrolló en CATIA y la simulación se llevó a cabo en ANSYS Fluent con el modelo de turbulencia k- $\epsilon$ . El resultado fue la obtención de los coeficientes aerodinámicos para la carrocería modelada.<sup>9</sup>

En el artículo “Control de flujo para un carro con alerón trasero montado” se prueba un alerón móvil mediante CFD y experimentación en túnel con una escala 1:2.5 en un Honda CR-X del sol. En CFD se usaron varios modelos de turbulencia y un estudio de malla para garantizar la independencia de malla, la malla final tuvo más de 7 millones de elementos y tenía inflación cerca al automóvil. El resultado de este trabajo fueron los coeficientes de lift y de drag para ángulos de ataque del alerón desde los 0 hasta los 55°, permitiendo comparar los resultados experimentales y tomando diversas conclusiones sobre las ventajas de usar los modelos de turbulencia en cada caso como que el modelo k- $\omega$  es muy efectivo cuando el ángulo de ataque es 0°.<sup>10</sup>

---

<sup>8</sup> BAUSKAR, Manoj; DHANDE, Dinesh; VADGERI, Shivraj y PARTIL, Sunil. Study of Aerodynamic Drag of Sports Utility Vehicle by Experimental and Numerical Method. En: Materials Today: Proceedings. Vol. 16 (2019), p. 750 – 757.

<sup>9</sup> SINGH, Aditya; JAIN, Arpit y SHARMA, Ashish. Designing a 3-D Model of Bodywork of a Vehicle with Low Coefficient of Drag and High Downforce. En: Materials Today: Proceedings. Vol. 28 (2020), p. 2197 – 2204.

<sup>10</sup> KUREC, Krzysztof; REMER, Michal; MAYER, Tobiasz; TUDRUJ, Sylwester y PIECHNA, Janusz. Flow Control for a car-mounted rear wing. En: International Journal of Mechanical Sciences. Vol. 152 (Mar 2019), p. 384 – 399.

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Como ya se ha mencionado, si se desea obtener mayores velocidades en curva es necesario aumentar la carga aerodinámica de los vehículos para que estos estén más pegados al suelo y tengan un mejor agarre.

Los alerones se usan con el fin de incrementar la carga aerodinámica, sin embargo, generan también una resistencia al avance considerable. Por esta razón, si se quiere mejorar el desempeño en curvas escogiendo un alerón, es debido evaluar con detalle cómo los diferentes perfiles y su posición angular afectan a las velocidades del vehículo (en curva y en recta).

El problema a tratar es entonces el análisis de la influencia que añadir alerones con 3 diferentes perfiles y en diferentes ángulos tiene sobre la resistencia al avance y la carga aerodinámica de un vehículo; cuantificados los cambios en la resistencia al avance y la carga aerodinámica se llega al cálculo de las velocidades máximas en curva y en recta.

#### 3.2 JUSTIFICACIÓN

Es necesario evaluar los efectos de este tipo de perfiles ya que añadir elementos para aumentar la carga sin usar la metodología adecuada puede contribuir a que simplemente se aumente la resistencia al movimiento sin aumentar la carga de manera significativa. Cuando sucede lo anterior se produce una disminución en la velocidad máxima en recta muy grande a cambio de un aumento muy leve en las velocidades de curva.

Un alerón ubicado en un ángulo incorrecto puede no generar el máximo de carga aerodinámica o entrar en pérdida generando una excesiva resistencia al avance, para resolver esto se buscará evaluar diferentes configuraciones angulares.

## 4. OBJETIVOS

### 4.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar la influencia de los perfiles NACA 2412, NACA 4412 y NACA 6409 en la aerodinámica de un Mercedes AMG GT – 2015, mediante simulación de dinámica computacional de fluidos (CFD), para medir como afectan a las velocidades máximas.

### 4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adaptar un modelo de la geometría del vehículo, hecho a partir de superficies, simplificándolo y volviéndolo un sólido 3d para que sea compatible con ANSYS FLUENT y añadir al modelo las geometrías alares, **Indicador:** Modelos compatibles con ANSYS Fluent, **Resultado:** Modelos simplificados en SolidWorks con los perfiles alares.
- Simular los modelos con los perfiles acoplados al vehículo usando el software de volúmenes finitos ANSYS FLUENT, **Indicador:** Modelo numérico, **Resultado:** Coeficientes aerodinámicos de los perfiles NACA en función de diferentes ángulos de ataque.
- Analizar la influencia de los coeficientes aerodinámicos de los modelos en las velocidades máximas que sea posible alcanzar en recta y en curva, **Indicador:** Comparativa del rendimiento aerodinámico de los modelos, **Resultado:** Velocidades máximas de los modelos.
- Validar el modelo numérico comparando la velocidad máxima real con la velocidad máxima calculada, **Indicador:** Modelo Numérico, **Resultado:** comparación de los resultados.

## 5. ALCANCE

Para resolver el problema planteado el mejor método es el túnel de viento, también se puede crear un modelo a escala para evaluarlo en un túnel a escala, se puede usar el análisis CFD o se pueden combinar las técnicas. En este trabajo, dado que no se disponía de los equipos para pruebas experimentales, se optó únicamente por análisis CFD.

No se creó desde cero la geometría del automóvil, sino que, se simplificó una geometría de GRABCAD y se convirtió en un modelo adaptado a las necesidades.

Se utilizaron alerones simples (de un solo elemento). Los perfiles no se dibujaron a partir de sus ecuaciones, sino que se ajustaron a partir de sus coordenadas que se encuentran disponibles en internet. Solo se realizaron simulaciones de los perfiles en los ángulos de  $-4^\circ$ ,  $-8^\circ$ ,  $-12^\circ$  y  $-16^\circ$ , mediante las distintas pruebas se buscó encontrar cuál es la configuración que presenta más eficiencia aerodinámica.

Dado que las simulaciones realizadas superaban el límite de las 512.000 celdas para la versión estudiantil fue necesario utilizar las licencias de la universidad. La potencia computacional de la que se dispuso fue la de un ordenador personal

## 6. METODOLOGÍA

Se tomó un modelo en SOLIDWORKS del automóvil desde GRABCAD hecho a partir de superficies. Se hicieron modificaciones al modelo para simplificarlo como eliminar el detalle de las superficies que no lo requerían o eliminar las superficies que generaban un gran gasto computacional innecesario, se cerraron los huecos y se comprobó que la geometría funcionara en ANSYS FLUENT.

Se descargaron de la web airfoiltool.com las coordenadas que representan los perfiles NACA 2412, NACA 4412 Y NACA 6409 y a partir de estas se dibujaron en SolidWorks modificando el largo del perfil y creando modelos para los ángulos de ataque de 4°, 8°, 12° y 16° que es el rango usual; los perfiles se añadieron a una base que los conectó con el modelo del auto y se les añadieron derivas laterales.

Se procedió a mallar los modelos creados, si hicieron pruebas para encontrar el tamaño de malla adecuado reduciéndolo hasta que no variara notablemente. Se simularon los modelos con los perfiles en los 4 ángulos y sin ningún perfil usando el modelo de turbulencia k -e, que tiene un buen desempeño en este tipo de análisis, con el fin de obtener los coeficientes aerodinámicos y se encontró, después de probar diferentes ajustes, convergencia en las simulaciones.

Se crearon gráficas que ilustran el comportamiento de los modelos y su eficiencia aerodinámica. Se obtuvieron las velocidades límite de los modelos en curva, en vuelco y en recta haciendo uso del modelo de cálculo propuesto por Carbonell<sup>11</sup>, estas ecuaciones se resolvieron con el software EES.

Para validar los resultados se comparó la Velocidad máxima en recta del modelo del automóvil sin ala obtenida a partir de los cálculos con la velocidad máxima que da el fabricante del vehículo. La carga aerodinámica producida por los perfiles no pudo ser comprobada de manera teórica debido a la falta de datos existentes en la literatura por lo específico del problema.

---

<sup>11</sup> CARBONELL, Op. cit.

## 7. MARCO TEÓRICO

### 7.1 AERODINÁMICA EN VEHÍCULOS

La aerodinámica afecta directamente el rendimiento de los vehículos, “la aerodinámica representa el 40% de la eficiencia total de un automóvil”<sup>12</sup>. El diseño aerodinámico de un coche tiene principalmente dos objetivos: que la interacción del vehículo en movimiento con el aire genere la menor resistencia posible al avance para reducir el consumo de combustible y que se genere una fuerza que pegue el coche contra el suelo (down-force) para que este tenga más agarre y pueda dar curvas a velocidades más altas.

Para llevar a cabo estos dos objetivos se realizan diversas acciones como hacer coches con menor área frontal o con formas afiladas para reducir la resistencia del viento. También, buscando generar down-force, se ha modificado la geometría de los vehículos y se han empleado elementos como perfiles alares o fondos planos con difusores.

#### 7.1.1 FONDOS PLANOS

El fondo del vehículo se ajusta con un pequeño ángulo negativo con respecto a la horizontal de modo que la parte delantera esté un poco más cerca al suelo que la trasera. Su uso hace que el fondo del coche funcione como una sección Venturi a través de la cual el aire se acelera y genera baja presión.<sup>13</sup>

#### 7.1.2 DIFUSORES

Los difusores se ubican en la parte trasera del fondo del coche y se usan en conjunto con el fondo plano, estos poseen un incremento en el ángulo de desviación comparado con la parte de adelante del coche, su forma imita a la parte divergente del tubo Venturi. Su función es abrir el flujo del fondo a la zona de influencia de la estela y hacer que el aire que pasa por debajo del coche se acelere para llenar el volumen expansible generando así una caída de presión.<sup>14</sup>

---

<sup>12</sup> MCBEATH, Op. cit., p. 9.

<sup>13</sup> Ibid., p. 111.

<sup>14</sup> Ibid., p. 121.

### 7.1.3 ALERONES

La implementación de alerones en los coches fue la primera gran mejora aerodinámica que se les realizó a los coches con el objetivo de generar down-force y en la actualidad siguen usándose y continúa la investigación para usar perfiles (o conjuntos de perfiles) más adecuados. Esta tecnología ya había madurado gracias a su uso en vehículos aéreos y posteriormente se transfirió a los autos<sup>15</sup>. Su utilidad se debe a que, gracias a su forma y su ubicación, hacen que el flujo de aire se separe obteniéndose en este menos velocidad y más presión.<sup>16</sup>

El rendimiento de los alerones varía en función del ángulo de ataque de estos, la carga aerodinámica y la resistencia por lo general aumentan a mayor ángulo de ataque, aunque existe un ángulo en el cual el aire se desvía por el borde de succión del perfil y en lugar de fluir suavemente se separa de la superficie del perfil y se vuelve muy inestable conllevando una pérdida de carga y un aumento de la resistencia<sup>17</sup>. Generalmente su ángulo de máxima eficiencia se encuentra entre los  $-3^\circ$  y los  $-20^\circ$ , por esto suelen realizarse pruebas en este rango de ángulos.<sup>18 19 20</sup>

## 7.2 MÉTODOS PARA EVALUAR LA AERODINÁMICA DE LOS VEHÍCULOS

El desempeño aerodinámico de un vehículo depende en gran parte de cómo su forma interactúa con el aire y esto se mide en coeficientes aerodinámicos que no pueden obtenerse de forma analítica, se disponen en cambio de métodos experimentales como el túnel de viento y las pruebas en pista o del análisis computacional de fluidos para obtenerlos. Una vez conocidos los valores de los coeficientes aerodinámicos mediante los métodos que se describen más adelante en este documento, es posible conocer el impacto de la aerodinámica en las velocidades usando sistemas de cálculo basados en las leyes de la mecánica clásica como el propuesto por Carbonell<sup>21</sup>.

---

<sup>15</sup> KATZ, Joseph. Aerodynamics of Race Cars. En: Annual Review of Fluid Mechanics. Vol. 37 (2006); p. 27 – 63.

<sup>16</sup> MCBEATH, Op. cit., p. 53.

<sup>17</sup> Ibid., p. 76.

<sup>18</sup> CAMPOS, Rubén. Diseño de un alerón de un vehículo de competición: comparación de la simulación aerodinámica numérica y la simulación aerodinámica experimental. Barcelona, 2008, 61p. Trabajo de investigación (grado en Ingeniería Técnica Aeronáutica, especialidad Aeronavegación). Universidad Politécnica de Cataluña.

<sup>19</sup> DEY, Shamudra & SAHA, Ranabir, Op. cit.

<sup>20</sup> BAUSKAR, DHANDE, VADGERI y PARTIL, Op. Cit.

<sup>21</sup> CARBONELL, Op. cit.

### 7.2.1 ANÁLISIS CFD

El análisis computacional de fluidos utiliza métodos numéricos y estructuras de datos para la resolución de problemas que involucran flujos de fluidos. Estos análisis son muy útiles para el estudio aerodinámico de los vehículos y tienen un coste bajo en comparación con las pruebas experimentales. Suelen usarse en las primeras fases de diseño preliminar de los vehículos o como complemento a las pruebas experimentales. Su principal ventaja es la gran cantidad de información que brindan, lo que los hace perfectos para el diseño de alerones.<sup>22</sup>

### 7.2.2 TÚNEL DE VIENTO

Es el método más preciso para evaluar la aerodinámica. La tecnología de los túneles de viento ya había madurado bastante para cuando la aerodinámica empezó a importar en los coches por lo que fue usada también para estos, aunque hubo que solucionar aspectos que diferenciaban su uso para los autos como la simulación del movimiento de las ruedas con un piso en movimiento<sup>23</sup>. En estos túneles se utilizan ventiladores, cambios de secciones y rejillas para que el flujo de aire alcance una velocidad deseada y sea lo menos turbulento posible.

Los túneles de viento son bastante costosos de construir y de operar por lo que solo las compañías o centros de investigación con alto presupuesto pueden costearlos. También se usan túneles de viento a escala en los que se examinan modelos a escala, estos son más asequibles, y se usan para probar ideas básicas de diseños que si resultan dar buenos resultados luego se prueban a tamaño real en pista.<sup>24</sup>

### 7.2.3 PRUEBAS EN PISTA

Se realizan con la instrumentación necesaria cuando el coche ya está construido para medir los valores reales, solucionan el problema del movimiento de las llantas y el movimiento de los muros en el túnel de viento, aunque las condiciones ambientales deben ser las óptimas y se debe contar con la instrumentación necesaria para su uso.<sup>25</sup>

## 7.3 FUERZA AERODINÁMICA

---

<sup>22</sup> Katz, Op. cit.

<sup>23</sup> Ibid.

<sup>24</sup> Ibid.

<sup>25</sup> Ibid.

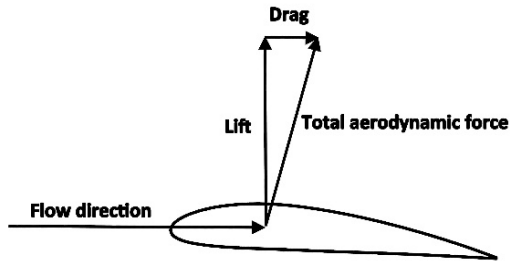


Figura 1: Fuerza aerodinámica con sus componentes, tomada de Wikimedia commons, autor: J Doug McLean.

La fuerza que ejerce el aire sobre un cuerpo tiene dos componentes: la sustentación (lift) y el arrastre (drag), en la figura 1 se muestran estas componentes de la fuerza aerodinámica. El drag es la fuerza de resistencia al movimiento de un cuerpo a través de un fluido, por lo que va en dirección paralela a la velocidad relativa del viento; la sustentación es perpendicular al movimiento del cuerpo y en los automóviles, como se busca que empuje el vehículo hacia el suelo, se llama también down force. Estas fuerzas se calculan de la siguiente manera:

$$F_l = \frac{1}{2} C_l A \rho v^2 \quad (1)$$

$$F_d = \frac{1}{2} C_d A \rho v^2 \quad (2)$$

Donde  $F_l$  y  $F_d$  son las fuerzas de lift y de drag,  $C_l$  y  $C_d$  son los coeficientes de lift y de drag,  $A$  es el área frontal del cuerpo,  $\rho$  es la densidad del aire y  $v$  es la velocidad del aire.

#### 7.4 COEFICIENTES DE LIFT Y DE DRAG

Son parámetros adimensionales que se usan para cuantificar la influencia de la forma del objeto, su inclinación y las condiciones de flujo en la fuerza de lift y de drag. Puede despejarse de la ecuación de la fuerza:

$$C_d = \frac{2F_d}{A\rho v^2} \quad (3)$$

$$C_l = \frac{2F_l}{A\rho v^2} \quad (4)$$

Diferentes formas tendrán diferentes coeficientes, por ejemplo, una placa cuadrada con un flujo cuyo número de Reynolds es  $Re_d = 10^5$  tendrá un  $C_d$  de 2.0 mientras

que una esfera con  $Re_d = 10^5$  tendrá un  $C_d$  de 1.2<sup>26</sup>. De la misma manera, al girar un objeto también cambian los coeficientes, razón por la cual muchos trabajos se centran en encontrar la inclinación adecuada de perfiles alares.

## 7.5 EFICIENCIA AERODINÁMICA

Se simboliza con una  $f$  y cuantifica el lift generado por el drag generado:

$$f = \frac{c_l}{c_d} \quad (5)$$

Cómo se busca generar la mayor cantidad de carga aerodinámica con la menor resistencia posible, se espera que este parámetro tenga valores lo más altos.

## 7.6 CÁLCULO DE LAS VELOCIDADES MÁXIMAS

Con el objetivo de usar los coeficientes hallados en la obtención de las velocidades límite se usará el modelo propuesto por Carbonell<sup>27</sup> para encontrar las velocidades límites en recta, en curva y en vuelco. A continuación, las ecuaciones básicas de la mecánica que se usan en el modelo de fuerzas.

$$W = mg \quad (6)$$

Donde  $W$  es el peso,  $m$  la masa y  $g$  la aceleración de la gravedad.

$$F_r = F_N C_r \quad (7)$$

Donde  $F_r$  es la fuerza de rozamiento (hacia adelante),  $F_N$  es la fuerza normal (contraria al movimiento) y  $C_r$  es el coeficiente de rodadura.

$$F_m = \frac{P}{v} \quad (8)$$

Donde  $F_m$  es la fuerza del motor,  $P$  es la potencia del motor y  $v$  la velocidad.

---

<sup>26</sup> BERTIN, Jhon. Aerodynamics for Engineers. 5ta edición. Pearson Education International, 2009. p. 130.

<sup>27</sup> CARBONELL, Op. cit.

$$F_c = \frac{v^2}{r} m \quad (9)$$

Donde  $F_c$  es la fuerza centrípeta,  $v$  es la velocidad,  $r$  es el radio de la curva y  $m$  la masa.

$$F_{rz} = F_N \mu \quad (10)$$

Donde  $F_{rz}$  representa la fuerza de rozamiento,  $F_N$  la fuerza normal y  $\mu$  el coeficiente de rozamiento.

El coeficiente de rodadura  $C_r$  en (7) representa la resistencia debido a la fricción entre un neumático que gira moviéndose hacia adelante y el asfalto, mientras que el coeficiente de rozamiento  $\mu$  en (10) representa la resistencia debido a la fricción de un neumático que se mueve hacia el centro de su trayectoria curva, por esto el  $\mu$  es mucho más alto que el  $C_r$ .

#### 7.6.1 ECUACIONES EN RECTA

$$\text{Eje } y: F_N + F_L - W = 0 \quad (11)$$

$$\text{Eje } x: F_m - F_D - F_r = 0 \quad (12)$$

De (11) se despeja  $F_N$  y se reemplaza como un término de la  $F_r$  en (12), se obtiene:

$$F_m - F_D - (W - F_L)C_r = 0 \quad (13)$$

Se procede a insertar todos los términos que componen las fuerzas a la ecuación:

$$\frac{P}{v} - \frac{1}{2}AC_D\rho v^2 - \left(mg - \frac{1}{2}AC_L\rho v^2\right)C_r = 0 \quad (14)$$

Finalmente, se organiza la ecuación teniendo en cuenta que  $v$  es el parámetro por encontrar:

$$-v^3 \left(\frac{1}{2}AC_D\rho + C_{RR}\frac{1}{2}AC_L\rho\right) - vC_rmg + P = 0 \quad (15)$$

#### 7.6.2 ECUACIONES EN CURVA

$$\text{Eje } y: F_N + F_L - W = 0 \quad (16)$$

$$\text{Eje } x: F_c - F_{rz} = 0 \quad (17)$$

De (16) se despeja  $F_N$  y se reemplaza como un término de la  $F_{rz}$  en (17), se obtiene:

$$F_c - \mu(W - F_L) \quad (18)$$

Se procede a insertar todos los términos que componen las fuerzas a la ecuación:

$$\frac{mv^2}{r} - \mu \left( mg - \frac{1}{2} AC_L \rho v^2 \right) = 0 \quad (19)$$

Finalmente, se organiza la ecuación despejando  $v$ :

$$v = \sqrt{\frac{mg}{\frac{m}{r\mu} + \frac{1}{2} AC_L \rho}} \quad (20)$$

### 7.6.3 ECUACIONES EN VUELCO

Se plantea la ecuación de momentos estabilizantes y desestabilizantes:

$$F_c h_g = \frac{d_r}{2} (W - F_L) \quad (21)$$

Se procede a insertar todos los términos que componen las fuerzas a la ecuación:

$$\frac{mv^2}{r} h_g = \frac{d_r}{2} \left( mg - \frac{1}{2} AC_L \rho v^2 \right) \quad (22)$$

Finalmente, se organiza la ecuación despejando  $v$ :

$$v = \sqrt{\frac{d_R mg}{2 \frac{m}{r} h_g + d_R \frac{1}{2} AC_L \rho}} \quad (23)$$

Donde  $h_g$  es la altura del centro de gravedad y  $d_R$  es la distancia exterior entre las ruedas.

## 7.7 EL PERFIL ALAR Y LA NOMENCLATURA NACA DE 4 DÍGITOS

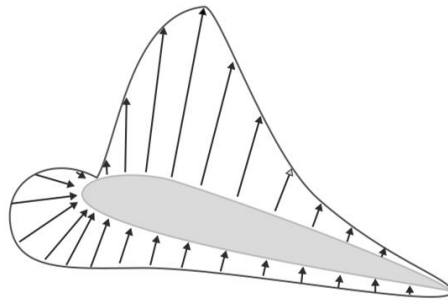


Figura 2: Distribución de presiones alrededor de un perfil alar, tomada de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Fluids/airfoil.html>.

Un perfil alar es la forma transversal de un elemento que al desplazarse a través del aire obtiene una distribución de presiones a su alrededor que genera sustentación, en la figura 2 puede verse la distribución de presiones sobre un perfil alar y el empuje hacia arriba que genera. Los perfiles alares representan un criterio de diseño importante al diseñar elementos con superficies sustentadoras como alas, hélices de turbinas o compresores, palas de hélices, entre otras. La geometría y/o la inclinación del elemento con sección de perfil hacen que el aire que entre en contacto con ellos se mueva hacia abajo (arriba en el caso de los coches) generando así fuerza de lift. Según su forma los perfiles pueden ser simétricos o asimétricos, un perfil simétrico no generará lift a  $0^\circ$  de inclinación, aunque si generará a medida que el ángulo de ataque aumenta.

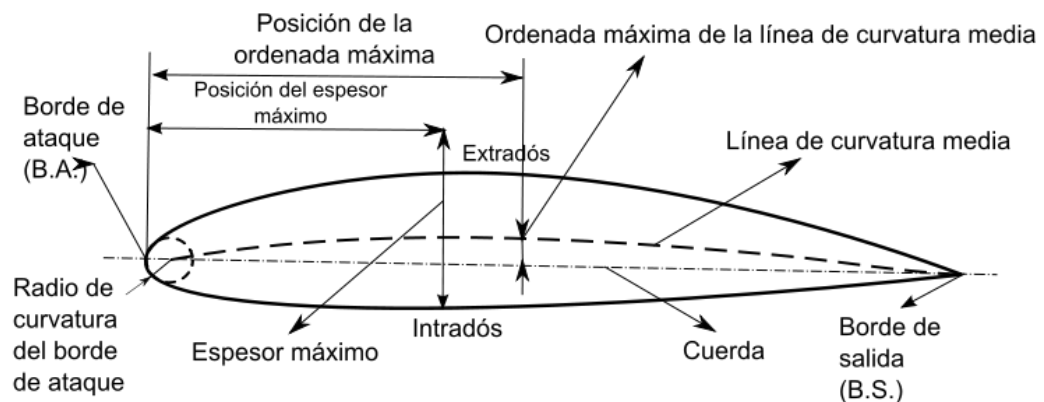


Figura 3: Nomenclatura acerca del perfil, tomada de [upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8d/Perfil\\_alar\\_1.svg/800px-Perfil\\_alar\\_1.svg.png?1606264512400](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8d/Perfil_alar_1.svg/800px-Perfil_alar_1.svg.png?1606264512400)

La delantera del perfil es llamada borde de ataque mientras que la trasera borde de salida; se conoce como intradós a la parte inferior y como extradós a la parte superior. En la figura 3 pueden observarse las regiones un perfil y las medidas o parámetros que lo definen.

La NACA creó su nomenclatura con el fin de crear perfiles de manera racional y sistematizada. Existen diferentes familias de perfiles NACA, la primera familia de perfiles fue la de 4 dígitos. Su nomenclatura es:

NACA MPXX

Donde:

- M= Ordenada máxima dividida en el valor de la cuerda y dividida en 100.
- P= Posición de la ordenada máxima dividida en el valor de la cuerda y dividida entre 10.
- XX= Espesor máximo dividido en el valor de la cuerda y dividido en 100.

El valor de la cuerda define el tamaño del perfil mas no su geometría, por esto debe ser definido en función de la aplicación del perfil.

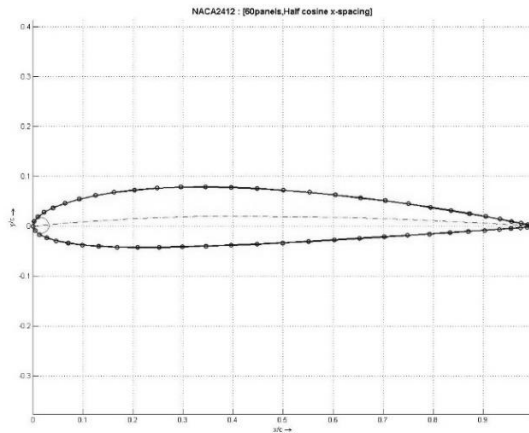


Figura 4: Perfil NACA 2412, tomada de: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/mlc-downloads/downloads/submissions/19915/versions/5/screenshot.jpg>

Entonces, si se da por ejemplo el perfil NACA 2412, mostrado en la figura 4, se pueden definir los parámetros del perfil M= 2% de la cuerda, P= 40% de la cuerda y XX= 12% de la cuerda.

## 7.8 ECUACIONES PARA OBTENER LOS PERFILES NACA DE 4 DIGITOS

Para obtener las coordenadas de los perfiles NACA de 4 dígitos, se parte de las ecuaciones de la línea de curvatura media  $y_c$  y de sus respectivas derivadas con respecto a x. Las ecuaciones para la línea de curvatura media  $y_c$  son dos, una

describe la curva antes de la posición de la ordenada máxima P y la otra después de P.

$$y_c = \frac{M}{P^2}(2Px - x^2), 0 \leq x < P \quad (24)$$

$$\frac{dy_c}{dx} = \frac{2M}{P^2}(P - x), 0 \leq x < P \quad (25)$$

$$y_c = \frac{M}{(1 - P)^2}(1 - 2P + 2Px - x^2), P \leq x \leq 1 \quad (26)$$

$$\frac{dy_c}{dx} = \frac{2M}{(1 - P)^2}(P - x), P \leq x \leq 1 \quad (27)$$

Si se toma un trozo de la curva  $y_c$  y se forma un triángulo en donde el trozo de la curva es la hipotenusa y  $dy_c$  y  $dx$  los catetos, se tiene un ángulo  $\theta$  junto al cateto  $dx$  que es el mismo ángulo que se forma entre la línea vertical y la recta perpendicular a la curva  $y_c$ .

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{dy_c}{dx}\right) \quad (28)$$

Ahora que se tiene el ángulo, falta conocer la distribución de los espesores de la curva, para esto se usa la siguiente ecuación.

$$y_t = \frac{T}{0,2}(a_0x^{0,5} + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4) \quad (29)$$

Donde  $a_0 = 0.2969$ ,  $a_1 = -0.126$ ,  $a_2 = -0.3516$ ,  $a_3 = 0.2843$ ,  $a_4 = -0.1015$  o  $-0.1036$  para un borde de salida cerrado.

Finalmente, se pasa de las ecuaciones de ángulo y espesor a ecuaciones.  $x_u$  representa la coordenada en X de la parte superior de la curva,  $y_u$  representa la coordenada en Y de la parte superior de la curva,  $x_l$  representa la coordenada en X de la parte inferior de la curva y  $y_l$  representa la coordenada en Y de la parte inferior de la curva.

$$x_u = x_c - y_t \sin(\theta) \quad (30)$$

$$y_u = y_c + y_t \cos(\theta) \quad (31)$$

$$x_l = x_c + y_t \sin(\theta) \quad (32)$$

$$y_l = y_c - y_t \cos(\theta) \quad (33)$$

## 8. TRATAMIENTO DE LA GEOMETRÍA

El modelo desde el que se empezó a trabajar se tomó de la web GRABCAD y fue subido por el usuario Yusuf Budwanguzi, este modelo original puede verse en la figura 5.



Figura 5: Vistas isométricas del modelo inicial.

El objetivo del tratamiento de la geometría es hacerla mucho más sencilla, de modo que puedan hacerse simulaciones con la capacidad computacional con la que se cuenta. Además, el modelo original contiene una mezcla de superficies con sólidos y hay muchas superficies que no están unidas con otras, esto representa un problema ya que para trabajar en ANSYS FLUENT es necesario ingresar un modelo que contenga solamente un sólido, de modo que también se busca corregir esto.

Para conseguir el modelo sólido simplificado, y teniendo en cuenta que casi todo el modelo inicial estaba hecho a partir de superficies y no de sólidos, se buscó obtener un modelo simplificado hecho solo a base de superficies para usar en esta herramienta coser superficies de SOLIDWORKS y formar así el modelo sólido.

Para reconstruir los elementos modificados, se construían los respectivos croquis y en estos se usaba la operación Rellenar Superficie que creaba una superficie en su interior. A continuación, se describen y se muestran todas las modificaciones que se le hicieron al modelo.

Lo primero que se realizó fue eliminar las operaciones de Espejo (simetría) para trabajar solo con la mitad del modelo que había sido hecha paso a paso.

## 8.1 FRENTE



Figura 6: Imagen del frente del modelo antes y después de tratar la geometría.

En la figura 6 pueden observarse los cambios que se mencionan a continuación.

- La parrilla frontal con todos sus detalles (logo de la marca, logo de AMG, rejilla y tubo emellecedor) fue eliminada y se reemplazó por una cubierta hecha a base de tres círculos.

- Todos los detalles interiores de los faros se eliminaron y se conservó solo la superficie exterior.
- Las rejillas de ventilación inferior central e inferior lateral se eliminaron y taparon por completo.
- Se eliminó la placa.
- Se eliminó la línea sobresaliente del capó y para tapar el hueco se alargó el croquis que estaba al lado.
- Se eliminó el logo de la marca.
- Se eliminaron los tres hundimientos con forma de aro.

En la figura 7 se hace un énfasis en zonas que no aprecian totalmente en la figura 6, los cambios que se aprecian en esta figura se describen a continuación.

- Se eliminó la hendidura que marca la separación del capó.
- Se eliminó la rejilla de ventilación del capó y las superficies de su hundimiento. Esto generó el problema de que las superficies de los alrededores se eliminaron también debido a que estaban ligadas las operaciones (seguramente como un error de importación del modelo). Para solucionar esto se dibujaron croquis encima de las superficies que se quería conservar, se eliminó la rejilla y con esta las superficies de los alrededores y usando la herramienta Rellenar Superficie se crearon las superficies eliminadas que debían conservarse.
- El cristal delantero estaba separado del capó y de la parte exterior de la carrocería, todas estas separaciones y el cristal mismo se eliminaron. Para reacer el cristal frontal se seleccionó el perímetro de la abertura que quedó y se usó la herramienta Rellenar Superficie.

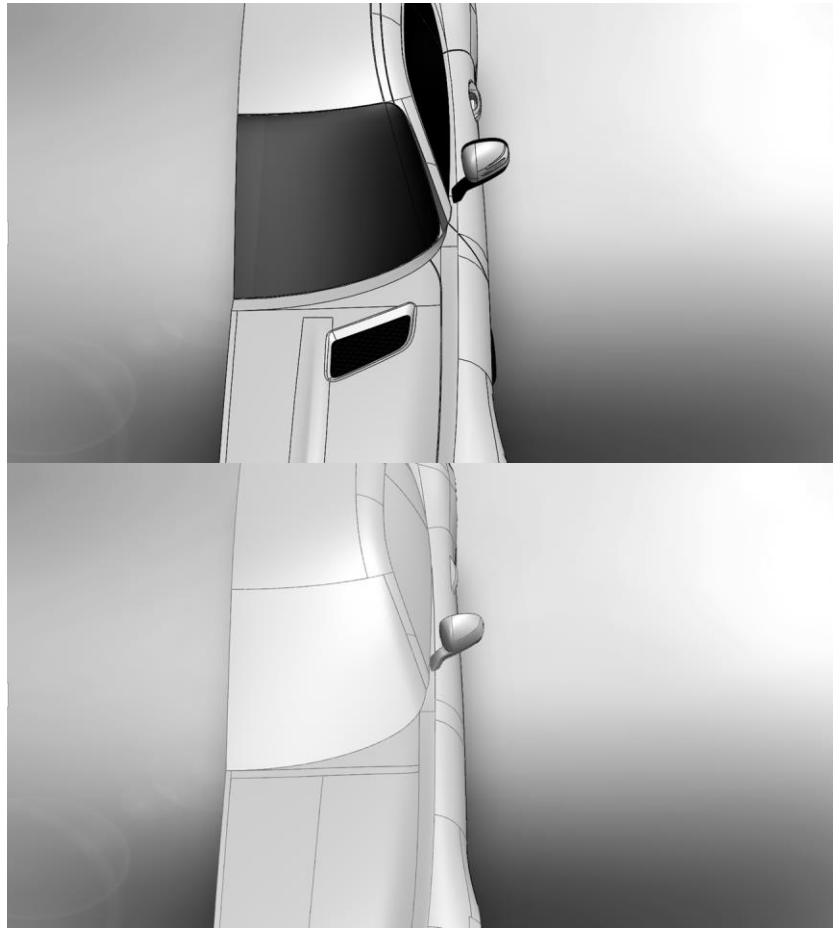


Figura 7: Imagen del frente del modelo, con énfasis en el cristal y la rejilla de ventilación, antes y después de tratar la geometría.

## 8.2 LATERAL

En la figura 8 se aprecian los cambios realizados en el lateral.

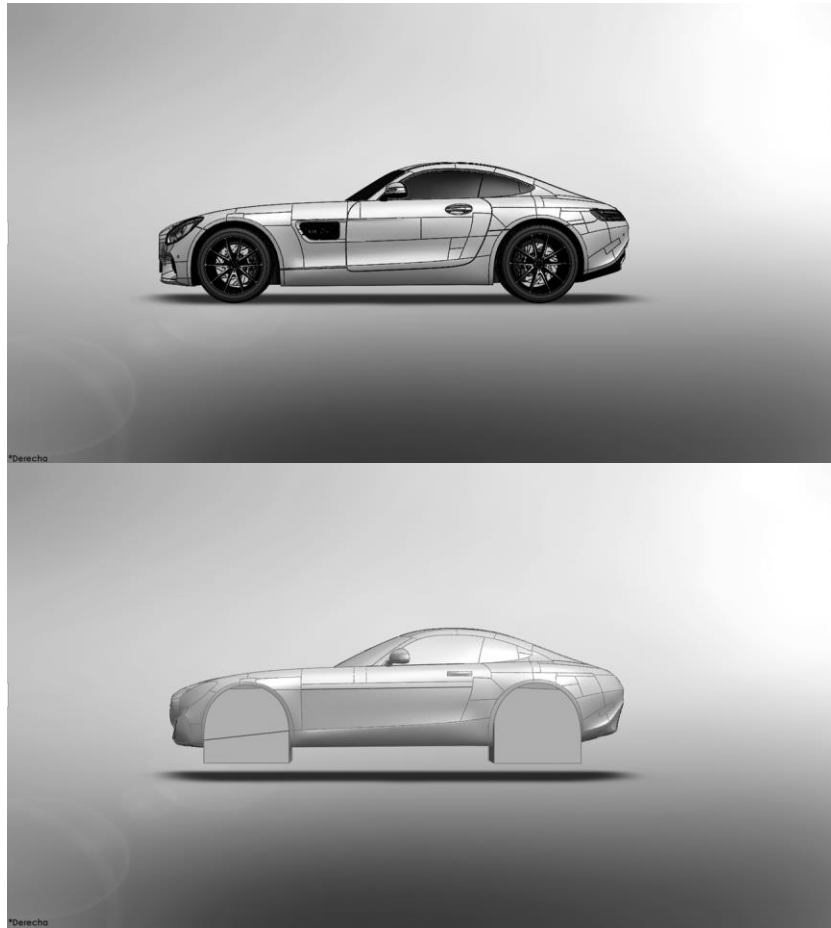


Figura 8: Imagen del lateral del modelo antes y después de tratar la geometría.

- Se eliminó la rejilla de ventilación junto con todos sus detalles y las superficies exteriores que marcaban su hundimiento.
- Se eliminó la hendidura que demarcaba la puerta.
- El conjunto de superficies que iban desde la parte derecha de la puerta hasta casi el neumático delantero se reemplazó por una sola superficie.
- Las ruedas, los neumáticos y los frenos, que eran partes sólidas, se eliminaron por completo, así como las superficies de la carrocería que iban alrededor de ellos. Para reconstruirlas se usó una forma de caja, esto no debería afectar mucho los resultados puesto que se conserva la misma área frontal. La razón por la que se optó por una forma de caja y no una cilíndrica es porque se quiso tener tamaños de celda pequeños en la zona de contacto del neumático con el suelo.

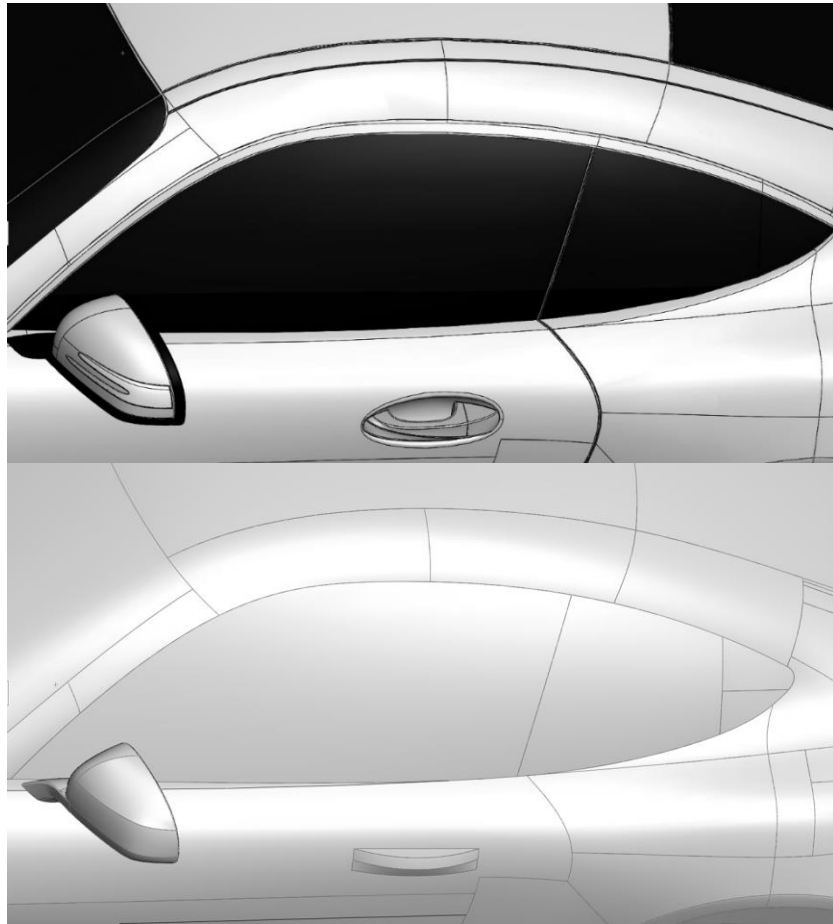


Figura 9: Imagen del lateral del modelo, con énfasis en la ventanilla, el espejo y la manija, antes y después de tratar la geometría.

En la figura 9 se hace un énfasis en zonas que no aprecian totalmente en la figura 8, los cambios que se aprecian en esta figura se describen a continuación.

- Se eliminaron los marcos de las ventanas y las ventanas mismas y se reemplazaron por superficies mucho más sencillas con formas similares hechas a base de formas circulares y de los bordes abiertos. Estas nuevas ventanas estaban pegadas a los marcos exteriores.
- Como el espejo estaba hecho con sólidos, era necesario eliminarlos por completo. Para reconstruirlo, antes de eliminarlo se calcularon los croquis principales tal como se hizo en las superficies cercanas a la rejilla de ventilación del capó, omitiendo los detalles decorativos, y se usó la operación Rellenar Superficie.
- La manija de la puerta y su hueco se eliminaron y se reemplazó por una forma mucho más sencilla ubicada en el mismo lugar.

### 8.3 PARTE POSTERIOR

En la figura 10 se muestran los cambios realizados en la parte posterior.

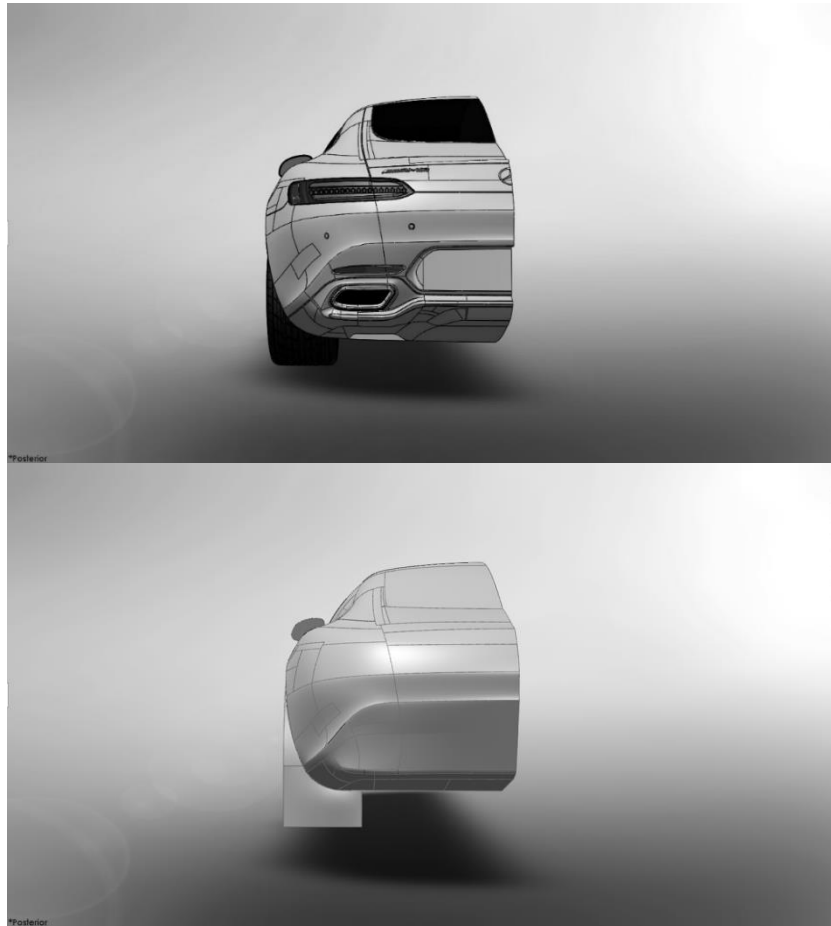


Figura 10: Imagen de la parte trasera del modelo antes y después de tratar la geometría.

- Se eliminó el logo de la marca y el de AMG.
- Se buscó una forma plana en la parte trasera.
- Se eliminó el tubo de escape junto con todas las superficies a su alrededor que le complementaban.
- Se eliminaron los faros y todos sus detalles interiores.
- Se eliminó la luz trasera cercana al tubo de escape.
- El borde inferior, cuya forma se adaptaba al tubo de escape, se dejó recto.
- Se eliminaron los dos hundimientos con forma de aro.

## 8.4 FONDO

En la figura 11 se muestran los cambios realizados en el fondo del vehículo.

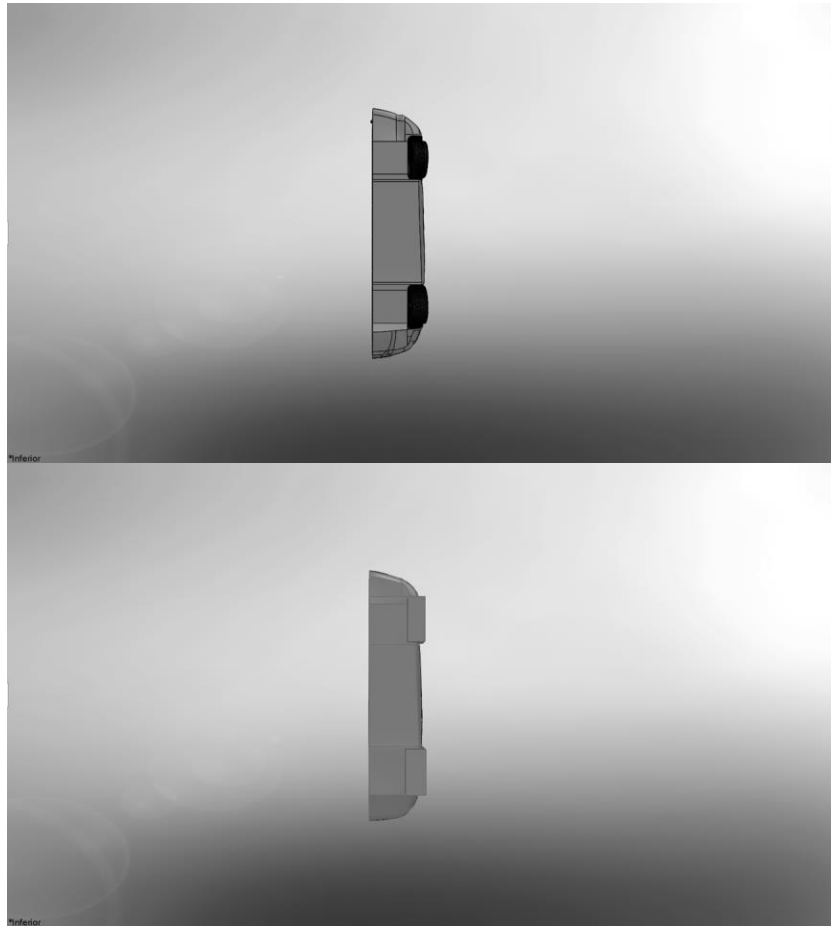


Figura 11: Imagen del fondo del modelo antes y después de tratar la geometría.

- Las partes del fondo cercanas al frente y a la parte trasera presentaban algunas superficies con hundimientos que fueron rectificadas.
- Varias superficies pequeñas fueron reemplazadas por una más grande.

## 8.5 SELLADO DE HUECOS

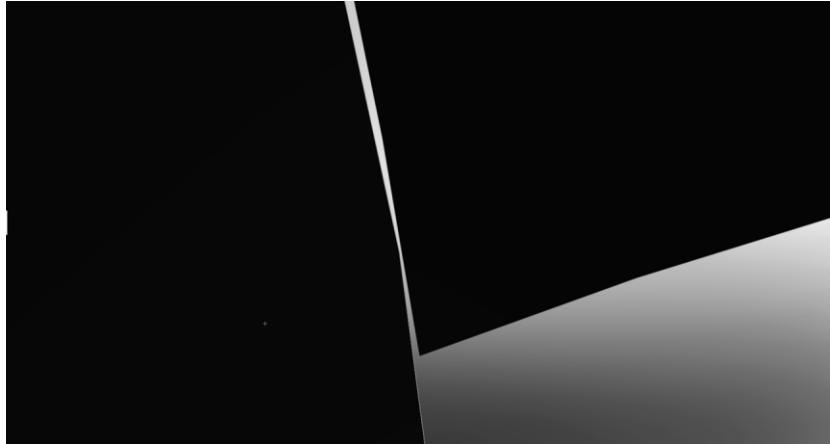


Figura 12: Imagen de dos superficies con un hueco entre ellas.

Mientras se trabajó en la geometría se encontró que muchas superficies no estaban perfectamente unidas entre sí, muchas tenían pequeñas separaciones que solo se hacían visibles al hacer excesivo zoom. Esto no es conveniente porque para que se pueda realizar la operación coser en SOLIDWORKS y con esta unir todas las superficies en un sólido, es necesario que las superficies estén unidas entre sí.

Para unir estas pequeñas separaciones se modificaban los croquis de las superficies haciendo que coincidiesen entre sí. No se añaden imágenes de todas las separaciones cerradas porque todas se ven iguales y el documento se llenaría innecesariamente.

## 8.6 CREACIÓN DEL MODELO SÓLIDO

Después de haber simplificado el modelo, eliminado todos los sólidos y cerrado todas las separaciones, se procedió a usar la operación con Coser superficie de SOLIDWORKS y se seleccionaron todas las superficies existentes, se usaron en esta operación las opciones crear sólido y fusionar entidades.

No se usó la operación de simetría para crear la otra mitad del modelo debido a que en ANSYS FLUENT se trabajará solo con la mitad del modelo y se usará ahí la opción de simetría, de esta manera el análisis demandará menos recursos.

Se procedió después a guardar el modelo en formato STEP. En la figura 13 se aprecia este modelo.

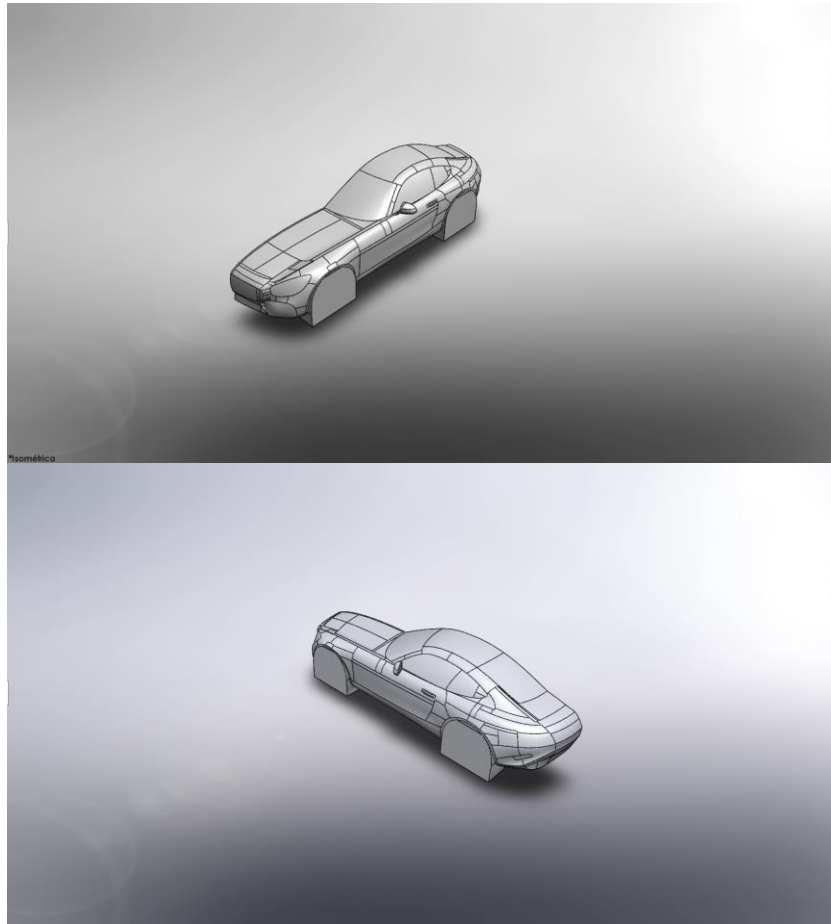


Figura 13: Vistas isométricas del modelo ya tratado.

## 8.7 GENERACIÓN DE LOS DIFERENTES MODELOS CON ALAS

El dibujo de las alas se explica con las ecuaciones mostradas en la sección 7.8, en este trabajo se obtuvieron las coordenadas de los perfiles de la web <http://airfoiltools.com/>. Estas coordenadas se organizaron en EXCEL y allí se les añadió el eje z lleno de ceros, después de esto se guardaron como documento de texto.

En SOLIDWORKS se usó la operación curva XYZ y se seleccionaron los archivos de texto con cada una de las curvas, obteniendo el dibujo de estas. Para poder ajustar el tamaño y la orientación de las curvas obtenidas, se realizó la operación de croquis Convertir Entidades y se procedió a acotar.

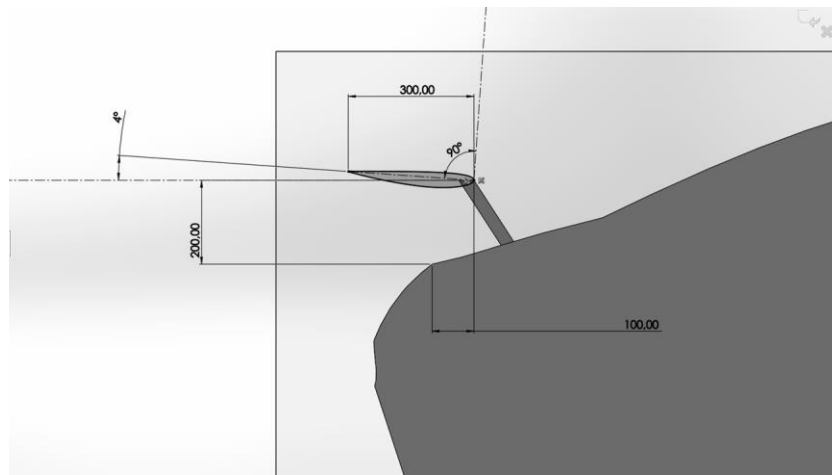


Figura 14: Acotación de un ala.

Se ubicaron las alas en el plano alzado, se les dio una longitud de cuerda de 300mm, se le dio a cada una su respectiva orientación con respecto a la horizontal (cada ala en ángulos de 4°, 8°, 12° y 16°) y se dio una ubicación fija para las alas con respecto al vehículo. En la figura 14 se muestran las medidas con las que se acotaron las alas. Se extruyó el perfil con 1m de profundidad (2m al tener en cuenta que analizará como simetría).

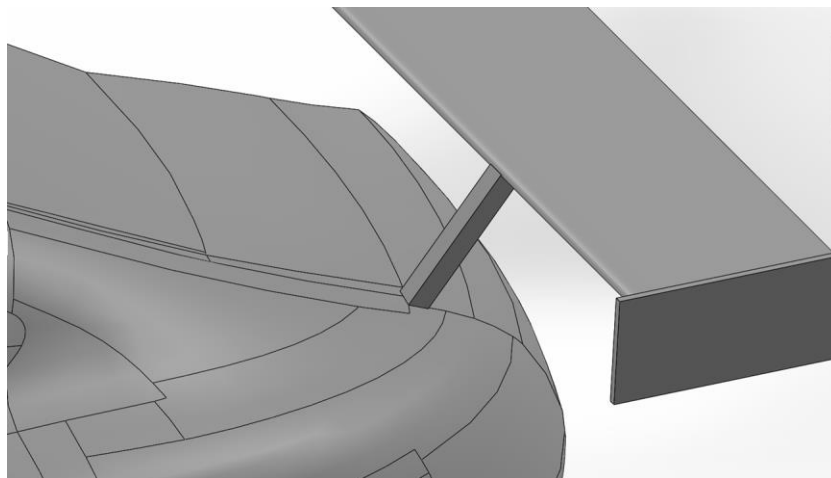


Figura 15: Soporte del alerón.

Se dibujó un soporte sencillo de sección rectangular para conectar las alas al vehículo, este se muestra en la figura 15. También se añadieron derivas laterales en dirección paralela a la cuerda del perfil y con un grosor de 10mm, sus dimensiones se muestran en la figura 16.

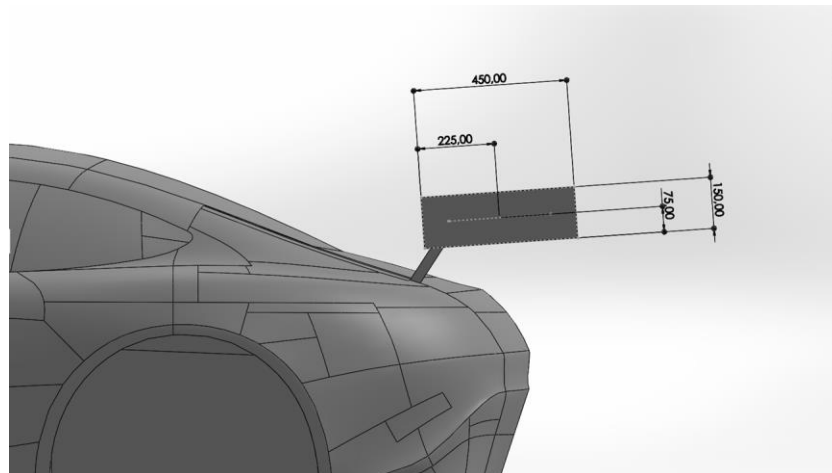


Figura 16: Dimensiones de las derivas laterales.

En total se obtuvieron 13 modelos: El modelo sin ala, 4 modelos con NACA 2412, 4 modelos con NACA 4412 y 4 modelos con NACA 6409. Se guardaron con la extensión. STEP para trabajarlos después en ANSYS.

Tabla 1: Modelos creados.

Modelos
Sin ala
NACA 2412-4°
NACA 2412-8°
NACA 2412-12°
NACA 2412-16°
NACA 4412-4°
NACA 4412-8°
NACA 4412-12°
NACA 4412-16°
NACA 6409-4°
NACA 6409-8°
NACA 6409-12°
NACA 6409-16°

## 9. SIMULACIONES EN ANSYS FLUENT

### 9.1 PREPARACIÓN DE LOS MODELOS

#### 9.1.1 CORRECCIÓN DEL ESPEJO

Al exportar los modelos trabajados a SpaceClaim (Herramienta CAD de ANSYS) se usó la herramienta caras pequeñas especificando que se mostraran las caras cuyo ancho fuera menor a 4mm. Se encontró que en el espejo lateral había bastantes caras pequeñas, especialmente en los redondeos. Fue necesario volver a usar SOLIDWORKS para corregir esto, recortando los redondeos. En la figura 17 se muestra la corrección realizada.

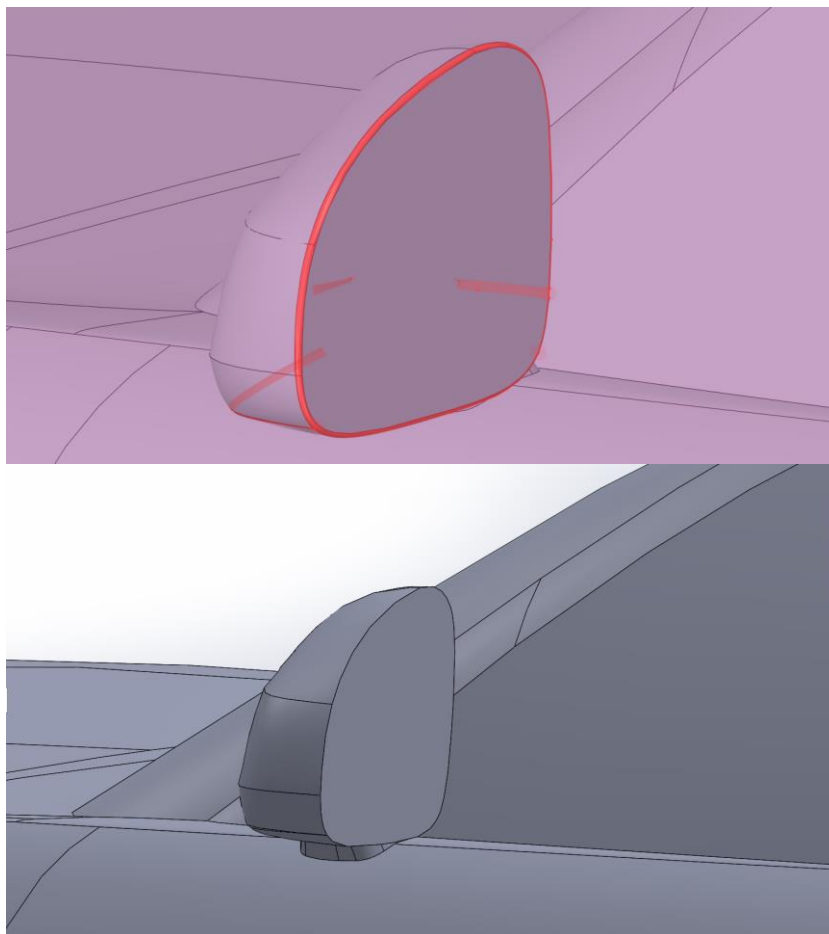


Figura 17: Espejo con las caras pequeñas subrayadas y posteriormente corregidas.

### 9.1.2 RECINTO Y CUERPO DE INFLUENCIA

Se usó la operación recinto para crear una caja que envolvía los modelos y restaba su volumen. El recinto es el espacio en el que se simula el movimiento del aire. A continuación, en figura 18 se muestran sus dimensiones.

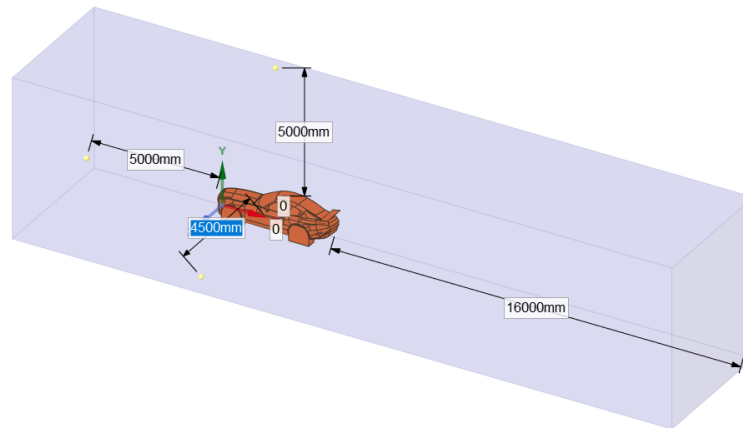


Figura 18: Dimensiones del recinto

Se creó también un sólido en forma de caja dentro del recinto, con la intención de usarlo como cuerpo de influencia en el mallado. Sus dimensiones son 1600mm de alto, 1100mm de ancho y 20800mm de profundidad. El recinto y este sólido interior se muestran en la figura 19.

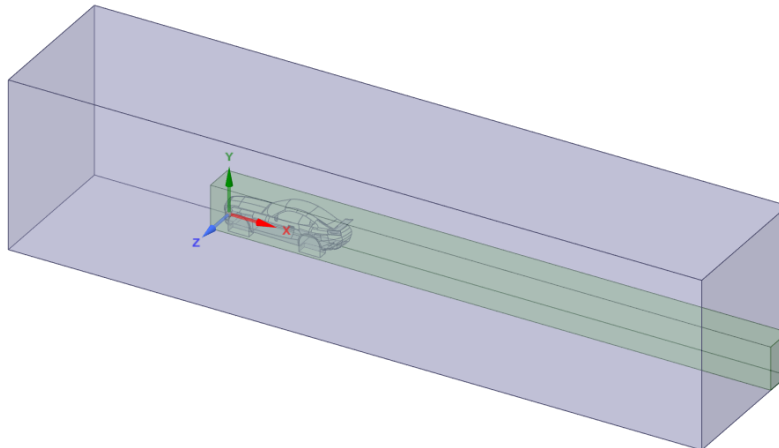


Figura 19: Cuerpo de influencia.

### 9.1.3 NOMBRAMIENTO DE LAS CARAS

Para mallar las diferentes zonas y para poner las condiciones requeridas del setup, se nombraron las superficies de la siguiente manera. La cara frontal del recinto se llamó "Inlet", La posterior "Outlet", la lateral izquierda y la superior "Sky", la lateral derecha "Symmetry", la inferior "Ground", todas las caras del sólido en forma de caja "Boi", todas las superficies del vehículo y el soporte del ala "Car" y el ala con su deriva lateral "Wing". El conjunto "Car" se muestra en la figura 20.

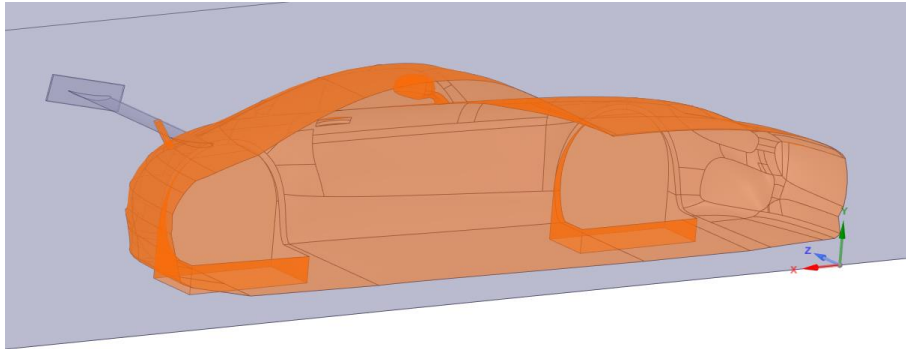


Figura 20: Conjunto de superficies Car.

## 9.2 MALLADO DE LAS GEOMETRÍAS

### 9.2.1 ESPECIFICACIONES DEL MALLADO

Con el sólido "Boi" se creó un cuerpo de influencia con tamaño objetivo de 64mm y tasa de crecimiento de 1.2. Al conjunto de superficies "Car" se le dio un mallado por curvatura con tamaño mínimo de 2mm, máximo de 32mm y tasa de crecimiento de 1.2. Al conjunto de superficies "Wing" se le dio un mallado por curvatura con tamaño mínimo de 1mm, máximo de 8mm y tasa de crecimiento de 1.2; se optó por este tamaño de malla más pequeño que el del auto debido a que es un área con curvaturas bastante pronunciadas y porque es el área que mayor interés presenta.

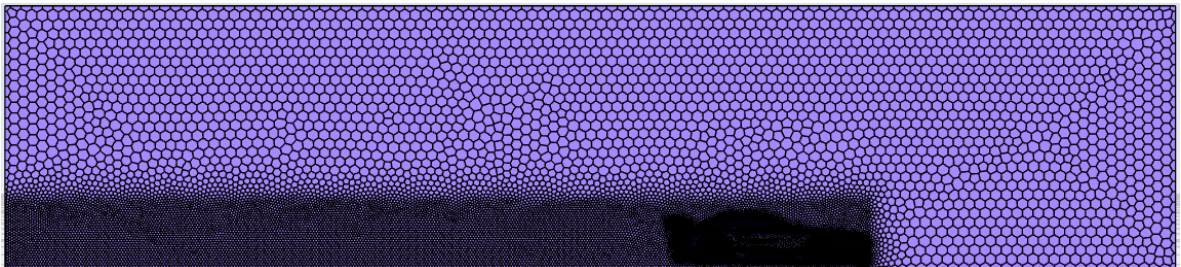


Figura 21: Vista lateral del mallado.

La figura 21 muestra las diferencias en los tamaños de malla. La superficie de la malla se creó con curvatura y proximidad, con tamaño mínimo de 0.5mm y máximo de 256mm. Se usó una transición suave de tres capas con un radio de transición de

0.272 y tasa de crecimiento de 1.2. La malla se llenó con hexágonos 3d (Poli-hexacore) con una longitud máxima de celda de 256mm. La figura 22 muestra un acercamiento a la fina malla que rodea al modelo del vehículo.

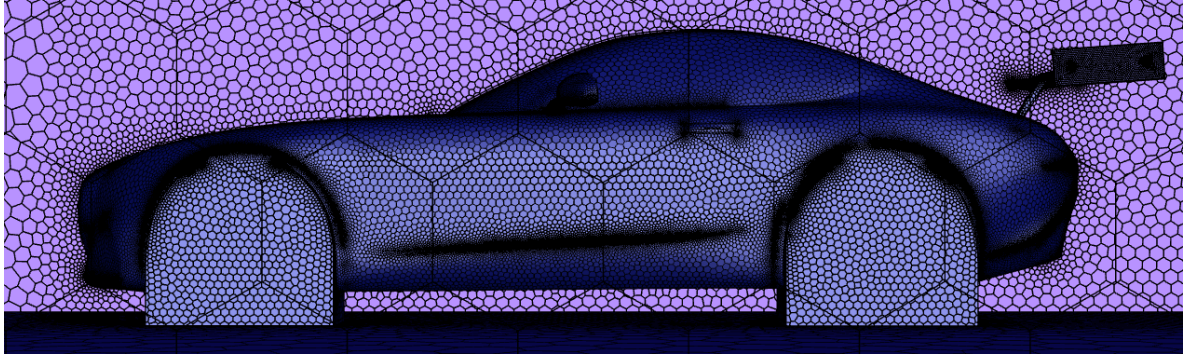


Figura 22: Acercamiento al mallado de las superficies del auto.

Al evaluar la calidad ortogonal de los mallados se verificó que ninguna celda tenía una calidad inferior a 0.2.

### 9.2.2 INDEPENDENCIA DE LA MALLA

Para garantizar que la malla no influyera significativamente en los resultados, se probaron los tres tamaños de malla mostrados a continuación en “Car”, los resultados de estas pruebas se muestran en la tabla 2. De estos se pudo concluir que con un mínimo local de 2mm sería suficiente debido a que solo se presentan cambios pequeños en el tercer decimal al reducir más el tamaño de malla.

Tabla 2: Cambios en los resultados al variar el tamaño de elemento mínimo.

Tamaño mínimo [mm]	Ca	
	Cd	Cl
2	0,31570023	0,29959893
1	0,3180528	0,29565471
0,5	0,31629407	0,29631878

### 9.3 ALISTAMIENTO DE LAS SIMULACIONES

Para preparar las simulaciones se asignó a “Inlet” (La cara destinada a la entrada de aire) una velocidad de 27.78m/s, se seleccionó el modelo de turbulencia k-e estándar y se configuró como 10<sup>-4</sup> el tamaño de residuales necesario para dejar de iterar. Se crearon reportes del coeficiente de drag, del coeficiente de lift y del imbalance de masa.

En los valores de referencia se asignó la misma velocidad que la de entrada: 27.78m/s. Fue necesario también medir las áreas frontales de todos los modelos

para colocarlas en los valores de referencia, esto se hizo midiendo el área que se proyectaba en el plano frontal en SOLIDWORKS con la herramienta medir. El área frontal del modelo sin ala es de 1.07m<sup>2</sup>, esto se muestra en la figura 23; a cada modelo se le midió el excedente de área que generaba su perfil y se computaron las áreas totales de los modelos en la tabla 3.

Tabla 3: Áreas de los modelos.

Ángulo [°]	Áreas [m <sup>2</sup> ]		
	2412	4412	6409
4	1,0818	1,0828	1,0829
8	1,0871	1,0877	1,0881
12	1,0932	1,093	1,0935
16	1,1001	1,0987	1,0995

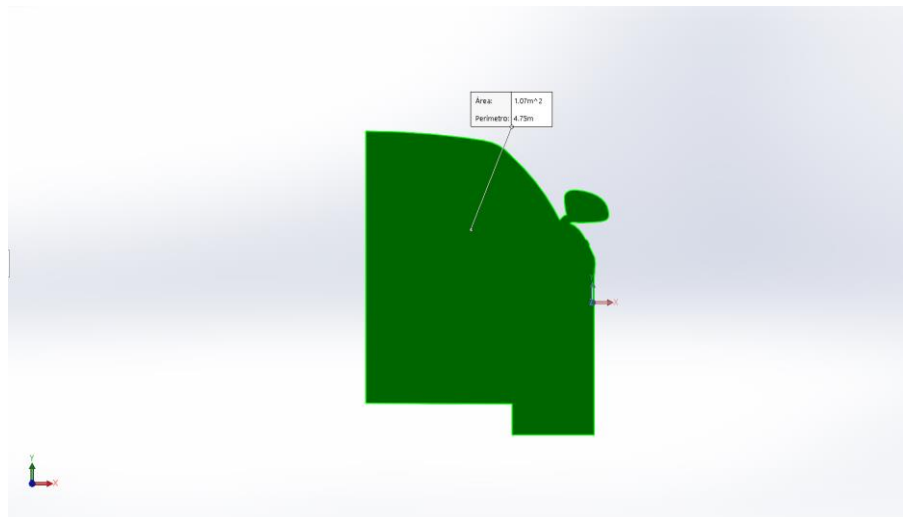


Figura 23: Medición del área frontal del modelo sin ala.

En los primeros intentos de correr las simulaciones se encontró que no convergían y presentaban residuales demasiado altos. Para corregir estas oscilaciones se probó reducir el time-step, el time-step que resultó ser adecuado para la convergencia fue de 1\*10<sup>-5</sup>s. Al hacer esto los valores dejaron de oscilar y se consiguió un bajón muy considerable en los residuales. En cada simulación se corrieron 200 iteraciones con el time-step automático y otras 200 con el time-step ajustado tal como se muestra en figura 24.

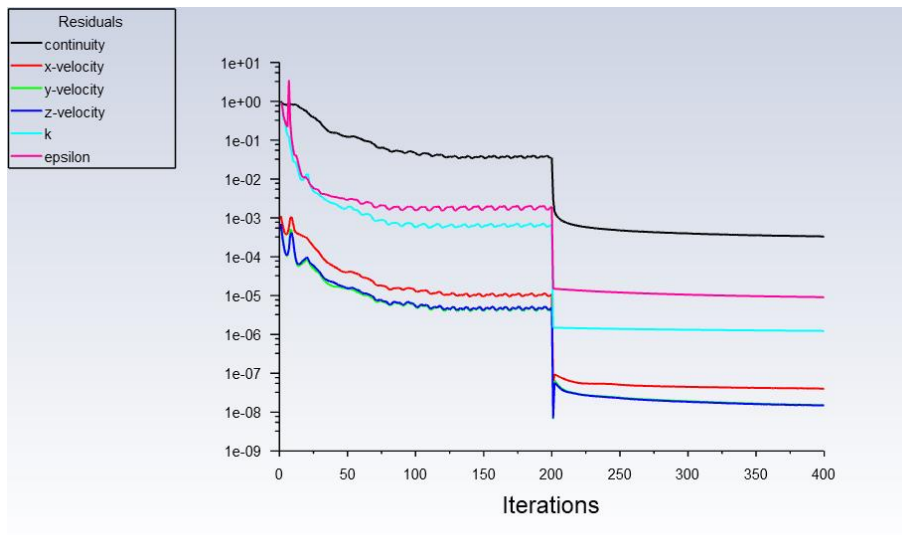


Figura 24: Simulación del modelo con NACA 4412: Residuales.

La continuidad fue el residual más alto en las simulaciones, variando entre  $10^{-3}$  y  $10^{-4}$  en los diferentes modelos. Los demás residuales presentaron valores óptimos estado alrededor de  $10^{-5}$  y en muchas casos incluso mucho más bajos.

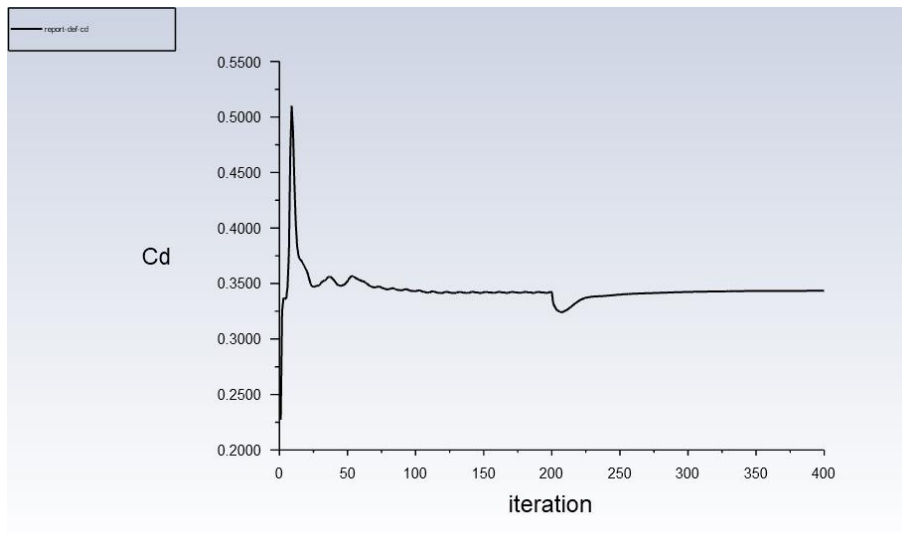


Figura 25: Simulación del modelo con NACA 4412: Cd.

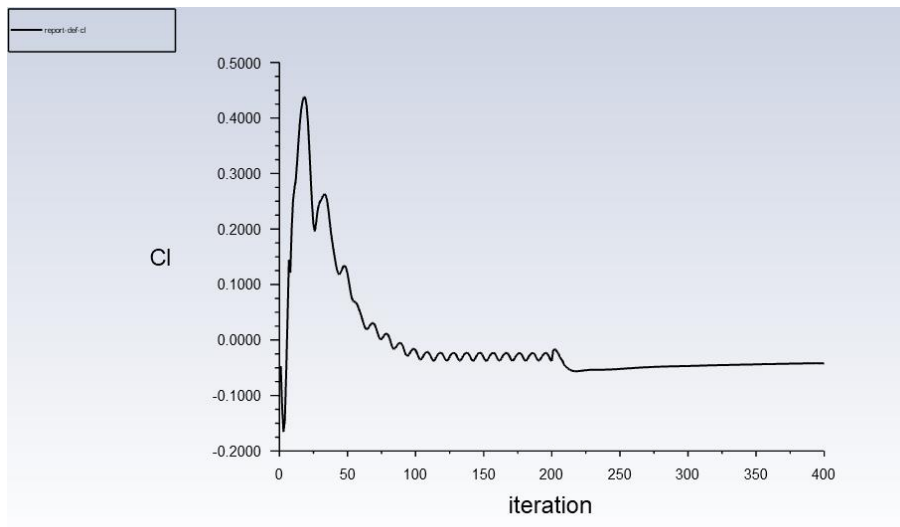


Figura 26: Simulación del modelo con NACA 4412: Cl.

Cómo se puede apreciar en las figuras 24, 25 y 26 no tiene mucho sentido seguir calculando después de las 400 iteraciones ya que no se presentan cambios significativos en los resultados.

El imbalance de masa de las simulaciones realizadas fue siempre inferior al 1%, lo que se considera bastante aceptable.

#### 9.4 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

De las simulaciones se obtuvieron los coeficientes aerodinámicos de todos los modelos. Para el modelo sin ala se obtuvo un Cl de 0,29631878 y un Cd de 0,31629407. A continuación, se presentan en tablas y gráficos los resultados obtenidos en los modelos con perfiles alares.

Tabla 4: Coeficientes de lift de todos los modelos con perfil alar.

Ángulo [°]	Cl		
	2412	4412	6409
4	-0,006885	-0,049648	-0,081115
8	-0,0094581	-0,053849	-0,085049
12	-0,037762	-0,069609	-0,093842
16	-0,066961	-0,093897	-0,102548

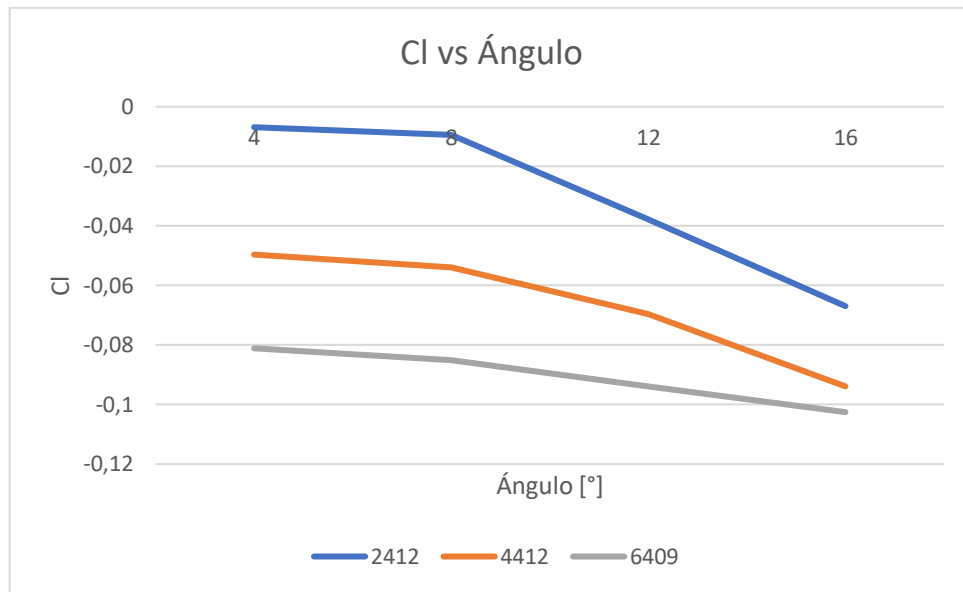


Figura 27: Gráfica del coeficiente de lift de los modelos con perfil alar en sus diferentes ángulos.

Tal como se esperaba, con los perfiles se obtuvo una gran reducción del lift pasando a ser negativo y un aumento pequeño en el drag. En las figuras 27 y 28 se observa que el perfil NACA 6409 fue el que dio más lift, pero también fue el que dio más drag. Los cambios en los valores de los coeficientes entre ángulos y perfiles son pequeños, esto es normal debido a que pequeños cambios en las formas evaluados en las mismas condiciones no deberían presentar grandes cambios.

Tabla 5: Coeficientes de drag de todos los modelos con perfil alar.

Ángulo [°]	Cd		
	2412	4412	6409
4	0,34302	0,34365	0,344
8	0,36088	0,3565	0,36737
12	0,38072	0,37938	0,3915
16	0,4103	0,40088	0,42134

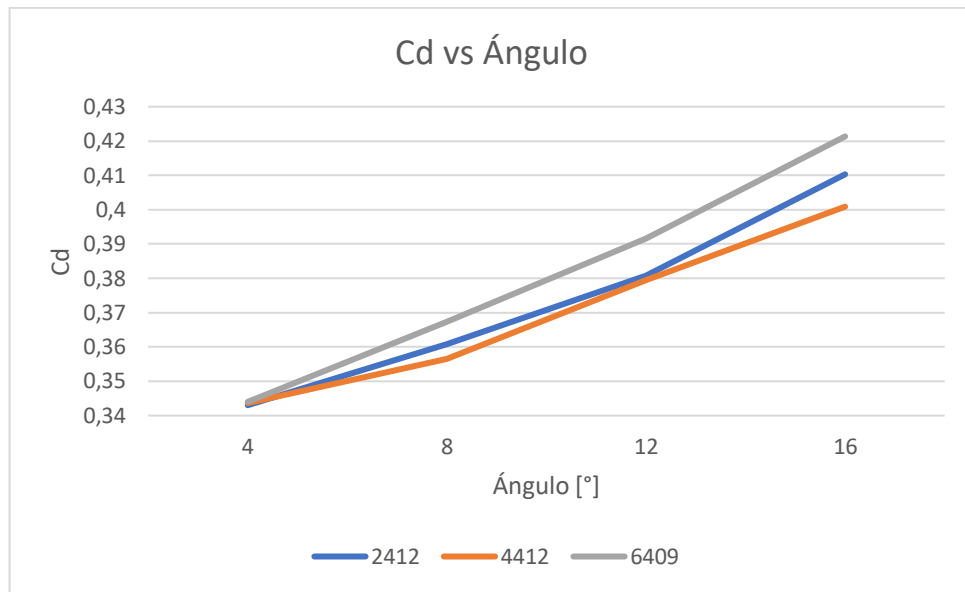


Figura 28: Gráfica del coeficiente de drag de los modelos con perfil alar en sus diferentes ángulos.

## 10. CÁLCULO DE LAS VELOCIDADES MÁXIMAS Y ANÁLISIS

Para conocer las velocidades máximas se resolvieron las ecuaciones 15, 20 y 23 con el software ESS, esto se muestra en la figura 29. Los parámetros que siempre variaban al resolver estas ecuaciones fueron los coeficientes de lift y de drag y el área frontal (mostrados en las tablas 3, 4 y 5).

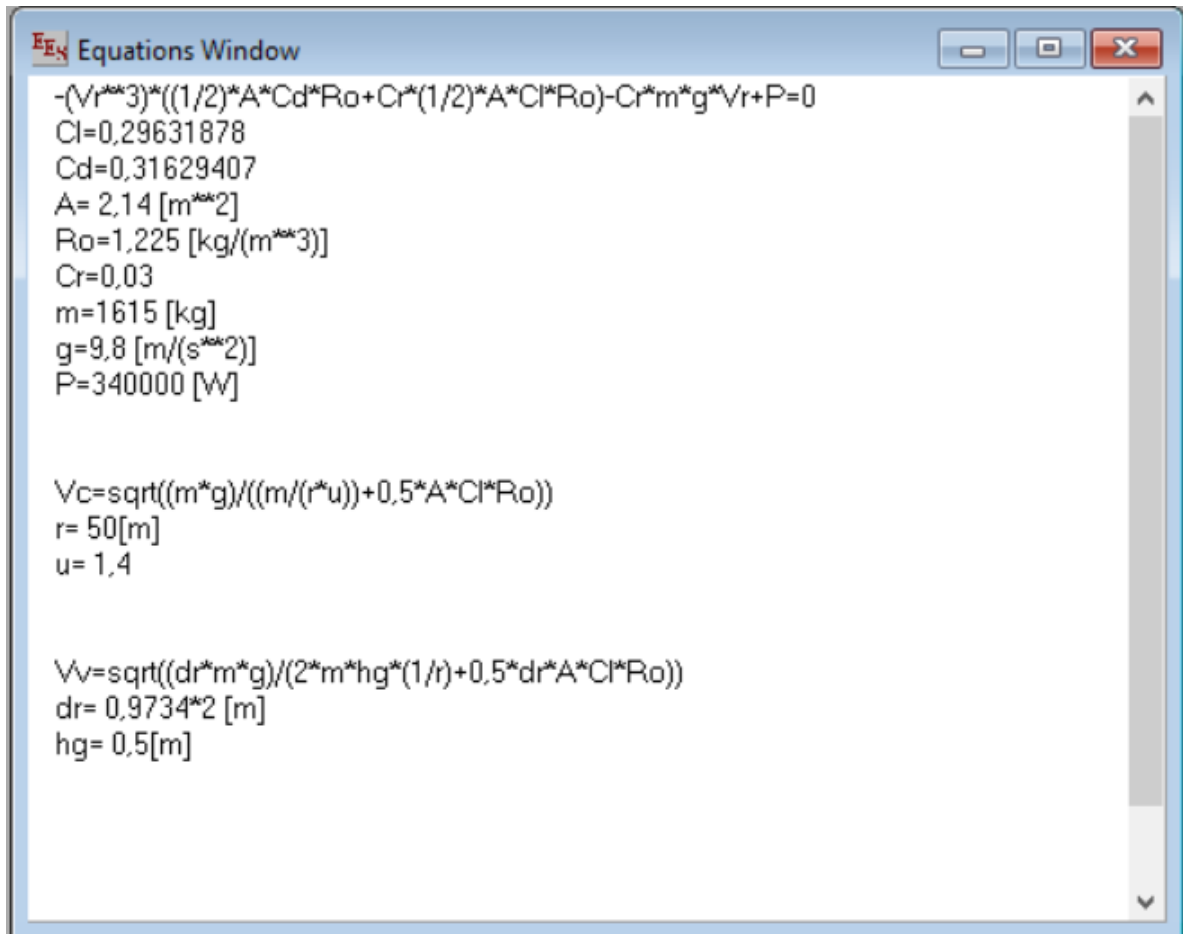


Figura 29: Solucionador de ecuaciones con los parámetros empleados.

Los valores de la gravedad  $g$  y la densidad del aire  $R_o$  se tomaron los valores estándar. La masa  $m$  y la potencia  $P$  son datos del fabricante del vehículo, a la potencia se le multiplicó por 0.95 para tener en cuenta las pérdidas de la transmisión. El coeficiente de rodadura  $C_r$  se tomó como 0.03 y el de rozamiento  $u$  como 1.4, valores normales para un neumático de competición. La distancia entre las ruedas se midió en el modelo y la altura del centro de gravedad  $h_g$  se asumió en 0.5m (un valor algo conservador debido a que no se conocía).

El radio de la curva  $r$  se tomó en este caso como 50m, sin embargo, esto se hizo para mostrar un caso práctico, este valor puede ser modificado para realizar el mismo cálculo en diferentes curvas.

En la tabla 6 se muestran las velocidades calculadas por los modelos y la eficiencia aerodinámica de estos, que fue calculada con una simple división haciendo uso de la ecuación 6.  $f$  es la eficiencia aerodinámica,  $V_r$  la velocidad en recta,  $V_c$  la velocidad en curva y  $V_v$  la velocidad por vuelco. Las gráficas 30 y 31 presentan los resultados de la tabla 6.

Tabla 6: Velocidades máximas de todos los modelos con perfil alar.

Modelo	f	Vr [m/s]	r= 50 [m]	
			Vc [m/s]	Vv [m/s]
Sin perfil	0,93685	88,74	25,97	30,53
NACA 2412-4°	-0,0201	86,96	26,2	30,89
NACA 2412-8°	-0,0262	85,43	26,2	30,9
NACA 2412-12°	-0,0992	83,9	26,22	30,93
NACA 2412-16°	-0,1632	81,8	26,24	30,97
NACA 4412-4°	-0,1445	86,98	26,23	30,95
NACA 4412-8°	-0,151	85,85	26,23	30,95
NACA 4412-12°	-0,1835	84,06	26,24	30,97
NACA 4412-16°	-0,2342	82,5	26,26	31
NACA 6409-4°	-0,2358	87,03	26,25	30,99
NACA 6409-8°	-0,2315	85,09	26,26	30,99
NACA 6409-12°	-0,2397	83,26	26,26	31
NACA 6409-16°	-0,2434	81,19	26,27	31,02

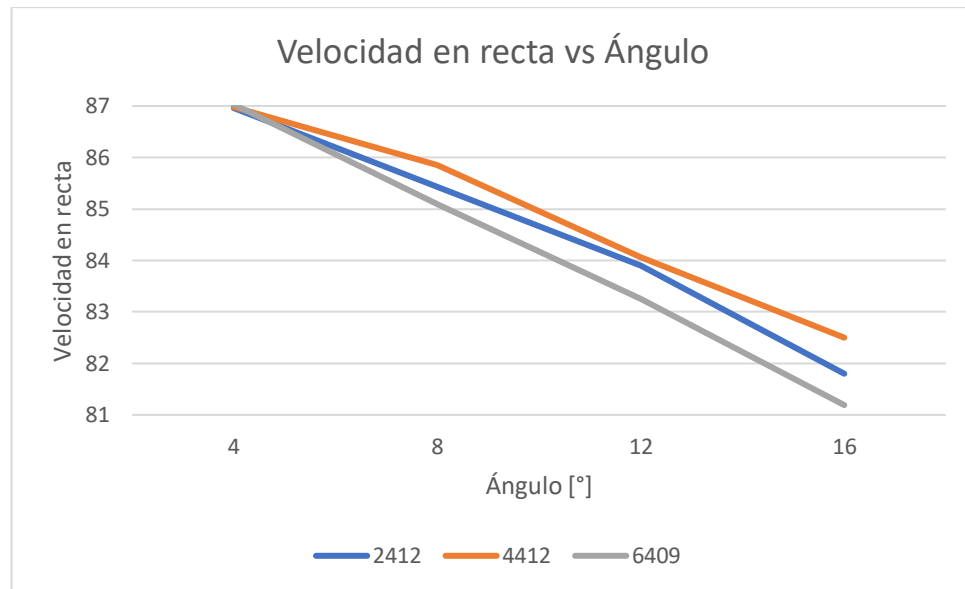


Figura 30: Gráfica de la velocidad en recta de los modelos con perfil alar en sus diferentes ángulos.

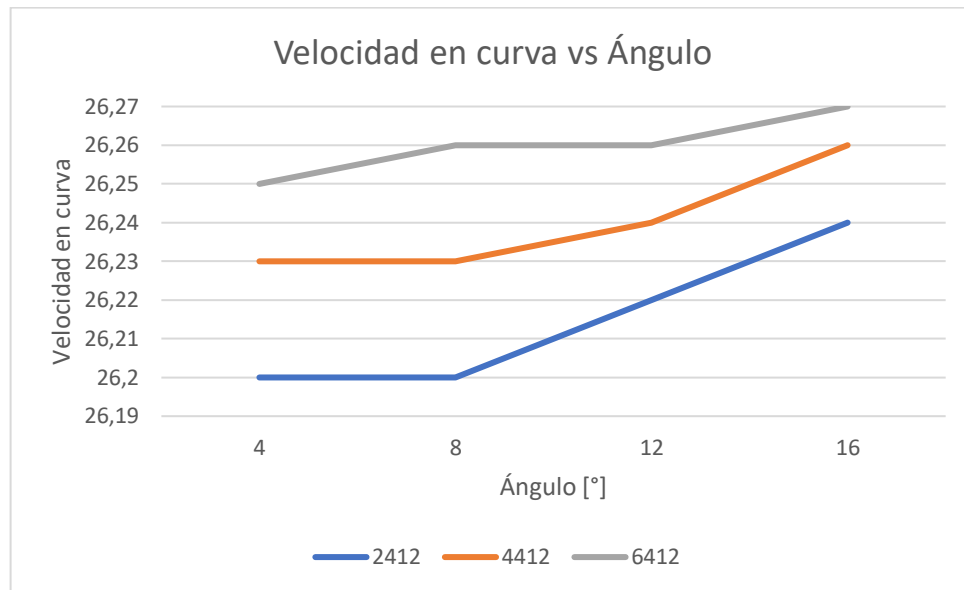


Figura 31: Gráfica de la velocidad en curva de los modelos con perfil alar en sus diferentes ángulos.

Tal como se esperaba, se observó el aumento de la velocidad en curva trae también una disminución de la velocidad en recta debido a la resistencia al movimiento que agrega el perfil.

De las gráficas se puede inferir que, para el ejemplo propuesto con radio de curvatura de 50, el perfil NACA 6412 es el que da más velocidad para curva en sus diferentes ángulos, pero no es el más eficiente, el que tiene la mejor relación de eficiencia es el perfil NACA 4412. Es posible obtener estos valores para otros radios de curvatura haciendo una sencilla variación en las ecuaciones mostradas en la figura 28.

La velocidad máxima real del vehículo es de  $84.4\text{m/s}^{28}$ , la velocidad obtenida con los cálculos para el modelo sin perfil es de  $88.74\text{m/s}$ . Esto resulta en un porcentaje de error del 4.85%, lo que se considera aceptable teniendo en cuenta la cantidad de simplificaciones realizadas.

No se pudo comparar el efecto de las alas con valores de la literatura debido a que el auto impide tener claro cuál es el ángulo en que el aire entra en contacto con el perfil; por la turbulencia del viento y porque además del aire que entra en contacto

<sup>28</sup> mbusa.com. The new Mercedes-AMG GT: Driving performance for sports car enthusiasts. Mercedes-Benz USA. 9 de septiembre del 2014. [Consultado: 25 de noviembre de 2020]. Disponible en: [https://www.mbusa.com/vcm/MB/DigitalAssets/AboutUs/PressReleases/US\\_%20Release\\_%202016\\_%20Mercedes\\_AMG\\_%20GT.pdf](https://www.mbusa.com/vcm/MB/DigitalAssets/AboutUs/PressReleases/US_%20Release_%202016_%20Mercedes_AMG_%20GT.pdf)

con el perfil en ángulo, también en la parte lateral hay aire que entra en contacto con el perfil sin ángulo y no se encuentran valores para comparar estos resultados.

## 11. CONCLUSIONES

- Los cambios en los coeficientes aerodinámicos de los diferentes modelos fueron, aunque pequeños bastante distinguibles. Estos cambios pequeños eran esperados debido a las pequeñas variaciones angulares entre los perfiles. El rango pequeño se escogió porque, como se menciona en el estado del arte, después de los  $20^\circ$  la eficiencia aerodinámica cae abismalmente.
- El modelo con más ganancia de lift fue el que tenía el perfil NACA 6409 en sus diferentes ángulos, sin embargo, también tenía el mayor drag. El modelo que mostraba una mejor relación entre lift y drag es el que tiene modelo NACA 4412. Esto también se refleja en los datos sobre las velocidades máximas.
- En los cálculos realizados se supuso un radio de curvatura de 50m, sin embargo, el sistema de ecuaciones empleado puede ser usado en diferentes radios de curvatura y con estos valores calcular tiempos en diferentes circuitos. Esto es ideal para conocer la eficiencia aerodinámica en diferentes lugares.
- Inicialmente las simulaciones realizadas no convergían, se identificó como principal causa de esto un time step bastante alto por lo que reducirlo fue la solución clave del problema. Al reducir el time step las oscilaciones de las variables de interés se detuvieron y los residuales cayeron a valores aceptables. El imbalance de masa en las simulaciones si situó por debajo del 1%.
- El porcentaje de error obtenido al comparar la velocidad real con la teórica fue satisfactorio. Se cree que partiendo de un modelo 3d sólido en vez de uno hecho a base de superficies se hubiera podido conservar la forma del tren de aterrizaje con más fidelidad al simplificar y así se hubiera obtenido un error aún menor, esto sin embargo hubiese requerido más potencia computacional.
- Durante el desarrollo de este trabajo se emplearon conceptos de mecánica clásica, mecánica de fluidos, modelado 3d y mecánica de fluidos. Esto permitió afianzar el conocimiento obtenido durante el curso del pregrado y obtener algunos conocimientos nuevos.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

MCBEATH, Simon. Aerodinámica del automóvil de competición. Barcelona: CEAC, 2005.

CARBONELL ROMERO, Pablo. Análisis de diferentes configuraciones aerodinámicas de un Audi R8 mediante técnicas CFD. Valencia, 2015, 81p. Trabajo fin de grado en ingeniería en tecnologías industriales. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela técnica superior ingenieros industriales Valencia.

KUREC, Krzysztof; REMER, Michal y Janusz Piechna. The influence of different aerodynamic setups on enhancing a sports car's braking. En: International Journal of Mechanical Sciences. Vol. 164, No 105140 (Dic 2019).

KAR, Anurag. Simulation of Flow Around a Car Wing in ANSYS FLUENT CFD. Praga. 2018. 4p.

HETAWAL, Sneha; GOPHANE, Mandar; B. K., Ajay. y MUKKAMALA, Yagnavalya. Aerodynamic Study of Formula SAE Car. En: 12th GLOBAL CONGRESS ON MANUFACTURING AND MANAGEMENT (12 : 2014 : Vellore). Procedia Engineering 97. Vellore : Procedia Engineering, 2014. p. 1198 - 1207.

DEY, Shamudra & SAHA, Ranabir. CFD Study on Aerodynamic Effects of NACA 2412 Airfoil as Rear Wing on a Sports Car. En: International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering 2018 (5 : 2018 : Khulana). ICMIEE18-125. Khulana : Department of Mechanical Engineering, Shahjalal University of Science & Technology and Department of Mechanical Engineering, Bangladesh University of Engineering & Technology, 2018. No 125.

BAUSKAR, Manoj; DHANDE, Dinesh; VADGERI, Shivraj y PARTIL, Sunil. Study of Aerodynamic Drag of Sports Utility Vehicle by Experimental and Numerical Method. En: Materials Today: Proceedings. Vol. 16 (2019), p. 750 – 757.

SINGH, Aditya; JAIN, Arpit y SHARMA, Ashish. Designing a 3-D Model of Bodywork of a Vehicle with Low Coefficient of Drag and High Downforce. En: Materials Today: Proceedings. Vol. 28 (2020), p. 2197 – 2204.

KUREC, Krzysztof; REMER, Michal; MAYER, Tobiasz; TUDRUJ, Sylwester y PIECHNA, Janusz. Flow Control for a car-mounted rear wing. En: International Journal of Mechanical Sciences. Vol. 152 (Mar 2019), p. 384 – 399.

KATZ, Joseph. Aerodynamics of Race Cars. En: Annual Review of Fluid Mechanics. Vol. 37 (2006); p. 27 – 63.

CAMPOS, Rubén. Diseño de un alerón de un vehículo de competición: comparación de la simulación aerodinámica numérica y la simulación aerodinámica experimental. Barcelona, 2008, 61p. Trabajo de investigación (grado en Ingeniería Técnica Aeronáutica, especialidad Aeronavegación). Universidad Politécnica de Cataluña.

BERTIN, Jhon. Aerodynamics for Engineers. 5ta edición. Pearson Education International, 2009. p. 130.

mbusa.com. The new Mercedes-AMG GT: Driving performance for sports car enthusiasts. Mercedes-Benz USA. 9 de septiembre del 2014. [Consultado: 25 de noviembre de 2020]. Disponible en: [https://www.mbusa.com/vcm/MB/DigitalAssets/AboutUs/PressReleases/US\\_%20Release\\_%202016\\_%20Mercedes\\_AMG\\_%20GT.pdf](https://www.mbusa.com/vcm/MB/DigitalAssets/AboutUs/PressReleases/US_%20Release_%202016_%20Mercedes_AMG_%20GT.pdf)