



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES
AERODINÁMICAS DE UN TESLA MODEL S MEDIANTE
TÉCNICAS CFD

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

AUTOR/A: Sanchis Ortolá, Hugo

Tutor/a: Manzano Juarez, Juan

Cotutor/a: Iglesias Rey, Pedro Luis

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES AERODINÁMICAS DE UN TESLA MODEL S MEDIANTE TÉCNICAS CFD

AUTOR: HUGO SANCHIS ORTOLÁ

TUTOR: JUAN MANZANO JUÁREZ

Curso Académico: 2021-22

*A mis padres y amigos,
por su apoyo y confianza en mi
y por permitirme disfrutar tanto
de esta etapa de aprendizaje que termina aquí;*

*y sobre todo, a mi hermano Victorio
por su gran insistencia, actitud y dedicación,
por haberme inculcado esa perseverancia y pasión por el trabajo bien hecho
y por estar atento y disponible siempre que le necesito.*

Resumen

Hoy en día, es bien sabida la gran importancia que posee la aerodinámica de un vehículo en aspectos como el rendimiento, consumo del motor, o la aceleración del mismo. Desde un vehículo familiar de uso diario, hasta el deportivo de carreras más veloz, todos pasan por un meticuloso proceso de análisis aerodinámico con el objetivo de incorporar diseños que minimicen el efecto del rozamiento del aire durante su movimiento, para así maximizar la velocidad punta y estabilidad, a la par que minimizar el gasto de combustible.

A raíz de ello, el presente Trabajo Final de Grado se centra en el estudio y análisis de la influencia que tiene la implantación de un alerón trasero en la aerodinámica de un automóvil Tesla Model S, con el objetivo de obtener la inclinación óptima de funcionamiento de dicho elemento.

Para ello, se requiere de un archivo CAD del vehículo y un programa de elementos finitos con el que, mediante sucesivas simulaciones, se calculen las fuerzas que actúan sobre el carenado del vehículo. Partiendo de un modelo CAD del vehículo, se realizan múltiples modificaciones y simplificaciones con el programa Solidworks[®], de tal modo que, sin perder la esencia del vehículo, se consigue un modelo que sirve como base a introducir en el entorno de elementos finitos donde se lleva a cabo el análisis: ANSYS Workbench[®].

Una vez introducida la geometría en ANSYS[®], primero se crea un cubo de aire al que se le resta el volumen del vehículo, obteniendo así la geometría final. Posteriormente, se realiza el mallado, previamente de haber realizado un estudio de la malla para ver la influencia del tamaño de esta en el resultado. Con la geometría mallada, definiendo las condiciones de contorno, se realiza la simulación en ANSYS Fluent[®], del que se obtienen las fuerzas que actúan sobre el vehículo y los coeficientes aerodinámicos.

Con todos estos datos, el presente proyecto culmina con la observación y comparación de las velocidades alcanzadas con cada configuración del alerón, gracias a un simulador de circuitos desarrollado desde cero. Este simulador incorpora todos y cada uno de los circuitos de carreras de la Formula 1, donde a partir de los coeficientes aerodinámicos obtenidos en las simulaciones, se obtiene un tiempo óptimo por vuelta para cada circuito. Estos resultados, permiten llegar a la conclusión de qué configuración aerodinámica es la óptima para cada circuito, así como las ventajas e inconvenientes generales de aumentar o disminuir el grado de inclinación del alerón trasero en el vehículo.

Palabras Clave

Modelado CAD, 3D, SolidWorks[®], simulación aerodinámica, ANSYS Workbench[®], Fluent, análisis CFD, alerón, inclinación, mallado, análisis por elementos finitos, simulación aerodinámica, Tesla Model S, vehículo, rozamiento, sustentación, Análisis de Independencia de Malla.

Resum

Hui en dia, és ben sabuda la gran importància que posseïx l'aerodinàmica d'un vehicle en aspectes com el rendiment, consum del motor, o l'acceleració del mateix. Des d'un vehicle familiar d'ús diari, fins a l'esportiu de carreres més ràpid, tots passen per un meticulós procés d'anàlisi aerodinàmic amb l'objectiu d'incorporar dissenys que minimitzen l'efecte del fregament de l'aire durant el seu moviment, per a així maximitzar la velocitat punta i estabilitat, al mateix temps que minimitzar el consum de combustible.

Derivat d'això, el present Treball Final de Grau se centra en l'estudi i anàlisi de la influència que té la implantació d'un aleró posterior en l'aerodinàmica d'un automòbil Tesla Model S, amb l'objectiu d'obtindre la inclinació òptima de funcionament del dit element

Per a això, es requereix d'un arxiu CAD del vehicle i un programa d'elements finits amb què, per mitjà de successives simulacions, es calculen les forces que actuen sobre el carenat del vehicle. Partint d'un model CAD del vehicle, es realitzen múltiples modificacions i simplificacions amb el programa Solidworks®, de tal manera que, sense perdre l'essència del vehicle, s'aconsegueix un model que servix com a base a introduir en l'entorn d'elements finits on es du a terme l'anàlisi: ANSYS Workbench®.

Una vegada introduïda la geometria en ANSYS®, primer es crega un espai d'aire a què se li resta el volum del vehicle, obtenint així la geometria final. Posteriorment, es realitza el mallat, prèviament d'haver realitzat un estudi d'independència de la malla per a veure la influència de la grandària d'esta en el resultat. Amb la geometria mallada, definint les condicions de contorn, es realitza la simulació en ANSYS Fluent®, del que s'obtenen les forces que actuen sobre el vehicle i els coeficients aerodinàmics

Amb totes estes dades, el present projecte culmina amb l'observació i comparació de les velocitats aconseguides amb cada configuració de l'aleró, gràcies a un simulador de circuits desenrotllat de zero. Este simulador incorpora tots i cada un dels circuits de carreres de la Formula 1, on a partir dels coeficients aerodinàmics obtinguts en les simulacions, s'obté un temps òptim per volta per a cada circuit. Estos resultats, permeten arribar a la conclusió de quina configuració aerodinàmica és l'òptima per a cada circuit, així com els avantatges i inconvenients generals d'augmentar o disminuir el grau d'inclinació de l'aleró posterior en el vehicle.

Paraules Clau

Modelatge CAD, 3D, Solidworks®, simulació aerodinàmica, ANSYS Workbench®, Fluent, anàlisi CFD, aleró, inclinació, malla, anàlisi per elements finits, simulació aerodinàmica, Tesla Model S, vehicle, fregament, sustentació, Anàlisi d'Independència de Malla.

Abstract

Nowadays, it is well known how important the aerodynamics of a vehicle are in aspects such as performance, engine consumption and acceleration. From an ordinary family car to the fastest racing sports car, they all go through a meticulous process of aerodynamic analysis with the aim of incorporating designs that minimise the effect of air friction during movement, in order to maximise top speed and stability, while minimising fuel consumption.

For this reason, this Final Degree Project focuses on the study and analysis of the influence that the implementation of a rear spoiler has on the aerodynamics of a Tesla Model S car, with the objective of obtaining the optimum operating angle of this element.

This requires a CAD file of the vehicle and a finite element programme in order to calculate the forces acting on the vehicle's fairing by means of successive simulations. Starting from a CAD model of the vehicle, multiple modifications and simplifications are made with the Solidworks® 3D modelling software, in such a way that, without losing the essence of the vehicle, a basic model is obtained which serves as a basis to be introduced into the finite element environment where the analysis is carried out: ANSYS Workbench®.

Once the geometry has been introduced into ANSYS®, first an air cube is created from which the volume of the vehicle is subtracted, thus obtaining the final geometry. Subsequently, the meshing is carried out, having previously carried out a study of the mesh to see the influence of its size on the result. With the meshed geometry, defining the boundary conditions, the simulation is carried out in ANSYS Fluent®, from which the forces acting on the vehicle and the aerodynamic coefficients are obtained.

With all this data, this project culminates with the observation and comparison of the speeds achieved with each wing configuration, thanks to a circuit simulator specially developed from scratch. This simulator incorporates each and every one of the Formula 1 race circuits, where based on the aerodynamic coefficients obtained in the simulations, an optimum lap time is obtained for each circuit. These results allow the conclusion of which aerodynamic configuration is optimal for each circuit, as well as the general advantages and disadvantages of increasing or decreasing the degree of inclination of the rear wing on the vehicle.

Key Words

CAD modelling, 3D, SolidWorks®, aerodynamic simulation, ANSYS Workbench®, Fluent, CFD analysis, spoiler, inclination, meshing, finite element analysis, aerodynamic simulation, Tesla Model S, vehicle, drag, lift, Mesh Independence Analysis.

Índice General del Documento

MEMORIA DESCRIPTIVA	10
ANEXOS	83
PRESUPUESTO.....	118
PLIEGO DE CONDICIONES.....	129
PLANOS.....	138

MEMORIA DESCRIPTIVA

Índice de la Memoria Descriptiva

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	20
1.1. ANTECEDENTES.....	20
1.1.1. La importancia de la Aerodinámica	20
1.1.2. Las componentes de la Fuerza Aerodinámica.....	22
1.1.2.1. Fuerza de Arrastre.....	22
1.1.2.2. Fuerza de Sustentación	22
1.1.3. El Alerón	23
1.2. HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS AERODINÁMICO	25
1.2.1. Túneles de viento.....	25
1.2.2. Técnicas CFD	27
1.2.3. Pruebas aerodinámicas en pista.....	28
1.2.3.1. Tubo de Pitot.....	28
1.2.3.2. Parrillas de Sensores y Sondas Kiel.....	28
1.2.3.3. Sensores de Succión	29
1.2.3.4. Parafina.....	29
1.3. OBJETO DE PROYECTO Y OBJETIVOS	30
1.4. METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS	31
1.4.1. Metodología de Trabajo	31
1.4.2. Proceso Iterativo de Diseño	32
CAPÍTULO 2. MODELO DINÁMICO DE ESTUDIO	33
2.1. FUERZAS INVOLUCRADAS.....	33
2.1.1. Fuerzas de Arrastre y Sustentación	34
2.1.1.1. Fuerza de Arrastre.....	34
2.1.1.2. Fuerza de Sustentación	36
2.1.2. Otras fuerzas relevantes	36
2.1.2.1. Fuerza gravitatoria	36
2.1.2.2. Fuerza normal	36
2.1.2.3. Fuerza del motor	37

2.1.2.4. Fuerza de deslizamiento.....	37
2.1.2.5. Fuerza de rozamiento.....	37
2.1.2.6. Fuerza centrípeta.....	37
2.2. ECUACIONES DEL MODELO	38
2.2.1. Ecuación genérica de velocidad en recta	38
2.2.2. Ecuación genérica de velocidad en curva	39
2.2.3. Ecuación de velocidad en curva por riesgo de vuelco	39
2.2.4. Sistema de ecuaciones final.....	41
2.2.4.1. En recta.....	41
2.2.4.2. En curva.....	41
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS	42
3.1. GEOMETRÍA	43
3.1.1. Justificación del proyecto y Motivación	43
3.1.2. Simplificación de la geometría en Solidworks	43
3.1.2.1. Simplificación de la parte delantera.....	44
3.1.2.2. Simplificación de la parte trasera	45
3.1.2.3. Simplificación de los laterales.....	46
3.1.2.4. Cosido de superficies y generación del volumen del sólido... 48	
3.1.3. Diseño del alerón.....	49
3.1.4. Preprocesado de la geometría en <i>DesignModeler</i>	50
3.2. MALLADO	53
3.2.1. Introducción.....	53
3.2.2. Análisis de Independencia de Malla	53
3.2.2.1. Procedimiento.....	53
3.2.2.2. Análisis de Resultados	54
3.2.2.3. Conclusiones obtenidas	57
3.2.3. Mallado final del modelo	58
3.2.3.1. Configuración general del mallado.....	58
3.2.3.2. Configuración particular	60
3.2.3.3. Aspectos previos a la configuración de la simulación	61
3.3. CONFIGURACIÓN DE LAS SIMULACIONES.....	62
3.3.1. Preparación de las simulaciones.....	62
3.3.1.1. Modelo de Cálculo	62

3.3.1.2. Condiciones de Contorno	62
3.3.1.3. Otros Ajustes.....	64
3.3.1.4. Inicialización del modelo	64
CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	65
4.1. SIMULACIÓN SIN ALERÓN	65
4.1.1. Fuerzas resultantes.....	65
4.1.2. Distribución de velocidades y presiones	66
4.2. SIMULACIÓN PARAMÉTRICA CON ALERÓN.....	67
4.3. COMPARATIVA CON RESPECTO AL SIMULADOR.....	72
4.3.1. Resultados del simulador.....	72
4.3.2. Análisis de los resultados.....	76
4.3.3. Comparación de resultados con el modelo sin alerón.....	77
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	78
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA	80

Índice de Figuras

Figura 1.1:	Vista lateral comparativa de la aerodinámica del carenado de dos vehículos: Porsche (izquierda) vs Mercedes Benz (derecha).....	20
Figura 1.2:	Toyota TF110 durante un ensayo en un túnel de viento.....	21
Figura 1.3:	Componentes de la Fuerza Aerodinámica. Fuerzas de arrastre y Sustentación.....	22
Figura 1.4:	Chevrolet Chaparral 2F con alerón trasero móvil, montado sobre el eje. Diseñado por Jim Hall en 1967.....	23
Figura 1.5:	<i>Drag Reduction System</i> (DRS) incorporado en el alerón de un Formula 1. Vistas del DRS cerrado (izquierda) y abierto (derecha).....	24
Figura 1.6:	Automóviles superdeportivos con alerón trasero incorporado. Audi R8 (izquierda) y Porsche 911 (derecha).....	24
Figura 1.7:	Diagrama de la estructura básica de un Túnel de Viento.....	26
Figura 1.8:	Elementos empleados durante pruebas en pista. Tubos de Pitot (izquierda) y Parrillas de sondas Kiel (derecha).....	29
Figura 1.9:	Elementos empleados durante pruebas en pista. Sensores de Succión (izquierda) y Trazas de Parafina (derecha).....	29
Figura 1.10:	Diagrama de flujo del trabajo desarrollado en el presente TFG.....	32
Figura 2.1:	Esquemático de fuerzas actuantes sobre un vehículo en movimiento.....	33
Figura 2.2:	Valores típicos de coeficiente de arrastre en distintos vehículos.....	35
Figura 2.3:	Volkswagen modelo XL1 2013.....	35
Figura 3.1:	Esquema de desarrollo de las simulaciones, empleando segmentación por módulos.....	42
Figura 3.2:	Tesla Model S seleccionado para el proyecto.....	43
Figura 3.3:	Archivo CAD 3D original del Tesla Model S.....	44
Figura 3.4:	Vista frontal del Modelo CAD. Archivo inicial sin modificaciones (izquierda) y eliminación de los retrovisores (derecha).....	44
Figura 3.5:	Vista frontal del Modelo CAD. Eliminación del logo central (izquierda) y de las rejillas y luces de guiado inferiores (derecha).....	45
Figura 3.6:	Vista frontal del Modelo CAD. Eliminación de los faros frontales (izquierda) y de la luna delantera (derecha).....	45

Figura 3.7: Vista trasera del Modelo CAD. Archivo inicial sin retrovisores (izquierda) y eliminación del logo y letrero (izquierda) 45

Figura 3.8: Vista trasera del Modelo CAD. Eliminación de los faros traseros (izquierda) y de la luna trasera (derecha) 46

Figura 3.9: Vista lateral del del Modelo CAD, antes (superior) y después (inferior) de las modificaciones delanteras y traseras 46

Figura 3.10: Vista lateral del del Modelo CAD. Eliminación de las manetas de las puertas y luces intermitentes (superior), y de los marcos y ventanillas laterales (inferior)..... 47

Figura 3.11: Vista lateral del del Modelo CAD. Eliminación de los huecos para los neumáticos, y reconstrucción del bajo del vehículo..... 47

Figura 3.12: Vista isométrica comparativa del modelo CAD, antes (izquierda) y después (derecha) de las simplificaciones 48

Figura 3.13: Modelado CAD del Alerón diseñado, con 10° de inclinación..... 49

Figura 3.14: Sketches para las dos cámaras que envuelven al vehículo..... 50

Figura 3.15: Extrusiones de las cámaras que envuelven el vehículo..... 51

Figura 3.16: Volumen final obtenido durante el preprocesado de la geometría de estudio 52

Figura 3.17: Análisis de Independencia de Malla. Estabilización del valor de la Fuerza en el eje X para 40 m/s 55

Figura 3.18: Análisis de Independencia de Malla. Estabilización del valor de la Fuerza en el Eje Y para 40 m/s 55

Figura 3.19: Análisis de Independencia de Malla. Estabilización del valor de la Fuerza en el Eje X para 90 m/s 56

Figura 3.20: Análisis de Independencia de Malla. Estabilización del valor de la Fuerza en el Eje Y para 90 m/s 57

Figura 3.21: Configuración General del Mallado (1/2)..... 58

Figura 3.22: Escala de calidad del Espectro de valores posibles para el parámetro de Oblicuidad..... 59

Figura 3.23: Configuración General del Mallado (2/2)..... 59

Figura 3.24: Configuración particular del Mallado. *Body Sizing* (izquierda) y *Face Sizing* (derecha) empleados en el modelo 60

Figura 3.25: Mallado final sobre el modelo del vehículo sin alerón 60

Figura 3.26: Grafico representativo de la calidad de la malla, según el criterio de Oblicuidad -Skewness- 61

Figura 4.1: Fuerzas resultantes sobre el carenado para el caso sin alerón 65

Figura 4.2: Contorno de presiones para el caso del vehículo sin alerón. Vista lateral seccionada por el plano de simetría..... 66

Figura 4.3: Contorno de velocidades (superior) y Vectorización de velocidades (inferior) para el caso del vehículo sin alerón 66

Figura 4.4: Contorno de Presiones sobre el vehículo para un alerón con un ángulo de inclinación de 5° (superior), 30° (intermedia) y 60° (inferior)..... 67

Figura 4.5: Contorno de Velocidades del flujo de aire sobre el vehículo para un alerón con una inclinación de 5° (superior), 30° (intermedia) y 60° (inferior) ... 68

Figura 4.6: Vectorización 3D de la velocidad sobre el vehículo para un alerón con una inclinación de 5° (superior), 30° (intermedia) y 60° (inferior)..... 69

Figura 4.7: Fuerzas sobre el vehículo según el ángulo de inclinación del alerón 70

Figura 4.8: Coeficientes de arrastre y sustentación para los distintos ángulos de inclinación del alerón..... 71

Figura 4.9: Evolución de la velocidad con el ángulo de inclinación del alerón..... 75

Índice de Tablas

Tabla 3.1:	Dimensiones básicas del alerón en función del ángulo de inclinación	49
Tabla 3.2:	Dimensiones de los sketches de las cámaras dibujadas en DesignModeler.	50
Tabla 3.3:	Análisis de Independencia de malla. Fuerzas y Coeficientes de Arrastre y sustentación para distintos tamaños de elemento, obtenidos para una velocidad de movimiento de 40 m/s	54
Tabla 3.4:	Análisis de Independencia de malla. Fuerzas y Coeficientes de Arrastre y sustentación para distintos tamaños de elemento, obtenidos para una velocidad de movimiento de 90 m/s	56
Tabla 3.5:	Asignación de las Named Selections	63
Tabla 3.6:	Asignación de los coeficientes correspondientes a los controles de la Solución	64
Tabla 4.1:	Fuerzas sobre el vehículo para los distintos ángulos de inclinación del alerón	70
Tabla 4.2:	Coeficientes de arrastre y sustentación para los distintos ángulos de inclinación del alerón	71
Tabla 4.3:	Tiempos por vuelta en segundos proporcionados por el simulador (1/5) ..	72
Tabla 4.4:	Tiempos por vuelta en segundos proporcionados por el simulador (2/5) ..	73
Tabla 4.5:	Tiempos por vuelta en segundos proporcionados por el simulador (3/5) ..	73
Tabla 4.6:	Tiempos por vuelta en segundos proporcionados por el simulador (4/5) ..	74
Tabla 4.7:	Tiempos por vuelta en segundos proporcionados por el simulador. (5/5) .	74
Tabla 4.8:	Tiempos por vuelta en cada uno de los circuitos para el vehículo sin alerón VS el mejor tiempo con alerón.	77

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1.1:	Ecuación de transporte de la variable de interés	27
Ecuación 2.1:	Ecuación de la Fuerza de Arrastre ..	34
Ecuación 2.2:	Ecuación de la Fuerza de Sustentación	36
Ecuación 2.3:	Ecuación de la Fuerza gravitatoria	36
Ecuación 2.4:	Ecuación de la Fuerza del motor	37
Ecuación 2.5:	Ecuación de la Fuerza de deslizamiento o rozamiento cinetico	37
Ecuación 2.6:	Ecuación de la Fuerza de rozamiento	37
Ecuación 2.7:	Ecuación de la Fuerza centrípeta.....	37
Ecuación 2.8:	Balance de fuerzas por eje para el caso en recta.....	38
Ecuación 2.9:	Ecuación de la Fuerza Normal.....	38
Ecuación 2.10:	Desarrollo del balance de fuerzas en recta para el eje X.....	38
Ecuación 2.11:	Ecuación genérica de velocidad en Recta.....	38
Ecuación 2.12:	Balance de fuerzas por eje para el caso en curva.....	39
Ecuación 2.13:	Desarrollo del balance de fuerzas por eje para el caso en curva.....	39
Ecuación 2.14:	Ecuación genérica de velocidad en Curva	39
Ecuación 2.15:	Ecuación de momentos estabilizantes y desestabilizantes frente al riesgo de vuelco en curva.....	40
Ecuación 2.16:	Desarrollo de la ecuación de momentos estabilizantes y desestabilizantes frente al riesgo de vuelco en curva	40
Ecuación 2.17:	Ecuación de velocidad en Curva por riesgo de vuelco	40
Ecuación 2.18:	Ecuación de velocidad máxima en Recta	41
Ecuación 2.19:	Ecuación de velocidad máxima en Curva.....	41
Ecuación 3.1:	Ecuacion del Coeficiente de Arrastre	54
Ecuación 3.2:	Ecuacion del Coeficiente de Sustentación	54
Ecuación 3.3:	Ecuacion del Diámetro hidráulico.....	63

Nomenclatura

F_D	Fuerza de Arrastre, <i>Drag Force</i> [N]
V	Velocidad relativa entre el fluido y el vehículo [m/s]
A	Área de referencia [m ²]
ρ	Densidad [Kg/m ³]
C_D	Coefficiente de Resistencia, <i>Drag Coeficient</i> [adimensional]
F_L	Fuerza de Sustentación, <i>Lift Force</i> [N]
C_L	Coefficiente de Sustentación, <i>Lift Coeficient</i> [adimensional]
F_g	Fuerza gravitatoria [N]
m	Masa del vehículo [kg]
g	Aceleración de la gravedad [m/s ²]
F_N	Fuerza Normal [N]
F_M	Fuerza del Motor [N]
P	Potencia del Motor [W]
F_{des}	Fuerza de deslizamiento o de rozamiento cinético [N]
μ	Coefficiente de rozamiento [adimensional]
F_μ	Fuerza de rozamiento [N]
C_{rr}	Coefficiente de rodadura del neumático [adimensional]
F_C	Fuerza Centrípetas [N]
r	Radio de curvatura [m]
h_g	Altura del centro de gravedad del vehículo con respecto al suelo [m]
d_R	Distancia lateral entre ruedas [m]
$v_{max,R}$	Velocidad máxima del vehículo en Recta [m/s]
$v_{max,C}$	Velocidad máxima del vehículo en Curva [m/s]

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

1.1.1. La importancia de la Aerodinámica

Como es bien sabido, la aerodinámica es el área de la mecánica de fluidos que estudia las acciones que aparecen sobre un objeto, cuando existe un movimiento relativo entre este y el aire. [1]

Es un campo fundamental en el mundo del automovilismo, ya que puede ayudar a mejorar la estabilidad de un coche a altas velocidades y reducir su consumo de combustible. De igual manera, la aerodinámica de un vehículo puede facilitar la conducción, ya que según como se lleve a cabo el diseño, este puede tener una mayor adhesión a la superficie, consiguiendo un buen rendimiento y efectividad.

En la siguiente Figura 1.1 puede observarse una comparativa entre los carenados de dos vehículos. A simple vista ya puede percibirse como claramente el Porsche (vehículo izquierdo) posee un carenado con un diseño mucho más aerodinámico que el del Mercedes Benz (vehículo derecho).

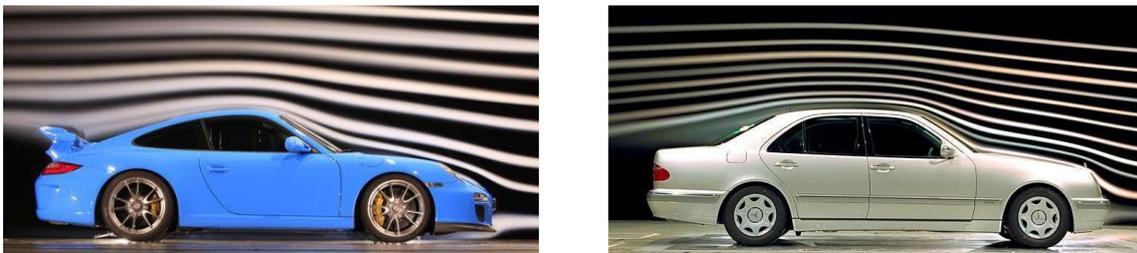


Figura 1.1: Vista lateral comparativa de la aerodinámica del carenado de dos vehículos: Porsche (izquierda) vs Mercedes Benz (derecha). (Fuente: *taringa.net*)

El objetivo principal de un buen diseño aerodinámico de un vehículo no es otro que el de reducir los efectos no deseados del viento –es decir, la resistencia aerodinámica– y conseguir que el coche se pueda desplazar a la mayor velocidad posible, de la forma más segura y con un buen rendimiento.

La teoría que existe detrás de esta resistencia aerodinámica es bien sencilla. Cuando un fluido circula por la superficie de un objeto, genera una fuerza sobre él, sin importar si este se mueve a través del fluido, o si es el fluido el que está en movimiento a través de un objeto estático.

Es debido a esta relatividad de movimiento del aire, que, durante las fases de diseño de muchos aviones o coches, estos son introducidos en los conocidos túneles de viento. Un ejemplo de ello es el del testeo del Formula 1 que se muestra en la Figura 1.2, durante uno de estos ensayos, donde puede apreciarse como el vehículo se encuentra estático en el interior de la cámara, proyectándose el aire de manera forzada contra el carenado del vehículo. [2]



Figura 1.2: Toyota TF110 durante un ensayo en un túnel de viento.
(Fuente: *F1framework blog*).

Más adelante, en la Sección 1.2.1 , puede encontrarse información más detallada en relación con estos ensayos en Túneles de viento.

1.1.2. Las componentes de la Fuerza Aerodinámica

Dicha fuerza anteriormente mencionada, generada como consecuencia de un fluido circulando por la superficie de un objeto, es lo que se conoce como Fuerza Aerodinámica, y puede subdividirse en dos componentes principales: la fuerza de Arrastre, y la fuerza de Sustentación. Ambas componentes pueden visualizarse conjuntamente en la Figura 1.3.

1.1.2.1. Fuerza de Arrastre

La Fuerza de Arrastre, -en inglés, *Drag Force*-, es la componente de la fuerza aerodinámica que aparece en la dirección paralela al movimiento del objeto a través del fluido. Es siempre de sentido contrario a la velocidad relativa entre el cuerpo y el fluido. [3]

1.1.2.2. Fuerza de Sustentación

La Fuerza de Sustentación, -en inglés, *Lift Force*-, es la componente de la fuerza aerodinámica que aparece en dirección perpendicular a la dirección de la corriente incidente. Dicha fuerza puede ser dirigida hacia arriba o hacia abajo, es decir, sustentación positiva o negativa¹. [4]

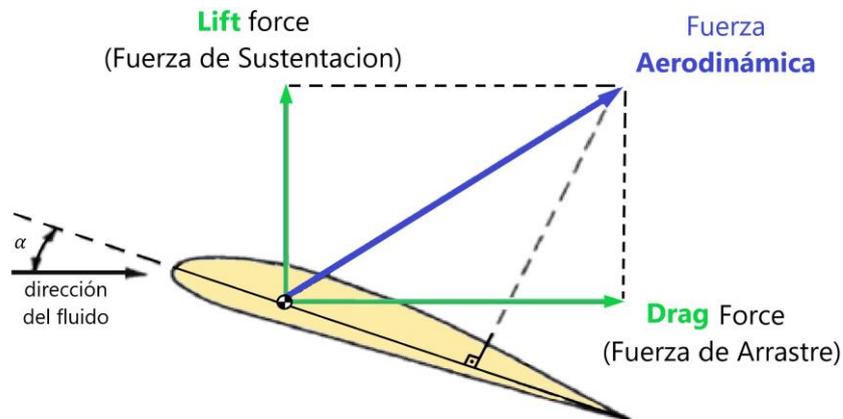


Figura 1.3: Componentes de la Fuerza Aerodinámica. Fuerzas de arrastre y Sustentación. *(elaboración propia)*

En lo referente a un automóvil y al contrario de lo que sucede en los aviones, se busca producir un empuje hacia abajo -antisustentación- de manera que, al aumentar la velocidad, aumenta la carga en los neumáticos, mejorando e incrementando la adherencia del vehículo al suelo.

Con este fin, es frecuente encontrar un gran número de automóviles con capós bajos e inclinados, combinados con alerones en la parte trasera -especialmente cuando se trata de vehículos de competición-.

¹ Es frecuente encontrar el término sustentación negativa, también referida como Antisustentación.

Igualmente, se busca disminuir la cantidad de aire que pasa por debajo de la parte delantera del carenado, con el objetivo de evitar que se cree una presión no deseada debajo del vehículo.²

1.1.3. El Alerón

El alerón, -en inglés *spoiler*, o *rear wing* si hace referencia al alerón trasero-, fue diseñado por primera vez con el objetivo de generar la máxima carga aerodinámica³ posible para que, de esta forma, el vehículo consiga mayor estabilidad y adherencia a la superficie.

En el mundo del automóvil, los primeros alerones fueron implementados en la Formula 1 en 1968. En aquella época, dicha competición obtuvo grandes avances en los motores, consiguiendo motores de alrededor de 450 CV. Con un motor mucho más potente, existía falta de tracción y agarre al asfalto, lo que derivó en tiempos por vuelta lentos.

Se conocía que se necesitaba una mayor presión sobre las ruedas para generar más agarre, con lo que se conseguiría pasar por las curvas a mayor velocidad y así obtener tiempos por vuelta más rápidos. En definitiva, faltaba carga aerodinámica.

La solución fue aportada por un expiloto llamado Jim Hall, el cual entendió que, si un alerón en un avión podía ayudar a elevarlo del suelo y hacerlo planear, si lo invertía y lo colocaba en un automóvil, este ayudaría a aumentar la presión sobre el coche, pegándolo más al suelo e incrementando el agarre de las ruedas.

Y es de esta forma como, a mediados de los 60, Hall diseña y crea el legendario modelo *Chevrolet Chaparral 2F* (véase la siguiente Figura 1.4), un prototipo de carreras con un enorme alerón trasero.

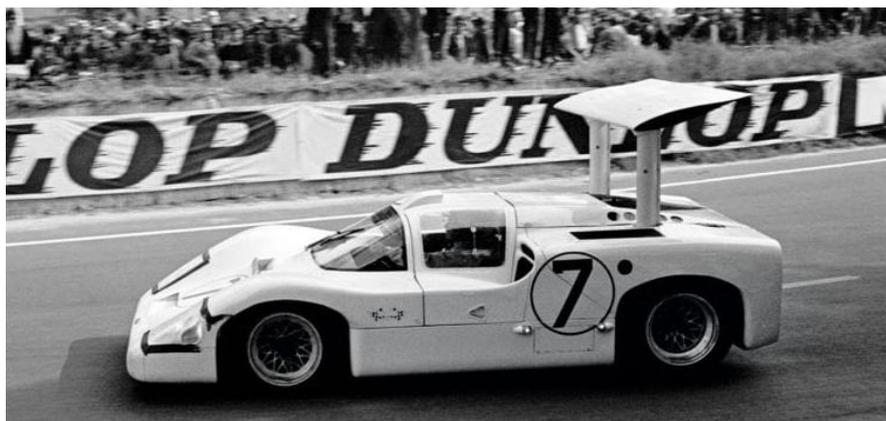


Figura 1.4: Chevrolet Chaparral 2F con alerón trasero móvil, montado sobre el eje.
Diseñado por Jim Hall en 1967. (Fuente: *motorsport.com*)

² Este fenómeno es comúnmente conocido como efecto suelo. En adelante, no se entrará en mayor detalle en relación con este concepto, ya que queda fuera del alcance del presente Trabajo Final de Grado.

³ La carga aerodinámica se refiere a la fuerza vertical descendiente -en inglés, *downforce*-.

Este alerón tiene la peculiaridad de estar montado sobre el eje del vehículo, y su cierta capacidad de movimiento recuerda bastante al funcionamiento de lo que posteriormente se conocería como DRS⁴ en los Formula 1 de competición actuales. [5]

No obstante, no sería hasta el año 2011, cuando se implementa el mencionado *Drag Reduction System*, con el fin de reducir la carga aerodinámica. Tal y como se muestra a continuación en la Figura 1.5, el funcionamiento de este innovador sistema consiste en un alerón trasero móvil abatible, el cual permite a los pilotos abrir el alerón en recta para reducir la carga aerodinámica y posteriormente cerrarlo antes de llegar a la curva para aumentar el agarre y adherencia al suelo a lo largo de estas. [6]



Figura 1.5: *Drag Reduction System* (DRS) incorporado en el alerón de un Formula 1. Vistas del DRS cerrado (izquierda) y abierto (derecha). (Fuente: *printerest.com*)

Fuera de la Formula 1 y de otras competiciones de carreras, es menos habitual encontrar alerones incorporados en vehículos, ya que la mayoría de los turismos utilizados para el transporte de uso diario no tienen motores con tanta relación peso-potencia⁵, ni suelen alcanzar tan altas velocidades. [7]

Sin embargo, hoy en día destacan algunos modelos deportivos como el Audi R8 (véase la Figura 1.6 izquierda) o el Porsche 911 (Figura 1.6 derecha), los cuales poseen alerones con diseños muy característicos y distintivos de estos modelos.



Figura 1.6: Automóviles superdeportivos con alerón trasero incorporado. Audi R8 (izquierda) y Porsche 911 (derecha). (Fuente: *speedcafe.com*)

⁴ Las siglas DRS proceden del inglés y se refieren al *Drag Reduction System*, o Sistema de Reducción de Arrastre.

⁵ Esta relación también es conocida como potencia específica, y es un cálculo habitualmente aplicado en la comparación de diseños o unidades de vehículos, ya que permite evaluar el rendimiento real de cualquier motor o fuente de potencia.

1.2. HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS AERODINÁMICO

Actualmente existen dos herramientas principales para el análisis y comprobación de diseños aerodinámicos. Estas herramientas son los conocidos túneles de viento, de alto coste pero mayor precisión; y las técnicas CFD, que son todo el conjunto de programas a través de los cuales se puede simular el efecto de un fluido en contacto con la superficie de un objeto sin tener que haber construido un modelo físico de dicho objeto.

Por último, aunque menos frecuente, también es posible llevar a cabo pruebas aerodinámicas en pista. Estas pruebas permiten validar de forma experimental los resultados obtenidos en el túnel de viento o en la simulación CFD.

1.2.1. Túneles de viento

Un túnel de viento es una herramienta de investigación, consistente en una construcción que permite estudiar en detalle el diseño aerodinámico de un objeto sólido, esto es, el efecto que tiene el aire sobre el mismo. En el mundo del automovilismo, son utilizados en competiciones como la conocida Formula 1, donde la aerodinámica del vehículo es protagonista y puede marcar la diferencia en cualquier Gran Premio⁶. [8]

El coste de instalación y mantenimiento de un túnel de viento es muy elevado, razón por la cual son pocas las marcas del mundo automovilístico las que poseen uno. Se estima que el coste aproximado de un túnel de viento a escala real para monoplazas de F1, se encuentra cerca de los 35 millones de euros. [9]

Además, para poder hacer uso del túnel de viento es necesario llevar a cabo la construcción real del prototipo objeto de estudio, aspecto que incrementa considerablemente el costo en la investigación ya que un estudio comparativo requiere de la construcción física de diferentes diseños. [10]

Es por ello por lo que, de forma general, los Túneles de viento cobran gran importancia a la hora de optimizar elementos o partes de un vehículo ya diseñado, y no tanto cuando el vehículo se encuentra en sus etapas iniciales de diseño.

⁶ El término “Gran Premio” se refiere a cada una de las carreras oficiales de Fórmula 1, celebradas por la FIA desde su creación en 1950.

El principio de funcionamiento de un túnel de viento es muy sencillo. Básicamente, se hace pasar el aire a través de un conducto, manteniendo estático el objeto de estudio en su interior. El aire puede ser aspirado desde la salida, o soplado desde la entrada del conducto⁷.

A la entrada del túnel de viento, se incorpora un entramado de rejillas o ventanillas anti-pompaje, para así garantizar que el flujo posea un comportamiento laminar puro que facilite el estudio⁸. Además, permiten llevar a cabo un equilibrio de las presiones y evitar posibles oscilaciones críticas de dicha presión durante los ensayos [11]

Posteriormente, se lleva a cabo la contracción del flujo. Al pasar el aire por el cono de aceleración, se consigue incrementar la velocidad del aire a la entrada de la cámara de ensayos. En esta cámara es donde se coloca el objeto a estudiar, en este caso, el vehículo.

Tras el paso del aire por la mencionada cámara de ensayos, un proceso inverso permite disminuir la velocidad y expandir el flujo gracias a un conjunto de difusores que recuperan la presión estática. Es habitual encontrar el difusor escalonado en dos etapas, divididas por un potente sistema de ventilación. [12]

Es frecuente encontrar estabilizadores de corriente ubicados tras el ventilador, con el objetivo de anular la rotación provocada por el ventilador. Un diagrama esquematizado con el funcionamiento descrito puede observarse a continuación en la Figura 1.7.

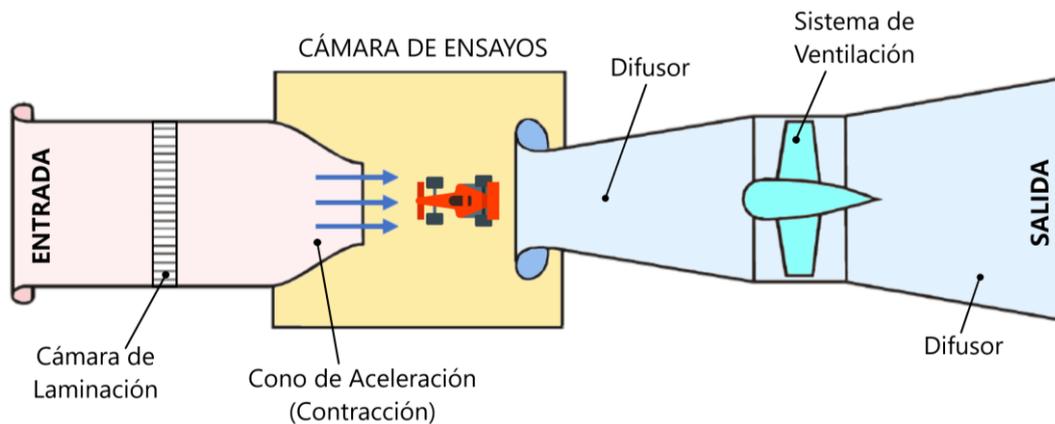


Figura 1.7: Diagrama de la estructura básica de un Túnel de Viento. (elaboración propia)

Entre los principales problemas a los que se enfrentan las mediciones en un túnel aerodinámico, podemos encontrar las limitaciones por efecto de la escala del modelo; el propio tamaño del túnel de viento; o efectos aerodinámicos no deseados como problemas de interferencia por el bloqueo del flujo en el interior del conducto.

⁷ En ocasiones, también es frecuente incorporar obstáculos u otros objetos, si lo que se busca es obtener un flujo turbulento.

⁸ Se refiere a aquel flujo ordenado, donde el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse ni producir vórtices. El paso a flujo turbulento viene marcado por lo que se conoce como capa límite

1.2.2. Técnicas CFD

Las Dinámica de Fluidos Computacional, es el área de la mecánica de fluidos que hace uso de simulaciones numéricas y algoritmos para resolver problemas sobre el flujo de fluidos. En lo que respecta al mundo del automovilismo, las técnicas CFD⁹ son las más utilizadas para llevar a cabo la comprobación aerodinámica del diseño de un vehículo.

Las ecuaciones que gobiernan el flujo fluido poseen su origen en la mecánica de fluidos, y pueden ser resueltas por distintos métodos numéricos, y Todas las ecuaciones conservativas resueltas en Dinámica de Fluidos Computacional poseen cuatro términos principales: el temporal, el advectivo, el difusivo y el término fuente.

Estos cuatro términos se combinan en lo que se conoce como la Ecuación de transporte de la variable de interés, y puede observarse a continuación en la Ecuación (1.1). [13]

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi \cdot dV + \oint_A \rho \phi V \cdot dA = \oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_\phi \cdot dV \quad (1.1)$$

(Tiempo)
(Advección)
(Difusión)
(Fuente)

Dado que no existe hoy día una solución exacta a esta ecuación, se emplean múltiples métodos de discretización para afrontarla, de entre los que destacan el método de las diferencias finitas, el método de los volúmenes finitos, o el método de los elementos finitos.

Estos métodos permiten discretizar el dominio en pequeños volúmenes, para posteriormente resolver la Ecuación de transporte de la variable de interés para cada uno de estos volúmenes de control.

No obstante, en lo que sigue del presente Trabajo Final de Grado, el contenido de este no se centrará en el estudio del método numérico empleado, ni se profundizará en el análisis de las ecuaciones de transporte mencionadas.

La ventaja principal de las técnicas CFD es que son de coste reducido, ya que únicamente es necesario el modelado CAD¹⁰ de un diseño 3D del vehículo y un programa de simulación para comprobar la aerodinámica.

Su precisión es menor que la proporcionada por un túnel de viento, pero permiten comprobar la aerodinámica de infinitos diseños aerodinámicos, sin con ello incurrir en un incremento desmedido del coste económico de ejecución del estudio. Es por ello por lo que en competiciones como la Formula 1, suelen ser utilizadas para seleccionar los mejores diseños, los cuales serán llevados posteriormente a un túnel de viento.

⁹ Las siglas CFD proceden del inglés, *Computational Fluid Dynamics*, y se refieren a la Dinámica de Fluidos Computacional

¹⁰ Las siglas CAD proceden del inglés, *Computer-Aided Design*, y se refieren al Diseño asistido por Ordenador

Debido a las limitaciones económicas del presente Trabajo Final de Grado, el estudio y análisis aerodinámico que se desarrolla se realiza mediante técnicas CFD, empleando el software de elementos finitos ANSYS®.

Más concretamente, la preparación de la geometría se desarrolla con ayuda de los *plug-in* de modelado SpaceClaim® y DesignModeler®; el mallado de la geometría se obtiene en el módulo Mechanical de ANSYS Workbench®; y el análisis final por elementos finitos se ejecuta en el módulo Fluent de ANSYS Workbench®.

1.2.3. Pruebas aerodinámicas en pista

Como se menciona en la introducción de la presente sección, las pruebas aerodinámicas en pista, permiten validar de forma experimental los resultados obtenidos en el túnel de viento o en las simulaciones CFD. Además, son la principal herramienta de recogida de datos que permiten obtener la información sobre el estado del flujo alrededor del vehículo, es decir, definir las características del medio. [14]

En entrenamientos libres previos a un Gran Premio de F1, es frecuente que algunos equipos hagan test aerodinámicos en pista incorporando diversos elementos como parrillas, sondas Kiel o tubos de Pitot para computar el efecto de los flujos y la aparición de vórtices a lo largo de todo el monoplaça, en especial en las zonas del vehículo cercanas a los neumáticos. [15]

Algunos de los elementos más empleados durante las pruebas aerodinámicas en pista, son los que se desarrollan a continuación:

1.2.3.1. Tubo de Pitot

El Tubo de Pitot (véase más adelante en la Figura 1.8 izquierda) es un sensor empleado para determinar con precisión la velocidad relativa existente entre el aire y el vehículo. Tiene forma de ‘L’, y suele ubicarse en los monoplaça de Formula 1 a la altura de la entrada de aire en el motor. [16]

1.2.3.2. Parrillas de Sensores y Sondas Kiel

Son parrillas formadas por un gran número de sondas Kiel (véase a la Figura 1.8 derecha). Estos sensores ocupan menos de 2 mm en su punta, y funcionan como una alternativa a los tubos de Pitot, con la ventaja de permitir medir tanto la velocidad relativa como la temperatura del aire.

Las parrillas más grandes suelen ubicarse a la altura de las ruedas o tras el difusor, pero también pueden utilizarse parrillas más pequeñas para los alerones. [17]

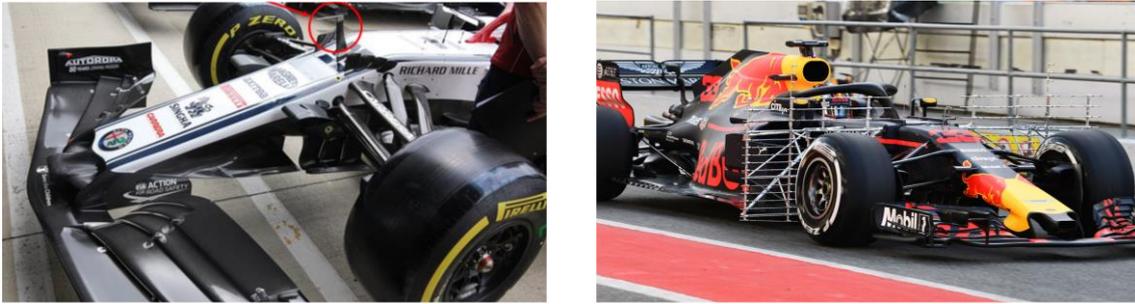


Figura 1.8: Elementos empleados durante pruebas en pista. Tubos de Pitot (izquierda) y Parrillas de sondas Kiel (derecha). (Fuente: *aerodinamicaf1.com*)

1.2.3.3. Sensores de Succión

Estos Sensores de Succión detectan y cuantifican las posibles depresiones que puedan aparecer en la zona inferior de los alerones. Se ubican en pequeñas perforaciones ubicadas en los propios alerones (véase más adelante en la Figura 1.9 izquierda). [18]

1.2.3.4. Parafina

La parafina consiste en un fluido viscoso y poco denso (véase a continuación en la Figura 1.9 derecha), aplicado sobre la superficie del vehículo a estudiar. Debido a su largo tiempo de secado, este fluido es arrastrado por el aire dejando una impresión del flujo sobre la superficie de análisis. [19]

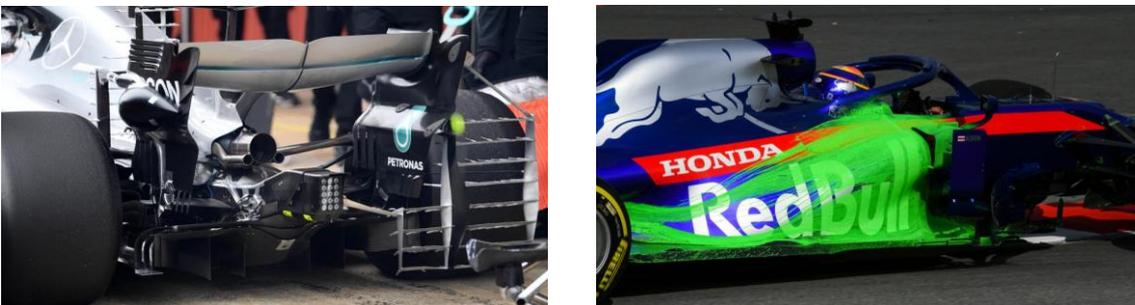


Figura 1.9: Elementos empleados durante pruebas en pista. Sensores de Succión (izquierda) y Trazas de Parafina (derecha). (Fuente: *aerodinamicaf1.com*)

Esta técnica aparentemente tan sencilla, es muy efectiva para validar de una forma visual los resultados obtenidos con un estudio CFD. Una mancha uniforme sobre la superficie indica un flujo laminar en esa zona, mientras que un trazo aleatorio y no uniforme implica un flujo turbulento en dicha zona

1.3. OBJETO DE PROYECTO Y OBJETIVOS

El objeto del presente proyecto es analizar y estudiar la influencia que tiene sobre la aerodinámica, la implementación de un alerón trasero en un Tesla Model S. De la misma manera, el trabajo tiene como objetivo obtener el ángulo de inclinación óptimo para todos y cada uno de los circuitos de estudio.

Los principales Objetivos con relación al análisis aerodinámico que se desarrolla en el presente documento son:

- Diseñar un alerón trasero capaz de mejorar la aerodinámica general del vehículo, y por tanto, el tiempo por vuelta del mismo con respecto a la configuración sin alerón.
- Observar las consecuencias de aumentar o reducir el ángulo de inclinación del alerón trasero.
- Conseguir una configuración óptima del alerón trasero para cada uno de los circuitos de estudio, teniendo en cuenta el efecto de las curvas y rectas sobre el vehículo.

Otros objetivos de relevancia que cabe nombrar son:

- Llevar a cabo un preprocesado¹¹ de la geometría de un Tesla Model S en SolidWorks®, a partir de un modelo CAD detallado del vehículo, para su posterior introducción a ANSYS®.
- Desarrollar un Análisis de Independencia de Malla que permita establecer un tamaño de malla óptimo, capaz de proporcionar resultados válidos al análisis por elementos finitos en el menor tiempo posible y con el menor gasto computacional viable.
- Desarrollar un modelo dinámico que permita obtener analíticamente todos los coeficientes aerodinámicos involucrados en el cálculo aerodinámico, a partir de las fuerzas resultantes obtenidas del análisis por elementos finitos
- Desarrollar un simulador que contemple todo el modelo dinámico del vehículo y que proporcione de la forma más realista posible los tiempos por vuelta de los circuitos principales de la Formula 1.

¹¹ Se refiere al conjunto de operaciones llevadas a cabo en las etapas previas a la simulación aerodinámica por elementos finitos.

1.4. METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS

1.4.1. Metodología de Trabajo

Después de un estudio teórico del modelo de fuerzas que intervienen y el análisis de las ecuaciones de velocidades máximas en recta y curva, se selecciona y descarga un archivo CAD que contenga la geometría 3D de un Tesla Model S.

Dicha geometría se importa a Solidworks[®], donde se lleva a cabo una simplificación de la geometría, eliminando componentes innecesarios y adaptando el carenado del vehículo a un único sólido, para facilitar el posterior mallado.

Esta geometría es exportada a ANSYS, donde gracias al *plugin* de modelado DesignModeler[®], se crea un prisma rectangular, al cual se le suprime el volumen del vehículo. De esta forma se obtiene la geometría final, la cual en este punto ya se encuentra preparada para efectuar el mallado.

Para conseguir un mallado de calidad, previamente se realiza en ANSYS Workbench[®] un estudio de influencia del tamaño de malla. Este estudio consiste en simular la geometría con distintos tamaños de malla y seleccionar un tamaño que proporcione resultados válidos en un tiempo aceptable de simulación. Una vez seleccionado el tamaño de malla y aplicando criterios de calidad, se realiza el mallado final de la geometría y se extraen los resultados del análisis por elementos finitos para el modelo del vehículo sin alerón.

Cabe mencionar que para la ejecución del mallado se emplea el módulo ANSYS Mechanical[®], mientras que, para el establecimiento de las condiciones de contorno y la ejecución de la simulación, es empleado el módulo ANSYS Fluent[®].

Una vez obtenidos los resultados para el modelo 3D sin alerón, el siguiente paso lógico es el de diseñar el alerón trasero -de nuevo empleando el software de modelado Solidworks[®]-. Este alerón se compone de un soporte de base rectangular centrado sobre el vehículo y un prisma triangular horizontal que actúa como alerón. Modificando el ángulo de inclinación de la hipotenusa de dicho prisma, se obtienen los modelos de alerones con distintas inclinaciones.

Con el alerón diseñado, se actualiza la geometría y se procede a realizar las simulaciones mediante ANSYS Fluent[®], que es la herramienta de CFD seleccionada. Se realizan simulaciones con alerones con una diferencia de 5^o de inclinación entre ellos, obteniendo las fuerzas de arrastre y sustentación para cada caso. Con estas fuerzas, atendiendo a sus ecuaciones, se obtiene también los coeficientes de arrastre y sustentación.

Para el análisis de los resultados y poder llegar a las conclusiones, se diseña en una hoja de cálculo de Excel, un simulador basado en el modelo cinemático completo del vehículo. Este modelo, con los datos de las simulaciones y siguiendo las leyes de la cinemática, calcula el tiempo que tarda el coche en completar una vuelta en todos y cada uno de los circuitos de la Formula 1.

Gracias a MS Excel también se obtienen gráficas y tablas que contienen los resultados de los tiempos por vuelta, fuerzas de arrastre y sustentación, tamaños de malla, que facilitan el análisis y comprensión de los resultados y sirven como base para establecer conclusiones sobre el estudio realizado en el presente proyecto.

1.4.2. Proceso Iterativo de Diseño

A continuación, en la Figura 1.10, puede visualizarse de forma esquematizada el diagrama de flujo del proceso de trabajo seguido a lo largo del proyecto.

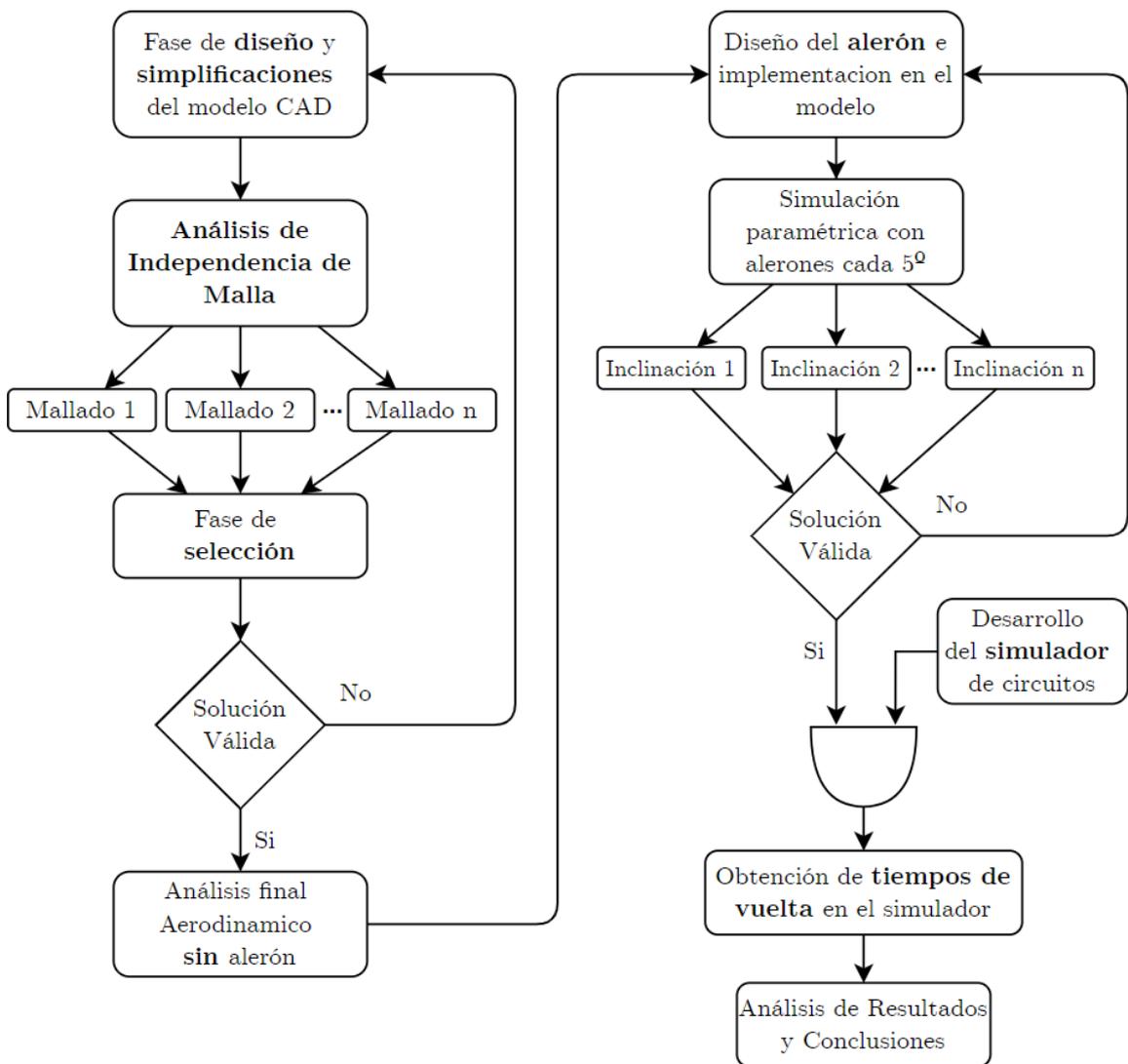


Figura 1.10: Diagrama de flujo del trabajo desarrollado en el presente TFG. (elaboración propia)

CAPÍTULO 2. MODELO DINÁMICO DE ESTUDIO

2.1. FUERZAS INVOLUCRADAS

Persiguiendo los objetivos del presente proyecto, se busca que el coche circule a la máxima velocidad posible en todo momento. Para ello, es necesario comprender la influencia que tienen en la velocidad, las diferentes fuerzas que aparecen sobre el coche. (véase la Figura 2.1)

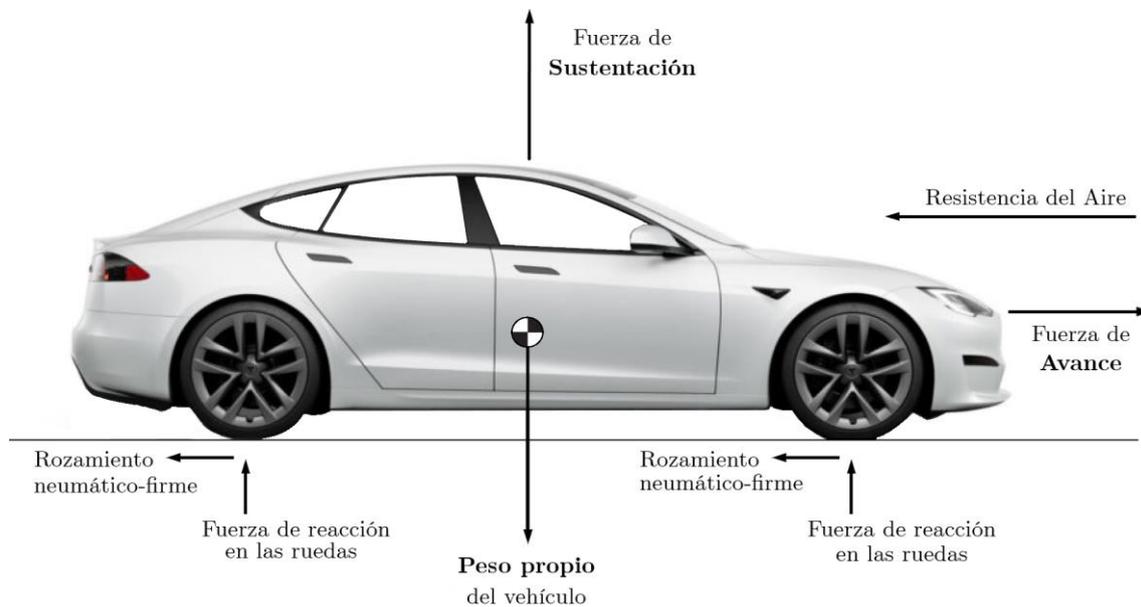


Figura 2.1: Esquemático de fuerzas actuantes sobre un vehículo en movimiento.
(*elaboración propia*)

Estando el vehículo parado, la única fuerza que se puede apreciar es la generada por el propio peso del coche, pero una vez el coche inicia el movimiento, aparecen diversas fuerzas en múltiples partes del carenado del vehículo.

Estas fuerzas actuantes no solo son consecuencia del diseño del vehículo, y por tanto hay que tener en cuenta factores externos como pueda ser el tipo de superficie por la que circula el coche, la inclinación de la superficie, el posible radio de curvatura de la vía, el posible peralte la misma o el tipo de neumáticos empleados, entre otros.

Todo esto, es determinante y limita las velocidades máximas en recta y curva. Es por ello, que en la presente sección se analiza con detalle la importancia de cada una de estas fuerzas.

2.1.1. Fuerzas de Arrastre y Sustentación

El presente proyecto tiene como objetivo principal el estudio aerodinámico del vehículo y por tanto las fuerzas generadas por el contacto del flujo de aire con la superficie del vehículo, son de suma importancia. Estas fuerzas son conocidas como resistencia aerodinámica, se oponen al movimiento y son generadas por el choque del aire con el vehículo.

Según la dirección en la que se ejerza la fuerza sobre el vehículo, se pueden distinguir dos componentes principales de la resistencia aerodinámica: fuerza de arrastre y fuerza de sustentación.

2.1.1.1. Fuerza de Arrastre

La Fuerza de arrastre, -en inglés *Drag Force*-, es la fuerza que aparece sobre el vehículo en la misma dirección que la del movimiento del vehículo, pero de sentido contrario -es decir, se opone al movimiento del automóvil-.

Es por ello por lo que, a la hora de llevar a cabo el diseño del carenado de un automóvil, se buscan diseños aerodinámicos que minimicen esta fuerza. Con esto, se consigue que para una misma potencia de motor, la velocidad máxima sea mayor. Esto es equivalente a decir que minimizar esta fuerza de arrastre provoca una mejora directa en el rendimiento del vehículo.

La expresión de la Fuerza de Arrastre ' F_D ' empleada en los cálculos del presente proyecto, puede observarse a continuación en la Ecuación (2.1). [20]

$$F_D = \frac{V^2 \cdot A \cdot \rho}{2} \cdot C_D \quad ; \quad (2.1)$$

donde ' V ' es la velocidad relativa entre el fluido y el vehículo, ' ρ ' es la densidad del fluido -en este caso, el aire-, ' A ' es el área de referencia¹² y el término ' C_D ' es el Coeficiente de Resistencia¹³. [21]

¹² Se refiere a el área de la proyección ortográfica del vehículo sobre un plano perpendicular a la dirección del movimiento.

¹³ Las siglas C_D hacen referencia a la designación del coeficiente en inglés, *Drag Coeficient*.

El coeficiente de arrastre varía en función de la geometría del vehículo, es decir su aerodinámica. Cuanto mejor sea el diseño aerodinámico, más bajo será el valor del coeficiente de arrastre, consiguiendo también un menor consumo de combustible. En la siguiente Figura 2.2 se pueden observar algunos de los valores típicos del coeficiente de arrastre para distintos vehículos.

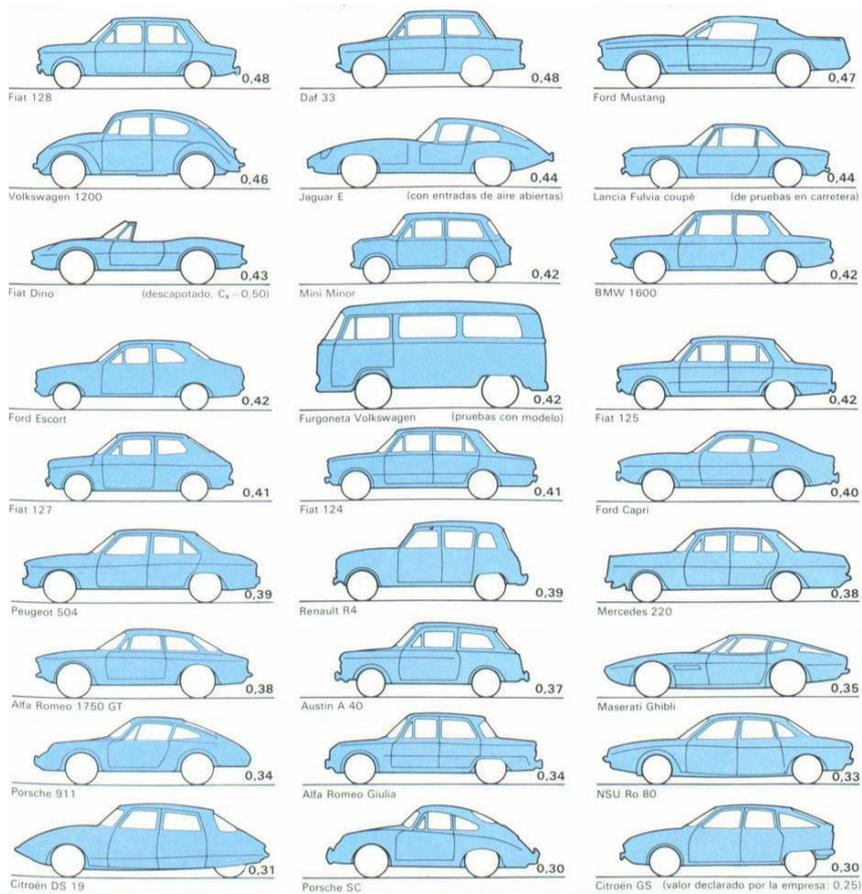


Figura 2.2: Valores típicos de coeficiente de arrastre en distintos vehículos.
(Fuente: *technicalcourses.net*)

En la Formula 1, por ejemplo, el coeficiente de arrastre suele variar entre 0.7 y 1.1 según las características del circuito. Actualmente, el vehículo comercial con mejor coeficiente de arrastre es el Volkswagen XL1, el cual posee un coeficiente de arrastre de 0.19.



Figura 2.3: Volkswagen XL1 2013. (Fuente: *autoevolution.com*)

2.1.1.2. Fuerza de Sustentación

La Fuerza de sustentación, -en inglés *Lift Force*-, es la componente de la fuerza aerodinámica que aparece en dirección perpendicular al movimiento. Esta fuerza puede ser orientada en dos sentidos.

Si lo que se busca es conseguir que el objeto de estudio se separe del suelo y gane altura, es necesario orientar dicha fuerza hacia arriba. Este es el caso de los aviones, los cuales buscan crear una reacción positiva que separe el tren de aterrizaje del suelo para poder volar. Esto es lo que se conoce como sustentación positiva o simplemente sustentación

Por el contrario, si lo que se busca es adherir el objeto de estudio a la superficie, entonces es necesario orientar dicha fuerza hacia abajo. Este es el caso de los automóviles, los cuales buscan crear presión sobre las ruedas para generar adherencia al suelo. Esto es lo que se conoce como sustentación negativa o antisustentación.

La expresión de la Fuerza de Arrastre ' F_L ' empleada en los cálculos del presente proyecto, puede observarse a continuación en la Ecuación (2.2). [22]

$$F_L = \frac{V^2 \cdot A \cdot \rho}{2} \cdot C_L \quad ; \quad (2.2)$$

donde ' C_L ' (adimensional) es el Coeficiente de Sustentación¹⁴, y el resto de los términos son análogos al de la anterior Ecuación (2.1).

2.1.2. Otras fuerzas relevantes

2.1.2.1. Fuerza gravitatoria

La Fuerza gravitatoria ' F_g ' es la fuerza que aparece sobre el vehículo por efecto de la gravedad. También es conocida como peso, y puede obtenerse según se muestra en la Ecuación (2.3).

$$F_g = m \cdot g \quad ; \quad (2.3)$$

donde ' m ' es la masa del coche y ' g ' es el valor de la aceleración de la gravedad.

2.1.2.2. Fuerza normal

La Fuerza normal ' F_N ' es la fuerza que ejerce la superficie sobre el vehículo en la misma dirección que la fuerza gravitatoria, de igual magnitud, pero en sentido contrario.

¹⁴ Las siglas C_L hacen referencia a la designación del coeficiente en inglés, *Lift Coeficient*.

2.1.2.3. Fuerza del motor

La Fuerza del motor ' F_M ' es la fuerza generada por el motor del vehículo, como consecuencia directa de la cilindrada del mismo. Esta fuerza permite el movimiento del coche. La fuerza del motor puede obtenerse según se muestra en la Ecuación (2.4).

$$F_M = \frac{P}{v} ; \quad (2.4)$$

donde ' P ' es la potencia del motor y ' v ' es la velocidad relativa entre el vehículo y el fluido.

2.1.2.4. Fuerza de deslizamiento

La Fuerza de deslizamiento ' F_{des} ', también conocida como Fuerza de rozamiento cinético, es una fuerza que aparece en curva y que se opone al deslizamiento lateral de las ruedas. Su sentido está orientado hacia el interior de la curva. La fuerza de deslizamiento puede obtenerse según se muestra en la Ecuación (2.5).

$$F_{des} = \mu \cdot F_N ; \quad (2.5)$$

donde ' μ ' es el coeficiente de rozamiento.

2.1.2.5. Fuerza de rozamiento

La Fuerza de rozamiento ' F_R ' es la fuerza que se opone al movimiento, que aparece como consecuencia del contacto entre el vehículo y la superficie. La fuerza de rozamiento puede obtenerse según se muestra en la Ecuación (2.6).

$$F_R = C_{rr} \cdot F_N ; \quad (2.6)$$

donde ' C_{rr} ' es el coeficiente de rodadura del neumático.

2.1.2.6. Fuerza centrípeta

La Fuerza centrípeta ' F_C ' es la fuerza que aparece sobre un objeto que sigue una trayectoria curvilínea. Dicha fuerza está orientada en sentido del centro de curvatura. La fuerza centrípeta en curva puede obtenerse según se muestra en la Ecuación (2.7).

$$F_C = \frac{v^2}{r} \cdot m ; \quad (2.7)$$

donde ' v ' es la velocidad relativa entre el objeto y el fluido, ' m ' es la masa del vehículo y ' r ' es el radio de curvatura descrito.

2.2. ECUACIONES DEL MODELO

Con el objetivo de obtener la velocidad máxima del vehículo tanto en recta como en curva y teniendo en cuenta las fuerzas que actúan sobre el vehículo en cada situación, es posible conseguir las ecuaciones genéricas de velocidad en recta y curva. Estas ecuaciones son aplicables a cualquier vehículo y proporcionan velocidades máximas teóricas.

2.2.1. Ecuación genérica de velocidad en recta

Para obtener la ecuación genérica de la velocidad en una recta, el primer paso es separar las ecuaciones de fuerzas según el eje en el que actúan:

$$\begin{aligned} \text{Eje X: } F_M - F_D - F_R &= 0 \\ \text{Eje Y: } F_N + F_L - F_g &= 0 \end{aligned} \tag{2.8}$$

A partir del balance de fuerzas en el eje Y, es posible despejar la Fuerza normal F_N , como diferencia entre la fuerza gravitatoria y la fuerza de sustentación:

$$F_N = F_g - F_L \tag{2.9}$$

Si se sustituye el valor de la Fuerza Normal (Ecuación (2.9)) en la ecuación de la Fuerza de rozamiento (Ecuación (2.6)) y posteriormente se desarrolla el balance de fuerzas en el eje X (Ecuación (2.8)),

$$F_R = (F_g - F_L) \cdot C_{rr} \rightarrow F_M - F_D - (F_g - F_L) \cdot C_{rr} = 0 \quad , \tag{2.10}$$

se obtiene una ecuación de tercer grado. Agrupando términos en función del grado de la incógnita (v), se obtiene la Ecuación (2.11) que se muestra a continuación.

$$\begin{aligned} P - \frac{1}{2}AC_D\rho v^3 - \left(mgv - \frac{1}{2}AC_L\rho v^3\right) \cdot C_{rr} &= 0 \rightarrow \\ \rightarrow v^3 \cdot \left(\frac{1}{2}AC_D\rho + \frac{1}{2}AC_L\rho C_{rr}\right) + C_{rr}mgv - P &= 0 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Esta última ecuación es la ecuación genérica de velocidad en recta.

2.2.2. Ecuación genérica de velocidad en curva

De manera análoga a como se desarrolla para el caso en recta, para obtener la ecuación genérica de la velocidad en una curva, el primer paso es separar las ecuaciones de fuerzas según el eje en el que actúan (véase la Ecuación (2.12)).

$$\begin{aligned} \text{Eje X: } F_C - F_{des} &= 0 \\ \text{Eje Y: } F_N + F_L - F_g &= 0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Puede observarse como, tanto para el caso en recta como en curva, el balance de fuerzas es idéntico, mientras que para el eje X las fuerzas actuantes en curva son las Fuerzas centrípeta y de deslizamiento.

Si Se despeja la Fuerza normal ' F_N ' en ambos ejes, y posteriormente se agrupan ambas ecuaciones en una igualando F_N , se obtiene la ecuación de segundo grado que se observa a continuación en la Ecuación (2.13).

$$\left. \begin{aligned} \text{Eje X: } F_N &= \frac{v^2 \cdot m}{r \cdot \mu} \\ \text{Eje Y: } F_N &= F_g - F_L \end{aligned} \right\} \rightarrow v^2 \left(\frac{m}{r \cdot \mu} + \frac{1}{2} AC_L \rho \right) = mg \quad (2.13)$$

Por último, despejando la incógnita (v) de la anterior Ecuación (2.13), se obtiene la Ecuación genérica de velocidad en Curva. Véase la siguiente Ecuación (2.14).

$$v = \sqrt{\frac{m \cdot g}{\left(\frac{m}{r \cdot \mu} + \frac{1}{2} AC_L \rho \right)}} \quad (2.14)$$

2.2.3. Ecuación de velocidad en curva por riesgo de vuelco

Durante el paso del vehículo por curva, también se ha de tener en cuenta la velocidad máxima a la que puede circular el vehículo en función de sus características, sin que se produzca vuelco de mismo.

De esta forma, a la hora de estimar cual es la velocidad máxima permitida para una curva dada, será necesario desarrollar la velocidad máxima sin riesgo de vuelco, y evaluar si es limitante con respecto a la velocidad máxima genérica en curva (véase la velocidad obtenida en la anterior Ecuación (2.14)).

Para ello, la ecuación de velocidad en curva por riesgo de vuelco se obtiene de la siguiente forma:

El primer paso lógico, es plantear la ecuación de momentos estabilizantes y desestabilizantes (véase la siguiente Ecuación (2.15)) que se producen en el automóvil como consecuencia de un trazado curvilíneo.

$$F_c \cdot h_g = \frac{d_R}{2} \cdot (F_g - F_L) \quad ; \quad (2.15)$$

donde ' h_g ' es la altura del centro de gravedad del automóvil con respecto al suelo y ' d_R ' es la distancia que existe entre las ruedas de un mismo eje.

Desarrollando la expresión anterior tal y como se muestra en la Ecuación (2.16), es posible obtener una vez más, una ecuación de segundo grado dependiente de la velocidad.

$$\begin{aligned} \frac{mv^2}{r} \cdot h_g &= \frac{d_R}{2} \cdot \left(mg - \frac{1}{2} AC_L \rho v^2 \right) \rightarrow \\ \rightarrow \left(\frac{mh_g}{r} + \frac{1}{4} d_R AC_L \rho \right) \cdot v^2 &= \frac{d_R}{2} \cdot mg \end{aligned} \quad (2.16)$$

De manera análoga al caso genérico en curva, espejando la incógnita (v) de la anterior Ecuación (2.16), se obtiene la Ecuación de velocidad en Curva por riesgo de vuelco. Véase la siguiente Ecuación (2.17).

$$v = \sqrt{\frac{d_R mg}{2 \frac{m}{r} h_g + \frac{1}{2} AC_L d_R \rho}} \quad (2.17)$$

2.2.4. Sistema de ecuaciones final

A modo de resumen, las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del vehículo tanto en curva como en recta se muestran a continuación agrupadas para una mayor accesibilidad.

2.2.4.1. En recta

La obtención de la velocidad máxima en recta viene determinada por el caso genérico de velocidad en recta, resolviendo de forma iterativa¹⁵ la ecuación de tercer grado que se muestra en la Ecuación (2.18).

$$v_{max,R}^3 \cdot \left(\frac{1}{2} AC_D \rho + \frac{1}{2} AC_L \rho C_{rr} \right) + v_{max,R} \cdot (C_{rr} mg) - P = 0 \quad (2.18)$$

2.2.4.2. En curva

La velocidad máxima permitida en cada curva viene determinada por mínimo obtenido de las ecuaciones de velocidad en curva, tanto genérica ($v_{max,c1}$) como frente a la condición de vuelco ($v_{max,c2}$).

Ambas ecuaciones se agrupan a continuación en el sistema de la Ecuación (2.19).

$$v_{max,C} = \min \begin{cases} v_{max,c1} = \sqrt{\frac{mg}{\left(\frac{m}{r \cdot \mu} + \frac{1}{2} AC_L \rho\right)}} \\ v_{max,c2} = \sqrt{\frac{d_R \cdot mg}{2 \frac{m}{r} h_g + \frac{1}{2} AC_L d_R \rho}} \end{cases} \quad (2.19)$$

Estas ecuaciones son la base del simulador, que posteriormente se desarrolla para obtener como resultado los tiempos de vuelta del vehículo objeto de estudio, para cada uno de los circuitos de la Formula 1 analizados.

¹⁵ En el presente trabajo final de grado, dicha ecuación ha sido resuelta empleando el módulo de *Solver* de MS Excel.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

En el presente capítulo se desarrolla el procedimiento seguido para la simplificación geométrica del modelo 3D en Solidworks®, y la posterior preparación de la simulación en ANSYS®. Mas concretamente, en lo referente a ANSYS®, se ha seguido un proceso de discretización del trabajo en módulos¹⁶, con el objetivo de segmentar el desarrollo de las simulaciones y así facilitar la posible identificación de fallos o errores en el proceso.

Tras simplificar la geometría en Solidworks®, esta se importa a ANSYS Workbench® para llevar a cabo un preprocesado final de esta empleando el módulo DesignModeler®. Tras ello, el modelo se malla en un módulo específico de mallado, que posteriormente se vincula al set-up del módulo de simulación aerodinámica ANSYS Fluent®, donde se configura toda la simulación y se establecen todas las condiciones de contorno. Tras correr la simulación, los resultados obtenidos se enlazan con un cuarto y último módulo, específico para el postproceso de resultados para análisis CFD. En este último módulo, se lleva a cabo todo el ploteo de presiones y velocidades de interés para el establecimiento de las conclusiones. En la siguiente Figura 3.1 se muestra el esquema de desarrollo descrito para los casos sin alerón y con alerón de 5°.

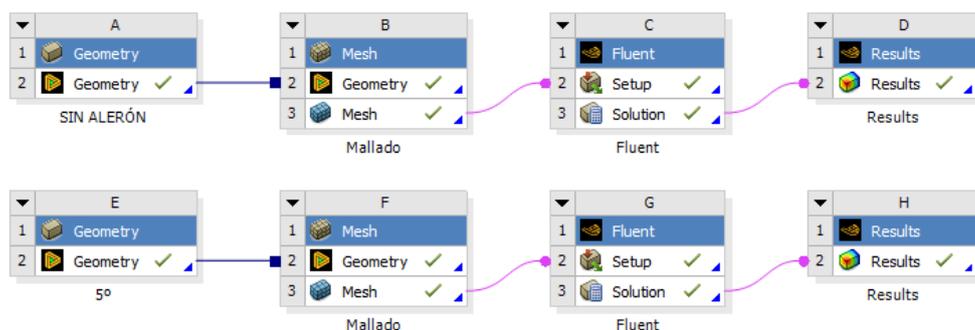


Figura 3.1: Esquema de desarrollo de las simulaciones, empleando segmentación por módulos. (ANSYS Workbench®)

¹⁶ Véanse en ANSYS estos módulos, referidos como *Component Systems*.

3.1. GEOMETRÍA

3.1.1. Justificación del proyecto y Motivación

Para el presente Trabajo de Fin de Grado, se ha seleccionado como vehículo de estudio, el Tesla Model S (edición 2019-2020). La ficha técnica de especificaciones de dicho modelo, pueden encontrarse adjuntas en el ANEXO A. [23].

Una imagen del Tesla Model S elegido, puede observarse a continuación en la Figura 3.2.



Figura 3.2: Tesla Model S seleccionado para el proyecto. (Fuente: *topgear.es*)

A nivel personal, se ha elegido este coche ya que esta marca ha sido pionera en el desarrollo de coches eléctricos de alta eficiencia y de excelente aerodinámica en los últimos años. Además, gracias a esta popularidad, la búsqueda del modelo CAD 3D que se ha utilizado en las simulaciones aerodinámicas, ha sido más sencilla.

3.1.2. Simplificación de la geometría en Solidworks®

Una vez descargado el archivo CAD del vehículo que se observa en la Figura 3.3, se procede a realizar las simplificaciones necesarias sobre este, mediante el software de modelado Solidworks®. [24]

Dichas modificaciones se realizan con el fin de simplificar y adaptar la geometría para su posterior uso en las simulaciones. De esta forma se evitan errores de simulación o tiempos de simulación excesivos, así como conseguir crear un único sólido, que es lo que se busca.



Figura 3.3: Archivo CAD 3D original del Tesla Model S. (*Solidworks*[®])

Dado que el archivo inicial (véase la Figura 3.4 izquierda) se trata de un ensamblaje, el primer paso es el de eliminar las ruedas y neumáticos del conjunto. Con esto, únicamente se mantiene el sólido correspondiente al cuerpo del vehículo.

3.1.2.1. Simplificación de la parte delantera

A partir del modelo inicial que se observa en la Figura 3.4 izquierda, se eliminan los retrovisores para evitar fallos de cálculo derivados de estos elementos (véase la Figura 3.4 derecha).

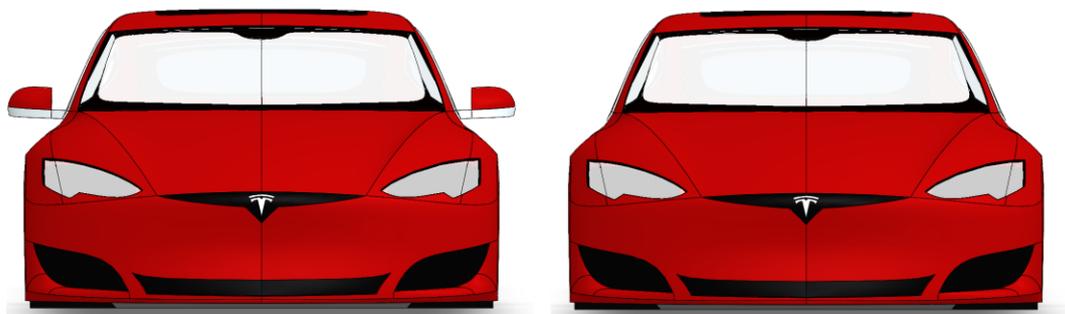


Figura 3.4: Vista frontal del Modelo CAD. Archivo inicial sin modificaciones (izquierda) y eliminación de los retrovisores (derecha). (*Solidworks*[®])

El siguiente paso, es el de modificar la parte frontal del vehículo, simplificando al máximo el número de superficies que gobiernan el morro y la luna delantera del automóvil. Se comienza eliminando el logo de Tesla ubicado en la parte central, y se rellena el hueco en el que este estaba situado (véase la Figura 3.5 izquierda).

También se elimina el espacio donde se sitúan las rejillas inferiores, así como los huecos exteriores destinados a la localización de las luces de guiado (véase la Figura 3.5 derecha).

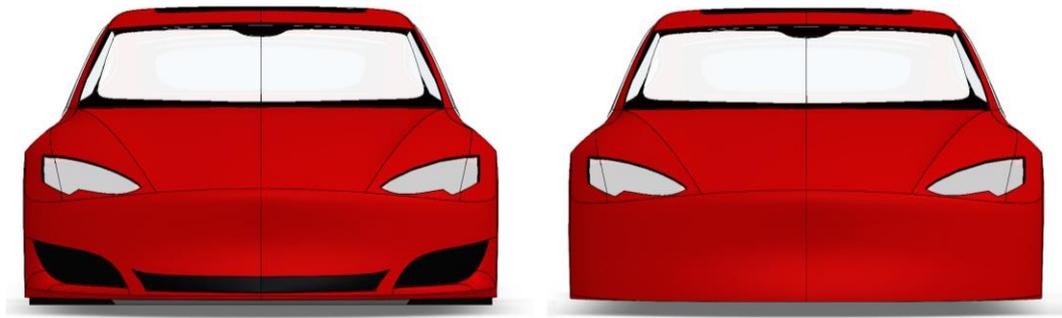


Figura 3.5: Vista frontal del Modelo CAD. Eliminación del logo central (izquierda) y de las rejillas y luces de guiado inferiores (derecha). (Solidworks®)

Por último, se eliminan las superficies correspondientes a los faros frontales (véase la Figura 3.6 izquierda), y las correspondientes a la luna delantera (véase la Figura 3.6 derecha).

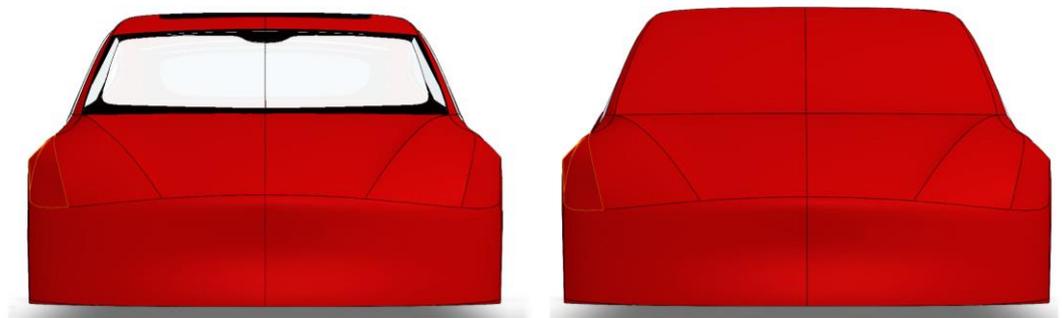


Figura 3.6: Vista frontal del Modelo CAD. Eliminación de los faros frontales (izquierda) y de la luna delantera (derecha). (Solidworks®)

3.1.2.2. Simplificación de la parte trasera

Una vez finalizada la parte delantera del Tesla Model S, se procede con la simplificación de la parte trasera. A partir del modelo que se observa en la Figura 3.7 izquierda, se comienza eliminando el logo y el nombre de tesla. El espacio reservado para la matrícula se rellena para nivelar las superficies de la parte trasera (véase la Figura 3.7 derecha).

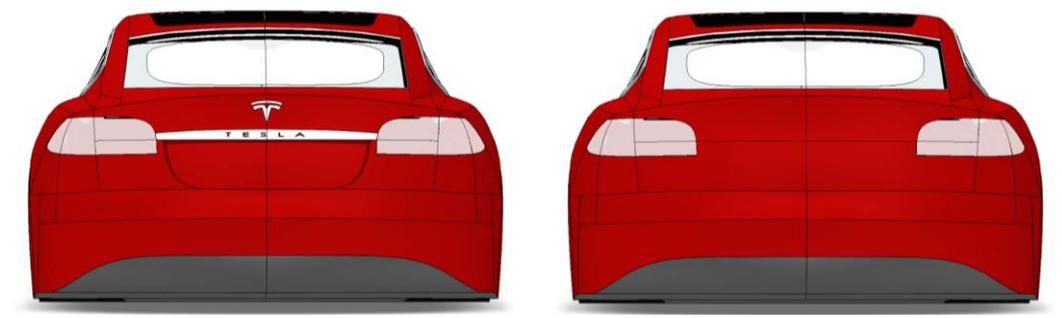


Figura 3.7: Vista trasera del Modelo CAD. Archivo inicial sin retrovisores (izquierda) y eliminación del logo y letrero (izquierda). (Solidworks®)

Del mismo modo, se eliminan los faros traseros (véase la Figura 3.8 izquierda) y la luna trasera del coche (véase la Figura 3.8 derecha), de forma análoga a como se realiza para la zona delantera.

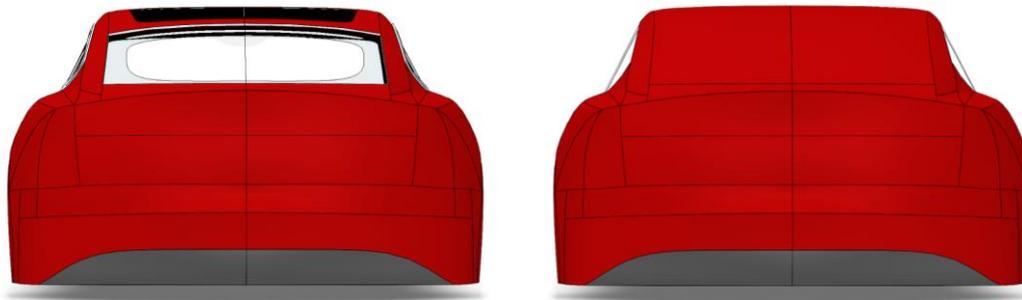


Figura 3.8: Vista trasera del Modelo CAD. Eliminación de los faros traseros (izquierda) y de la luna trasera (derecha). (Solidworks®)

A continuación, puede observarse una vista lateral del vehículo, antes (Figura 3.9 superior) y después (Figura 3.9 inferior) de llevar a cabo las modificaciones delanteras y traseras realizadas sobre el modelo 3D.

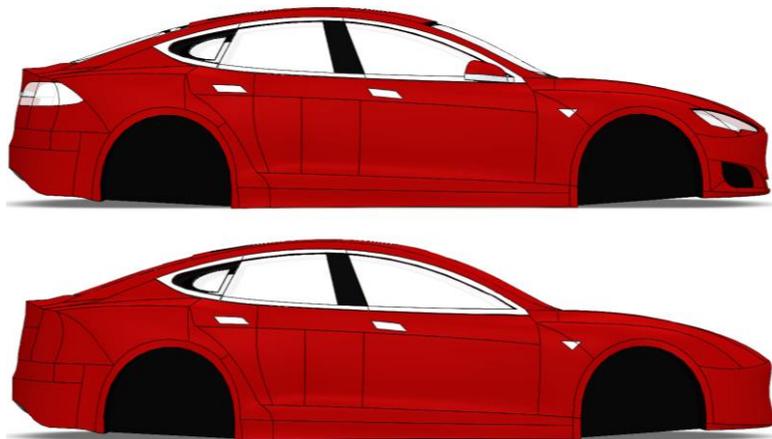


Figura 3.9: Vista lateral del del Modelo CAD, antes (superior) y después (inferior) de las modificaciones delanteras y traseras. (Solidworks®)

3.1.2.3. Simplificación de los laterales

Atendiendo a los laterales del vehículo, se eliminan todo tipo de pequeños detalles y superficies, como puedan ser las manetas de las puertas o el embellecedor triangular ubicado junto a la puerta delantera, el cual simula la posición de las luces intermitentes de aviso de cambio de dirección (véase la Figura 3.10 superior)

Igualmente, se han eliminado los marcos que dividen las tres ventanas, y se han tapado los espacios con nuevas superficies (véase la Figura 3.10 inferior).

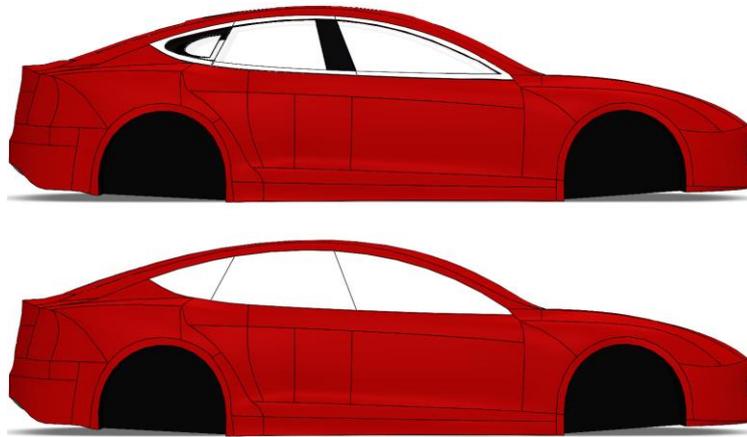


Figura 3.10: Vista lateral del del Modelo CAD. Eliminación de las manetas de las puertas y luces intermitentes (superior), y de los marcos y ventanillas laterales (inferior). (*Solidworks*®)

Por último, se han tapado huecos destinados a la ubicación de las ruedas y llantas, con el objetivo de evitar que estos volúmenes negativos en la estructura puedan alterar el flujo y dificultar la posterior obtención de resultados en ANSYS Fluent®.

Con el mismo objetivo, se lleva a cabo un corte plano sobre la base del coche, para así disponer de una superficie inferior totalmente regular y plana. Tras el corte, una superficie plana se encarga de tapar y cerrar toda la parte inferior del vehículo. El resultado final de las zonas laterales es el que se observa a continuación en la Figura 3.11.

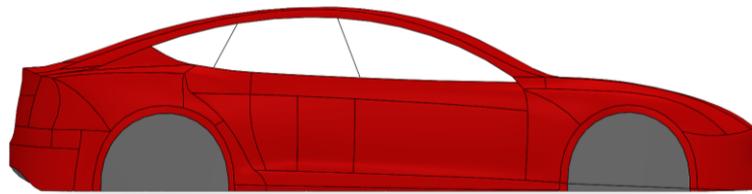


Figura 3.11: Vista lateral del del Modelo CAD. Eliminación de los huecos para los neumáticos, y reconstrucción del bajo del vehículo. (*Solidworks*®)

3.1.2.4. Cosido de superficies y generación del volumen del sólido

Una vez finalizadas las operaciones de simplificación geométrica, es necesario llevar a cabo -en Solidworks®- un cosido de las superficies¹⁷ que conforman el carenado, para posteriormente rellenar el hueco en el interior del vehículo, y poder exportar a ANSYS el modelo como un único *part*¹⁸.

Además, esta herramienta de cosido de las superficies permite comprobar que no existen huecos entre superficies, que puedan provocar a posteriori fallos en el mallado del vehículo.

Cabe mencionar que dentro de la propia operación de cosido de superficies, es posible indicar en la configuración de la operación, que el volumen encerrado se rellene para formar un sólido.

Tras todas estas modificaciones y simplificaciones del vehículo, el modelo ya está listo para ser introducido al simulador de ANSYS. A continuación, puede observarse una vista comparativa del modelo CAD antes (Figura 3.12 izquierda) y después (Figura 3.12 derecha) de las simplificaciones implementadas en la presente sección

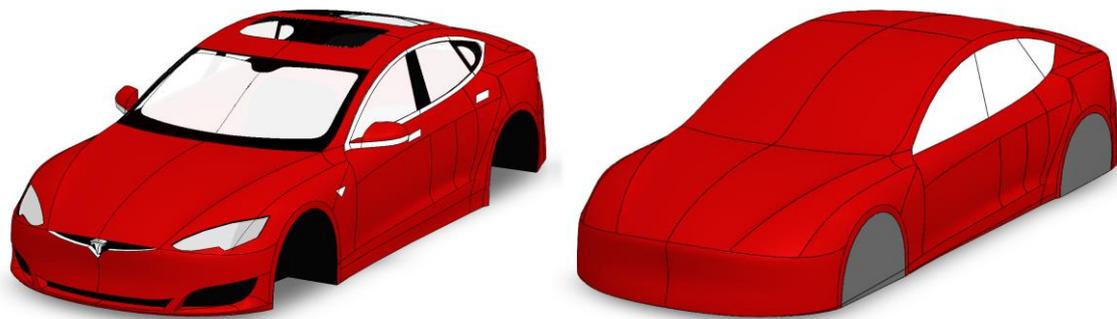


Figura 3.12: Vista isométrica comparativa del modelo CAD, antes (izquierda) y después (derecha) de las simplificaciones. (Solidworks®)

El modelo de la anterior Figura 3.12 derecha, es el modelo 3D que posteriormente se introduce en ANSYS para llevar a cabo el análisis de independencia de malla. Una vez obtenido el tamaño de malla óptimo, es cuando se añade a este modelo CAD un alerón trasero, para repetir el análisis por elementos finitos -con el mismo tamaño de elemento en la malla- y así comparar los resultados obtenidos en ambos casos.

Dado que la presente sección se centra en el modelado de la geometría, a continuación, en la siguiente Sección 3.1.3 puede observarse el diseño de alerón trasero implementado. Más adelante en el presente documento, puede encontrarse el análisis de independencia de malla en la Sección 3.2.2, y el análisis final con alerón en la Sección 4.2.

¹⁷ Se refiere a la herramienta de modelado CAD que permite cerrar pequeños huecos entre superficies y curvas.

¹⁸ En ANSYS, se emplea el termino *part* para hacer referencia a un sólido o cuerpo individual.

3.1.3. Diseño del alerón

Para la implementación del alerón, se toma como punto de partida el diseño del vehículo sin alerón, correspondiente a la anterior Sección 3.1.2. Sobre la parte trasera del vehículo, se procede a la implementación del alerón en Solidworks®.

Se trata de un alerón con un único soporte, centrado en el eje de simetría. La geometría de dicho alerón consiste en un prisma tumbado de base triangular, unido al mencionado soporte (véase coloreado en blanco, en la siguiente Figura 3.13).

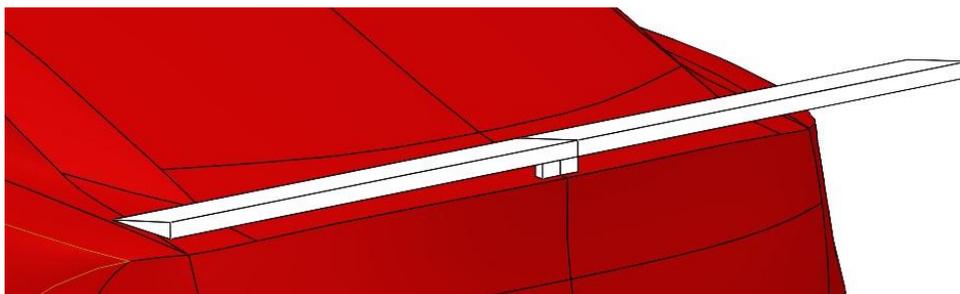


Figura 3.13: Modelado CAD del Alerón diseñado, con 10° de inclinación. (Solidworks®)

Atendiendo a las dimensiones del alerón, estas dependen del ángulo de inclinación del alerón, ya que, como se ha comentado previamente, se diseñan alerones con ángulos de inclinación de 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55° y 60°. Es por ello por lo que no se fijan ni las dimensiones de altura del alerón ni la longitud de la base.

Se introduce el perfil triangular del alerón en una circunferencia de radio 175 mm, siendo este, el valor fijo de la longitud de la hipotenusa del triángulo que conforma el alerón. Las dimensiones de la base y altura de dicho triángulo varían en función de la inclinación de la pendiente del alerón. Con lo que, a mayores ángulos de inclinación del alerón, la altura será mayor y la base será menor. En la siguiente Tabla 3.1, se recopilan las dimensiones básicas del alerón, obtenidas en función del ángulo de inclinación de este.

Tabla 3.1: Dimensiones básicas del alerón en función del ángulo de inclinación del mismo.

Ángulo (°)	Base (mm)	Altura (mm)
5	174.33	15.25
10	172.34	30.39
15	169.04	45.29
20	164.44	59.85
25	158.60	73.96
30	151.55	87.50
35	143.35	100.37
40	134.06	112.48
45	123.74	123.74
50	112.48	134.06
55	100.37	143.35
60	87.50	151.55

Por otro lado, el ancho del alerón es de 1800 mm, llegando prácticamente de un extremo a otro del vehículo.

3.1.4. Preprocesado de la geometría en *DesignModeler*[®]

Posteriormente a las simplificaciones realizadas sobre el modelo 3D del Tesla, se importa el archivo en formato ‘.sat’ proveniente de Solidworks[®] a ANSYS[®], concretamente al *plug-in* de modelado *DesignModeler*[®].

En este programa se define la geometría final, que consiste en generar el volumen de aire que rodea el vehículo y que posteriormente será mallado. El preprocesado de la geometría ha seguido los pasos que se describen a continuación.

En primer lugar, se dibujan dos sketches para las dos cámaras que envuelven al vehículo (véase la Figura 3.14).

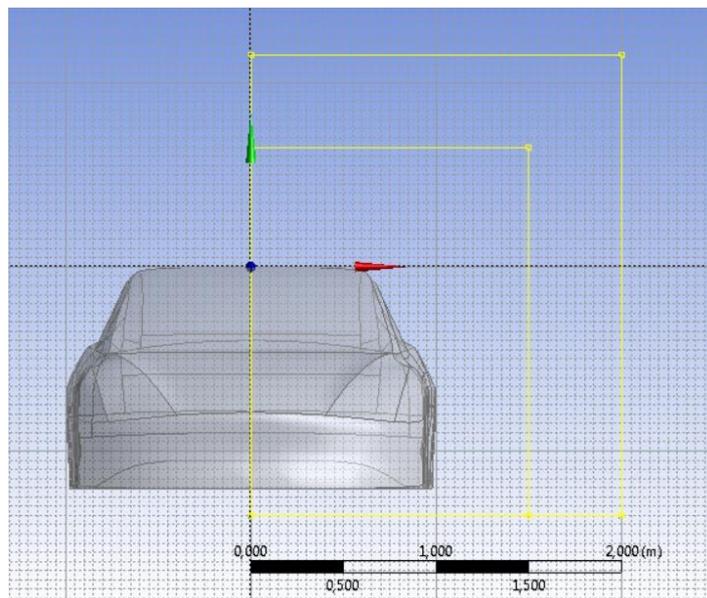


Figura 3.14: Sketches para las dos cámaras que envuelven al vehículo. (*DesignModeler*[®])

Puede observarse como cada sketch se inicia a una distancia de 16 cm por debajo del suelo del vehículo, ya que esta es la altura real a la que se encontraría el vehículo con respecto a la superficie si este llevase ruedas. Las dimensiones de ambos sketches se muestran a continuación en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Dimensiones de los sketches de las cámaras dibujadas en *DesignModeler*[®]. (*elaboración propia*)

Sketch	Ancho [m]	Alto [m]
Cámara grande	2.0	2.5
Cámara pequeña	1.5	2.0

A partir de los sketches anteriores, se realizan las extrusiones de las cámaras dibujadas. Para la cámara grande, se busca una longitud total de 12 m. Como el vehículo se encuentra centrado en los ejes, la extrusión se efectúa 5.5 m por la parte delantera y 6.5 m por la parte trasera. Para esta cámara se activa la opción de ‘Add frozen’.

De la misma forma, para la cámara pequeña se busca una longitud de 8m, luego se extruye 3.5 m por la parte delantera y 4.5 m por la parte trasera. Para esta cámara se activa la opción de ‘Add material’¹⁹.

El resultado puede observarse a continuación en la Figura 3.15.

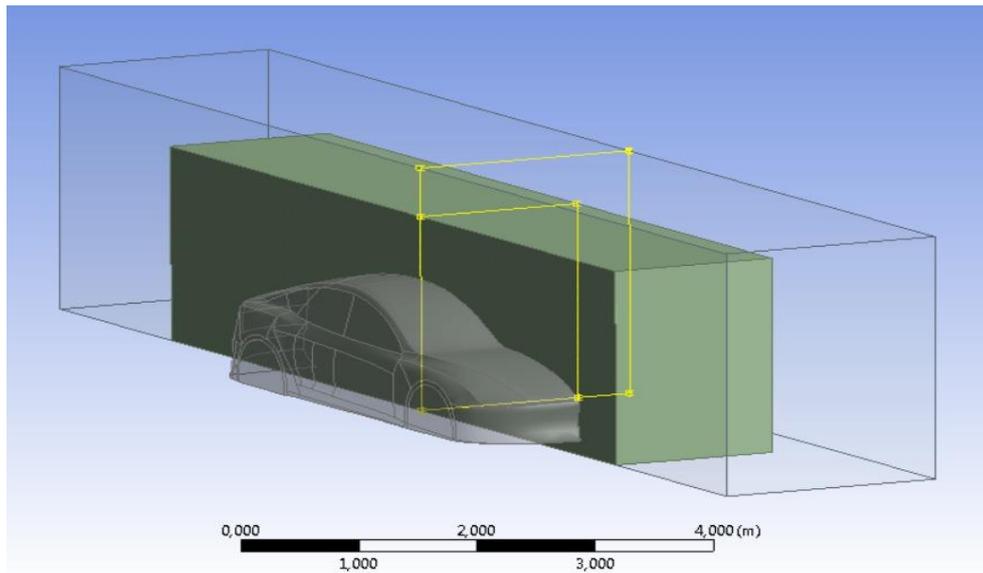


Figura 3.15: Extrusiones de las cámaras que envuelven el vehículo. (*DesignModeler*®)

A continuación, se utiliza la operación *Boolean* en 2 etapas, para combinar los volúmenes. Primero se realiza un *Boolean* para suprimir la cámara pequeña de la cámara grande, pero conservando la cámara pequeña. Esta cámara pequeña se emplea posteriormente en el mallado final de la geometría, para establecer una mallado a dos niveles que permita disminuir el cálculo computacional.

En segundo lugar, se realiza otro *Boolean* para suprimir el volumen del vehículo de la cámara pequeña, esta vez sin conservar la geometría del vehículo. El objetivo es generar un volumen negativo que incorpore el espacio que ocuparía el automóvil en dicho lugar.

Dado que el coche se encuentra centrado en los ejes, los sketches y las extrusiones se han realizado directamente por su plano de simetría. Esto se lleva a cabo porque el vehículo es simétrico y por tanto los resultados proporcionados por el simulador, serán iguales para ambos lados. De esta forma se consigue menor tiempo de simulación, obteniendo los mismos resultados.

¹⁹ Las opciones ‘Add frozen’ y ‘Add material’ permiten distinguir posteriormente ambas cámaras en el programa ANSYS, ya que en caso contrario, se verían fusionadas.

Así pues, el volumen restante es el volumen por el que circulará el flujo de aire, y por tanto la geometría final a mallar. El resultado final, es el volumen que se muestra en la siguiente Figura 3.16.

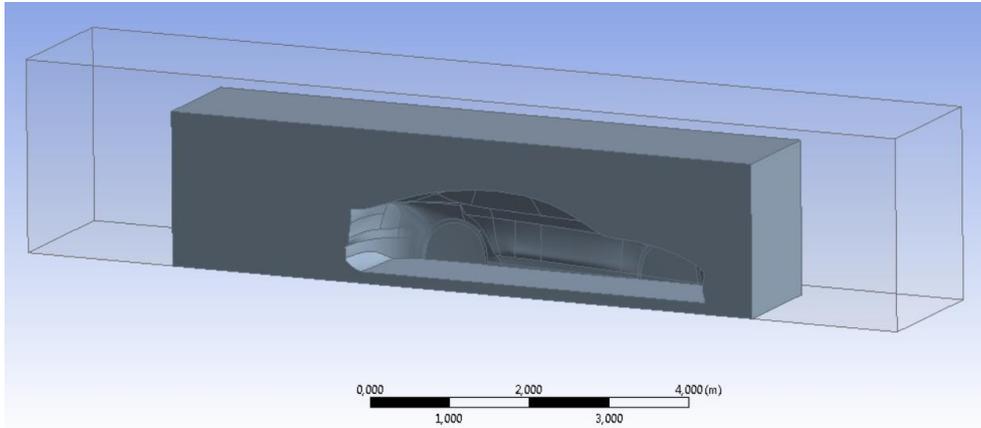


Figura 3.16: Volumen final obtenido durante el preprocesado de la geometría de estudio.
(*DesignModeler*[®])

Cabe mencionar, que todo el proceso descrito en la presente sección se lleva a cabo tanto para el caso sin alerón, como para todos los casos con alerón.

3.2. MALLADO

3.2.1. Introducción

El mallado es un paso de suma importancia para garantizar la obtención de resultados fiables y precisos. La preparación de la malla consiste en subdividir el modelo 3D en pequeñas partes -elementos-, las cuales están conectadas entre sí -por nodos-, creando una red.

La precisión de los resultados depende de la calidad de la malla. El tamaño de los elementos es uno de los parámetros que dotan a la malla de calidad, por tanto, a menor tamaño de elementos, mayor precisión.

Previamente al mallado de la geometría, será necesario hacer un estudio o análisis de independencia de malla. Se sabe que, a menor tamaño de malla, el tiempo de cálculo es mayor y la fiabilidad del resultado también aumenta. Este análisis permite observar de forma aproximada, cuál el mínimo número de celdas a partir del cual ya se considera que permite obtener unos resultados válidos. De esta forma, se consigue minimizar el tiempo de cálculo computacional, sin con ello sacrificar la calidad de los resultados.

Por último una vez seleccionados los parámetros óptimos para el mallado del modelo, es cuando se llevan a cabo las simulaciones finales del modelo: una simulación sin alerón, y un conjunto de simulaciones con alerones de distintos ángulos.

Cabe mencionar, que la configuración de las simulaciones empleada para el Análisis de Independencia de Malla es idéntica a la configuración de las simulaciones finales. En el presente capítulo únicamente se muestran los resultados comparativos del análisis, pero no se profundiza en la propia configuración de la simulación.

Para un mayor detalle sobre como la simulación se configura en ANSYS Fluent[®], se recomienda la lectura de la Sección 3.3.

3.2.2. Análisis de Independencia de Malla

3.2.2.1. Procedimiento

El análisis de independencia de malla del presente Trabajo Final de Grado consiste en llevar a cabo un conjunto simulaciones en ANSYS Fluent[®] con la geometría del vehículo mallada a diferentes tamaños de malla.

A partir de los resultados de dichas simulaciones, se extraen las fuerzas que aparecen en las direcciones paralela y perpendicular al movimiento del flujo de aire. Con estas fuerzas, es posible obtener de forma directa los coeficientes de arrastre y sustentación del modelo.

Despejando ' C_D ' en la Ecuación (2.1) de la Fuerza de Arrastre, se obtiene el Coeficiente de Arrastre -*Drag Coefficient*, en inglés-, tal y como se muestra en la Ecuación (3.1).

$$C_D = \frac{2F_D}{V^2 \cdot A \cdot \rho} \quad (3.1)$$

Del mismo modo, despejando ‘ C_L ’ en la Ecuación (2.2) de la Fuerza de Sustentación, se obtiene el Coeficiente de Sustentación -*Lift Coeficient*, en inglés-, tal y como se muestra en la Ecuación (3.2).

$$C_L = \frac{2F_L}{V^2 \cdot A \cdot \rho} \quad (3.2)$$

Para el presente análisis se consideran dos variables: la velocidad de movimiento, y el tamaño de elemento global²⁰. Se aprovecha este análisis de independencia de malla, para observar la influencia de la velocidad del flujo de aire sobre los coeficientes de arrastre y sustentación. Es por ello que se llevan a cabo simulaciones con una velocidad de movimiento de 40 y 90 m/s. Con respecto al tamaño de elemento, se emplean tamaños de 600, 500, 400, 300, 200, 150, 100, 90, 80, 70, 60, 50 y 40 mm. De esta forma también se puede observar la influencia de la velocidad en los resultados.

3.2.2.2. Análisis de Resultados

Los resultados de Fuerzas y Coeficientes de Arrastre y sustentación, obtenidos para una velocidad de movimiento de 40 m/s, pueden observarse a continuación en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Análisis de Independencia de malla. Fuerzas y Coeficientes de Arrastre y sustentación para distintos tamaños de elemento, obtenidos para una velocidad de movimiento de 40 m/s. (*elaboración propia*)

Element size [mm]	F_x [N]	F_y [N]	C_D [-]	C_L [-]
600	334.32	-337.61	0.1457	-0.1472
500	323.75	-429.72	0.1411	-0.1873
400	336.43	-273.38	0.1467	-0.1192
300	323.83	-259.07	0.1412	-0.1129
200	330.28	-408.75	0.1440	-0.1782
150	330.02	-261.67	0.1439	-0.1141
100	337.45	-239.94	0.1471	-0.1046
90	318.00	-382.09	0.1386	-0.1666
80	309.75	-196.27	0.1350	-0.0855
70	323.89	-285.04	0.1413	-0.1242
60	323.29	-216.68	0.1409	-0.0944
50	323.12	-231.19	0.1409	-0.1008
40	324.12	-227.47	0.1413	-0.0991

²⁰ En ANSYS, se refiere al parámetro “*Global Element Size*” que caracteriza el tamaño general de los elementos del modelo

Ploteando los resultados de las Fuerzas en el Eje X para 40 m/s, podemos observar cómo se estabiliza el valor de la fuerza en el rango entre 70 y 40 mm de tamaño de elemento (véase la siguiente Figura 3.17).

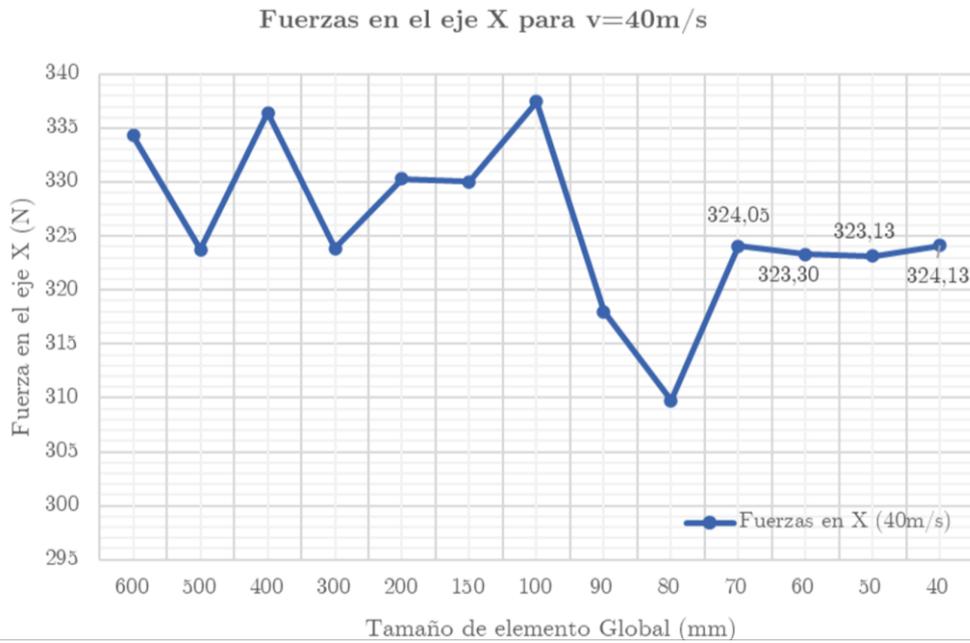


Figura 3.17: Análisis de Independencia de Malla. Estabilización del valor de la Fuerza en el eje X para 40 m/s. (*elaboración propia*)

Del mismo modo, ploteando los resultados de las Fuerzas en el Eje Y para 40 m/s, podemos observar cómo en este eje se estabiliza el valor de la fuerza en el rango entre 60 y 40 mm de tamaño de elemento (véase la siguiente Figura 3.18).

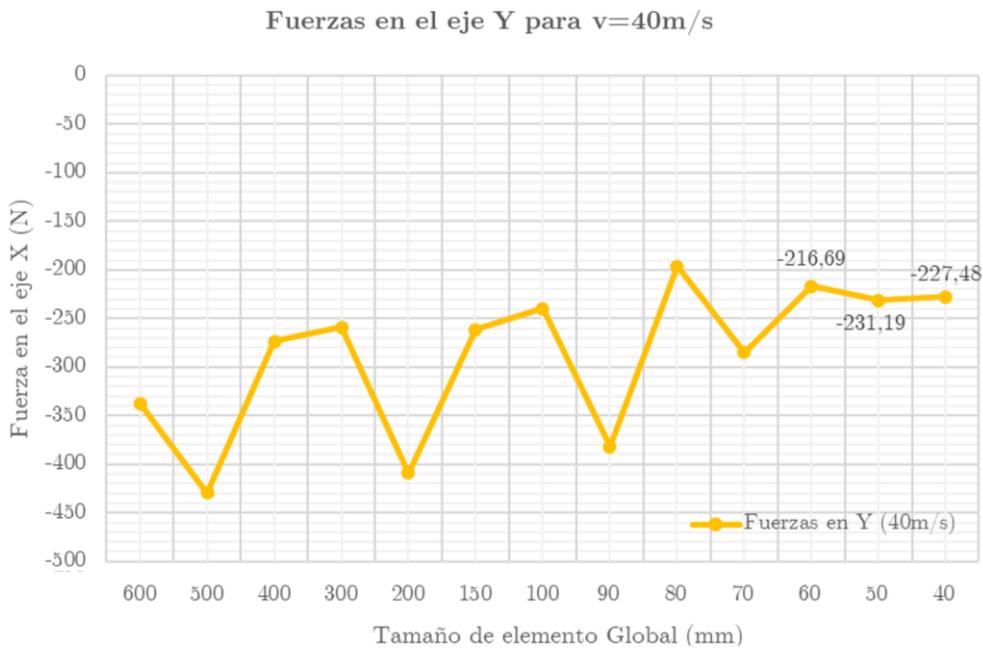


Figura 3.18: Análisis de Independencia de Malla. Estabilización del valor de la Fuerza en el Eje Y para 40 m/s. (*elaboración propia*)

Por otro lado, los resultados de Fuerzas y Coeficientes de Arrastre y sustentación, obtenidos para una velocidad de movimiento de 90 m/s, pueden observarse a continuación en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Análisis de Independencia de malla. Fuerzas y Coeficientes de Arrastre y sustentación para distintos tamaños de elemento, obtenidos para una velocidad de movimiento de 90 m/s. *(elaboración propia)*

Element size [mm]	F_x [N]	F_y [N]	C_D [-]	C_L [-]
600	1710.60	-1649.47	0.1473	-0.1420
500	1635.53	-2184.00	0.1408	-0.1881
400	1694.99	-1446.14	0.1460	-0.1245
300	1632.73	-1333.30	0.1406	-0.1148
200	1664.93	-2037.12	0.1434	-0.1754
150	1691.75	-1278.80	0.1457	-0.1101
100	1708.59	-1202.56	0.1471	-0.1035
90	1598.06	-1983.95	0.1376	-0.1708
80	1574.95	-1004.86	0.1356	-0.0865
70	1646.22	-1423.35	0.1418	-0.1224
60	1638.46	-1117.25	0.1411	-0.0962
50	1638.97	-1194.83	0.1411	-0.1029
40	1638.73	-1190.93	0.1411	-0.1025

Ploteando los resultados de las Fuerzas en el Eje X para 90 m/s, podemos observar cómo se estabiliza el valor de la fuerza en el rango entre 60 y 40 mm de tamaño de elemento (véase la siguiente Figura 3.19).

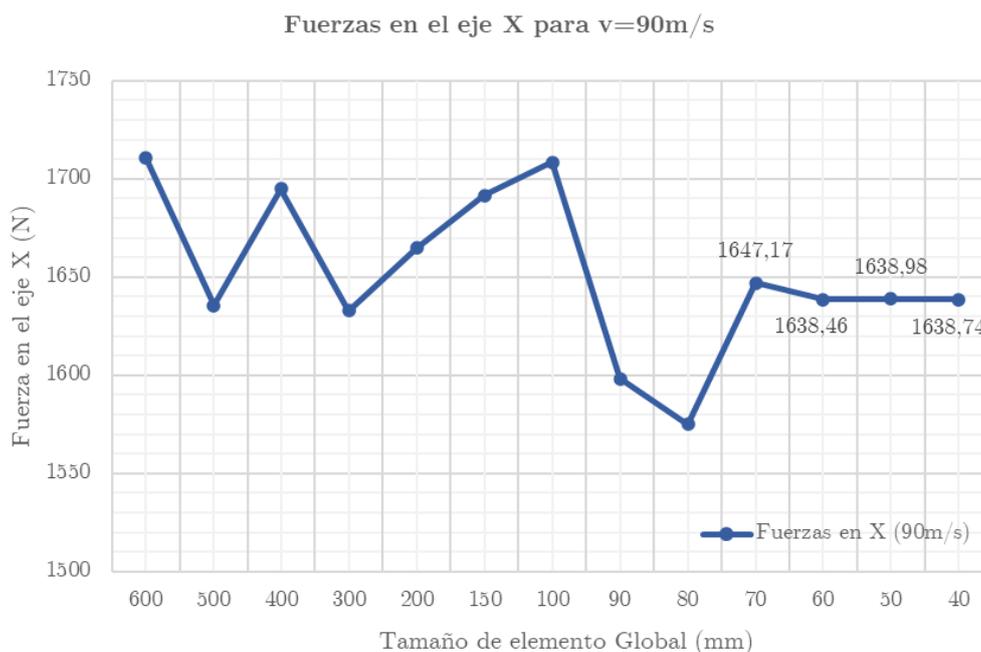


Figura 3.19: Análisis de Independencia de Malla. Estabilización del valor de la Fuerza en el Eje X para 90 m/s. *(elaboración propia)*

En último lugar, planteando los resultados de las Fuerzas en el Eje Y para 90 m/s, podemos observar cómo en este eje se estabiliza el valor de la fuerza en el rango entre 50 y 40 mm de tamaño de elemento (véase la siguiente Figura 3.20).

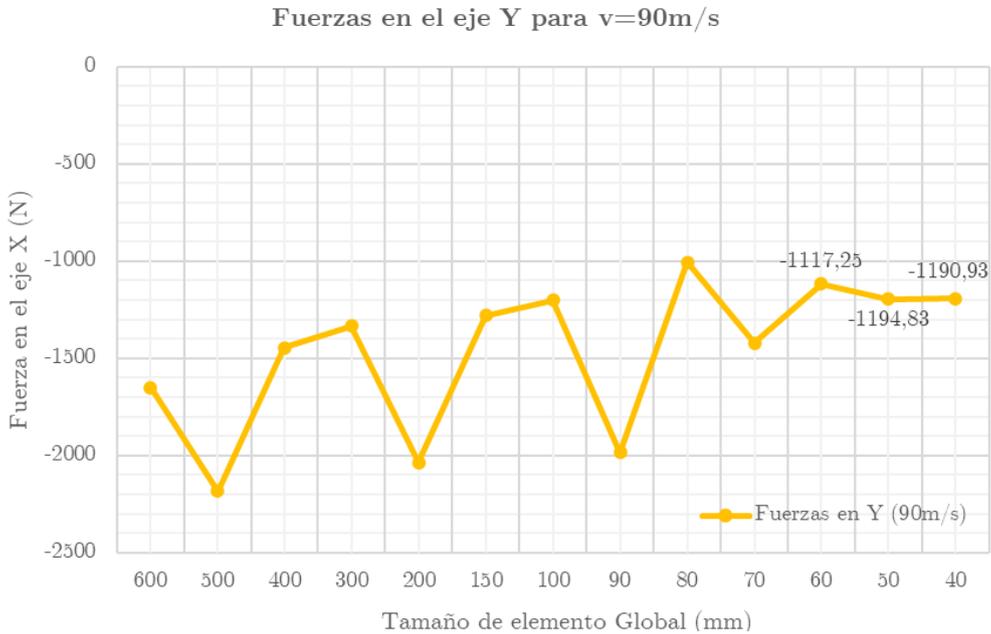


Figura 3.20: Análisis de Independencia de Malla. Estabilización del valor de la Fuerza en el Eje Y para 90 m/s. (elaboración propia)

3.2.2.3. Conclusiones obtenidas

Como se puede comprobar, a mayor velocidad de movimiento, las fuerzas que aparecen sobre el vehículo son mayores. En cambio, los coeficientes de arrastre y sustentación no varían prácticamente. De esta forma, se puede llegar a la conclusión de que los coeficientes de arrastre y sustentación son independientes de la velocidad a la que circule el vehículo.

En el simulador explicado en el ANEXO B, el tiempo que tarda el vehículo en realizar una vuelta en un circuito, depende de los valores de los coeficientes de arrastre y sustentación y no de la velocidad del flujo de aire a la que se haya simulado en ANSYS Fluent. Es por ello por lo que, en lo que sigue, las simulaciones que se realizan a lo largo del presente Trabajo Final de Grado utilizan una velocidad de movimiento de 40 m/s.

Por otro lado, prestando atención a las gráficas obtenidas, se puede observar cómo los resultados de las fuerzas que aparecen sobre el vehículo van variando en mayor medida con tamaños de malla más grandes. Por lo general, en un Análisis de Independencia de Malla los resultados deberían haber aparecido representados con una curva asintótica en la gráfica, en lugar de las observadas oscilaciones.

Esto se debe a que el tamaño de malla de las primeras simulaciones es tan grande, que la falta de precisión en los resultados provoca valores muy dispares. No obstante, este fenómeno se va atenuando conforme se reduce el tamaño de malla, hasta alcanzar unos resultados válidos.

Por último, se puede observar como a partir de un tamaño de elemento de 70 mm para las fuerzas en el eje X y 60 mm para las fuerzas en el eje Y, los resultados varían muy poco. Es por esto, que con dichos tamaños de malla y con tamaños de malla inferiores, los resultados ya se pueden considerar válidos.

Con todo esto, y teniendo en cuenta que, a menor tamaño de malla, tanto la calidad de los resultados como el tiempo requerido para las simulaciones en ANSYS Fluent® es mayor, se selecciona un tamaño de elemento de 50 mm. Este valor supone un equilibrio entre calidad de resultados y velocidad de simulación.

3.2.3. Mallado final del modelo

A partir de los resultados del análisis de independencia de malla expuestos en el apartado anterior del presente proyecto, se busca crear un mallado de calidad, que posteriormente permita obtener los resultados más reales posibles.

Es por ello por lo que, aplicando varios parámetros de calidad y teniendo en cuenta el tamaño de elemento seleccionado (50 mm), se realiza el mallado según se expone a continuación.

3.2.3.1. Configuración general del mallado

Como punto de partida, se selecciona el tetraedro como forma principal de los elementos. A continuación, se utilizan unos ajustes de mallado general, donde se selecciona preferencias físicas de CFD, por el hecho de simular el vehículo en aire. Se selecciona un tamaño de elemento genérico de 500 mm (véase la Figura 3.21 izquierda). Este tamaño de elemento se asigna automáticamente a aquellas partes de la geometría en las que no se especifica otro tamaño –tal y como sucede en el volumen exterior-.

También se activan las opciones de *Capture Curvature* y *Capture Proximity* (véase la Figura 3.21 derecha), con el fin de mallar mejor las zonas donde se encuentren superficies curvas o con más detalle y dificultad.

Display		Sizing	
Display Style	Use Geometry Setting	Use Adaptive Sizing	No
Defaults		<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,2)
Physics Preference	CFD	<input type="checkbox"/> Max Size	Default (1, m)
Solver Preference	Fluent	Mesh Defeaturing	Yes
Element Order	Linear	<input type="checkbox"/> Defeature Size	1,e-003 m
<input type="checkbox"/> Element Size	0,5 m	Capture Curvature	Yes
Export Format	Standard	<input type="checkbox"/> Curvature Min Size	2,e-003 m
Export Preview Surface Mesh	No	<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	6,°
		Capture Proximity	Yes
		<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	5,e-003 m
		<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	5
		Proximity Size Function Sources	Faces and Edges
		Bounding Box Diagonal	12,42 m
		Average Surface Area	3,0922 m ²
		Minimum Edge Length	4,7149e-003 m

Figura 3.21: Configuración General del Mallado (1/2). (ANSYS Mechanical®)

Para el presente Trabajo Final de Grado, se utiliza el *Skewness* -del inglés, oblicuidad-, como parámetro indicativo para evaluar la calidad del mallado (véase más adelante la Figura 3.23 izquierda). Este parámetro, determina cómo de próximo a una celdilla ideal es cada una de las celdas, siendo 0.00 el valor ideal. Luego, se buscan valores de *skewness* lo más bajos posibles.

En la siguiente Figura 3.22, una escala permite verificar con mayor detalle, todo el espectro de valores posibles de oblicuidad.

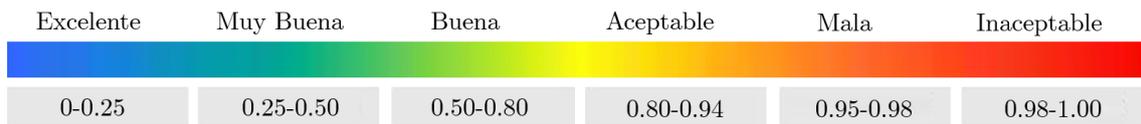


Figura 3.22: Escala de calidad del Espectro de valores posibles para el parámetro de Oblicuidad. *(elaboración propia)*

Por último, también se activa la opción de *Inflation*, la cual permite hacer un mallado más refinado en la zona de la capa límite, consiguiendo más nodos y por lo tanto más puntos donde se puedan obtener resultados en la simulación. Tal y como se observa en la siguiente Figura 3.23 derecha, se asignan un total de 10 capas.

Quality		Inflation	
Check Mesh Quality	Yes, Errors	Use Automatic Inflation	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Target Skewness	0,8	Inflation Option	First Layer Thickness
Smoothing	High	<input type="checkbox"/> First Layer Height	2,22e-003 m
Mesh Metric	Skewness	<input type="checkbox"/> Maximum Layers	10
<input type="checkbox"/> Min	6,9462e-004	<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,45
<input type="checkbox"/> Max	0,91666	Inflation Algorithm	Pre
<input type="checkbox"/> Average	0,22348	View Advanced Options	No
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	9,8986e-002		

Figura 3.23: Configuración General del Mallado (2/2). *(ANSYS Mechanical®)*

Este es el mallado genérico que se aplica automáticamente sobre toda la geometría del modelo. No obstante, en la siguiente sección, se indica la configuración particular añadida con el objetivo de refinar el tamaño de elemento en determinadas partes.

3.2.3.2. Configuración particular

Continuando con el mallado, se realiza un *Body sizing* a la cámara pequeña de la geometría, utilizando un tamaño de elemento de 50 mm, que es el valor obtenido del análisis de independencia de malla. La configuración detallada de dicho *Body Sizing*, puede observarse más adelante en la Figura 3.24 izquierda.

Para las superficies de dicha cámara que conforman el habitáculo del vehículo, se añade un *Face sizing* con un tamaño de elemento de 20 mm. Este segundo nivel de refinado permite capturar mejor la geometría irregular del carenado del Tesla, sobre todo en las zonas con mayor curvatura. La configuración detallada de este *Face Sizing*, puede observarse más adelante en la Figura 3.24 derecha.

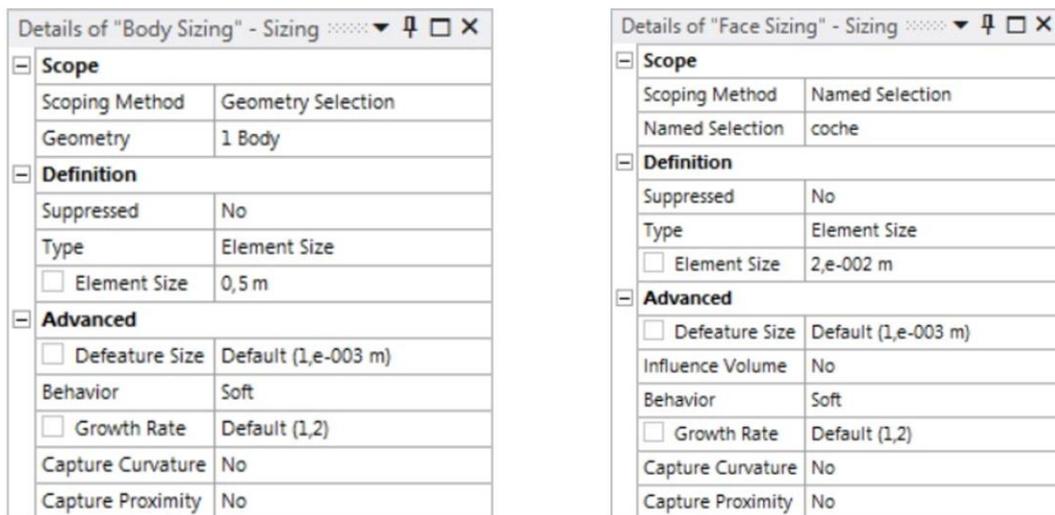


Figura 3.24: Configuración particular del Mallado. *Body Sizing* (izquierda) y *Face Sizing* (derecha) empleados en el modelo. (ANSYS Mechanical®)

Gracias a estas dos operaciones, se consigue que el tamaño de malla sea más pequeño cuanto más nos aproximamos a la superficie del vehículo, ya que este es el elemento a estudiar y donde más precisión se necesita.

Aplicando todos estos ajustes, se obtiene la malla sobre el modelo del vehículo sin alerón, que se muestra en la Figura 3.25.

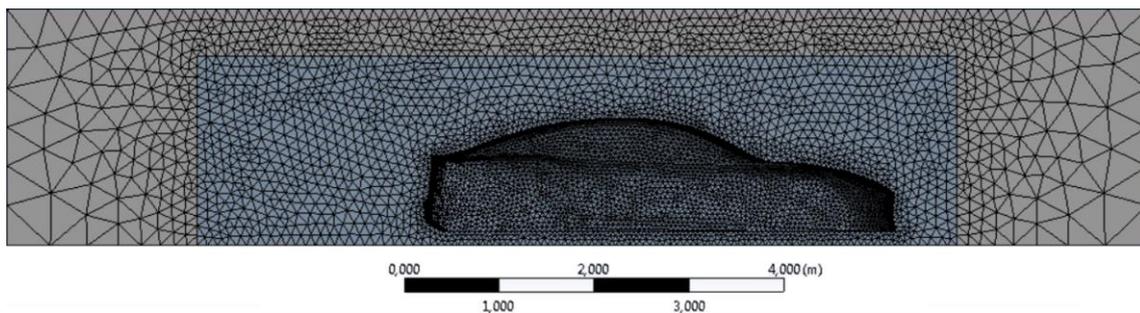


Figura 3.25: Mallado final sobre el modelo del vehículo sin alerón. (ANSYS Mechanical)

A modo de comprobación de la calidad de la malla, se plotea el gráfico del *skewness* (oblicuidad) que se muestra en la Figura 3.26.

Este gráfico, permite verificar si los ajustes establecidos para el mallado y tamaños de elemento seleccionados han proporcionado una malla de calidad. En el gráfico anterior, se puede observar como la mayoría de los elementos están comprendidos entre 0.13 y 0.38 de *skewness*, teniendo un valor medio de 0.22, lo que indica un nivel muy bueno de mallado.

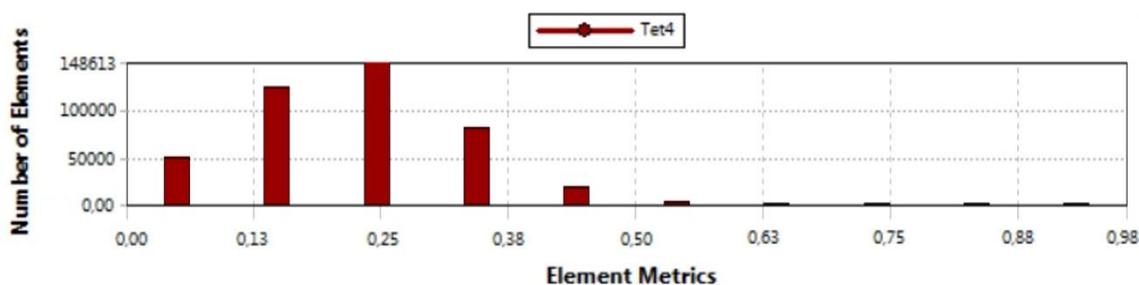


Figura 3.26: Gráfico representativo de la calidad de la malla, según el criterio de Oblicuidad -Skewness-. (ANSYS Mechanical®)

De esta forma, las características del mallado quedan establecidas y se aplican en los apartados siguientes del documento del presente proyecto, tanto para la simulación del vehículo sin alerón, como para la tanda de simulaciones con alerones a distinto ángulo de inclinación.

3.2.3.3. Aspectos previos a la configuración de la simulación

Antes de finalizar con el programa de mallado, se definen las zonas de la superficie de la geometría para posteriormente, en el simulador, poder establecer correctamente las condiciones de contorno.

En primer lugar, la superficie que se encuentra en la parte delantera del vehículo se define como *‘entrada’*, que es la zona por donde entra el flujo de aire. De la misma forma se define la superficie de la parte posterior de la geometría como *‘salida’*, que es la zona por donde sale el flujo de aire de la cámara. A continuación, se define la superficie inferior como *‘suelo’* y la superior como *‘techo’*. La superficie correspondiente a la cara donde se sitúa el hueco del vehículo se define como *‘plano simetría’* y a la superficie opuesta, se le da el nombre de *‘pared’*. Por último, al conjunto de superficies que definen el hueco del coche, reciben el nombre de *‘coche’*.

3.3. CONFIGURACIÓN DE LAS SIMULACIONES

Una vez ya se tiene la geometría mallada correctamente, se abre el archivo en ANSYS Fluent[®], módulo de ANSYS que lleva a cabo las simulaciones CFD. Aplicando la configuración adecuada al caso de estudio, este programa permite, mediante simulaciones, obtener multitud de datos derivados de la geometría del vehículo y del flujo de aire que atraviesa.

En el presente proyecto, existe un interés principal por la obtención de las fuerzas resultantes que aparecen sobre el vehículo, para así poder obtener los coeficientes de arrastre y sustentación de cada configuración aerodinámica.

3.3.1. Preparación de las simulaciones

Para el presente Trabajo Final de Grado, se definen los siguientes parámetros de la configuración de ANSYS Fluent[®] para poder llevar a cabo correctamente las simulaciones.

3.3.1.1. Modelo de Cálculo

Primeramente, en la configuración de la solución se define el tipo de modelo de cálculo. Dentro de los Modelos de turbulencia que posee ANSYS Fluent[®], en función de la naturaleza del problema, existen varios métodos para solucionar la turbulencia asociada a un flujo.

En este caso se define como modelo viscoso con *k-epsilon* realizable. El modelo *k-epsilon* realizable contiene una formulación mejorada para la viscosidad turbulenta y el ratio de disipación -con respecto al modelo estándar-, y donde algunas constantes del modelo estándar ahora son variables.

También se añade la gravedad al modelo, con valor de -9.81 m/s^2 y se define el material que atraviesa la geometría, que en este caso es aire. A continuación, se definen las condiciones de contorno.²¹

3.3.1.2. Condiciones de Contorno

Para definir las condiciones de contorno, se utilizan las *Named Selections*. Las *Named Selections*, son las zonas de la superficie de la geometría definidas en la anterior Sección 3.2.3.3. Cada superficie, tiene asignada unas condiciones de contorno diferentes.

²¹ Véase en ANSYS Fluent la sección de Condiciones de Contorno, referida por su traducción al inglés, *Boundary Conditions*.

La superficie ‘*suelo*’ es de tipo *wall*. Se selecciona la opción de *moving wall*, junto con la opción de *absolute*. Esto se establece para poder asignar al suelo una velocidad de movimiento de 40m/s (tal y como se indica más adelante, en la Sección 3.2.2.2) en sentido negativo (-1) del Eje Z, que es la dirección en la que está orientado el movimiento del vehículo.

En realidad, el vehículo se desplazaría a través del aire, sobre una superficie como podría ser el asfalto. Teniendo en cuenta la relatividad del movimiento, mediante esta configuración se está considerando el vehículo estático y el suelo y el aire en movimiento, aspecto que permite obtener el mismo resultado.

La superficie ‘*entrada*’ es de tipo *velocity-inlet*. Se selecciona la opción de ‘*magnitud y dirección*’, indicando una velocidad de entrada del aire de 40m/s orientada en sentido negativo (-1) del Eje Z. Se configura con *Intensity and Hydraulic Diameter* con un diámetro hidráulico de 0.556 m.

El diámetro hidráulico puede obtenerse de forma directa a partir del cálculo que se muestra en la Ecuación (3.3).

$$\text{Diámetro hidráulico} = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}} \quad (3.3)$$

La superficie ‘*salida*’ es de tipo *pressure-outlet*. Se selecciona la opción de *Intensity and Hydraulic Diameter* con un diámetro hidráulico de flujo de retorno de 0.556 m, obtenido de la ecuación anterior. Se indica también, que la sección de salida está abierta a la atmosfera, dándole así un valor de 0 Pa de presión manométrica (*gauge pressure*)²².

Las superficies ‘*techo*’, ‘*pared*’ y ‘*plano de simetría*’ son de tipo *symmetry*. Por último, la superficie ‘*coche*’ es de tipo *wall*. Un resumen de todas las condiciones de contorno puede observarse en la siguiente Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Asignación de las Named Selections (*ANSYS Fluent*®)

Named Selection	Tipo
Entrada	Velocity-Inlet
Salida	Pressure-Outlet
Techo	Symmetry
Pared	Symmetry
Plano Simetría	Symmetry
Coche	Wall
Suelo	Wall

²² Una presión manométrica de 0 Pa, se corresponde con una presión absoluta de 1 atmósfera.

3.3.1.3. Otros Ajustes

Otros ajustes que configurar son los *Residual Monitors*, los cuales se establecen todos en el valor de 0.001.

Igualmente, es necesario establecer todos los coeficientes para los controles de la solución -en inglés, *Solution controls*-. Los valores establecidos, pueden observarse en la Tabla 3.6 ubicada más adelante.

Tabla 3.6: Asignación de los coeficientes correspondientes a los controles de la Solución. (*ANSYS Fluent*®)

Parámetro del <i>Solution control</i>	Coefficiente
Presión	0.3
Densidad	1.0
Fuerzas del cuerpo	0.5
Momento	0.3
Energía cinética turbulenta	0.4
Ratio de disipación turbulenta	0.4
Viscosidad turbulenta	0.5

3.3.1.4. Inicialización del modelo

Tras todos estos ajustes, se inicializa el modelo y se establece un número de iteraciones máximo que se desea que realice el simulador para encontrar la solución.

En este caso se selecciona un total de 1000 iteraciones. De esta forma el modelo ya está preparado para poder ser solucionado por el *Solver*.

CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. SIMULACIÓN SIN ALERÓN

Previamente a simular el vehículo con las diferentes configuraciones del alerón, se realiza la simulación del vehículo sin el alerón para posteriormente poder observar que influencia tiene la implementación del alerón sobre el vehículo.

4.1.1. Fuerzas resultantes

Tras ejecutar en ANSYS Fluent® la simulación para el caso del vehículo sin alerón, se plotean las Fuerzas resultantes, obteniendo por pantalla el *script* que se muestra a continuación en la Figura 4.1.

```

Forces
Coefficients
Zone
Pressure
Viscous
Total
coche
(2644.439 -308.28403 -291.78201) (2.0697954 2.4742296 -52.933949) (2646.5088 -305.8098 -344.71596)
(4317.4514 -503.32086 -476.3788) (3.3792577 4.0395585 -86.422773) (4320.8306 -499.2813 -562.80157)
-----
Net
(2644.439 -308.28403 -291.78201) (2.0697954 2.4742296 -52.933949) (2646.5088 -305.8098 -344.71596)
(4317.4514 -503.32086 -476.3788) (3.3792577 4.0395585 -86.422773) (4320.8306 -499.2813 -562.80157)
-----
Forces - Direction Vector (0 0 -1)
Forces [N]
Zone
Pressure Viscous Total Coefficients
coche
291.78201 52.933949 344.71596 476.3788 86.422773 562.80157
-----
Net
291.78201 52.933949 344.71596 476.3788 86.422773 562.80157

```

Figura 4.1: Fuerzas resultantes sobre el carenado para el caso del vehículo sin alerón.
(ANSYS Fluent®)

Con esta simulación, se obtiene que para el coche sin alerón, las fuerzas que aparecen sobre el vehículo son de 344.717 N en el Eje X y de 305.81 N en el Eje Y. Con estas fuerzas, aplicando la Ecuación (3.1) y la Ecuación (3.2), se obtienen los coeficientes de arrastre y sustentación, de valores 0.1503 y 0.1334 respectivamente.

4.1.2. Distribución de velocidades y presiones

Otro de los resultados de interés que es posible plotear una vez la simulación ha finalizado, es la distribución de presiones sobre el carenado del vehículo. Puede observarse como la parte frontal del vehículo acumula las presiones más altas, por el hecho de ser la primera superficie en contacto con el flujo de aire y estar en perpendicular con la dirección del flujo. La Figura 4.2, permite observar mejor los resultados.

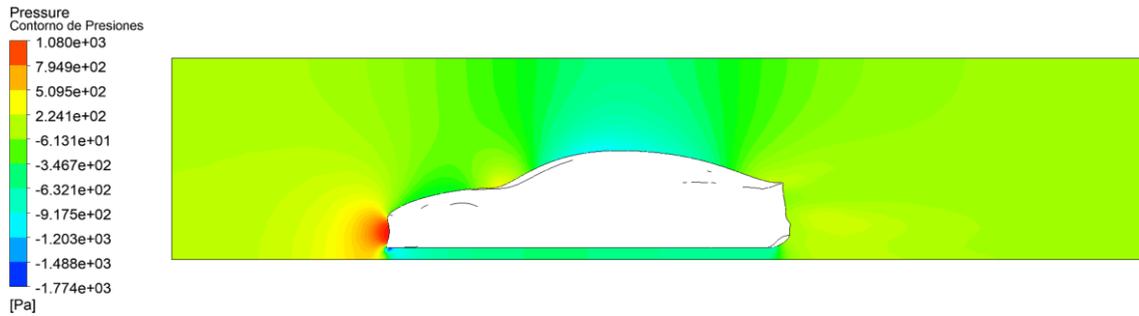


Figura 4.2: Contorno de presiones para el caso del vehículo sin alerón. Vista lateral seccionada por el plano de simetría. (ANSYS Fluent®)

Igualmente, se plotea la distribución de velocidades sobre el carenado del vehículo. Puede apreciarse como, las velocidades más altas del aire se producen en la parte superior del vehículo ya que el flujo de aire desliza sobre las superficies curvas, ganando velocidad. La Figura 4.3 permite observar mejor los mencionados resultados.

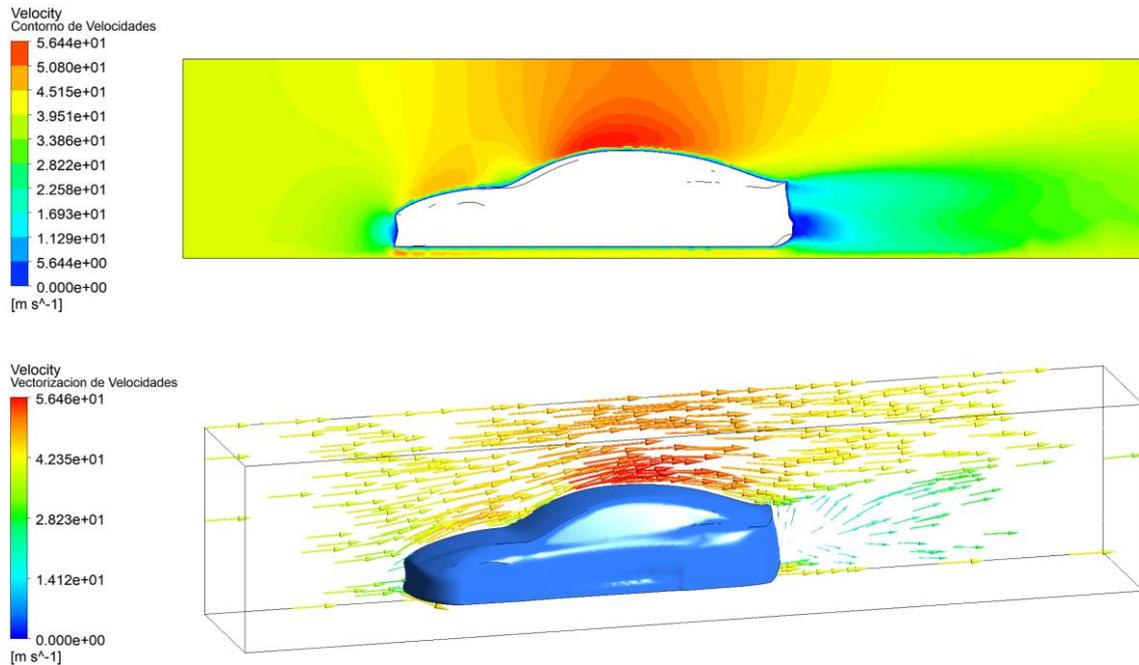


Figura 4.3: Contorno de velocidades (superior) y Vectorización de velocidades (inferior) para el caso del vehículo sin alerón. (ANSYS Fluent®)

4.2. SIMULACIÓN PARAMÉTRICA CON ALERÓN

Con el objetivo de conseguir la configuración adecuada del alerón para cada uno de los circuitos seleccionados, se realizan simulaciones del vehículo con alerón en ANSYS, concretamente mediante el módulo de ANSYS Fluent®. Para estas simulaciones, el mallado de las geometrías es idéntico al establecido en la Sección 3.2.3.

En este apartado se procede a realizar simulaciones para el vehículo con alerón, con ángulos de inclinación de 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55° y 60°. De esta forma, se busca observar de manera progresiva la influencia del ángulo de inclinación del alerón sobre la aerodinámica del vehículo, concretamente sobre los coeficientes de arrastre y sustentación.

En las siguientes figuras, es posible encontrar los resultados de presiones para distintos ángulos, sobre una vista lateral seccionada por el plano de simetría. Con el objetivo de exponer una comparativa de resultados significativa, únicamente se muestran los casos extremos de 5° y 60°, así como el caso medio correspondiente a 30° (véase la Figura 4.4).

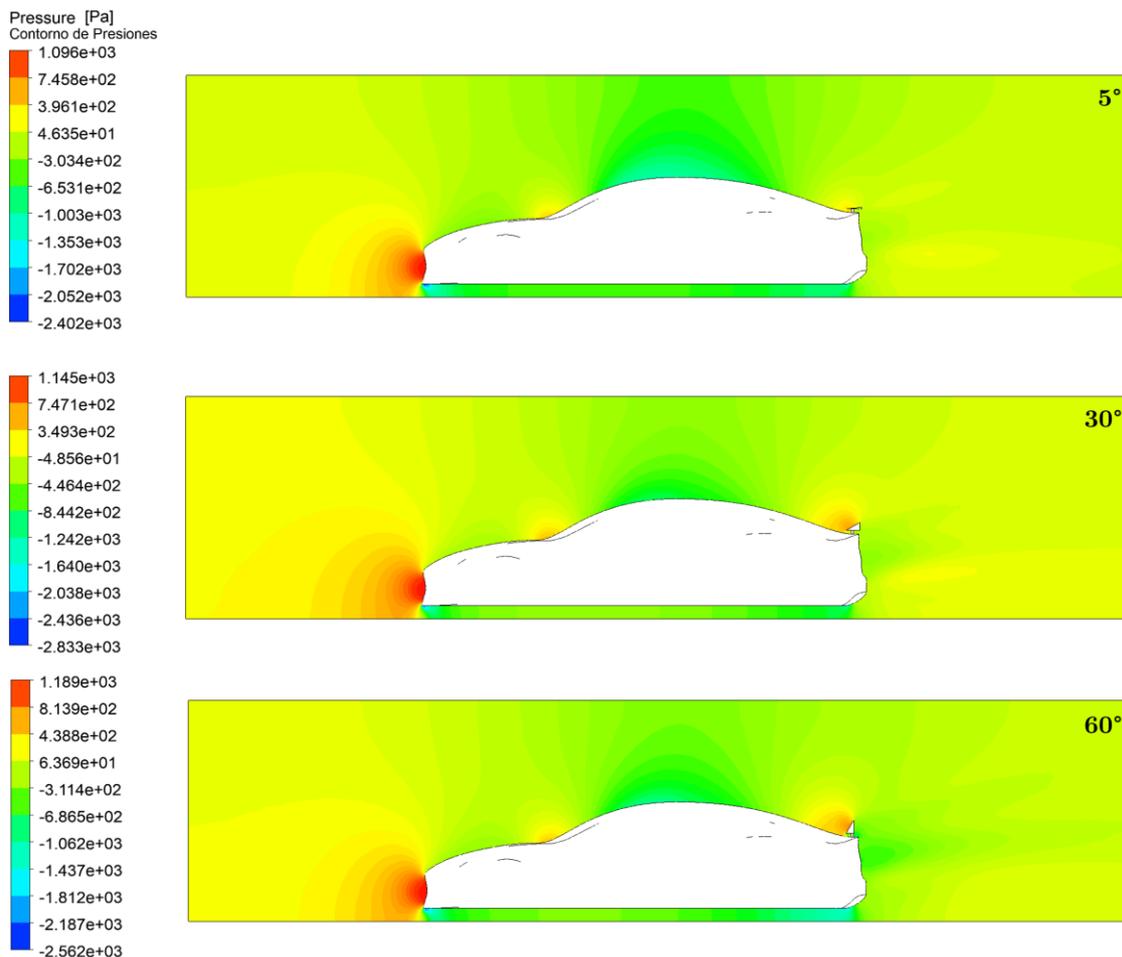


Figura 4.4: Contorno de Presiones sobre el vehículo para un alerón con un ángulo de inclinación de 5° (superior), 30° (intermedia) y 60° (inferior). (ANSYS Fluent®)

Seleccionando los gráficos de contorno de las presiones que aparecen sobre el vehículo con ángulos de inclinación del alerón de 5°, 30° y 60° se consigue observar como a medida que aumenta el ángulo de inclinación del alerón, la presión sobre este va aumentando.

Esto se debe a que los alerones con mayor ángulo de inclinación generan mayor resistencia al movimiento del aire. En cambio, los alerones con menor ángulo de inclinación desvían menos el flujo de aire por el hecho de situarse prácticamente en paralelo con la dirección de movimiento del flujo de aire, resultando en una menor resistencia al movimiento.

Para apoyar mejor esta explicación, es posible observar la mencionada dirección del movimiento del aire, planteando una distribución del contorno de velocidades del flujo de aire, para dichas tres situaciones principales de estudio (véase la Figura 4.5)

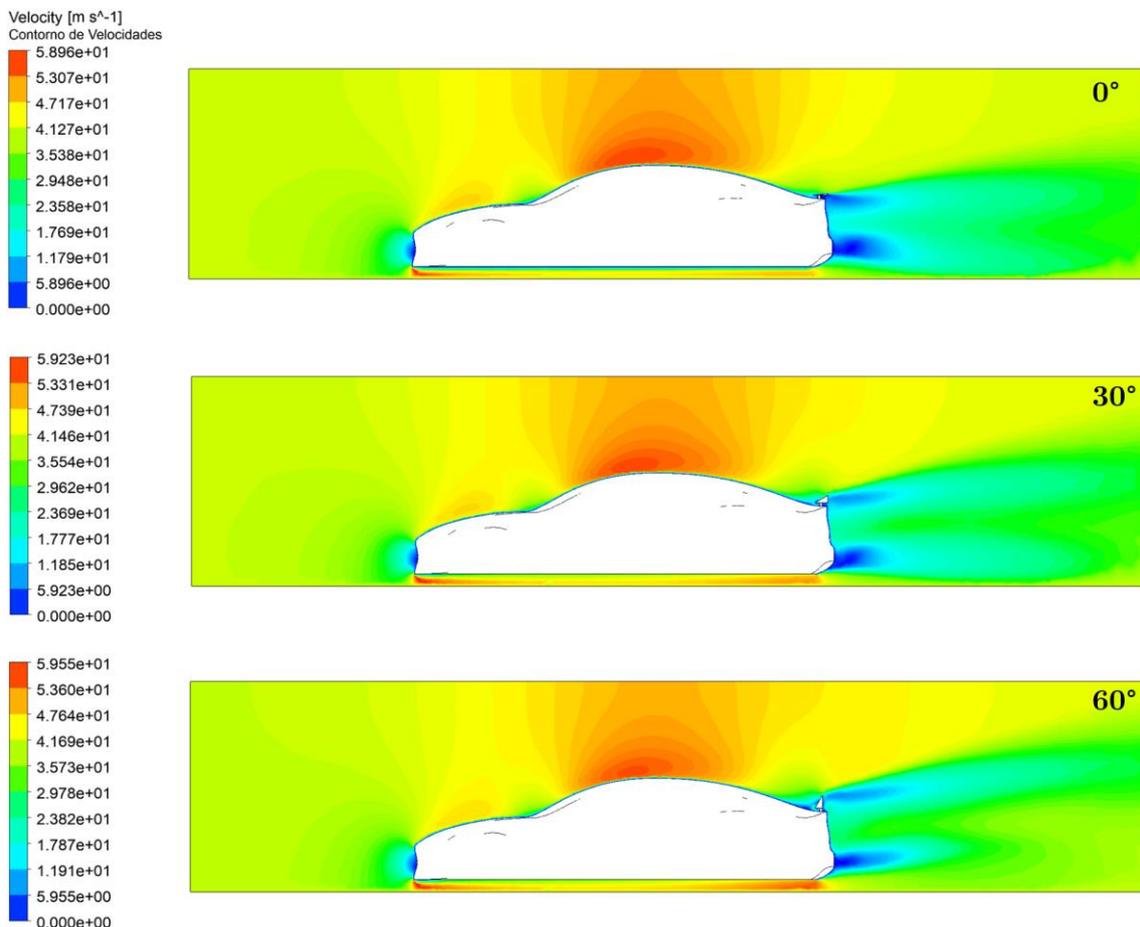


Figura 4.5: Contorno de Velocidades del flujo de aire sobre el vehículo para un alerón con una inclinación de 5° (superior), 30° (intermedia) y 60° (inferior). (ANSYS Fluent®)

Atendiendo a las gráficas de velocidad del flujo de aire para el vehículo con ángulos de inclinación del alerón de 5°, 30° y 60°, cabe destacar como a medida que aumenta el ángulo de inclinación del alerón, el flujo de aire que circula por la parte superior del vehículo se va viendo cada vez más desviado de su sentido original.

Por otro lado, mediante estas gráficas, se puede observar claramente el efecto suelo. Al reducirse la sección de paso del flujo de aire en la parte inferior del vehículo, por el principio de Bernoulli, la velocidad del aire aumenta y la presión de este disminuye. Esto deriva en una mayor carga aerodinámica, es decir, una mayor adherencia del vehículo a la superficie por la succión que se genera en esta zona. También se puede observar como a mayor ángulo de inclinación del alerón se mejora dicho efecto y, por tanto, mayor velocidad y menor presión en la parte inferior del vehículo.

De igual forma, es posible plotear la velocidad de forma vectorizada (véase la siguiente Figura 4.6), para complementar lo representado en la anterior Figura 4.5.

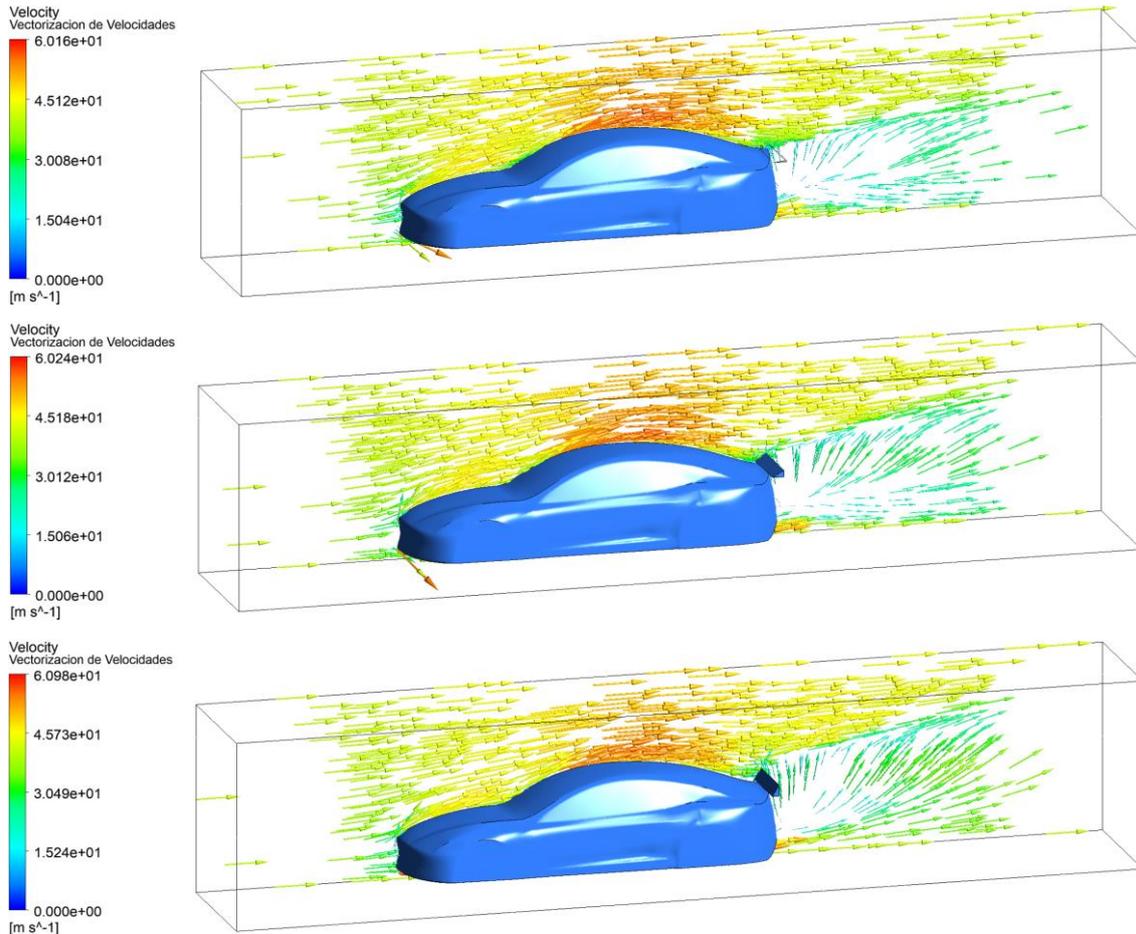


Figura 4.6: Vectorización 3D de la velocidad sobre el vehículo para un alerón con una inclinación de 5° (superior), 30° (intermedia) y 60° (inferior). (ANSYS Fluent®)

Cabe mencionar que en el ANEXO C ubicado al final del presente documento, se encuentran recopilados los resultados de presión y velocidad ploteados en distintas configuraciones (contornos, vectorizaciones y líneas de corriente) para todos los ángulos estudiados en las simulaciones.

A partir de las simulaciones realizadas para cada ángulo, se obtienen las Fuerzas Resultantes en los ejes X e Y (véase la Tabla 4.1 y la Figura 4.7).

Tabla 4.1: Fuerzas sobre el vehículo para los distintos ángulos de inclinación del alerón

Ángulo de inclinación [°]	Fuerzas Resultantes	
	F_x [N]	F_y [N]
5	433.34	-508.99
10	466.99	-624.3
15	463.38	-822.91
20	559.36	-828.97
25	551.27	-992.11
30	598.17	-1110.44
35	645.65	-1191.12
40	687.51	-1256.58
45	739.88	-1290.72
50	747.49	-1319.36
55	769.29	-1346.57
60	791.21	-1369.16

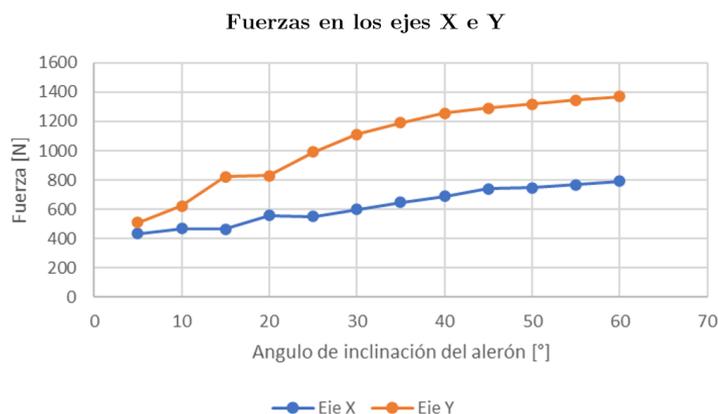


Figura 4.7: Fuerzas sobre el vehículo según el ángulo de inclinación del alerón (Valor absoluto)

Comparando los datos obtenidos de las fuerzas, a mayor ángulo de inclinación del alerón, mayor es la fuerza que aparece sobre la superficie del vehículo, tanto en el eje X como en el eje Y.

Aplicando estas fuerzas a las ecuaciones de los coeficientes de arrastre y sustentación, Ecuación X4.1 y Ecuación X4.2, se llega a la misma conclusión, es decir, aumentan los coeficientes cuanto mayor sea el ángulo de inclinación (véase la Tabla 4.2 y la Figura 4.8)

Tabla 4.2: Coeficientes de arrastre y sustentación para los distintos ángulos de inclinación del alerón

Ángulo inclinación [°]	C_D	C_L
5	0.1889	-0.2219
10	0.2036	-0.2722
15	0.2020	-0.3588
20	0.2439	-0.3614
25	0.2403	-0.4326
30	0.2608	-0.4842
35	0.2815	-0.5194
40	0.2998	-0.5479
45	0.3226	-0.5628
50	0.3259	-0.5753
55	0.3354	-0.5872
60	0.3450	-0.5970

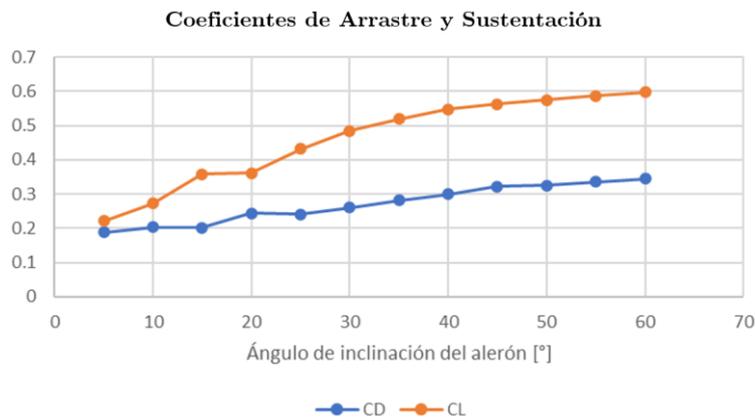


Figura 4.8: Coeficientes de arrastre y sustentación para los distintos ángulos de inclinación del alerón (Valor absoluto)

Cabe comentar que el coeficiente de sustentación aumenta más de lo que aumenta el coeficiente de arrastre con cada incremento de 5° en la inclinación del alerón.

4.3. COMPARATIVA CON RESPECTO AL SIMULADOR

En la presente sección del presente Trabajo Final de Grado, se introducen los datos de los coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos en las simulaciones de ANSYS Fluent®, en el simulador generado mediante la herramienta de MS Excel, explicado en el ANEXO B.

Para dicho simulador, se ha diseñado todos y cada uno de los 23 circuitos que forman parte de la competición de Formula 1. Mediante este simulador se puede obtener el tiempo que tarda el vehículo en completar una vuelta en cada uno de los circuitos. De esta forma se pretende encontrar la configuración adecuada del alerón para cada uno de los circuitos, ya que estos presentan distintas características.

4.3.1. Resultados del simulador

Los tiempos de vuelta obtenidos con el simulador para todos los circuitos de la F1, pueden encontrarse a continuación de la Tabla 4.3 a la Tabla 4.7.

Tabla 4.3: Tiempos por vuelta en segundos proporcionados por el simulador (1/5)

Ángulo de inclinación [°]	Baréin (Baréin)	Yeda (Arabia)	Albert-Park (Australia)	Imola (Italia)	Miami (US)
5	140.466	154.566	139.072	140.856	140.856
10	140.386	154.312	138.920	140.679	140.679
15	140.249	153.875	138.656	140.373	140.373
20	140.387	153.945	138.688	140.498	140.498
25	140.259	153.578	138.467	140.232	140.232
30	140.426	153.458	138.378	140.267	140.267
35	140.631	153.421	138.344	140.356	140.356
40	140.828	153.401	138.324	140.440	140.440
45	141.204	153.855	138.596	140.609	140.867
50	141.189	153.459	138.352	140.632	140.632
55	141.257	153.440	138.339	140.650	140.650
60	141.375	153.453	138.345	140.705	140.705

Tabla 4.4: Tiempos por vuelta en segundos proporcionados por el simulador (2/5)

Ángulo de inclinación [°]	Barcelona (España)	Mónaco (Mónaco)	Bakú (Azerbaiyán)	Villeneuve (Canadá)	Silverstone (UK)
5	137.419	124.328	151.413	113.787	145.669
10	137.319	124.231	151.306	113.714	145.546
15	137.147	124.064	151.123	113.589	145.334
20	137.233	124.059	151.291	113.682	145.345
25	137.082	123.923	151.122	113.570	145.168
30	137.131	123.824	151.303	113.666	145.079
35	137.211	123.756	151.518	113.793	145.043
40	137.287	123.702	151.713	113.914	145.028
45	137.561	123.824	152.126	114.177	145.251
50	137.446	123.649	152.060	114.138	145.061
55	137.468	123.627	152.119	114.177	145.055
60	137.519	123.608	152.227	114.249	145.067

Tabla 4.5: Tiempos por vuelta en segundos proporcionados por el simulador (3/5)

Ángulo de inclinación [°]	RedBull Ring (Austria)	Paul Ricard (Francia)	Hungaroring (Hungría)	Spa (Bélgica)	Zandvoort (Países Bajos)
5	102.176	137.536	133.694	170.298	125.124
10	102.052	137.428	133.612	170.044	125.015
15	101.840	137.243	133.469	169.607	124.827
20	101.859	137.570	133.503	169.646	124.845
25	100.796	137.385	133.382	169.282	124.688
30	100.712	137.816	133.366	169.116	124.622
35	100.676	138.267	133.380	169.037	124.596
40	100.654	138.660	133.399	168.992	124.583
45	100.683	139.280	133.458	169.416	124.776
50	100.674	139.306	133.464	169.032	124.606
55	100.665	139.425	133.467	169.014	124.598
60	100.673	139.624	133.487	169.028	124.605

Tabla 4.6: Tiempos por vuelta en segundos proporcionados por el simulador (4/5)

Ángulo de inclinación [°]	Monza (Italia)	Soshi (Rusia)	Marina Bay (Singapur)	Susuka (Japón)	Texas (US)
5	120.687	154.600	164.144	155.742	159.793
10	120.573	154.454	164.053	155.556	159.702
15	120.377	154.203	163.896	155.234	159.545
20	120.649	154.228	163.891	155.302	159.571
25	120.458	154.018	163.764	155.029	159.438
30	120.803	153.937	163.672	154.975	159.401
35	121.181	153.920	163.610	154.990	159.398
40	121.522	153.927	163.560	155.019	159.403
45	122.111	154.217	163.677	155.406	159.448
50	122.111	154.011	163.520	155.139	159.448
55	122.220	154.014	163.502	155.142	159.447
60	122.406	154.044	163.490	155.172	159.461

Tabla 4.7: Tiempos por vuelta en segundos proporcionados por el simulador. (5/5)

Ángulo de inclinación [°]	Hos. Rodriguez (México)	Interlagos (Brasil)	Yas Marina (Abu Dabi)
5	119.167	124.127	146.070
10	119.098	124.013	145.955
15	118.980	123.817	145.755
20	119.128	123.830	145.903
25	119.014	123.666	145.724
30	119.199	123.593	145.864
35	119.406	123.571	146.043
40	119.594	123.567	146.213
45	119.929	123.785	146.619
50	119.919	123.615	146.535
55	119.977	123.613	146.589
60	120.080	123.630	146.692

Atendiendo a los resultados expresados en las tablas anteriores, obtenidos con el alerón diseñado para un Tesla Model S, se obtiene que para los circuitos de Baréin (Baréin), Paul Ricard, (Francia), Monza (Italia) y Hermanos Rodríguez (México), el ángulo óptimo de inclinación es de 15°. Con este ángulo, el vehículo completa las vueltas en tiempos de 140.249 s, 137.243 s, 120.377 s y 118.980 s respectivamente.

Por otro lado, para los circuitos de Monza (Italia), Miami (US), Barcelona (España), Bakú (Azerbaiyán), Gilles Villeneuve (Canadá) y Yas Marina (Abu Dabi), el ángulo de inclinación óptimo del alerón es de 25°. En ellos, los tiempos obtenidos son de 140.232 s, 140.232 s, 137.082 s, 151.122 s, 113.570 s y 145.724 s respectivamente.

En 30° de inclinación del alerón como configuración óptima se encuentran Hungaroring (Hungría) y Susuka (Japón) con tiempos de 133.366 s y 154.975 s respectivamente. Muy cerca, con 35° de inclinación del alerón como configuración óptima, se encuentran el autódromo de Soshi (Rusia) y el Circuito de las Américas (US) con tiempos de 153.920 s y 159.398 s respectivamente.

Para los circuitos de Albert Park (Australia), Corniche de Yeda (Arabia Saudita), Silverstone (Reino Unido), Red Bull Ring (Austria), Spa-Francorchamps (Bélgica), Zandvoort (Países Bajos) e Interlagos (Brasil), el ángulo de inclinación óptimo del alerón resulta de 40°. Los -mejores- tiempos obtenidos son de 138.324 s, 153.401 s, 145.028 s, 100.654 s, 168.992 s, 124.583 s y 123.567 s respectivamente.

Por último, se encuentran el circuito de Mónaco (Mónaco) y Marina Bay (Singapur), en los cuales los mejores tiempos por vuelta se obtienen con un ángulo de inclinación del alerón de 60°, siendo estos de 123.608 s y 163.490 s respectivamente.

Con todo esto, podemos evidenciar tres grandes tendencias en los circuitos. En primer lugar, aquellos en los que lo más beneficioso es un alerón con poco ángulo, debido a que son circuitos donde predominan las rectas y la velocidad punta en ellas. Un segundo grupo opuesto, donde un mayor ángulo de alerón resulta más útil, debido al predominio de curvas cerradas donde la velocidad máxima en ellas es un punto crítico. Y por último, un tercer grupo en el que encontramos ángulos intermedios entre ambos extremos, justificado por un mayor equilibrio entre curvas y rectas en sus trazados.

Todo esto se analiza con mas detalle en la siguiente Sección 4.3.2.

Otro aspecto obtenido a partir de las simulaciones es la velocidad máxima en recta para cada uno de los ángulos de inclinación del alerón. Así pues, tal y como se muestra en la Figura 4.9, es clara la tendencia de reducirse la velocidad máxima en recta cuanto mayor sea el ángulo de inclinación del alerón.

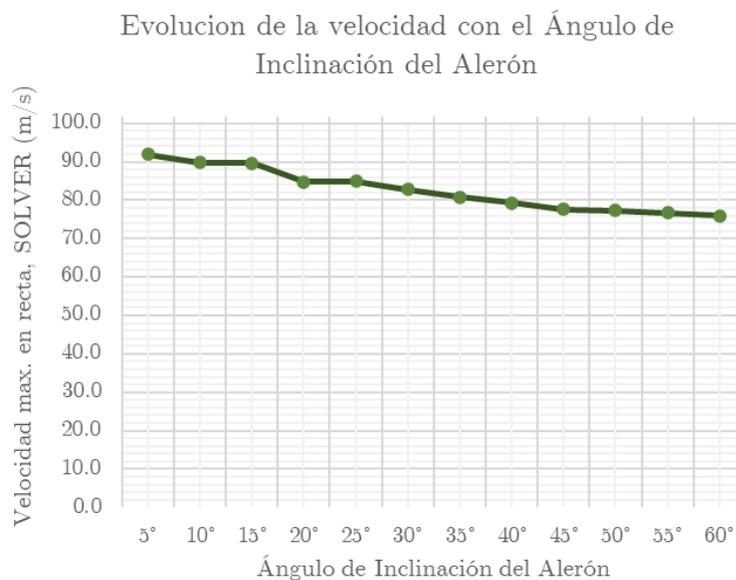


Figura 4.9: Evolución de la velocidad con el ángulo de inclinación del alerón.

Esto se debe a que, a mayores ángulos de inclinación del alerón, el viento ejerce más resistencia al movimiento del vehículo, derivando en menores velocidades

4.3.2. Análisis de los resultados

Observando las características de cada circuito y los datos obtenidos a partir de las simulaciones del apartado anterior, se pueden clasificar los circuitos en tres grandes grupos.

En el primer grupo, se encuentran los circuitos donde las rectas son los tramos más importantes y, por lo tanto, la velocidad punta del vehículo en estas es crucial. Es por ello, que un alerón con un ángulo de inclinación pequeño, que proporciona menos carga aerodinámica y velocidades máximas mayores consiguiendo así mejores tiempos.

En este grupo se encuentran el Circuito Internacional de Baréin (Baréin), el Circuito Paul Ricard, (Francia), el Autódromo Nazionale di Monza (Italia) y el Autódromo Hermanos Rodríguez (México). En ellos, el ángulo óptimo de inclinación es de 15° .

En el segundo grupo se encuentran los circuitos donde las curvas son los tramos más importantes. En estos circuitos es más importante que el vehículo posea una gran carga aerodinámica para poder circular por las curvas con mayor adherencia y velocidad.

Es por ello, que un alerón con un ángulo de inclinación grande proporciona mejores tiempos. En este grupo se encuentran el circuito de Mónaco (Mónaco) y el circuito Urbano Marina Bay (Singapur). En ellos, el ángulo óptimo de inclinación del alerón es de 60° .

En el tercer y último grupo se encuentran los circuitos donde la influencia combinada de rectas y curvas produce que un ángulo intermedio sea la mejor solución.

En este grupo se encuentra el circuito Enzo e Dino Ferrai (Italia), el autódromo Internacional de Miami (US), el circuito de Barcelona-Cataluña (España), el circuito callejero de Bakú (Azerbaiyán), el circuito Gilles Villeneuve (Canadá), el circuito Yas Marina (Abu Dabi), Hungaroring (Hungría), el circuito de Suzuka (Japón), el autódromo de Soshi (Rusia), el circuito de las Américas (US), el circuito de Albert Park (Australia), el circuito de la Corniche de Yeda (Arabia Saudita), el circuito de Silverstone (Reino Unido), el Red Bull Ring (Austria), el circuito Spa-Francorchamps (Bélgica), el circuito de Zandvoort (Países Bajos) y el autódromo José Carlos Pace (Brasil). En ellos, ángulo óptimo de inclinación del alerón se encuentra comprendido entre 25° y 40° .

4.3.3. Comparación de resultados con el modelo sin alerón

De la misma forma, se objienen los tiempos por vuelta del vehículo sin alerón en cada uno de los circuitos, para observar la diferencia de tiempos respecto a los del vehículo con el alerón óptimo de cada circuito y así comprobar la mejoría de los tiempos con la implementación del alerón adecuado.

En la siguiente Tabla 4.8, puede evidenciarse la mejora de tiempos al implementar el alerón objeto de estudio.

Tabla 4.8: Tiempos por vuelta en cada uno de los circuitos para el vehículo sin alerón vs el mejor tiempo con alerón.

Circuito	Tiempo sin aleron (s)	Mejor tiempo con alerón (s)
Circuito Internacional de Baréin, Baréin	140.606	140.249
Circuito de la Corniche de Yeda, Arabia Saudita	155.013	153.401
Circuito de Albert-Park, Australia	139.339	138.325
Autódromo Enzo e Dino Ferrari, Imola, Italia	126.406	125.276
Autódromo Internacional de Miami, US	141.166	140.232
Circuito de Barcelona-Cataluña, España	137.595	137.082
Circuito de Mónaco, Mónaco	124.498	123.608
Circuito callejero de Bakú, Azerbaiyán	151.599	151.122
Circuito Gilles Villeneuve, Canadá	113.915	113.571
Circuito de Silverstone, Reino Unido	145.886	145.028
Red Bull Ring, Austria	101.546	100.654
Circuito Paul Ricard, Francia	137.728	137.243
Hungaroring, Hungría	133.839	133.366
Circuito Spa-Francorchamps, Bélgica	170.745	168.992
Circuito de Zandvoort, Países Bajos	125.316	124.583
Autódromo Nazionale di Monza, Monza, Italia	120.887	120.377
Autódromo de Soshi, Rusia	154.855	153.921
Circuito Urbano Marina Bay, Singapur	164.306	163.490
Circuito de Susuka, Japón	156.070	154.976
Circuito de las Américas, Texas, US	159.953	159.398
Autódromo Hermanos Rodríguez, México	119.296	118.980
Autódromo José Carlos Pace, Interlagos, Brasil	124.326	123.568
Circuito Yas Marina, Abu Dabi	146.274	145.724

Como se puede comprobar, ningún tiempo conseguido con el vehículo sin alerón es mejor que los tiempos conseguidos por el vehículo con la configuración óptima de alerón. De esta forma, se comprueba la aportación y mejora aerodinámica generada por un modelo con el ángulo de inclinación del alerón adecuado. Por otra parte, si existen configuraciones, que empeoran los tiempos con respecto a los obtenidos por el vehículo sin alerón.

CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES

Tras la realización del presente proyecto, se ha conseguido lograr el objetivo principal del trabajo, habiendo diseñado un alerón válido para un Tesla Model S, que mediante ANSYS Fluent® y un simulador de tiempos de vuelta de múltiples circuitos, nos ha permitido seleccionar el ángulo de inclinación óptimo del alerón para cada uno de los circuitos a estudiar.

También se ha podido comprobar cómo la implementación de un alerón con el ángulo de inclinación adecuado es capaz de mejorar la aerodinámica del vehículo y por tanto los tiempos por vuelta.

Se ha logrado encontrar una relación entre el ángulo de inclinación del alerón y el tipo de circuito, obteniéndose mejores tiempos por vuelta con alerones con un ángulo de inclinación pequeño en circuitos donde las rectas son protagonistas. En el polo opuesto, en los circuitos donde las curvas son más importantes, se obtienen mejores tiempos por vuelta con ángulos de inclinación del alerón grandes.

Por otro lado, se ha podido evidenciar una relación entre el ángulo de inclinación del alerón y la velocidad máxima del vehículo de estudio en recta. A menor ángulo de inclinación del alerón, menores son las fuerzas que aparecen sobre la superficie del vehículo, es decir, los coeficientes de arrastre y sustentación del vehículo son menores y, por tanto, menos resistencia al avance del vehículo a través del aire, derivando en una mayor velocidad.

De la misma manera, se ha podido comprobar como a mayor grado de inclinación del alerón se genera más carga aerodinámica, aumentando la velocidad del flujo de aire que pasa por la parte inferior del vehículo y disminuyendo la presión en esta misma zona, potenciando así el efecto suelo y dotando al vehículo de mayor agarre a la superficie, pudiendo circular a mayores velocidades en el paso por curva.

Cabe destacar la importancia que ha tenido la realización de un análisis de independencia de malla sobre los resultados finales, ya que, gracias a este, se ha podido

encontrar un tamaño de elemento optimizado que proporcionase resultados válidos en el menor tiempo de simulación posible.

Dicho análisis de independencia de malla realizado a dos velocidades de flujo, también ha permitido entender que no existe relación entre la velocidad del flujo de aire y los coeficientes de arrastre y sustentación, es decir, la aerodinámica del vehículo.

Por último y a nivel personal, gracias a este análisis sobre la optimización de la configuración de un alerón, se ha podido comprender la inmensa importancia de la aerodinámica de un vehículo en competiciones como por la Formula 1, donde un mínimo cambio en el ángulo de inclinación del alerón puede hacer que el vehículo pierda décimas e incluso segundos por vuelta. Es por ello por lo que, en competiciones como esta se persigue la mayor precisión en los estudios aerodinámicos, ya que cada detalle puede marcar la diferencia.

CAPÍTULO 6.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Taringa, 2022. *La aerodinámica de un vehículo. Autos y motos.* [en línea] Disponible en: <https://www.taringa.net/+autos_motos/la-aerodinamica-de-un-vehiculo_v22oc>
- [2] F1framework.blogspot.com. 2012. *Dentro de Túneles de viento.* [en línea] Disponible en: <<http://f1framework.blogspot.com/2012/12/inside-wind-tunnels.html>>
- [3] Connor, N., 2019. *Qué es la fuerza de arrastre. La Ecuación de arrastre.* [en línea] Thermal-engineering.org. Disponible en: <<https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-fuerza-de-arrastre-ecuacion-de-arrastre-definicion/>>
- [4] Es.wikipedia.org. 2022. *Sustentación. Wikipedia, la enciclopedia libre.* [en línea] Disponible en: <<https://es.wikipedia.org/wiki/Sustentaci%C3%B3n>>
- [5] Fagnan, R., 2018. *La primera aparición de los alerones en los autos de Fórmula 1.* [en línea] motorsport.com. Disponible en: <<https://lat.motorsport.com/f1/news/la-primera-aparicion-de-los-alerones-en-los-autos-de-formula-1-1001042/1638167/>>
- [6] Ruta, D., 2022. *Qué es el Drag Reduction System (DRS) de la F1 y para que funciona.* [en línea] Rutamotor. Disponible en: <<https://www.rutamotor.com/que-es-el-drag-reduction-system-de-la-F1-y-para-que-funciona>>
- [7] Es.wikipedia.org. 2019. *Relación potencia a peso. Wikipedia, la enciclopedia libre.* [en línea] Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Relaci%C3%B3n_potencia_a_peso>

- [8] Es.wikipedia.org. 2022. *Anexo: Grandes Premios de Fórmula 1. Wikipedia, la enciclopedia libre.* [en línea] Disponible en:.....
 <https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Grandes_Premios_de_F%C3%B3rmula_1>
- [9] Briet Blanes, T., 2009. *Coste de un túnel de viento.* [en línea] Coche y conductor. Disponible en: <<https://www.caranddriver.com/es/formula-1/a15241/coste-de-un-tunel-de-viento>>
- [10] Fernandez Osma, M., 2019. *El túnel de viento en la Fórmula 1 - Aerodinámica F1.* [en línea] Aerodinámica F1. Disponible en:.....
 <<https://www.aerodinamicaf1.com/2019/11/el-tunel-de-viento-en-la-formula-1/>>
- [11] Fernandez Osma, M., 2019. *Flujo laminar y turbulento - Aerodinámica F1.* [en línea] Aerodinámica F1. Disponible en:.....
 <<https://www.aerodinamicaf1.com/2019/10/flujo-laminar-y-turbulento/>>
- [12] Es.wikipedia.org. 2022. *Túnel de viento. Wikipedia, la enciclopedia libre.* [en línea] Disponible en:
 <https://es.wikipedia.org/wiki/T%C3%BAnel_de_viento>
- [13] ESSS, 2022. *Dinámica de Fluidos Computacional: ¿que es?.* [en línea] Especialistas en Simulación por Computadora de ESSS. Disponible en: <<https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>>
- [14] Fernández Osma, M., 2019. *Pruebas aerodinámicas en pista - Aerodinámica F1.* [en línea] Aerodinámica F1. Disponible en:
 <<https://www.aerodinamicaf1.com/2019/12/pruebas-aerodinamicas-en-pista/>>
- [15] Celis, J. y Piola, G., 2019. *F1 a la parrilla: las originales pruebas de los equipos en sus coches.* [en línea] motorsport.com. Disponible en: <<https://es.motorsport.com/f1/news/fotos-coches-test-abu-dhabi/4606725/>>
- [16] Miner, A., 2017. *Los tubos Prandtl-Pitot en la F1.* [en línea] MomentoGP. Disponible en: <<https://www.momentogp.com/los-tubos-prandtl-pitot-en-la-f1/>>
- [17] Es.frwiki.wiki. 2020. *Sonda de Kiel - frwiki.wiki.* [en línea] Disponible en: <https://es.frwiki.wiki/wiki/Sonde_de_Kiel>
- [18] Guerrero, D., 2020. *Sensores en Fórmula 1: cómo se obtiene la información del monoplaza | Fórmula F1.* [en línea] Fórmula F1. Disponible en: <<https://www.formulaf1.es/64933/sensores-en-formula-1-como-se-obtiene-la-informacion-del-monoplaza/>>

- [19] Moreno, A., 2017. *Técnica F1: todo sobre el Flow Viz, ese fluido indispensable en la Fórmula 1. PdM.* [en línea] Planeta del Motor. Disponible en: <<https://planetadelmotor.com/parafina-formula-1/>>
- [20] cienciadehoy.com. 2022. *¿Que es y Cómo calcular la fuerza de arrastre?*. [en línea] Disponible en: <<https://cienciadehoy.com/que-es-y-como-calcular-la-fuerza-de-arrastre/>>
- [21] Connor, N., 2019. *Qué es el coeficiente de arrastre. El Área de arrastre.* [en línea] [Thermal-engineering.org](https://www.thermal-engineering.org). Disponible en: <<https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-coeficiente-de-arrastre-area-de-arrastre-autos-definicion/>>
- [22] [Es.wikipedia.org](https://es.wikipedia.org). 2022. *Sustentación. Wikipedia, la enciclopedia libre.* [en línea] Disponible en: <<https://es.wikipedia.org/wiki/Sustentaci%C3%B3n>>
- [23] [Km77.com](https://www.km77.com). 2021. *Tesla Model S Performance (2019-2020) | Precio y ficha técnica - km77.com.* [en línea] Disponible en:.....<<https://www.km77.com/coches/tesla/model-s/2016/estandar/model-s-performance/datos>>
- [24] Mahdi, D., 2017. *Tesla Model S CAD Files - Mahdi Designs.* [en línea] Mahdi Diseños. Disponible en: <<https://mdesigns.space/3d-printing-cad-files/p/tesla-model-s-cad-files-1>>

ANEXOS

Índice de Anexos

ANEXO A. Ficha Técnica de especificaciones del Tesla Model S (2019-2020)	88
ANEXO B. Simulador para el cálculo automatizado de los tiempos de vuelta de cada circuito	89
B.1. Parámetros de Entrada	89
B.2. Principio de Funcionamiento del Simulador	90
B.3. Hipótesis generales	90
B.4. Recta seguida de una Curva.....	91
B.5. Curva seguida de una Recta.....	95
B.6. Recta seguida de otra Recta.....	97
B.7. Curva seguida de otra Curva	98
ANEXO C. Ficha de Resultados Gráficos de las Simulaciones	102
C.1. Contornos de Presiones	102
C.2. Contornos de Velocidades	106
C.3. Vectorización de Velocidades	110
C.4. Líneas de Corriente de Velocidades	114

Índice de Figuras de los Anexos

Figura B1:	Espectro de posibilidades para el Caso A, de una Recta seguida de una Curva.....	91
Figura B2:	Espectro de posibilidades para el Caso B, de una Recta seguida de una Curva.....	94
Figura C1.1:	Contorno de presiones para el vehículo sin alerón.....	102
Figura C1.2:	Contorno de presiones para el vehículo con alerón de 5°.....	102
Figura C1.3:	Contorno de presiones para el vehículo con alerón de 10°.....	103
Figura C1.4:	Contorno de presiones para el vehículo con alerón de 15°.....	103
Figura C1.5:	Contorno de presiones para el vehículo con alerón de 20°.....	103
Figura C1.6:	Contorno de presiones para el vehículo con alerón de 25°.....	103
Figura C1.7:	Contorno de presiones para el vehículo con alerón de 30°.....	104
Figura C1.8:	Contorno de presiones para el vehículo con alerón de 35°.....	104
Figura C1.9:	Contorno de presiones para el vehículo con alerón de 40°.....	104
Figura C1.10:	Contorno de presiones para el vehículo con alerón de 45°.....	104
Figura C1.11:	Contorno de presiones para el vehículo con alerón de 50°.....	105
Figura C1.12:	Contorno de presiones para el vehículo con alerón de 55°.....	105
Figura C1.13:	Contorno de presiones para el vehículo con alerón de 60°.....	105
Figura C2.1:	Contorno de velocidades para el vehículo sin alerón.....	106
Figura C2.2:	Contorno de velocidades para el vehículo con alerón de 5°.....	106
Figura C2.3:	Contorno de velocidades para el vehículo con alerón de 10°.....	106
Figura C2.4:	Contorno de velocidades para el vehículo con alerón de 15°.....	107
Figura C2.5:	Contorno de velocidades para el vehículo con alerón de 20°.....	107
Figura C2.6:	Contorno de velocidades para el vehículo con alerón de 25°.....	107
Figura C2.7:	Contorno de velocidades para el vehículo con alerón de 30°.....	107
Figura C2.8:	Contorno de velocidades para el vehículo con alerón de 35°.....	108
Figura C2.9:	Contorno de velocidades para el vehículo con alerón de 40°.....	108
Figura C2.10:	Contorno de velocidades para el vehículo con alerón de 45°.....	108
Figura C2.11:	Contorno de velocidades para el vehículo con alerón de 50°.....	108
Figura C2.12:	Contorno de velocidades para el vehículo con alerón de 55°.....	109

Figura C2.13: Contorno de velocidades para el vehículo con alerón de 60°	109
Figura C3.1: Vectorización de velocidades para el vehículo sin alerón.....	110
Figura C3.2: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón de 5°	110
Figura C3.3: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón de 10°	110
Figura C3.4: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón de 15°	111
Figura C3.5: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón de 20°	111
Figura C3.6: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón de 25°	111
Figura C3.7: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón de 30°	111
Figura C3.8: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón de 35°	112
Figura C3.9: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón de 40°	112
Figura C3.10: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón de 45°	112
Figura C3.11: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón de 50°	112
Figura C3.12: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón de 55°	113
Figura C3.13: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón de 60°	113
Figura C4.1: Líneas de Corriente de velocidad para el vehículo sin alerón	114
Figura C4.2: Líneas de Corriente de velocidad para el vehículo con alerón de 5°	114
Figura C4.3: Líneas de Corriente de velocidad para el vehículo con alerón de 10°	114
Figura C4.4: Líneas de Corriente de velocidad para el vehículo con alerón de 15°	115
Figura C4.5: Líneas de Corriente de velocidad para el vehículo con alerón de 20°	115
Figura C4.6: Líneas de Corriente de velocidad para el vehículo con alerón de 25°	115
Figura C4.7: Líneas de Corriente de velocidad para el vehículo con alerón de 30°	115
Figura C4.8: Líneas de Corriente de velocidad para el vehículo con alerón de 35°	116
Figura C4.9: Líneas de Corriente de velocidad para el vehículo con alerón de 40°	116
Figura C4.10: Líneas de Corriente de velocidades para el vehículo con alerón de 45°	116
Figura C4.11: Líneas de Corriente de velocidad para el vehículo con alerón de 50°	116
Figura C4.12: Líneas de Corriente de velocidad para el vehículo con alerón de 55°	117
Figura C4.13: Líneas de Corriente de velocidad para el vehículo con alerón de 60°	117

Índice de Tablas de los Anexos

Tabla B1: Parámetros del vehículo a introducir para el Simulador.....	89
Tabla B2: Situaciones posibles para el Caso A1.	93
Tabla B3: Situaciones posibles para el Caso A2.	94
Tabla B5: Situaciones posibles para los Casos C1 y C2.....	96
Tabla B6: Situaciones posibles para los Casos D1 y D2.	98
Tabla B7: Situaciones posibles para el Caso E.	99
Tabla B9: Situaciones posibles para el Caso F2.	101

ANEXO A. Ficha Técnica de especificaciones del Tesla Model S (2019-2020)

Prestaciones y Consumos Homologados

Velocidad máxima	322 km/h
Potencia máxima	1020 CV / 760 kW
Aceleración 0-100 km/h	2,5 s
Consumo WLTP Combinado batería cargada	19,3 kWh/100 km
Autonomía eléctrica WLTP	593 km
Normativa de emisiones	Euro 6
Distintivo ambiental DGT	0 emisiones

Dimensiones, peso y capacidades

Tipo de Carrocería	Turismo
Número de puertas	5
Longitud	4.970 mm
Anchura	1.964 mm
Altura	1.445 mm
Batalla	2.960 mm
Vía delantera	1.662 mm
Vía trasera	1.700 mm
Coefficiente Cx	0,23
Superficie frontal	2,34 m ²
Factor de resistencia	0,54
Peso	2.316 kg
Volúmenes de maletero	
Volumen con una fila de asientos disponible	1.645 litros
Volumen con dos filas de asientos disponibles	745 litros
Volumen del segundo maletero	60 litros
Número de plazas	5
Distribución de asientos	2 + 3

Motores Eléctricos

	Motor Eléctrico 1	Motor Eléctrico 2
Propósito	Impulsar al vehículo	Impulsar al vehículo
Potencia máxima	262 CV / 193 kW	510 CV / 375 kW
Revoluciones potencia máxima	6.100 rpm	No disponible
Par máximo	330 Nm	720 Nm
Revoluciones par máximo	No disponible	No disponible
Ubicación	Delantero transversal	Trasero transversal
Tensión nominal	320 V	320 V

ANEXO B. Simulador para el cálculo automatizado de los tiempos de vuelta de cada circuito

En el presente Anexo de la memoria Descriptiva, se recopila una descripción del funcionamiento y automatización del Simulador empleado para obtener de forma automatizada, el tiempo de vuelta

B.1. Parámetros de Entrada

Como parámetros de entrada del Simulador, deben introducirse los siguientes grupos de datos:

Se introducen los siguientes parámetros relativos al vehículo (véase la siguiente Tabla B1).

Tabla B1: Parámetros del vehículo a introducir para el Simulador.

Parámetro [unidades]	Valor
Masa [kg]	2232
Potencia [W]	278445
Área de referencia [m ²]	2,34
Altura del cdg [m]	0,457
Anchura [m]	1,69
Aceleración de 0 a 100 [s]	2,1
Aceleración máxima [m/s ²]	13,2275
Velocidad máxima [km/h]	320
Frenada máxima [m/s ²]	-10,7873
Aceleración lateral máxima [m/s ²]	14,7100

Con esta aceleración lateral, para superar los 88,88 m/s de velocidad máxima de diseño, es necesario que la curva tenga un radio igual o mayor a 537,134 m.

Además, como datos de entrada también son necesarios los coeficientes de Arrastre, Sustentación, Rodadura y Deslizamiento. Se asume para el presente simulador, un coeficiente de Rodadura de 0,03 y un coeficiente de deslizamiento de 0,9. Los coeficientes de Arrastre y Sustentación, son obtenidos por las simulaciones aerodinámicas en ANSYS Fluent®.

B.2. Principio de Funcionamiento del Simulador

El principio de funcionamiento del simulador consiste en discretizar los circuitos en una sucesión de tramos curvos y rectos. Para los tramos rectos únicamente es necesaria la longitud de la recta, mientras que para los tramos curvos es necesario el radio de curvatura y la longitud del arco.

El tiempo total de una vuelta se obtiene por tanto como la suma de los tiempos obtenidos para cada tramo. Para evaluar un tramo recto o curvo, se compara dicho tramo con su tramo inmediato posterior. Esto implica, que se pueden dar cuatro situaciones posibles:

1. Recta seguida de una Curva
2. Curva seguida de una Recta
3. Recta seguida de otra Recta
4. Curva seguida de otra Curva

Dentro de cada una de estas 4 situaciones, se establecen hipótesis sobre las que llevar a cabo un trazado supuestamente ideal.

B.3. Hipótesis generales

Entre las hipótesis principales sobre las que establece las bases del simulador, se destacan los siguientes puntos:

- Se asume como caso ideal, el de salir de la recta/entrar en la curva a la $V_{C,max}$ de la propia curva. Además, se asume en primera aproximación que, en la medida de lo posible, todas las curvas se realizarán a la velocidad máxima de dicha curva ($V_{C,max}$).
- Mas concretamente, el valor de $V_{C,max}$ de una Curva determinada, será siempre el mínimo entre la velocidad obtenida para el Radio de dicha curva, la velocidad máxima de diseño permitida por el Tesla, y la velocidad máxima de recta del modelo (determinado por los coeficientes obtenidos en ANSYS). Esto también permite entender que no puede existir ningún valor por encima de $V_{R,max}$.
- Dentro de una recta, se asume como ideal el de frenar (en caso de ser necesario) lo más tarde posible, antes de entrar en la curva. Esto es equivalente a decir que lo ideal es que el vehículo se encuentre durante la recta a la $V_{R,max}$ (única) el mayor tiempo posible.
- Se asume la hipótesis de que la $V_{C,max}$ de ninguna curva, puede ser mayor que la $V_{R,max}$ (única). Es por ello que, dentro de las posibles situaciones a darse en recta, no se contempla el caso $V_{R,max} < V_{C,max}$
- Por último, se establece como hipótesis que, por motivos de seguridad, no se supere en curvas una aceleración lateral mayor a 1,5g

$$a_L = \frac{V_C^2}{R}$$

A continuación se desarrollan, una a una, todas las posibles situaciones que pueden darse en el modelo.

B.4. Recta seguida de una Curva

Los cálculos para este caso corresponden a la Recta (R1), mientras que la posterior Curva (C2) sirve únicamente como referencia.

Como condición inicial de partida, se asume que el coche tiene como objetivo salir de la recta a la máxima velocidad que permita la curva siguiente, es decir:

$$V_{R1,sal} = V_{C2,max}$$

El primer paso es el de validar que $V_{R1,max}$ es siempre mayor que $V_{C2,max}$. Es lógico pensar que no es muy coherente que la velocidad máxima admisible sea mayor en curva que en recta, ya que existe el fenómeno añadido de la aceleración lateral.

Si calculamos el radio necesario para poder trazar la curva a una velocidad superior a la velocidad de diseño del coche, obtenemos que es necesario un radio de curvatura mínimo de 537,134 m.

$$a_{Lat} = \frac{V^2}{R} \rightarrow R_{min} = \frac{V^2}{a_{Lat}} = 537,134 \text{ m}$$

Aunque es poco común que esto pueda suceder, como punto de seguridad se asume la hipótesis adicional de considerar como una recta todas aquellas curvas con un Radio de curvatura mayor a 537 m.

Con todo esto, para el caso de una recta seguida de una curva, solo quedan dos opciones posibles.

CASO A:

Es el caso en el que la velocidad máxima de la Recta es mayor que la velocidad máxima de la Curva. Esto implica que el vehículo sale de la recta a una velocidad menor a la velocidad máxima de la misma.

$$V_{R1,max} = V_{C2,max} \rightarrow V_{R1,max} = V_{R1,sal}$$

El espectro de opciones posibles para este Caso A, puede observarse a continuación en la Figura B1.



Figura B1: Espectro de posibilidades para el Caso A, de una Recta seguida de una Curva.

Tal y como se muestra en la figura encontramos diferentes opciones en función de la velocidad de entrada a la recta:

- Si la velocidad de entrada a la recta es menor o igual que la velocidad de salida de la recta, entonces nos encontramos en el Caso A1.

$$V_{R1,ent} \leq V_{R1,sal}$$

- Si la velocidad de entrada a la recta es mayor que la velocidad de salida de la recta, entonces nos encontramos en el Caso A2.

$$V_{R1,ent} > V_{R1,sal}$$

No obstante, es importante estudiar los Casos A1 y A2 por separado, ya que dentro de cada uno de ellos, pueden darse distintas posibilidades.

Caso A1:

Dentro del Caso A1, primero se comprueba si en el espacio que hay disponible (la longitud de la Recta), da tiempo a acelerar desde la velocidad de entrada a la recta, hasta la velocidad de salida (que idealmente es la velocidad máxima de la curva posterior).

$$V_{R1,ent} \xrightarrow{\text{Acelerar}} [V_{R1,sal} = V_{C2,max}]$$

Si esto no es posible, nos encontramos en el **Caso A1.a**, donde el vehículo no entrará a la siguiente curva a su $V_{C,max}$

Si esto sí es posible, se comprueba entonces si en el espacio que hay disponible (la longitud de la Recta), da tiempo a acelerar desde la velocidad de entrada a la recta hasta la velocidad máxima de dicha recta, y luego a frenar hasta la velocidad de salida (que idealmente es la velocidad máxima de la curva posterior)

$$V_{R1,ent} \xrightarrow{\text{Acelerar}} V_{R1,max} \xrightarrow{\text{Frenar}} [V_{R1,sal} = V_{C2,max}]$$

Si esto no es posible, nos encontramos en el **Caso A1.b**, donde el vehículo acelera hasta una velocidad determinada (menor a la velocidad máxima de la recta), y comienza a frenar de forma que justo llega al inicio de la curva a la velocidad máxima de la misma.

Por el contrario, si lo definido en el párrafo anterior si que fuese posible, entonces nos encontraríamos en el tercer y último **Caso A1.c**. En este caso, el vehículo acelera hasta la velocidad máxima de la recta, y se mantiene el máximo tiempo posible a la velocidad máxima de la recta para poder frenar justo para salir de la recta a la velocidad máxima de la curva siguiente.

En la Tabla B2 que se observa en la siguiente página, se recopilan las tres posibilidades correspondientes al Caso A1.

Tabla B2: Situaciones posibles para el Caso A1.

Caso	Entrada a Recta	Fase de Aceleración	Fase de Velocidad=cte	Fase de Frenada	Salida de Recta
A1.a	$V_{ent} < V_{sal}$	Acelerar al máximo PERO $V_R < V_{C,max} < V_{R,max}$	-	-	$V_{sal} < V_{C,max}$
A1.b		Acelerar al máximo PERO $V_R < V_{R,max}$	-	Frenar al máximo hasta $V_R = V_{C,max}$	$V_{sal} = V_{C,max}$
A1.c		Acelerar al máximo hasta $V_R = V_{R,max}$	Mantener a $V_R = V_{R,max} = cte$	Frenar al máximo hasta $V_R = V_{C,max}$	$V_{sal} = V_{C,max}$

Caso A2:

Dentro del Caso A2, primero se comprueba si en el espacio que hay disponible (la longitud de la Recta), da tiempo a frenar desde la velocidad de entrada a la recta, hasta la velocidad de salida (que idealmente es la velocidad máxima de la curva posterior).

$$V_{R1,ent} \xrightarrow{\text{Frenar}} [V_{R1,sal} = V_{C2,max}]$$

Si esto no es posible, nos encontramos en el **Caso A2.a**, donde el vehículo teóricamente entraría en la curva a una velocidad mayor a la máxima admisible. Dado que esto no puede suceder, si el Caso A2.a se produce, será necesario modificar la pareja de tramos anteriores para ajustar las velocidades e igualar la velocidad de salida de la recta a $V_{C,max}$

Si esto sí es posible, se comprueba entonces si en el espacio que hay disponible (la longitud de la Recta), da tiempo a acelerar desde la velocidad de entrada a la recta hasta la velocidad máxima de dicha recta, y luego a frenar hasta la velocidad de salida (que idealmente es la velocidad máxima de la curva posterior)

$$V_{R1,ent} \xrightarrow{\text{Acelerar}} V_{R1,max} \xrightarrow{\text{Frenar}} [V_{R1,sal} = V_{C2,max}]$$

Si esto no es posible, nos encontramos en el **Caso A2.b**, donde el vehículo acelera hasta una velocidad determinada (menor a la velocidad máxima de la recta), y comienza a frenar de forma que justo llega al inicio de la curva a la velocidad máxima de la misma.

Por el contrario, si lo definido en el párrafo anterior sí que fuese posible, entonces nos encontraríamos en el tercer y último **Caso A2.c**. En este caso, el vehículo acelera hasta la velocidad máxima de la recta, y se mantiene el máximo tiempo posible a la velocidad máxima de la recta para poder frenar justo para salir de la recta a la velocidad máxima de la curva siguiente.

En la Tabla B3 que se observa en la siguiente página, se recopilan las tres posibilidades correspondientes al Caso A2.

Tabla B3: Situaciones posibles para el Caso A2.

Caso	Entrada a Recta	Fase de Aceleración	Fase de Velocidad=cte	Fase de Frenada	Salida de Recta
A2.a		-	-	Frenar al máximo PERO $V_R > V_{C,max}$	$V_{sal} > V_{C,max}$ (*)
A2.b	$V_{ent} > V_{sal}$	Acelerar al máximo PERO $V_R < V_{R,max}$	-	Frenar al máximo hasta $V_R = V_{C,max}$	$V_{sal} = V_{C,max}$
A2.c		Acelerar al máximo hasta $V_R = V_{R,max}$	Mantener a $V_R = V_{R,max}$ = cte	Frenar al máximo hasta $V_R = V_{C,max}$	$V_{sal} = V_{C,max}$

CASO B:

Es el caso en el que la velocidad máxima de la Recta coincide con la velocidad máxima de la Curva. En ese caso, esta igualdad de velocidades implica que el vehículo sale de la recta a la velocidad máxima de la misma.

$$V_{R1,max} = V_{C2,max} \rightarrow V_{R1,max} = V_{R1,sal}$$

El espectro de opciones posibles para este Caso B, puede observarse a continuación en la Figura B2.

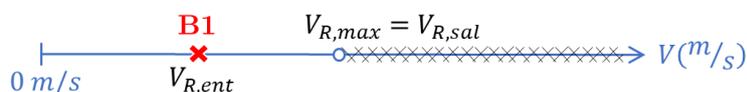


Figura B2: Espectro de posibilidades para el Caso B, de una Recta seguida de una Curva.

Tal y como se muestra en la figura, encontramos una única posibilidad, consistente en el caso en que la velocidad de entrada a la recta es menor o igual que la velocidad de salida de la recta -coincidente con la velocidad máxima de dicha recta-. Este es el denominado Caso B1.

$$V_{R1,ent} \leq V_{R1,sal}$$

Al igual que en los anteriores Casos A1 y A2, en el Caso B1 también encontramos distintas posibilidades:

Caso B1:

Dentro del Caso B1, primero se comprueba si en el espacio que hay disponible (la longitud de la Recta), da tiempo a acelerar desde la velocidad de entrada a la recta, hasta la velocidad de salida (que idealmente es la velocidad máxima de la curva posterior).

$$V_{R1,ent} \xrightarrow{\text{Acelerar}} [V_{R1,sal} = V_{C2,max}]$$

Si esto no es posible, nos encontramos en el **Caso B1.a**, donde el vehículo no entrará a la siguiente curva a su $V_{C,max}$.

Por el contrario, si esto sí es posible, nos encontramos en el **Caso B1.b**, donde el vehículo acelera hasta la velocidad máxima de la recta, y se mantiene a esa velocidad hasta la salida de la recta (ya que esta velocidad coincide justamente con la velocidad máxima de la curva).

En la Tabla B4 que se observa a continuación, se recopilan las dos posibilidades correspondientes al Caso B1.

Tabla B4: Situaciones posibles para el Caso B1.

Caso	Entrada a Recta	Fase de Aceleración	Fase de Velocidad=cte	Fase de Frenada	Salida de Recta
B1.a	$V_{ent} < V_{sal}$	Acelerar al máximo PERO $V_R < V_{R,max} = V_{C,max}$	-	-	$V_{sal} < V_{C,max}$
B1.b		Acelerar al máximo hasta $V_R = V_{R,max} = V_{C,max}$	Mantener a $V_R = V_{R,max} = cte$	-	$V_{sal} = V_{C,max}$

B.5. Curva seguida de una Recta

Los cálculos para este caso corresponden a la Curva (C1), mientras que la posterior Recta (R2) sirve únicamente como referencia. En este caso, también se asume que la velocidad máxima de la curva es siempre menor que la velocidad máxima de la recta.

$$V_{C,max} \leq V_{R,max}$$

Existen dos opciones posibles, ambas agrupadas en el Caso C

CASO C:

Existen dos opciones posibles, en función de la velocidad con la que el vehículo entre en la curva:

- Si la velocidad de entrada a la curva es menor o igual que la velocidad máxima de la curva, entonces se trata del Caso C1.

$$V_{C1,ent} \leq V_{C1,max}$$

- Si la velocidad de entrada a la curva es igual a la velocidad máxima de dicha curva, entonces se trata del Caso C2.

$$V_{C1,ent} > V_{C1,max}$$

No obstante, es importante estudiar los Casos C1 y C2 por separado, ya que dentro de cada uno de ellos, pueden darse distintas posibilidades.

Caso C1:

Dentro del Caso C1, primero se comprueba si en el espacio que hay disponible (la longitud de la Curva), da tiempo a acelerar desde la velocidad de entrada, hasta la velocidad máxima de la propia curva.

$$V_{C1,ent} \xrightarrow{\text{Acelerar}} V_{C1,max}$$

Si esto no es posible, nos encontramos en el **Caso C1.a**, donde el vehículo no saldrá de la curva a su $V_{C,max}$.

Por el contrario, si esto sí es posible, nos encontramos en el **Caso C1.b**, donde el vehículo acelera hasta la velocidad máxima de la curva, y se mantiene a esa velocidad hasta la salida de la misma.

Caso C2:

Dentro del Caso C2, dado que el vehículo ya entra a la curva a la velocidad máxima admisible en dicha curva, no será necesario acelerar ni frenar. Este es el **Caso C2.a** y es el único posible. El vehículo se mantiene durante todo el trazado de la curva a velocidad constante e igual a $V_{C1,max}$.

En la Tabla B5 que se observa a continuación, se recopilan las dos posibilidades correspondientes a los Casos C1 y C2.

Tabla B5: Situaciones posibles para los Casos C1 y C2.

Caso	Entrada a Recta	Fase de Aceleración	Fase de Velocidad=cte	Fase de Frenada	Salida de Recta
C1.a	$V_{ent} < V_{sal}$	Acelerar al máximo PERO $V_c < V_{C,max}$	-	-	$V_{sal} < V_{C,max}$
C1.b		Acelerar al máximo hasta $V_c = V_{C,max}$	Mantener a $V_c = V_{C,max} = cte$	-	$V_{sal} = V_{C,max}$
C2.a	$V_{ent} = V_{C,max}$	-	Mantener a $V_c = V_{C,max} = cte$	-	$V_{sal} = V_{C,max}$

B.6. Recta seguida de otra Recta

Los cálculos para este caso corresponden a la primera Recta (R1), mientras que la segunda recta (R2) sirve únicamente como referencia. Para esta combinatoria de tramos, existen dos posibilidades, ambas agrupadas en el mismo Caso D.

CASO D:

Existen dos opciones posibles, en función de la velocidad con la que el vehículo entre en la primera recta:

- Si la velocidad de entrada a la primera recta es menor que la velocidad máxima de dicha recta, entonces se trata del Caso D1.

$$V_{R1,ent} < V_{R1,max}$$

- Si la velocidad de entrada a la primera recta es igual a la velocidad máxima de dicha recta, entonces se trata del Caso D2.

$$V_{R1,ent} = V_{R1,max}$$

No obstante, es importante estudiar los Casos D1 y D2 por separado, ya que dentro de cada uno de ellos, pueden darse distintas posibilidades.

Caso D1:

Dentro del Caso D1, primero se comprueba si en el espacio que hay disponible (la longitud de la primera recta), da tiempo a acelerar desde la velocidad de entrada, hasta la velocidad máxima de la propia recta.

$$V_{R1,ent} \xrightarrow{\text{Acelerar}} V_{R1,max}$$

Si esto no es posible, nos encontramos en el **Caso D1.a**, donde el vehículo no saldrá de la primera recta a su $V_{R,max}$.

Por el contrario, si esto sí es posible, nos encontramos en el **Caso D1.b**, donde el vehículo acelera hasta la velocidad máxima de la primera recta, y se mantiene a esa velocidad hasta la entrada de la segunda recta.

Caso D2:

Dentro del Caso D2, dado que el vehículo ya entra a la primera recta a la velocidad máxima admisible, no será necesario acelerar ni frenar. Este es el **Caso D2.a** y es el único posible. El vehículo se mantiene durante todo el trazado de la recta a velocidad constante e igual a $V_{R,max}$.

En la Tabla B6 que se observa a continuación, se recopilan las dos posibilidades correspondientes a los Casos D1 y D2.

Tabla B6: Situaciones posibles para los Casos D1 y D2.

Caso	Entrada a Recta	Fase de Aceleración	Fase de Velocidad=cte	Fase de Frenada	Salida de Recta
D1.a	$V_{ent} < V_{sal}$	Acelerar al máximo PERO $V_R < V_{R,max}$	-	-	$V_{sal} < V_{R,max}$
D1.b		Acelerar al máximo hasta $V_R = V_{R,max}$	Mantener a $V_R = V_{R,max} = cte$	-	$V_{sal} = V_{R,max}$
D2.a	$V_{ent} = V_{R,max}$	-	Mantener a $V_R = V_{R,max} = cte$	-	$V_{sal} = V_{R,max}$

B.7. Curva seguida de otra Curva

Los cálculos para este caso corresponden a la primera Curva (C1), mientras que la segunda Curva (C2) sirve únicamente como referencia.

En el caso de encontrar dos curvas consecutivas, lo primero es comparar las velocidades máximas admisibles en ambas curvas.

- Si la velocidad máxima de la primera curva es menor que la velocidad máxima de la segunda, entonces nos encontramos en el Caso E.

$$V_{C1,max} < V_{C2,max}$$

- Si la velocidad máxima de la primera curva es mayor que la velocidad máxima de la segunda, entonces nos encontramos en el Caso F.

$$V_{C1,max} > V_{C2,max}$$

CASO E:

Es el caso en el que velocidad máxima de la primera curva es menor que la velocidad máxima de la segunda. El primer paso es el de comprobar si en el espacio que hay disponible (la longitud de la primera curva), da tiempo a acelerar desde la velocidad de entrada de dicha curva, hasta su velocidad máxima.

$$V_{C1,ent} \xrightarrow{\text{Acelerar}} [V_{C1,sal} = V_{C1,max}]$$

Si esto no es posible, nos encontramos en el **Caso E1.a**, donde el vehículo no entrará a la segunda curva a la $V_{C1,max}$

Por el contrario, si esto sí es posible, entonces nos encontraríamos en el **Caso E1.b**. En este caso, el vehículo acelera hasta la velocidad máxima de la primera curva, y se mantiene a esa velocidad hasta la entrada de la segunda curva.

En la Tabla B7 que se observa a continuación, se recopilan las posibilidades correspondientes al Caso E.

Tabla B7: Situaciones posibles para el Caso E.

Caso	Entrada a Recta	Fase de Aceleración	Fase de Velocidad=cte	Fase de Frenada	Salida de Recta
E1.a	$V_{ent} < V_{C1,max}$	Acelerar al máximo PERO $V_{C1} < V_{C,max}$	-	-	$V_{sal} < V_{C1,max}$
E1.b		Acelerar al máximo hasta $V_{C1} = V_{C1,max}$	Mantener a $V_{C1} = V_{C1,max} = cte$	-	$V_{sal} = V_{C1,max}$

CASO F:

Es el caso en el que la velocidad máxima de la primera curva es mayor que la velocidad máxima de la segunda.

Esto implica que el vehículo no puede salir de la primera curva a su velocidad máxima, ya que esta no sería admisible en la segunda curva.

Encontramos diferentes opciones en función de si la velocidad de entrada a la primera curva es mayor o menor a la velocidad máxima de la segunda curva:

- Si la velocidad de entrada a la primera curva es menor que la velocidad máxima de la segunda curva, entonces se trata del Caso F1.

$$V_{C1,ent} < V_{C2,max}$$

- Si la velocidad de entrada a la primera curva es mayor que la velocidad máxima de la segunda curva, entonces se trata del Caso F2.

$$V_{C1,ent} > V_{C2,max}$$

No obstante, es importante estudiar los Casos F1 y F2 por separado, ya que dentro de cada uno de ellos, pueden darse distintas posibilidades.

Caso F1:

Dentro del Caso F1, primero se comprueba si en el espacio que hay disponible (la longitud de la primera curva), da tiempo a acelerar desde la velocidad de entrada a la primera curva, hasta la velocidad máxima de la segunda curva.

$$V_{C1,ent} \xrightarrow{\text{Acelerar}} V_{C2,max}$$

Si esto no es posible, nos encontramos en el **Caso F1.a**, donde el vehículo únicamente acelerará, pero no entrará a la segunda curva a su $V_{C2,max}$

Si esto sí es posible, se comprueba entonces si en el espacio que hay disponible (la longitud de la primera curva), da tiempo a acelerar desde la velocidad de entrada de la primera curva, hasta la velocidad máxima de dicha curva, y luego a frenar hasta la velocidad máxima de la segunda curva posterior

$$V_{C1,ent} \xrightarrow{\text{Acelerar}} V_{C1,max} \xrightarrow{\text{Frenar}} V_{C2,max}$$

Si esto no es posible, nos encontramos en el **Caso F1.b**, donde el vehículo acelera hasta una velocidad determinada (menor a la velocidad máxima de la primera curva), y seguidamente comienza a frenar de forma que justo llega al inicio de la segunda curva a la velocidad máxima de la misma.

Por el contrario, si lo definido en el párrafo anterior si que fuese posible, entonces nos encontraríamos en el tercer y último **Caso F1.c**. En este caso, el vehículo acelera hasta la velocidad máxima de la primera curva, y se mantiene el máximo tiempo posible a la velocidad máxima de dicha curva, para poder frenar justo para salir de la primera recta a la velocidad máxima de la curva siguiente.

En la Tabla B8 que se observa a continuación, se recopilan las tres posibilidades correspondientes al Caso F1.

Tabla B8: Situaciones posibles para el Caso F1.

Caso	Entrada a Recta	Fase de Aceleración	Fase de Velocidad=cte	Fase de Frenada	Salida de Recta
F1.a		Acelerar al máximo PERO $V_{C1} < V_{C2,max}$	-	-	$V_{sal} < V_{C2,max}$
F1.b	$V_{C1,ent} < V_{C2,max}$	Acelerar al máximo PERO $V_{C1} < V_{C1,max}$	-	Frenar al máximo hasta $V_{C1} = V_{C2,max}$	$V_{sal} = V_{C2,max}$
F1.c		Acelerar al máximo hasta $V_{C1} = V_{C1,max}$	Mantener a $V_C = V_{C1,max} = cte$	Frenar al máximo hasta $V_{C1} = V_{C2,max}$	$V_{sal} = V_{C2,max}$

Caso F2:

Dentro del Caso F2, primero se comprueba si en el espacio que hay disponible (la longitud de la primera curva), da tiempo a frenar desde la velocidad de entrada a la primera curva, hasta la velocidad máxima de la segunda curva.

$$V_{C1,ent} \xrightarrow{\text{Frenar}} V_{C2,max}$$

Si esto no es posible, nos encontramos en el **Caso F2.a**, donde el vehículo teóricamente entraría en la segunda curva a una velocidad mayor a la máxima admisible en dicho tramo. Dado que esto no puede suceder, si el Caso F2.a se produce, será necesario modificar la pareja de tramos anteriores para ajustar las velocidades e igualar la velocidad de salida de la primera curva a $V_{C2,max}$ (de forma equivalente a como sucedía previamente en el Caso A2.a).

No obstante, si lo descrito al inicio del caso F2 sí es posible, se comprueba entonces si en el espacio que hay disponible (la longitud de la primera curva), da tiempo a acelerar desde la velocidad de entrada de la primera curva hasta la velocidad máxima de dicha curva, y luego a frenar hasta la velocidad máxima de la curva posterior.

$$V_{C1,ent} \xrightarrow{\text{Acelerar}} V_{C1,max} \xrightarrow{\text{Frenar}} V_{C2,max}$$

Si esto no es posible, nos encontramos en el **Caso F2.b**, donde el vehículo acelera hasta una velocidad determinada (menor a la velocidad máxima de la primera curva), y comienza a frenar de forma que justo llega al inicio de la segunda curva a la velocidad máxima de la misma.

Por el contrario, si lo definido en el párrafo anterior sí que fuese posible, entonces nos encontraríamos en el tercer y último **Caso F2.c**. En este caso, el vehículo acelera hasta la velocidad máxima de la primera curva, y se mantiene el máximo tiempo posible a la velocidad máxima de dicho tramo, para luego poder frenar justo para salir de la primera curva a la velocidad máxima de la curva siguiente.

En la Tabla B9 que se observa en la siguiente página, se recopilan las tres posibilidades correspondientes al Caso F2.

Tabla B9: Situaciones posibles para el Caso F2.

Caso	Entrada a Recta	Fase de Aceleración	Fase de Velocidad=cte	Fase de Frenada	Salida de Recta
F2.a		-	-	Frenar al máximo PERO $V_C > V_{C2,max}$	$V_{sal} > V_{C2,max}$ (*)
F2.b	$V_{C1,ent} > V_{C2,max}$	Acelerar al máximo PERO $V_{C1} < V_{C1,max}$	-	Frenar al máximo hasta $V_{C1} = V_{C2,max}$	$V_{sal} = V_{C2,max}$
F2.c		Acelerar al máximo hasta $V_C = V_{C1,max}$	Mantener a $V_C = V_{C1,max} = cte$	Frenar al máximo hasta $V_C = V_{C2,max}$	$V_{sal} = V_{C2,max}$

ANEXO C. Ficha de Resultados Gráficos de las Simulaciones

En el presente Anexo de la memoria Descriptiva, se recopilan graficas para todos los casos sin y con alerón, estudiados durante el desarrollo del Trabajo Final de Grado. Se plotean tanto presiones como velocidades del vehículo.

Para el caso de las Presiones, se plotea el contorno de presiones. Para el caso de las Velocidades, se plotea el contorno de velocidades, vectores y líneas de corriente.

La información representada en este anexo sirve como complemento a la proporcionada en la Memoria descriptiva.

C.1. Contornos de Presiones

A continuación se muestra el ploteo de los Contornos de Presiones para el caso del vehículo sin alerón; y para los casos del vehículo con alerones con ángulo de inclinación de 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55° y 60°.

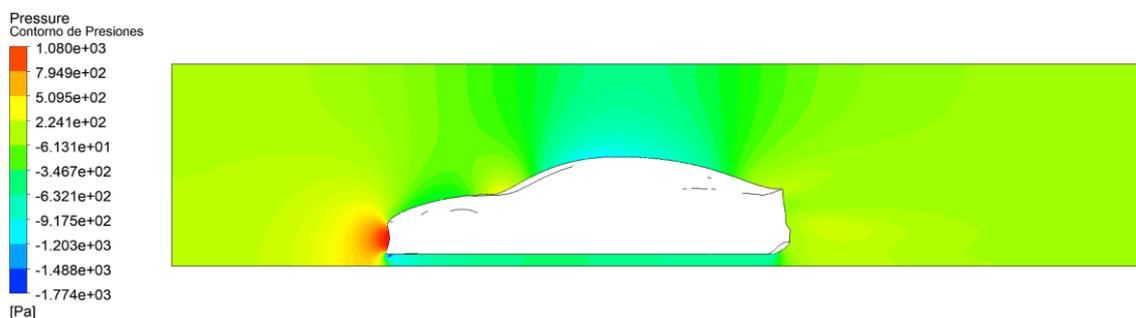


Figura C1.1: Contorno de presiones para el vehículo sin alerón. (ANSYS Fluent®)

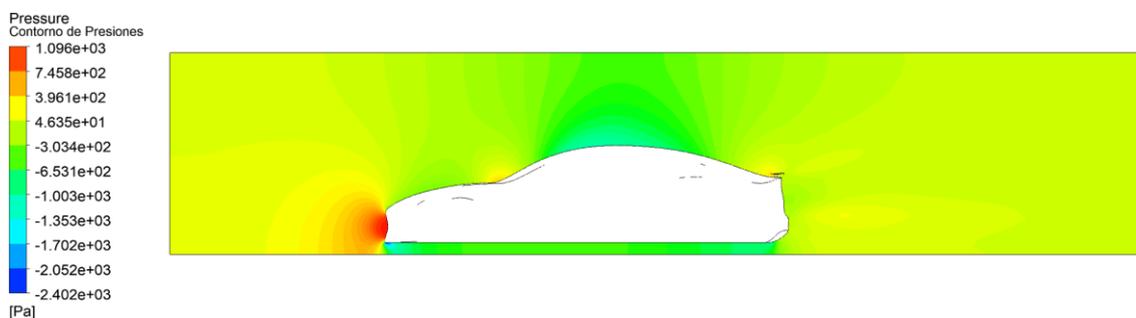


Figura C1.2: Contorno de presiones para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 5°. (ANSYS Fluent®)

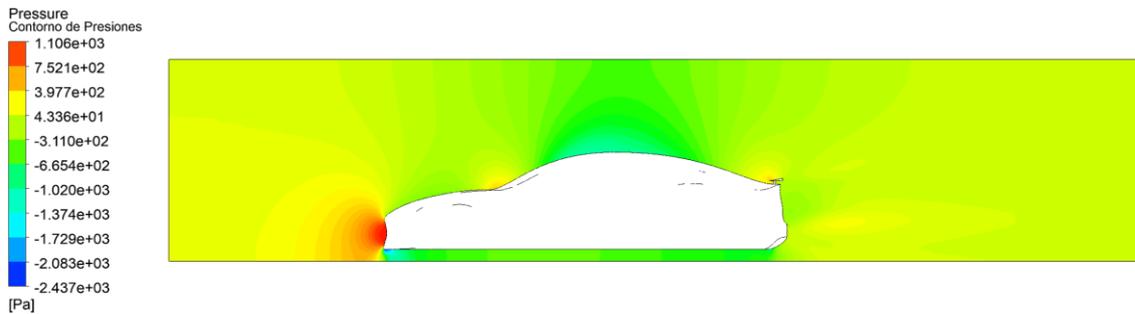


Figura C1.3: Contorno de presiones para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 10°. (ANSYS Fluent®)

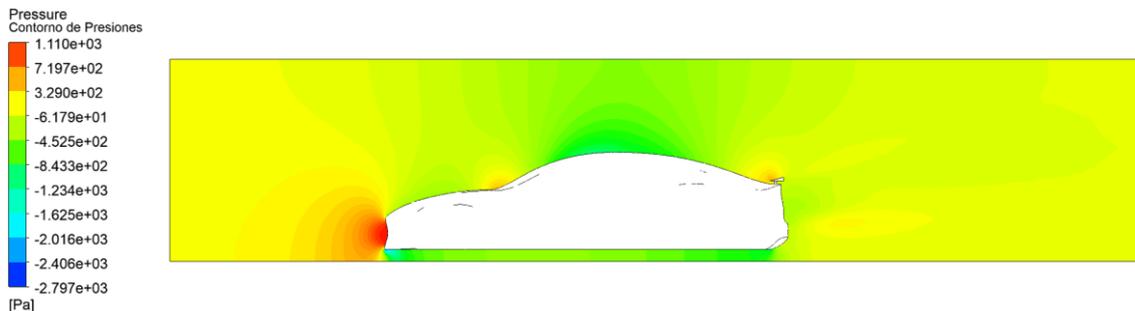


Figura C1.4: Contorno de presiones para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 15°. (ANSYS Fluent®)

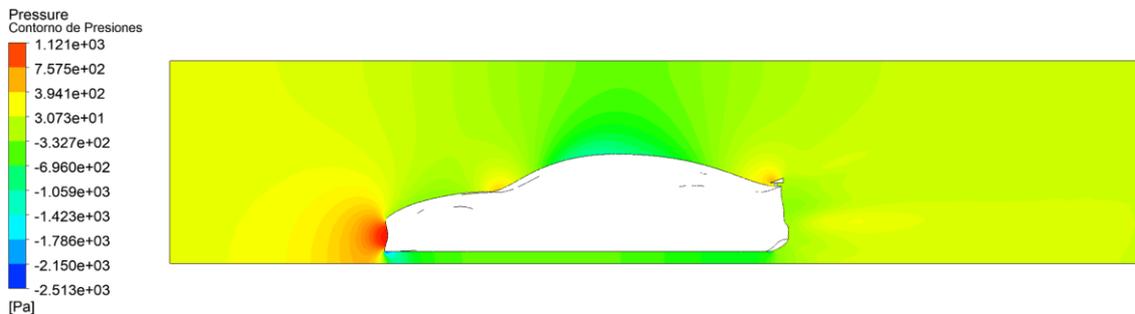


Figura C1.5: Contorno de presiones para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 20°. (ANSYS Fluent®)

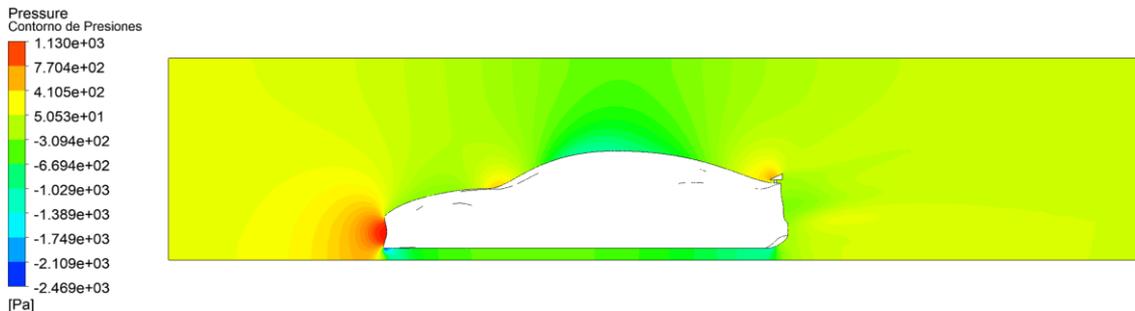


Figura C1.6: Contorno de presiones para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 25°. (ANSYS Fluent®)

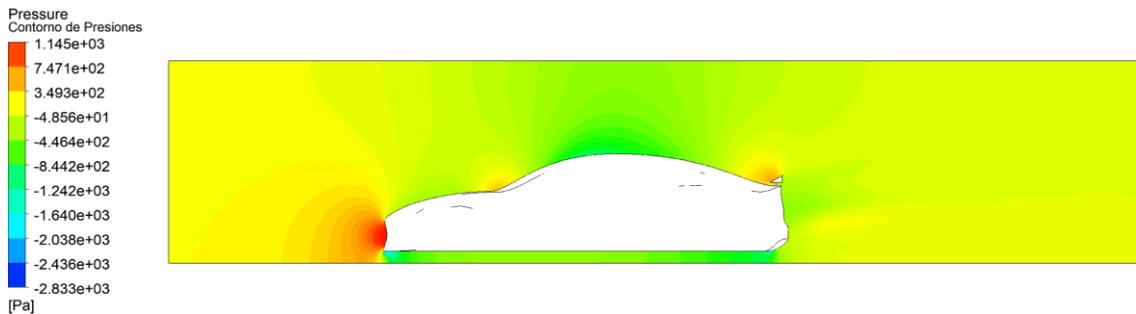


Figura C1.7: Contorno de presiones para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 30°. (ANSYS Fluent®)

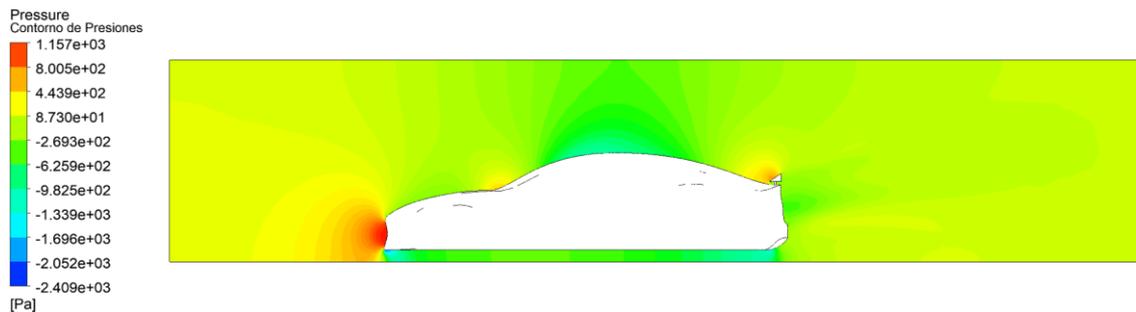


Figura C1.8: Contorno de presiones para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 35°. (ANSYS Fluent®)

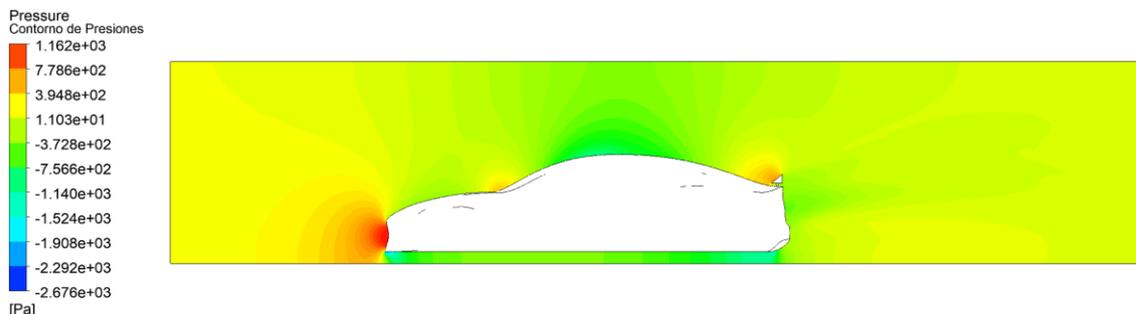


Figura C1.9: Contorno de presiones para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 40°. (ANSYS Fluent®)

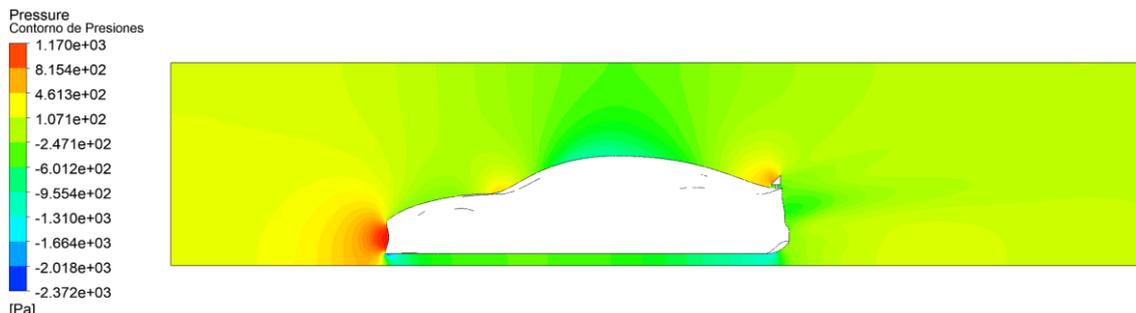


Figura C1.10: Contorno de presiones para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 45°. (ANSYS Fluent®)

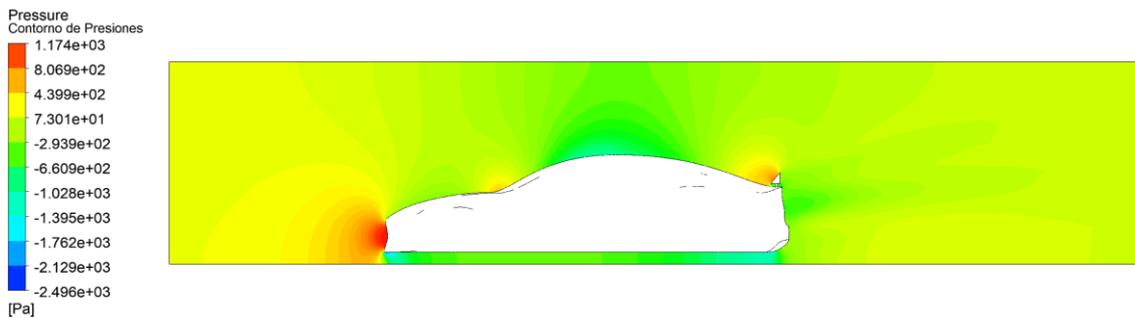


Figura C1.11: Contorno de presiones para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 50°. (ANSYS Fluent®)

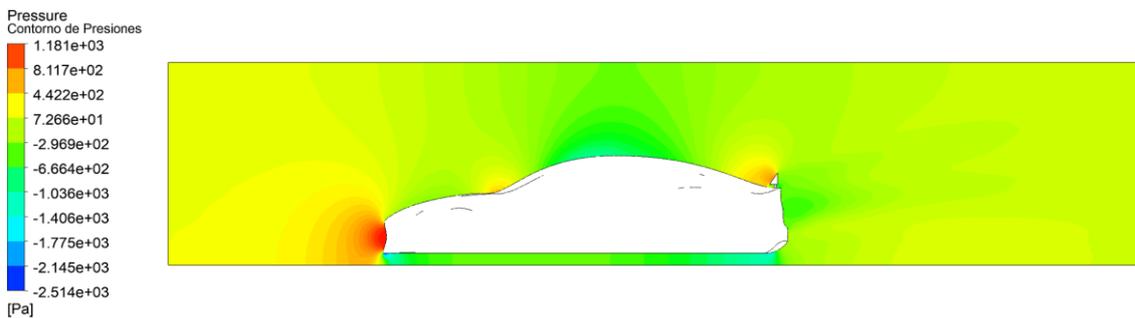


Figura C1.12: Contorno de presiones para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 55°. (ANSYS Fluent®)

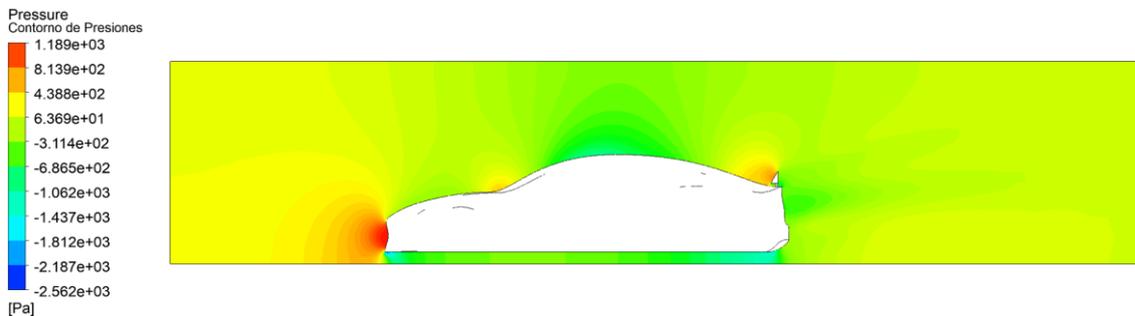


Figura C1.13: Contorno de presiones para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 60°. (ANSYS Fluent®)

C.2. Contornos de Velocidades

A continuación se muestra el ploteo de los Contornos de Velocidades, tanto para el caso del vehículo sin alerón, como para los casos del vehículo con alerones con ángulo de inclinación de 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55° y 60°.

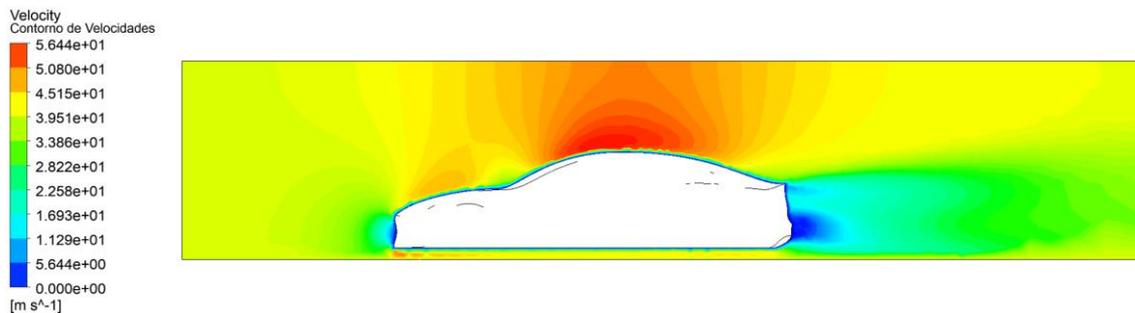


Figura C2.1: Contorno de velocidades para el vehículo sin alerón. (ANSYS Fluent®)

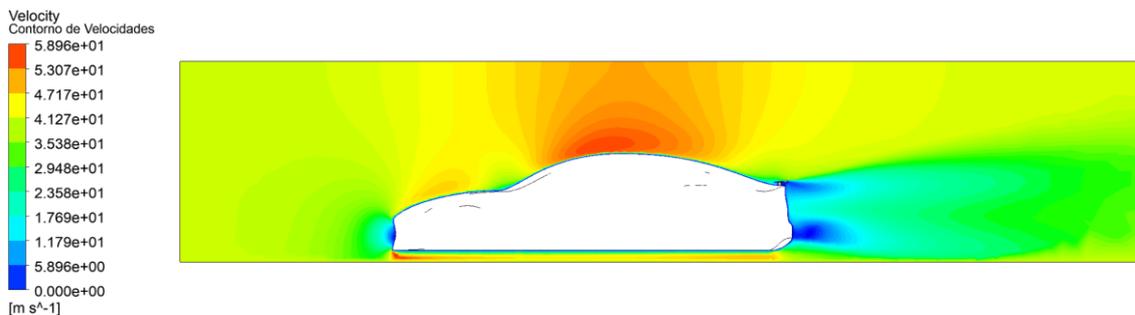


Figura C2.2: Contorno de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 5°. (ANSYS Fluent®)

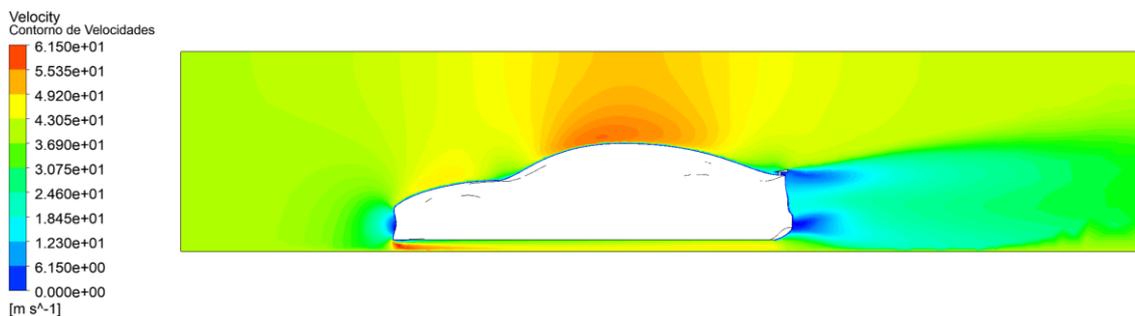


Figura C2.3: Contorno de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 10°. (ANSYS Fluent®)

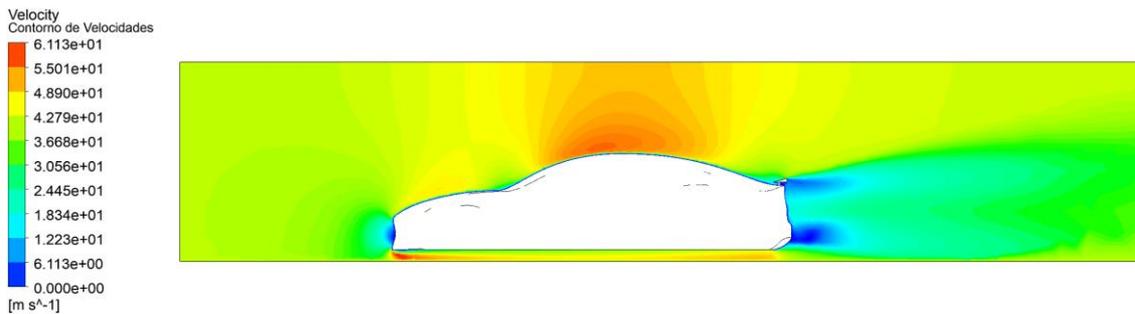


Figura C2.4: Contorno de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 15°. (ANSYS Fluent®)

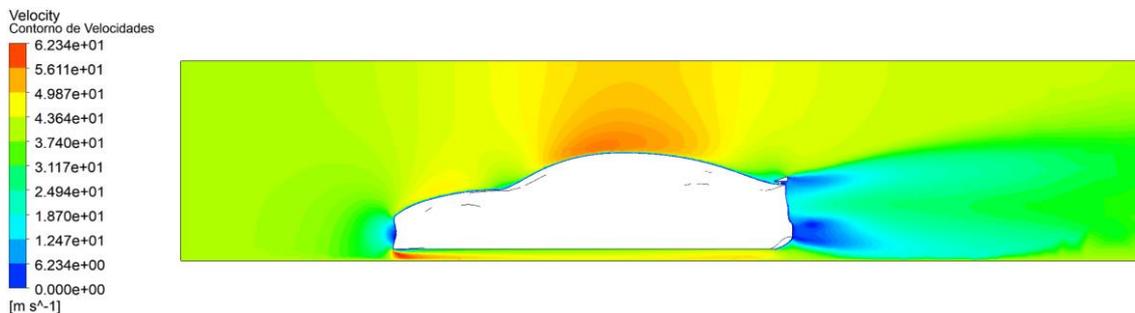


Figura C2.5: Contorno de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 20°. (ANSYS Fluent®)

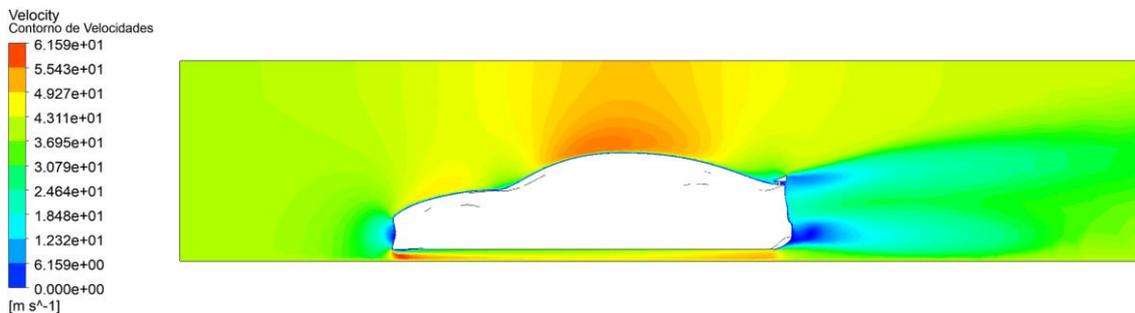


Figura C2.6: Contorno de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 25°. (ANSYS Fluent®)

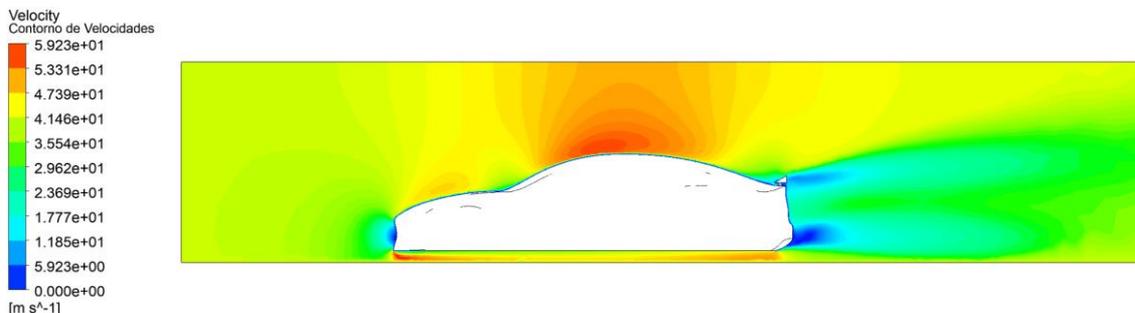


Figura C2.7: Contorno de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 30°. (ANSYS Fluent®)

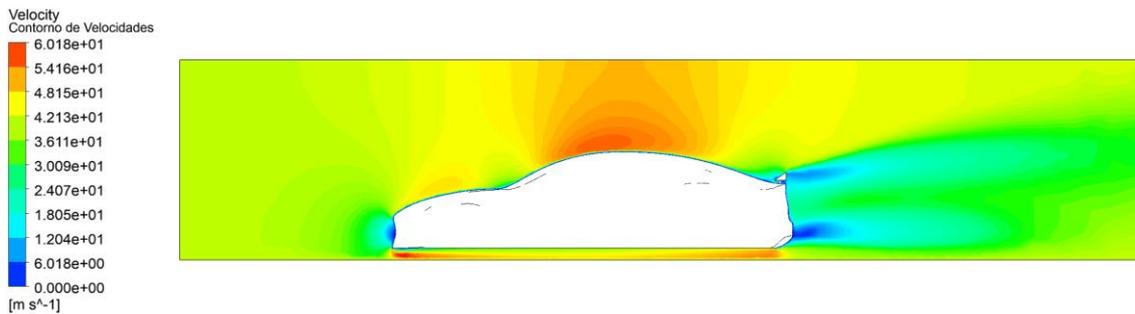


Figura C2.8: Contorno de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 35°. (ANSYS Fluent®)

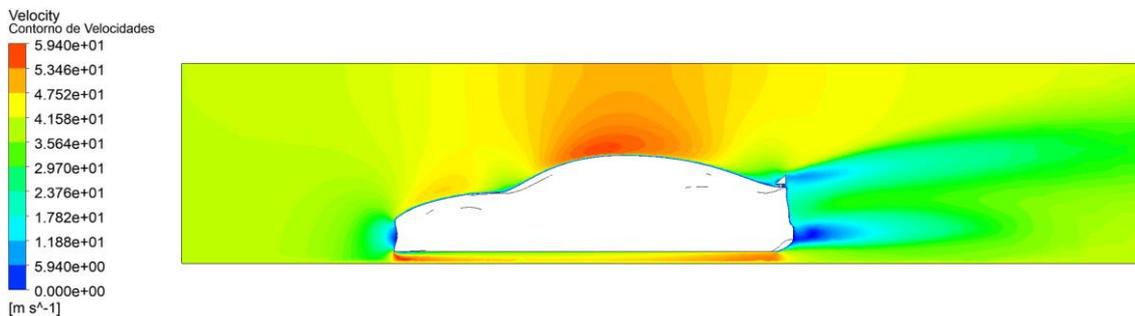


Figura C2.9: Contorno de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 40°. (ANSYS Fluent®)

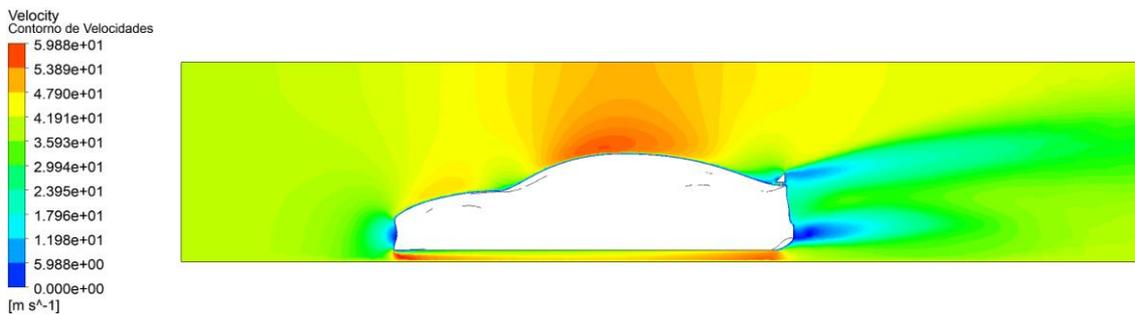


Figura C2.10: Contorno de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 45°. (ANSYS Fluent®)

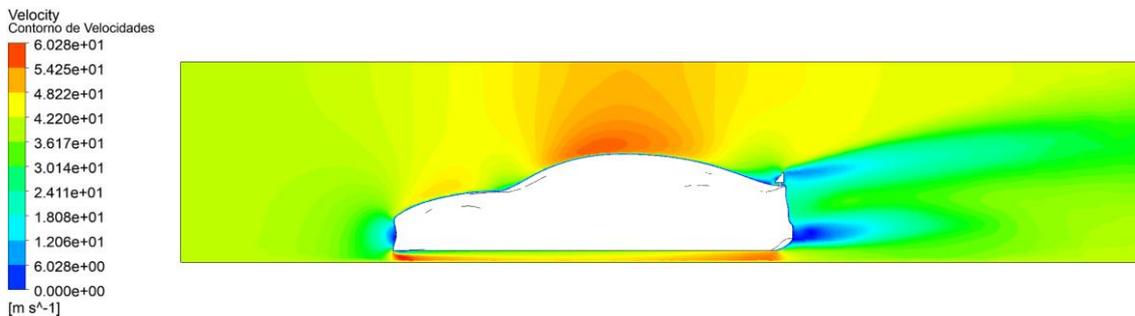


Figura C2.11: Contorno de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 50°. (ANSYS Fluent®)

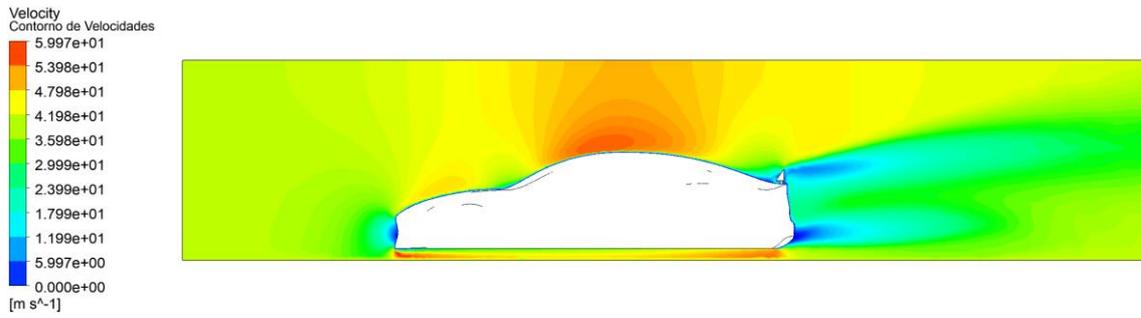


Figura C2.12: Contorno de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 55°. (ANSYS Fluent®)

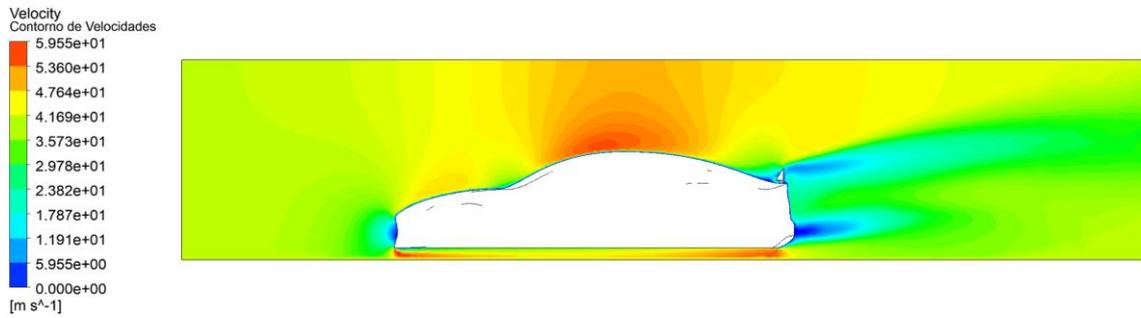


Figura C2.13: Contorno de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 60°. (ANSYS Fluent®)

C.3. Vectorización de Velocidades

A continuación se muestra el ploteo de la Vectorización de la Velocidad, tanto para el caso del vehículo sin alerón, como para los casos del vehículo con alerones con ángulo de inclinación de 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55° y 60°.

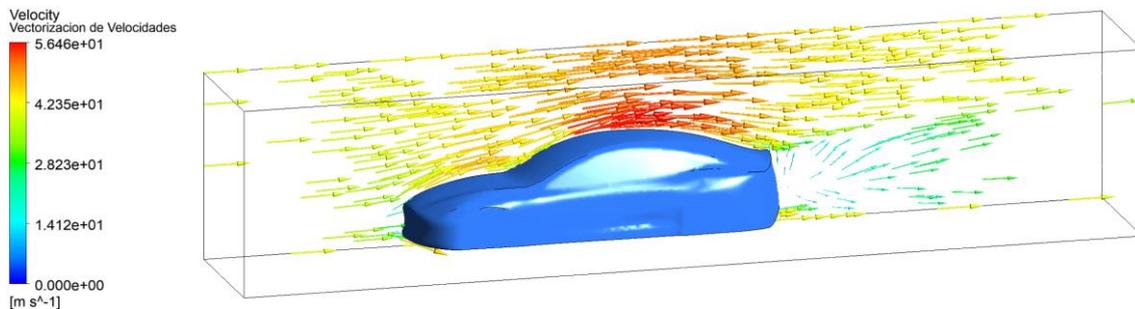


Figura C3.1: Vectorización de velocidades para el vehículo sin alerón. (ANSYS Fluent®)

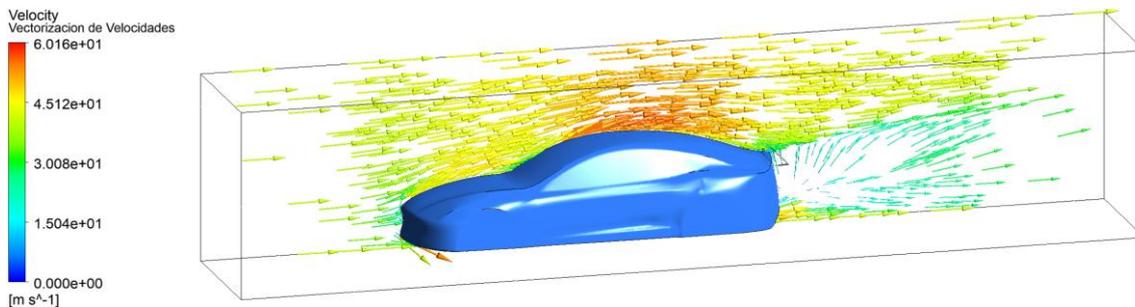


Figura C3.2: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 5°. (ANSYS Fluent®)

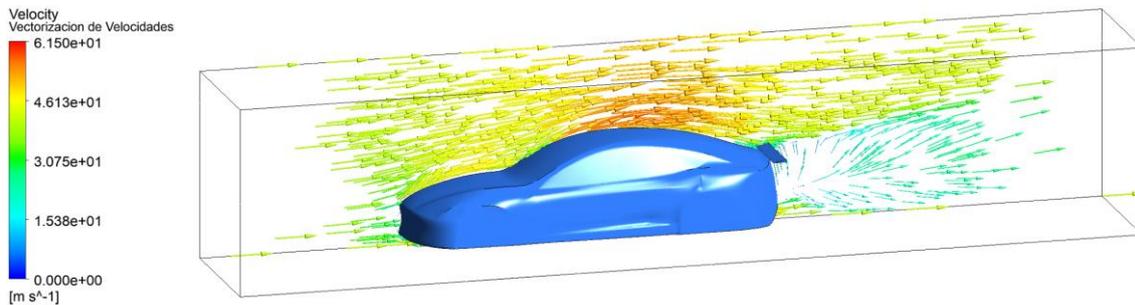


Figura C3.3: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 10°. (ANSYS Fluent®)

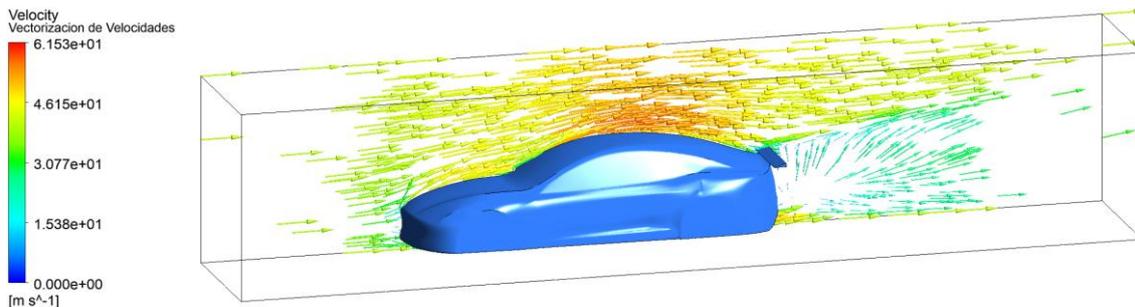


Figura C3.4: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 15°. (ANSYS Fluent®)

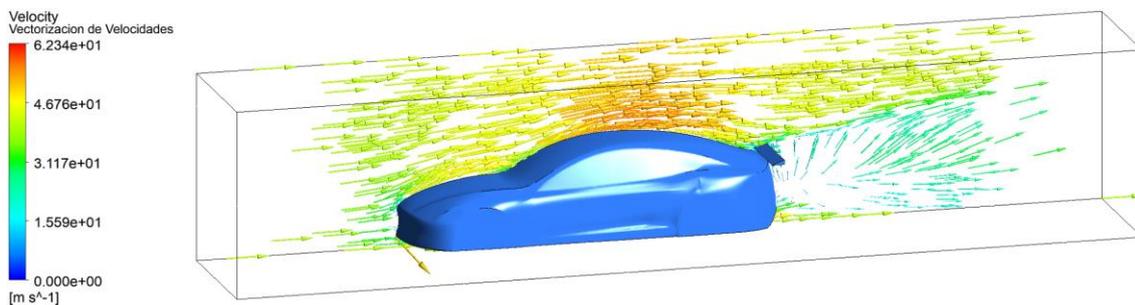


Figura C3.5: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 20°. (ANSYS Fluent®)

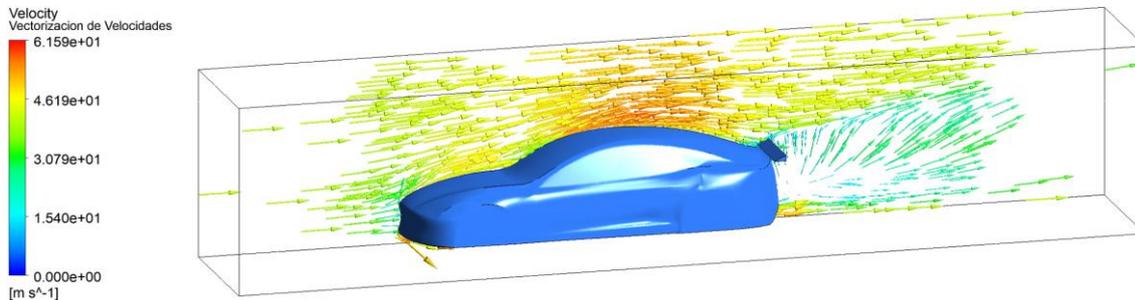


Figura C3.6: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 25°. (ANSYS Fluent®)

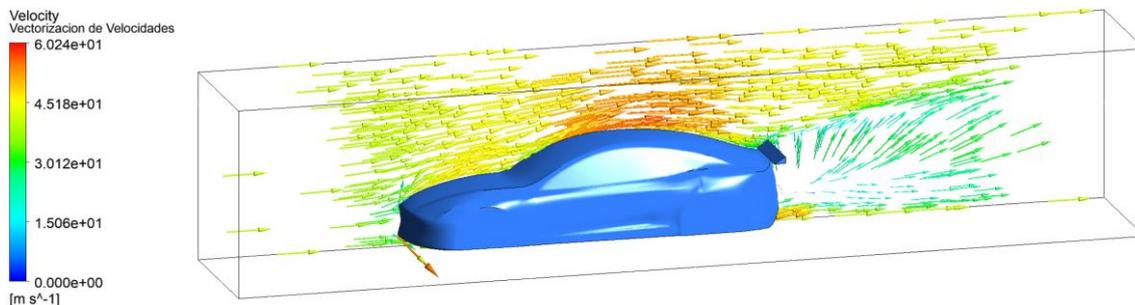


Figura C3.7: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 30°. (ANSYS Fluent®)

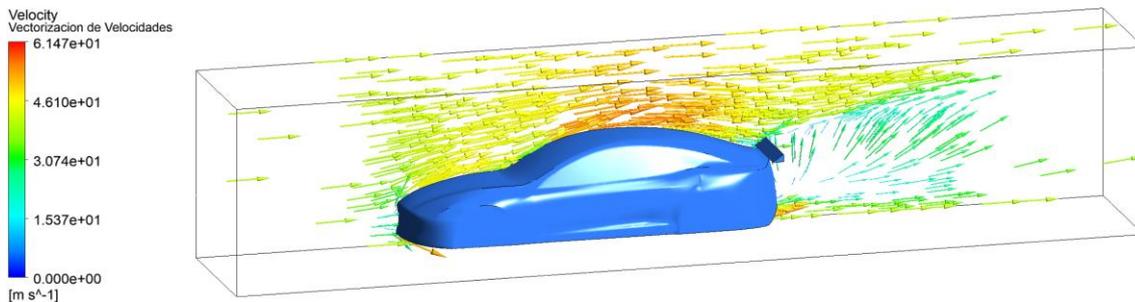


Figura C3.8: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 35°. (ANSYS Fluent®)

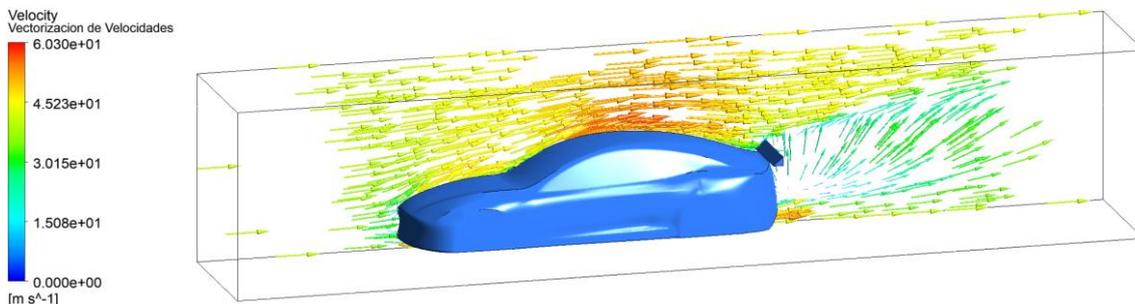


Figura C3.9: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 40°. (ANSYS Fluent®)

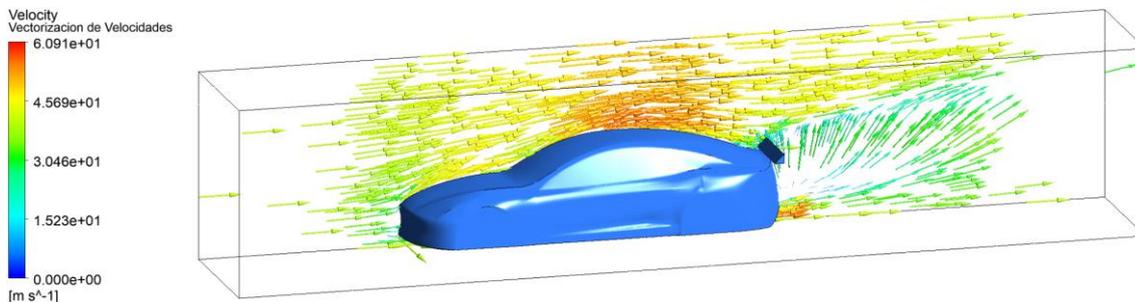


Figura C3.10: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 45°. (ANSYS Fluent®)

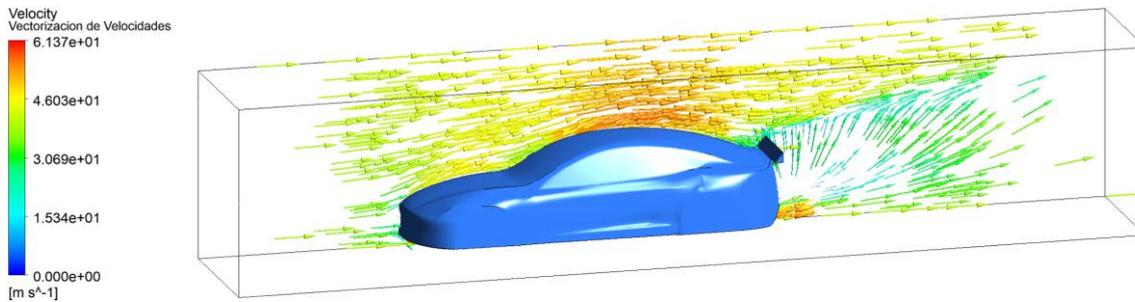


Figura C3.11: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 50°. (ANSYS Fluent®)

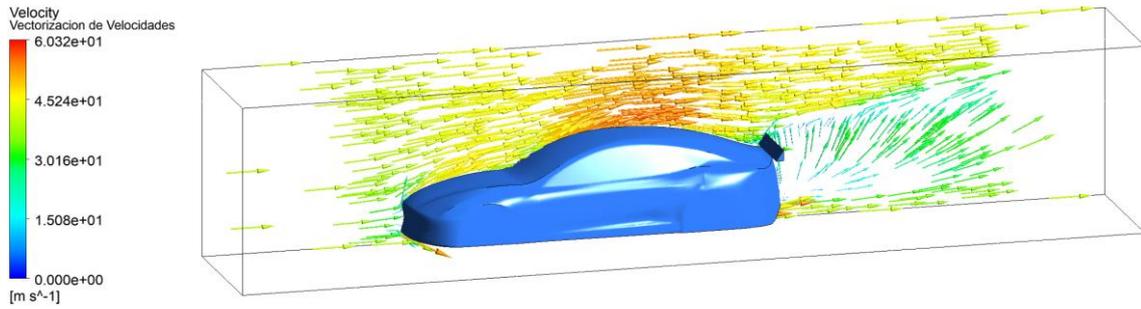


Figura C3.12: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 55°. (ANSYS Fluent®)

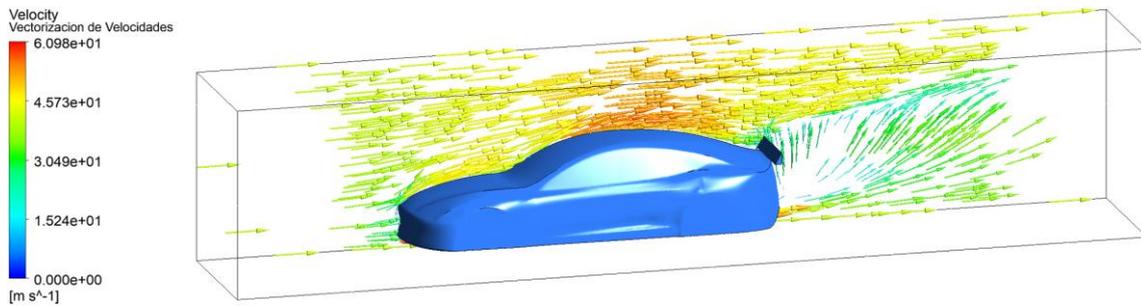


Figura C3.13: Vectorización de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 60°. (ANSYS Fluent®)

C.4. Líneas de Corriente de Velocidades

A continuación se muestra el ploteo de Líneas de Corriente de Velocidades, tanto para el caso del vehículo sin alerón, como para los casos del vehículo con alerones con ángulo de inclinación de 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55° y 60°.

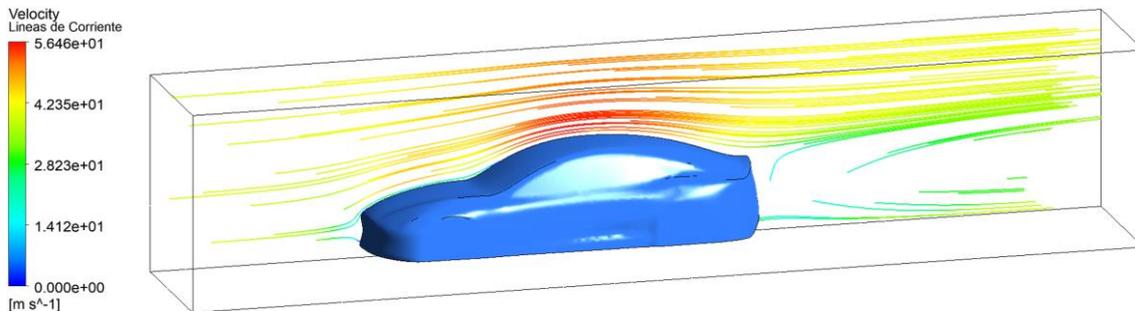


Figura C4.1: Líneas de Corriente de velocidades para el vehículo sin alerón. (ANSYS Fluent®)

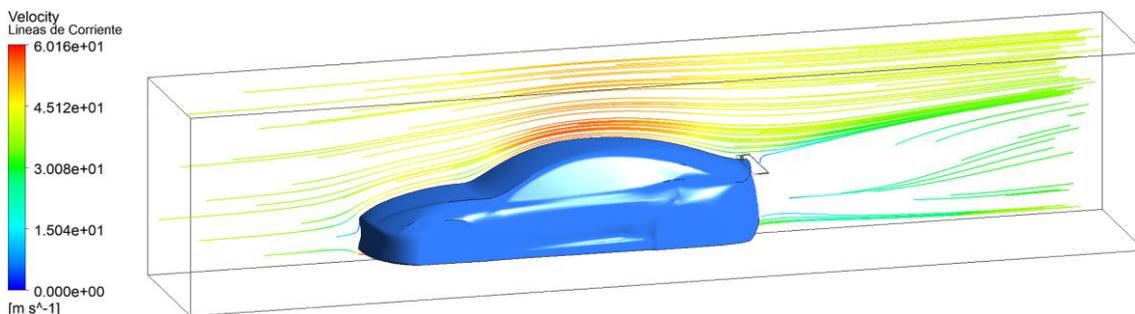


Figura C4.2: Líneas de Corriente de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 5°. (ANSYS Fluent®)

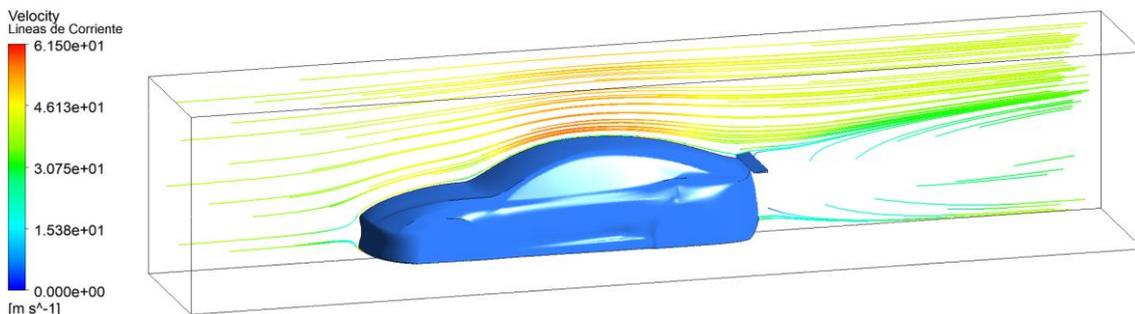


Figura C4.3: Líneas de Corriente de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 10°. (ANSYS Fluent®)

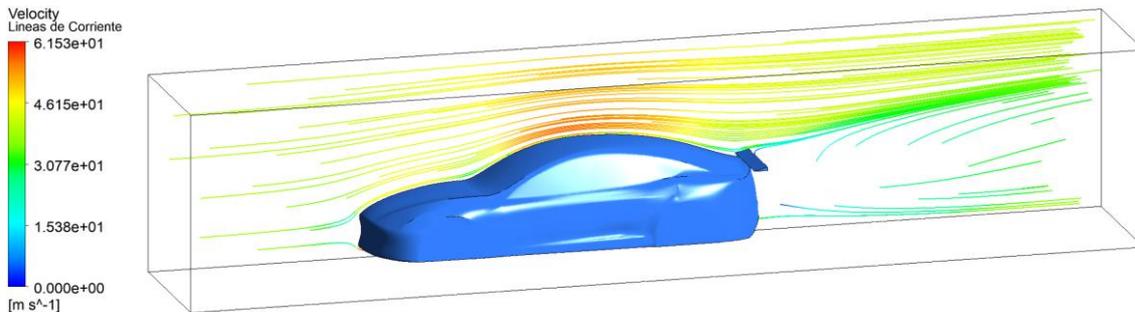


Figura C4.4: Líneas de Corriente de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 15°. (ANSYS Fluent®)

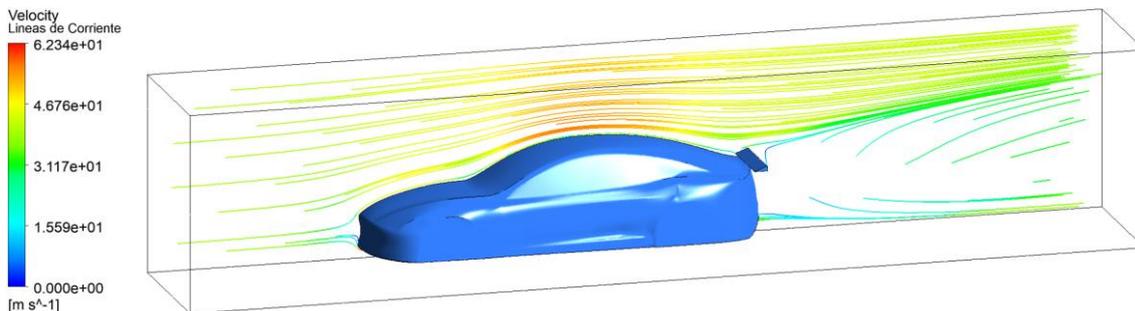


Figura C4.5: Líneas de Corriente de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 20°. (ANSYS Fluent®)

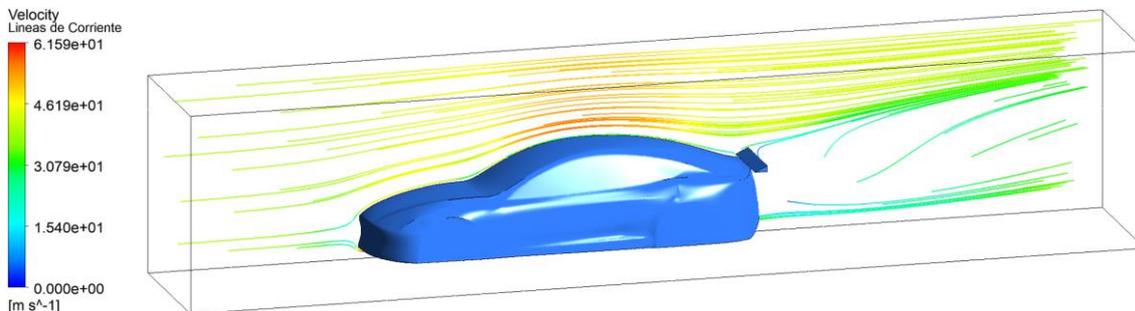


Figura C4.6: Líneas de Corriente de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 25°. (ANSYS Fluent®)

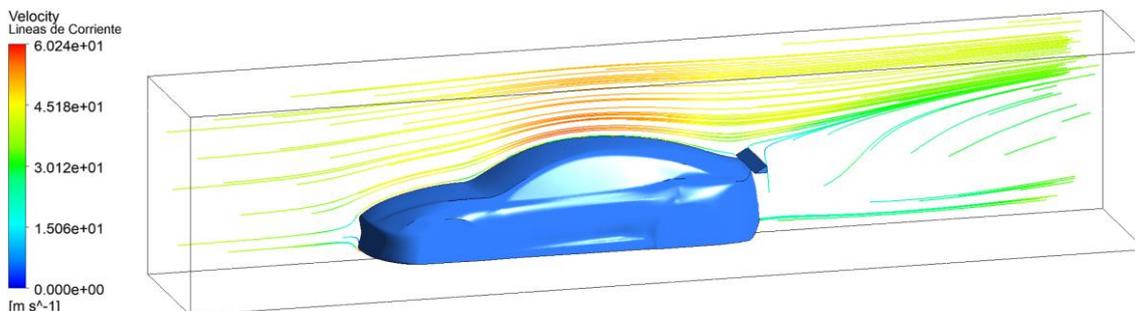


Figura C4.7: Líneas de Corriente de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 30°. (ANSYS Fluent®)

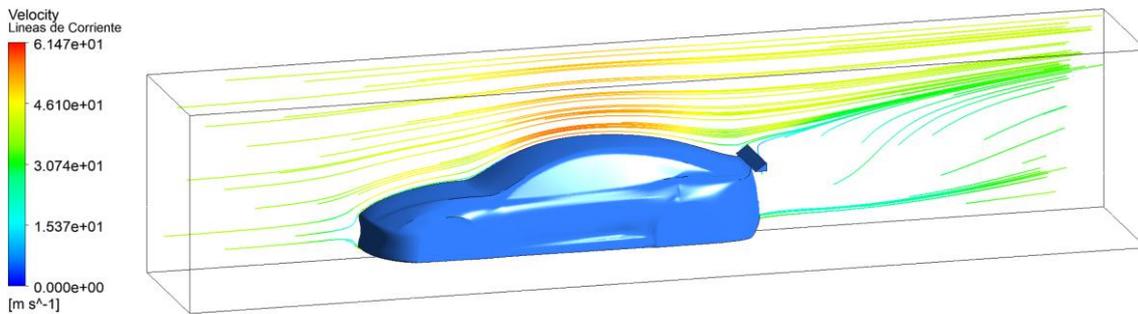


Figura C4.8: Líneas de Corriente de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 35°. (ANSYS Fluent®)

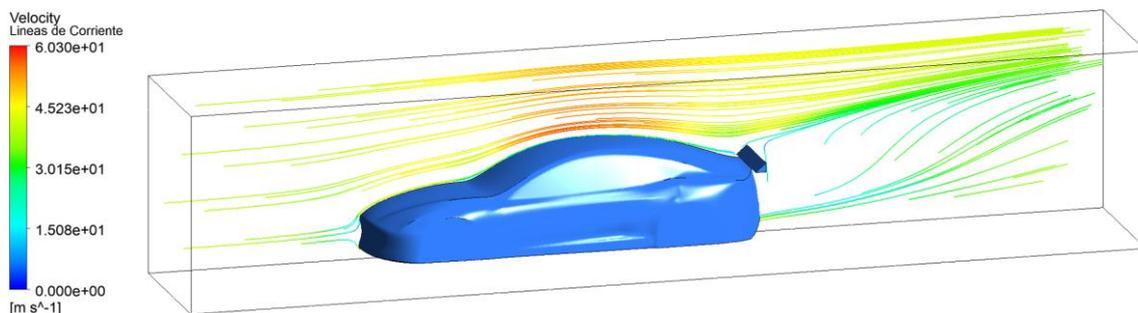


Figura C4.9: Líneas de Corriente de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 40°. (ANSYS Fluent®)

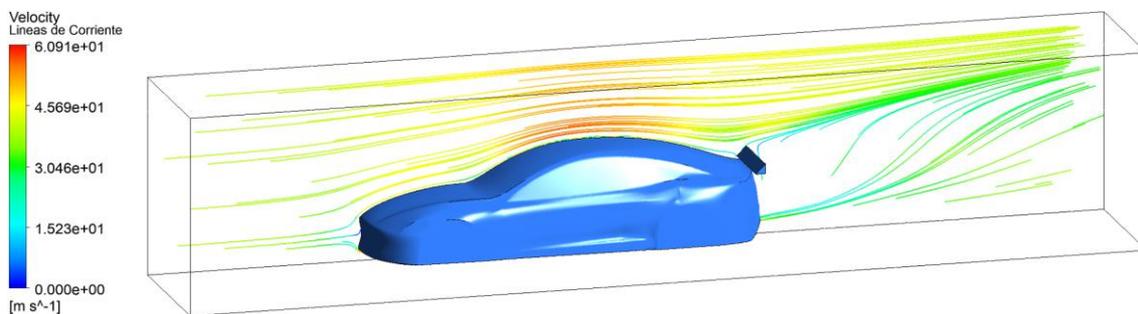


Figura C4.10: Líneas de Corriente de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 45°. (ANSYS Fluent®)

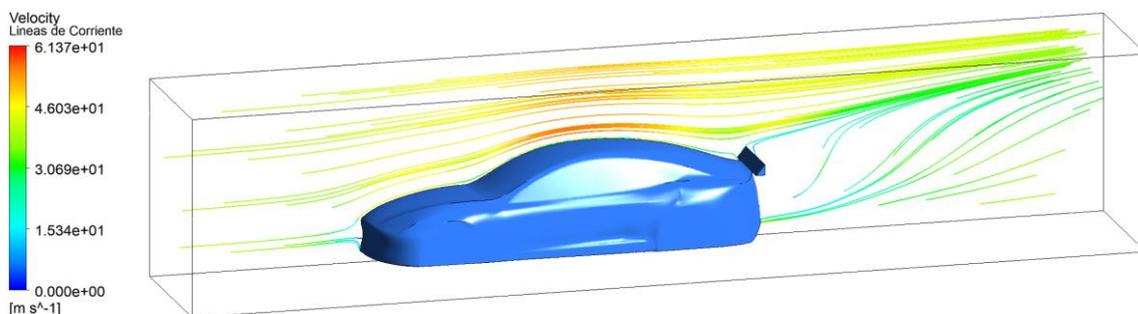


Figura C4.11: Líneas de Corriente de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 50°. (ANSYS Fluent®)

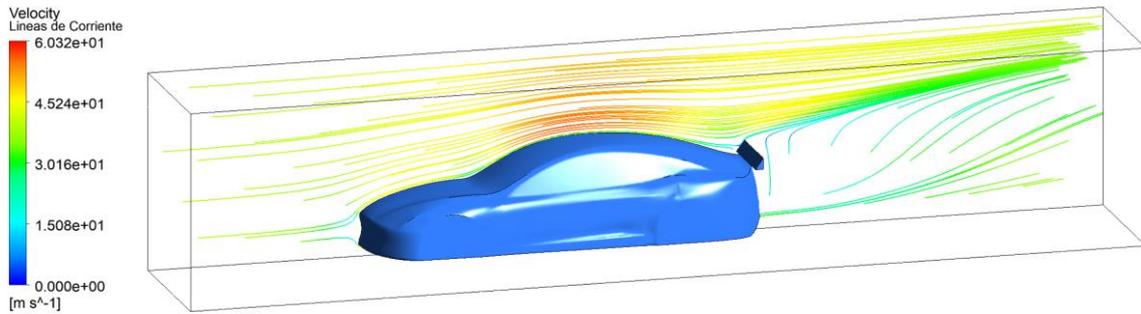


Figura C4.12: Líneas de Corriente de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 55°. (ANSYS Fluent®)

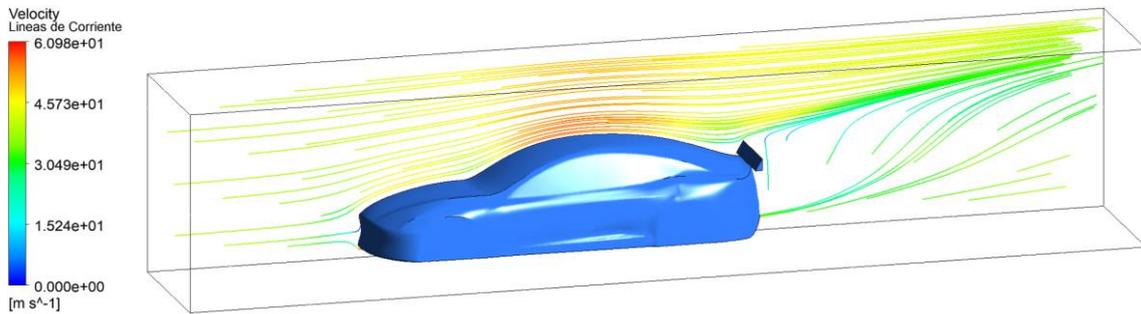


Figura C4.13: Líneas de Corriente de velocidades para el vehículo con alerón, con un ángulo de inclinación de 60°. (ANSYS Fluent®)

PRESUPUESTO

Índice del Presupuesto

1. INTRODUCCIÓN.....	120
2. CUADRO DE PRECIOS BÁSICOS.....	120
3. CUADRO DE PRECIOS UNITARIOS	121
4. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS	122
5. CUADRO DE MEDICIONES	128
6. PRESUPUESTO.....	128

1. INTRODUCCIÓN

En el presente Documento se expone un presupuesto detallado del presente trabajo final de Grado. En caso de querer aplicar dicho proyecto a cualquier otro vehículo, únicamente habría que añadir una unidad de obra más, correspondiente al modelado de superficies del carenado del modelo seleccionado para el estudio.

Tal y como se muestra más adelante en los rendimientos de cada unidad de obra, se asume que los materiales involucrados en el proyecto -Ordenador, *Workstation* y ratón CAD- poseen una vida útil de 2 años.

Igualmente, se asume que una simulación completa en ANSYS del modelo del vehículo del alerón incurre en un total de 24 horas de trabajo (por ser la primera simulación). Para el resto de simulaciones con alerón, se consideran únicamente 8 horas de trabajo por simulación. Por último, se estima que el coste total de desarrollo del simulador es de aproximadamente 80 horas.

En lo que respecta al Cuadro de Precios Descompuestos, en el presente presupuesto se incorpora un 2,0% en concepto de Costes Directos Complementarios, correspondientes a cada una de las unidades de obra. Del mismo modo, en lo referente al Cuadro de Mediciones, se incluye un 1,0% en concepto de Costes Indirectos.

Por último, se asume un 13,0% de Gastos Generales y un 6,0% de Beneficio Industrial, ambos contabilizados sobre el Presupuesto de Ejecución Material.

2. CUADRO DE PRECIOS BÁSICOS

Código	Ud.	Descripción	Importe (€)
1		Mano de Obra	
MO.001	h	Ingeniero Técnico en Tecnologías Industriales	17,000
MO.002	h	Ingeniero Técnico en Mecánica	15,000
MO.003	h	Ingeniero Senior en Tecnologías Industriales	35,000

3. CUADRO DE PRECIOS UNITARIOS

Código	Ud.	Descripción	Importe (€)
2		Software	
SW.001	año	ANSYS Workbench 19.2 [®] Premium License	41.700,000
SW.002	año	SolidWorks 2020 [®] Professional License	13.250,000
SW.003	año	Autodesk AutoCAD 2020 [®]	2.342,000
SW.004	año	Matlab [®] License	800,000
SW.005	año	MS Office [®] Hogar y Estudiantes 2021 para PC	150,000
3.		Materiales	
MAT.001	ud.	Workstation HP [®] 64Gb/2Tb IntelXeon	6.520,000
MAT.002	ud.	Ordenador HP [®] Pavilion Gaming 32Gb/1Tb i7	2.300,000
MAT.003	ud.	3Dconnexion [®] - CadMouse Compact	120,000

4. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS

UO.001 [mes] Documentación previa al inicio del proyecto

Fase inicial del proyecto correspondiente a todo el proceso de documentación técnica referente a las fuerzas que actúan sobre la aerodinámica del vehículo, y las distintas herramientas existentes para el análisis aerodinámico.

Código	Ud.	Descripción	Rendim.	Precio unitario	Importe
1.1		Mano de Obra			
MO.001	h	Ingeniero Técnico en Tecnologías Industriales	112,000	17,000	1.904,000
MO.003	h	Ingeniero Senior en Tecnologías Industriales	15,000	35,000	525,000
Subtotal mano de obra:					2.429,000
1.2		Software			
SW.005	año	MS Office® Hogar y Estudiantes 2021 para PC	0,0833	150,000	12,500
Subtotal software:					12,500
1.3		Materiales			
MAT.002	ud.	Ordenador HP® Pavilion Gaming 32Gb/1Tb i7	0,0417	2.300,000	95,833
Subtotal materiales:					95,833
1.4		Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	2,000	2.537,333	50,747
Costes directos:					2.588,080

UO.002 [mes] Adaptación de la geometría del modelo CAD

Unidad de obra correspondiente a la simplificación y adaptación del modelo 3D del Tesla original, empleando el software específico de modelado Solidworks®. También incluye el diseño parametrizado del alerón trasero objeto de estudio.

Código	Ud.	Descripción	Rendim.	Precio unitario	Importe
2.1		Mano de Obra			
MO.002	h	Ingeniero Técnico en Mecánica	112,000	15,000	1.680,000
MO.003	h	Ingeniero Senior en Tecnologías Industriales	15,000	35,000	525,000
Subtotal mano de obra:					2.205,000
2.2		Software			
SW.002	año	SolidWorks 2020® Professional License	0,0833	13.250,000	1.104,167
SW.003	año	Autodesk AutoCAD® 2020	0,0833	2.342,000	195,167
SW.005	año	MS Office® Hogar y Estudiantes 2021 para PC	0,0833	150,000	12,500
Subtotal software:					1.311,833
2.3		Materiales			
MAT.001	ud.	Workstation HP® 64Gb/2Tb IntelXeon	0,0417	6.520,000	271,667
MAT.003	ud.	3Dconnexion® - CadMouse Compact	0,0417	120,000	5,000
Subtotal materiales:					276,667
2.4		Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	2,000	3.793,500	75,870
Costes directos:					3.869,370

UO.003 [mes] Análisis de Independencia de Malla

Unidad de Obra correspondiente al análisis de Independencia de Malla realizado para obtener el óptimo tamaño de elemento, empleando el software específico de Elementos Finitos ANSYS Workbench® (módulo Fluent).

Código	Ud.	Descripción	Rendim.	Precio unitario	Importe
3.1 Mano de Obra					
MO.002	h	Ingeniero Técnico en Mecánica	112,000	15,000	1.680,000
MO.003	h	Ingeniero Senior en Tecnologías Industriales	15,000	35,000	525,000
Subtotal mano de obra:					2.205,000
3.2 Software					
SW.001	año	ANSYS Workbench 19.2® Premium License	0,0833	41.700,000	3.475,000
SW.004	año	Matlab® License	0,0833	800,000	66,667
SW.005	año	MS Office® Hogar y Estudiantes 2021 para PC	0,0833	150,000	12,500
Subtotal software:					3.554,167
3.3 Materiales					
MAT.001	ud.	Workstation HP® 64Gb/2Tb IntelXeon	0,0417	6.520,000	271,667
MAT.003	ud.	3Dconnexion® - CadMouse Compact	0,0417	120,000	5,000
Subtotal materiales:					276,667
3.4 Costes directos complementarios					
	%	Costes directos complementarios	2,000	6.035,833	120,717
Costes directos:					6.156,550

UO.004 [Ud.] Simulación Aerodinámica del vehículo sin alerón

Unidad de obra correspondiente a la simulación aerodinámica en ANSYS Fluent® del vehículo sin alerón, para la obtención de las fuerzas resultantes, así como los perfiles de velocidades y presiones generados. Coste aproximado de 24 horas de trabajo.

Código	Ud.	Descripción	Rendim.	Precio unitario	Importe
4.1 Mano de Obra					
MO.001	h	Ingeniero Técnico en Tecnologías Industriales	2,000	17,000	34,000
MO.002	h	Ingeniero Técnico en Mecánica	22,000	15,000	330,000
MO.003	h	Ingeniero Senior en Tecnologías Industriales	1,000	35,000	35,000
Subtotal mano de obra:					399,000
4.2 Software					
SW.001	año	ANSYS Workbench 19.2® Premium License	0,00274	41.700,000	114,247
SW.004	año	Matlab® License	0,00274	800,000	2,192
SW.005	año	MS Office® Hogar y Estudiantes 2021 para PC	0,00274	150,000	0,411
Subtotal software:					116,849
4.3 Materiales					
MAT.001	ud.	Workstation HP® 64Gb/2Tb IntelXeon	0,00137	6.520,000	8,932
MAT.003	ud.	3Dconnexion® - CadMouse Compact	0,00137	120,000	0,164
Subtotal materiales:					9,096
4.4 Costes directos complementarios					
	%	Costes directos complementarios	2,000	524,945	10,499
Costes directos:					535,444

UO.005 [Ud.] Simulación Aerodinámica del vehículo con alerón

Unidad de obra correspondiente a una de las múltiples simulaciones aerodinámicas en ANSYS Fluent® del vehículo con alerón, para la obtención de las fuerzas resultantes, así como los perfiles de velocidades y presiones generados. Se realiza una simulación para cada ángulo de inclinación distinto, con un coste aproximado de 8 horas de trabajo por simulación

Código	Ud.	Descripción	Rendim.	Precio unitario	Importe
5.1		Mano de Obra			
MO.002	h	Ingeniero Técnico en Mecánica	8,000	15,000	120,000
MO.003	h	Ingeniero Senior en Tecnologías Industriales	1,000	35,000	35,000
Subtotal mano de obra:					155,000
5.2		Software			
SW.001	año	ANSYS Workbench® 19.2 Premium License	0,00822	41.700,000	342,740
SW.002	año	SolidWorks® Professional License	0,00822	13.250,000	108,904
SW.004	año	Matlab® License	0,00822	800,000	6,575
SW.005	año	MS Office® Hogar y Estudiantes 2021 para PC	0,00822	150,000	1,233
Subtotal software:					459,452
5.3		Materiales			
MAT.001	ud.	Workstation HP® 64Gb/2Tb IntelXeon	0,000457	6.520,000	2,977
MAT.003	ud.	3Dconnexion® - CadMouse Compact	0,000457	120,000	0,055
Subtotal materiales:					3,032
5.4		Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	2,000	617,484	12,350
Costes directos:					629,834

UO.006 [Ud.] Desarrollo de un simulador de circuitos de F1

Unidad de Obra correspondiente al desarrollo de un simulador automatizado capaz de obtener el tiempo ideal de vuelta de un vehículo, a partir de los datos de tramos rectos y curvos del trazado de un circuito y de los parámetros aerodinámicos y de potencia del vehículo de estudio. Coste aproximado de 80 horas de trabajo

Código	Ud.	Descripción	Rendim.	Precio unitario	Importe
6.1		Mano de Obra			
MO.001	h	Ingeniero Técnico en Tecnologías Industriales	80,000	17,000	1.360,000
MO.003	h	Ingeniero Senior en Tecnologías Industriales	2,000	35,000	70,000
Subtotal mano de obra:					1.430,000
6.2		Software			
SW.003	año	Autodesk AutoCAD® 2020	0,00913	2.342,000	21,388
SW.005	año	MS Office® Hogar y Estudiantes 2021 para PC	0,00913	150,000	1,370
Subtotal software:					22,758
6.3		Materiales			
MAT.002	ud.	Ordenador HP® Gaming Notebook 32Gb/1Tb i7	0,00457	2.300,000	10,502
Subtotal materiales:					10,502
6.4		Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	2,000	1.463,260	29,265
Costes directos:					1.492,525

5. CUADRO DE MEDICIONES

Código	Ud.	Descripción	Rendim.	Precio unitario	Importe
UO.001	mes	Documentación previa al inicio del proyecto	1,000	2.588,080	2.588,080
UO.002	mes	Adaptación de la geometría del modelo CAD	1,000	3.869,370	3.869,370
UO.003	mes	Análisis de Independencia de Malla	0,500	6.156,550	3.078,275
UO.004	ud.	Simulación Aerodinámica del vehículo sin alerón	1,000	535,444	535,444
UO.005	ud.	Simulación Aerodinámica del vehículo con alerón	12,000	629,834	7.558,004
UO.006	ud.	Desarrollo de un simulador de circuitos de F1	1,000	1.492,525	1.492,525
Costes Indirectos					
%		Costes Indirectos	1,000	19.121,699	191,217
Presupuesto de Ejecución Material (PEM):					19.312,916
Gastos Generales					
%		Gastos Generales	13,000	19.312,916	2.510,679
Beneficio Industrial					
%		Beneficio Industrial	6,000	19.312,916	1.158,775
Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC):					22.982,370
Impuesto Valor Añadido (I.V.A.)					
%		Impuesto Valor Añadido (I.V.A.)	21,000	22.982,370	4.826,298
PRESUPUESTO DE INVERSIÓN:					27.808,668

6. PRESUPUESTO

El presupuesto total del proyecto asciende a la cantidad de VEINTISIETE MIL OCHOCIENTOS OCHO euros con SESENTA Y SIETE céntimos.

PLIEGO DE CONDICIONES

Índice del Pliego de Condiciones

1. PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES	131
1.1. Objeto del Pliego de Condiciones	131
1.3. Documentación del proyecto	131
1.2. Agentes involucrados en el proyecto.....	132
2. PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS	133
2.1. Pliego de prescripciones técnicas generales	133
2.1.1. Documentos técnicos de soporte	133
2.1.2. Disposiciones legales.....	134
2.2. Pliego de prescripciones técnicas específicas	134
2.2.2. Planos de detalle.....	134
3. PLIEGO DE CONDICIONES FACULTATIVAS.....	136
3.1. Promotor	136
3.2. Contratista	136
3.3. Proyectista	136
3.4. Plazos y entrega del proyecto.....	137
3.5. Garantías.....	137

1. PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES

1.1. Objeto del Pliego de Condiciones

El pliego de condiciones que se desarrolla en el presente Trabajo Final de Grado tiene como objetivo recopilar las pautas que deben seguirse durante toda la fase de desarrollo del modelo 3D y simulación del Análisis de diferentes configuraciones aerodinámicas de un Tesla Model S mediante técnicas CFD.

Se recopilan todas las condiciones tanto técnicas como facultativas que deben tenerse en cuenta para ejecutar adecuadamente el proyecto, atribuyendo las pertinentes obligaciones y responsabilidades de las partes involucradas en el proceso.

El presente documento no pretende reunir detalles técnicos constructivos en relación con una posible construcción física del alerón.

En caso de querer llevar a cabo la fabricación de alguno de los elementos detallados en la Memoria o en los Planos, es responsabilidad del Contratista asegurar que cualquier detalle relativo a la fabricación, sea conforme a las normas y reglamentos técnicos de diseño más actuales.

Se consideran anexadas al presente proyecto, todas las prescripciones e indicaciones de carácter técnico incluidas en el resto de los anteriores documentos. En caso de darse algún tipo de contradicción o incoherencia en los mismos, será prevalecerá la palabra del ingeniero técnico responsable del proyecto.

Igualmente, será el ingeniero técnico el encargado de la toma de cualquier decisión derivada de la omisión de algún tipo de información de relevancia para el desarrollo del trabajo.

1.3. Documentación del proyecto

El presente proyecto de Análisis de diferentes configuraciones aerodinámicas de un Tesla Model S mediante técnicas CFD, consta de los siguientes documentos:

- Documento 1. MEMORIA DESCRIPTIVA
- Documento 2. ANEXOS DE LA MEMORIA DESCRIPTIVA
- Documento 3. PRESUPUESTO
- Documento 4. PLIEGO DE CONDICIONES
- Documento 5. PLANOS

Por otro lado, se consideran documentos contractuales, los documentos que se listan a continuación:

- Documento 2. ANEXOS DE LA MEMORIA DESCRIPTIVA
- Documento 3. PRESUPUESTO
- Documento 4. PLIEGO DE CONDICIONES
- Documento 5. PLANOS

Dichos documentos contractuales se establecen como documentos de obligado cumplimiento, y deberán ser anexados a la entrega de cualquier contrato. Los documentos restantes se consideran de carácter meramente informativo, pudiendo emplearse como complemento a los contractuales siempre y cuando no queden incluidos en el contrato.

Con respecto al Contratista, cabe resaltar que este se asume como responsable de cualquier falla que pudiera derivarse de la falta de información que pueda provocar una incorrecta ejecución del trabajo.

Asimismo, el Contratista no dispone de autoridad para exigir ninguna modificación que difiera de los documentos descriptivos, a excepción de que dicha alteración se encuentre incluida en algún documento contractual.

1.2. Agentes involucrados en el proyecto

En lo que respecta a los agentes involucrados en el presente proyecto, se definen como protagonistas:

- *Promotor:* se declara al **Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente** de la **Universitat Politècnica de València** como el promotor del presente proyecto.
- *Contratista:* el compromiso de garantizar que el Análisis aerodinámico del presente proyecto se ejecute de acuerdo con el diseño propuesto en el documento de la memoria descriptiva -reforzada con los planos anexos-, recae sobre **Juan Manzano Juárez**, tutor responsable del presente trabajo final de grado, adscrito al Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- *Proyectista:* la responsabilidad relativa al Análisis de diferentes configuraciones aerodinámicas de un Tesla Model S mediante técnicas CFD, bajo las especificaciones impuestas por Juan Manzano Juárez a través del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, recae sobre **Hugo Sanchis Ortolá**, ingeniero graduado en tecnologías industriales.

2. PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

2.1. Pliego de prescripciones técnicas generales

Para la ejecución del proyecto de Análisis de diferentes configuraciones aerodinámicas de un Tesla Model S mediante técnicas CFD, contratista y promotor pondrán al alcance del proyectista, todas aquellas especificaciones y requerimientos de carácter técnico que deban cumplirse.

Del mismo modo, el proyectista es el único responsable de mantener actualizado al promotor sobre los avances que vayan produciéndose en el proyecto. Un informe final de proyecto deberá ser entregado al final de la ejecución de los trabajos.

2.1.1. Documentos técnicos de soporte

El contenido mínimo pactado por los agentes del proyecto, debe incorporar los siguientes documentos:

- *Documento 1. MEMORIA DESCRIPTIVA:* la Memoria Descriptiva define tanto los objetivos como la metodología de trabajo, como todo el proceso de desarrollo técnico de modelado y simulación de las distintas configuraciones del Tesla Model S objeto de estudio.
- *Documento 2. ANEXOS DE LA MEMORIA DESCRIPTIVA:* los Anexos de la Memoria Descriptiva incluyen documentación técnica relativa al modelo específico del vehículo empleado en el proyecto, así como el desarrollo técnico del simulador para la validación de las simulaciones aerodinámicas.
- *Documento 3. PRESUPUESTO:* el documento del Presupuesto cuantifica el coste económico total del proyecto, segmentado en las diferentes partidas o unidades de obra.
- *Documento 4. PLIEGO DE CONDICIONES:* el Pliego de Condiciones permite establecer un marco legal para el desarrollo del proyecto, definiendo y delimitando los derechos y responsabilidades de todos los agentes involucrados.
- *Documento 5. PLANOS:* el documento de planos incorpora todos los trazados de los circuitos empleados en el simulador, así como las dimensiones básicas del vehículo y alerones empleados en las simulaciones aerodinámicas.

2.1.2. Disposiciones legales

Se cumplirán, bajo cualquier caso, los reglamentos y normativas aplicables, tanto para el personal como para los equipos de trabajo:

- Real Decreto 488/1997, de 14 de abril: Disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipo que incluyen pantallas de visualización.
- Norma UNE 157001:2002, febrero: Criterios generales para la elaboración de proyectos, AENOR.
- Norma UNE 1032. Principios generales de representación de dibujos técnicos.
- Norma UNE 50-132-94. Documentación para numeración de las divisiones y subdivisiones en los documentos escritos, AENOR.
- Norma UNE 82100, partes 01 a 13. Magnitudes y unidades, AENOR.

2.2. Pliego de prescripciones técnicas específicas

2.2.2. Planos de detalle

Es responsabilidad del constructor seguir los correspondientes planos de detalle para la ejecución del proyecto, en las mismas condiciones a las realizadas durante el proceso original de desarrollo.

En caso de que pudiesen advertirse algún tipo de limitaciones técnicas de diseño, cualquier tipo de modificación deberá ser comunicada a la mayor brevedad posible, al ingeniero técnico responsable de la ejecución del proyecto.

Los planos que deben seguirse para diseñar las cámaras de estudio en ANSYS, así como todos los modelos de alerón posibles a implementar en el vehículo, son los que se listan a continuación:

- PD1.01. Dimensiones básicas del Tesla Model S (2019-2020)
- PD1.02. Dimensiones básicas del alerón para el Tesla Model S

Cabe resaltar que, pese a que únicamente existe un plano para el diseño del alerón, dentro se detallan todas las configuraciones posibles que deben seguirse.

Igualmente, para la toma de datos de los tramos rectos y curvos de cada uno de los circuitos que conforman la Formula 1, deben seguirse los planos que se indican listados a continuación:

- PD2.01. Circuito Internacional de Baréin, Baréin
- PD2.02. Circuito de la Corniche de Yeda, Arabia Saudita
- PD2.03. Circuito de Albert-Park, Australia
- PD2.04. Autódromo Enzo e Dino Ferrari, Imola, Italia
- PD2.05. Autódromo Internacional de Miami, US
- PD2.06. Circuito de Barcelona-Cataluña, España
- PD2.07. Circuito de Mónaco, Mónaco
- PD2.08. Circuito callejero de Bakú, Azerbaiyán
- PD2.09. Circuito Gilles Villeneuve, Canadá
- PD2.10. Circuito de Silverstone, Reino Unido
- PD2.11. Red Bull Ring, Austria
- PD2.12. Circuito Paul Ricard, Francia
- PD2.13. Hungaroring, Hungría
- PD2.14. Circuito Spa-Francorchamps, Bélgica
- PD2.15. Circuito de Zandvoort, Países Bajos
- PD2.16. Autódromo Nazionale di Monza, Italia
- PD2.17. Autódromo de Sochi, Rusia
- PD2.18. Circuito Urbano Marina Bay, Singapur
- PD2.19. Circuito de Susuka, Japón
- PD2.20. Circuito de las Américas, Texas, US
- PD2.21. Autódromo Hermanos Rodríguez, México
- PD2.22. Autódromo José Carlos Pace, Interlagos, Brasil
- PD2.23. Circuito Yas Marina, Abu Dabi

3. PLIEGO DE CONDICIONES FACULTATIVAS

El Pliego de Condiciones Facultativas que se desarrolla a continuación, tiene como objetivo establecer los límites relativos a obligaciones y responsabilidades entre los distintos agentes involucrados en el desarrollo del proyecto.

3.1. Promotor

La figura del promotor recae sobre Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universitat Politècnica de València, que le encomienda el proyecto al Contratista, y por ende al Proyectista. El Promotor es responsable en todo momento de la correcta definición de los requerimientos bajo los cuales debe ejecutarse el proyecto.

El Promotor se asume como el responsable de cualquier problema que pueda incurrir, tanto en un gasto económico adicional para el proyecto, como en un retraso de los plazos de ejecución de los trabajos.

El Promotor podrá solicitar al Contratista y Proyectista, siempre que considere necesario, cualquier información relativa al cumplimiento de los plazos y al estado de desarrollo del proyecto.

3.2. Contratista

El papel del Contratista recae sobre Juan Manzano Juárez. Es responsabilidad del Contratista, asegurar que el proyecto de Análisis de diferentes configuraciones aerodinámicas de un Tesla Model S mediante técnicas CFD, se realiza de acuerdo con los documentos del proyecto desarrollados.

El Contratista podrá solicitar al Proyectista información relativa al estado de desarrollo del proyecto, pudiendo llegar a detener el mismo si así lo permiten las cláusulas del contrato.

3.3. Proyectista

La figura del Proyectista recae sobre Hugo Sanchis Ortolá. El proyectista es el responsable de resolver las incoherencias u omisiones que surjan durante cualquier etapa de la ejecución del proyecto.

El Proyectista se reserva el derecho de ejecutar los trabajos de modelado y simulación, de acuerdo con su criterio profesional como ingeniero -con independencia de los intereses del Contratista o del Promotor-, siempre y cuando cumpla con las especificaciones técnicas impuestas por las pautas del proyecto.

3.4. Plazos y entrega del proyecto

En el contrato deberán quedar definidos tanto la fecha de inicio del proyecto, como los plazos de ejecución del mismo. Ambos puntos, serán de obligado cumplimiento para el Proyectista:

- Fecha de inicio del proyecto: 01/10/2021
- Fecha de fin del proyecto: 07/09/2022

Siempre y cuando exista una justificación razonable, el Proyectista podrá solicitar una prolongación de los plazos de entrega. No obstante, el Contratista deberá aceptar dichos nuevos plazos, siendo a partir de dicho punto, responsable de los nuevos plazos de cara al Promotor del proyecto.

3.5. Garantías

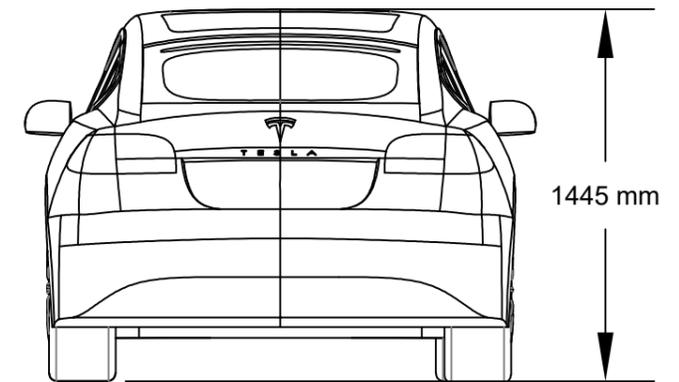
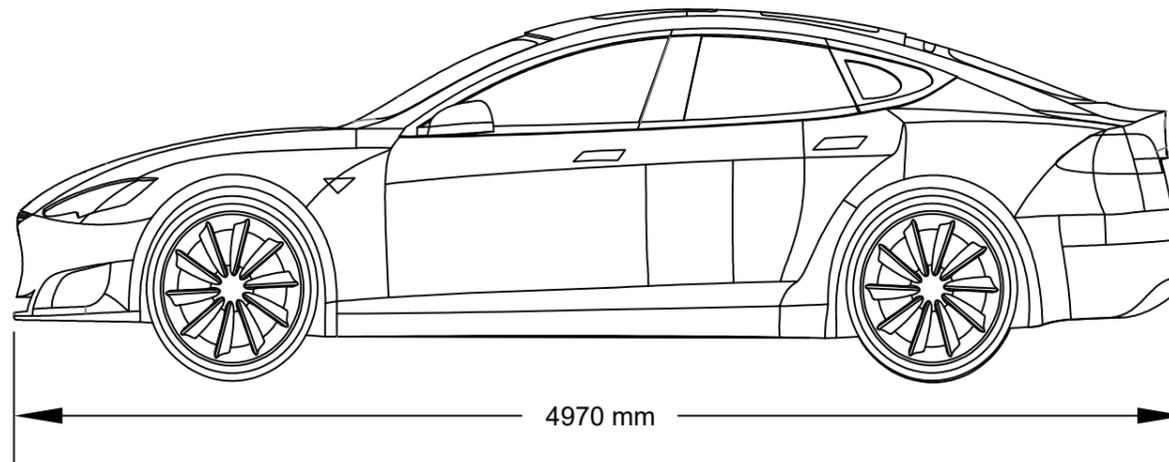
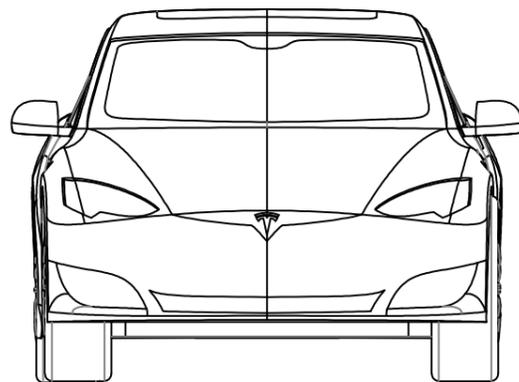
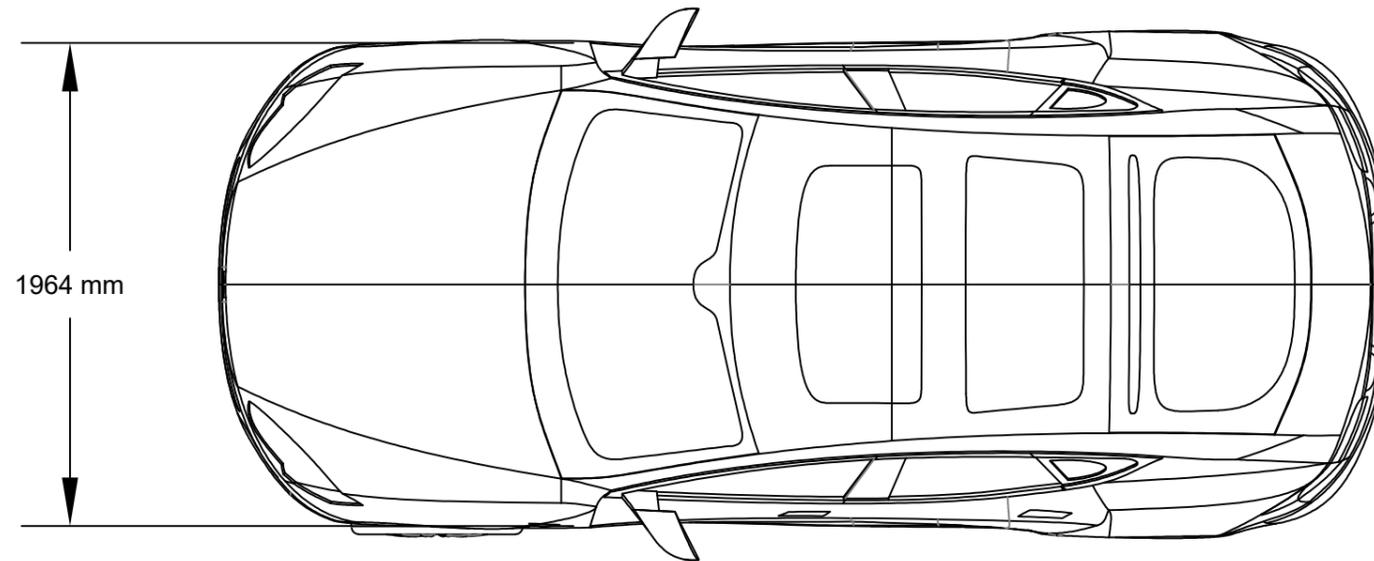
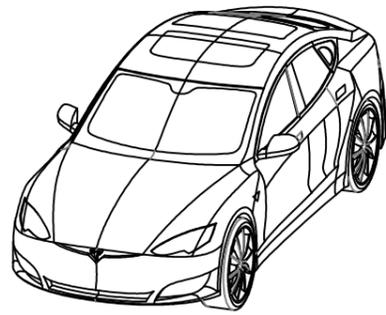
El proyecto de Análisis de diferentes configuraciones aerodinámicas de un Tesla Model S mediante técnicas CFD, posee una garantía de 24 meses, a partir de la fecha de entrega del proyecto final al cliente.

Durante este periodo, es responsabilidad del proyectista desarrollar cualquier modificación o actualización de aquellas partes que de demuestren erróneas. Sin embargo, cabe recalcar que bajo ningún caso, dichas modificaciones requerirán un coste económico adicional para el Proyectista.

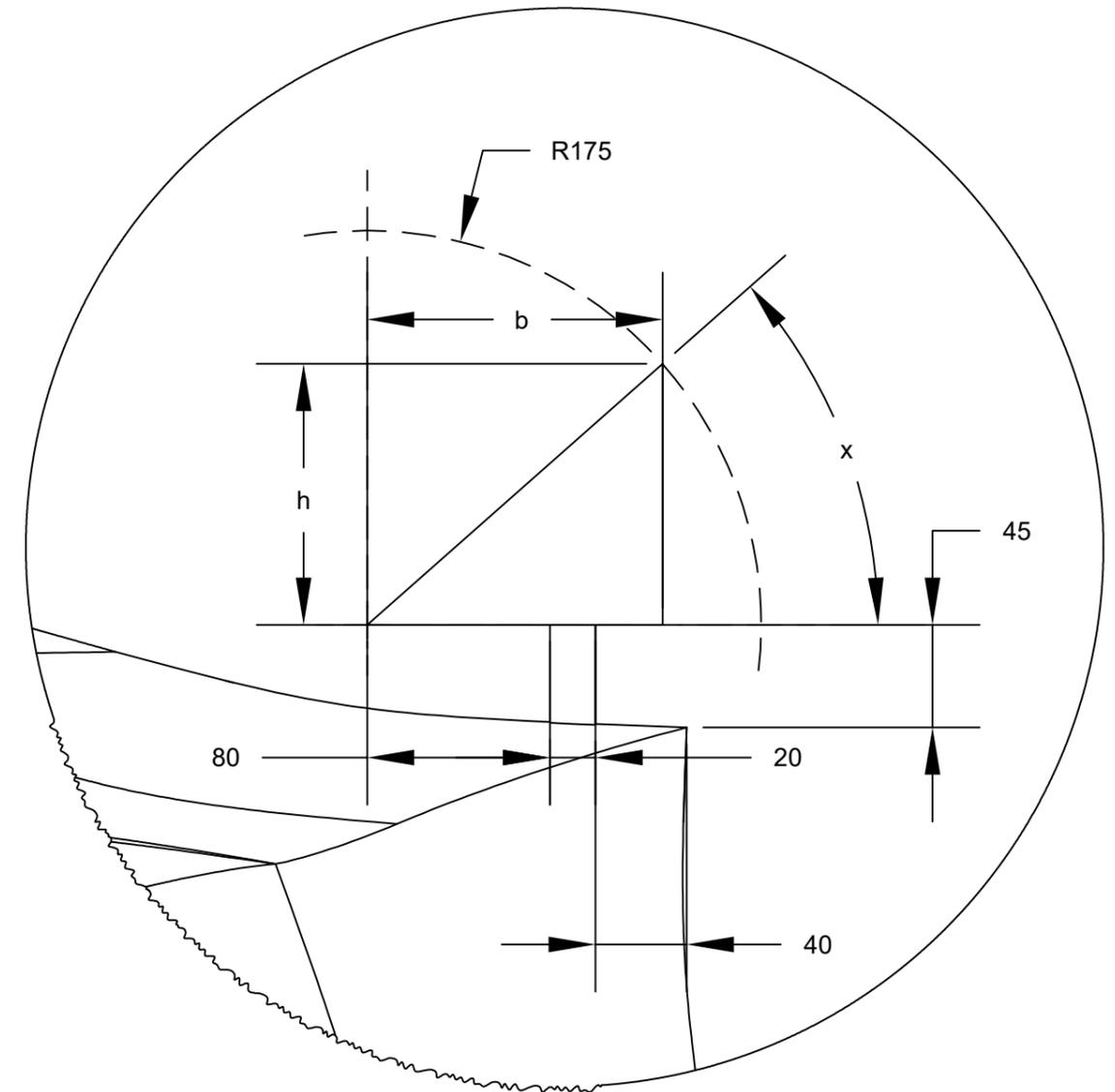
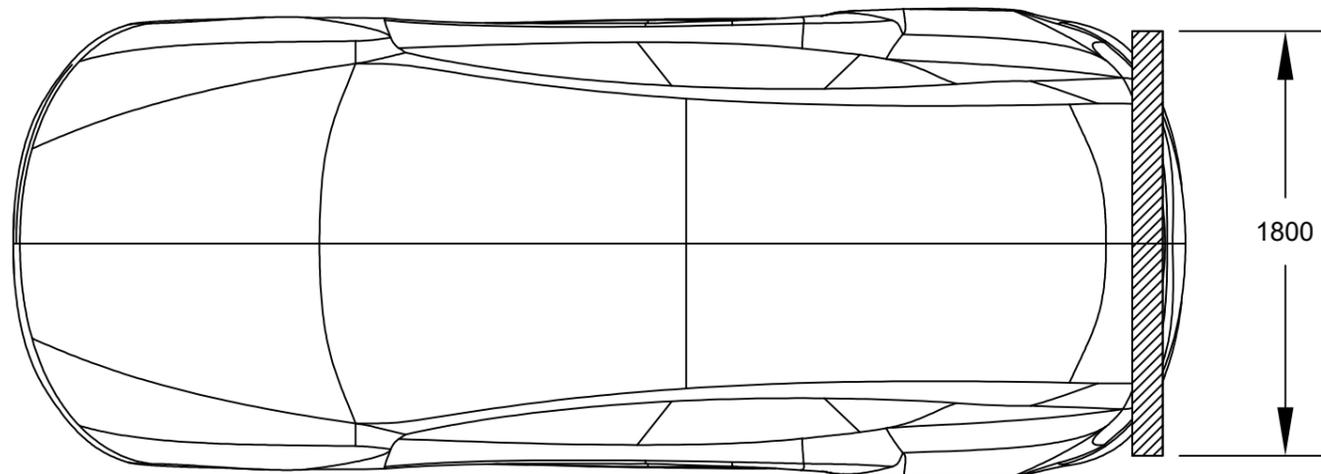
PLANOS

Índice de Planos

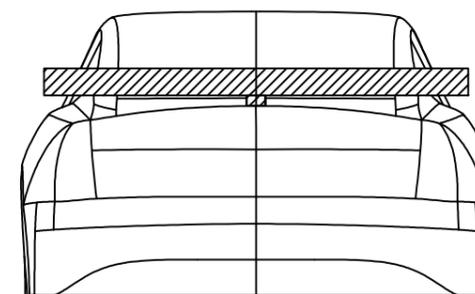
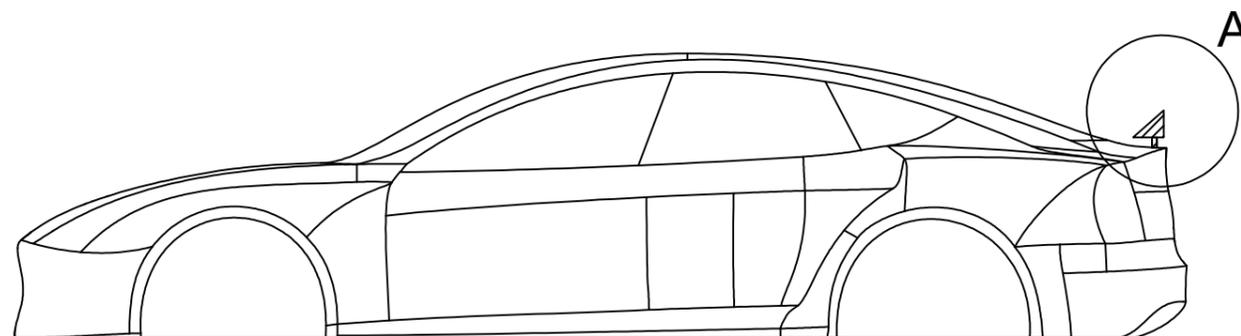
1. PLANOS DE DETALLE DEL VEHÍCULO	140
PD1.01 Dimensiones básicas del Tesla Model S (2019-2020)	140
PD1.02. Dimensiones básicas del aleron para el Tesla Model	141
2. PLANOS DE DETALLE DE LOS CIRCUITOS	142
PD2.01. Circuito Internacional de Baréin, Baréin	142
PD2.02. Circuito de la Corniche de Yeda, Arabia Saudita	143
PD2.03. Circuito de Albert-Park, Australia	144
PD2.04. Autódromo Enzo e Dino Ferrari, Imola, Italia	145
PD2.05. Autódromo Internacional de Miami, US	146
PD2.06. Circuito de Barcelona-Cataluña, España	147
PD2.07. Circuito de Mónaco, Mónaco	148
PD2.08. Circuito callejero de Bakú, Azerbaiyán	149
PD2.09. Circuito Gilles Villeneuve, Canadá	150
PD2.10. Circuito de Silverstone, Reino Unido	151
PD2.11. Red Bull Ring, Austria	152
PD2.12. Circuito Paul Ricard, Francia	153
PD2.13. Hungaroring, Hungría	154
PD2.14. Circuito Spa-Francorchamps, Bélgica	155
PD2.15. Circuito de Zandvoort, Países Bajos	156
PD2.16. Autódromo Nazionale di Monza, Italia	157
PD2.17. Autódromo de Sochi, Rusia	158
PD2.18. Circuito Urbano Marina Bay, Singapur	159
PD2.19. Circuito de Susuka, Japón	160
PD2.20. Circuito de las Américas, Texas, US	161
PD2.21. Autódromo Hermanos Rodríguez, México	162
PD2.22. Autódromo José Carlos Pace, Interlagos, Brasil	163
PD2.23. Circuito Yas Marina, Abu Dabi	164

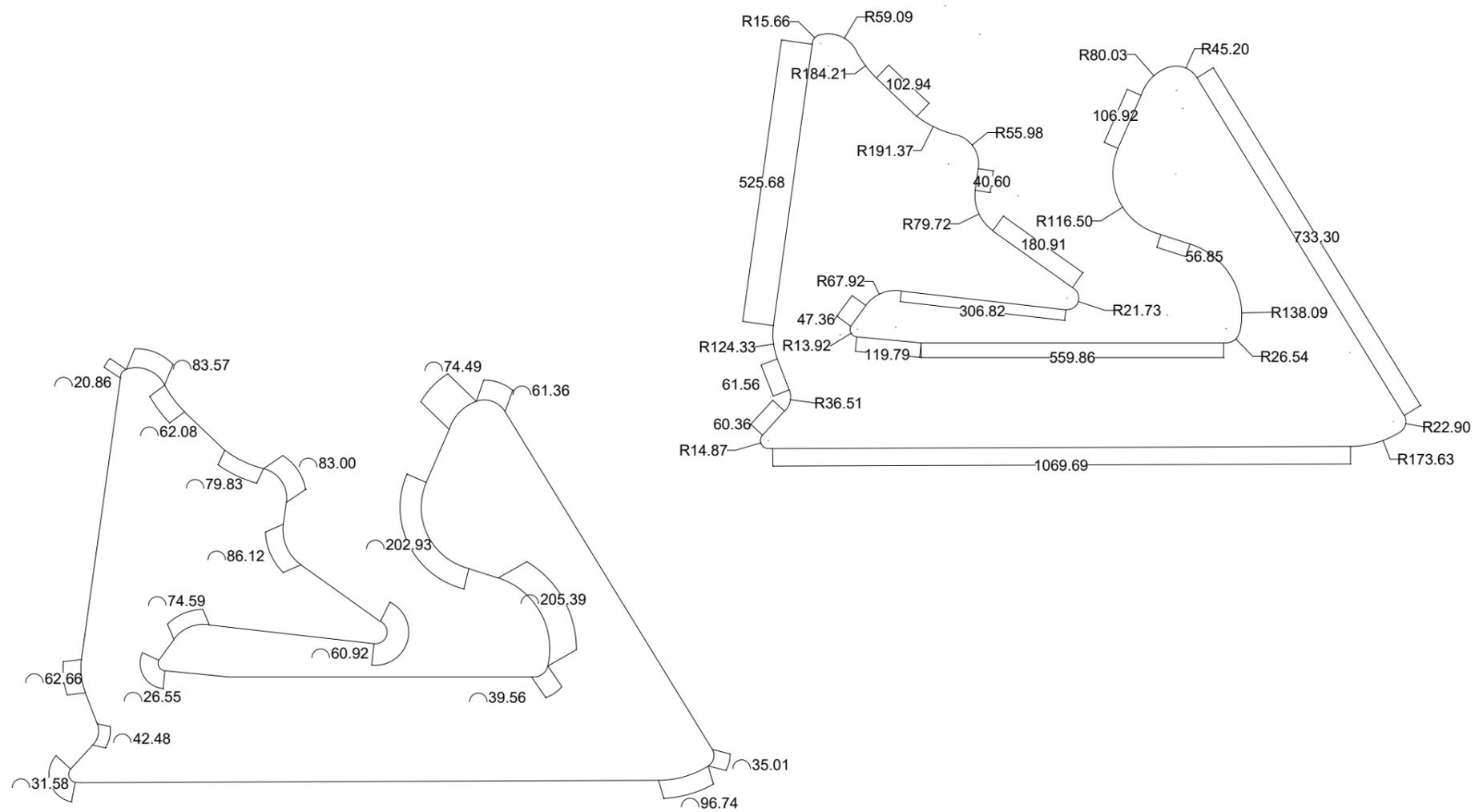


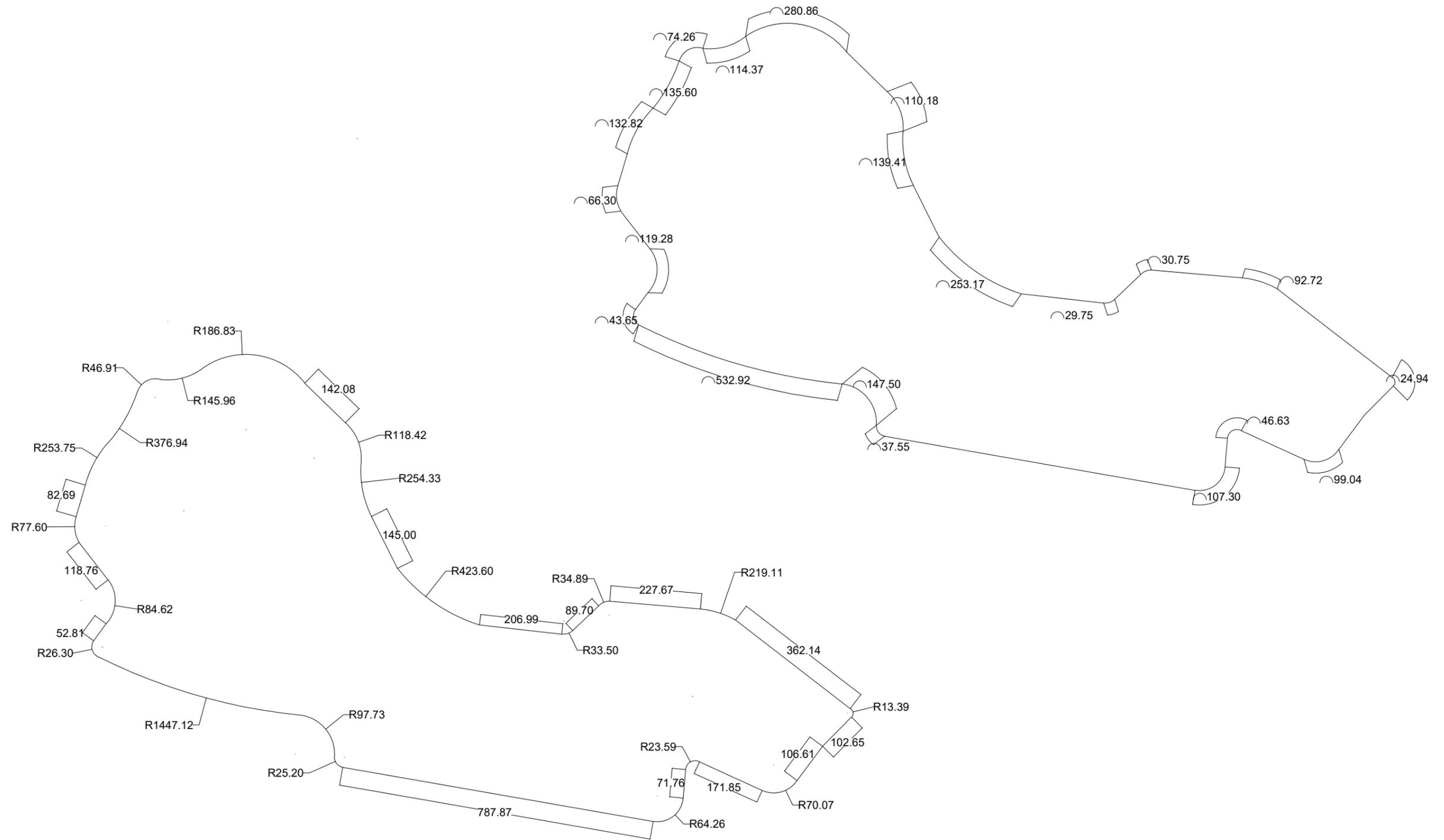
Angulo, x (°)	Base, b (mm)	Altura, h (mm)
5	174.33	15.25
10	172.34	30.39
15	169.04	45.29
20	164.44	59.85
25	158.60	73.96
30	151.55	87.50
35	143.35	100.37
40	134.06	112.48
45	123.74	123.74
50	112.48	134.06
55	100.37	143.35
60	87.50	151.55



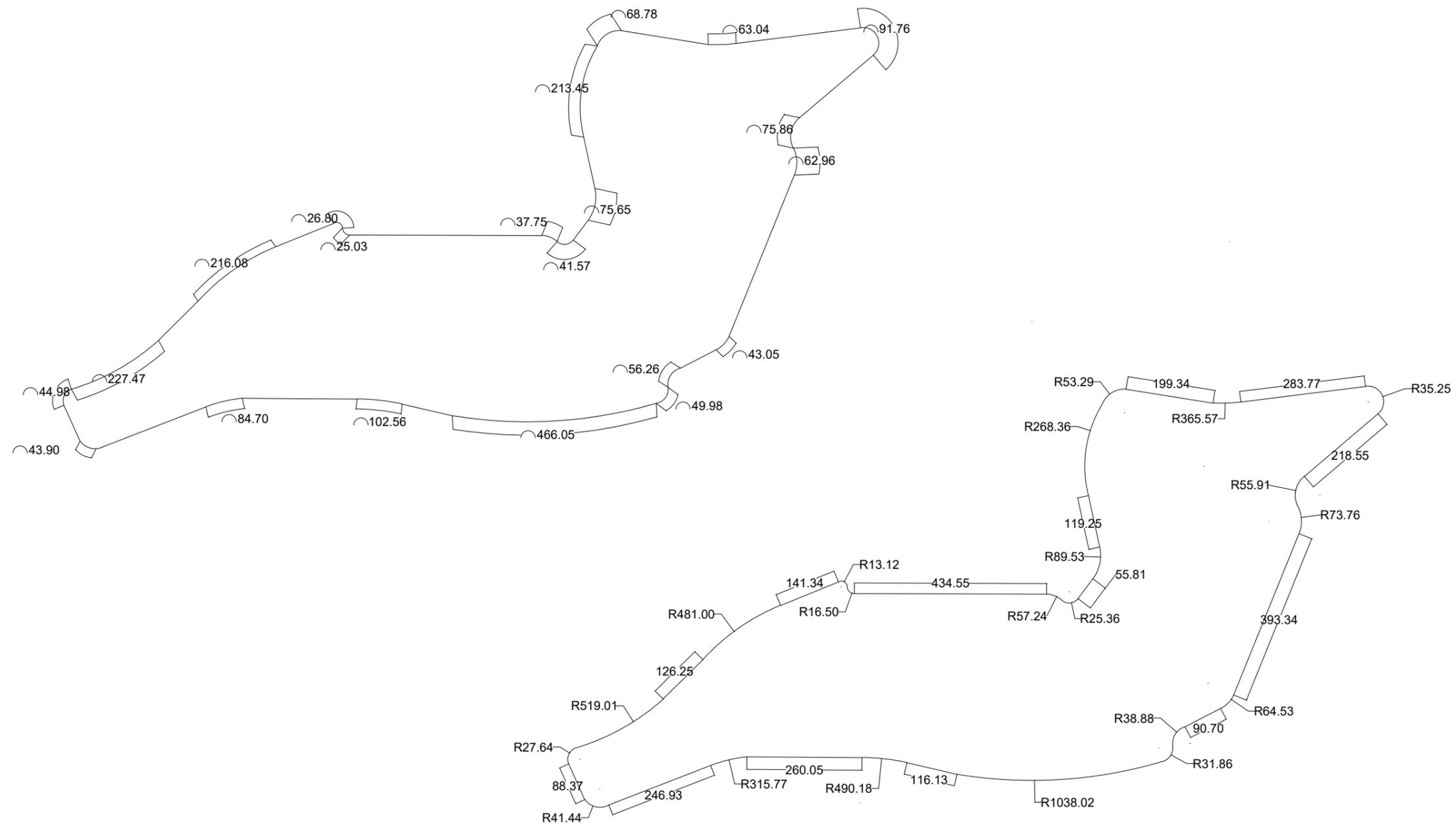
DETALLE A
ESCALA 1:5







<p>TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERIA EN TECNOLOGIAS INDUSTRIALES</p> <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p> <p>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERIA INDUSTRIAL VALENCIA</p>	<p>Proyecto: ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES AERODINAMICAS DE UN TESLA MODEL S, MEDIANTE TECNICAS CFD</p>	<p>Plano: Circuito de Albert-Park, Australia</p> <p>Autor: Hugo Sanchis Ortola</p>	<p>Fecha: Julio 2022</p> <p>Escala: 1:10.000</p>	<p>Nº Plano: 2.03</p>
---	---	--	--	------------------------------



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA

Proyecto: ANALISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES AERODINAMICAS DE UN TESLA MODEL S, MEDIANTE TECNICAS CFD

Plano: Autodromo Enzo e Dino Ferrari, Imola, Italia

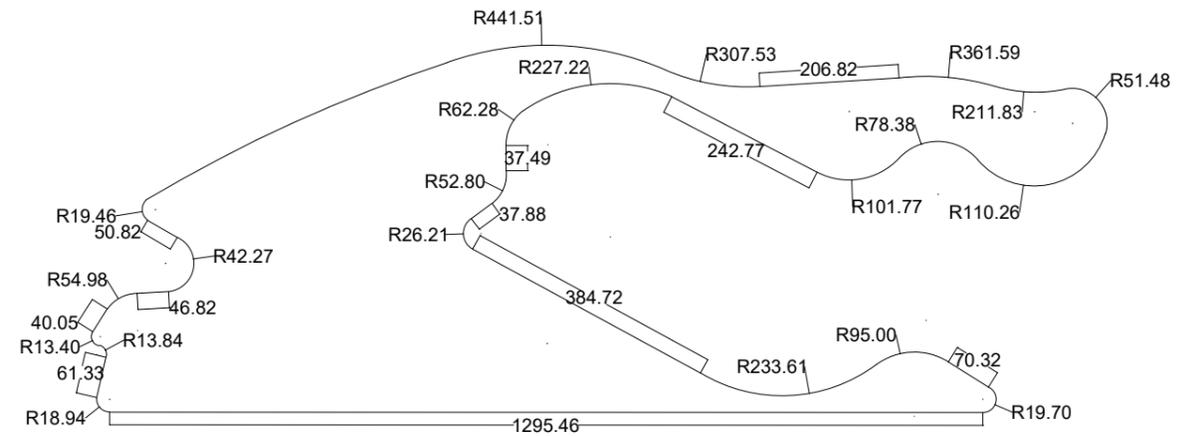
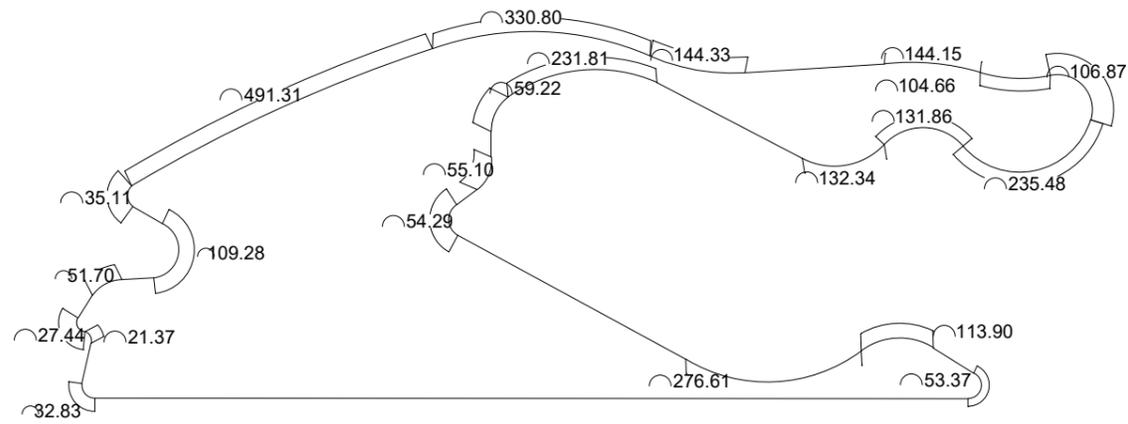
Autor: Hugo Sanchis Ortola

Fecha: Julio 2022

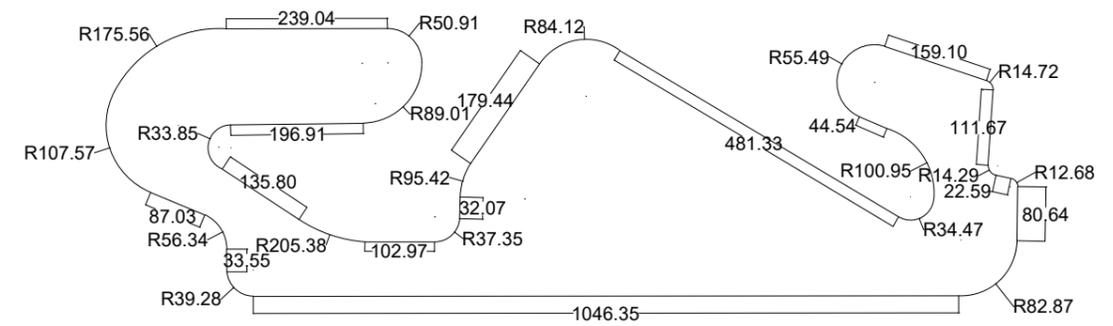
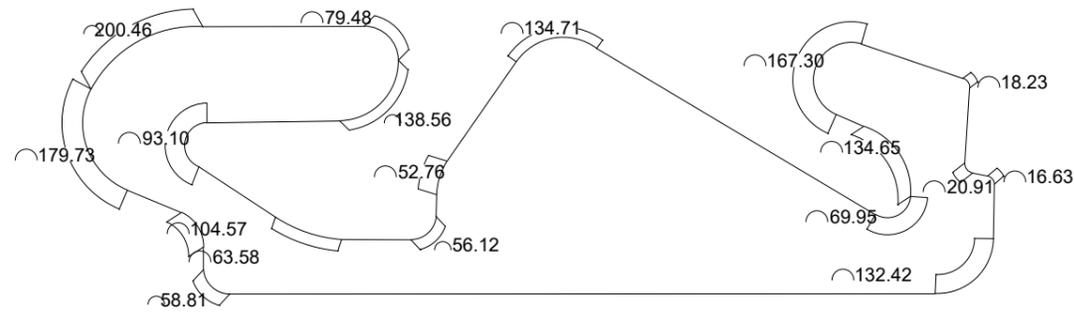
Escala: 1:10.000

Nº Plano:

2.04



<p>TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES</p>  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p>  <p>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA</p>	<p>Proyecto: ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES AERODINÁMICAS DE UN TESLA MODEL S, MEDIANTE TÉCNICAS CFD</p>	<p>Plano: Autódromo Internacional de Miami, US</p> <p>Autor: Hugo Sanchis Ortola</p>	<p>Fecha: Julio 2022</p> <p>Escala: 1:10.000</p>	<p>Nº Plano: 2.05</p>
--	---	--	--	------------------------------



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA

Proyecto:

ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES AERODINÁMICAS DE UN TESLA MODEL S, MEDIANTE TÉCNICAS CFD

Plano:

Circuito de Barcelona-Cataluña, España

Autor:

Hugo Sanchis Ortola

Fecha:

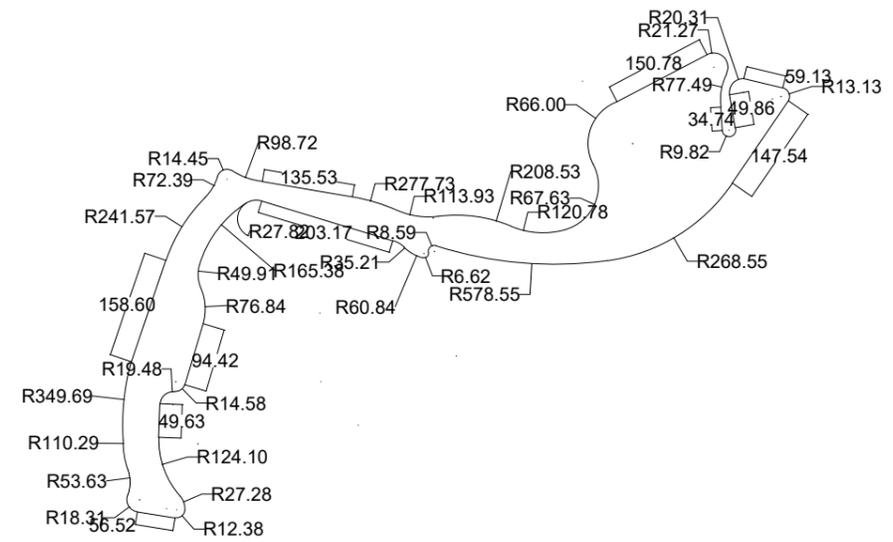
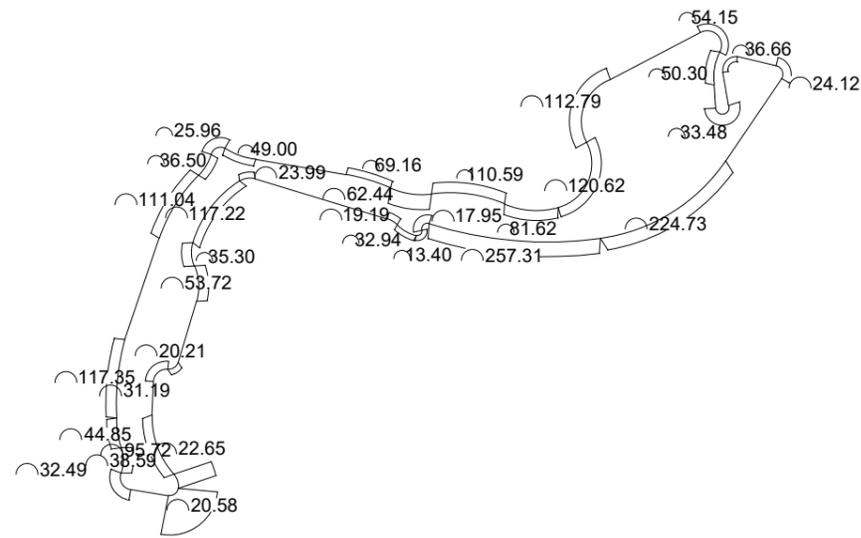
Julio 2022

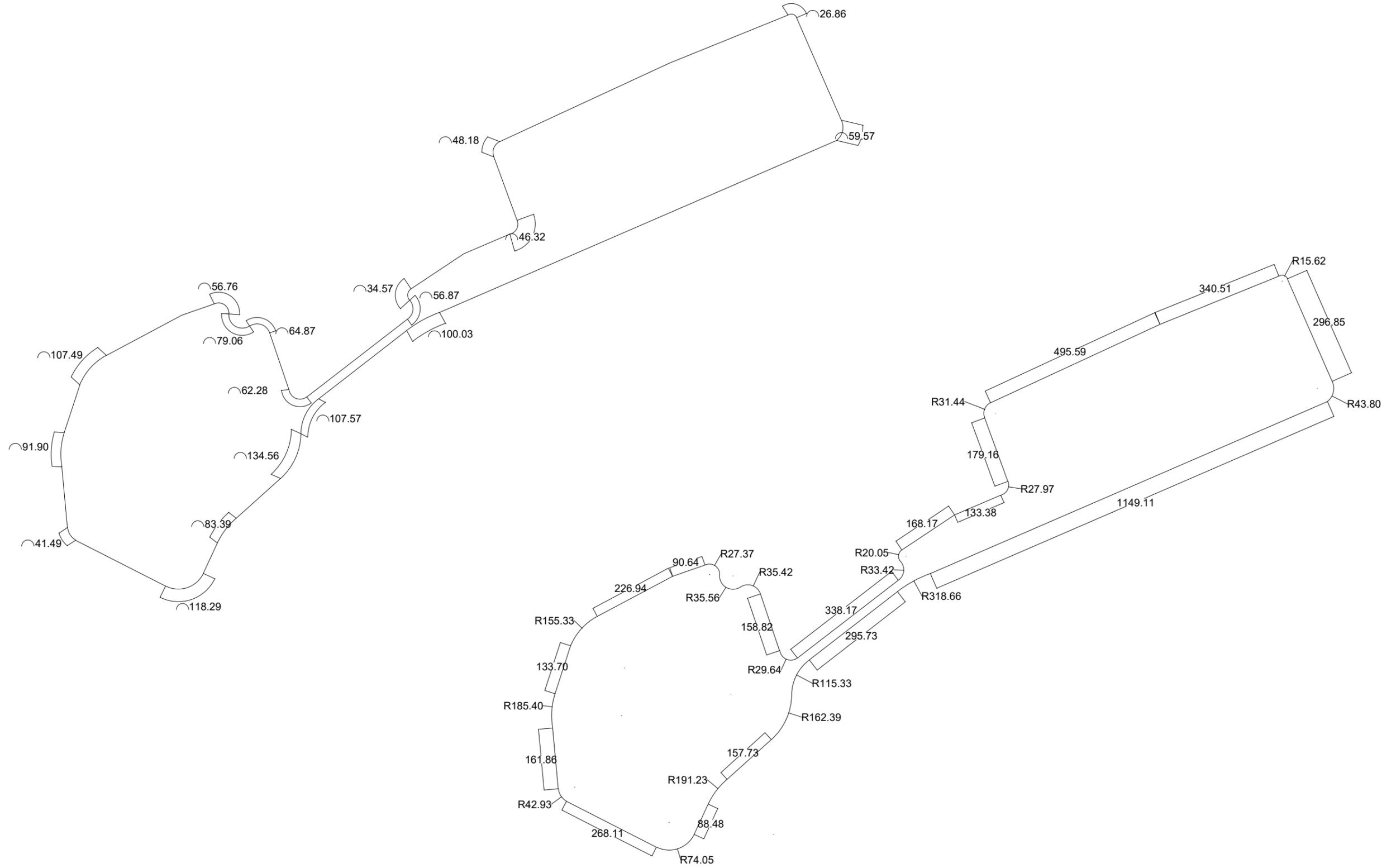
Escala:

1:10.000

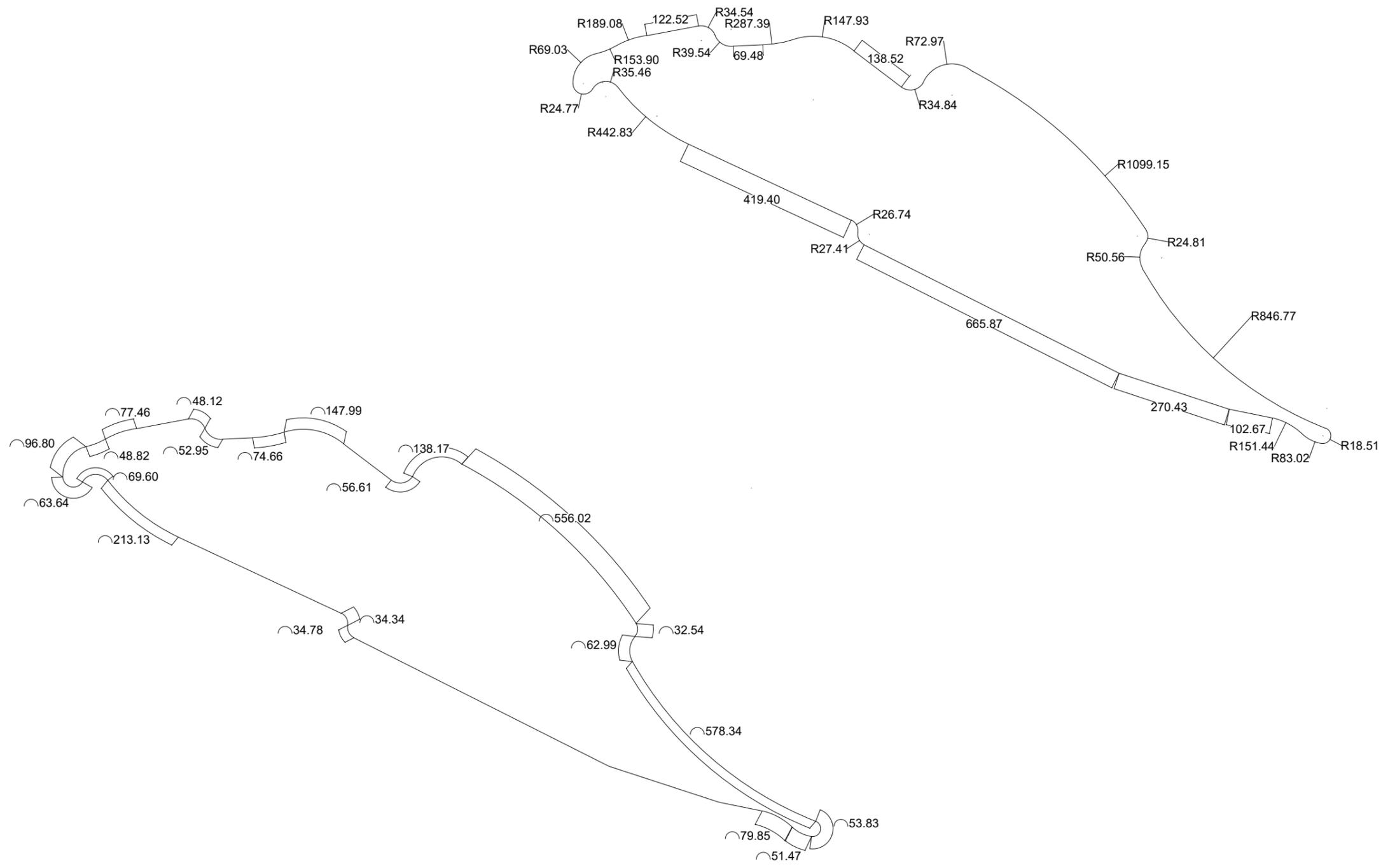
Nº Plano:

2.06

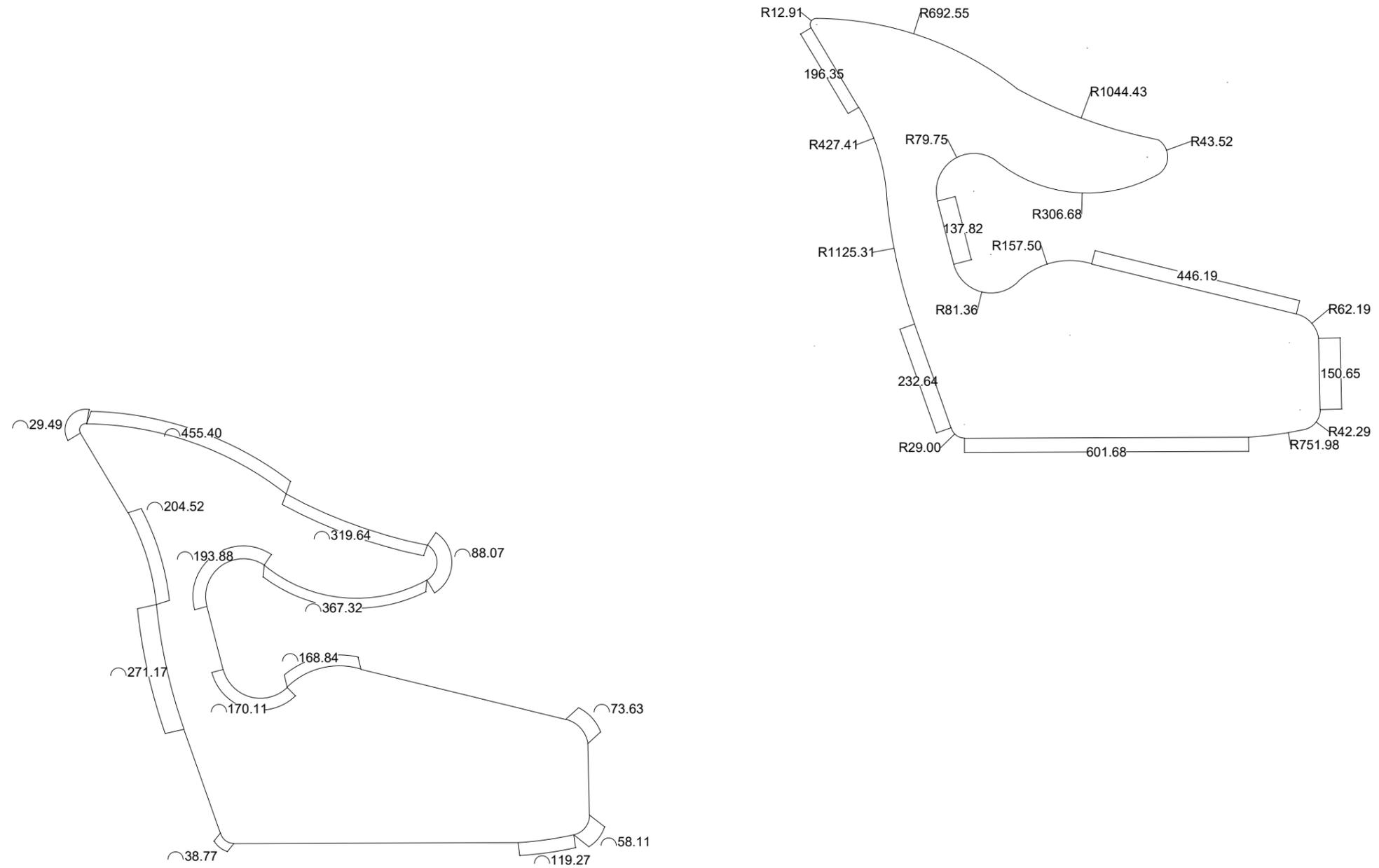


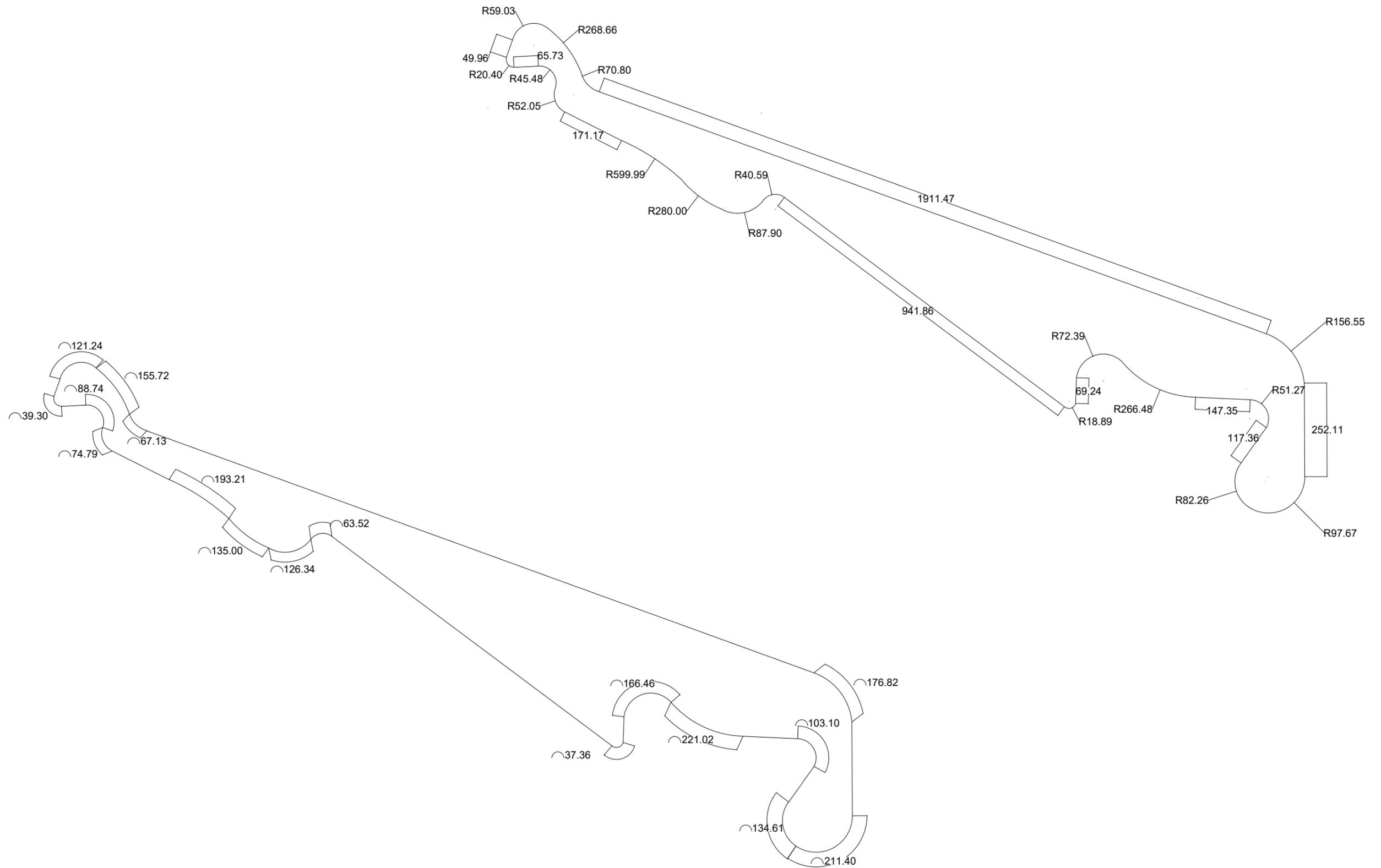


<p>TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERIA EN TECNOLOGIAS INDUSTRIALES</p>  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p>  <p>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA</p>	<p>Proyecto:</p> <p>ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES AERODINAMICAS DE UN TESLA MODEL S, MEDIANTE TECNICAS CFD</p>	<p>Plano:</p> <p>Circuito callejero de Bakú, Azerbaiyán</p> <p>Autor:</p> <p>Hugo Sanchis Ortola</p>	<p>Fecha:</p> <p>Julio 2022</p> <p>Escala:</p> <p>1:10.000</p>	<p>Nº Plano:</p> <p>2.08</p>
--	--	--	--	-------------------------------------

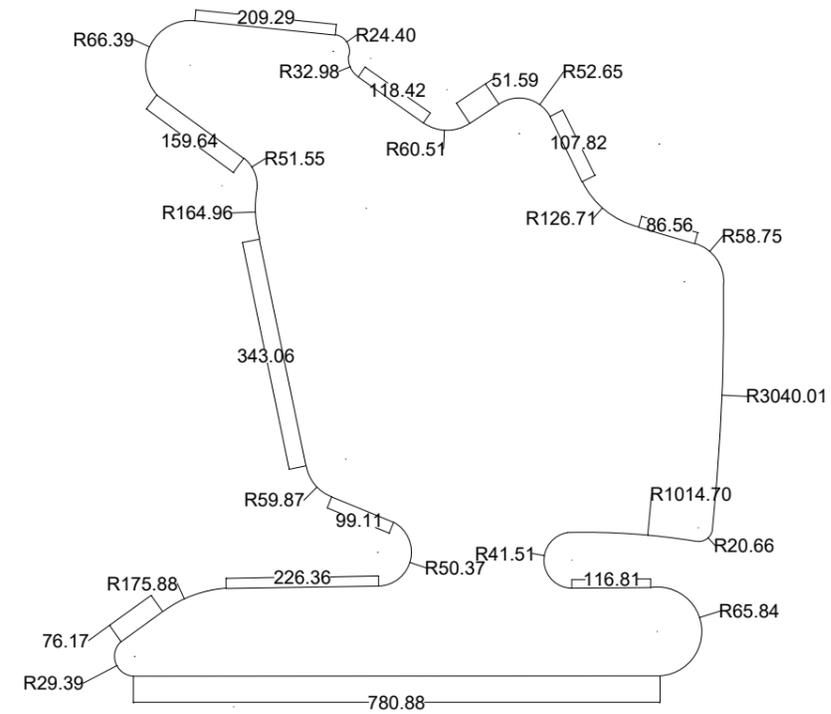
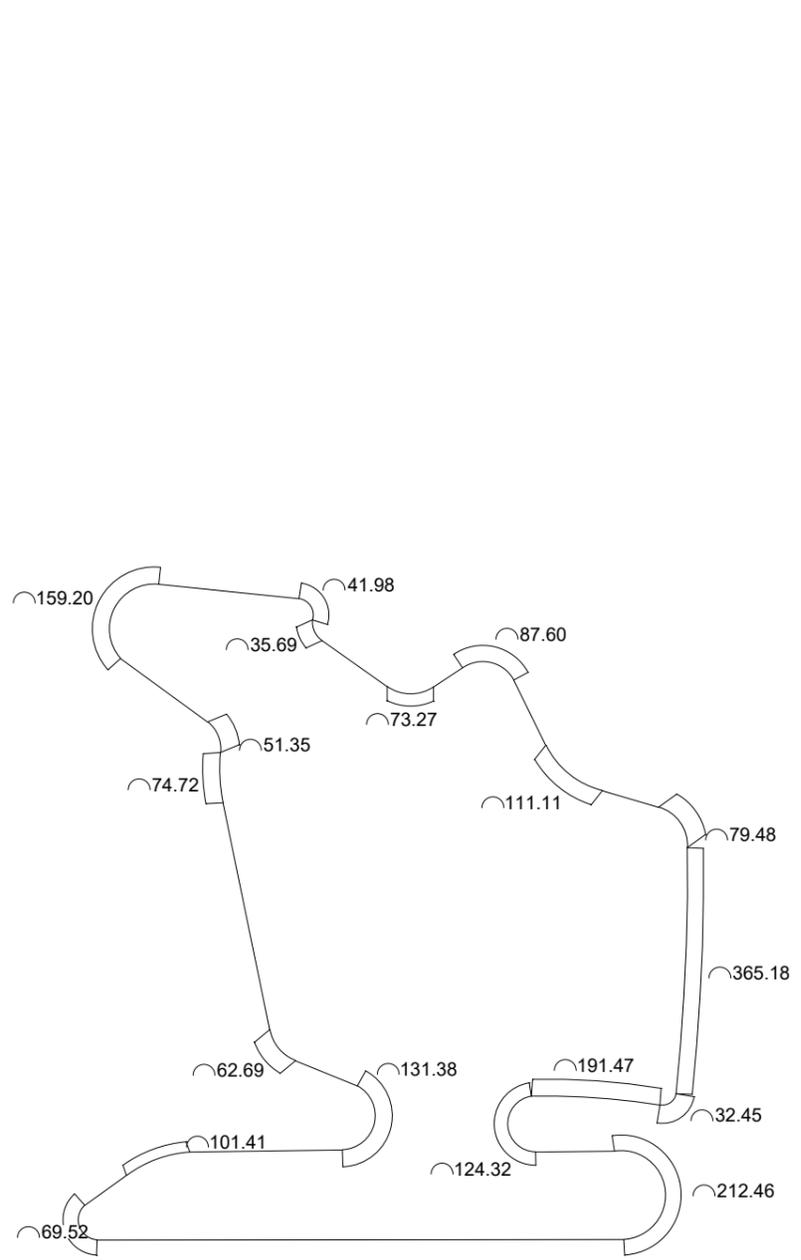


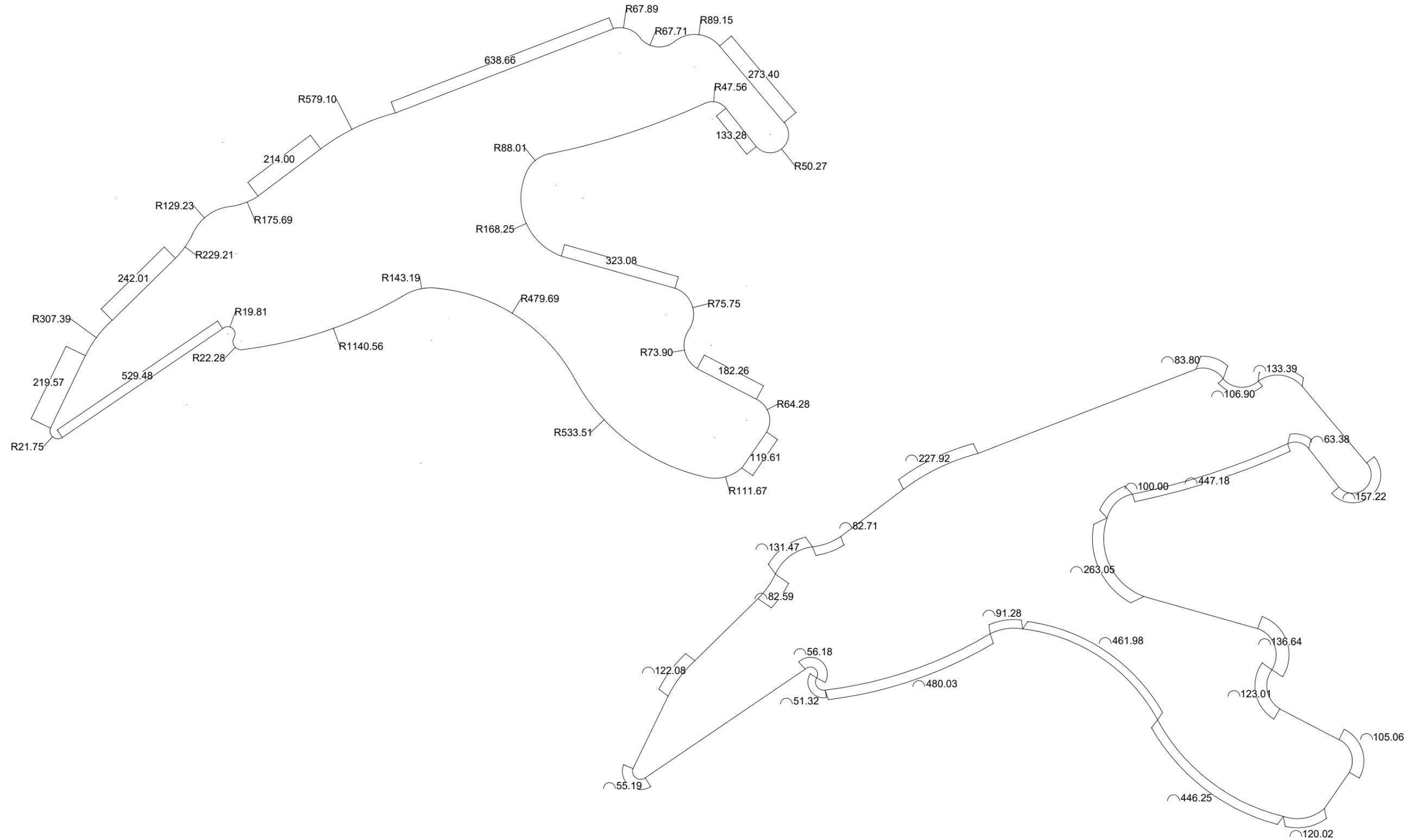
<p>TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERIA EN TECNOLOGIAS INDUSTRIALES</p>  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p>  <p>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA</p>	<p>Proyecto:</p> <p>ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES AERODINAMICAS DE UN TESLA MODEL S, MEDIANTE TECNICAS CFD</p>	<p>Plano:</p> <p>Circuito Gilles Villeneuve, Canadá</p> <p>Autor:</p> <p>Hugo Sanchis Ortola</p>	<p>Fecha:</p> <p>Julio 2022</p> <p>Escala:</p> <p>1:10.000</p>	<p>Nº Plano:</p> <p>2.09</p>
--	--	--	--	-------------------------------------



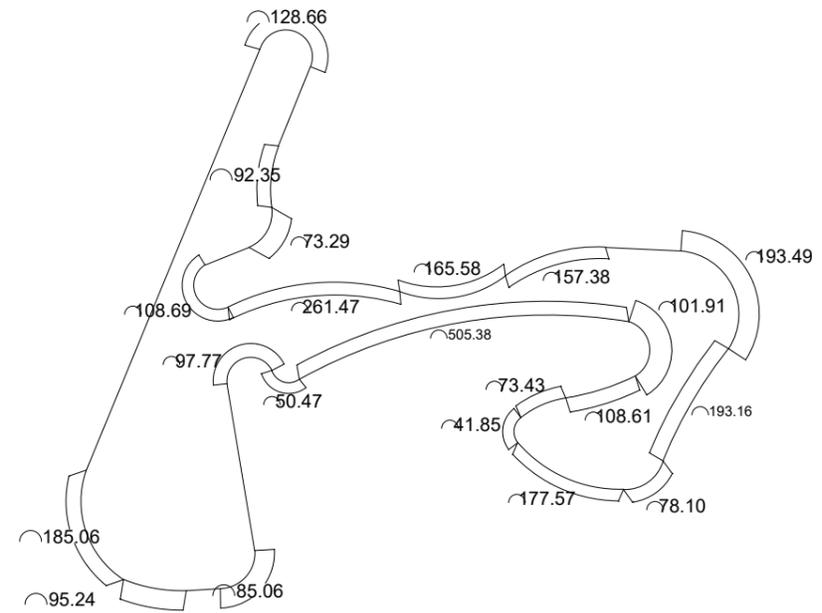
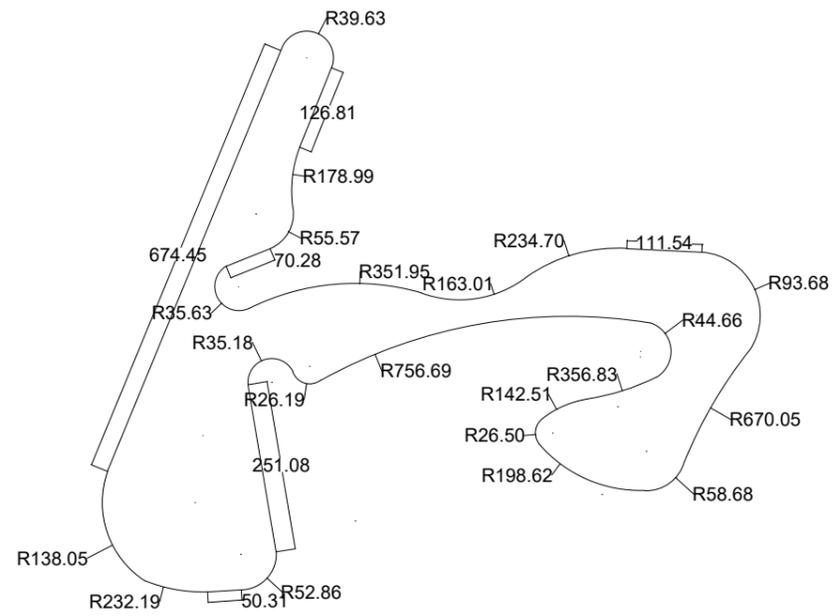


<p>TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES</p>  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p>  <p>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA</p>	<p>Proyecto:</p> <p>ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES AERODINÁMICAS DE UN TESLA MODEL S, MEDIANTE TÉCNICAS CFD</p>	<p>Plano:</p> <p>Circuito Paul Ricard, Francia</p> <p>Autor:</p> <p>Hugo Sanchis Ortola</p>	<p>Fecha:</p> <p>Julio 2022</p> <p>Escala:</p> <p>1:10.000</p>	<p>Nº Plano:</p> <p>2.12</p>
--	--	---	--	-------------------------------------





<p>TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERIA EN TECNOLOGIAS INDUSTRIALES</p>  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p>  <p>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA</p>	<p>Proyecto: ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES AERODINAMICAS DE UN TESLA MODEL S, MEDIANTE TECNICAS CFD</p>	<p>Plano: Circuito Spa-Francorchamps, Bélgica</p> <p>Autor: Hugo Sanchis Ortola</p>	<p>Fecha: Julio 2022</p> <p>Escala: 1:10.000</p>	<p>Nº Plano: 2.14</p>
--	---	---	--	------------------------------



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA

Proyecto:

ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES AERODINÁMICAS DE UN TESLA MODEL S, MEDIANTE TÉCNICAS CFD

Plano:

Circuito de Zandvoort, Países Bajos

Autor:

Hugo Sanchis Ortola

Fecha:

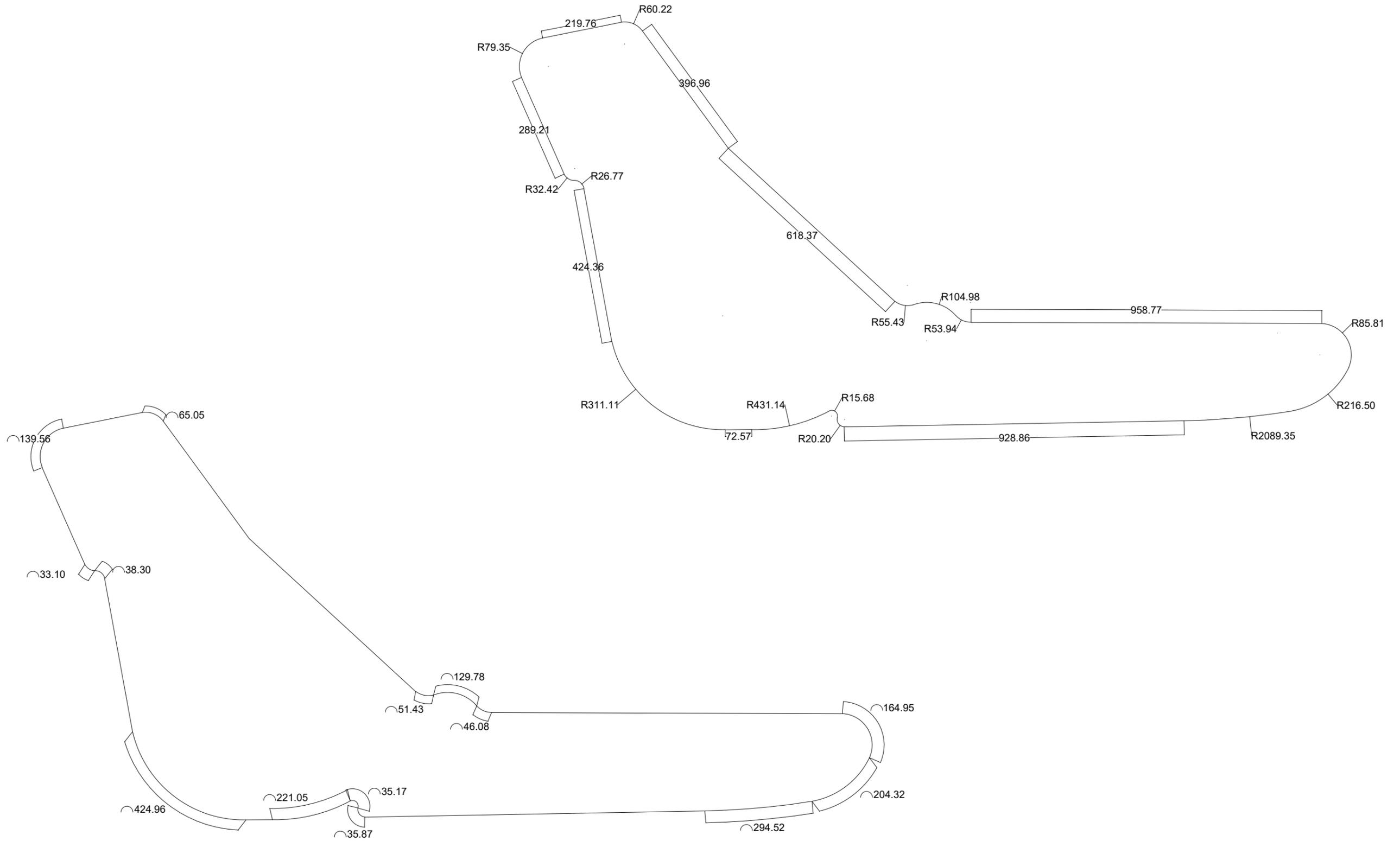
Julio 2022

Escala:

1:10.000

Nº Plano:

2.15



<p>TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES</p> <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p> <p>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA</p>	<p>Proyecto:</p> <p>ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES AERODINÁMICAS DE UN TESLA MODEL S, MEDIANTE TÉCNICAS CFD</p>	<p>Plano:</p> <p>Autodromo Nazionale di Monza, Monza, Italia</p> <p>Autor:</p> <p>Hugo Sanchis Ortola</p>	<p>Fecha:</p> <p>Julio 2022</p> <p>Escala:</p> <p>1:10.000</p>	<p>Nº Plano:</p> <p>2.16</p>
---	--	---	--	-------------------------------------

