

Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Diseño y simulación aerodinámica de carrocerías de vehículos: Comparativa y diseño de un modelo Optimizado

Autor: Matías Montes Moron

Tutor: Francisco Salmeron Medina

Dpto. Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2026



Trabajo Fin de Grado
en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Diseño y simulación aerodinámica de carrocerías de vehículos: Comparativa y diseño de un modelo Optimizado

Autor:
Matias Montes Morón

Tutor:
Francisco Salmeron Medina
Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2026

Trabajo Fin de Grado: Diseño y simulación aerodinámica de carrocerías de vehículos: Comparativa y diseño de un modelo Optimizado

Autor: Matías Montes Morón

Tutor: Francisco Salmeron Medina

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2026

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

A mis compañeros

Agradecimientos

Considero este texto como una oportunidad para agradecer a todas las personas que me han acompañado durante la carrera, no solo durante la realización de este trabajo. Me considero una persona afortunada por tener a tanta gente buena alrededor y, aunque creo que es imposible acordarme de todos, pretendo intentarlo.

En primer lugar, a mi familia. A mis padres y a mi hermana: gracias por allanarme el camino, y guiarme con paciencia a pesar de mis innumerables y continuas dudas. Gracias por la educación que me habéis brindado, basada en el esfuerzo, el respeto y la constancia. Valores que me han ayudado a crecer como persona y llegar hasta aquí.

A mis abuelos, ejemplo vivo de que con sacrificio y determinación se puede alcanzar cualquier objetivo. Qué bendición es tenerlos y aprender cada día de vosotros.

A mis compañeros de la carrera, gracias. Gracias por todos los consejos. Gracias simplemente por estar ahí. Teneis mucho que ver en que todo haya salido adelante. Gracias por estar pendiente de mí durante tantos años, por vuestra disponibilidad siempre para hablar, para apoyarme, para proponer planes y despejarnos juntos. Gracias, sobre todo, por tirar del carro cuando yo flaqueaba.

A mis profesores, gracias por transmitirme conocimientos y valores que sin duda serán cruciales en mi futuro profesional. En especial, quiero destacar a Fran Salmerón, Daniel Vallejo, Aida Estévez, Alfredo Navarro, Fran Morales y Antonio Valverde, quienes representan para mí la figura del profesor admirable, siempre dispuestos a resolver dudas con una paciencia y dedicación encomiables.

Por último, aunque para mí el más importante, a mi primo, Jose Antonio Garrido Casado. No hay palabras para expresar la fuerza que me has dado día a día desde que te marchaste. Un beso al cielo. Te quiero.

Mi gratitud para todos por haber sido parte esencial de este camino. Simplemente, gracias.

Matias Montes Morón

Sevilla, 2026

Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado presenta un análisis aerodinámico comparativo entre dos vehículos icónicos: el Land Rover Defender 2008 y el Range Rover 2019. La investigación se centra en el modelado CAD (Diseño Asistido por Ordenador) y la posterior simulación CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) de las carrocerías de ambos vehículos.

El estudio finalizará con el desarrollo de un nuevo diseño optimizado, partiendo del Range Rover como base, para crear una carrocería con una mayor eficiencia aerodinámica. Este modelado se realizará utilizando el módulo "Imagine and Shape" de CATIA V5, mientras que las simulaciones CFD se ejecutarán con SolidWorks Flow Simulation.

Es fundamental destacar que la finalidad de este proyecto es demostrar la utilidad de estas herramientas a modo de tutorial. Todo el estudio se ha llevado a cabo con un ordenador portátil standard, similar al que cualquier estudiante utiliza en la universidad. Si bien es necesario aplicar simplificaciones que serán detalladas, este enfoque práctico prueba que es posible adentrarse en el mundo del CAD-CAE desde casa y obtener resultados valiosos.

Así, este TFG no solo busca un resultado técnico, sino también servir de guía y motivación para otros estudiantes. Pretende acortar la brecha entre la teoría académica y la aplicación práctica, demostrando que con los recursos disponibles se pueden emprender proyectos interesantes y adquirir competencias clave para la carrera profesional.

Abstract

This Bachelor's Thesis presents a comparative aerodynamic analysis between two iconic vehicles: the 2008 Land Rover Defender and the 2019 Range Rover. The research focuses on the CAD (Computer-Aided Design) modeling and subsequent CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation of both vehicle bodies.

The study culminates in the development of a new optimized design. Using the Range Rover as a base, a new body shape with greater aerodynamic efficiency is proposed. This modeling is performed using the "Imagine and Shape" module in CATIA V5, while the CFD simulations are run using SolidWorks Flow Simulation.

A key objective of this project is to demonstrate the accessibility of these tools in a tutorial-like manner. The entire study was conducted on a standard laptop, similar to those used by university students. Although certain necessary simplifications will be detailed, this practical approach proves that it is possible to delve into the world of CAD-CAE from home and achieve valuable results.

Thus, this thesis not only seeks a technical outcome but also aims to serve as a guide and motivation for other students. It intends to bridge the gap between academic theory and practical application, demonstrating that with available resources, it is possible to undertake interesting projects and acquire key competencies for a professional career.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xviii
Notación	xxiv
1 Introducción	1
1.1 <i>Contexto y justificación del proyecto</i>	1
1.2 <i>Objetivos del TFG</i>	2
1.2.1 <i>Objetivos específicos</i>	2
1.3 <i>Alcance y limitaciones</i>	2
2 ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES	5

2.1. Evolución del diseño automotriz: Del Land Rover Defender 2008 al Range Rover Evoque	5
2.2. Fundamentos de la Aerodinámica automotriz	7
2.2.1. Conceptos previos (resistencia al avance, sustentación, coeficientes aerodinámicos Cd y CL)	7
2.2.2. Importancia de la Aerodinámica en el Diseño y Rendimiento de Vehículos	8
2.3. Herramientas CAD para Modelado de Superficies en Automoción (CATIA V5 Imagine and Shape, Generative Shape Design, FreeStyle)	9
2.4. Dinámica de fluidos computacional (CFD) en la industria automotriz	10
2.4.1. Preproceso	11
2.4.2. Cálculo	11
2.4.3. Postproceso	¡Error! Marcador no definido.
2.5. Compromisos de Diseño en la Ingeniería Automotriz (Aerodinámica vs. Seguridad Peatonal, Espacio Interior y Factores Económicos)	12
2.5.1. Aerodinámica vs. Espacio Interior	12
2.5.2. Aerodinámica vs. Seguridad Peatonal	13
2.5.3. Otro factor Crítico: Coste-Beneficio Económico y Técnico	13
3 METODOLOGÍA	11
3.1. Modelado 3D de carrocerías con CATIA V5	11
3.1.1 Land Rover Defender 2008	11
3.1.2 Range Rover Evoque 2019	37
3.2. Simulaciones CFD en SolidWorks Flow Simulation	50
3.2.1. Preparación del modelo CAD para análisis CFD	50
3.2.2. Definición de condiciones de contorno y creación de Dominio Fluido	50
3.2.3. Mallado	51
4 RESULTADOS	59
4.1 Land Rover Defender 2008	59
4.1.1 Cálculo del coeficiente de resistencia aerodinámico Cd	66
4.2 Range Rover Evoque 2019	67
4.2.1 Cálculo del coeficiente de Resistencia aerodinámico Cd	73
5 PROPUESTA DE MEJORA	74
5.1. Diseño de la propuesta de mejora	74
5.2. Análisis aerodinámico de la propuesta de mejora	78
5.3. Cálculo del coeficiente de resistencia aerodinámico Cd	83
6 CONCLUSIÓN	85
Referencias	85
Índice de Conceptos	89
Glosario	91

ÍNDICE DE TABLAS

No se encuentran elementos de tabla de ilustraciones.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Land Rover Defender 110	6
Figura 2-2: Range Rover Evoque 2019	6
Figura 2-3: Aerodinámica de un vehículo	7
Figura 2-4 Energy balance in the drivetrain	8
Figura 2-5: Curvas de NURBS	9
Figura 2-6: Geometrical Shape Design. Carrocería	10
Figura 2-7: Part Design Catia. Rueda	10
Figura 2-8: Mallado de un perfil	11
Figura 2-9: CFD car simulation	11
Figura 2-10: CFD car simulation, II	12
Figura 2-11: Prototipo de vehículo con forma de gota de agua	13
Figura 3-1: Inicio de "Sketch Tracer"	12
Figura 3-2: Create an Immersive Sketch	13
Figura 3-3: Ejemplo de vista	13

Figura 3-4: Ejemplo de ajuste de vistas	14
Figura 3-5: Vista general "Sketch Tracer Catia V5"	14
Figura 3-6: "Imagine & Shape"	15
Figura 3-7: "Imagine & Shape" vista general	15
Figura 3-8: Interfaz principal "Imagine & Shape"	16
Figura 3-9: Comando "Extrude"	16
Figura 3-10: Aplicación comando "Extrude"	17
Figura 3-11: Aplicación comando "Extrude"	17
Figura 3-12: Icono de "Extrusion"	18
Figura 3-13: Ejemplo de aplicación de "Extrusion"	18
Figura 3-14: Icono de "Modification"	19
Figura 3-15: Ejemplo de aplicación del comando "Modification"	19
Figura 3-16: Boceto del morro del vehículo	20
Figura 3-17: Comando "Attraction"	20
Figura 3-18: Resultado de aplicar "Attraction"	21
Figura 3-19: Aplicación de "Attraction" en vertice	21
Figura 3-20: Aplicación de "Attraction" en vertice, resultado	22
Figura 3-21: Boceto lateral del vehículo	22
Figura 3-22: Boceto de apoyo 1 [34]	23
Figura 3-23: Boceto de apoyo 2 [34]	23
Figura 3-24: Boceto carrocería parte lateral, ventanillas	24
Figura 3-25: Herramienta "Face cutting"	24
Figura 3-26: Ejemplo de aplicación de herramienta "Face Cutting" 1	25
Figura 3-27: Ejemplo de aplicación de herramienta "Face Cutting" 2	25
Figura 3-28: Ejemplo de aplicación de herramienta "Face Cutting" 3	26
Figura 3-29: Ejemplo de aplicación de herramienta "Extrusion" en la ventanilla 1	26
Figura 3-30: Ejemplo de aplicación de herramienta "Extrusion" en la ventanilla 2	27
Figura 3-31: Ejemplo de aplicación de herramienta "Extrusion" en la ventanilla 2	27
Figura 3-32: Herramienta "Face Subdivision"	28
Figura 3-33: Ejemplo de aplicación de herramienta "Modification" en la ventanilla	28
Figura 3-34: Resultado ventanilla lateral trasera	29
Figura 3-35: Ejemplo de aplicación de la herramienta "Extrusion" en la ventanilla lateral central 1	29
Figura 3-36: Ejemplo de aplicación de la herramienta "Extrusion" en la ventanilla lateral central 2	30
Figura 3-37: Ejemplo de aplicación de la herramienta "Face Subdivision" en la ventanilla lateral central	30
Figura 3-38: Ejemplo de aplicación de la herramienta "Face Subdivision" en la ventanilla lateral central	31
Figura 3-39: Resultado ventanilla lateral central	31

Figura 3-40: Resultado efecto ventanillas	32
Figura 3-41: Boceto del coche completo, vista frontal	32
Figura 3-42: Boceto del coche completo, vista trasera 2	33
Figura 3-43: Boceto coche tras aplicar simetría	34
Figura 3-44: Boceto coche completo, con simetría	34
Figura 3-45: Boceto del fondo del coche	35
Figura 3-46: Boceto del fondo del coche completo	35
Figura 3-47: Resultado final, vista general	36
Figura 3-48: Resultado final, vista inferior	36
Figura 3-49: Planos Range Rover	37
Figura 3-50: Boceto parte delantera Range Rover 1	37
Figura 3-51: Boceto parte delantera Range Rover 2	38
Figura 3-52: Boceto parte lateral Range Rover	38
Figura 3-53: Boceto parte trasera Range Rover	39
Figura 3-54: Boceto Range Rover vista general	39
Figura 3-55: Boceto Range Rover completado	40
Figura 3-56: Part Range Rover	40
Figura 3-57: Resultado Boceto Range Rover	41
Figura 3-58: Fotos retrovisor	41
Figura 3-59: Boceto espejo restrovisor	42
Figura 3-60: Boceto "layers" retrovisor	42
Figura 3-61: Arbol de operaciones retrovisor	43
Figura 3-62: Boceto retrovisor completo, vista trasera	44
Figura 3-63: Boceto retrovisor completo, vista general	44
Figura 3-64: Boceto inicial llanta	45
Figura 3-65: Boceto detalles llanta 1	45
Figura 3-66: Boceto detalles llanta 2	46
Figura 3-67: Boceto detalles llanta 3	46
Figura 3-68: Boceto llanta completa	47
Figura 3-69: Boceto rueda completa	47
Figura 3-70: Boceto llanta Land Rover	48
Figura 3-71: Boceto llanta completa sin aligerar	48
Figura 3-72: boceto llanta completa con detalles	49
Figura 3-73: Emsamblaje completo Land Rover	49
Figura 3-74: Dominio fluido Land Rover	50
Figura 3-75: Dominio fluido Range Rover	51
Figura 3-76: Condiciones de contorno	51
Figura 3-77: Mallado nivel 6 Land Rover	52
Figura 3-78: Refinamiento de malla cerca del vehiculo	52

Figura 3-79: Malla refinada	53
Figura 3-80: Solver Land Rover	53
Figura 3-81: Boceto Range Rover original	54
Figura 3-82: Range Rover completo, viewer Catia	54
Figura 3-83: Boceto 1 Range Rover, vehiculo simplificado	55
Figura 3-84: Boceto 2 Range Rover, vehiculo simplificado	55
Figura 3-85: Boceto 3 Range Rover, vehiculo simplificado	56
Figura 3-86: Range Rover completo solidworks	56
Figura 3-87: Mallado Range Rover	57
Figura 3-88: Solver Range Rover	58
Figura 4-1: Visualizer "SolidWorks"	60
Figura 4-2: Leyenda de presiones	61
Figura 4-3: Cut Plot 1, vista lateral	61
Figura 4-4: Cut Plot 2, vista lateral	61
Figura 4-5: Cut Plot 3, vista lateral	62
Figura 4-6: Cut Plot 4, vista lateral	63
Figura 4-7: Surface Plot 1, vista general	63
Figura 4-8: Surface Plot 2, vista trasera	64
Figura 4-9: Cut Plot y Surface Plot combinados, vista general	64
Figura 4-10: Flow Trayectories	65
Figura 4-11: Flow trayectories y resultados	65
Figura 4-12: Resultados	65
Figura 4-13: Medición del area frontal	66
Figura 4-14: Leyenda de presiones relativas	67
Figura 4-15: "Cut plot " 1, Range Rover	67
Figura 4-16: "Cut plot " 1, Range Rover	68
Figura 4-17: "Cut plot " 1, Range Rover	68
Figura 4-18: "Cut plot " 1, Range Rover	69
Figura 4-19: Surface Plot 1, vista general	70
Figura 4-20: Surface Plot 2, vista trasera	70
Figura 4-21: Surface Plot 3, vista trasera	71
Figura 4-22: Cut Plot y Surface Plot combinados	71
Figura 4-23: Flow Trayectories	72
Figura 4-24: Resultados de fuerza de arrastre, Range Rover	72
Figura 4-25: Cálculo de area frontal, range Rover	73
Figura 4-26: Area frontal, Range Rover	73
Figura 4-27: Boceto de la propuesta de diseño optimizado, vista trasera	75
Figura 4-28: Boceto de la propuesta de diseño optimizado, vista lateral	75
Figura 4-29: Boceto de la propuesta de diseño optimizado, vista general	76

Figura 4-30: Boceto de la propuesta de diseño optimizado con simetría	76
Figura 4-31: Dominio fluido, propuesta de diseño mejorado	78
Figura 4-32: malla nivel 6, refinamiento nivel 3	78
Figura 4-33: mallado final, propuesta de diseño mejorado	79
Figura 4-34: leyenda de presiones relativas, propuesta de mejora	79
Figura 4-35: Mapa de presión relativa , propuesta de diseño mejorado	80
Figura 4-36: "Surface Plot", propuesta de diseño mejorado, vista frontal	80
Figura 4-37: "Surface plot", propuesta de diseño mejorado, vista trasera	81
Figura 4-38: "Flow trajectories" 2, propuesta de diseño mejorado	81
Figura 4-39: Cálculo fuerza de arrastre, propuesta de diseño mejorado	82
Figura 4-40: Resultados fuerza de arrastre, propuesta de diseño mejorado	82
Figura 4-41: Cálculo area frontal, propuesta de diseño mejorado	83
Figura 4-42: Área frontal, propuesta de diseño mejorado	83

Notación

A^*	Conjugado
c.t.p.	En casi todos los puntos
c.q.d.	Como queríamos demostrar
■	Como queríamos demostrar
e.o.c.	En cualquier otro caso
e	número e
Re	Parte real
Im	Parte imaginaria
sen	Función seno
tg	Función tangente
arctg	Función arco tangente
sen	Función seno
$\text{sen}^x y$	Función seno de x elevado a y
$\text{cos}^x y$	Función coseno de x elevado a y
S_a	Función sampling
sgn	Función signo
rect	Función rectángulo
Sinc	Función sinc
$\partial y \partial x$	Derivada parcial de y respecto
x°	Notación de grado, x grados.
$\text{Pr}(A)$	Probabilidad del suceso A
SNR	Signal-to-noise ratio
MSE	Minimum square error
:	Tal que
\leq	Menor o igual
\geq	Mayor o igual
\	Backslash
\Leftrightarrow	Si y sólo si

1 INTRODUCCIÓN

*Somos lo que hacemos repetidamente. La excelencia es,
por tanto, no un talento, sino mas un hábito.*

- Aristoteles -

Este proyecto consiste en la explicación y el modelado mediante el programa CATIA V5 de un automóvil real, concretamente un modelo de Ranger Rover. Se pretende así analizar y mostrar a modo de tutorial el uso del modulo de Catia V5 “Imagine and Shape” y sus utilidades. Una de ellas, la detallada en este trabajo será la del análisis computacional de dinámica de fluidos (CFD), un estudio aerodinámico al alcance de todos los estudiantes, con gran potencial sobre todo entre los amantes de la F1.

Para ello se comparan aerodinámicamente modelos de la marca Land rover y su posterior sucesor el Ranger Rover.

El objeto del Proyecto es el de acercar a los estudiantes algunas herramientas cruciales en el mundo automovilístico, herramientas que son de gran ayuda en la vida profesional de un ingeniero. Estas son el análisis computacional (CFD) y el Diseño asistido por ordenador (CAD).

1.1 Contexto y justificación del proyecto

Antiguamente, no se prestaba mucha atención a la aerodinámica de los vehículos. Sin embargo, en la actualidad, uno de los principales objetivos de la automoción es maximizar la eficiencia energética. Para lograr una mayor autonomía, las soluciones pasan por motores más eficientes y diseños aerodinámicamente optimizados. Esta última opción es donde se pueden realizar más cambios y, por tanto, ofrece un mayor margen para mejorar el rendimiento del vehículo.

El sector de la automoción ha experimentado un cambio radical impulsado por la búsqueda de rendimiento, eficiencia y seguridad. En este contexto, la aerodinámica se ha convertido en un pilar fundamental del diseño, especialmente en vehículos modernos, donde la interacción con el aire a altas velocidades afecta tanto a la autonomía (en el caso de los eléctricos) como al consumo de combustible, disminuyendo con ello la huella de carbono. [1]

Los primeros modelos de carrocerías consistían en líneas rectas, lo que perjudicaba la fluidez del flujo de aire alrededor del vehículo y aumentaba el consumo de combustible. Con el paso del tiempo, las formas de la carrocería se han ido suavizando. Actualmente, las empresas fabricantes de automóviles cuentan con las instalaciones de túneles de viento. En estos, se monta el coche objeto de estudio y se aplica aire hacia la superficie desde diferentes puntos. Gracias a esta técnica, se puede estudiar la geometría que caracteriza al vehículo en función de los resultados obtenidos, tales como las fuerzas de arrastre, de sustentación, etc. Sin embargo, las simulaciones mediante CFD ofrecen una excelente alternativa, permitiendo a los equipos reducir costos a la vez

que permite un estudio bastante preciso de la aerodinámica del vehículo.

Este proyecto se justifica la necesidad de entender y poder cuantificar la evolución aerodinámica de 2 modelos emblemáticos de Land Rover a través de un estudio comparativo: el Land Rover Defender 2008 y el Range Rover Evoque de 2019. El Land Rover tiene un diseño caracterizado por líneas rectas y forma cúbica debido a las limitaciones tecnológicas de la época. Sin embargo, La forma del vehículo cumplía con su función principal sin una intención aerodinámica concreta.

En contraste el Range Rover Evoque introducido en 2012, viene de la unión entre lujo y estética aplicada al nacimiento de los SUV compactos.

Mientras que mediante el diseño podremos ilustrar las diferencias entre estos dos modelos, con la simulación moderna como la dinámica de fluidos computacional (CFD), podemos cuantificar y optimizar el rendimiento de un automóvil de manera precisa.

1.2 Objetivos del TFG

En cuanto al objetivo del proyecto, hay que destacar que es un proyecto con un enfoque didáctico, por lo tanto, el objetivo principal es el de desarrollar un tutorial con un enfoque práctico sobre el uso del módulo “Imagine and Shape” de Catia V5, aplicándolo al modelado de una carrocería de un automóvil. En concreto el Range Rover Evoque y su antecesor el Land Rover Defender 2008. Además, se complementará con otros módulos como el Generative shape design (GSD) o part design para algunas piezas del coche.

Además, se llevarán a cabo simulaciones aerodinámicas a través del software SolidWorks, un software que nos permite realizar simulaciones aerodinámicas de manera relativamente sencilla.

La realidad es que las simulaciones en CFD requieren de un alto coste computacional, donde se requieren ordenadores especializados en cálculo computacional, pero como veremos en este proyecto, se realizarán algunas simplificaciones para poder realizar la simulación desde un ordenador convencional.

1.2.1 Objetivos específicos

- Desarrollo de un tutorial sobre el uso de Catia V5 y Solidworks aplicado a la simulación aerodinámica y modelado de un automóvil.
- Crear modelos CAD 3D relativamente precisos de las carrocerías del Range Rover Evoque y el Land Rover Defender 2008, usando planos y algunos datos disponibles.
- Obtener el coeficiente de arrastre aproximado de la sección ensayada en CFD, visualizando además patrones de flujo de aire, así como “Surface Plots” y “Cut Plots” donde podemos visualizar fácilmente y de manera bastante intuitiva gran cantidad de variables del flujo como presión relativa velocidad etc. Gracias a esta herramienta podemos identificar zonas de alta y baja presión, lo que nos permitirá analizar el impacto aerodinámico sobre la carrocería, entender cómo se comporta el flujo de aire cuando interactúa con la superficie del coche, y detectar así algunos problemas como el momento en el que se produce la separación de flujo.
- Se intentará proponer un diseño conceptual alternativo para el Range Rover Evoque que maximice su eficiencia aerodinámica analizando los puntos que tendríamos que dejar de lado para conseguir esta mejora, ya que nada es gratis.

1.3 Alcance y limitaciones

Definir el alcance y limitaciones de un proyecto es algo esencial, ya que permite definir lo que está dentro y fuera del estudio, proporcionando al lector transparencia y credibilidad.

El alcance de este trabajo se centra en un diseño conceptual de la carrocería de un automóvil, con un enfoque primordial en la aerodinámica de la superficie externa del vehículo. No se llevará a cabo un diseño detallado de

componentes internos como sería el motor, la suspensión, asientos, ni otros detalles interiores.

El modelado de la carrocería se realizará con una calidad aproximada a la de "Class-A surfacing", es decir, superficies con continuidad G2 o G3 en curvatura, y libre de irregularidades y alta calidad estética y funcional. [2]

Tanto es así que veremos que para el estudio aerodinámico tendremos que hacer algunas simplificaciones o cortes, dado que con la tecnología de la que disponemos en este TFG es imposible realizar el estudio completo del vehículo Range Rover Evoque, por lo tanto, para el Land Rover Defender 2008 se decidirá por realizar una superficie ligeramente más sencilla para intentar simular el coche completo. Posteriormente se comparan dos rebanadas significativamente similares para poder llegar a un resultado objetivo.

Otras limitaciones del proyecto son:

- La **limitada disponibilidad de los datos** para el Land Rover Defender 2008 ya que dada la antigüedad de este vehículo la obtención de planos y datos para el CAD es un desafío a tener en cuenta. El modelado de este vehículo se basará en las dimensiones obtenidas a través de referencias bibliográficas y bocetos Publicados en internet.
- La **limitación de recursos computacionales para CFD**, ya que veremos que la potencia del hardware puede limitar a veces el refinamiento de maya o la complejidad de los modelos que se pretenden analizar, lo que puede llegar a influir en la precisión de los resultados obtenidos. Por lo tanto, lo que se buscará es un equilibrio entre fidelidad y viabilidad en el cálculo.
- Propuesta de **diseño conceptual**: La propuesta de diseño será totalmente conceptual, y por tanto no incluirá un análisis exhaustivo en cuanto a normativas se refiere. Tampoco incluirá análisis de producción, espacio interior, ni de seguridad del peatón.

2 ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES

“La mente que se abre a una nueva idea jamás vuelve a su tamaño original.”

- Albert Einstein -

2.1. Evolución del diseño automotriz: Del Land Rover Defender 2008 al Range Rover Evoque

La historia del diseño automovilístico nace de una necesidad tecnológica y económica de cada época. El Land Rover Defender 2008 es un testimonio de la filosofía de diseño funcional y robusto que caracterizó a la marca durante décadas, manteniendo una esencia utilitaria, pero incorporando mejoras técnicas propias de su tiempo. Diseñado como un vehículo todoterreno por excelencia, su forma angular, planos verticales y líneas rectas eran el resultado de una herencia directa del Land Rover Series 1, priorizando la capacidad off-road, la simplicidad mecánica y la durabilidad sobre los refinamientos estilísticos y la eficiencia aerodinámica [3].

Las dimensiones del Defender 110 de 2008, con sus 3922 mm de largo, 1790 mm de ancho y 2018 mm de alto 8, ilustran un diseño que antepone la capacidad para superar terrenos extremos, la visibilidad y la funcionalidad. Su altura y su perfil cuadrado son consecuencia de una batalla (distancia entre ejes) de 2360 mm y una altura libre del suelo de 245 mm, características clave para su rendimiento todoterreno [4]. La aerodinámica en este vehículo era una consideración secundaria, un legado de los diseños de "cuerpos romos" cuyo coeficiente de arrastre (Cd) es inherentemente alto. Aunque no se proporciona el Cd exacto para el Defender 2008, su forma es comparable a la de sus predecesores, con valores que en vehículos de similar tipología pueden oscilar muy por encima de los estándares modernos. Vehículos similares tienen un Cd alto, típicamente por encima de 0.40-0.45, debido a su forma "rompe-viento".



Figura 2-1: Land Rover Defender 110

En contraste, el Range Rover Evoque, presentado como concepto LRX en 2008 y llegando a producción en 2011, representa un cambio de paradigma radical en el diseño de Land Rover. Se posicionó como un SUV compacto de lujo y estilo, donde la estética emocional, la eficiencia y el dinamismo se convirtieron en pilares fundamentales. Sus líneas fluidas, techo flotante y carrocería más baja (1649 mm de alto) revelan una silueta dramáticamente más estilizada y urbana [5] [6]. El Range Rover Evoque logró un coeficiente de arrastre excepcionalmente bajo para su categoría, de apenas 0.32 en su mejor versión, un valor que no solo es notablemente inferior al del Defender 2008, sino que se convirtió en un referente en el segmento premium. Este contraste pone de manifiesto cómo la aerodinámica, junto con la estética y el lujo, pasó de ser un factor casi irrelevante en los vehículos utilitarios de Land Rover a un elemento central, diferenciador y comercialmente crucial en el diseño de sus vehículos contemporáneos. Así pues, fue evolucionando hasta alcanzar la versión objeto de estudios en este trabajo, el Range Rover Evoque 2019.



Figura 2-2: Range Rover Evoque 2019

2.2. Fundamentos de la Aerodinámica automotriz

2.2.1. Conceptos previos (resistencia al avance, sustentación, coeficientes aerodinámicos Cd y CL)

La aerodinámica automotriz es la disciplina que estudia como el aire, un fluido, interactúa con un vehículo en movimiento [7]. Su objetivo principal es comprender y entender las fuerzas que el aire ejerce sobre la carrocería para optimizar el rendimiento de dicho automóvil. Las dos fuerzas aerodinámicas fundamentales son la resistencia al avance (Drag) y la sustentación (Lift o Downforce) [8].

La **resistencia al avance (Drag)** es la fuerza que se opone al movimiento del vehículo a través del aire. Es una fuerza perjudicial que debe ser superada por el motor, impactando directamente en el consumo de combustible y la velocidad máxima. Esta resistencia se compone principalmente de la presión frontal (el aire empujado), el vacío trasero (la incapacidad del aire para llenar el "agujero" dejado por el vehículo) y la fricción de la capa límite (el rozamiento del aire con la superficie del coche) [9]. La resistencia aerodinámica aumenta con el cuadrado de la velocidad, lo que significa que, a velocidades elevadas, se convierte en el factor dominante en el consumo de energía del vehículo [10] [8].

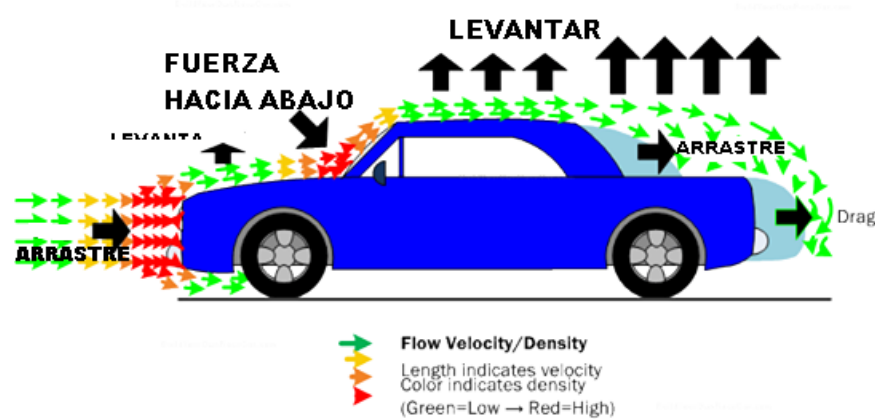


Figura 2-3: Aerodinámica de un vehículo

Para cuantificar estas fuerzas de manera estandarizada, se utilizan **coeficientes aerodinámicos adimensionales**:

- El **coeficiente de arrastre (Cx o Cd)**: Representa la resistencia al viento de un vehículo. Un valor de Cx más bajo indica una menor resistencia al aire y, por lo tanto, una mayor eficiencia aerodinámica. [6] Para la mayoría de los automóviles, el Cx se sitúa entre 0.28 y 0.35, mientras que para vehículos todoterreno puede variar entre 0.35 y 0.45. [10]

La Ecuación que se usará para calcular el coeficiente de arrastre será:

$$Cd = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 Af}$$

[11]

Donde:

- D = **Fuerza de arrastre** (calculada a través de la simulación aerodinámica)
- ρ = **Densidad del fluido** (aire)

- U = **Velocidad de flujo** (la velocidad determinada del automóvil)
- A_f = **Área frontal** del automóvil (calculada a través de la simulación aerodinámica)

Para ello se calculará a través de la simulación aerodinámica el parámetro D (drag) y el área frontal (A_f) del automóvil para una velocidad determinada U que será de 120 km/h.

Este coeficiente se determina tradicionalmente mediante pruebas en túneles de viento, pero, cada vez con mayor frecuencia, a través de simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). [12]

2.2.2. Importancia de la Aerodinámica en el Diseño y Rendimiento de Vehículos

Optimizar la Aerodinámica siempre ha sido un Pilar fundamental en cuanto al diseño de vehículos se refiere, con un impacto en una amplia variedad de factores como serían rendimiento y seguridad. Cada día más vemos en las noticias como las grandes empresas intentan mejorar la autonomía de sus vehículos, y es aquí donde la aerodinámica juega un papel fundamental. Concretamente un buen diseño aerodinámico puede traducirse directamente en:

- **Eficiencia en el consumo de combustible y autonomía:** Al reducir la resistencia al avance, El motor necesitará menos energía para mantener el vehículo en movimiento reduciendo así el consumo de combustible o la autonomía en el caso de los vehículos eléctricos. El efecto aerodinámico es proporcional a la velocidad del vehículo siendo por tanto notable a altas velocidades. En algunos casos puede representar hasta el 12% del consumo de combustible. [10].

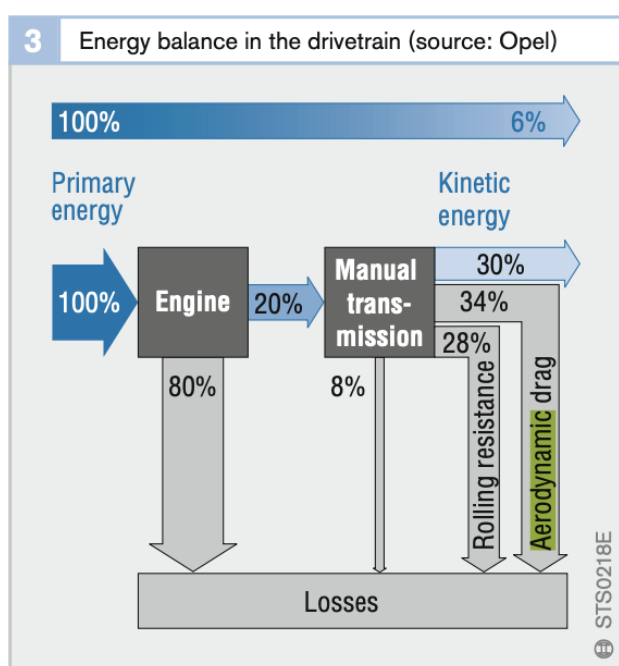


Figura 2-4 Energy balance in the drivetrain

- **Reducción de emisiones:** un menor consumo de combustible resulta directamente en una disminución de los gases emitidos a la atmósfera, como el CO₂ y otros gases de efecto invernadero, contribuyendo a preservar el ecosistema. [13]
- La aerodinámica contribuye también a mantener una **correcta estabilidad del vehículo**. Un buen diseño asegura que los neumáticos estén siempre en contacto con el asfalto gracias al downforce generado por la carrocería del vehículo. Esto se traduce en una mejor capacidad de frenado y maniobrabilidad, reduciendo así la probabilidad de tener un accidente. [7]
- **Confort acústico:** una carrocería aerodinámica disminuye el sonido que hace el viento al atravesarla mejorando el confort de los ocupantes. [14]

Para lograr todas estas mejoras, los fabricantes optan por diversas soluciones como el uso de curvas suaves la

reducción de protuberancias innecesarias y la integración de elementos como alerones o difusores como y componentes diseñados para controlar el flujo de aire a través del vehículo, retrasando la separación de la capa límite (fenómeno perjudicial a causa de la generación de turbulencias) y generando downforce, manteniendo el coche pegado al asfalto. [8]

2.3. Herramientas CAD para Modelado de Superficies en Automoción (CATIA V5 Imagine and Shape, Generative Shape Design, FreeStyle)

CATIA V5 es un software de diseño asistido por ordenador (CAD) de referencia mundial en la industria automotriz y aeronáutica, reconocido por sus potentes capacidades de modelado de superficies. [15] Para el diseño de carrocerías, se emplean varios workbenches de forma sinérgica, cada uno aportando funcionalidades específicas para lograr modelos de alta fidelidad y calidad.

- **Imagine & Shape:** Este módulo es el punto de partida fundamental para el modelado a partir de imágenes o planos. Permite importar imágenes 2D (blueprints o fotografías) y posicionarlas en el entorno 3D de CATIA. Estos bocetos hacen de referencia visual directa sobre la cual se construye la geometría 3D de la carrocería. Imagine and Shape facilita la interpretación de las imágenes en un entorno tridimensional, permitiendo a los diseñadores "trazar" los contornos del vehículo. [16] Esto se realiza gracias a trazar lo que se conoce como curvas de NURBS, una tecnología para representar una forma geométrica compleja sin perder suavidad, realizando una interpolación en base a ecuaciones paramétricas. [17]

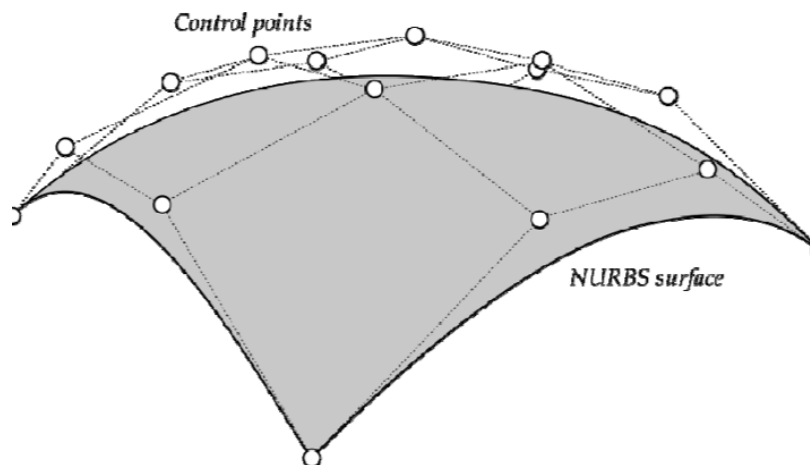


Figura 2-5: Curvas de NURBS

- **Generative Shape Design (GSD):** GSD permite construir geometrías alámbricas (puntos, líneas, splines 3D) que definen los esqueletos y las líneas de carácter de la carrocería. Sobre estas estructuras, se generan superficies complejas utilizando herramientas como Multi-Sections Surface, Sweep, Blend, etc. La clave de GSD reside en su control paramétrico, que permite modificar el diseño de manera flexible y asegurar la continuidad de curvatura (G2 o superior) entre las superficies. [17] [18] [20]

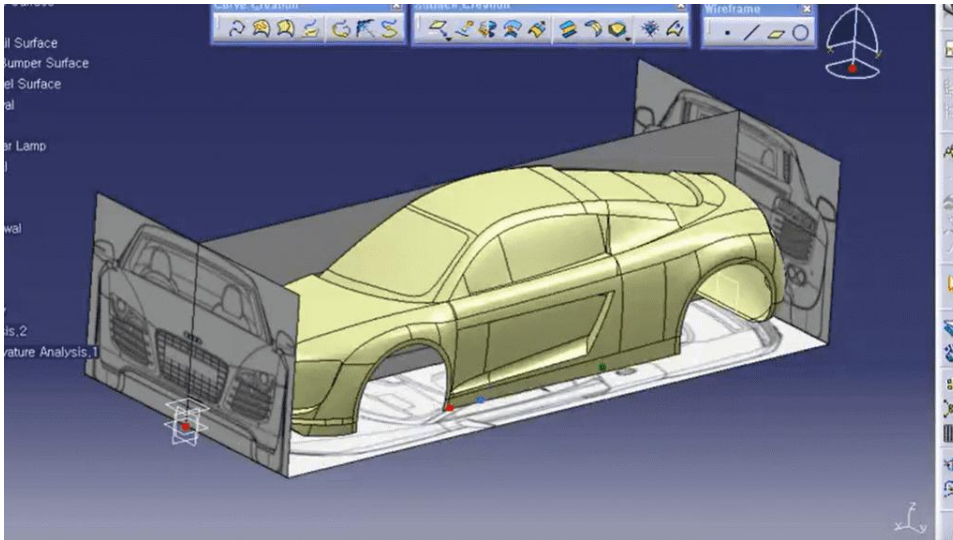


Figura 2-6: Geometrical Shape Design. Carrocería

- **Part Design:** Este workbench es el núcleo del modelado sólido paramétrico en CATIA, proporcionando herramientas esenciales para transformar bocetos 2D (Sketcher) en piezas 3D precisas y totalmente editables. Part Design destaca por su capacidad para generar geometrías complejas mediante operaciones como extrusiones, revoluciones, barridos y operaciones booleanas (uniones, cortes e intersecciones), lo que lo hace fundamental en el diseño de componentes mecánicos, moldes y ensamblajes industriales.

La sinergia entre Sketcher, Imagine and Shape, Part Design y Assembly Design es crítica para flujos de trabajo industriales. [19] [20] [21] [24]

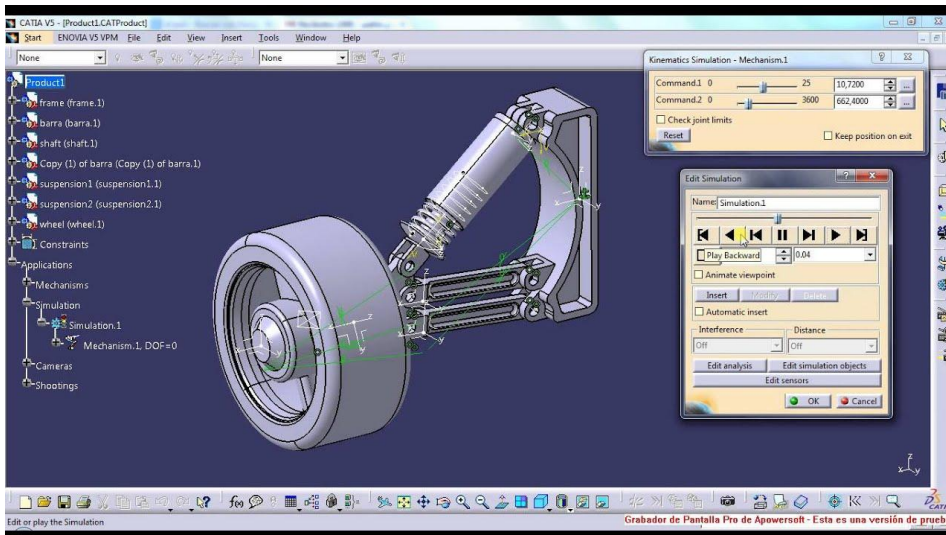


Figura 2-7: Part Design Catia. Rueda

2.4. Dinámica de fluidos computacional (CFD) en la industria automotriz

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta numérica muy importante en la industria moderna ya que nos permite simular y analizar el movimiento de fluidos como el aire y su interacción con objetos en un entorno virtual. En la industria automotriz, el CFD ha revolucionado el proceso de diseño aerodinámico, complementando y, en muchas etapas, sustituyendo las costosas pruebas físicas en túneles de

viento que pocas empresas tiene el lujo de poseer. [1]

El proceso de una simulación CFD se puede estructurar en tres fases principales:

2.4.1. Preproceso

En esta primera etapa lo que se hace básicamente es importar el modelo geométrico en formato “STEP” ya que es el modelo de importación compatible entre los diferentes softwares. Posteriormente, gracias al modulo “Flow simulation” de SolidWorks, podemos hacer una simulación CFD de manera muy intuitiva.

A continuación, se define el “dominio fluido”, que es definir el volumen de aire objeto de estudio. Posteriormente se divide el “dominio fluido” en millones de celdas formando una malla. Cuanto mas se refine esta malla, de mas calidad será, y, por tanto, mejores resultados se obtendrán en la simulación. Finalmente, se configuran las condiciones de la simulación, incluyendo las propiedades del fluido (aire), la velocidad del vehículo y las condiciones de contorno (por ejemplo, la velocidad del aire de entrada). [1] [25]

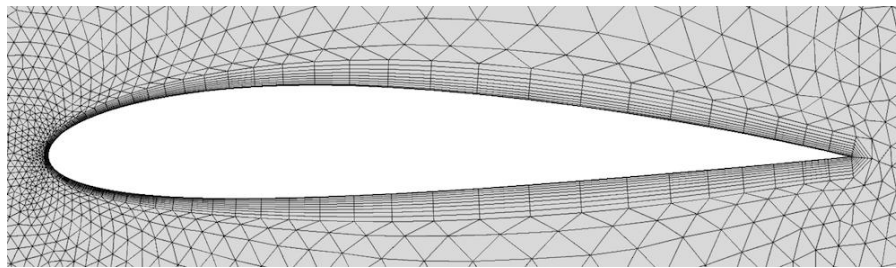


Figura 2-8: Mallado de un perfil

2.4.2. Cálculo y Postproceso

En esta fase, el software CFD resuelve numéricamente las ecuaciones matemáticas que rigen el movimiento de los fluidos, principalmente las ecuaciones de Navier-Stokes, para cada celda de la malla. Este proceso es iterativo, lo que significa que la solución se refina progresivamente en cada paso hasta alcanzar un estado de convergencia, donde los cambios entre iteraciones son mínimos. La duración de esta fase puede variar desde horas hasta días, dependiendo de la complejidad del modelo y la capacidad computacional. [1] [25] [27]

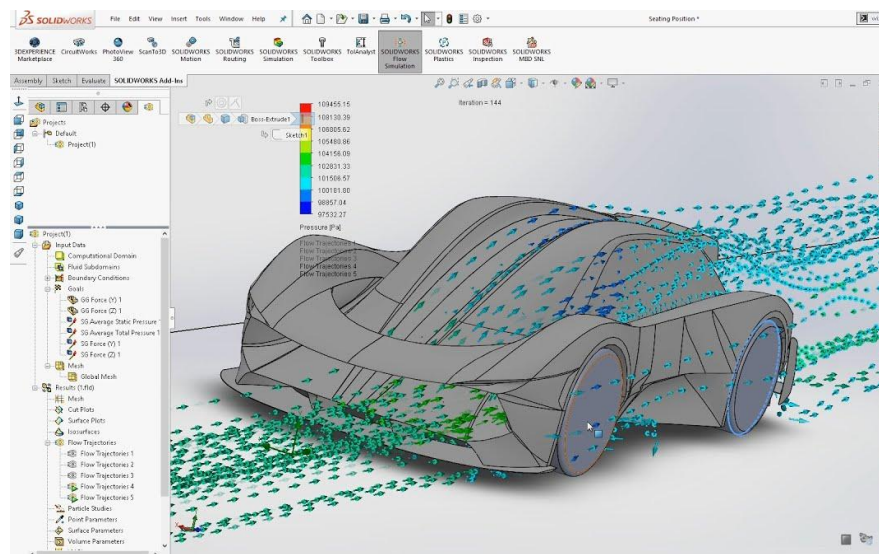


Figura 2-9: CFD car simulation

Una vez completado el cálculo, se interpretan y visualizan los vastos volúmenes de datos generados (presión, velocidad, densidad en cada punto de la malla). El software permite generar mapas de presión (“Surface plots”) y velocidad, crear líneas de corriente para visualizar los patrones de flujo de aire alrededor y a través del vehículo, identificar zonas de desprendimiento o recirculación del flujo, y cuantificar las fuerzas aerodinámicas clave como la resistencia (drag). [1] [28]

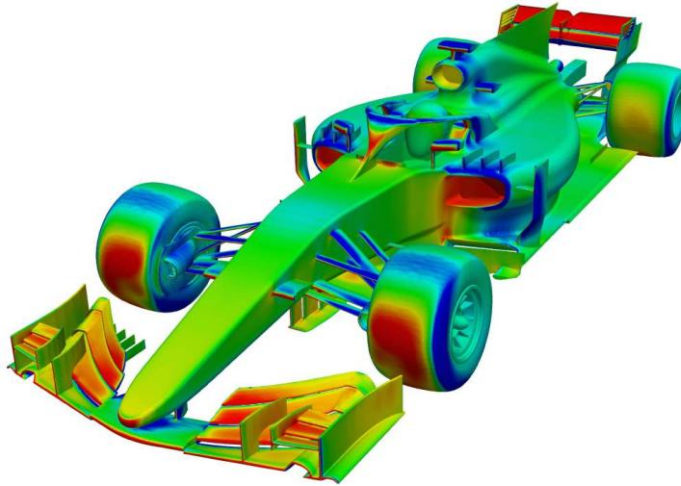


Figura 2-10: CFD car simulation, II

Las ventajas del CFD son múltiples: permite evaluar rápidamente numerosas iteraciones de diseño sin necesidad de construir prototipos físicos, lo que reduce significativamente los costos y el tiempo de desarrollo. Además, a diferencia de las pruebas en túnel de viento, que proporcionan datos en puntos específicos, el CFD ofrece información detallada sobre el comportamiento del aire en cada punto del modelo simulado, facilitando un análisis más profundo de fenómenos complejos como la turbulencia y sin necesidad de aumentar la velocidad del aire por hacer modelos a escala o construir modelos a tamaño real.

2.5. Compromisos de Diseño en la Ingeniería Automotriz (Aerodinámica vs. Seguridad Peatonal, Espacio Interior y Factores Económicos)

El diseño automotriz es un proceso bastante complejo y que implica un equilibrio entre múltiples aspectos que a veces son contradictorios entre sí. Un diseño “óptimo” pocas veces significa maximizar un único atributo ya que debemos tener en cuenta que hay otros atributos que a menudo son contradictorios, por lo que si 1 aumenta disminuye el otro. Por tanto, la misión de los diseñadores es encontrar un punto medio entre estética funcionalidad y seguridad. La aerodinámica, aunque juega un papel fundamental dentro de la estética y la funcionalidad no entra dentro del campo de la seguridad peatonal y por tanto se va a ver afectada al intentar y optimizar y encontrar un equilibrio óptimo entre todas las variables [14].

2.5.1. Aerodinámica vs. Espacio Interior

Sabemos que la forma ideal para disminuir la resistencia aerodinámica se asemeja a una “gota de agua” o una “cola Kammback”, Que son formas caracterizadas por una parte trasera que es estrecha o se corta abruptamente para controlar el flujo y disminuir la estela del objeto. Sin embargo, vemos intuitivamente cómo estas formas aerodinámicas pueden tener un impacto perjudicial en el espacio interior del vehículo, ya que si la parte trasera del vehículo se estrecha abruptamente repercutirá directamente tanto en el espacio para los ocupantes traseros como en la capacidad de carga del maletero [14] [9] [27].



Figura 2-11: Prototipo de vehículo con forma de gota de agua

Para nuestro Range Rover Evoque 2019 (Teóricamente más aerodinámico que el Land Rover Defender 2008):

- Un diseño tipo "gota" reduciría el volumen del maletero (>30%), incompatible con la demanda de **capacidad de carga (≥ 580 L)** y **espacio para pasajeros** que define a los SUVs.
- La **altura libre al suelo (≥ 200 mm)**, esencial para capacidad *off-road*, genera turbulencia bajo el chasis. Carenados parciales (usados en el Evoque) mitigan, pero no eliminan este *trade-off*.
- **Resultado práctico:** Un Cd de **0.36** (excelente para un SUV) se logra mediante deflectores traseros y sellado de bajos, **sin sacrificar espacio** [22] [23].

2.5.2. Aerodinámica vs. Seguridad Peatonal

Un aspecto crucial en el diseño de vehículos es buscar la seguridad del peatón. Esto a menudo requiere características de diseño como capós más altos y blandos. Un capó más alto y un frontal menos inclinado aumenta el área frontal del vehículo y también el número de aristas vivas de este, resultando en un incremento de la resistencia aerodinámica.

Adicionalmente el capó de un Range Rover Evoque 2019 está diseñado para dejar un hueco adicional de unos 10 cm, permitiendo una deformación controlada en el caso del impacto de una cabeza de peatón Y cumpliendo así con la normativa **EURONCAP** [24].

De nuevo vemos como la ingeniería de diseño es un arte donde el resultado óptimo es un balance entre requisitos procedentes de diferentes áreas [25] [26].

2.5.3. Otro factor Crítico: Coste-Beneficio Económico y Técnico

La búsqueda de una aerodinámica extrema ($Cd < 0.30$) en SUVs tropieza con límites económicos y técnicos, por lo tanto, Las empresas deciden preguntarse cuáles son las preferencias del consumidor, ya que, al fin y al cabo, un coche no deja de ser un producto de una empresa, por lo que tiene que ser rentable:

- **Inversión desproporcionada:** lograr mejoras marginales en el Cd (ej. 0.01-0.02) requiere miles de iteraciones CFD y validación en túnel de viento [27] [28].
- **Identidad de marca:** La silueta robusta y vertical es un atributo comercial para SUVs premium. Un diseño "afilado" perdería a consumidores que asocian volumen y líneas rectas con lujo, estética y seguridad.

El factor determinante reside en las preferencias del consumidor, que priorizan atributos incompatibles con la optimización aerodinámica. Las encuestas revelan que los compradores anteponen elementos como la presencia visual, el espacio interior y la identidad de marca a la eficiencia aerodinámica.

Los SUVs modernos como el Range Rover Evoque 2019 ($Cd=0.36$) ejemplifican la ingeniería de compromiso: maximizan eficiencia dentro de márgenes delimitados por las demandas comerciales (espacio, estética), seguridad legal y viabilidad económica. Lograr un Cd cercano a 0.25 (como el Tesla Model X) requeriría sacrificar su esencia off-road y elevar el coste hasta niveles inviables. La "gota de agua" ($Cd=0.04$) sigue siendo

un ideal teórico incompatible con la realidad automotriz [29].

3 METODOLOGÍA

Esto es una cita al principio de un capítulo.

- El autor de la cita -

En este apartado se detallará el procedimiento utilizado para el modelado y el análisis aerodinámico de ambos vehículos, explicando paso a paso a modo de tutorial los pasos necesarios para lograr realizar de manera exitosa el modelado de una carrocería en CATIA V5 y su posterior análisis aerodinámico en Solid Works.

3.1. Modelado 3D de carrocerías con CATIA V5

3.1.1 Land Rover Defender 2008

3.1.1.1 Recopilación de planos y datos de referencia

La fase inicial de modelado requiere una recopilación exhaustiva de datos geométricos para ambos vehículos, fundamental para garantizar la precisión en la simulación CFD.

Para el Range Rover Evoque, se buscarán planos técnicos detallados que incluyan vistas ortogonales (frontal, lateral, superior, trasera) y, preferiblemente, secciones transversales. Este proceso se complementará con fotografías de alta resolución tomadas desde ángulos controlados para capturar con exactitud la curvatura compleja de sus paneles, los detalles de la carrocería y los sellados entre componentes. Las dimensiones clave que se recopilarán, basadas en las especificaciones oficiales del fabricante, incluyen [30] :

- Largo: 4371 mm
- Ancho (sin espejos): 1967 mm
- Alto: 1649 mm
- Distancia entre ejes: 2681 mm
- Batalla: 2681 mm

La amplia disponibilidad de información técnica del Evoque, al ser un modelo contemporáneo y aún en producción, facilita enormemente esta etapa. Se consultarán recursos técnicos oficiales de Land Rover y posiblemente software de ingeniería especializado para obtener los planos necesarios.

Para el Land Rover Defender 2008, la estrategia de recopilación de datos es radicalmente diferente debido a la naturaleza de su diseño y a su ya discontinuada producción. La disponibilidad de planos técnicos de ingeniería precisos y oficiales es limitada. Este escenario exige una gestión meticulosa de datos, recurriendo a una combinación de fuentes diversas:

Dimensiones clave publicadas: Se utilizarán las dimensiones oficiales del Land Rover Defender 90 Td4 Station Wagon del año 2008 [31]:

- Largo total: 3922 mm
- Ancho total: 1790 mm
- Altura máxima: 2018 mm (con suspensión standard)
- Distancia entre ejes (Batalla): 2360 mm
- Altura libre al suelo: 245 mm

Imágenes de referencia de alta calidad: Se recopilarán fotografías de archivo y de unidades existentes, tomadas desde múltiples ángulos. Esta documentación visual es crucial para reconstruir con precisión los detalles de su forma angular, los voladizos, la geometría del parabrisas y los pasos de rueda.

Estimaciones de coeficiente de arrastre (Cx): Dada la dificultad para encontrar un valor oficial certificado, se utilizarán valores estimados de vehículos de similar tipología y filosofía de diseño. Un valor citado comúnmente para el Land Rover Defender de esta generación es de 0.59 [32] [33], el cual refleja su forma de "cuerpo romo" (bluff body), con un frente plano y una aerodinámica no prioritaria. Este valor servirá como punto de contraste para validar las simulaciones.

3.1.1.2 Creación de planos con "Sketch Tracer"

Una vez hecho este trabajo de búsqueda se procede a introducir las imágenes en Catia V5 gracias al modulo Sketch Tracer, usando en concreto la función de "Immersive Sketch". Bastante intuitiva y fácil, pero aquí se deja un ejemplo:

1. **Inicio de Sketch Tracer:** Dentro de CATIA V5, se accederá al workbench Sketch Tracer navegando a Start > Shape > Sketch Tracer.

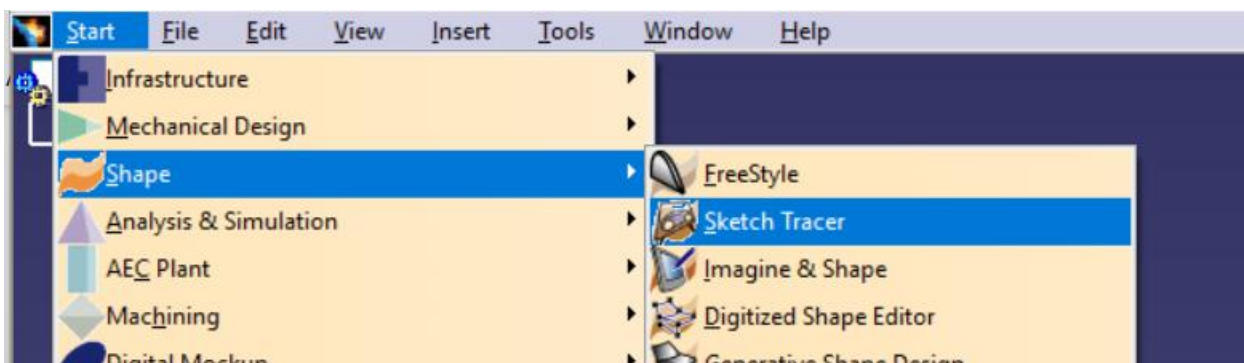


Figura 3-1: Inicio de "Sketch Tracer"

2. **Creación de Immersive Sketch:** Se utilizará la herramienta Create an Immersive Sketch para importar las imágenes de referencia (archivos JPEG) correspondientes a cada vista ortogonal del vehículo (frontal, lateral, superior, trasera). Cada imagen se importará individualmente.

Optimizado

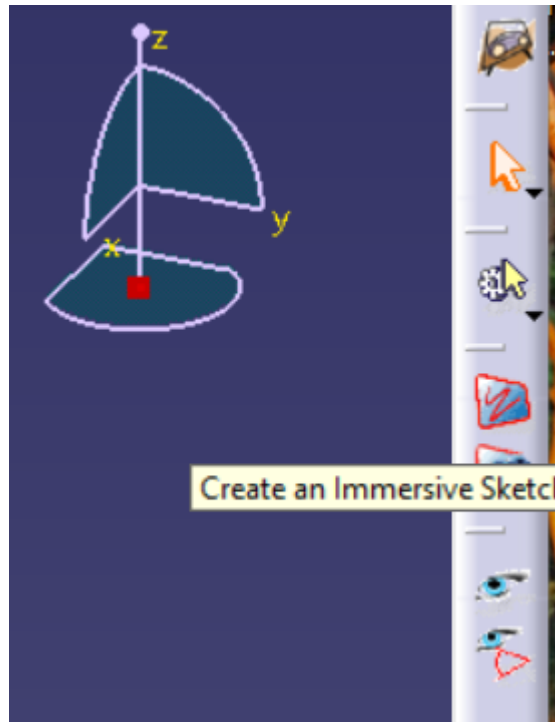


Figura 3-2: Create an Immersive Sketch

3. **Ajuste de Vistas:** Para cada imagen importada, se seleccionará el tipo de vista adecuado (por ejemplo, vista frontal para la imagen frontal) desde el menú correspondiente. Esto asegura que la imagen se alinee correctamente con los planos de referencia del entorno 3D.



Figura 3-3: Ejemplo de vista

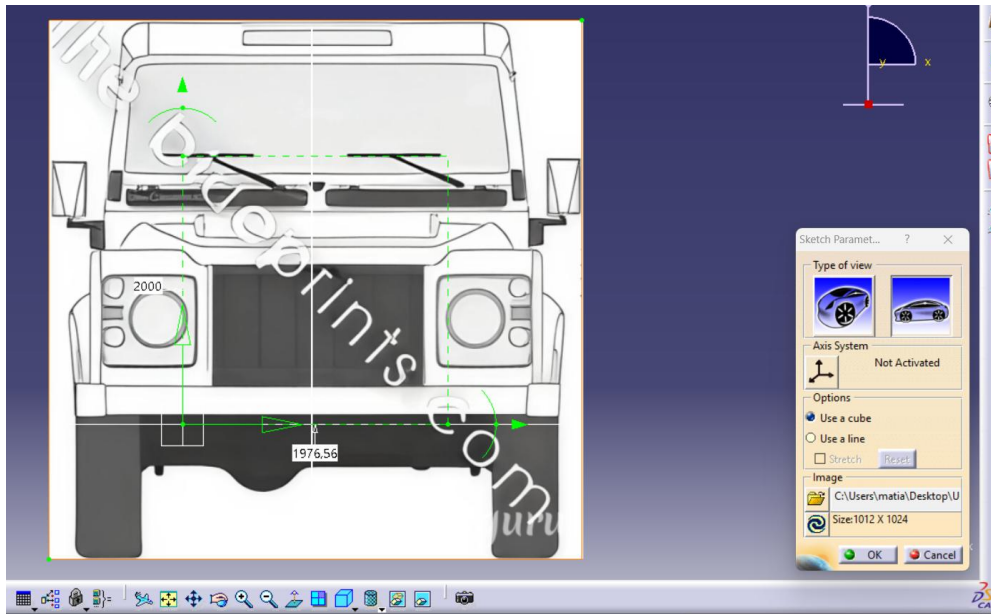


Figura 3-4: Ejemplo de ajuste de vistas

4. **Posicionamiento y Alineación:** Una vez escaladas, se repositionará cada "Immersive Sketch" en el espacio 3D. Esto implica mover y rotar los bocetos para asegurar una alineación perfecta entre las diferentes vistas. Por ejemplo, la línea del suelo en la vista lateral debe coincidir con la de la vista frontal, y los ejes de simetría deben estar perfectamente alineados. La herramienta permite arrastrar flechas para repositionar el boceto según los requisitos.
5. **Preparación para Modelado:** Con todos los bocetos correctamente alineados y escalados, el proceso de Sketch Tracer se considera completado. El siguiente paso será Insert > New Part para iniciar el modelado de la carrocería en un nuevo archivo de pieza, utilizando estos bocetos como guías visuales para la creación de la geometría 3D. Este enfoque garantiza que la geometría construida se base directamente en las proporciones y contornos del vehículo real. [16]

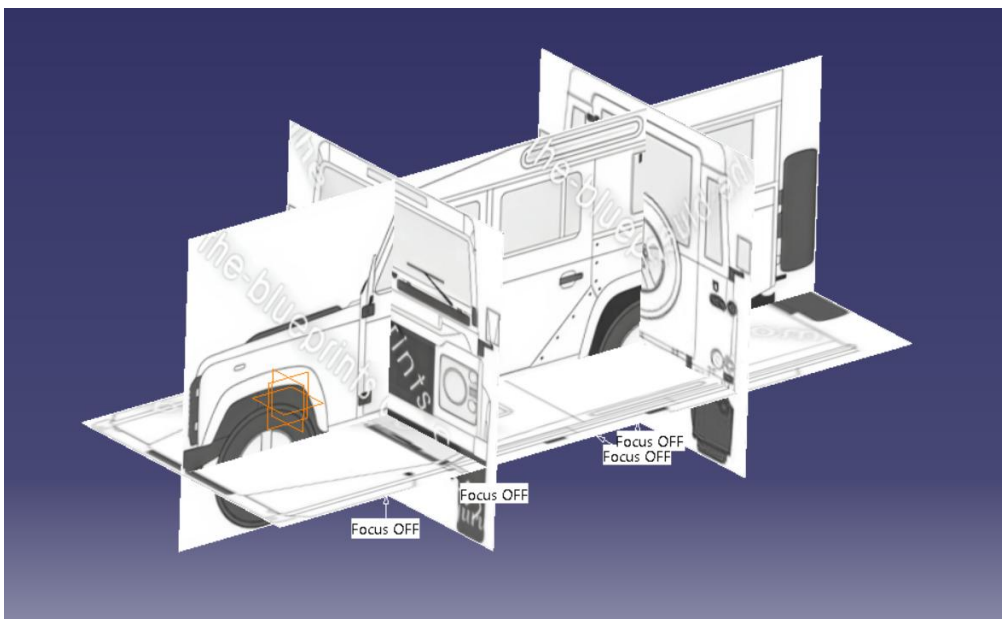


Figura 3-5: Vista general "Sketch Tracer Catia V5"

3.1.1.3 Proceso detallado de modelado con Imagine and Shape

Se procede ahora con el grosor del modelado, que se realizará en el módulo de "Imagine & Shape". Con la ayuda de las imágenes importadas y, Como dice su propio nombre, un poco de imaginación, se realizará de manera relativamente sencilla el modelado de esta carrocería.



Figura 3-6: "Imagine & Shape"

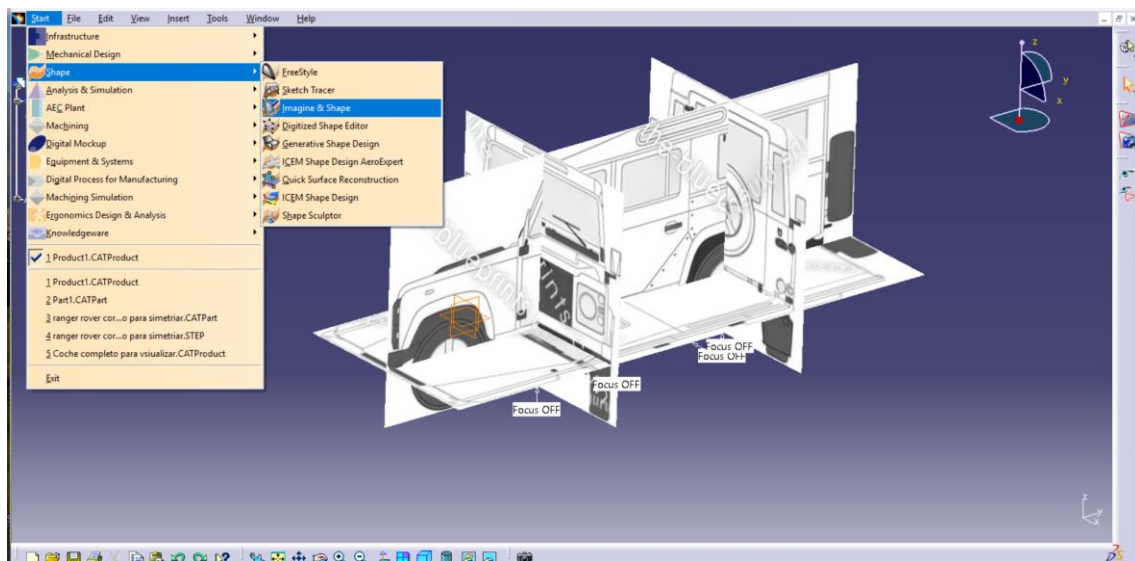


Figura 3-7: "Imagine & Shape" vista general

Una vez seleccionada esta opción se nos abrirá la interfaz completa del módulo, con todas las herramientas

necesarias para realizar un correcto modelado de la carrocería del vehículo.

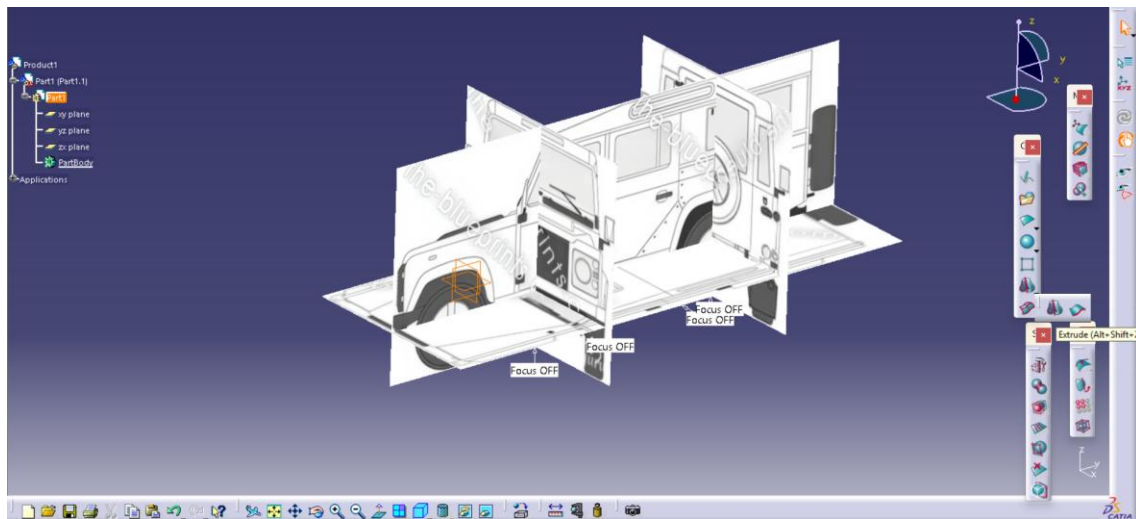


Figura 3-8: Interfaz principal "Imagine & Shape"

El primer paso para comenzar el modelado consiste en crear un boceto (una línea) sobre unos de los planos importados. En dicho boceto se dibuja el perfil 2D de la geometría inicial. Una vez definido el perfil, se utiliza el comando "Extrude" para otorgarle espesor y generar el primer sólido en el entorno de modelado 3D, a partir del cual se continuará desarrollando la pieza.



Figura 3-9: Comando "Extrude"

Para entender mejor esta aplicación se muestra un ejemplo en el techo del vehículo. Se puede apreciar cómo siguiendo la arista del techo se obtiene en 3D una cara en la posición marcada.



Figura 3-10: Aplicación comando "Extrude"

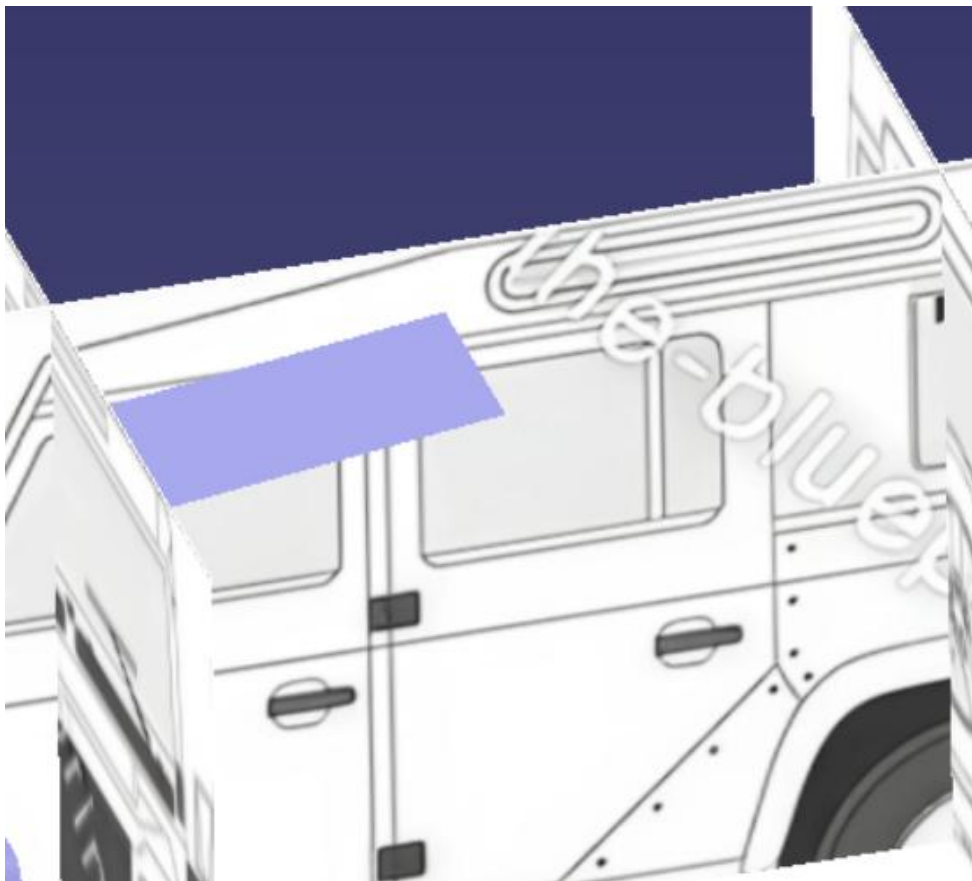


Figura 3-11: Aplicación comando "Extrude"

Otro comando muy importante, es el comando "Extrusion". Una vez creada la primera cara, este comando prolonga esa cara en la dirección que desees, creando nuevas caras que se unen a la original. Algo a destacar de esta función es que, si se seleccionan al mismo tiempo dos caras, Catia creará una cara nueva con forma de transición entre ambas.

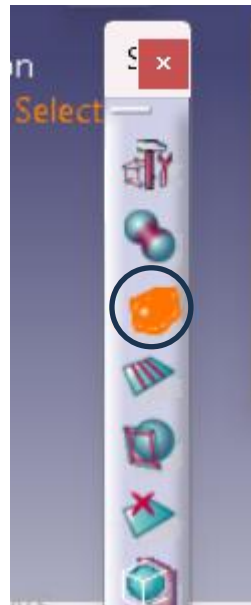


Figura 3-12: Icono de "Extrusion"

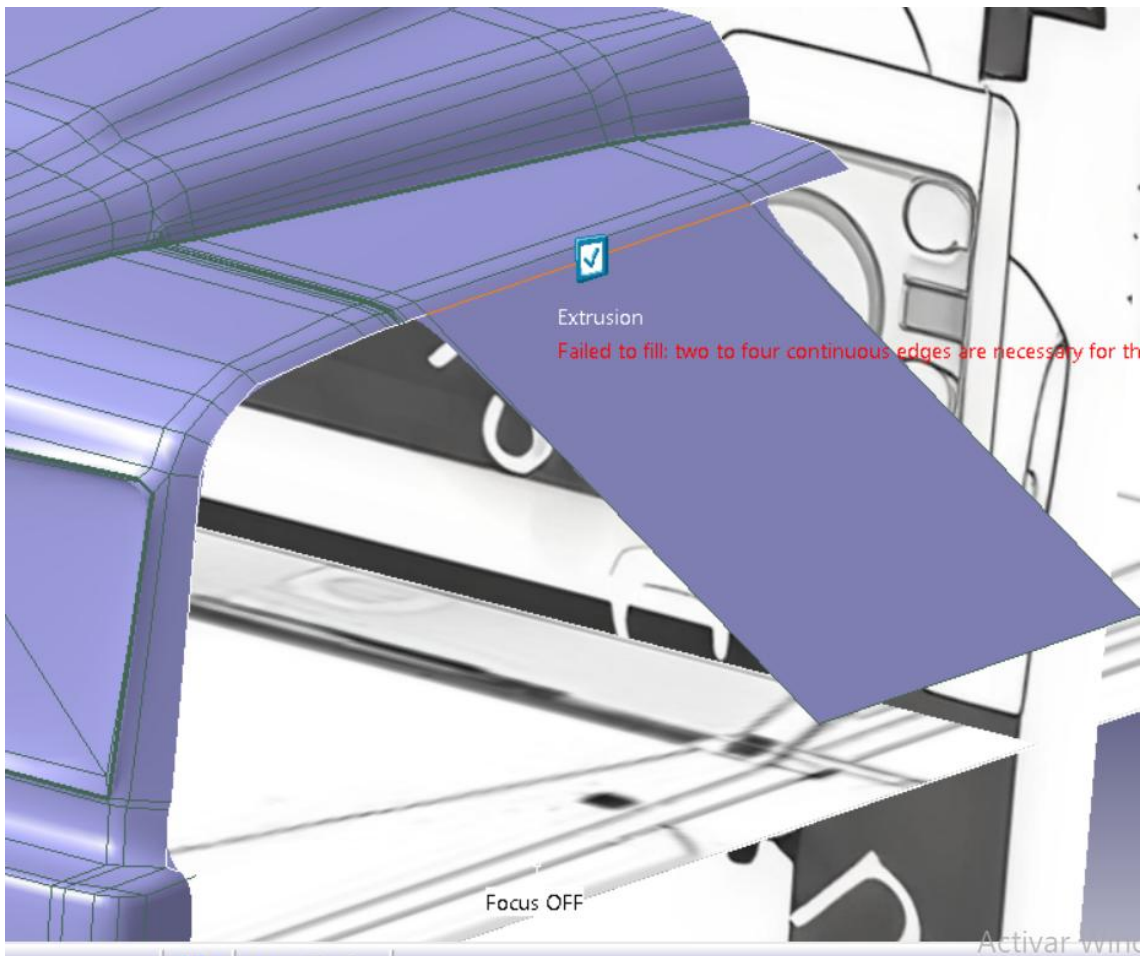


Figura 3-13: Ejemplo de aplicación de "Extrusion"

Una vez creada esa nueva cara, lo siguiente que se tiene que hacer, es posicionarla, y para ello se usa el comando “modification”, el cual sencillamente se encargará de situar correctamente los vértices de la cara gracias a unos ejes coordenados.

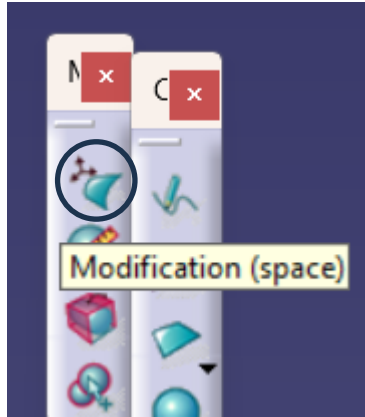


Figura 3-14: Icono de “Modification”

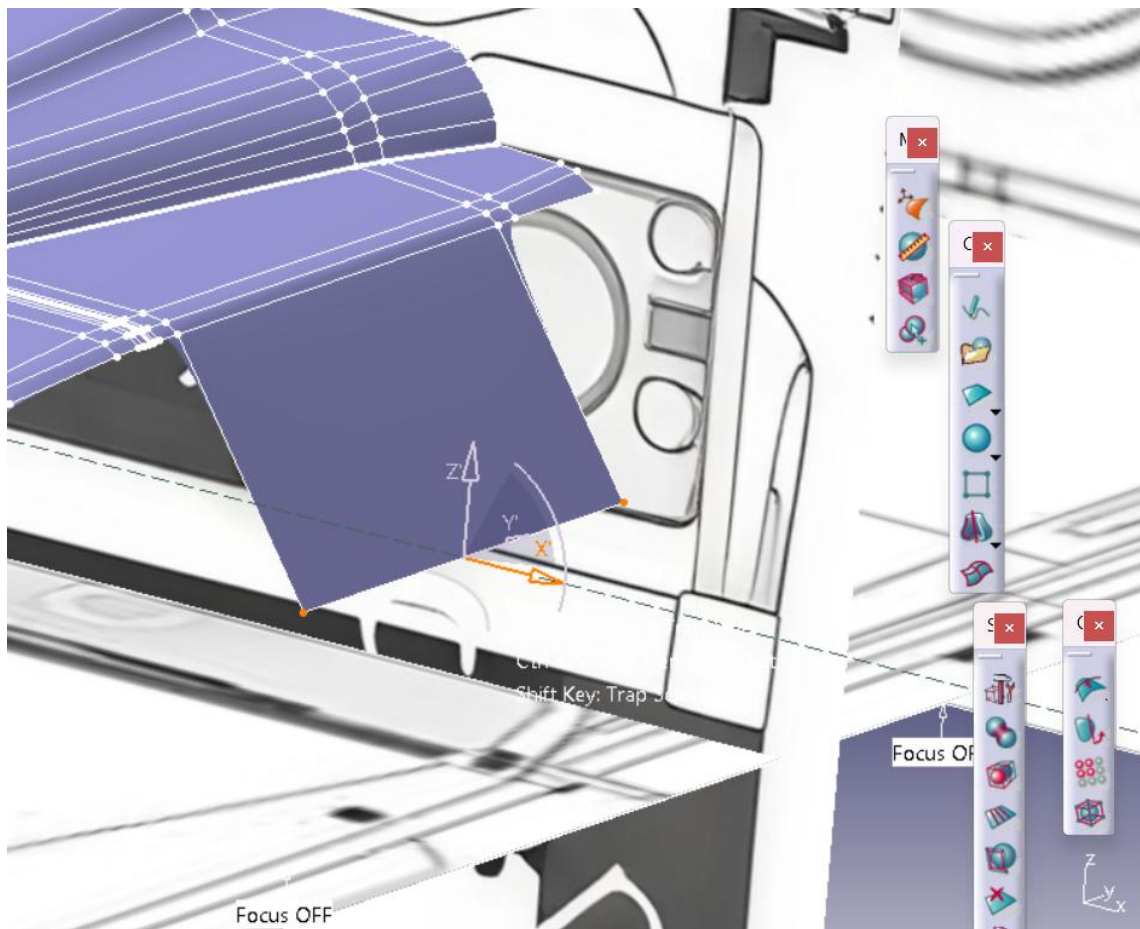


Figura 3-15: Ejemplo de aplicación del comando “Modification”

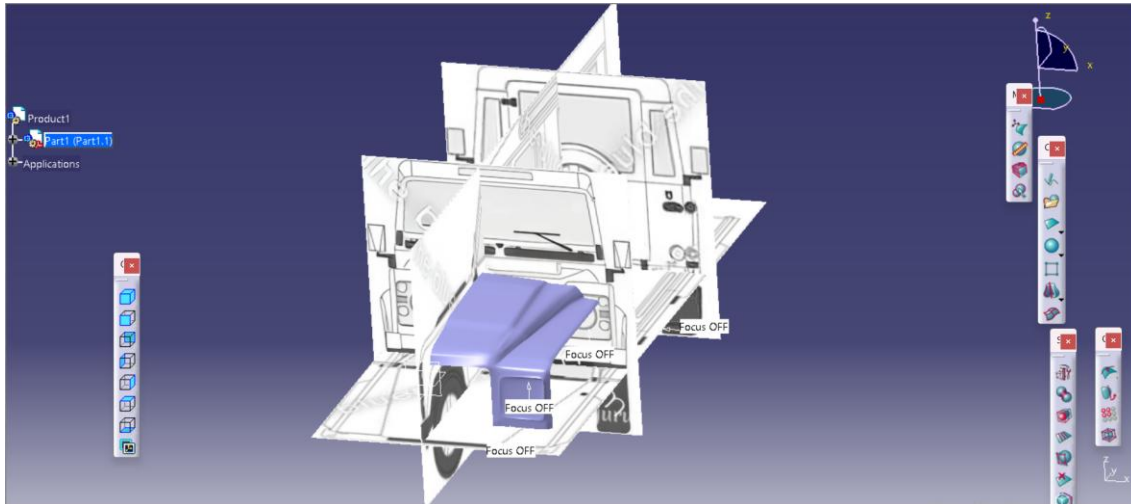


Figura 3-16: Boceto del morro del vehículo

Otra función muy interesante es la de “attraction”, la cual permitirá deformar la superficie cercana al vértice o arista en este caso alejando la voz cercándola en función de lo que se desee. Es tan fácil como seleccionar las aristas a las que se le quiere aplicar esta herramienta, y seleccionamos el nivel de atracción que queremos aplicar.

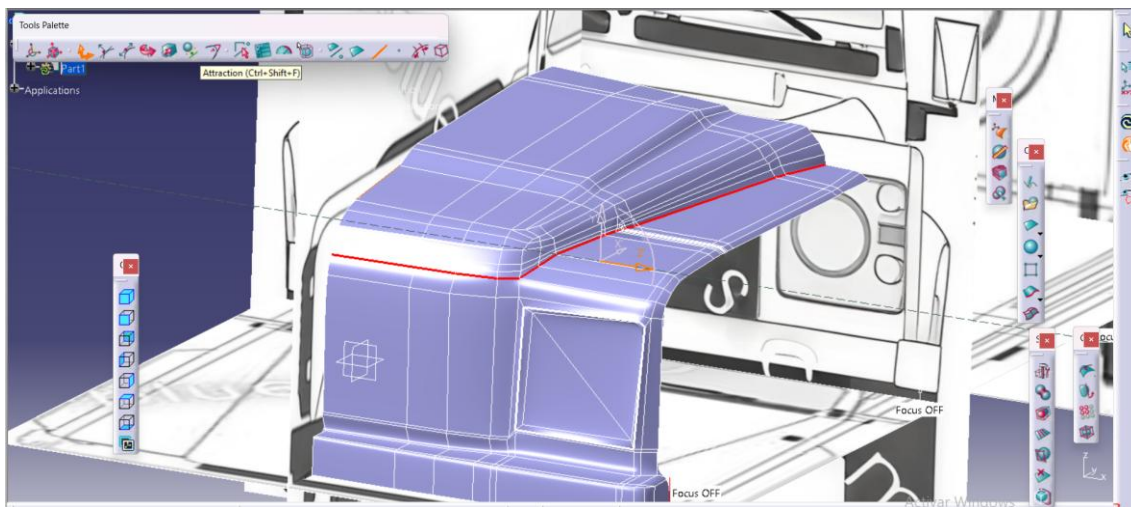


Figura 3-17: Comando "Attraction"

Optimizado

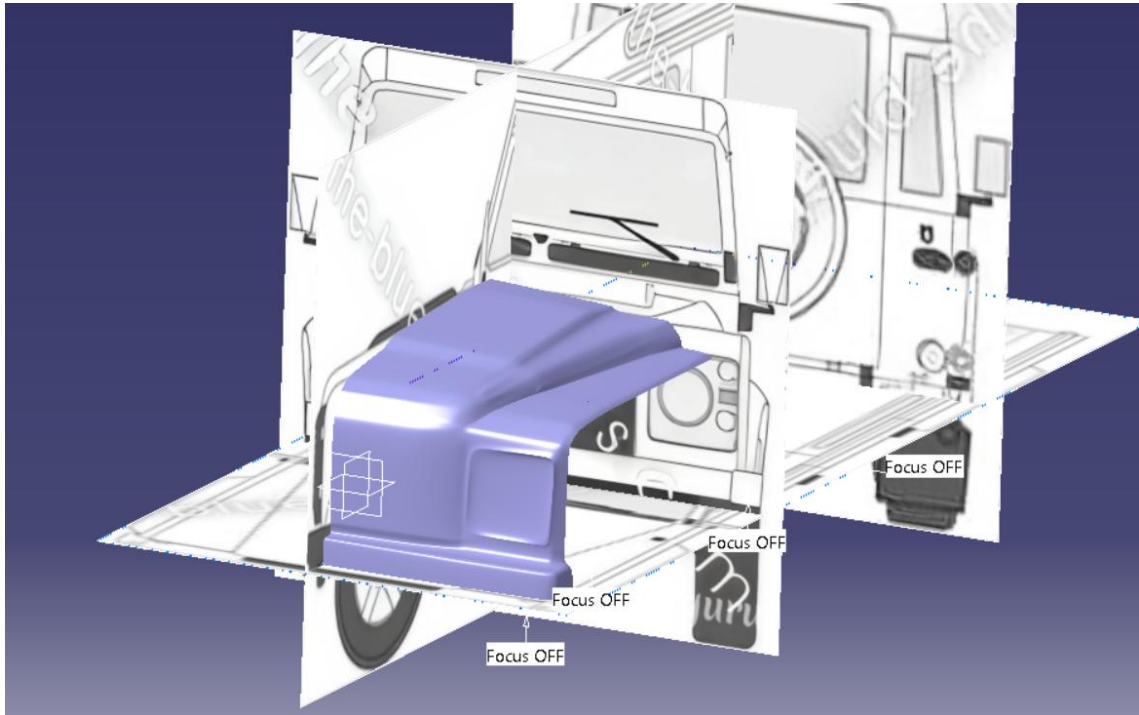


Figura 3-18: Resultado de aplicar "Attraction"

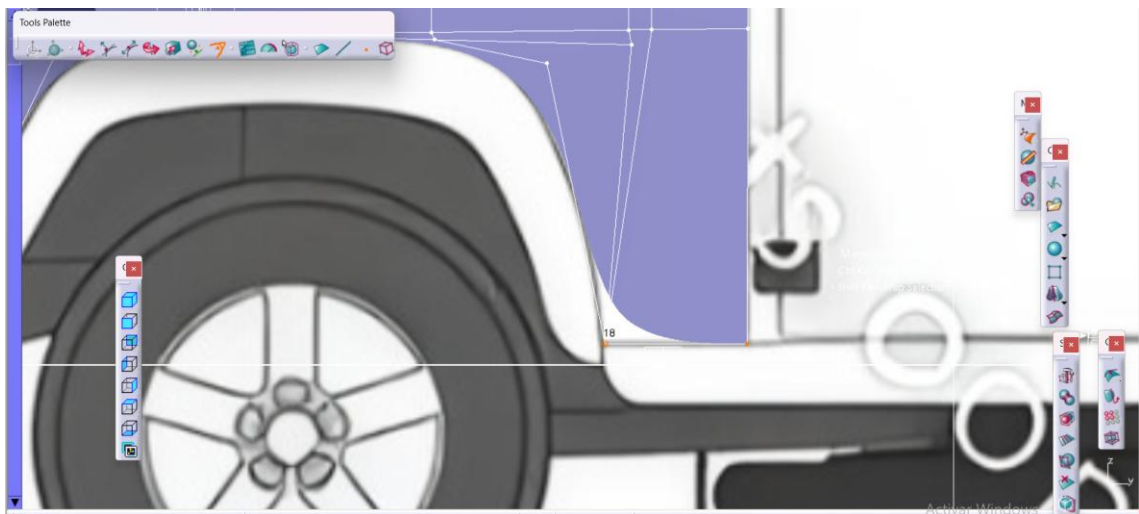


Figura 3-19: Aplicación de "Attraction" en vertice

Vemos como al aplicar la función “attraction”, el boceto se pega más al vértice que hemos seleccionado como origen del “attraction”.

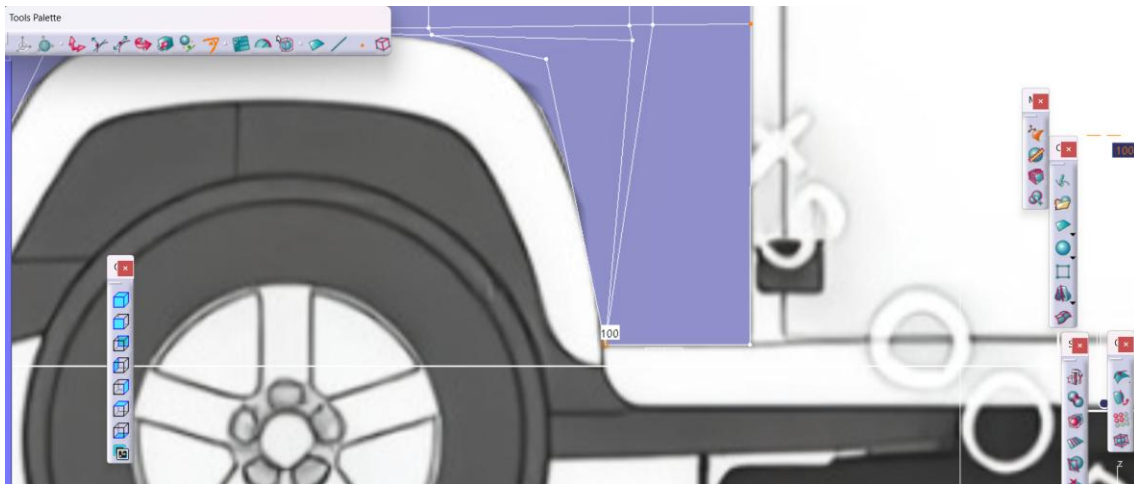


Figura 3-20: Aplicación de "Attraction" en vertice, resultado

Se siguen usando las herramientas ya mencionadas hasta llegar a la siguiente geometría.

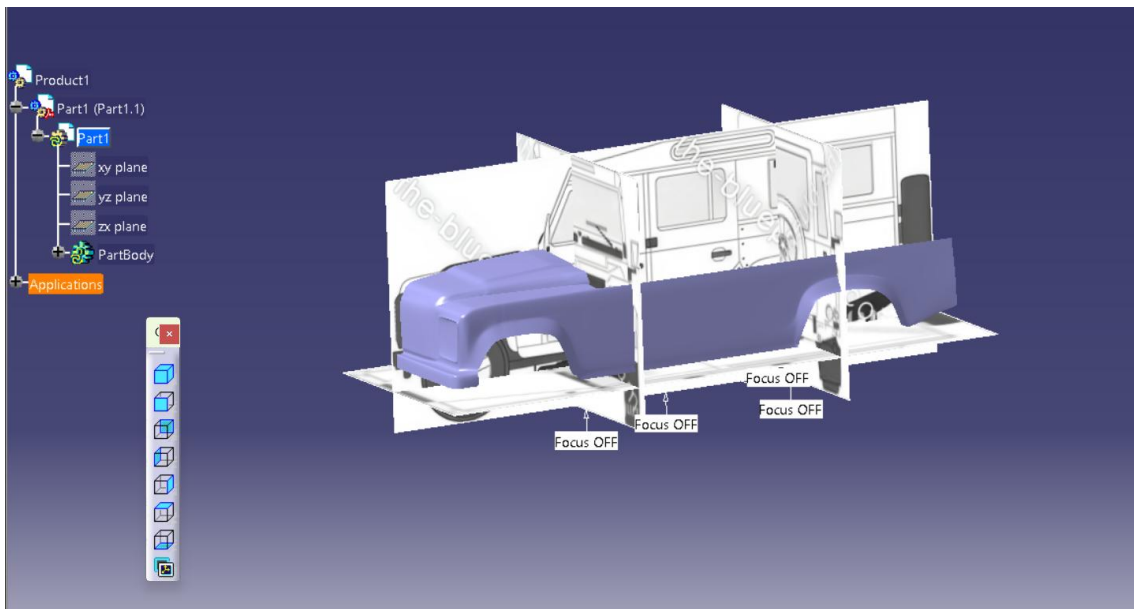


Figura 3-21: Boceto lateral del vehículo

Si en algún momento se tuviese alguna duda en alguna parte confusa de la carrocería o que a partir de los 3 planos no quede muy clara la solución, se usará como apoyo las siguientes perspectivas del coche.



Figura 3-22: Boceto de apoyo I [34]



Figura 3-23: Boceto de apoyo II [34]

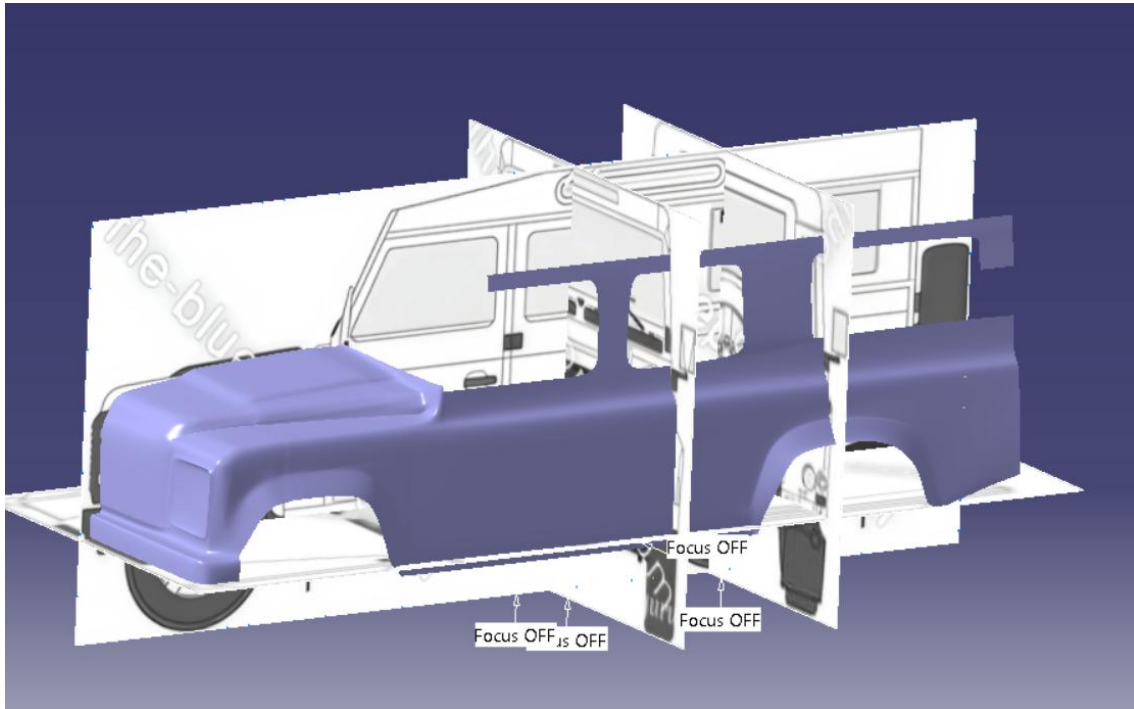


Figura 3-24: Boceto carrocería parte lateral, ventanillas

Para inducir mayor detalle a algunas partes de la carrocería, se usará la herramienta "Face Cutting", la cual subdividirá el elemento seleccionado, ya sea arista o plano, en tantas partes como deseemos. A continuación, se procede con un ejemplo de cómo se puede usar esta herramienta.



Figura 3-25: Herramienta "Face cutting"

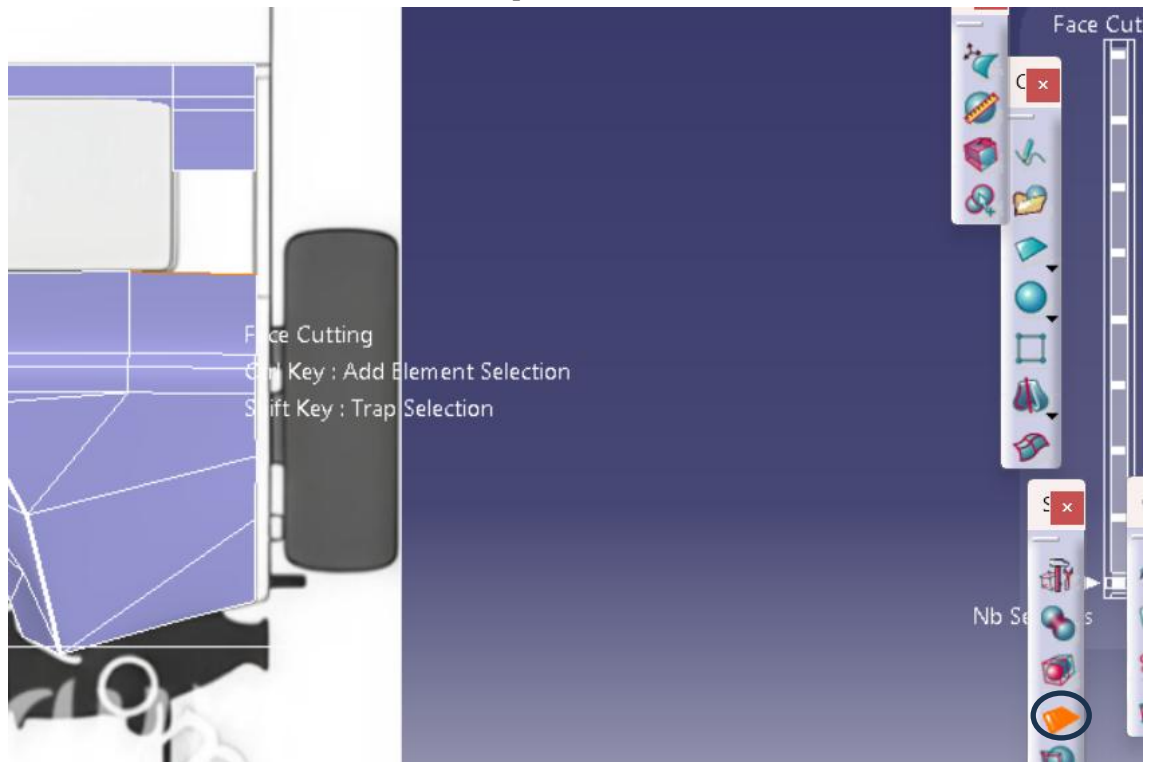


Figura 3-26: Ejemplo de aplicación de herramienta "Face Cutting" I

Primero se selecciona el icono de la herramienta, y posteriormente la arista que queremos dividir. En este caso, se aplica sobre una arista de la ventanilla del vehículo.



Figura 3-27: Ejemplo de aplicación de herramienta "Face Cutting" II

Algo muy interesante de esta herramienta, es que también permite elegir el punto en el que subdividir la arista.

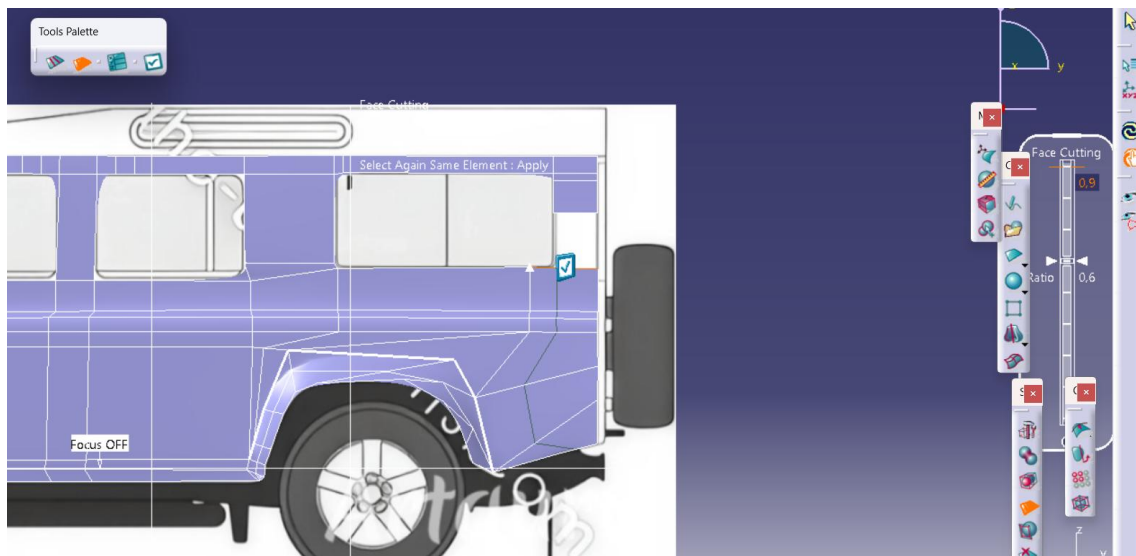


Figura 3-28: Ejemplo de aplicación de herramienta "Face Cutting" III

Una vez así, es tan fácil como aplicar un “Extrusion” a las dos caras abiertas de la ventanilla.



Figura 3-29: Ejemplo de aplicación de herramienta "Extrusion" en la ventanilla I

Se va a volver a aplicar “Extrusion” pero ahora a toda la ventanilla, poniendo de manifiesto la potencia y sencillez de esta herramienta. Simplemente con seleccionar todas las aristas que formaban el marco de la ventanilla, Catia crea una superficie que une todas las aristas.

Optimizado

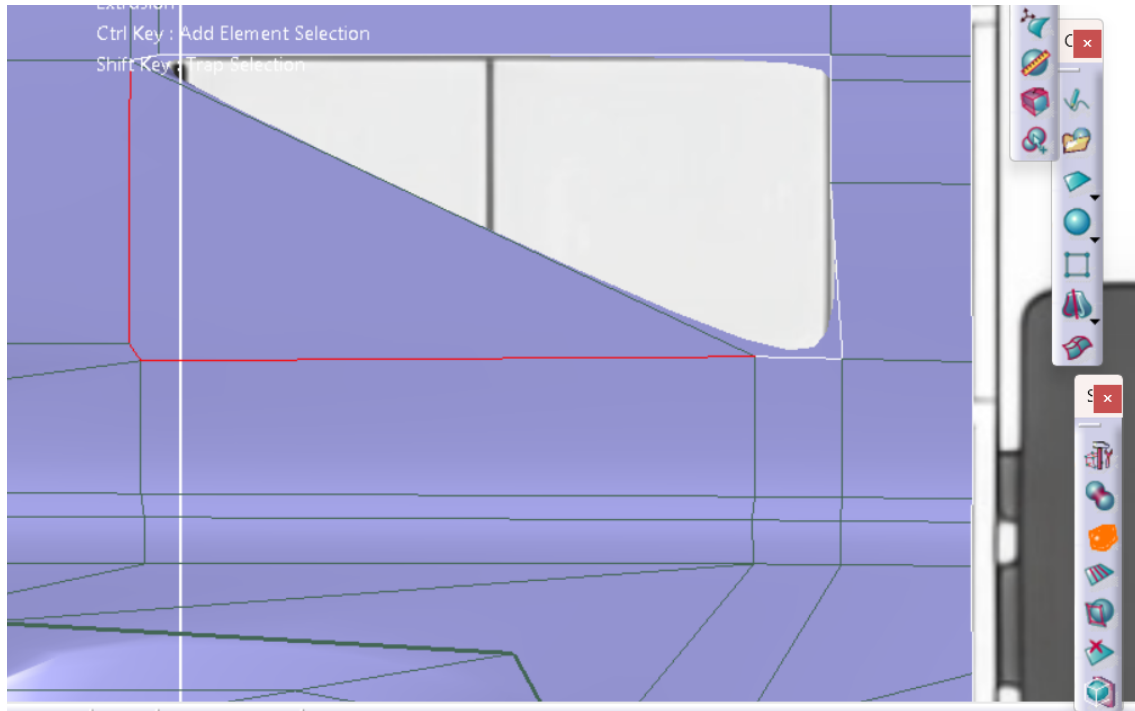


Figura 3-30: Ejemplo de aplicación de herramienta "Extrusion" en la ventanilla II

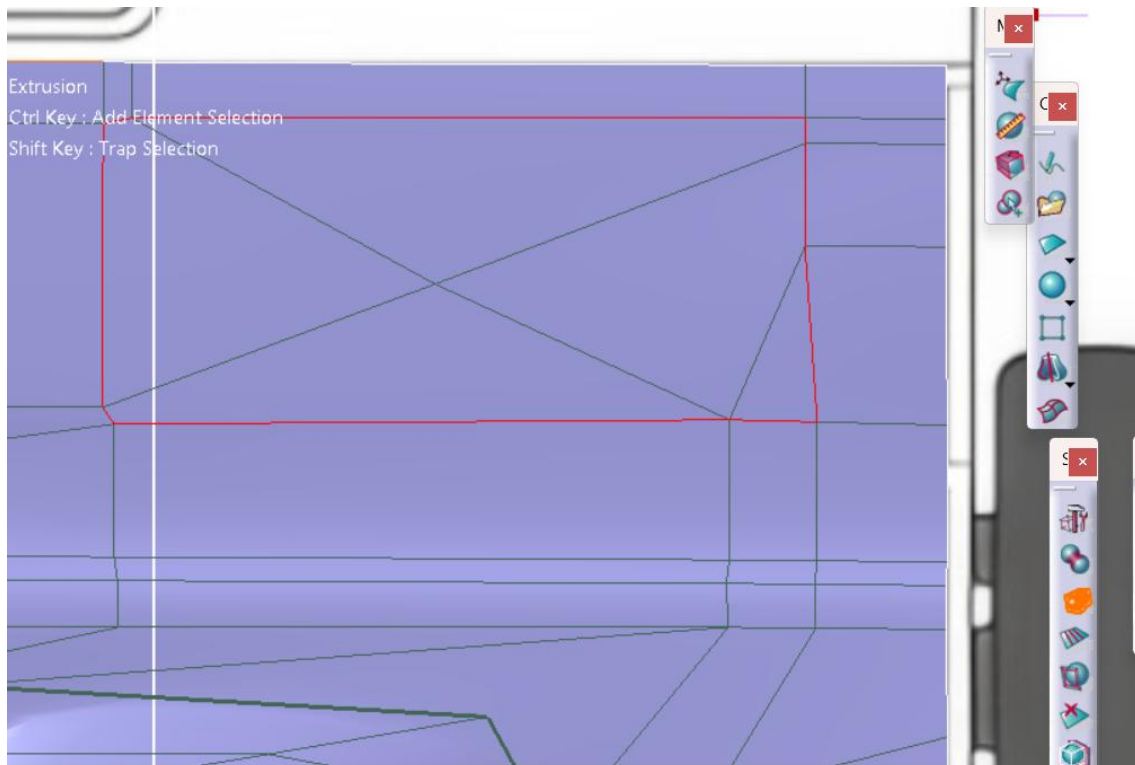


Figura 3-31: Ejemplo de aplicación de herramienta "Extrusion" en la ventanilla III

Ahora, se combina la herramienta "Face Subdivision" para seleccionar todas las caras que forman la ventanilla y crear una subdivisión de la ventanilla, creando una especie de marco. Con la herramienta "Modification" se le da profundidad a este marco en dirección normal al plano de la ventanilla creando una sensación de profundidad.

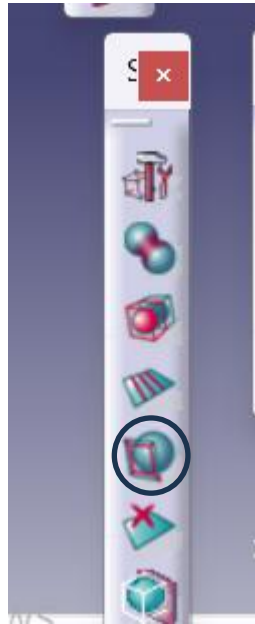


Figura 3-32: Herramienta "Face Subdivision"

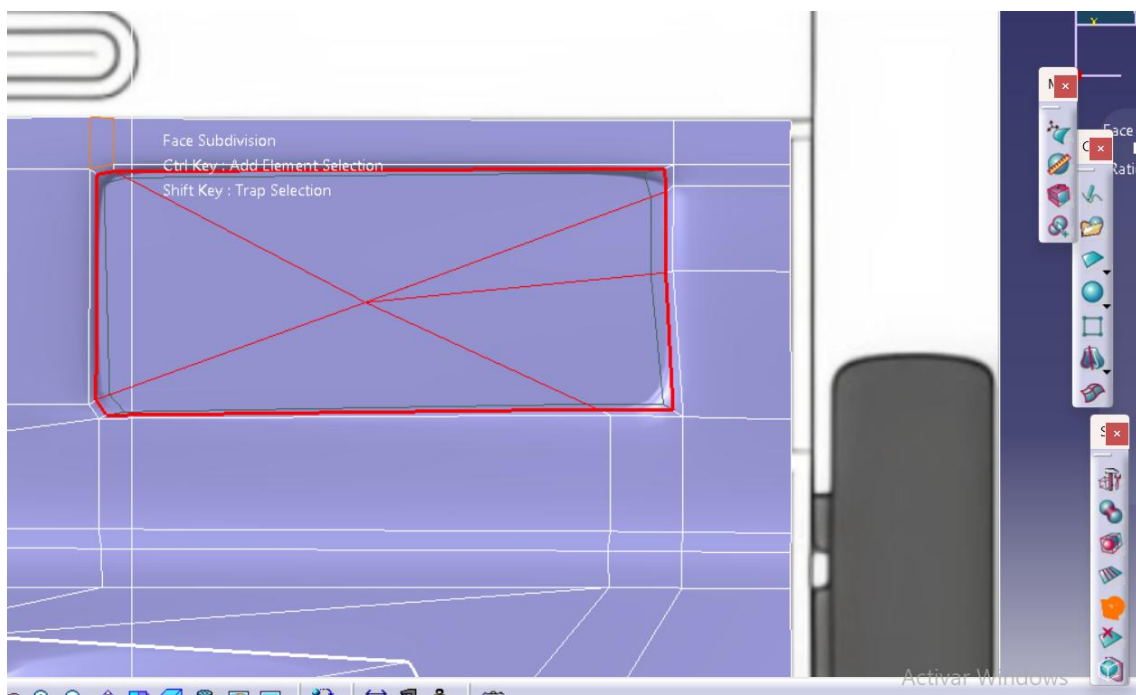


Figura 3-33: Ejemplo de aplicación de herramienta "Modification" en la ventanilla

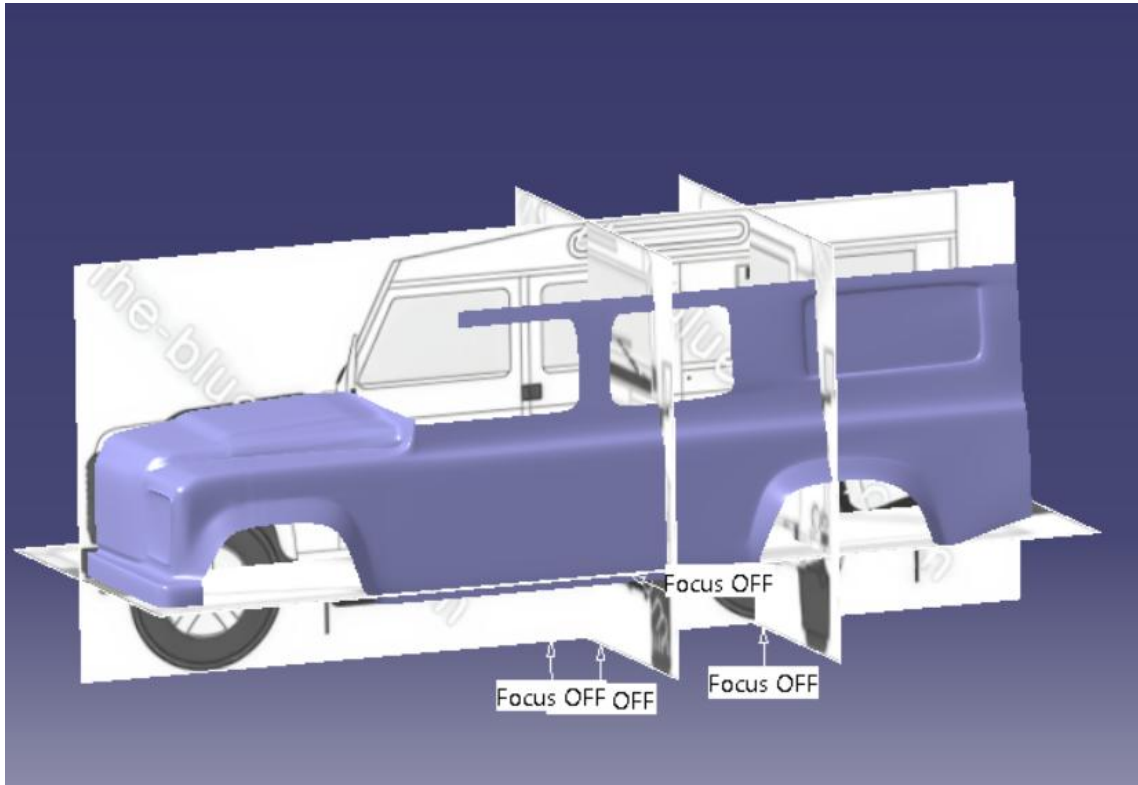


Figura 3-34: Resultado ventanilla lateral trasera

Se va a repetir el proceso con las otras dos ventanillas, usando las herramientas "Extrusion", "Face subdivision" y "Modification" de nuevo.

Al igual que en el paso anterior, se utilizan las aristas que definen el contorno del marco de la ventanilla para generar una superficie. Con la herramienta *Extrude*, se crea una superficie de transición que conecta las geometrías exteriores y permite continuar el modelado de la pieza.

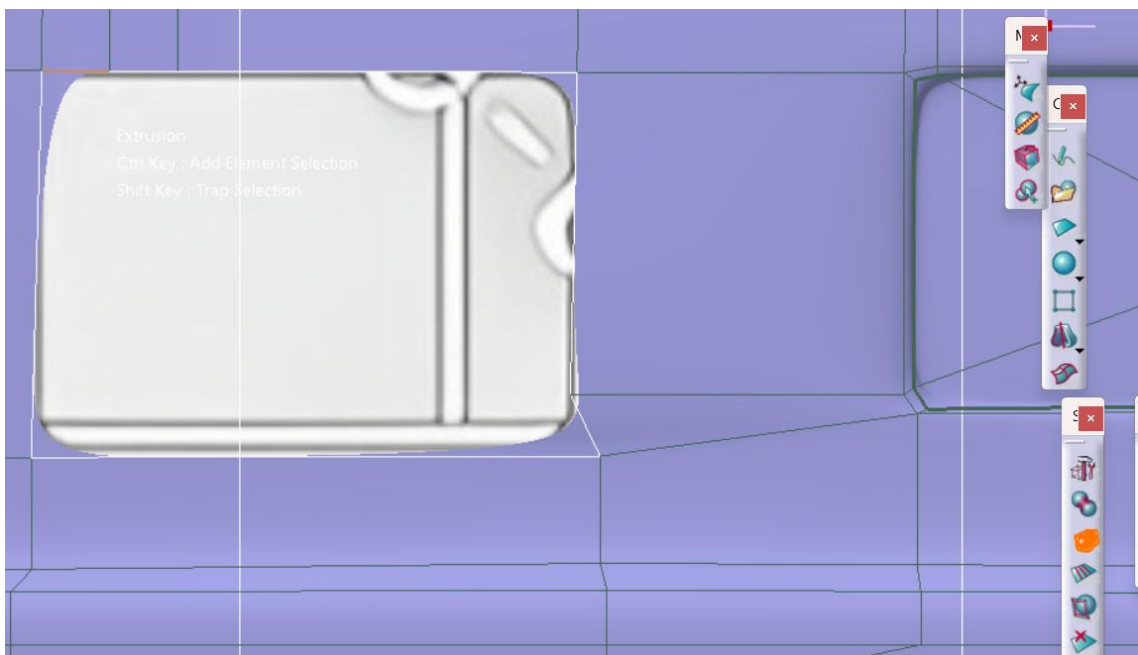


Figura 3-35: Ejemplo de aplicación de la herramienta "Extrusion" en la ventanilla lateral central I

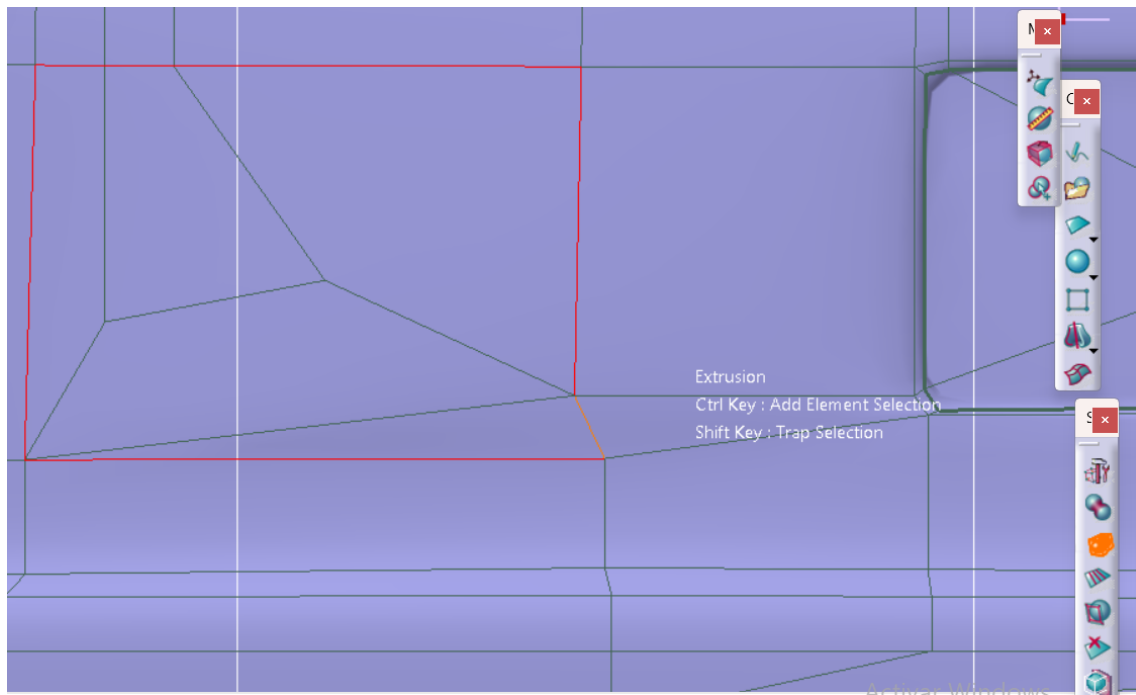


Figura 3-36: Ejemplo de aplicación de la herramienta "Extrusion" en la ventanilla lateral central II

Ahora gracias a la herramienta "Face Subdivisión", se subdivide la ventanilla para formar un doble marco exterior, al que dar profundidad para proporcionar un efecto más realista.

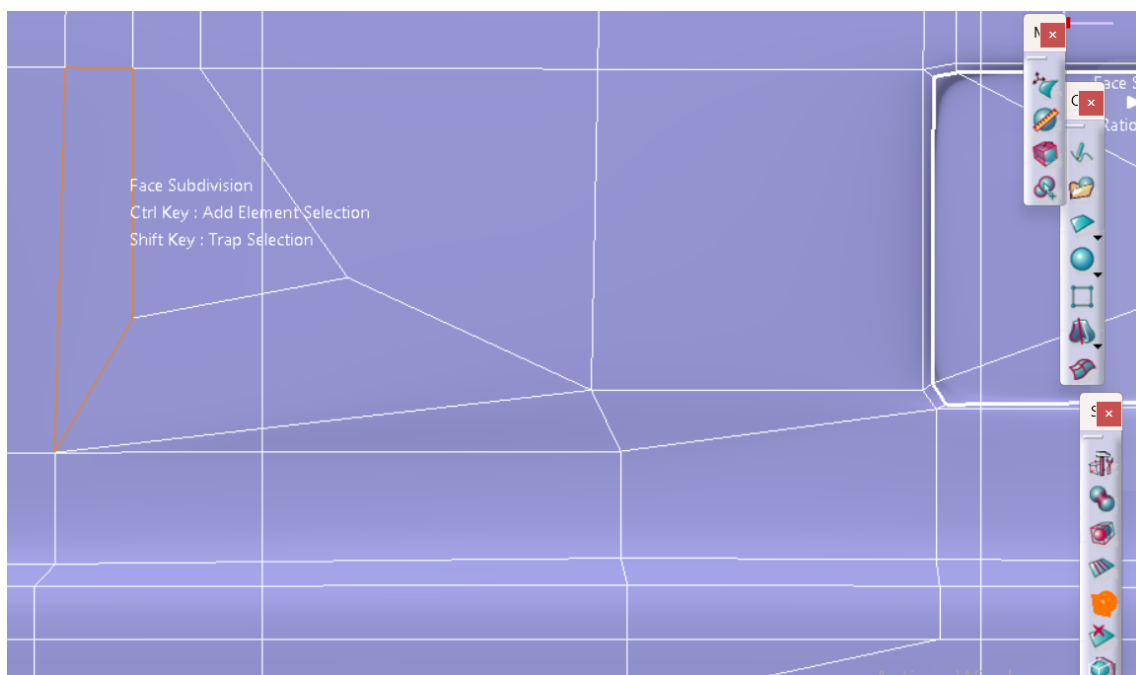


Figura 3-37: Ejemplo de aplicación de la herramienta "Face Subdivision" en la ventanilla lateral central

Así gracias a las herramientas "Face Subdivisión" y "Modification", se consigue dar un efecto realista de profundidad a la ventanilla central

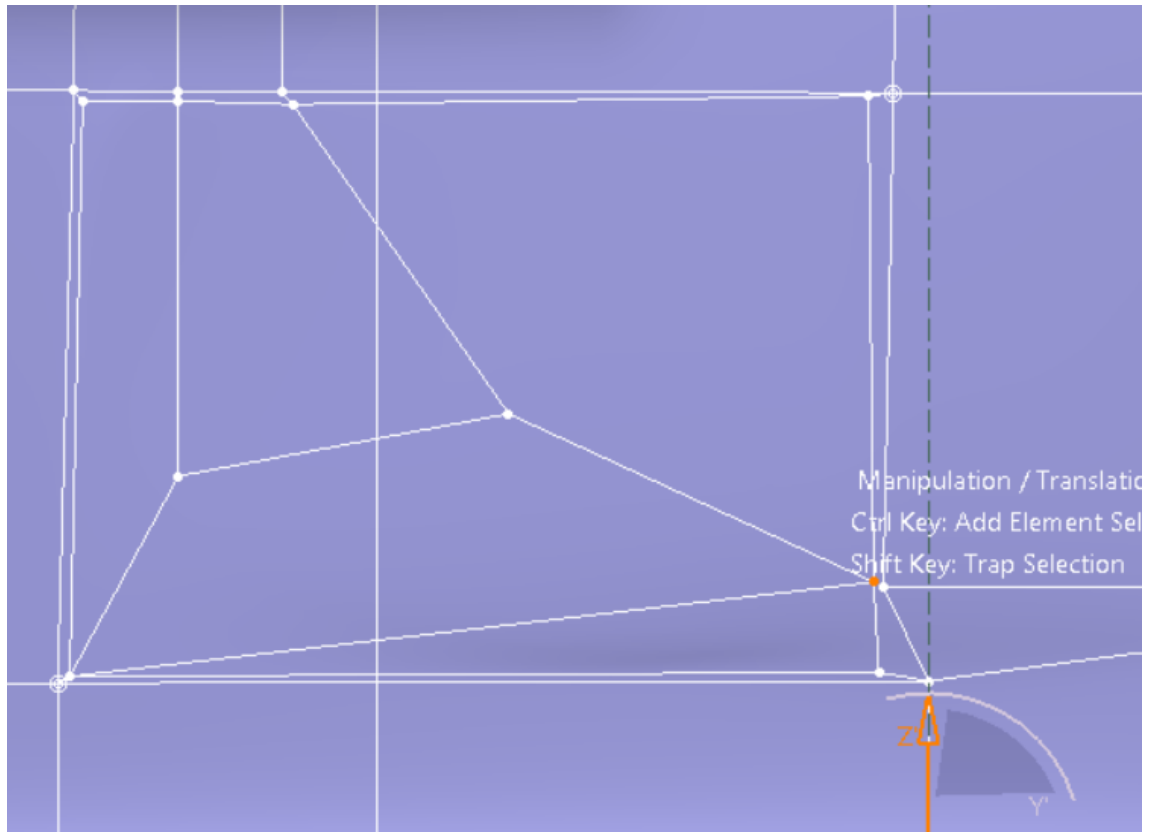


Figura 3-38: Ejemplo de aplicación de la herramienta "Face Subdivision" en la ventanilla lateral central

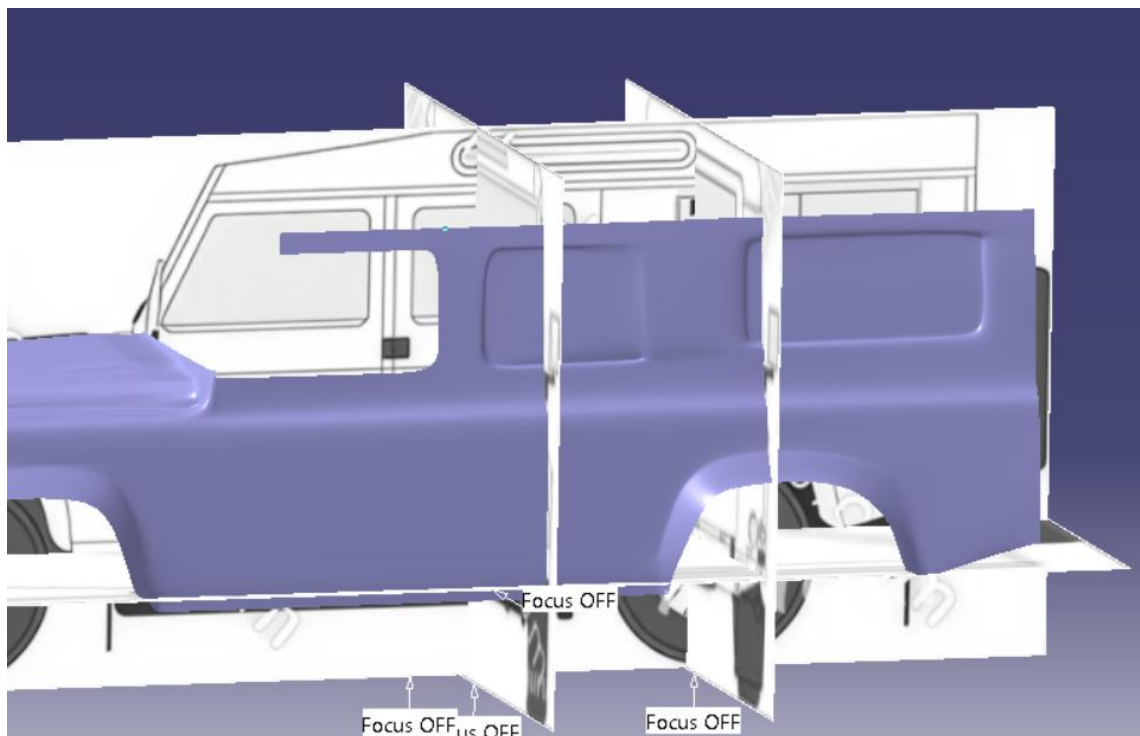


Figura 3-39: Resultado ventanilla lateral central

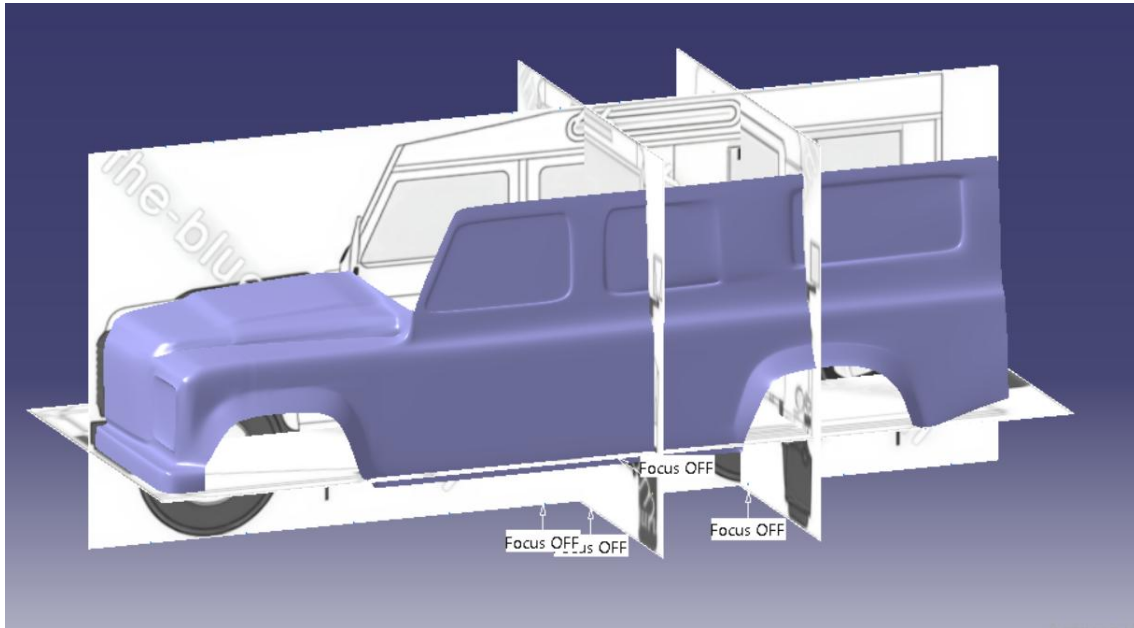


Figura 3-40: Resultado efecto ventanillas

Con la misma dinámica se continuará en el modelado de la ventanilla frontal y el techo, usando de nuevo las herramientas “Extrusión” y “Modificación”.

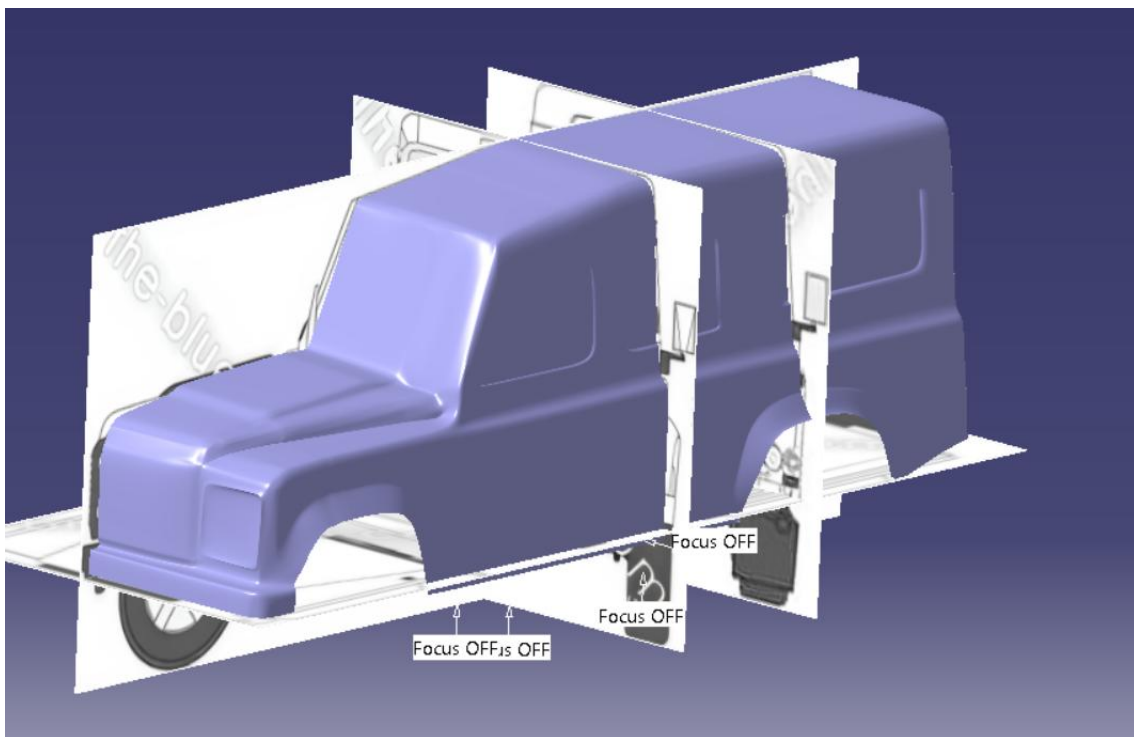


Figura 3-41: Boceto del coche completo, vista frontal

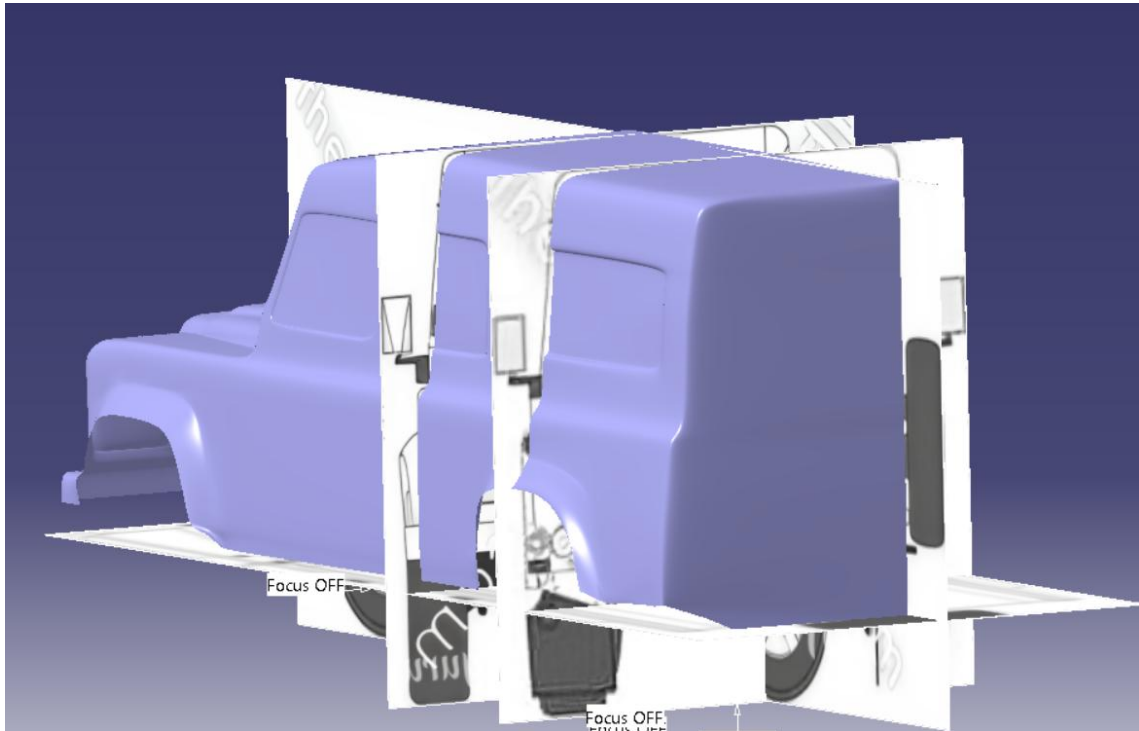


Figura 3-42: Boceto del coche completo, vista trasera

Así, se obtiene como resultado un boceto principal de referencia para el modelado del vehículo. Este enfoque garantiza que la geometría construida se ha basado en las proporciones y contornos del vehículo real.

3.1.1.4 Técnicas de superficies complementarias (GSD y FreeStyle)

La creación de la carrocería continúa más allá del modelado en “Imagine & Shape”. Ahora, el workbench de “Generative Shape Design” proporcionará geometrías avanzadas para completar el modelado del vehículo, corregir cualquier imperfección y terminar los contornos del coche. Esta función permite obtener modelos de alta fidelidad.

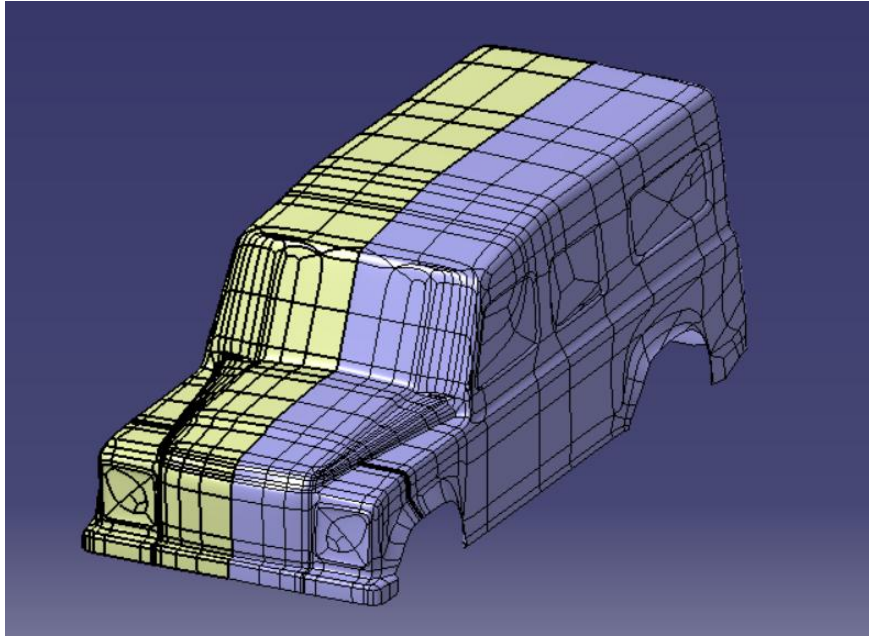


Figura 3-43: Boceto coche tras aplicar simetría

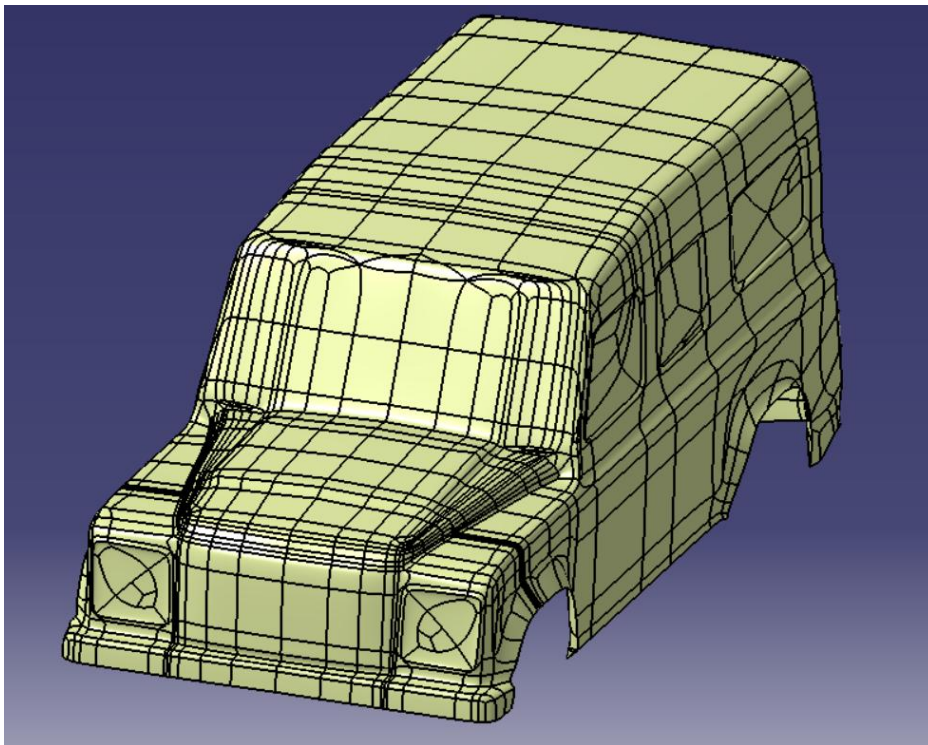


Figura 3-44: Boceto coche completo unido

Mediante Técnicas incorporadas en el módulo de “Generative shape design”, se procede a rellenar todo el fondo

del coche gracias a herramientas como “fill”, “boundary” y el trazado de líneas convencional.

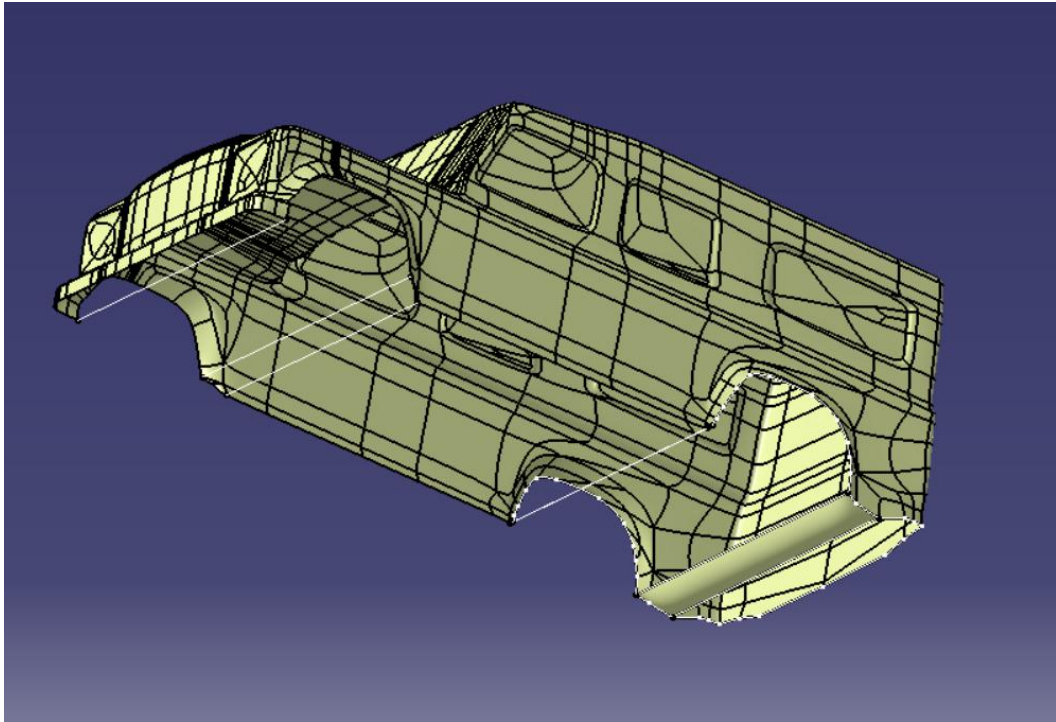


Figura 3-45: Boceto del fondo del coche

Realizando este proceso repetidas veces se obtiene un resultado final que se perfeccionará en solidworks, para que se asemeje más a la realidad.

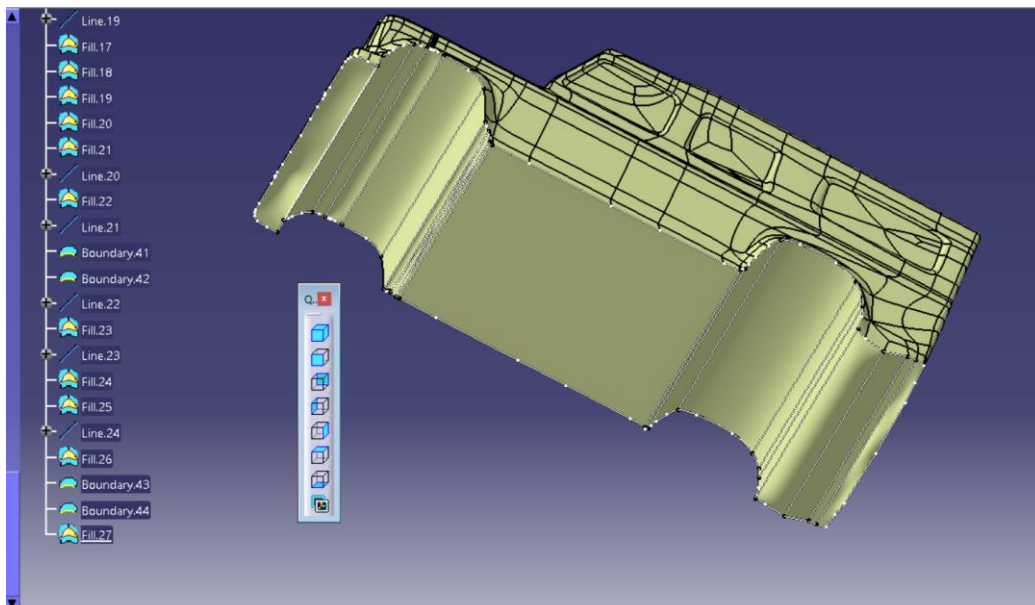


Figura 3-46: Boceto del fondo del coche completo

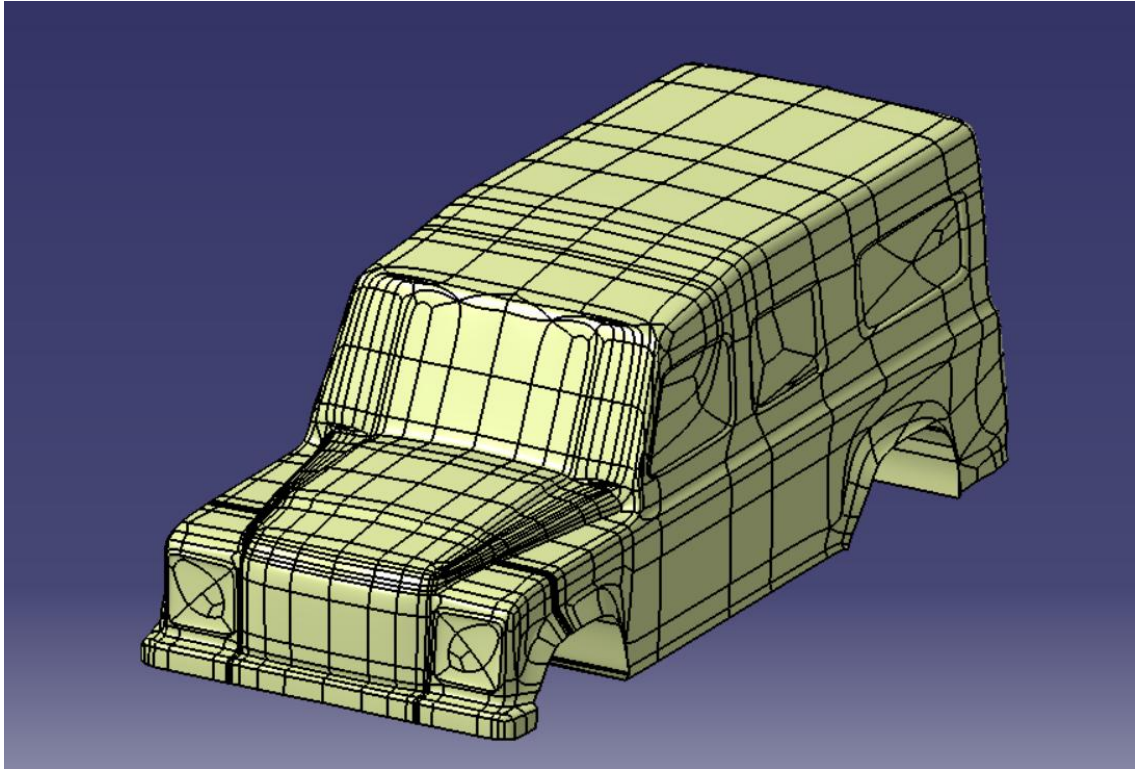


Figura 3-47: Resultado final, vista general

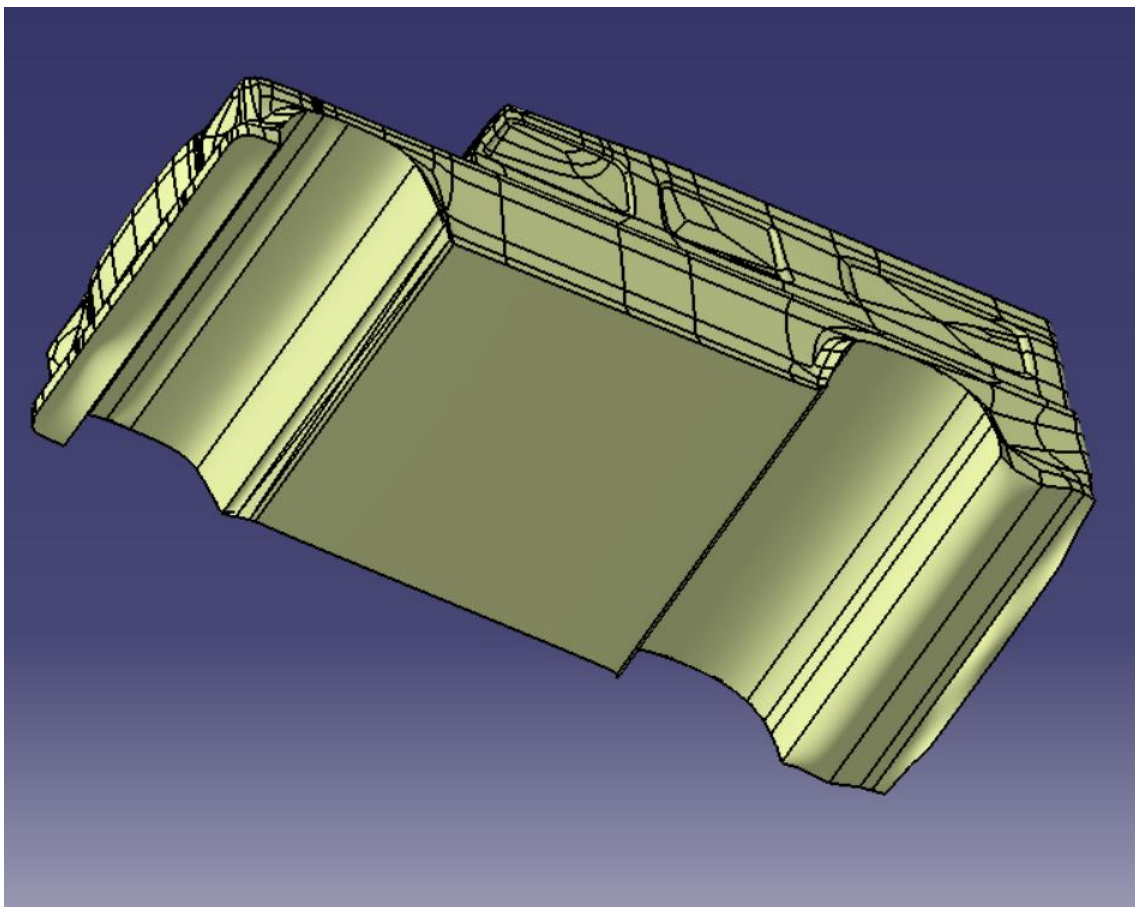


Figura 3-48: Resultado final, vista inferior

3.1.2 Range Rover Evoque 2019

Se realiza el mismo proceso para el modelo sucesor de la gama.

3.1.2.1 Creación de planos con “Sketch Tracer”

Al igual que con el Land Rover, el primer paso será crear los planos en los que se basará el modelado. Cabe de instalar que los planos del Range Rover son mucho más precisos y con mayor calidad debido al avance de la tecnología y, por ende, de la fotografía y calidad de las fotos, mostrando así unas bocetos más fiables.

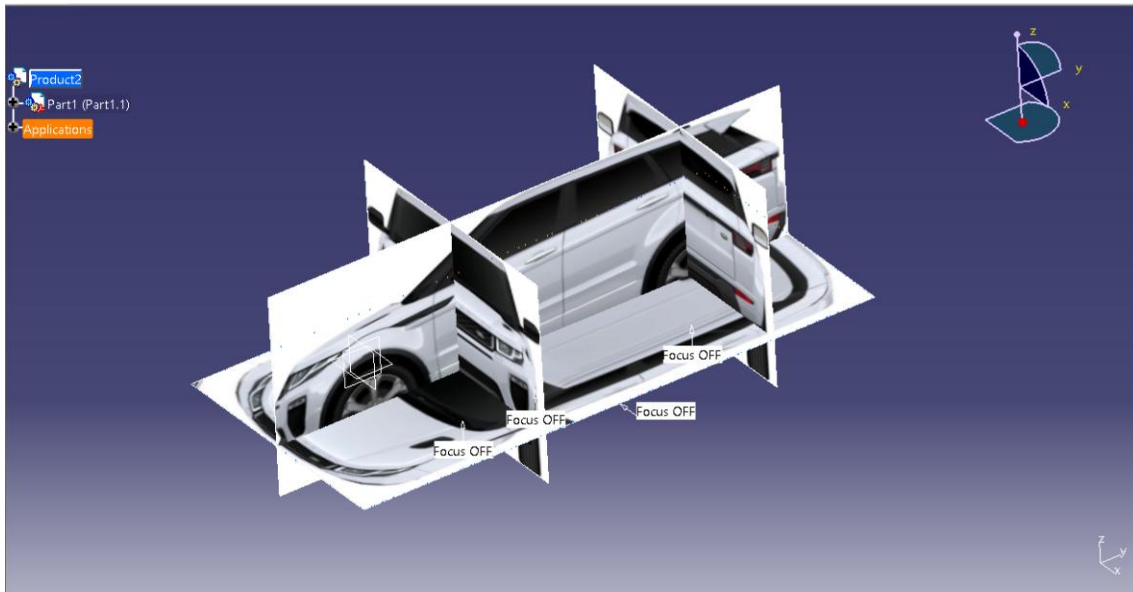


Figura 3-49: Planos Range Rover

3.1.2.2 Modelado con “Imagine and Shape”

De nuevo, y al igual que con el Land Rover, se comienza a modelar este vehículo. Como ya se ha comentado, el tener unos planos de mayor calidad hace que la tarea del modelado se convierta en algo más sencillo. Además se va a obviar los pasos intermedios que se realizaron para los detalles, ya que están explicados en el modelado del vehículo anterior.

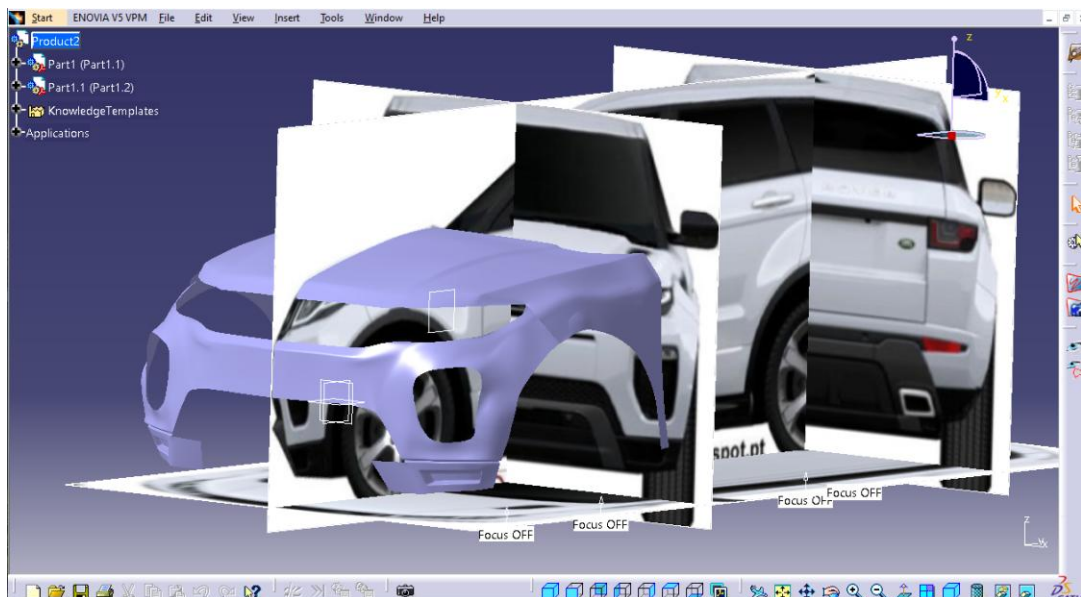


Figura 3-50: Boceto parte delantera Range Rover I

Igualmente se comienza por la parte frontal del coche, realizando los detalles de los faros y entradas de aire, aunque esto será solo para el modelado ya que posteriormente se tendrá que simplificar dichas zonas.

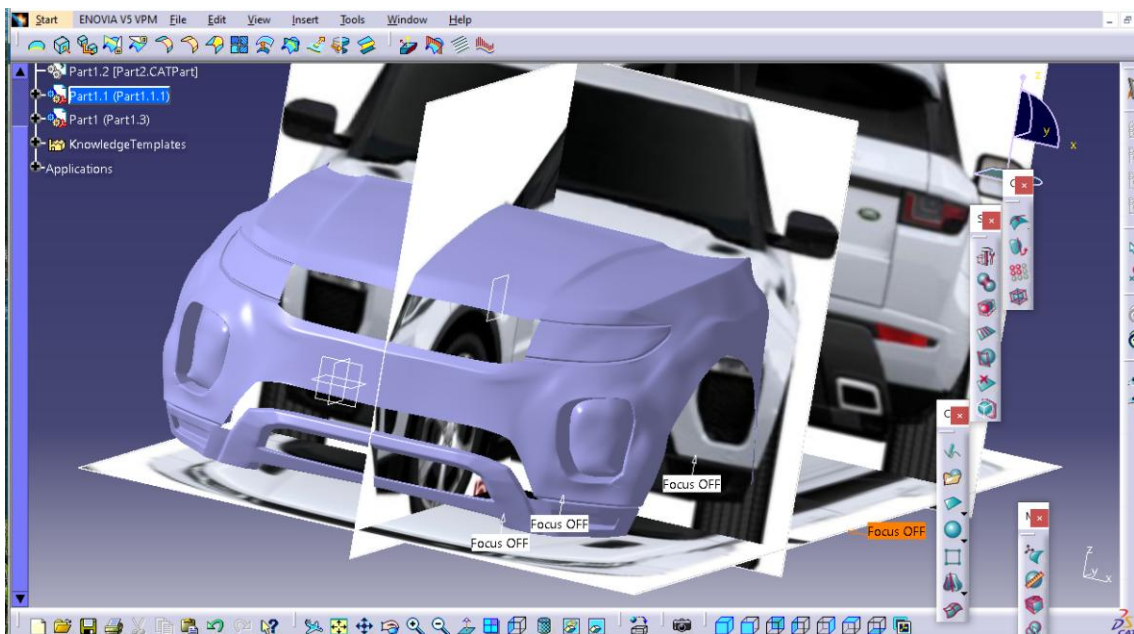


Figura 3-51: Boceto parte delantera Range Rover II

Una vez completada la parte frontal seguimos con las puertas y detalles de la parte lateral.

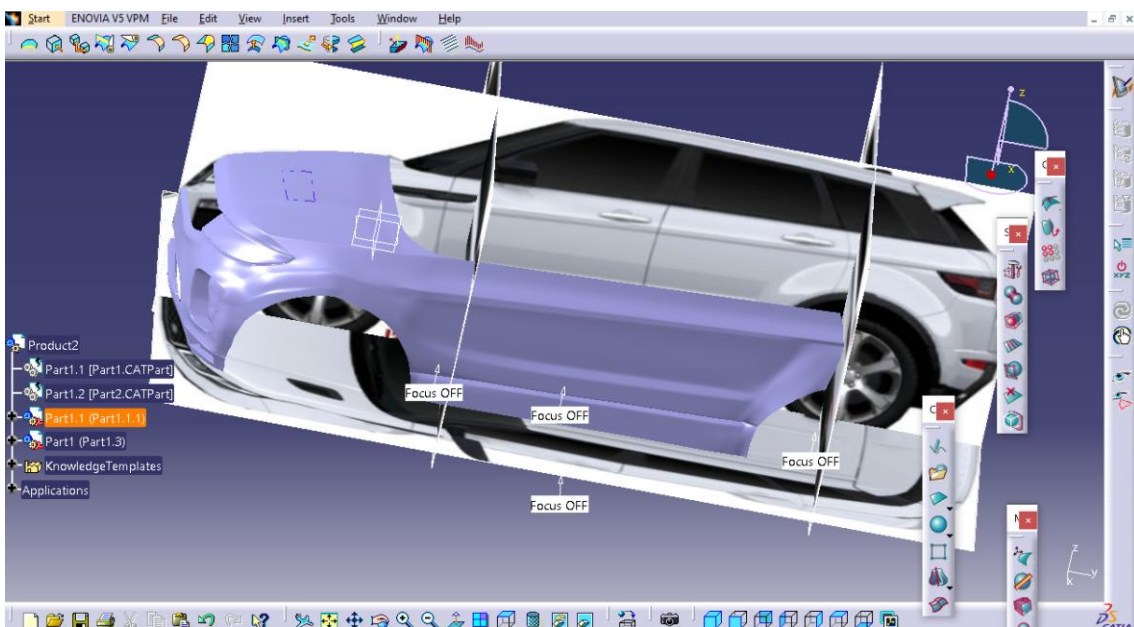


Figura 3-52: Boceto parte lateral Range Rover

Así completaríamos la parte trasera, donde se puede apreciar como se ha usado las técnicas ya mencionadas para

realzar algunos detalles, bordes, faros, uniones, etc.

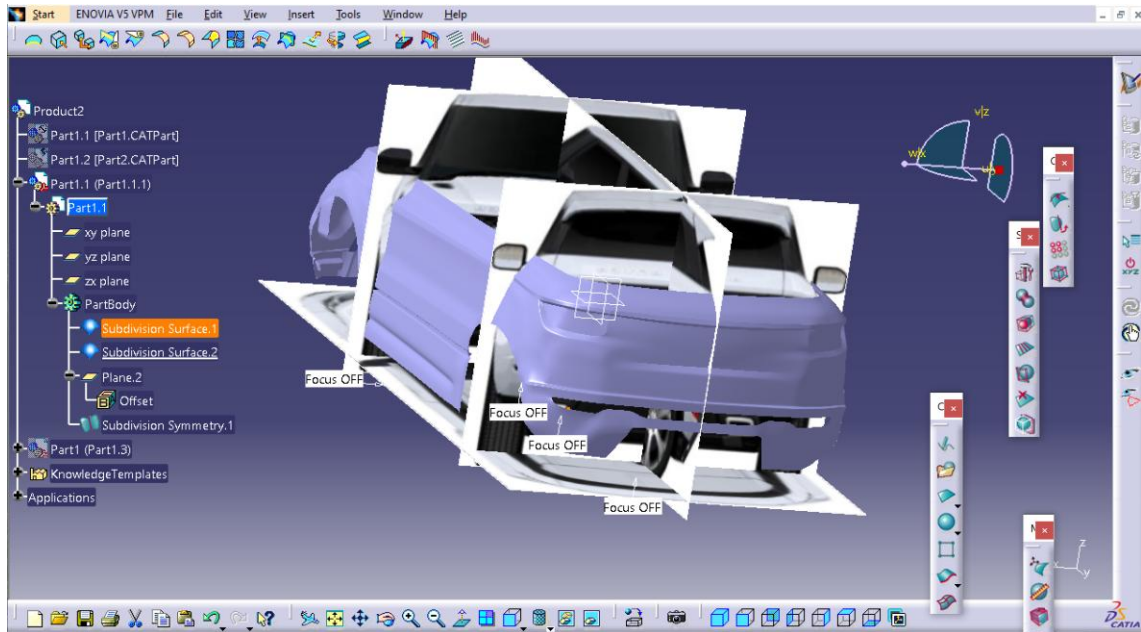


Figura 3-53: Boceto parte trasera Range Rover

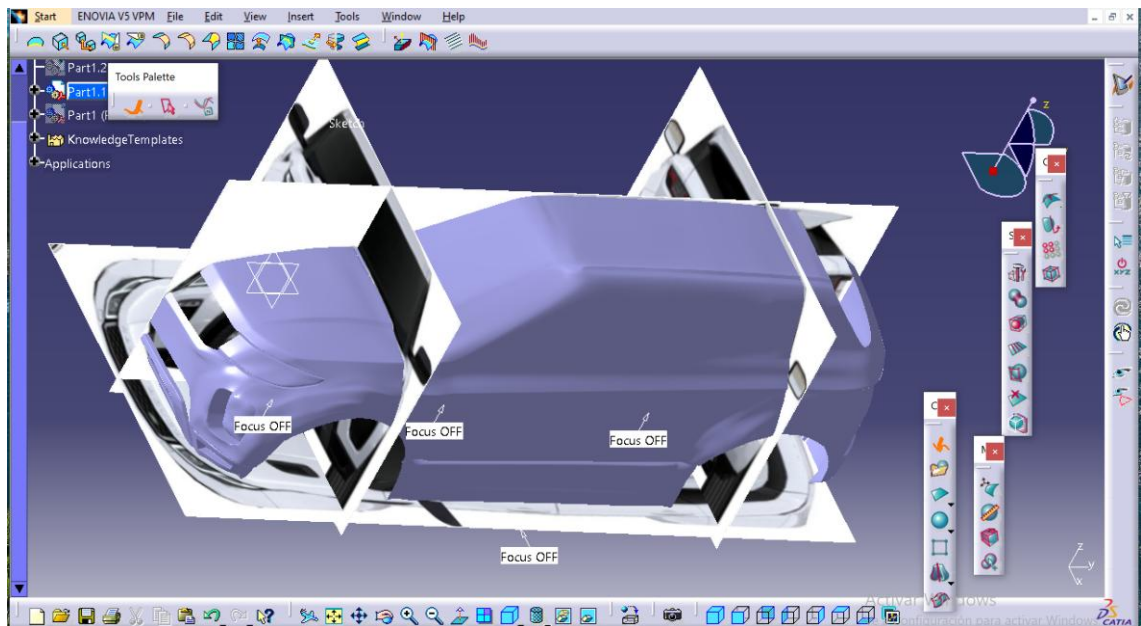


Figura 3-54: Boceto Range Rover vista general

Se procede a completar el vehículo, haciendo el spoiler trasero tan característico de este modelo.

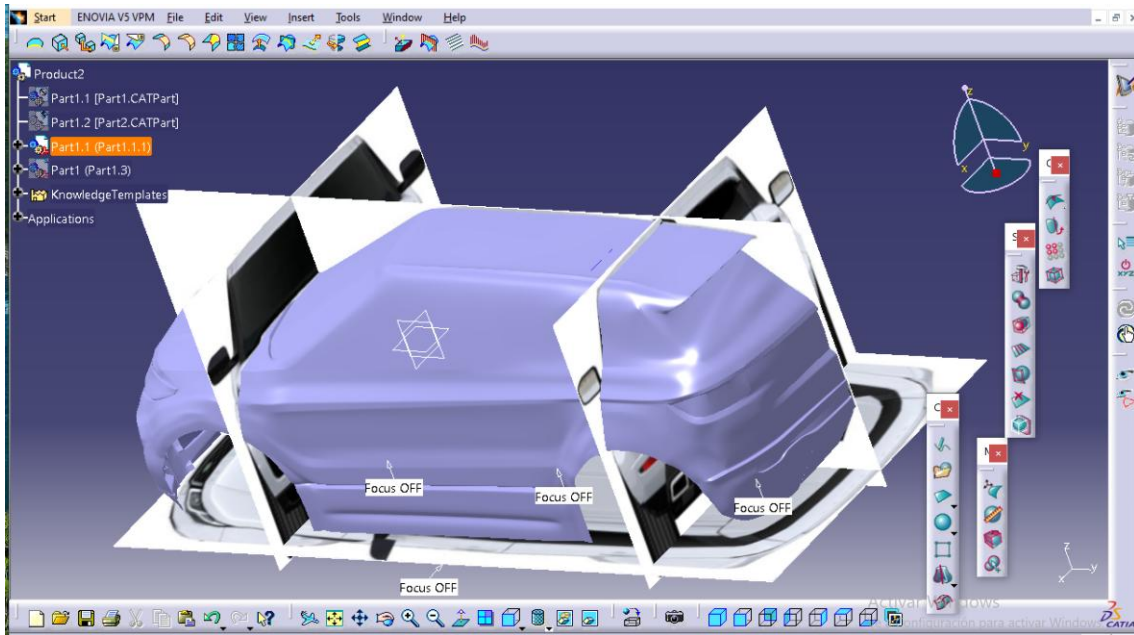


Figura 3-55: Boceto Range Rover completado

Una vez completado el vehículo aislaremos este de los planos para visualizarlo correctamente además de realizarle una simetría para un visualizado más fiel.

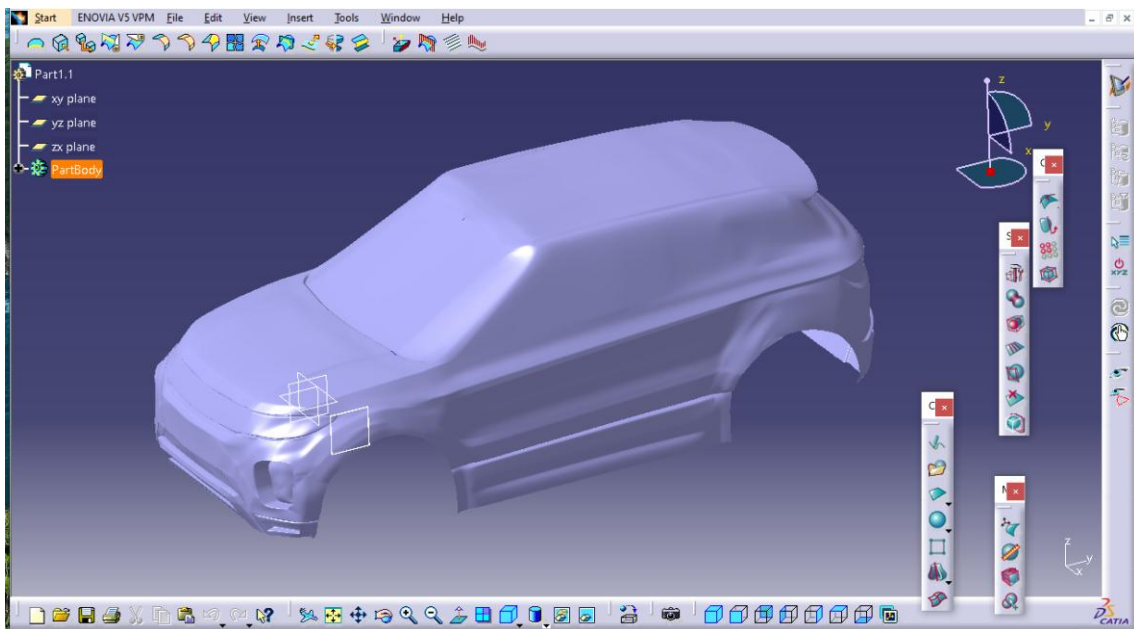


Figura 3-56: Part Range Rover

3.1.2.3 Complementos de “GSD”

Tal y como se hizo anteriormente, se trazarán líneas y “boundaries” que se rellenarán con la herramienta “fill”.

Algo muy sencillo y usado en el diseño y modelado de vehículos, por lo que se puede encontrar infinidad de ejemplos en internet. Por este motivo no se profundizará en estas técnicas, a diferencia del módulo *Imagine & Shape*, en el cual se centra este trabajo, ya que no se han encontrado tantas referencias relacionadas con este módulo de CATIA V5.

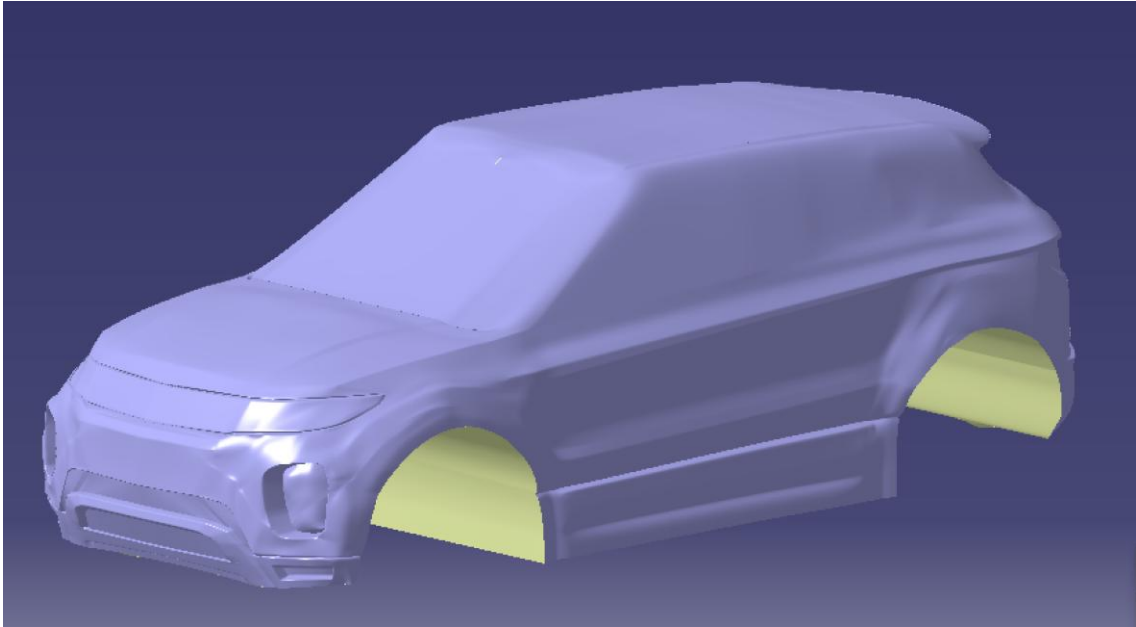


Figura 3-57: Resultado Boceto Range Rover

Además de para hacer el fondo del vehículo, el módulo de “Generative Shape Design” sirvió de gran utilidad para modelar el retrovisor del vehículo. Como no existen, o al menos no se han encontrado datos específicos del retrovisor, se hizo un análisis experimental del modelo exacto al ser encontrado en la calle. Como se ha mencionado antes, el retrovisor no será incluido en el análisis aerodinámico, por tanto, solo servirá para el modelado y ensamblaje. Esto permitirá tener un margen para el error un poco mayor que si se incluyera en el análisis aerodinámico.



Figura 3-58: Fotos retrovisor

Para diseñar este retrovisor se hizo un boceto, se cerró y se extruyó. Un boceto con las medidas del retrovisor

real y sus mismas formas.

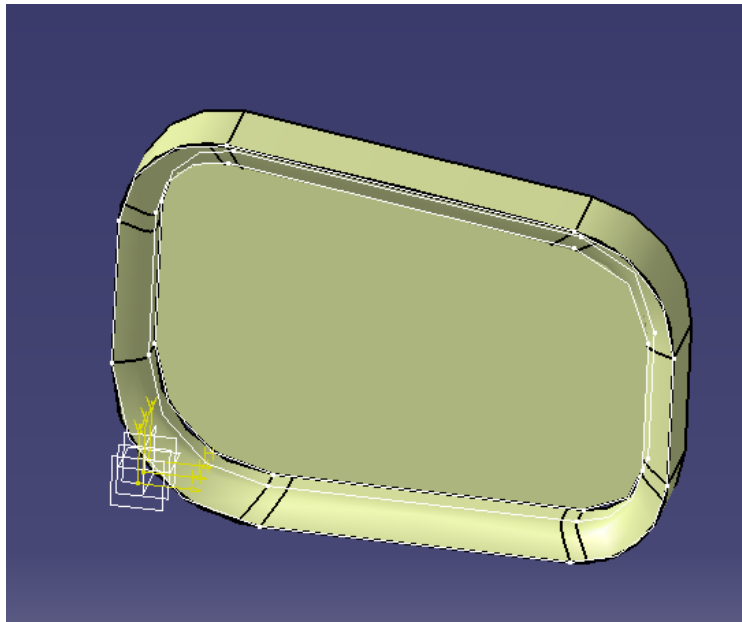


Figura 3-59: Boceto espejo retrovisor

Una parte más complicada fue la de realizar la curvatura de la parte exterior de la carcasa del retrovisor. Ante la incapacidad de medir la curvatura correcta de la carcasa, se decidió por tomar una serie de puntos y sus cotas, consiguiendo así una nube de aristas que posteriormente se unirían con la herramienta “Multi-Section Surface” de Catia V5.

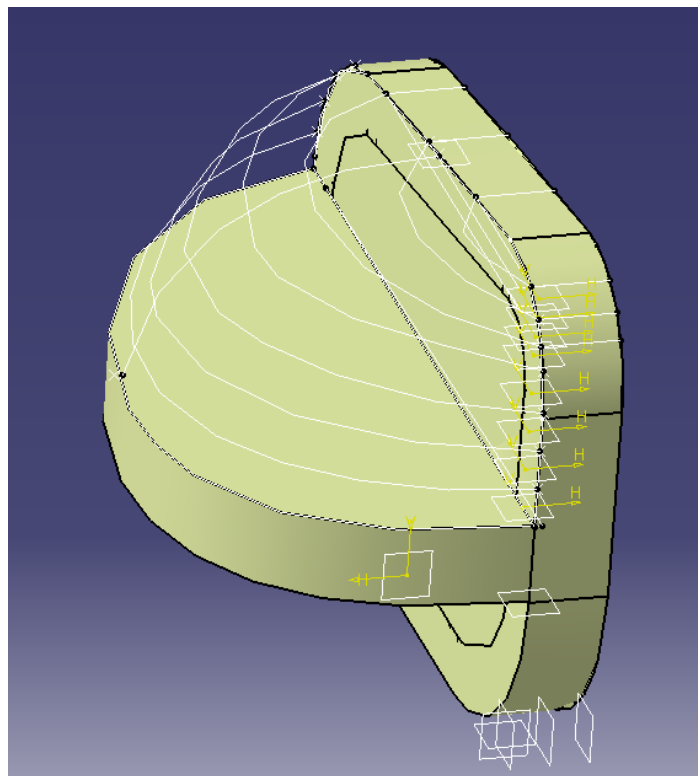


Figura 3-60: Boceto "layers" retrovisor

Optimizado

Para explicar esto de una manera más visual, se procede a dejar una imagen de los árboles de operaciones usados para el modelado del retrovisor. Cabe destacar la complejidad de este modelado al no disponer de planos oficiales de el retrovisor.

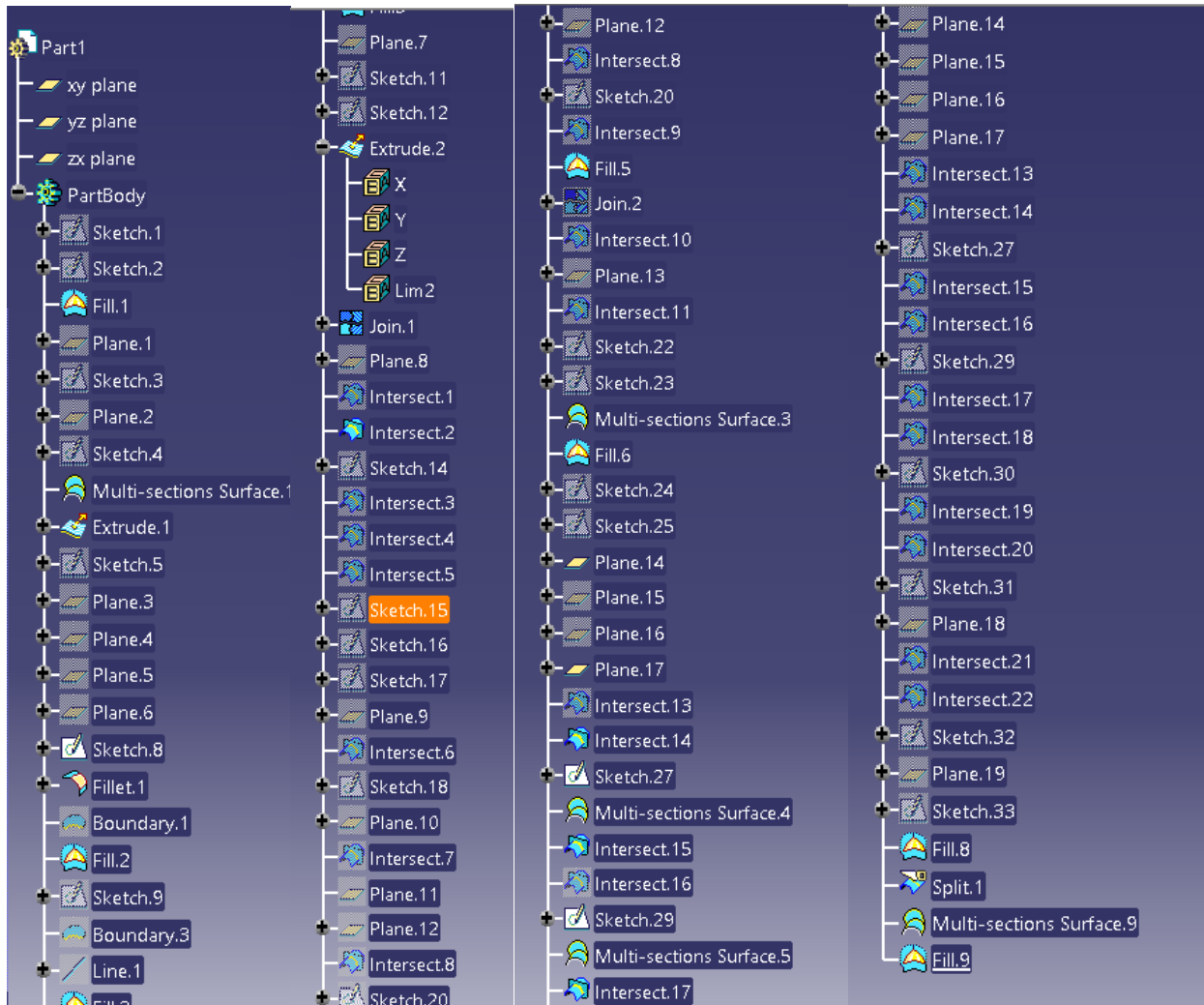


Figura 3-61: Arbol de operaciones retrovisor

Cabe señalar que, al no disponer de unos planos específicos del retrovisor, este elemento no se va a incorporar análisis aerodinámico. Al incluirlo, sin poseer los datos exactos, podría inducir a soluciones erróneas en el análisis. Por este motivo solo se incluirá de manera estética en el ensamblaje.

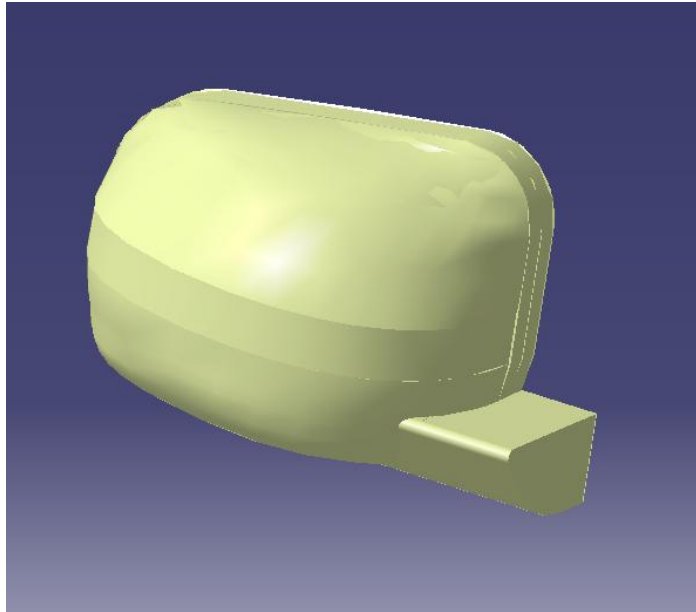


Figura 3-62: Boceto retrovisor completo, vista trasera

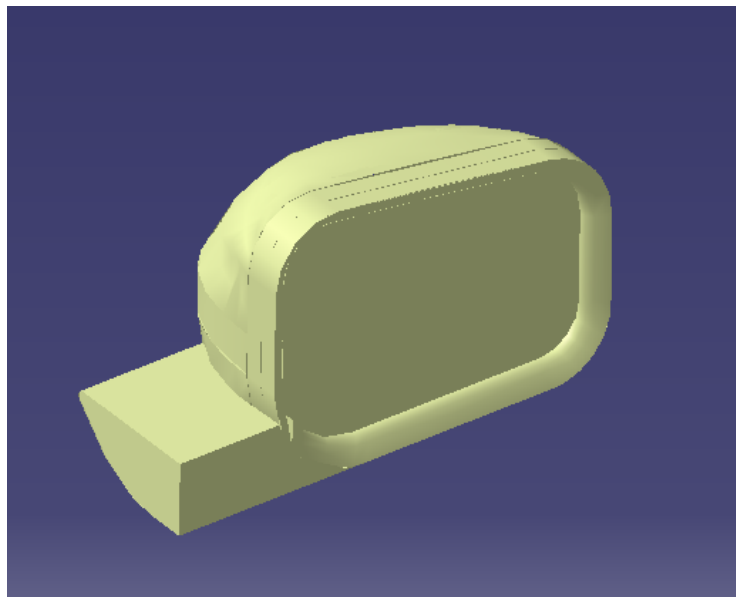


Figura 3-63: Boceto retrovisor completo, vista general

3.1.2.4 Part Design

Para finalizar, para mostrar un correcto ensamblaje y una bonita visualización del vehículo completo, se deciden modelar las ruedas y retrovisores del vehículo, que, aunque no se van a analizar, darán una sensación de mayor realidad y fidelidad al modelado. De nuevo, no se proporcionarán muchos detalles de este módulo ya que es 1 de los más usados.

Optimizado

Se procede con el modelado de uno de los radios de la llanta, creando o un boceto primario al que se le realizarán unos cortes para darle una forma más moderna.

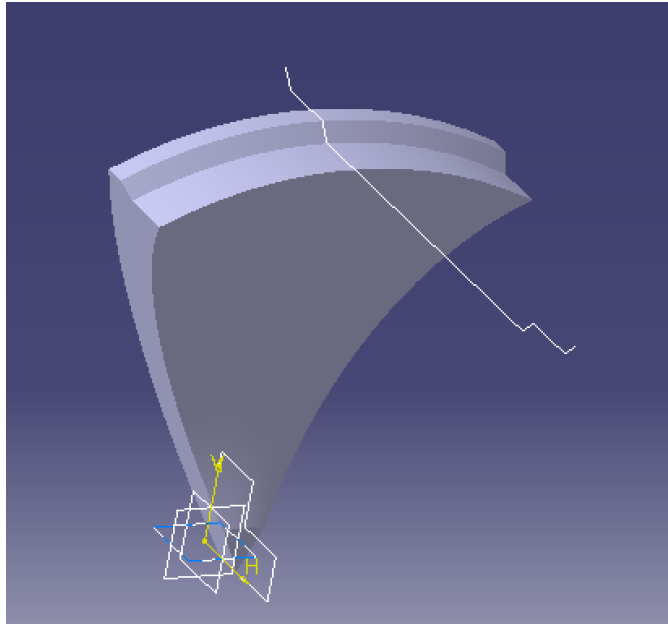


Figura 3-64: Boceto inicial llanta

Una vez que tenemos la forma deseada del radio, solo queda realizarle un patrón y algunos detalles como los alojamientos de los pernos que sujetan la llanta al vehículo

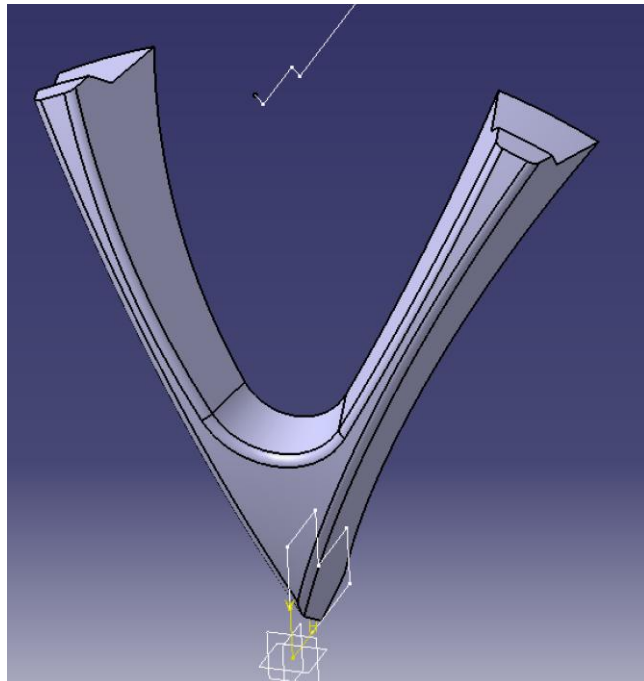


Figura 3-65: Boceto detalles llanta I

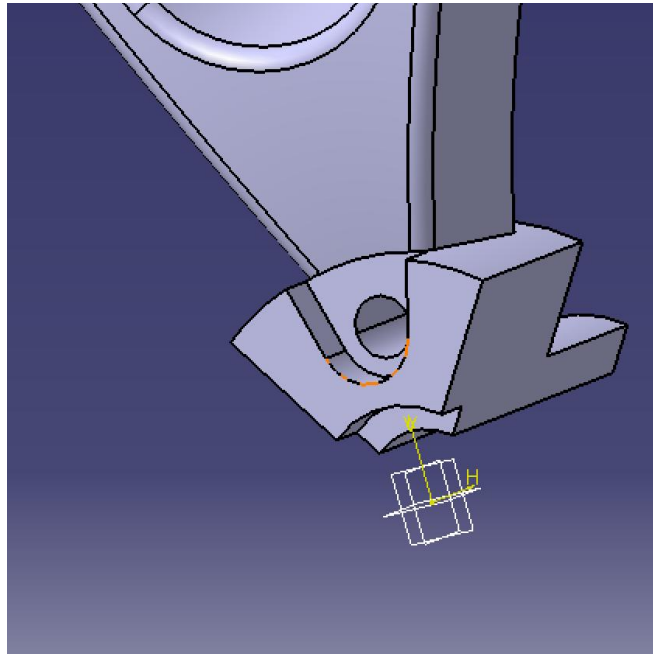


Figura 3-66: Boceto detalles llanta II

Este sería el resultado completo, al que solo queda hacerle una simetría de revolución.

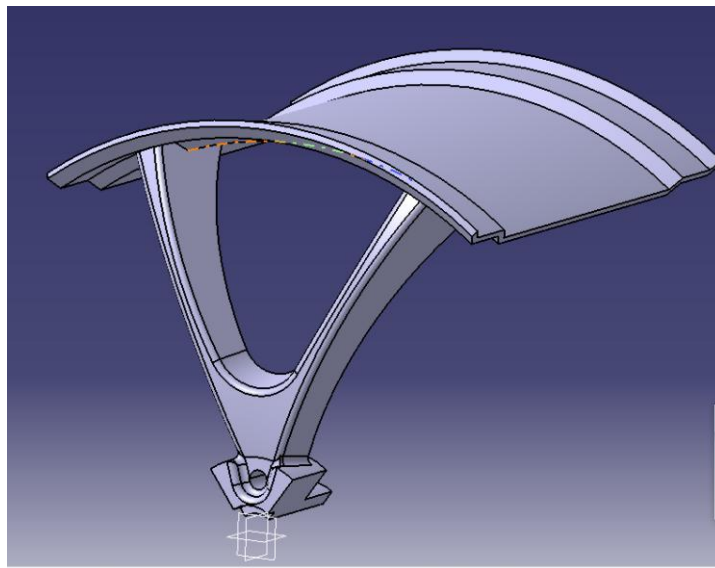


Figura 3-67: Boceto detalles llanta III

Así quedaría la llanta del Range Rover, a falta de añadir el neumático.



Figura 3-68: Boceto llanta completa

Procedemos de la misma manera con el neumático y tras una simetría de revolución obtenemos el resultado final

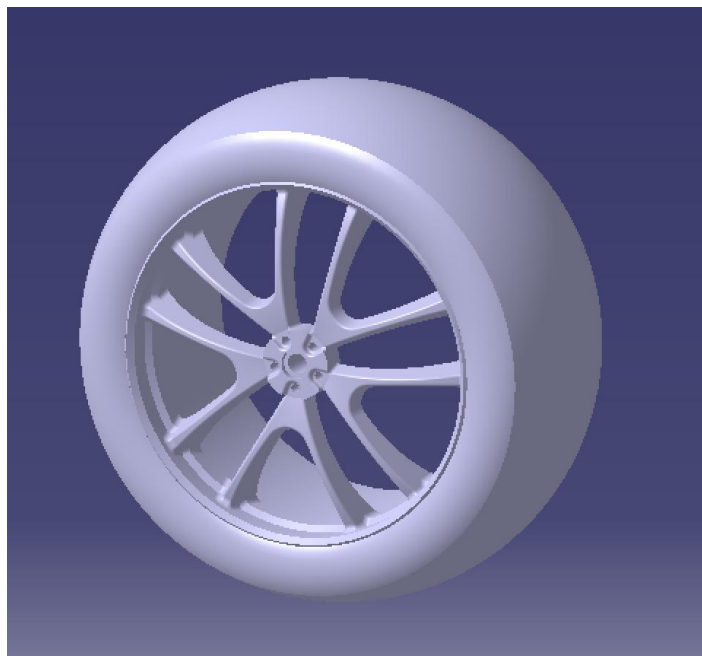


Figura 3-69: Boceto rueda completa

Por comodidad, se decide modelar la rueda del Land Rover defender en SolidWorks. A continuación, se muestra el boceto de la llanta.

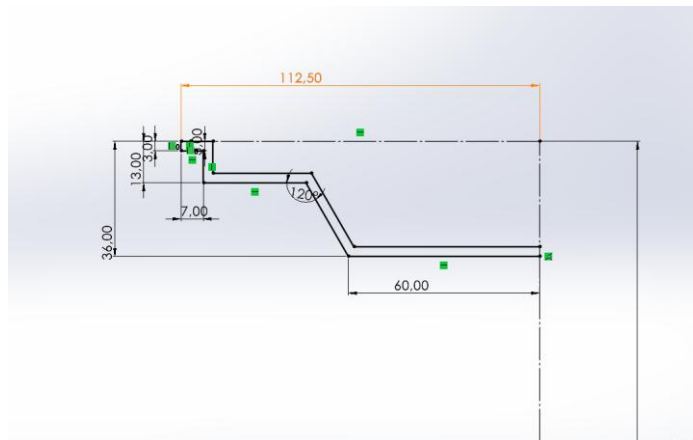


Figura 3-70: Boceto llanta Land Rover

Una vez realizado el boceto principal se revoluciona respecto al eje, obteniendo el siguiente boceto.



Figura 3-71: Boceto llanta completa sin aligerar

Finalmente se procede a realizar unos taladros en la llanta para aligerar el peso.



Figura 3-72: boceto llanta completa con detalles

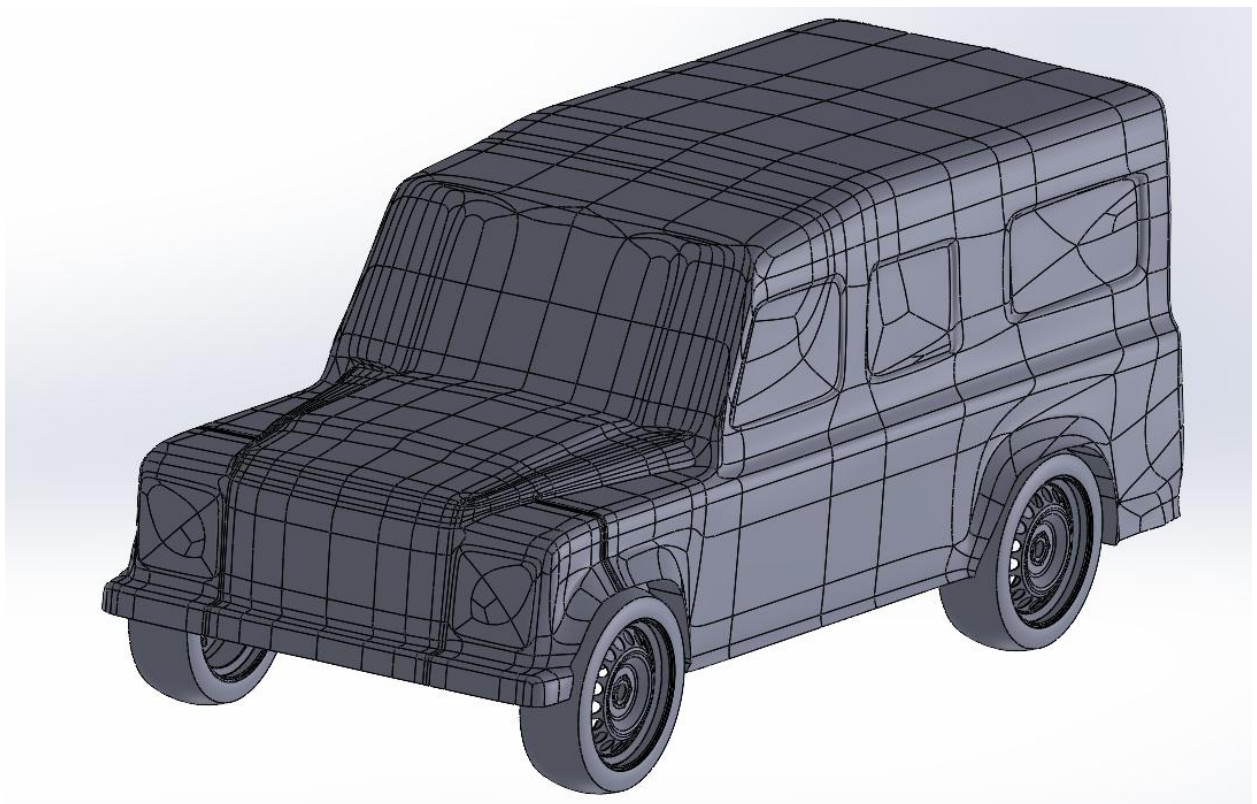


Figura 3-73: Emsamblaje completo Land Rover

3.2. Simulaciones CFD en SolidWorks Flow Simulation

Una vez terminado el modelado del vehículo, es el turno de CFD, una herramienta numérica que permite simular y analizar el movimiento de fluidos, en este caso el aire, y su interacción con el vehículo.

3.2.1. Preparación del modelo CAD para análisis CFD

Antes de iniciar la simulación CFD, se tienen que preparar los modelos CAD para que sean viables a la hora de analizarlos, esto implica un balance correcto entre fidelidad geométrica y eficiencia computacional.

Simplificación geométrica: los modelos CAD muy detallados, suelen contener pequeñas características que aumentan drásticamente la complejidad de la malla, pero, sin embargo, No tienen un impacto significativo en la aerodinámica global. Entre estos componentes se encuentran los huecos de paneles, antenas, tornillos, manetas, y en este caso simplificar aún más el modelo se omitirán los retrovisores, que se analizarán por separado.

La herramienta de simplificar geometría la trae directamente instalada SolidWorks, por lo que será un paso bastante sencillo de hacer.

3.2.2. Definición de condiciones de contorno y creación de Dominio Fluido

Aquí se definirá un volumen de aire que envuelve completamente el vehículo. Este dominio fluido debe ser lo suficientemente grande para asegurar que las condiciones de contorno no influyan artificialmente en el flujo alrededor del automóvil y para permitir que el flujo se desarrolle y se establezca adecuadamente antes de llegar a la salida, pero no excesivamente grande para no gastar recursos innecesarios y aumentar el costo computacional. Este dominio fluido lo propondrá directamente el módulo de “Flow Simulation” de solidworks, aunque se puede modificar siempre que fuera necesario. El módulo “Flow Simulation” es bastante intuitivo y fácil de usar, aunque en este apartado se dan algunos pasos clave para realizar un correcto análisis. Lo primero es que cuando se inicia el proceso de análisis, además de la velocidad y su dirección, habrá que concretar otros factores determinantes como serán la densidad del fluido, en nuestro caso aire, y, algunas otras condiciones como excluir el estudio de posibles cavidades internas o espacios con excesiva alta turbulencia.

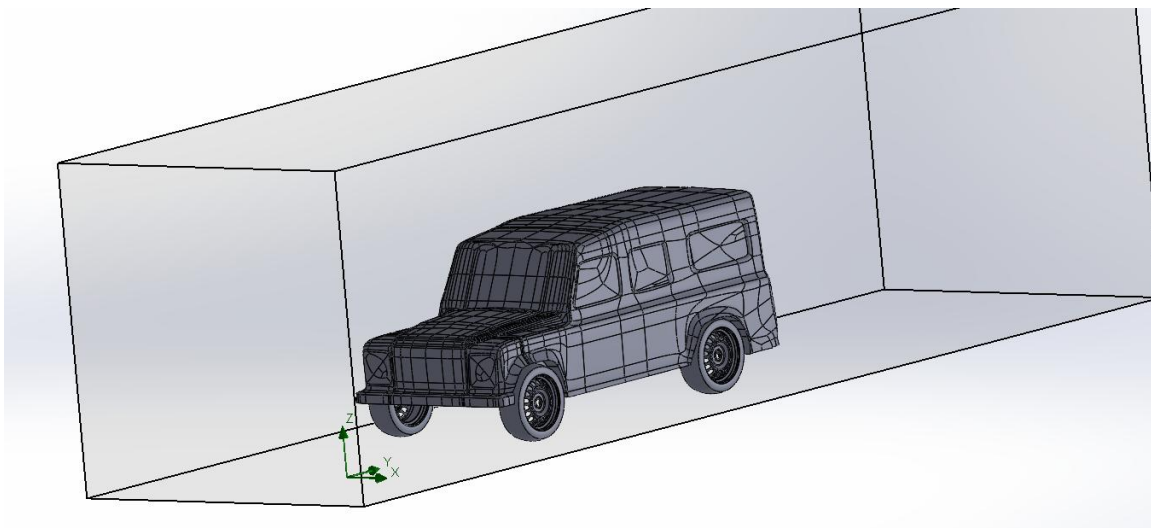


Figura 3-74: Dominio fluido Land Rover

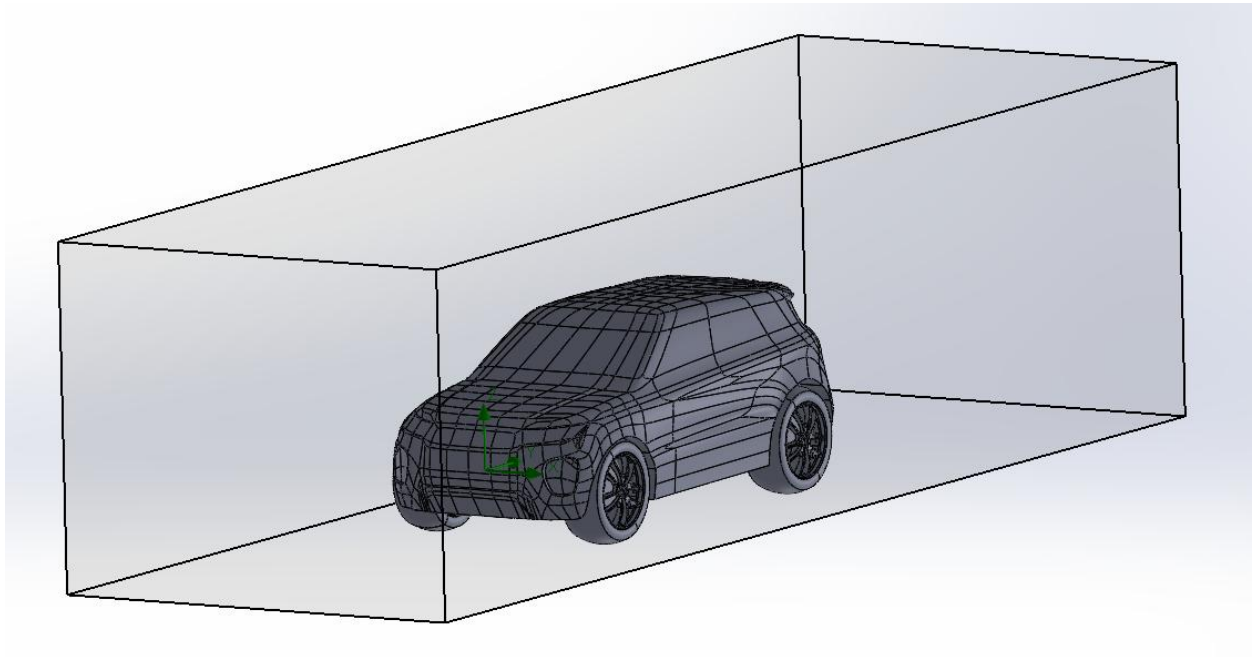


Figura 3-75: Dominio fluido Range Rover

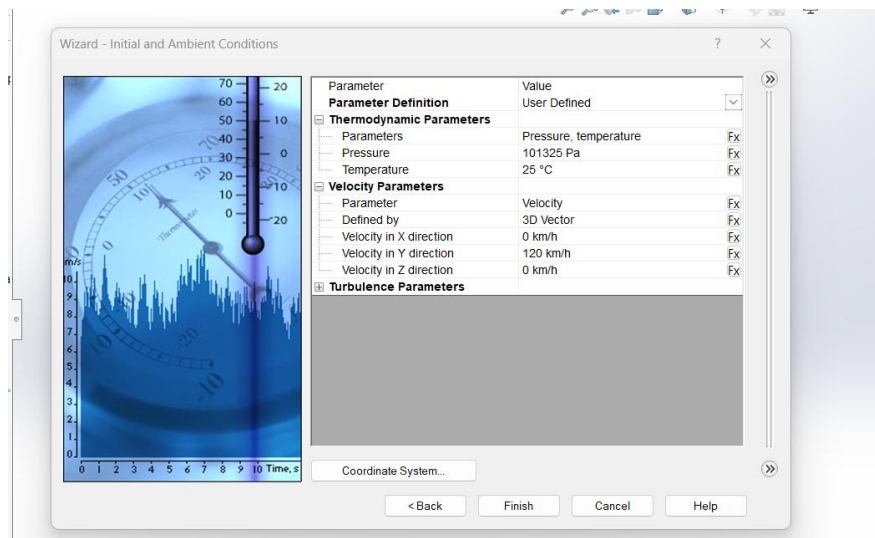


Figura 3-76: Condiciones de contorno

3.2.3. Mallado

El mallado, o la discretización del dominio de fluido y la geometría del vehículo en un conjunto de celdas, es un paso crítico en cualquier simulación CFD. La calidad y la estrategia de mallado son determinantes para la precisión y la estabilidad de los resultados obtenidos. Los pasos a seguir incluyen la generación de una malla inicial, que cubra todo el dominio computacional, y posteriormente se realizará un refinamiento del volumen cercano al vehículo para capturar con mayor precisión los gradientes de flujo importantes. Los niveles de refinamiento de malla se miden del 1 al 7, siendo el 7 el nivel de malla más fino y por tanto con mayor coste computacional. En este estudio se usará una malla de nivel 6, por lo tanto, bastante precisa, a la que además se le aplicará un refinamiento de malla en la superficie cercana al vehículo. Un refinamiento adicional de nivel 4.

3.2.3.1 Land Rover Defender 2008

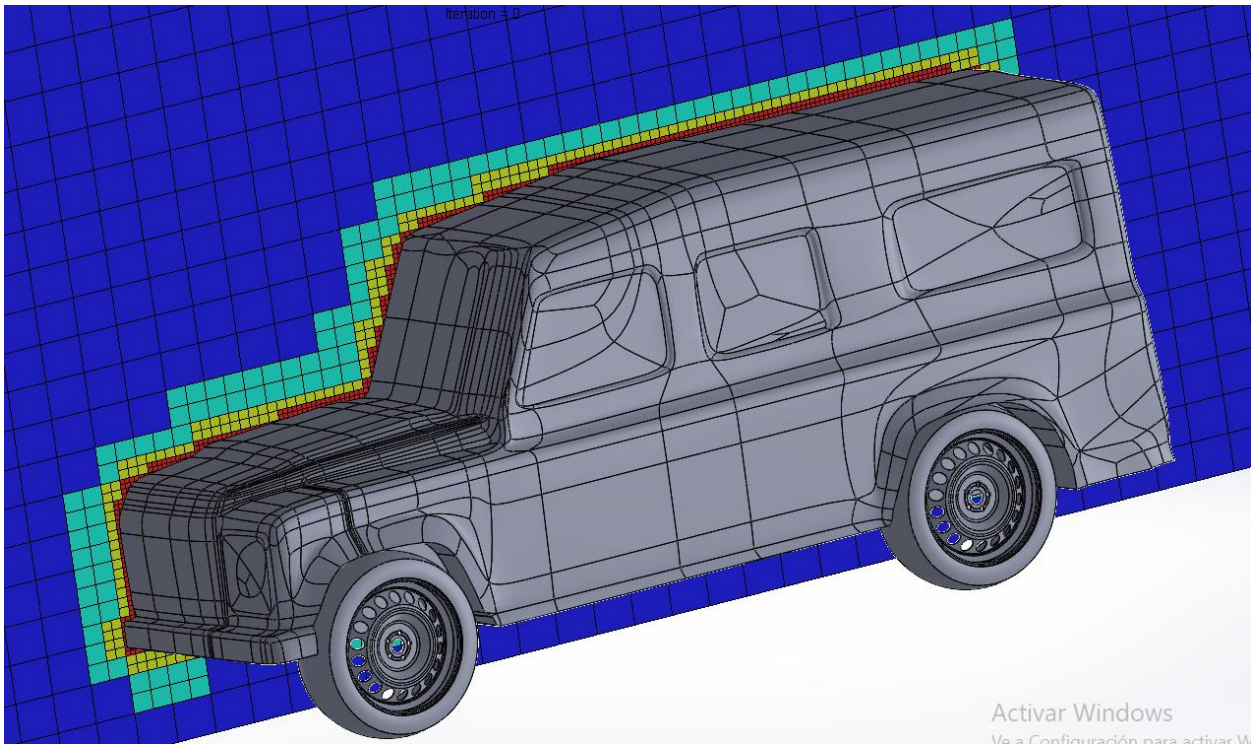


Figura 3-77: Mallado nivel 6 Land Rover

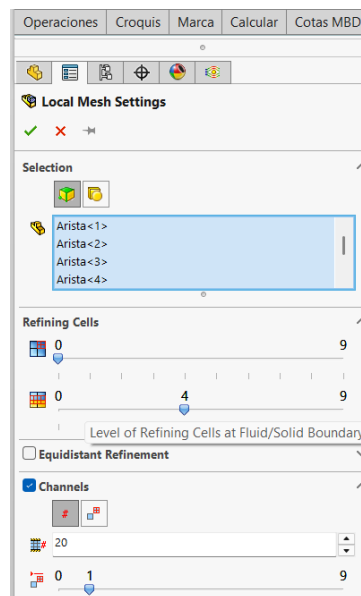


Figura 3-78: Refinamiento de malla cerca del vehiculo

Optimizado

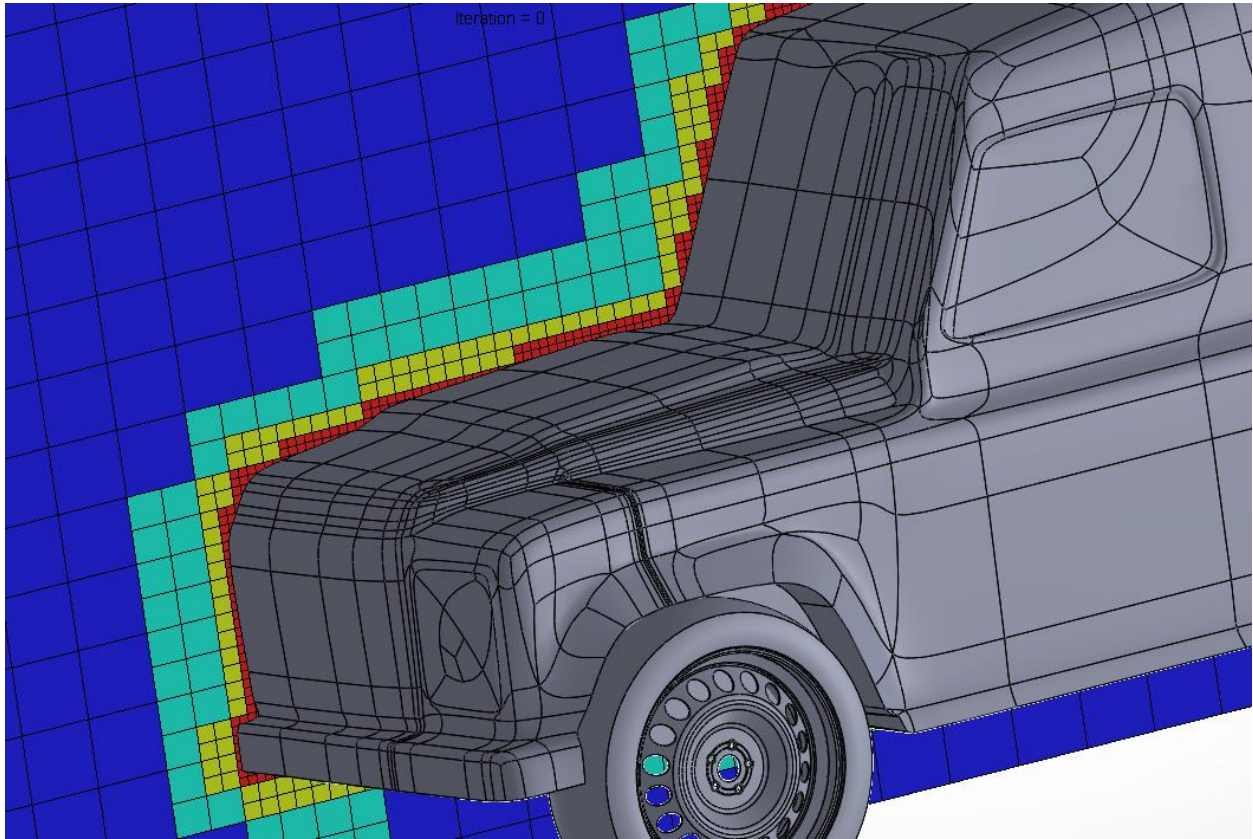


Figura 3-79: Malla refinada

Una vez finalizada la malla se intenta resolver. Esto se consigue mediante la resolución de una cantidad ingente de ecuaciones diferenciales, entre ellas las que conocemos de la asignatura de “mecánica de fluidos” de la carrera. A continuación, se muestra una tabla con información relevante sobre el modelo a analizar. Destacar el costo computacional de esta operación, resultando en un tiempo de cálculo de más de 3 horas y un número de celdas fluidas que asciende a más de 1,400,000 celdas a calcular.

Parameter	Value
Status	Calculation
Total cells	1,401,787
Fluid cells	1,401,787
Fluid cells contacting solids	693,698
Iterations	58
Last iteration finished	17:51:11
CPU time per last iteration	00:00:16
Travels	0.259122
Iterations per 1 travel	223
CPU time	0 : 15 : 5
Calculation time left	3 : 26 : 24
Run at	LENOVOMATI

Event	Iteration	Time
Mesh generation started	0	17:34:13 , Jul 30
Mesh generation normally finished	0	17:34:42 , Jul 30
Preparing data for calculation	0	17:36:01 , Jul 30
Calculation started	0	17:37:18 , Jul 30

Ready | Calculation | Iterations : 58

Figura 3-80: Solver Land Rover

3.2.3.2 Range Rover 2019

Resultado del ascendente denotar que aquí se ha realizado el mallado de un modelo completamente nuevo, aunque similar y mediante el uso de los mismos planos que se usaron para modelar el primer coche. Esto ha sido necesario ya que tras varios intentos de mallar el primer prototipo de Range Rover el programa avisaba de varios fallos en la carrocería. Tras un exhaustivo análisis se concluye que esos fallos son fallos irreparables (agujeros, conexiones fallidas entre planos y cortes irreparables entre planos que dejaban superficies abiertas). Se decidió por tanto, tras muchos intentos de mallar el vehículo original, realizar de nuevo el modelado del Range Rover 2019.

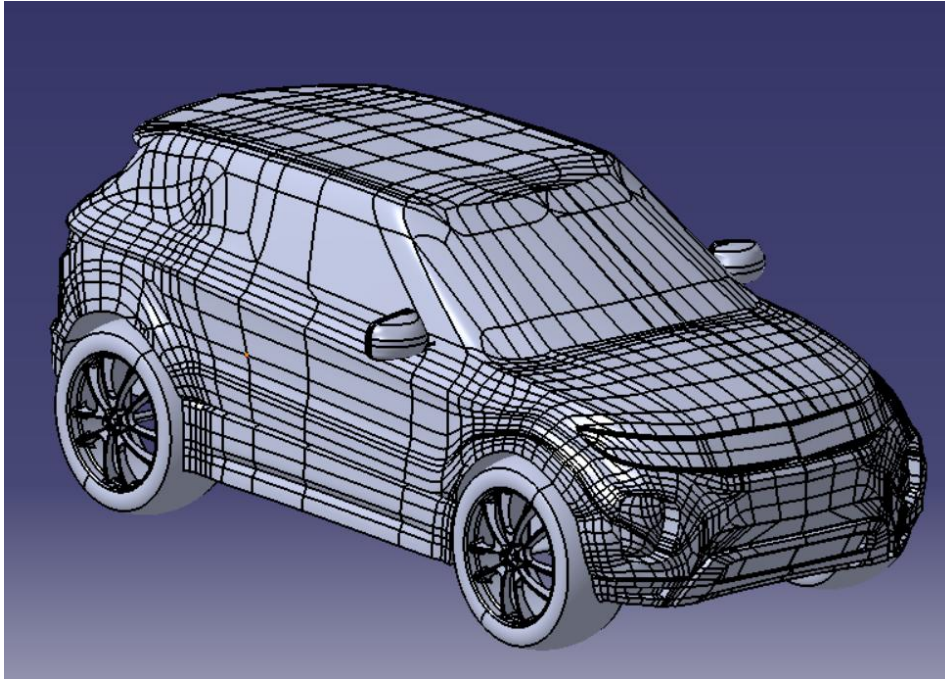


Figura 3-81: Boceto Range Rover original

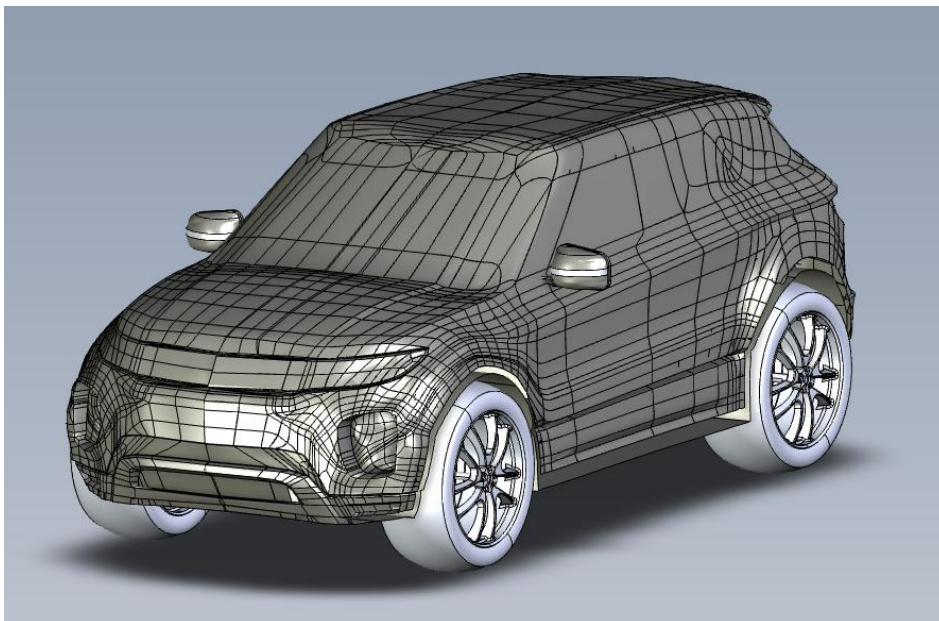


Figura 3-82: Range Rover completo, viewer Catia

Optimizado

Para evitar volver a cometer los mismos fallos, este modelo se ha creado a partir de superficies mayoritariamente rectangulares, sin comprometer a la geometría para crear detalles que a nivel aerodinámico son inapreciables. También cabe destacar como el número de caras disminuye considerablemente, haciendo de este un modelo mucho más barato computacionalmente. Por ello, se podrá realizar una malla de nivel 6 que compensará la falta de detalle adicional, resultando finalmente en un número similar de celdas en la malla.

Se puede apreciar esta diferencia en el lujo de detalles de manera muy clara en la parte lateral.

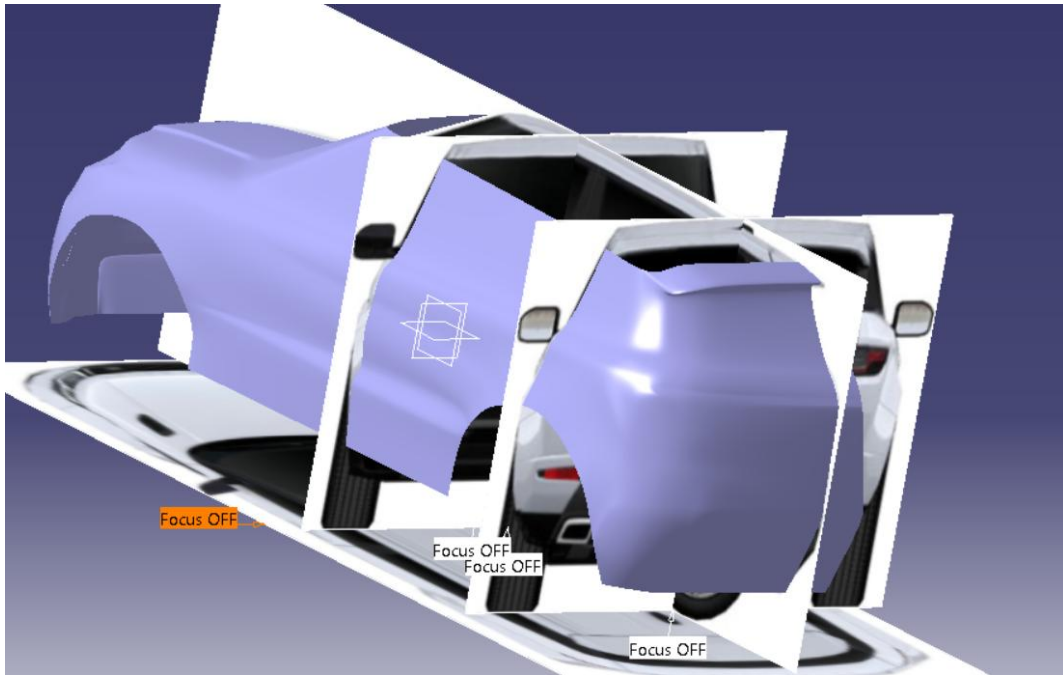


Figura 3-83: Boceto Range Rover, vehículo simplificado I

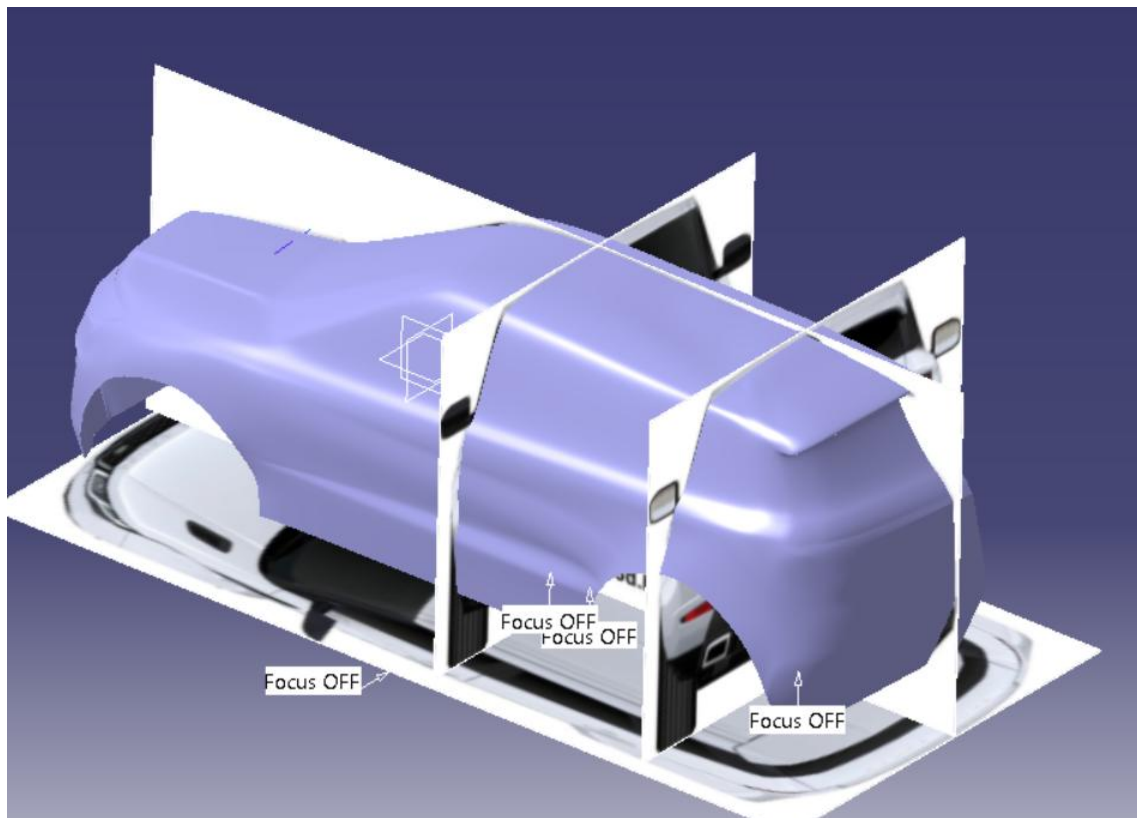


Figura 3-84: Boceto Range Rover, vehículo simplificado II

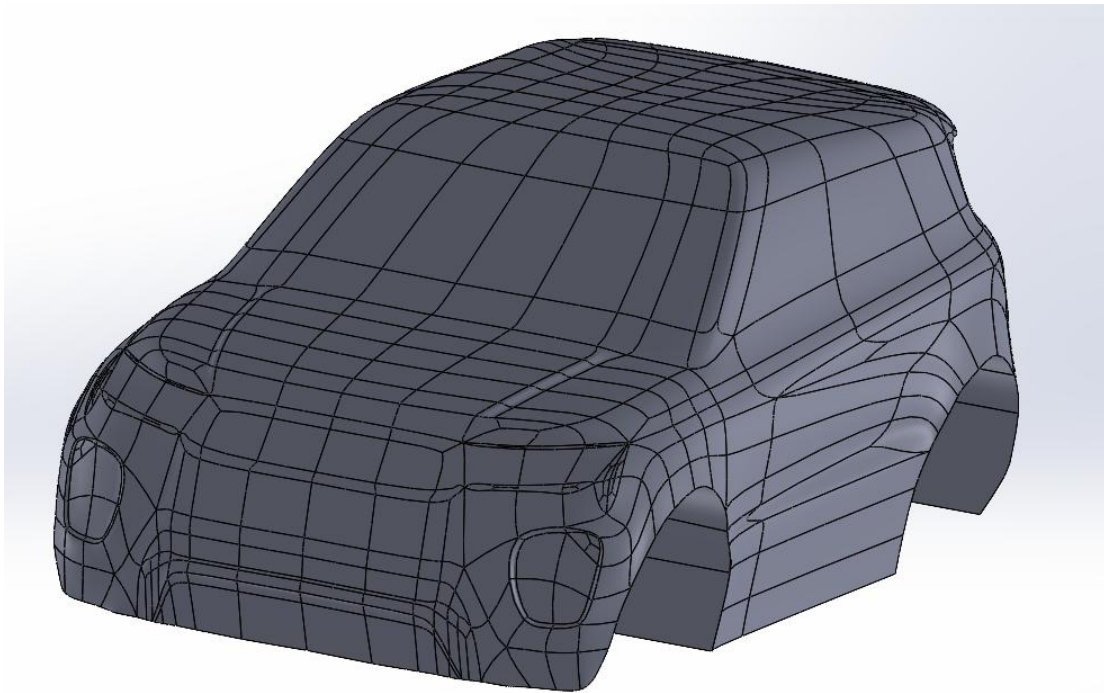


Figura 3-85: Boceto Range Rover, vehiculo simplificado III

Finalmente se puede observar el coche de manera muy clara y limpia en SolidWorks.

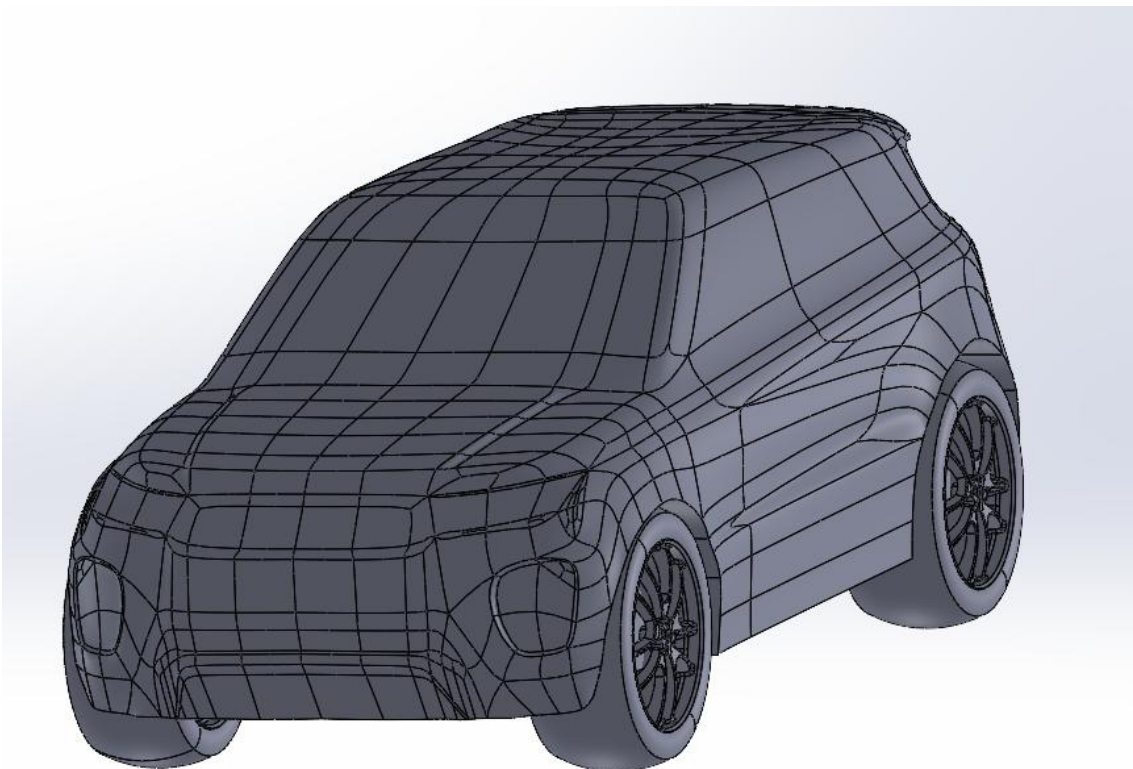


Figura 3-86: Range Rover completo solidworks

Optimizado

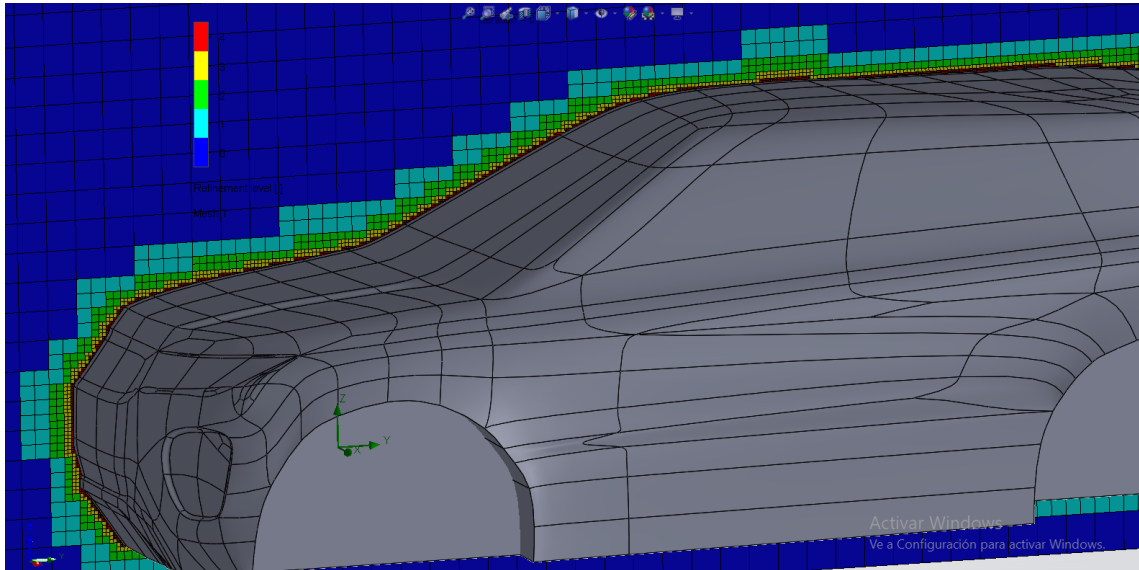
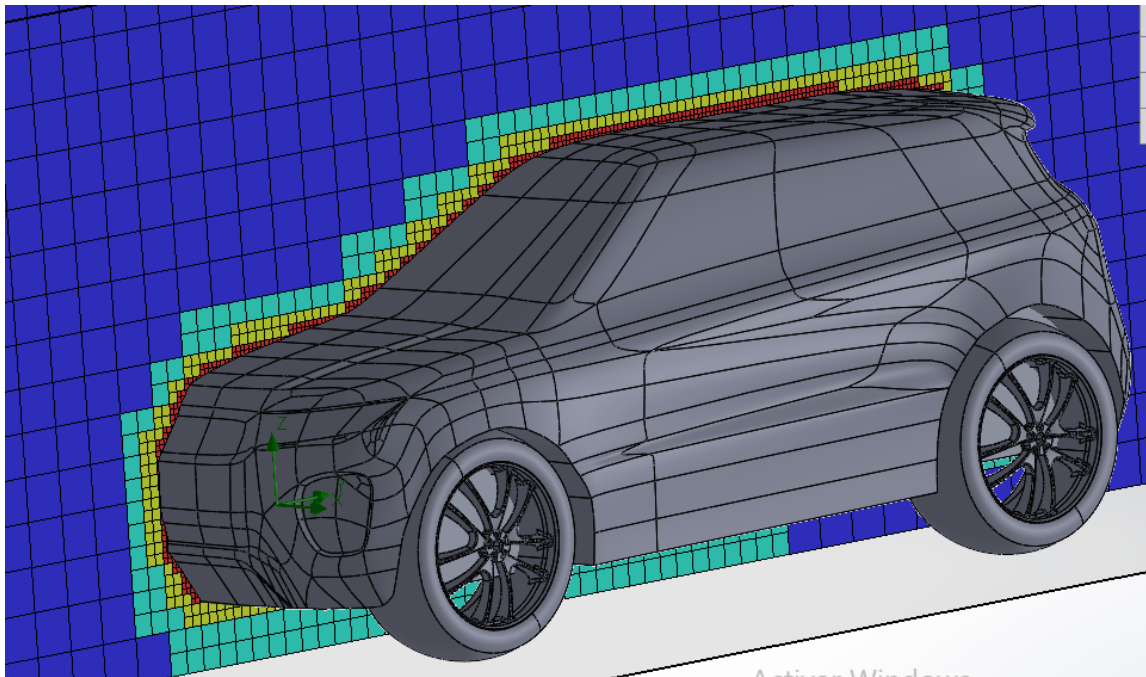


Figura 3-87: Mallado Range Rover



La aplicación de estas estrategias de mallado es un factor determinante para la confiabilidad de los resultados de CFD, ya que una malla bien diseñada es la base para una solución numérica precisa de las ecuaciones de flujo.

Una vez finalizada la malla se intenta resolver. Esto se consigue mediante la resolución de una cantidad ingente de ecuaciones diferenciales, entre ellas las que conocemos de la asignatura de “mecánica de fluidos” de la carrera. A continuación, se muestra una tabla con información relevante sobre el modelo a analizar. Destacar el costo computacional de esta operación, resultando en un tiempo de cálculo de más de 4 horas y un número de celdas fluidas que asciende a más de 1,600,000 celdas a calcular. Recordar que aunque este modelo fue una simplificación del modelo original, el número de celdas fluidas sigue siendo considerablemente grande. Esto refuerza la idea que se tenía de que CFD es una herramienta muy costosa.

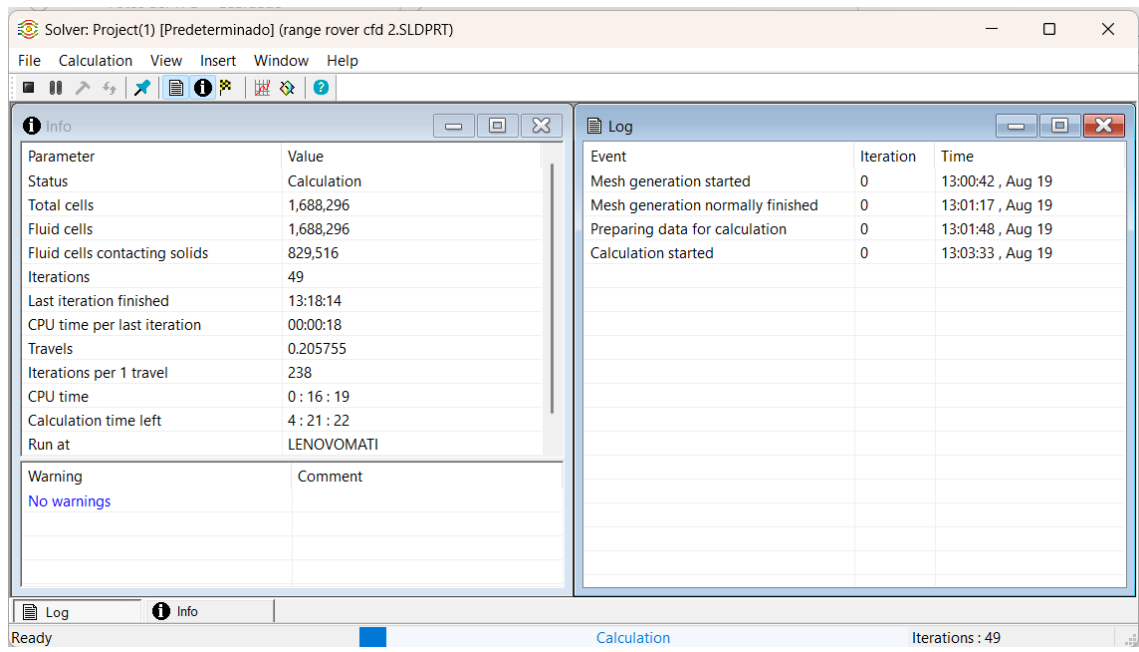


Figura 3-88: Solver Range Rover

4 RESULTADOS

The fundamental problem of communication is that of reproducing at one point either exactly or approximately a message selected at another point.

Claude Shannon, 1948

Los modelos CAD 3D del Land Rover Defender y el Range Rover Evoque se han desarrollado con éxito en CATIA V5, utilizando la metodología detallada en la sección 3.1. El uso de “Sketch Tracer” e “Imagine & Shape” permitió la importación y el posicionamiento preciso de planos y referencias visuales, sirviendo como guías fundamentales para la reconstrucción de la geometría. Para el Land Rover, la reconstrucción se basó en dimensiones publicadas para el modelo y una cuidadosa interpretación de fotografías históricas. Las líneas rectas del Defender facilitaron su modelado, aunque la ausencia de planos detallados requirió un enfoque de ingeniería inversa.

En contraste, el modelado del Range Rover Evoque exigió la aplicación de “Imagine and Shape” y “Generative Shape Design” (GSD) para capturar sus complejas superficies curvadas y transiciones suaves. El enfoque en la creación de superficies de "Clase A" con continuidad de curvatura fue fundamental para replicar la estética moderna y las características aerodinámicas inherentes al diseño del Evoque. Debido a un pequeño error de modelado, al intentar hacer detalles de la parrilla frontal se dejaron agujeros abiertos y los planos del faro cortaban a la carrocería. Esto resultó en la aparición de múltiples errores en el mallado que resultaron incorregibles. Por ello se decidió realizar de nuevo el modelado del Range Rover con más cuidado y priorizando funcionalidad a la estética de los detalles. Estos modelos CAD 3D son la representación digital precisa de las carrocerías, listas para el análisis aerodinámico.

Las simulaciones CFD se llevaron a cabo en SolidWorks Flow Simulation para ambos modelos, siguiendo la metodología de configuración descrita en la sección 3.2. Se aplicaron condiciones de contorno realistas, incluyendo una velocidad de flujo de aire de 120 km/h, lo que es crucial para replicar fielmente las condiciones de conducción y obtener resultados representativos de las fuerzas aerodinámicas. La estrategia de mallado, con refinamientos de volumen y superficie, junto con el mallado adaptativo, aseguró una resolución adecuada del flujo en las regiones críticas y la captura precisa de la capa límite, lo que es vital para la fiabilidad del coeficiente de arrastre.

4.1 Land Rover Defender 2008

Una vez mallado y resuelto el modelo, se puede proceder con la visualización patrones de los flujos de aire, mapas de presión alrededor de los vehículos y con el cálculo de los datos requeridos. Para ello se usará el visualizer incorporado en SolidWorks, ya que es bastante intuitivo y fácil de usar.

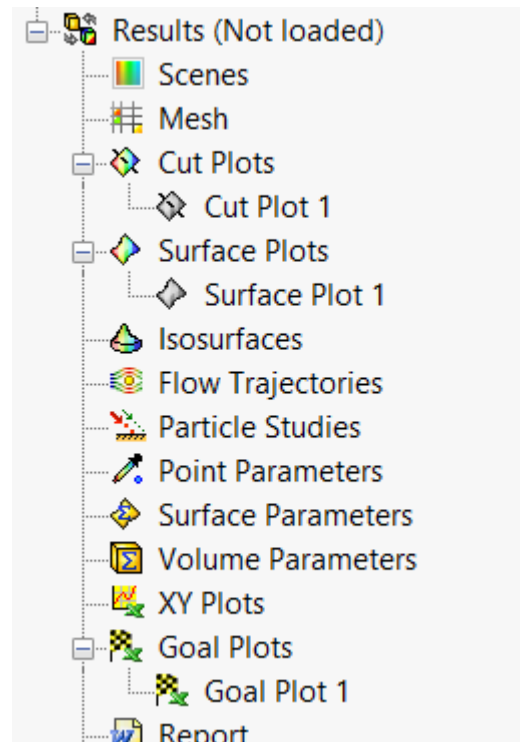


Figura 4-1: Visualizer "SolidWorks"

Una vez cargado los datos, se procede a insertar planos que corten el vehículo. Dicho corte generará un plano en el cual insertaremos los mapas de presión, llamados "Cut Plots".

En estos mapas aparecen zonas en color rojo y en color azul. Las zonas en color rojo indican alta presión, y por tanto baja velocidad, y al contrario con las zonas azules, que indican baja presión y, por lo tanto, alta velocidad.

Cabe destacar que algunas leyendas muestran presión relativa, por lo que sería un aumento o una disminución respecto a la presión atmosférica. También se puede incluir la leyenda de la presión total, aunque la relativa resulta más significativa.

En el siguiente mapa podemos comprobar como el aire al impactar contra la superficie frontal del vehículo se ve forzado detenerse casi por completo, Es por ello que, adquiere un color rojo muy intenso. Este se llama el punto de estancamiento. Es fácil comprobar que cumple el principio de Bernoulli, el cual decía que cuando la presión aumenta la velocidad disminuye.

Se muestra a continuación la leyenda que aparece en los mapas de presión relativa del vehículo. Esta leyenda ayudará a comprender la magnitud de las bolsas de aire de una manera más sencilla.

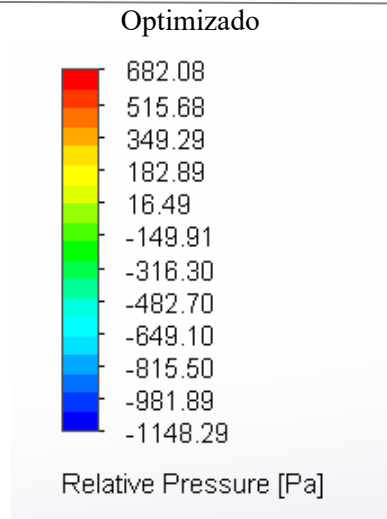


Figura 4-2: Leyenda de presiones

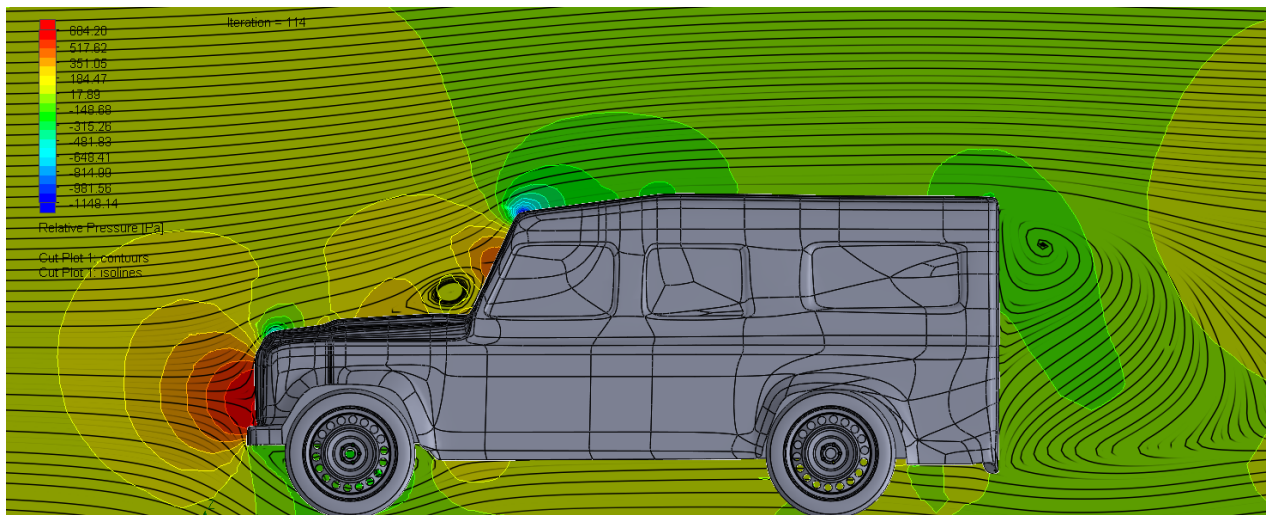


Figura 4-3: Cut Plot, vista lateral I

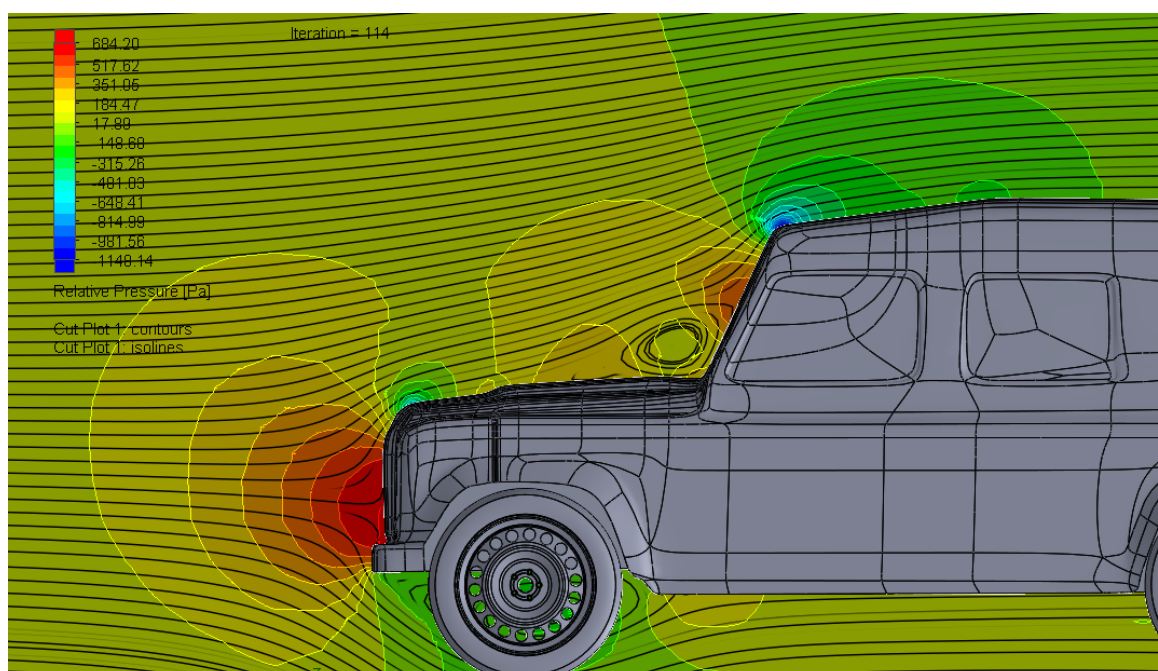


Figura 4-4: Cut Plot, vista lateral II

Como era de esperar este mapa muestra una zona de alta presión en la región frontal del vehículo, particularmente en parrilla y faros. Esta zona es la que crea la fuerza principal que contribuye al arrastre depresión del vehículo, que constituye una fuerza que se opone directamente al avance de este.

Además, también se pueden observar zonas en verde. Esto muestra una zona De baja presión, donde el aire, se acelera el fluir por las curvas. Según Bernoulli, esta aceleración crea una caída de presión. En nuestro caso se observa una transición rápida desde la alta hasta la baja presión este fuerte gradiente de presión acelera el flujo y lo dirige sobre la superficie del vehículo. La forma angulosa y recta del Land Rover defender 2008 favorece la separación temprana del flujo en comparación con otras formas más redondeadas, como ya se verá.

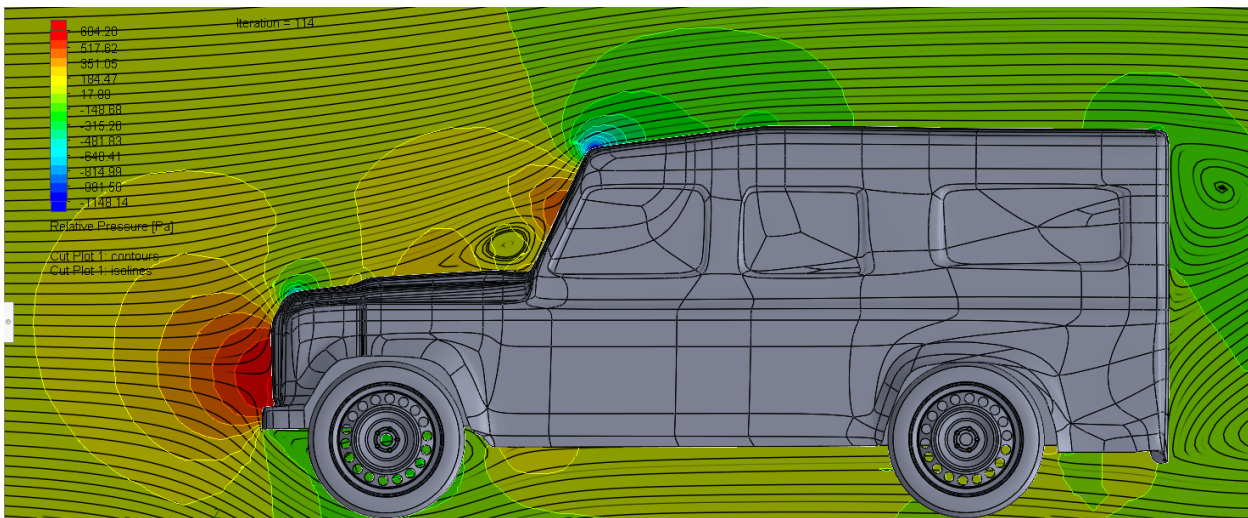


Figura 4-5: Cut Plot, vista lateral III

En la parte trasera, se produce una zona de recirculación del aire, donde el coche al avanzar deja una zona de baja presión que rápidamente es ocupada por el aire, produciéndose la recirculación. Esto crea una región de flujo turbulento llamada estela. En esta zona la presión baja, arrastrando al vehículo hacia atrás y ralentizándolo. Esta fuerza se conoce como “arrastre por presión” o “drag”. Cabe destacar, que en la zona trasera se produce una zona de baja presión, aunque solidWorks interpreta que es muy pequeña y por eso no la representa. Aunque al aumentar la escala si se pueda ver. Aquí se ha representado con una escala de nivel 12, por lo que se representarían hasta 12 escalones diferentes de presión.

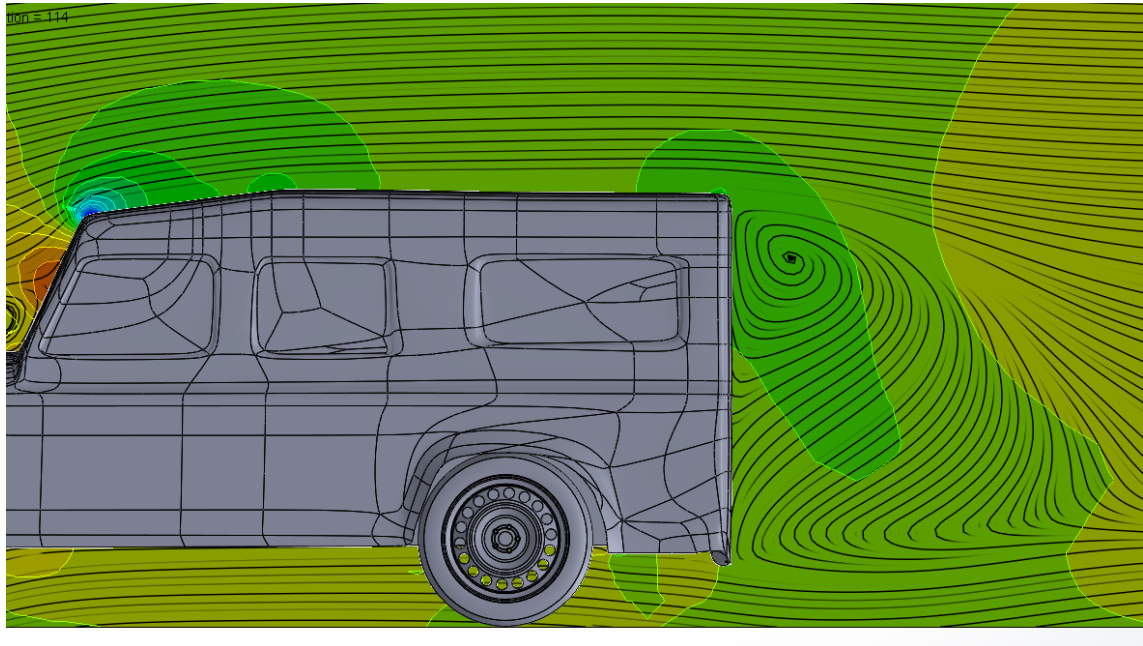


Figura 4-6: Cut Plot 4, vista lateral

Otra forma muy clara de ver los mapas de presión es proyectándolos en la superficie del vehículo, algo que se conoce como “Surface Plot”. De nuevo, se puede apreciar zonas de alta y baja presión de manera muy clara.

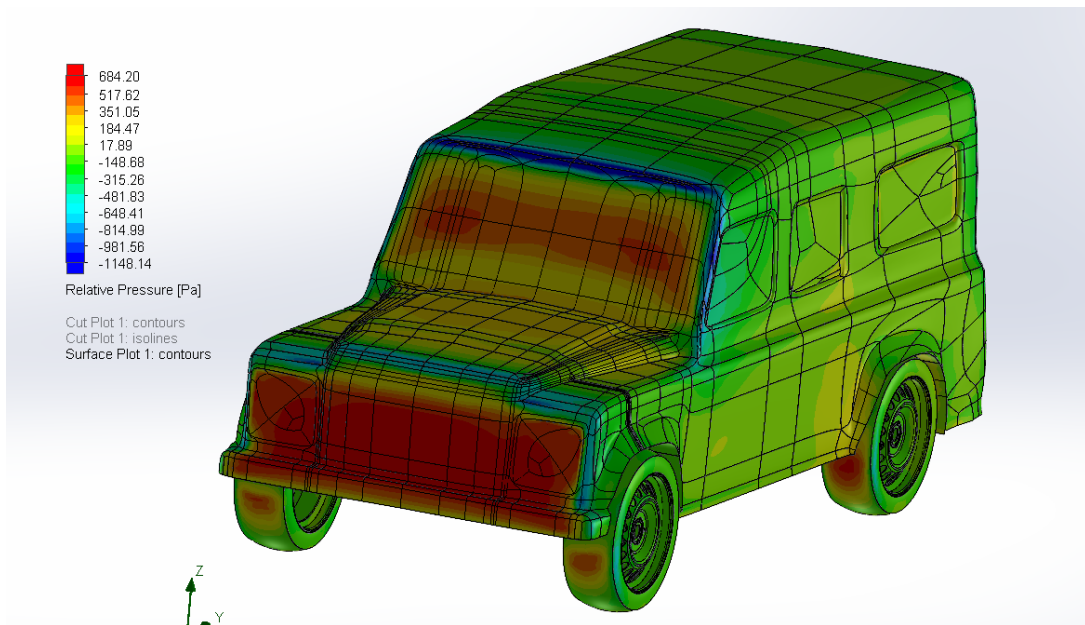


Figura 4-7: Surface Plot, vista general I

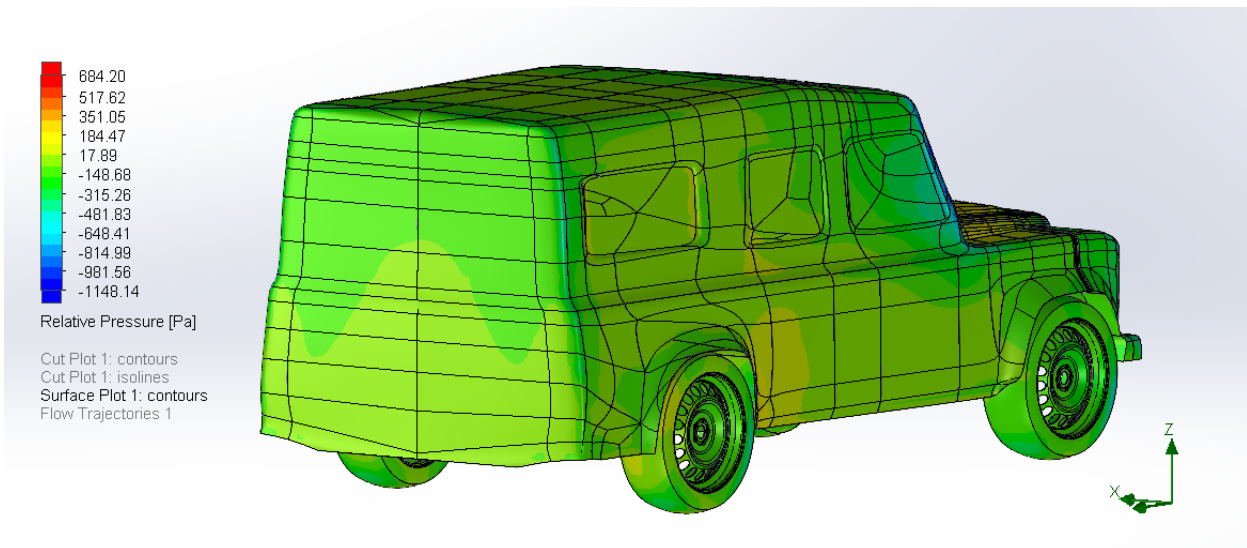


Figura 4-8: Surface Plot, vista trasera II

Por último, Solidworks permite combinar ambos mapas de presión.

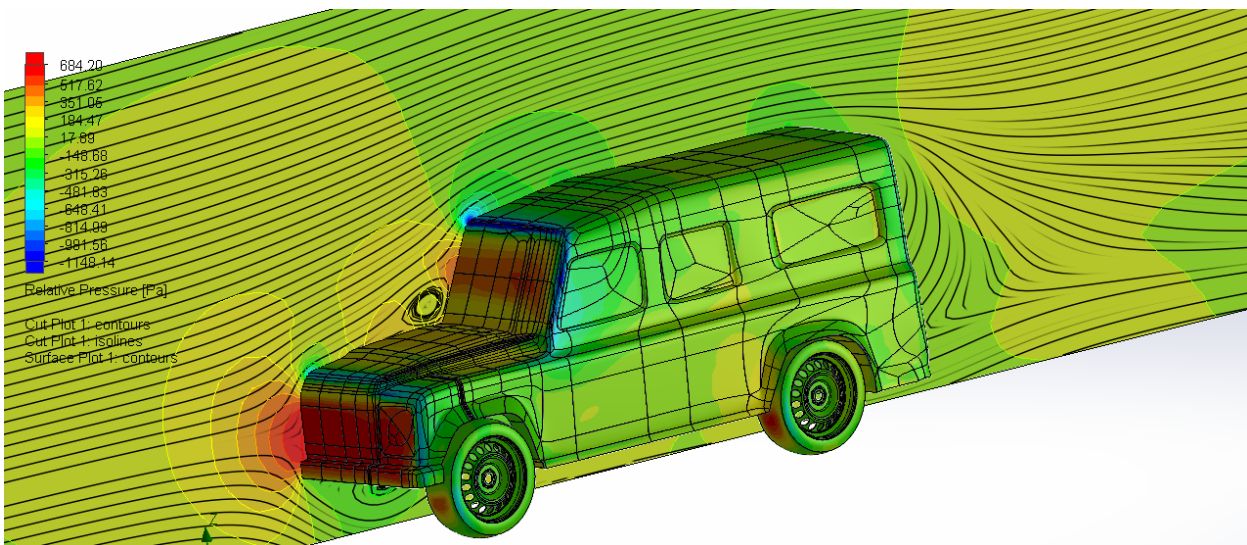


Figura 4-9: Cut Plot y Surface Plot combinados, vista general

Otro elemento muy importante son los “Flow trajectories” o trayectorias de flujo. Esto muestra el camino que sigue una partícula en el fluido. Son excelentes para visualizar patrones de flujo complejos. En nuestro análisis se puede apreciar como el flujo tiene que rodear el vehículo en la parte frontal, manteniéndose adherido hasta el

borde de la parte trasera. En este punto podemos ver la separación de flujo.

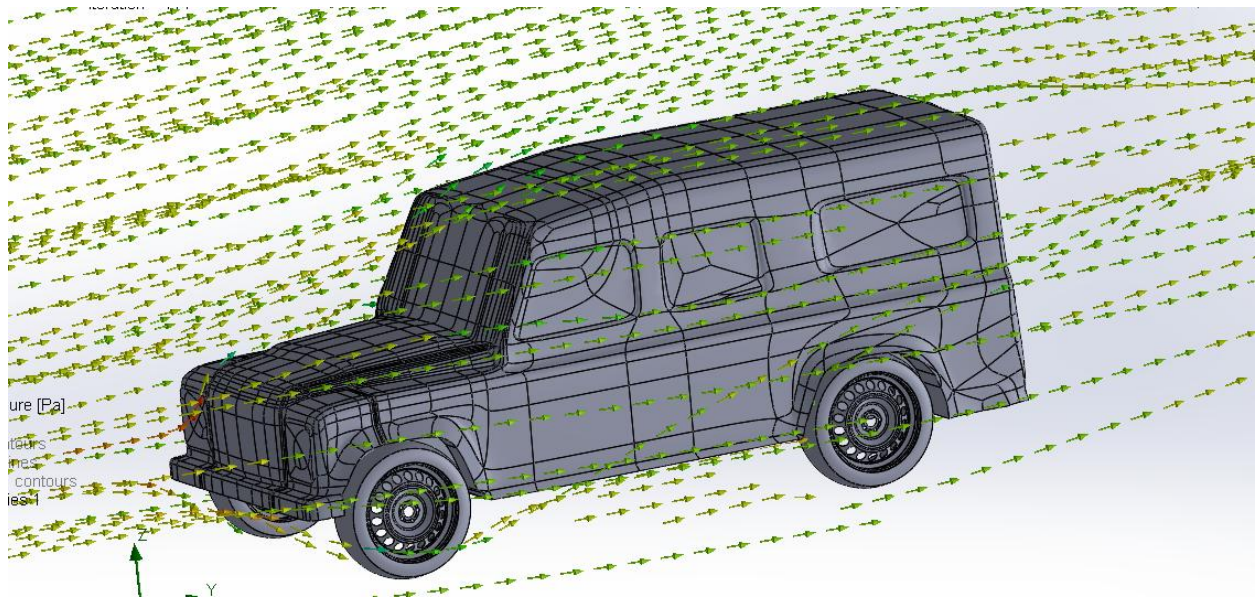


Figura 4-10: Flow Trajectories

También se pueden apreciar algunas zonas con vórtices. Un vórtice es energéticamente costoso y contribuye al arrastre. Cabe destacar que no se han incluido las ruedas en el análisis debido a su complejidad para hacerlas girar en el propio análisis.

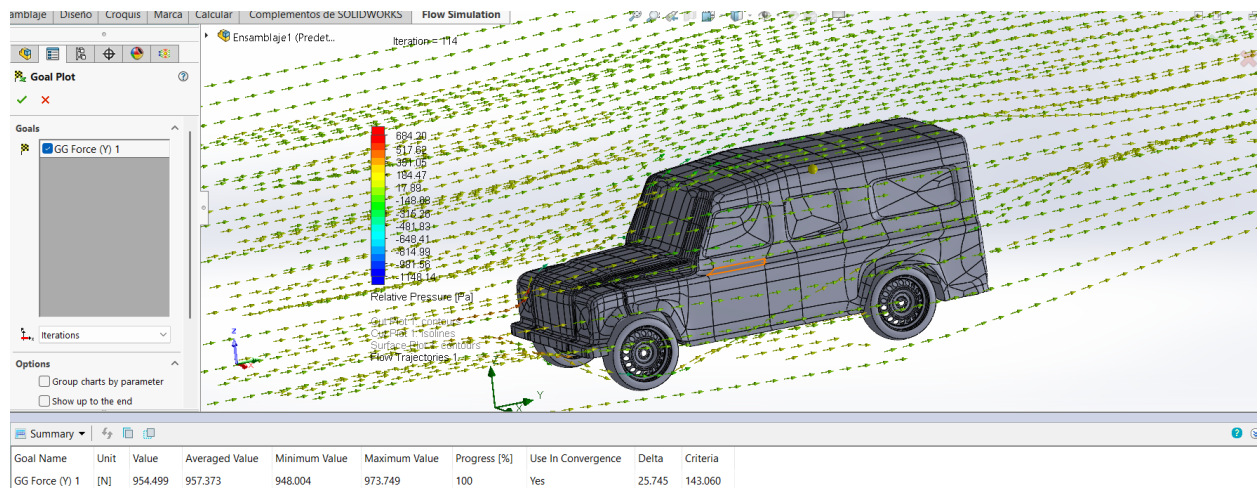


Figura 4-11: Flow trayectories y resultados

Gracias a la potente herramienta que es SolidWorks, se puede tener una estimación bastante aproximada del arrastre por presión o drag total que ha sufrido el vehículo. Esto será un elemento clave para calcular el coeficiente aerodinámico del vehículo, el cual calcularemos con la fórmula mencionada en el apartado 2.2.1.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Force (Y) 1	[N]	954.499	957.373	948.004	973.749	100	Yes	25.745	143.060

Figura 4-12: Resultados

Como se puede observar, se ha obtenido un valor promedio de la fuerza de arrastre en la dirección del coche de **D = 957,373 N**. Para proceder con el cálculo se necesita conocer el área frontal del vehículo, el cual de nuevo, se calculará con solidWorks. Para ello se proyecta el vehículo en un plano perpendicular a la dirección del flujo y se mide el área.

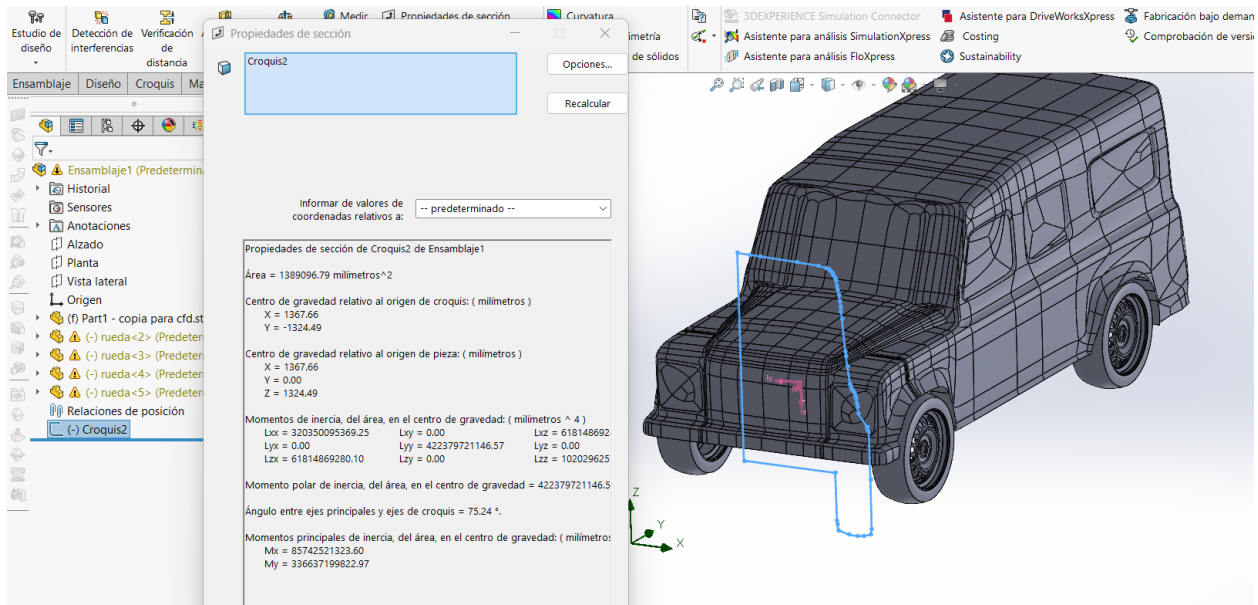


Figura 4-13: Medición del area frontal

De manera muy sencilla se obtiene el área frontal de la mitad de la sección, Con un valor de $1,389 \text{ m}^2$, por tanto, el área total será de: **Af = 2,778 m²**.

4.1.1 Cálculo del coeficiente de resistencia aerodinámico Cd

El coeficiente de arrastre (Cd) es un parámetro adimensional que define la eficiencia aerodinámica de un vehículo, cuantificando cómo su forma influye en la resistencia al avance a través de un fluido.

Para su determinación experimental, se usa la siguiente expresión: Sustituyendo los valores obtenidos experimentalmente:

$$Cd = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 Af}$$

Sustituyendo los valores obtenidos experimentalmente:

- Fuerza de arrastre, **D = 957,373 N**
- Velocidad, **U = 120 km/h = 33.333 m/s**
- Área frontal, **Af = 2.778 m²**
- Densidad del aire, **$\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3$**

Sustituyendo, se obtiene un **Cd = 0,515**.

4.2 Range Rover Evoque 2019

Se va a proceder ahora a mostrar los resultados del análisis aerodinámico realizado en el Range Rover 2019. Se muestra a continuación la leyenda que aparece en los mapas de presión relativa del vehículo. Esta leyenda ayudará a comprender la magnitud de las bolsas de aire de una manera más sencilla.

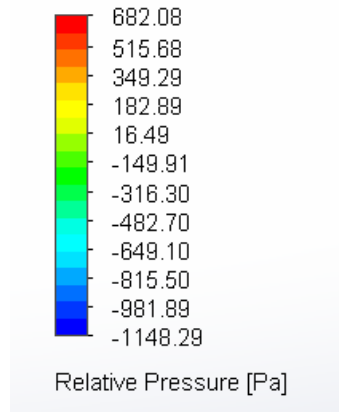


Figura 4-14: Leyenda de presiones relativas

Al analizar aerodinámicamente el Range Rover, se evidencia la filosofía de diseño evolutivo en comparación con su antecesor. Se puede observar una gestión del flujo mucho más eficiente controlada, creando un diseño más aerodinámico. También se puede observar como el mapa de presiones tiende a unos tonos más verdosos, a diferencia de los mapas visto anteriormente, donde los colores tendían a tonos amarillentos.

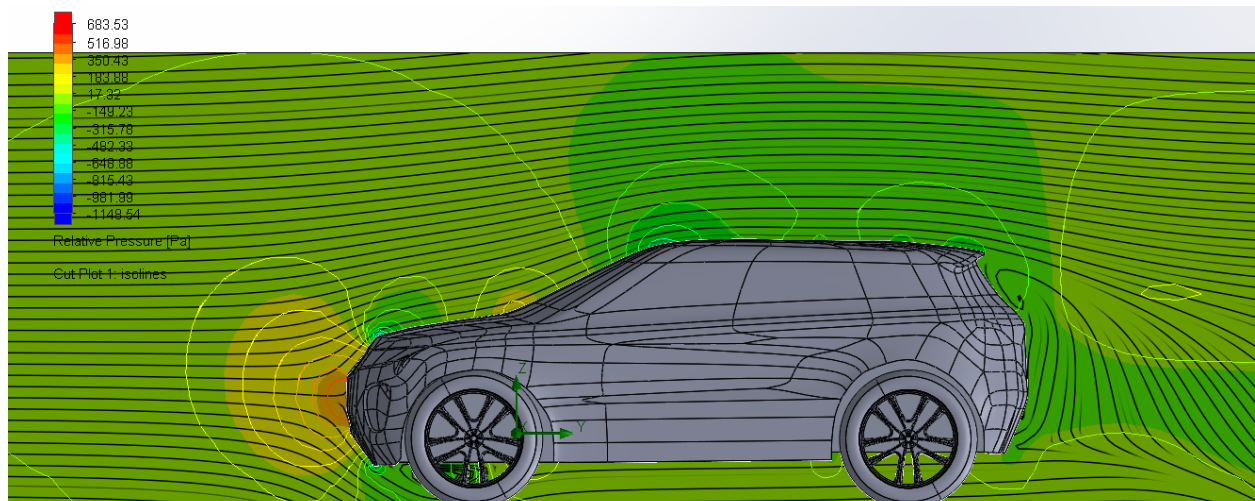


Figura 4-15: "Cut plot ", Range Rover I

Como era de esperar, la zona frontal sigue siendo el claro punto de impacto y estancamiento del aire, mostrando una extensa bolsa de color rojo. Sin embargo, con una forma más redondeada del capó, que ayuda a redirigir el flujo de aire evitando el estancamiento, tenemos unas zonas de alta presión más pequeñas.

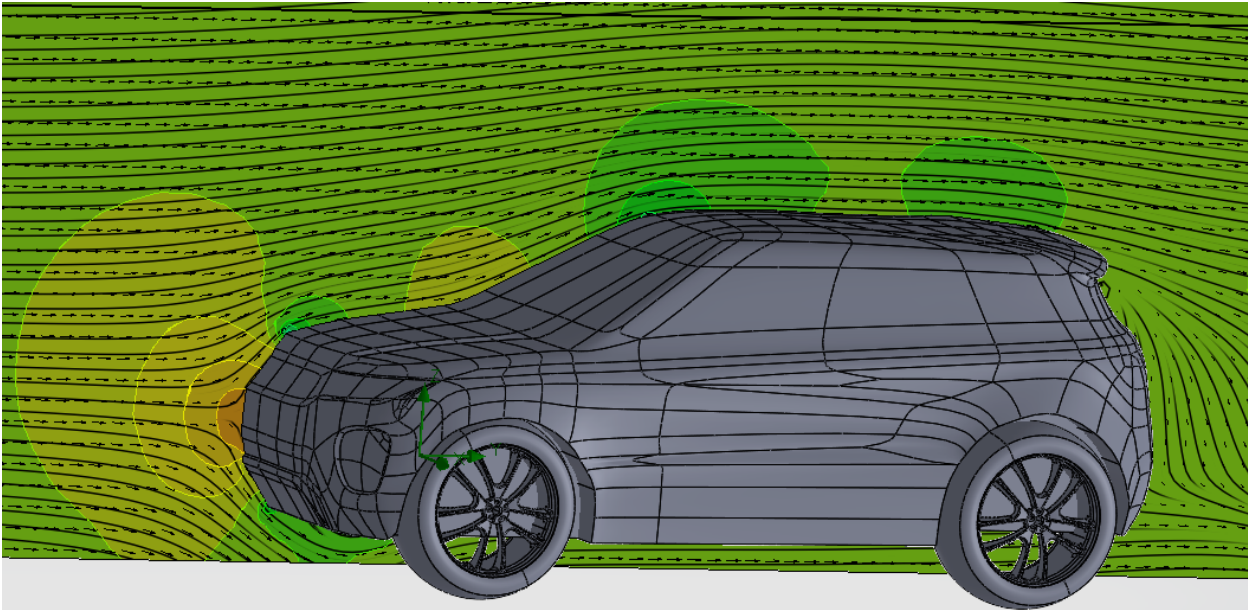


Figura 4-16: "Cut plot ", Range Rover II

La transición de la luneta delantera al techo es significativamente más suave y por tanto aerodinámica. A diferencia del corte casi vertical del Land Rover, El Range Rover presenta unas transiciones más suaves.

En las zonas más rápidas se observan bolsas de aire de baja presión, de color verde. No obstante, su intensidad es relativamente pequeña, Pero ayuda a dirigir el flujo de manera correcta. La presencia del spoiler también ayuda a limpiar el flujo que se desprende, dirigiendo el aire hacia abajo y reduciendo el tamaño de la estela en comparación con el Land Rover. Aunque este elemento se puede optimizar, da una sensación de elegancia y modernismo característico de esta marca. En la parte trasera, esta vez si se puede apreciar una bolsa de aire a baja presión que aumentaría la resistencia aerodinámica del vehículo, como ya se comentó.

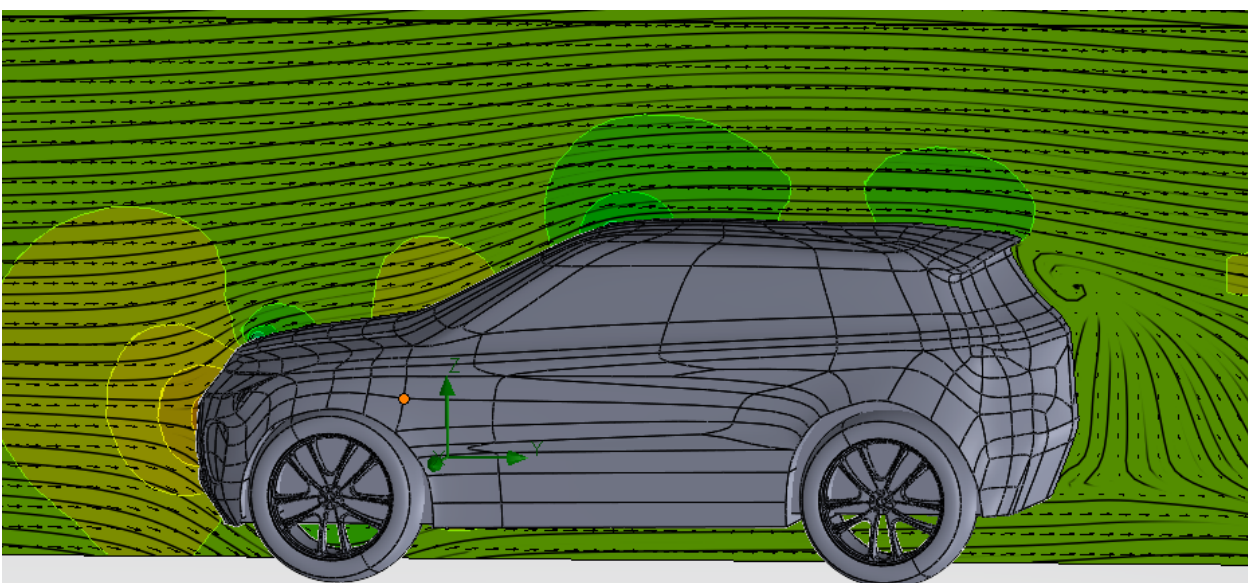


Figura 4-17: "Cut plot ", Range Rover III

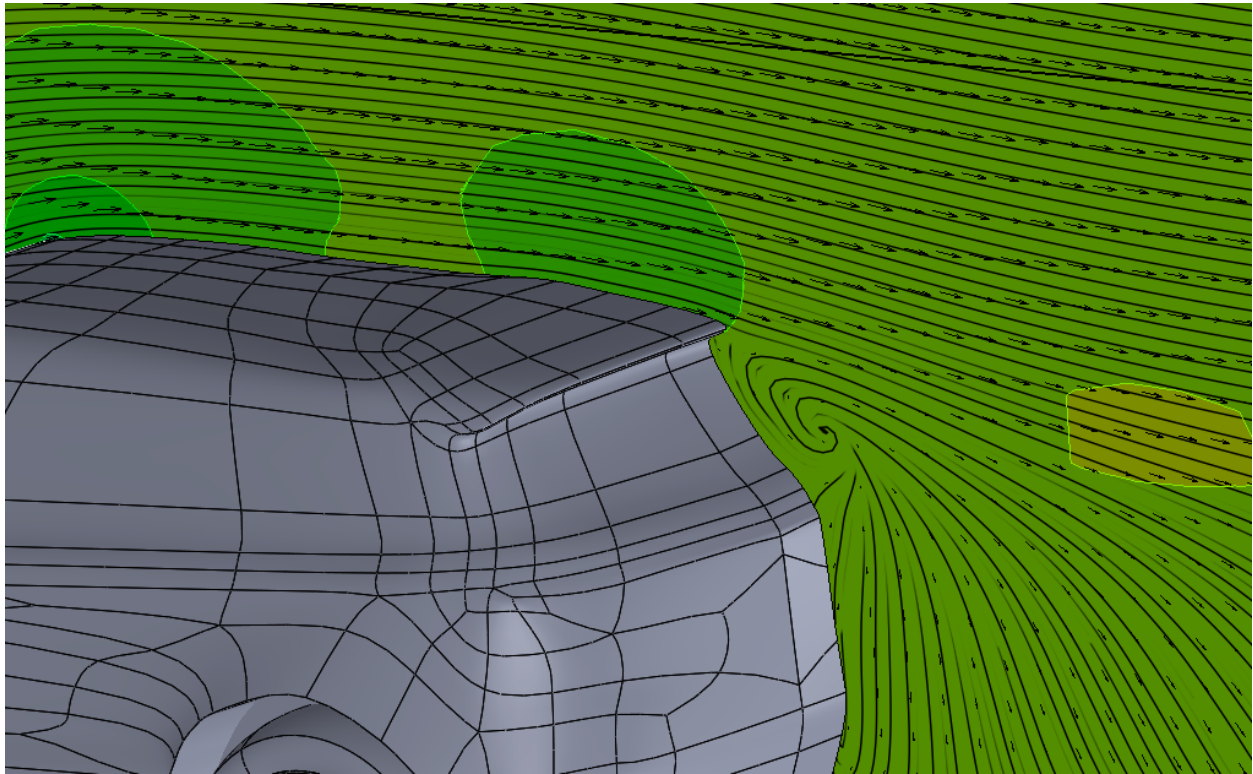


Figura 4-18: "Cut plot ", Range Rover IV

Cabe destacar, que este análisis no es cien por cien fiel a la realidad ya que en la zona de mayor presión es donde iría situada la parrilla del vehículo, sistema de ventilación que absorbería aire del exterior, creando una succión de ese aire de la zona roja. Esto disminuiría la resistencia aerodinámica del vehículo, pero es un análisis muy difícil de hacer con ordenadores convencionales.

A continuación, se muestra una imagen de los "Surface plot" generados por SolidWorks. Esto genera un mapa de presión en la superficie del vehículo donde muestra muy bien las zonas de alta y baja presión. Este Surface plot confirma visualmente el área de estancamiento en la parte frontal del vehículo, y una transición suave hacia el capó y posteriormente el techo del vehículo. A la vista de esta imagen, es razonable colocar la parrilla del vehículo ocupando la zona roja, succionando así la masa de aire estancado.

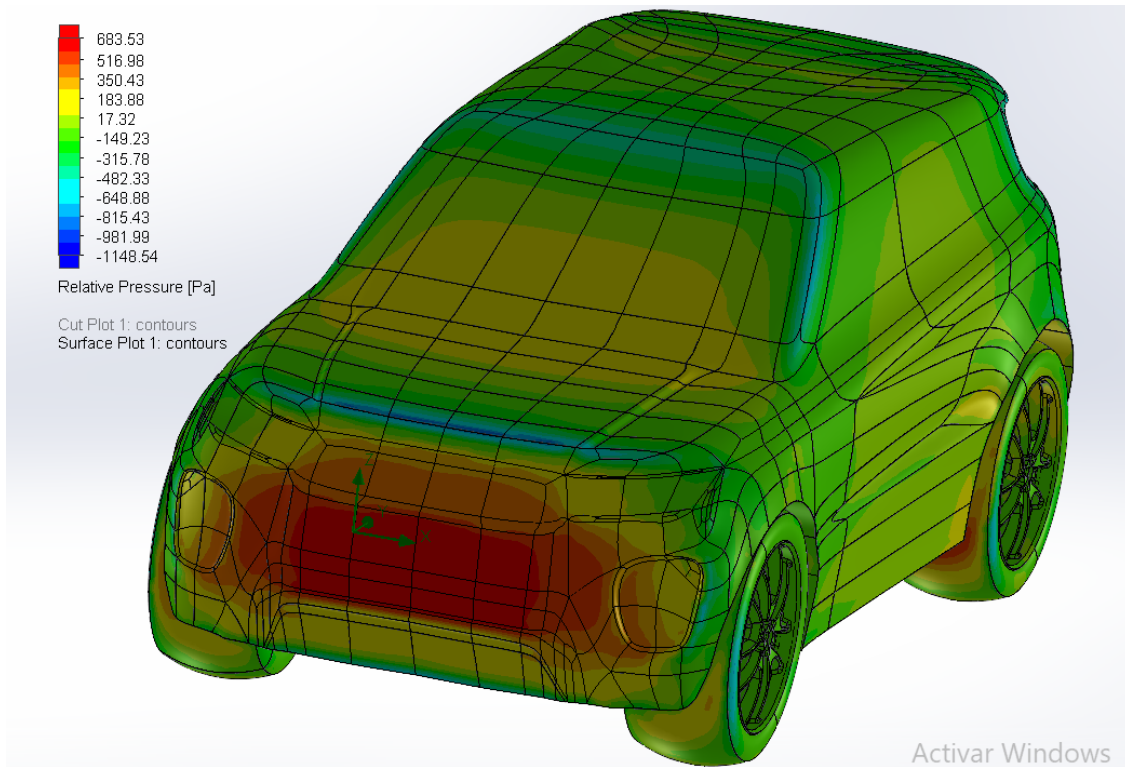


Figura 4-19: Surface Plot, vista general I

No pudiendo simular una parrilla en SolidWorks, se optará por intentar desviar esa masa de aire, creando un frontal más afilado, Aunque esto se explicará en profundidad más adelante.

De nuevo podemos ver cómo los bordes más suaves generan una aceleración del flujo en tonos verdes, incluso azules.

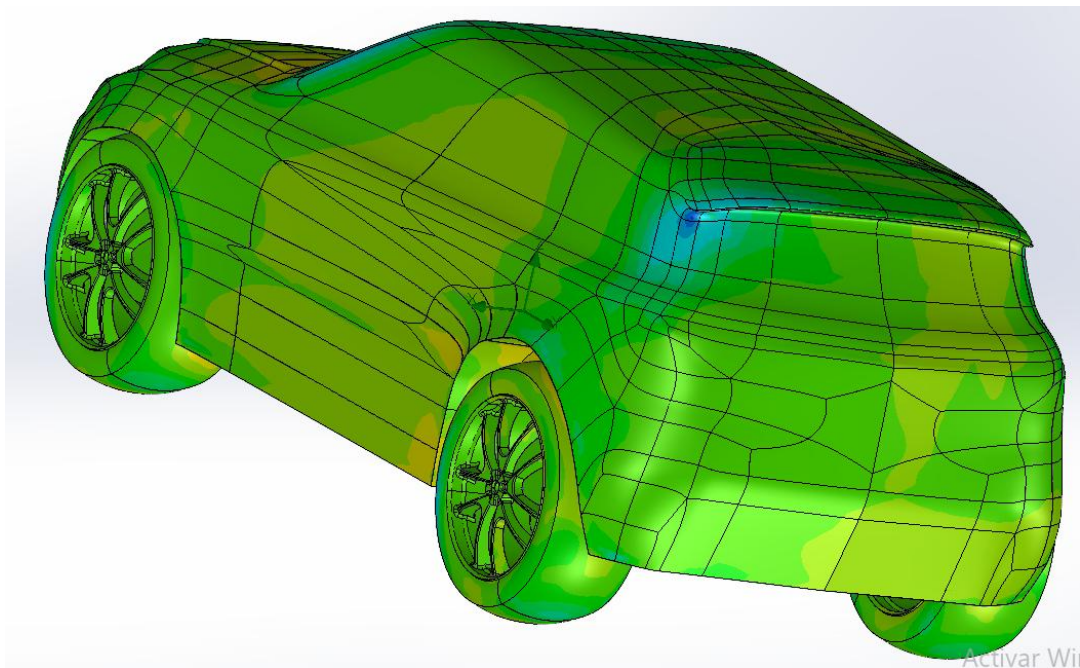


Figura 4-20: Surface Plot, vista trasera II

De nuevo se observa como el spoiler acelera el flujo.

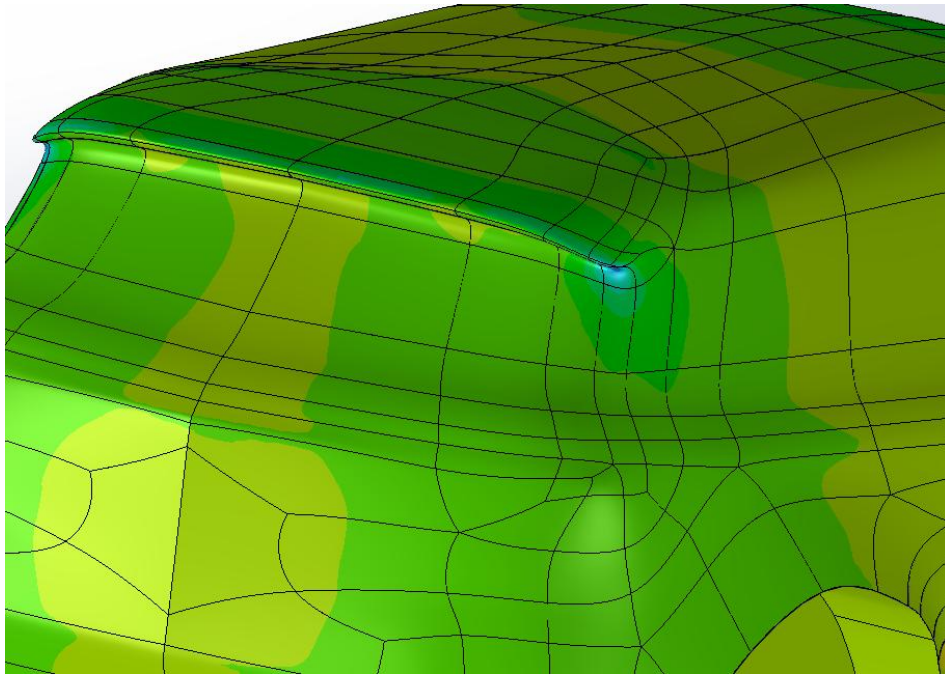


Figura 4-21: Surface Plot, vista trasera III

Combinando el mapa de presión o “Cut plot” con el “Surface plot”, Se puede observar como el análisis tiene un completo sentido físico.

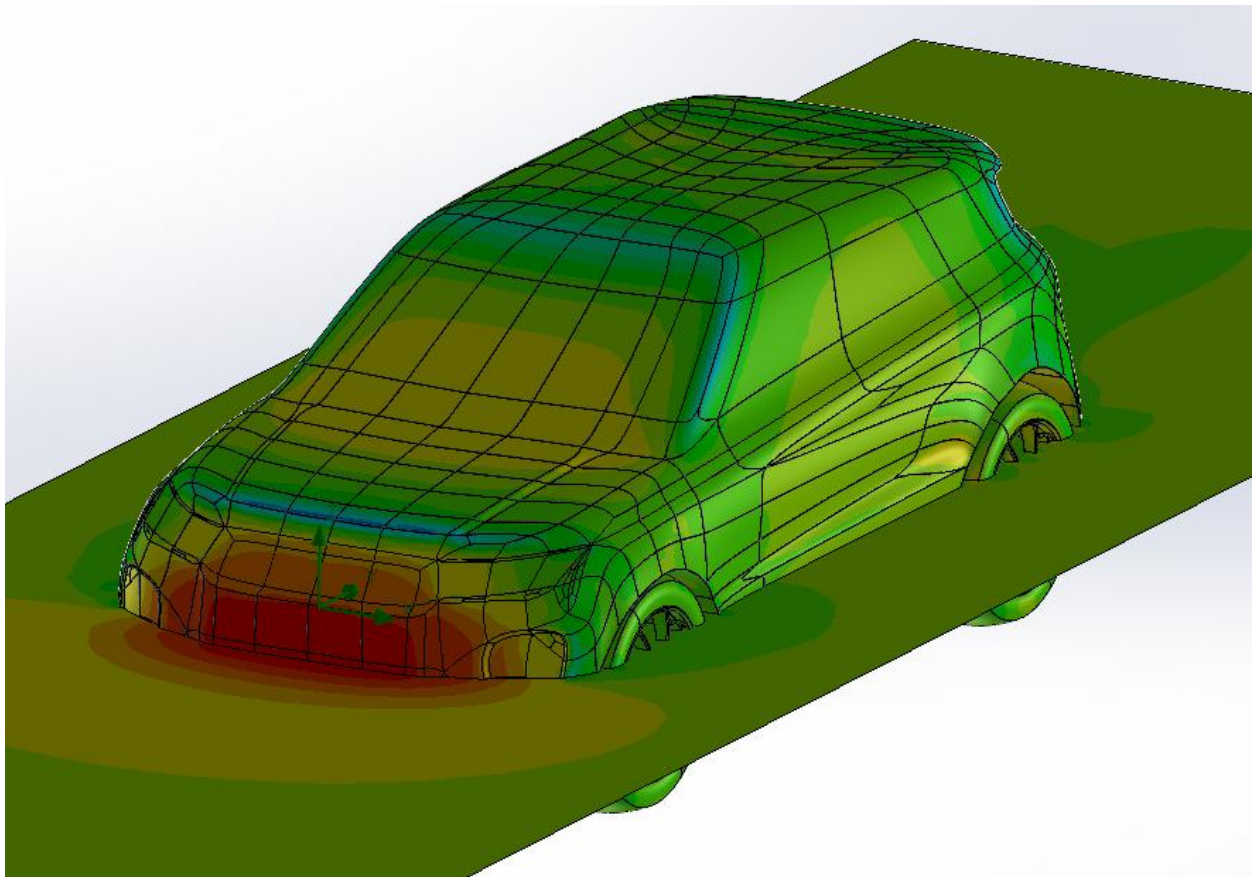


Figura 4-22: Cut Plot y Surface Plot combinados

Las líneas de flujo alrededor del vehículo son ligeramente más ordenadas que las de su antecesor. En contraste con las trayectorias en el frontal del Land Rover, aquí se muestran unas trayectorias menos angulosas, contribuyendo a una menor sobrepresión en la zona frontal. Debido a la relativa poca influencia del efecto suelo, no se ha incluido en este análisis

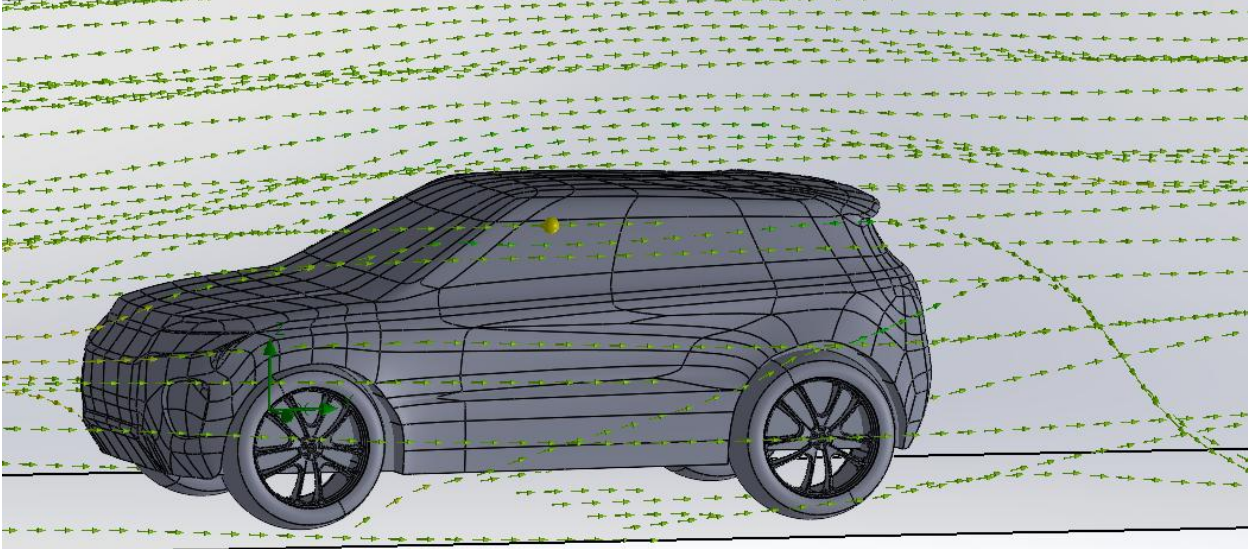


Figura 4-23: Flow Trajectories

Una vez terminado este análisis, se procede a ver la fuerza aerodinámica en la dirección del flujo.

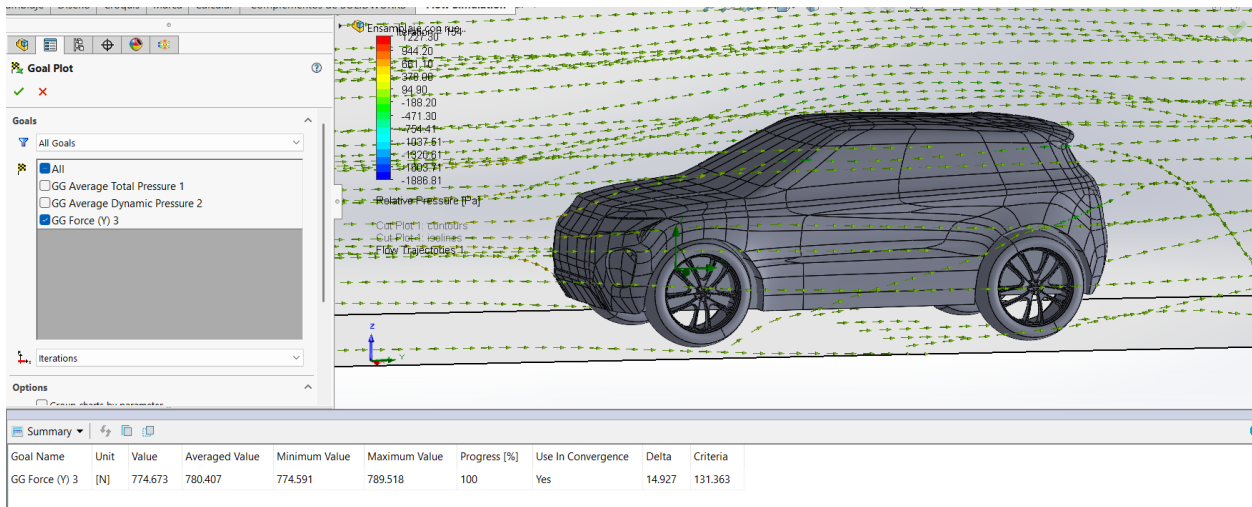


Figura 4-24: Resultados de fuerza de arrastre, Range Rover

Como se puede observar, se ha obtenido un valor promedio de la fuerza de arrastre en la dirección del coche de **$D = 780,407 \text{ N}$** .

Para calcular el coeficiente de resistencia aerodinámica se requiere primero calcular el área frontal del vehículo. De nuevo se hará uso de las herramientas que posee SolidWorks.

Optimizado

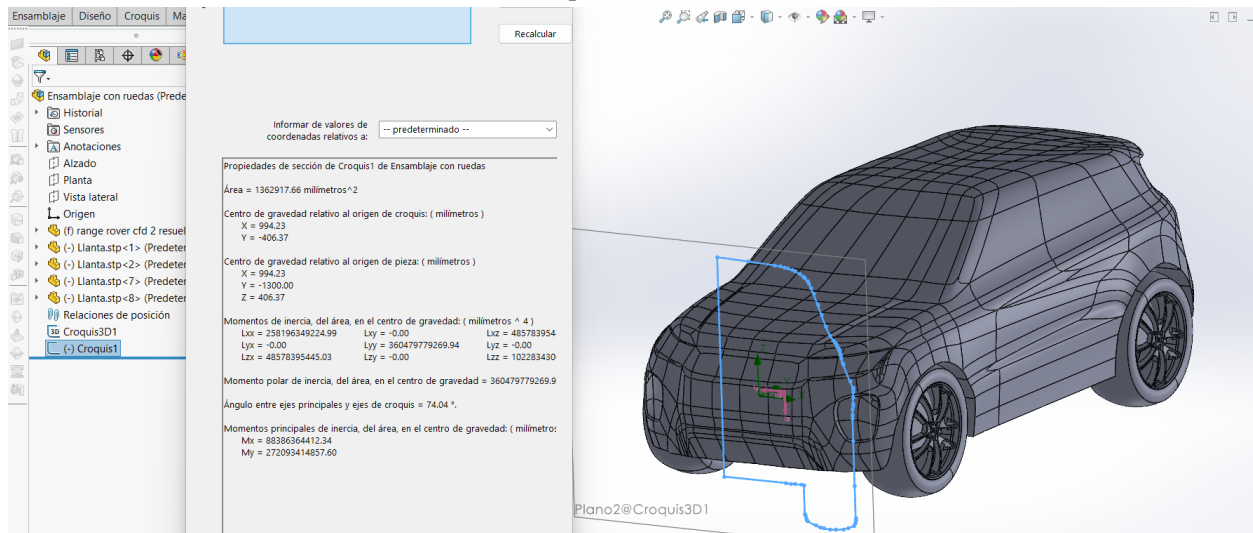


Figura 4-25: Cálculo de area frontal, range Rover

Una vez proyectada la mitad del vehículo únicamente se tiene que multiplicar por dos, obteniendo el área total.

Propiedades de sección de Croquis1 de Ensamblaje con ruedas

Área = 1362917.66 milímetros²

Figura 4-26: Area frontal, Range Rover

De manera muy sencilla se obtiene el área frontal de la mitad de la sección, Con un valor de 1,363 m², por tanto, el área total será de: **Af = 2,726 m²**.

4.2.1 Cálculo del coeficiente de Resistencia aerodinámico Cd

El coeficiente de arrastre (Cd) es un parámetro adimensional que define la eficiencia aerodinámica de un vehículo, cuantificando cómo su forma influye en la resistencia al avance a través de un fluido.

Para su determinación experimental, se usa la siguiente expresión: Sustituyendo los valores obtenidos experimentalmente:

$$Cd = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 Af}$$

Sustituyendo los valores obtenidos experimentalmente:

- Fuerza de arrastre, **D = 780,407 N**
- Velocidad, **U = 120 km/h = 33.333 m/s**
- Área frontal, **Af = 2.726 m²**
- Densidad del aire, **ρ = 1.204 kg/m³**

Sustituyendo, se obtiene un **Cd= 0,403**.

5 PROPUESTA DE MEJORA

Tomando como referencia el diseño del Range Rover, caracterizado por una estética robusta cuadrada y con su clara identidad visual, se ha realizado una propuesta de mejora centrada principalmente en la mejora aerodinámica. Cabe destacar que la mejora no ha sido muy notable ya que perdería esa esencia de SUV, como lo haría por ejemplo el coche más aerodinámico de la actualidad, el Tesla model s.

5.1. Diseño de la propuesta de mejora

Para dicha propuesta como las mejoras se han centrado en la zona del morro y zona trasera, donde los mapas de presión se encontraban los comportamientos más desfavorables para la aerodinámica. Para ello se ha intentado reducir la zona de alta presión en el morro del coche y la zona de baja presión en la parte trasera del coche.

Para la modificación de la parte trasera se ha eliminado el alerón característico y se ha suavizado la terminación del coche. En el diseño original, se produce una caída abrupta de la presión causada por el alerón trasero. Esto crea una separación de flujo notablemente grande, creando una zona de baja presión turbulenta detrás del vehículo, que succiona el vehículo hacia atrás, generando un mayor arrastre.

La nueva silueta que se quiere conseguir debe acercarse a la forma de lágrima, forma aerodinámica por excelencia.

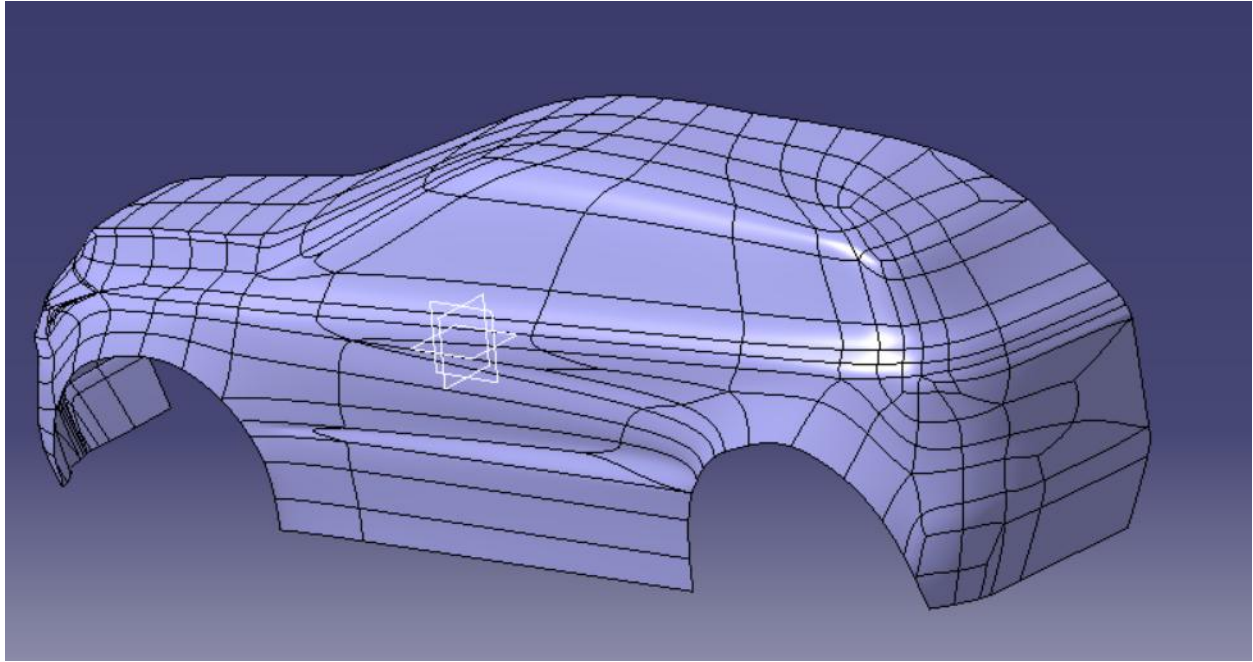


Figura 4-27: Boceto de la propuesta de diseño optimizado, vista trasera

En cuanto a la parte frontal, en el diseño original, los bordes rectos y pronunciados han sido ligeramente aplanados. Esto genera un ángulo de ataque más favorable dirigiendo el flujo de manera más eficiente hacia la luna delantera. Esto reduce la zona de alta presión frontal que se tenía en el vehículo original. La modificación no ha sido excesivamente vistosa ya que no queríamos perder ese carácter visual icónico de este modelo, además de que un borde muy afilado en el frontal del coche sería muy peligroso para los peatones.

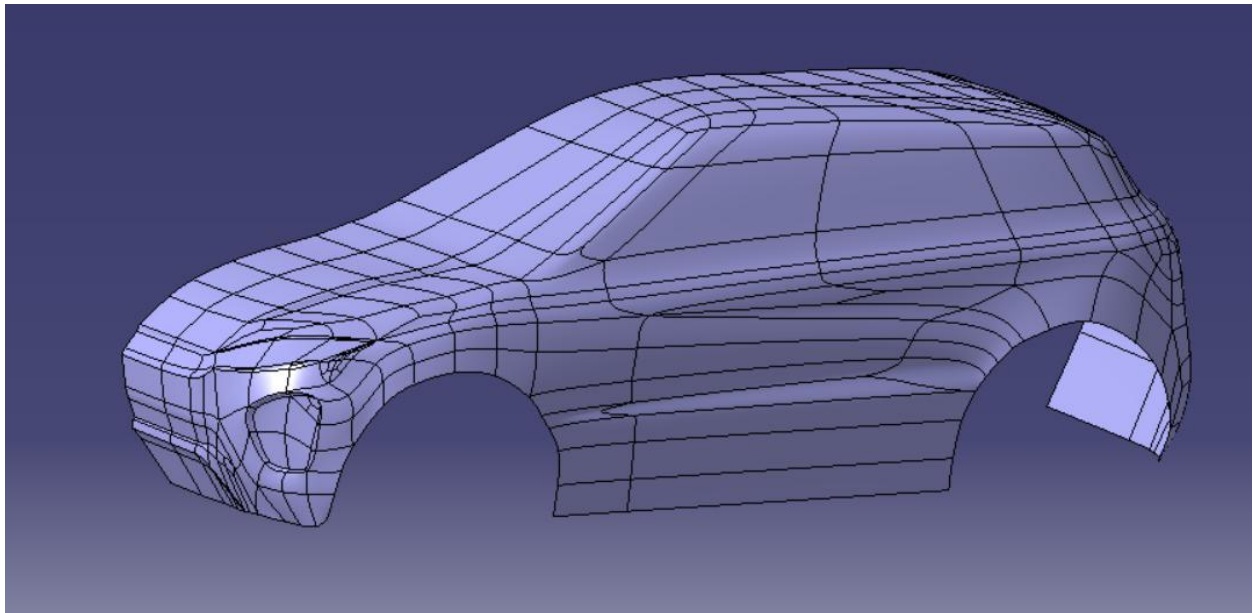


Figura 4-28: Boceto de la propuesta de diseño optimizado, vista lateral

en este apartado se deja de lado la estética, intentando llegar a una alta eficiencia aerodinámica. Se puede observar que con ligeras modificaciones el vehículo se acerca más a las tendencias actuales observadas en vehículos eléctricos, como el BYD Seal U, ya que estos no poseen una parrilla frontal, y tienen que optimizar la aerodinámica de la parte delantera. También se han aplanado los relieves de los detalles, para crear una superficie

más suave, que favorezca el flujo suave y sin turbulencias.

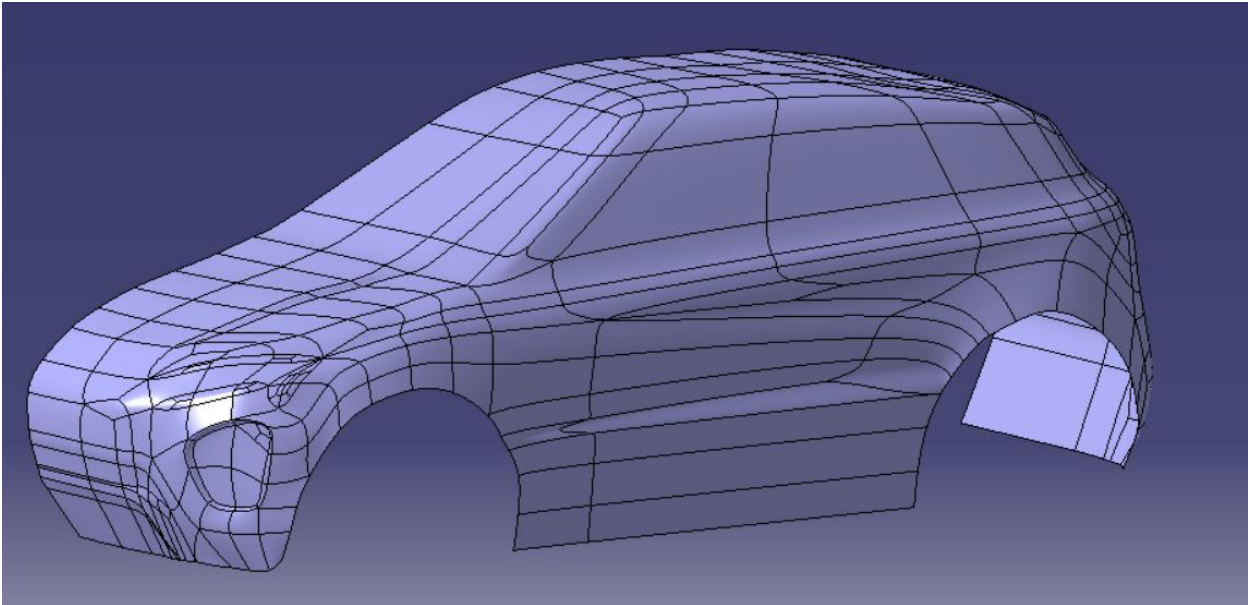


Figura 4-29: Boceto de la propuesta de diseño optimizado, vista general

Como conclusión, aunque las modificaciones realizadas alteran significativamente la estética visual característica del Range Rover, en este apartado esas modificaciones están justificadas desde el punto de vista aerodinámico. El parecido con los vehículos eléctricos modernos no es una casualidad, sino un síntoma de cómo la industria va avanzando. Qué este cambio merezca la pena o no es una decisión personal.

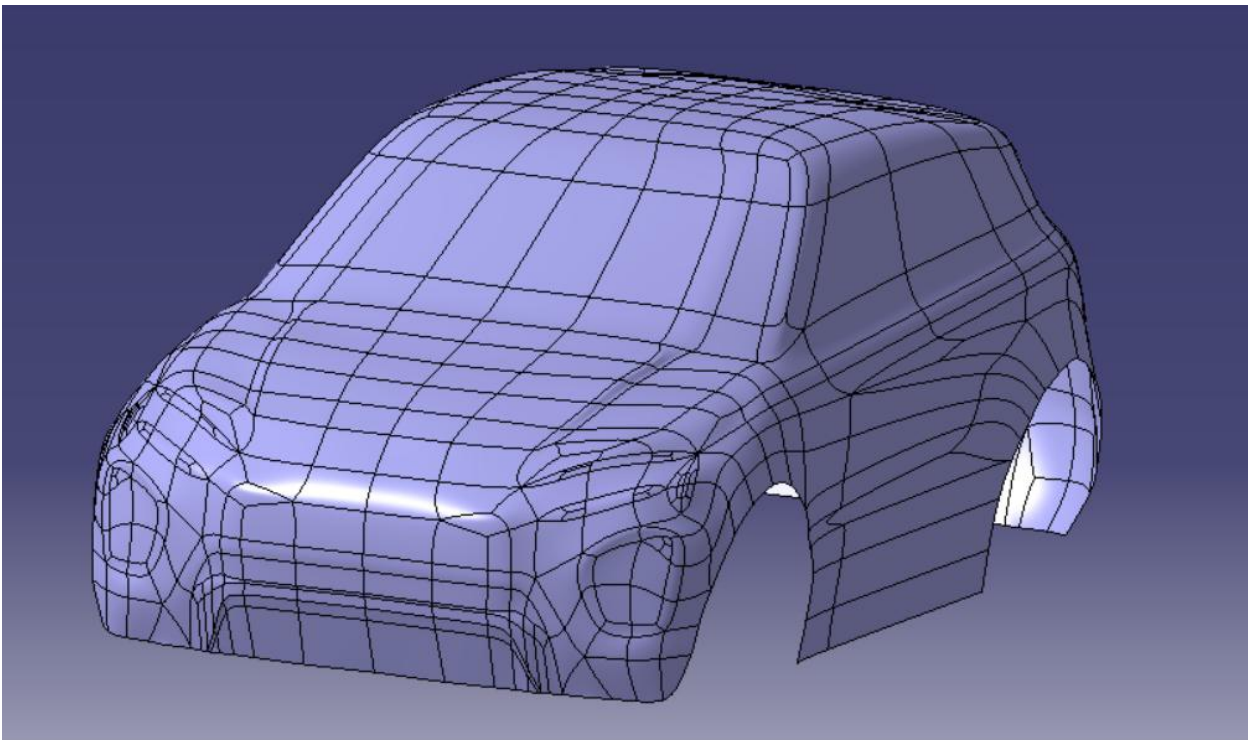


Figura 4-30: Boceto de la propuesta de diseño optimizado con simetría

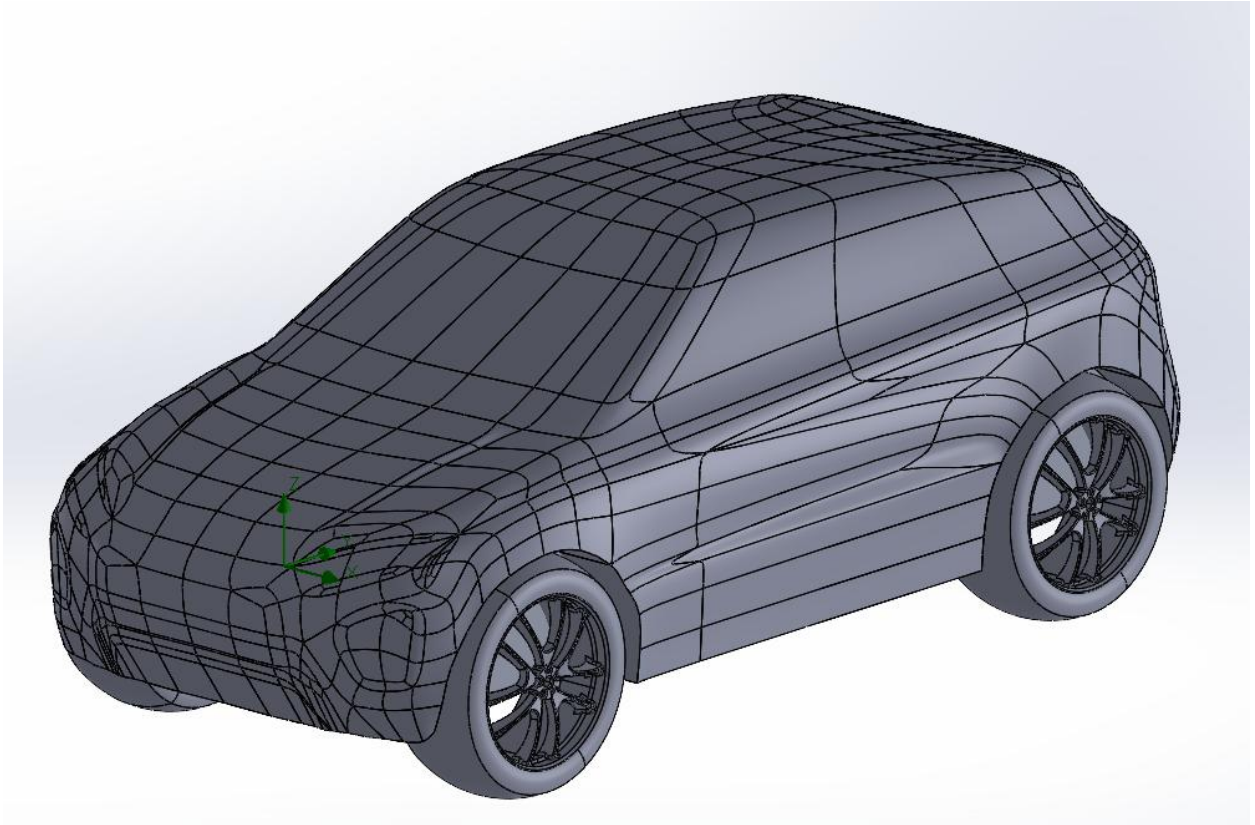


Figura 4-31: Ensamblaje completo diseño optimizado

Se procede ya por tanto con el análisis aerodinámico, definiendo primeramente el dominio fluido.

5.2. Análisis aerodinámico de la propuesta de mejora

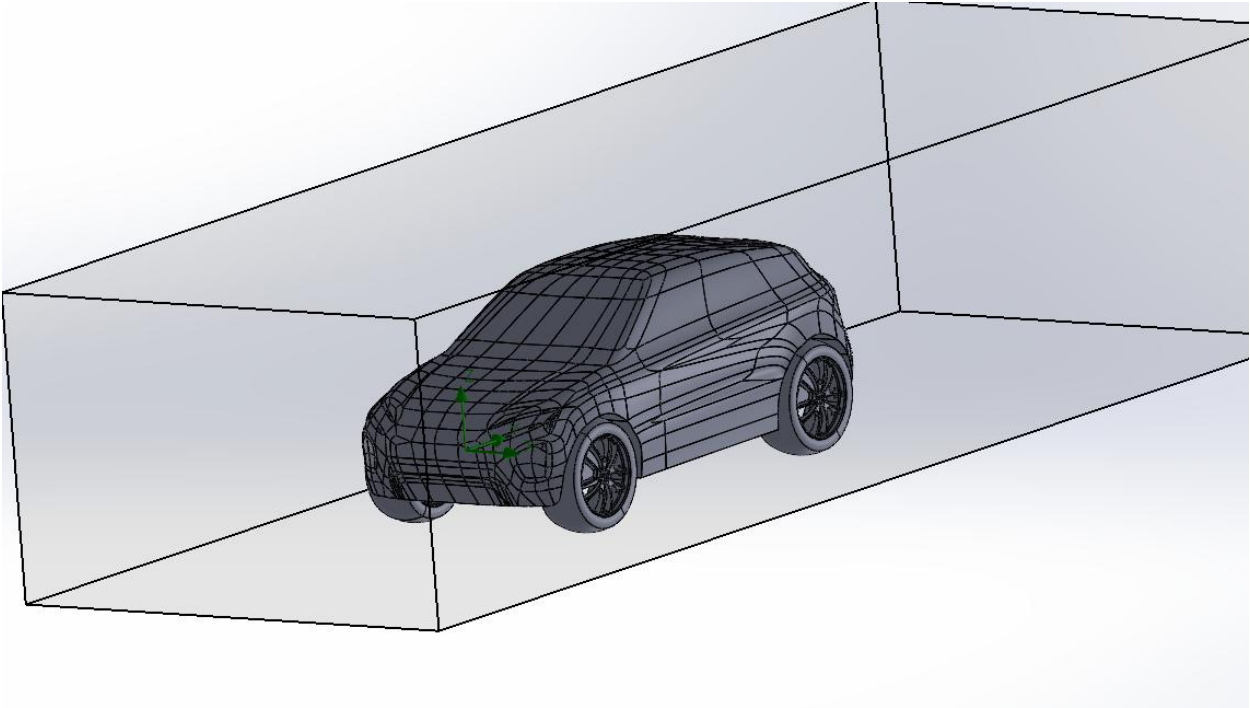


Figura 4-32: Dominio fluido, propuesta de diseño mejorado

Una vez que tenemos el dominio fluido generado, se realiza un mallado con refinamiento de malla. Este paso es crucial para que las soluciones sean fieles a la realidad.

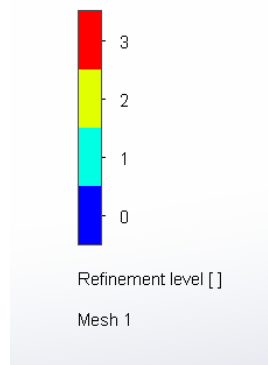


Figura 4-33: malla nivel 6, refinamiento nivel 3

Una vez modeladas las condiciones del mallado se procede a generarlo.

Optimizado

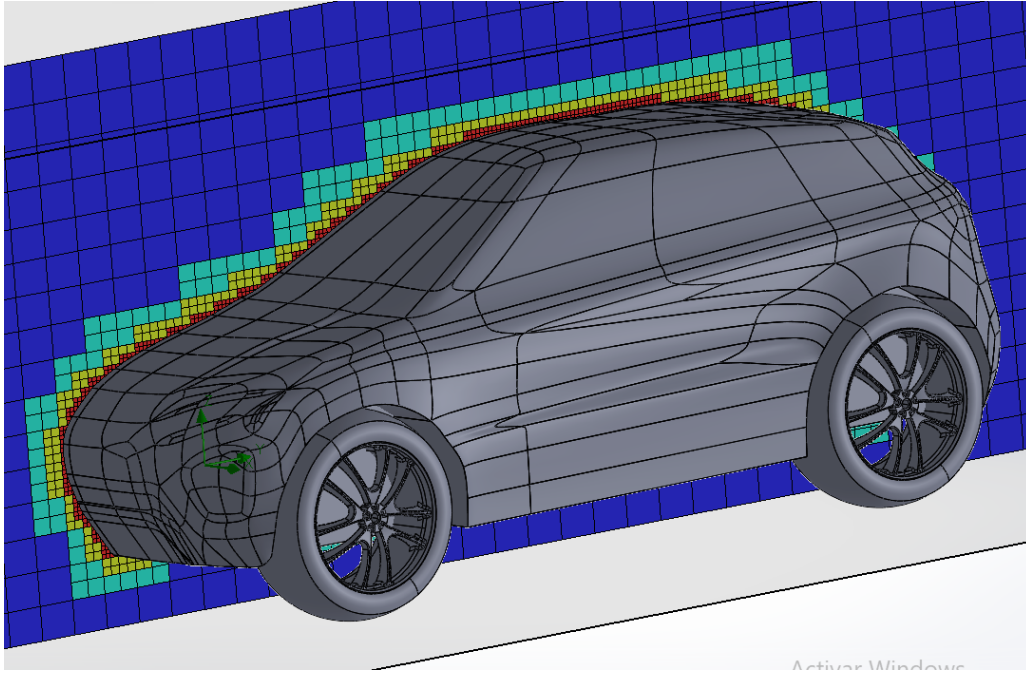


Figura 4-34: mallado final, propuesta de diseño mejorado

Ya estaría todo listo para generar la solución de este análisis. Lo primero que se observará será el mapa de presiones cuya leyenda se muestra a continuación.

En el mapa de presiones generado en el análisis CFD, se puede observar una zona de alta presión en la parte frontal, ligeramente más difusa y menos intensa que en el diseño original.

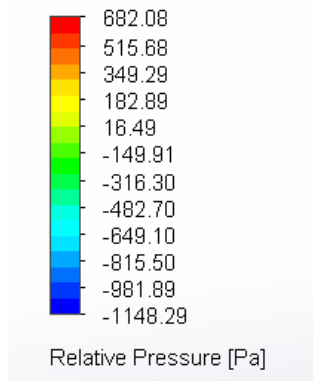


Figura 4-35: leyenda de presiones relativas, propuesta de mejora

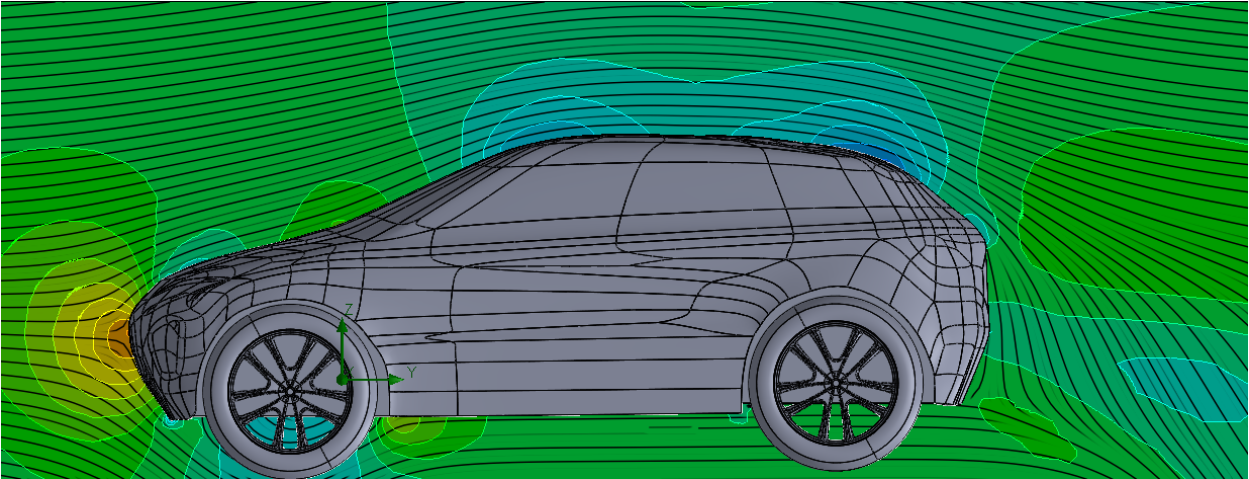


Figura 4-36: Mapa de presión relativa , propuesta de diseño mejorado

También se puede apreciar la reducción apreciable de esa área de baja presión que había en la parte trasera, no estando ahora tanto en la parte trasera sino en la trasera superior. Esto pone de manifiesto como la labor del alerón trasero era meramente estética.

Analizando ahora los “Cut plot”, se observa zonas que ligeramente tienen tonos más azules, lo que quiere decir que el aire pasa más rápido por esa zona.

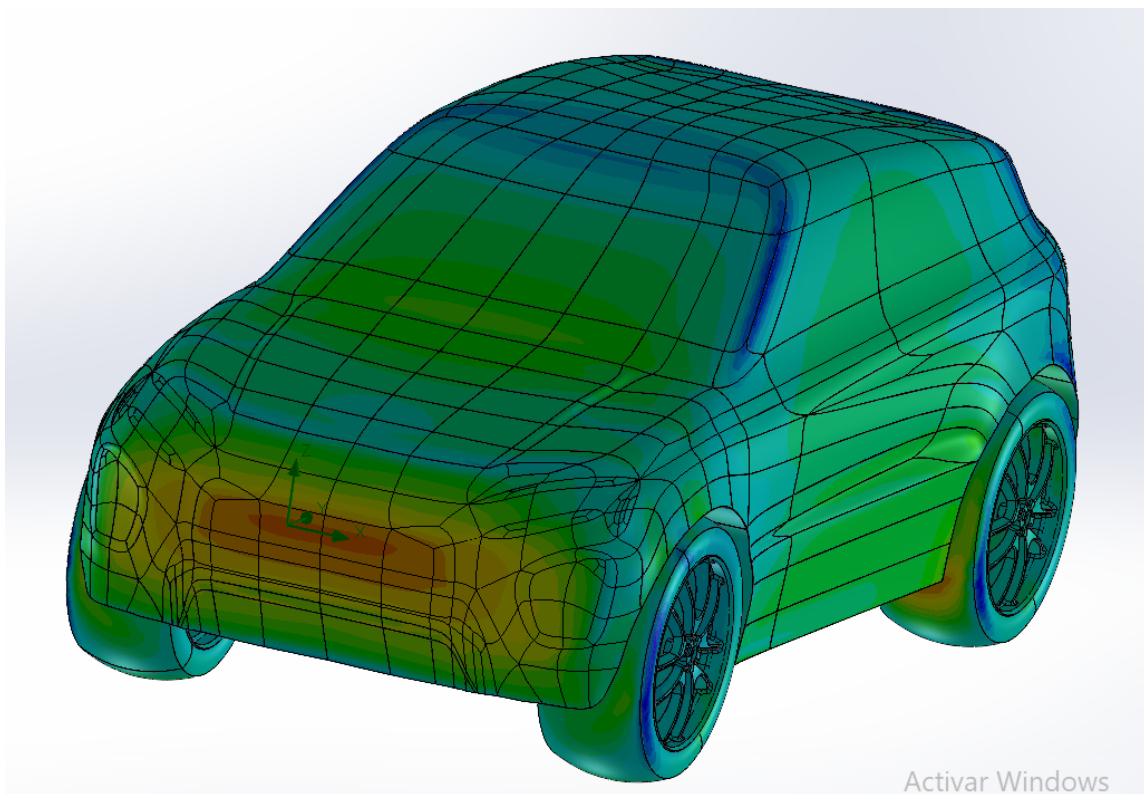


Figura 4-37: "Surface Plot", propuesta de diseño mejorado, vista frontal

De igual manera con la parte trasera se observa una transición más suave del aire, lo que conlleva a una menor succión desde la parte de atrás, contribuyendo de nuevo a un menor arrastre aerodinámico.

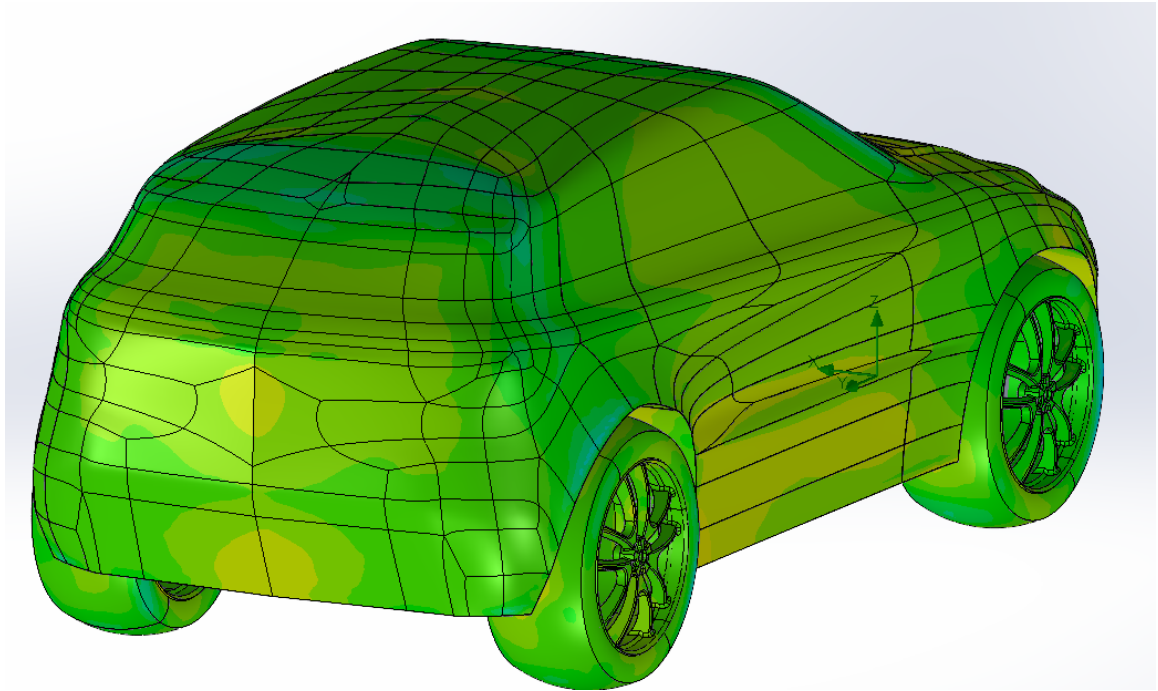


Figura 4-38: "Surface plot", propuesta de diseño mejorado, vista trasera

También se pueden observar las trayectorias de flujo. Aunque son muy similares a las del Range Rover, cabe destacar cómo estas trayectorias parecen más suaves en el morro frontal, Transicional a través de este sin llegar a unos tonos tan rojos como hacía en el vehículo original.

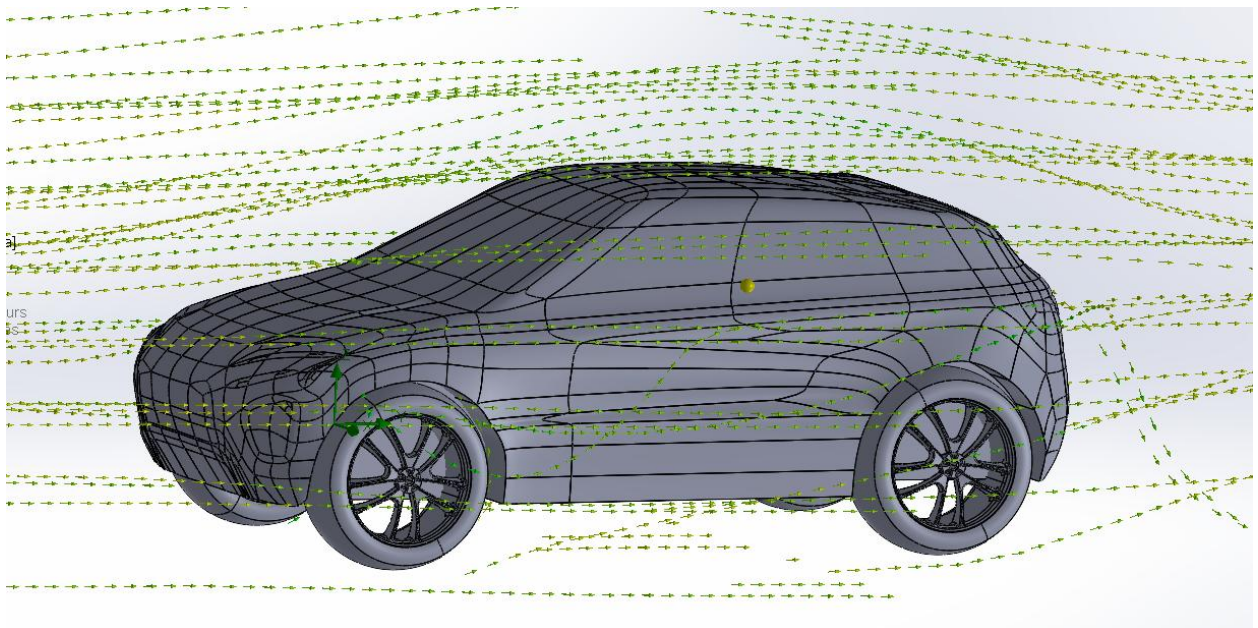


Figura 4-39: "Flow trajectories" 2, propuesta de diseño mejorado

Finalmente, una vez realizado el análisis, se puede proceder con el cálculo de la fuerza de arrastre.

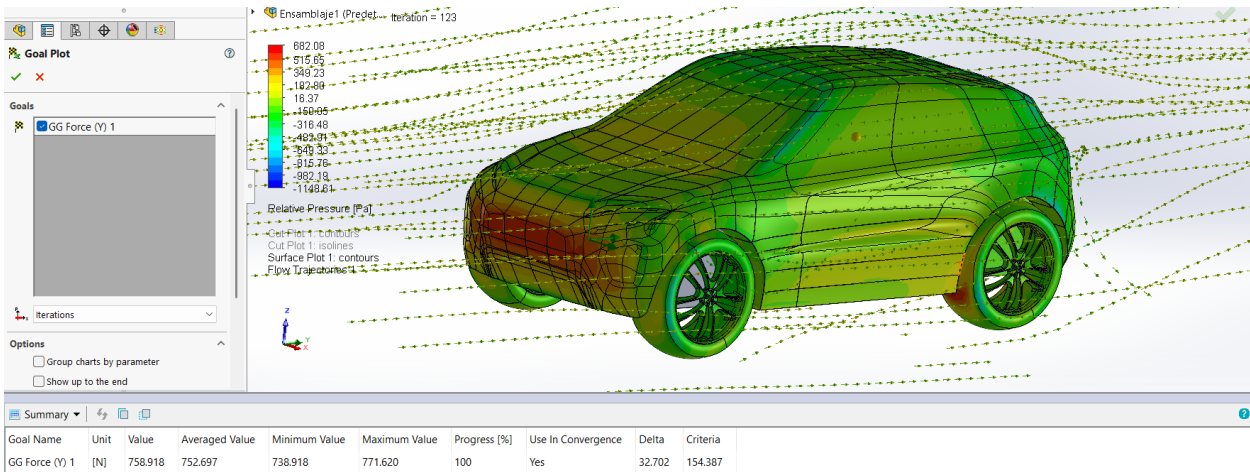


Figura 4-40: Cálculo fuerza de arrastre, propuesta de diseño mejorado

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence
GG Force (Y) 1	[N]	758.918	752.697	738.918	771.620	100	Yes

Figura 4-41: Resultados fuerza de arrastre, propuesta de diseño mejorado

Como se puede observar, se ha obtenido un valor promedio de la fuerza de arrastre en la dirección del coche de **D = 752,697 N**. Para proceder con el cálculo se necesita conocer el área frontal del vehículo, el cual de nuevo, se calculará con solidWorks. Para ello se proyecta el vehículo en un plano perpendicular a la dirección del flujo y se mide el área.

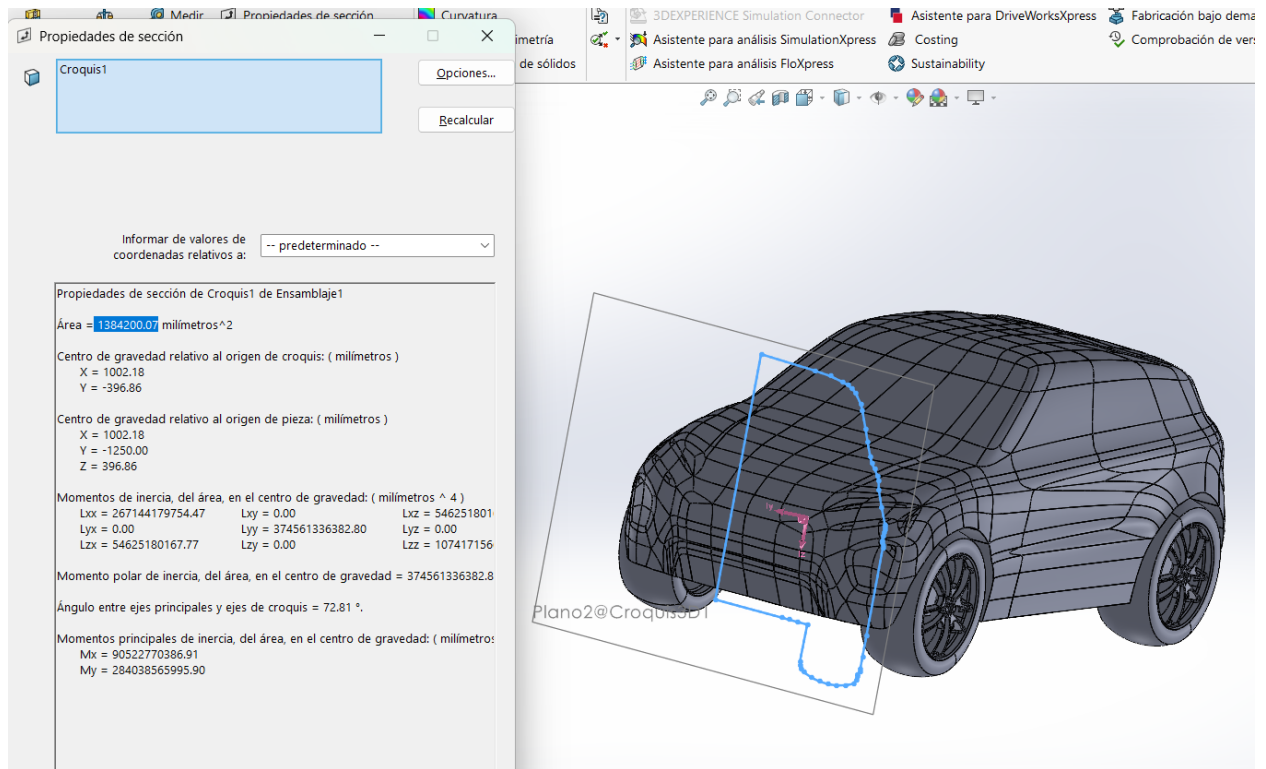


Figura 4-42: Cálculo área frontal, propuesta de diseño mejorado

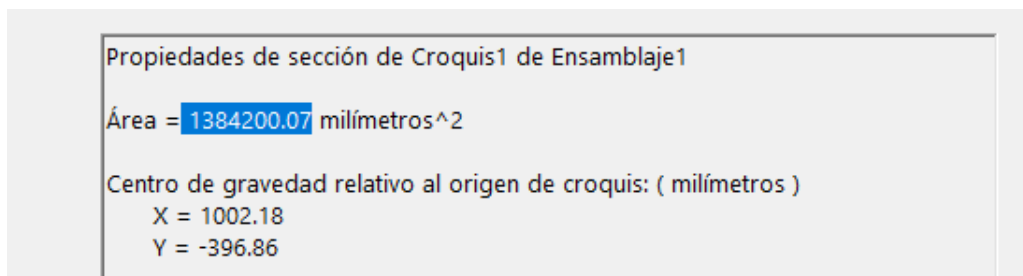


Figura 4-43: Área frontal, propuesta de diseño mejorado

De manera muy sencilla se obtiene el área frontal de la mitad de la sección, Con un valor de 1,384 m², por tanto, el área total será de: **Af = 2,768 m²**.

5.3. Cálculo del coeficiente de resistencia aerodinámico Cd

El coeficiente de arrastre (Cd) es un parámetro adimensional que define la eficiencia aerodinámica de un vehículo, cuantificando cómo su forma influye en la resistencia al avance a través de un fluido.

Para su determinación experimental, se usa la siguiente expresión: Sustituyendo los valores obtenidos experimentalmente:

$$Cd = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 Af}$$

Sustituyendo los valores obtenidos experimentalmente:

- Fuerza de arrastre, **D = 752,697 N**
- Velocidad, **U = 120 km/h = 33.333 m/s**
- Área frontal, **Af = 2.768 m²**
- Densidad del aire, **ρ = 1.204 kg/m³**

Sustituyendo, se obtiene un **Cd= 0,380**, ligeramente mejor al modelo original.

6 CONCLUSIÓN

En conclusión, este Trabajo de Fin de Grado ha permitido demostrar los objetivos planteados mediante la aplicación práctica de herramientas de diseño y simulación (CAD/CFD). Una vez modeladas las carrocerías del Land Rover Defender 2008 y el Range Rover 2019, utilizando el módulo "Imagine and Shape" de CATIA V5, se realizó un análisis aerodinámico comparativo mediante CFD en SolidWorks Flow Simulation.

La metodología aplicada incluyó la visualización de los campos de flujo mediante "Surface plots", "Cut plots", y "flow trajectories", además de el cálculo de las fuerzas aerodinámicas y sus coeficientes asociados (Cd). Esto ofreció resultados cuantitativos que validaron las hipótesis iniciales. Principalmente, se confirmó que el Range Rover 2019 presenta unas características aerodinámicas significativamente mejores que las de su antecesor, el Land Rover Defender 2008.

Como broche final al proyecto, se desarrolló una propuesta de diseño optimizado a partir del Range Rover. Los resultados de la simulación CFD demostraron que este nuevo diseño consigue un coeficiente de arrastre (Cd) ligeramente inferior, demostrando una mejora de la eficiencia aerodinámica a cambio de perder o la esencia de la marca, detalle que puede hacer que no valga la pena esa pequeña mejora.

Además, este proyecto sirve como para demostrar que es posible realizar estudios de ingeniería complejos, como un análisis CFD, con recursos hardware limitados, reduciendo la diferencia entre la teoría y la práctica, Sirviendo de base para futuros proyectos De desarrollo en el ámbito profesional.

REFERENCIAS

- [1] «CFD Aerodinámico: La Simulación que Moldea Autos | SuperAuto,» [En línea]. Available: <https://superauto.com.ar/cfd-aerodinamica-del-automovil-de-competicion/>.
- [2] «Class A surface,» [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Class_A_surface.
- [3] «La evolucion del Land Rover,» [En línea]. Available: <https://www.facebook.com/crediautoscolombia/posts/la-evoluci%C3%B3n-de-land-rover-una-marca-brit%C3%A1nica-ic%C3%B3nica-conocida-por-sus-veh%C3%ADculo/917420383750939/>.
- [4] «Ficha tecnica Land Rover,» [En línea]. Available: <https://motorgiga.com/land-rover/defender/defender-90-sw-se2/2007/precio-ficha-tecnica>.
- [5] «Historia de Land Rover,» [En línea]. Available: <https://www.rangerover.com/es-es/explore-land-rover/one-life/heritage/range-rover-history.html>.
- [6] «70 años de Land Rover resumidos,» [En línea]. Available: <https://www.caranddriver.com/es/coches/planeta-motor/a55606/70-anos-land-rover/>.
- [7] «Aerodinámica en autos: ¿Qué es y cómo funciona? - HDI Seguros,» [En línea]. Available: <https://www.hdi.cl/blog-auto-modo-seguro/aerodinamica-en-autos-que-es-y-como-funciona/>.
- [8] «Aerodinámica.pdf,» [En línea]. Available: <https://www.kimerius.com/app/download/5782300313/Aerodin%C3%A1mica.pdf>.
- [9] «Car Aerodynamics Basics, How-To & Design Tips ~ FREE! - Build Your Own Race Car!,» [En línea]. Available: <https://www.buildyourownracecar.com/race-car-aerodynamics-basics-and-design/>.
- [10] «¿Cómo afectan las cargas de viento a la resistencia de avance en los coches? | SYMULA,» [En línea]. Available: <https://symulacfd.com/blog/aerodinamica/como-afectan-cargas-viento-resistencia-de-avance-coches/>.
- [11] «Wikipedia. (s.f.). Drag equation.,» [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_equation.
- [12] «Análisis computacional del comportamiento aerodinámico de un vehículo con estructura tubular,» [En línea]. Available: <https://istte.edu.ec/revistaunanchay/index.php/RCU/article/download/32/55/367>.
- [13] «El rol crucial de la aerodinámica en vehículos - Green Wash - Lavadero Coches en Gava,» [En línea]. Available: <https://greenwashbarnasud.es/el-rol-crucial-de-la-aerodinamica-en-vehiculos/>.
- [14] «The Art of Compromise: Trade-Offs in Automotive Design - Number Analytics,» [En línea]. Available: <https://www.numberanalytics.com/blog/art-compromise-trade-offs-automotive-design>.
- [15] «Diseño y modelado de superficies avanzadas con CATIA V5 - Cogitig,» [En línea]. Available: <https://cogitig.com/es/cursos/online/diseño-y-modelado-de-superficies-avanzadas-con-catia-v5>.
- [16] «How to use sketch tracer in Catia V5? | GrabCAD Tutorials,» [En línea]. Available: <https://grabcad.com/tutorials/how-to-use-sketch-tracer-in-catia-v5>.
- [17] «Diseño y modelado de superficies avanzadas con CATIA V5 - Cogitig,» [En línea]. Available:

<https://cogitig.com/es/cursos/online/disen-y-modelado-de-superficies-avanzadas-con-catia-v5>.

- [18] «CATIA – Automotive Surface & Body Modeling Course at Caddex India,» [En línea]. Available: <https://caddexindia.com/article/catia-automotive-surface-&-body-modeling>.
- [19] «Dassault Systèmes. CATIA Part Design User Guide. Disponible en:» [En línea]. Available: <https://www.3ds.com..>
- [20] «Master Part Design in CATIA V5: A Step-by-Step Guide,» [En línea]. Available: <https://skill-lync.com/blogs/master-part-design-in-catia-v5-a-step-by-step-guide>.
- [21] «Una visión completa de los módulos de CATIA V5: Potencia y versatilidad en el diseño asistido por computadora,» [En línea]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/una-visi%25C3%25B3n-completa-de-los-m%25C3%25B3dulos-catia-v5-potencia-francisco-jos%25C3%25A9/>.
- [22] «Range Rover,» [En línea]. Available: <https://www.rangerover.com/en-gb/range-rover-evoque/models-and-specifications.html>.
- [23] «¿Qué coche me compro? Diario Motor,» [En línea]. Available: <https://www.quecochemecompro.com/medidas/range-rover-evoque/>.
- [24] «Pedestrian Protection Protocol. 2022,» [En línea]. Available: <https://www.euroncap.com/en/for-engineers/protocols/>.
- [25] «De implementarse el estándar de protección a peatones en los autos nuevos, en México se ... - El Poder del Consumidor,» [En línea]. Available: <https://elpoderdelconsumidor.org/2021/05/de-implementarse-el-estandar-de-proteccion-a-peatones-en-lo>.
- [26] «Pedestrian safety through vehicle design - Wikipedia,» [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Pedestrian_safety_through_vehicle_design.
- [27] «CFD-based Optimization for Automotive Aerodynamics,» [En línea]. Available: https://www.academia.edu/66241141/CFD_based_Optimization_for_Automotive_Aerodynamics.
- [28] D. Thevenin, Cost of Aerodynamic Optimization in Automotive..
- [29] «What luxury car buyers really want | McKinsey - McKinsey,» [En línea]. Available: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/shifting-gears-what-buyers-are-saying-about-the-luxury-car-experience>.
- [30] «Range Rover Evoque, modelos y especificaciones,» [En línea]. Available: <https://www.rangerover.com/es-mx/range-rover-evoque/models-and-specifications.html>.
- [31] «Land Rover Media. (2007). Defender 2007 Model Year Updates – Technical Specifications.,» [En línea]. Available: https://media.landrover.com/en/press-releases/2007/07/lrd_20070702_defender-2007-model-year-updates.
- [32] «Land Rover defender 2008, Ficha tecnica,» [En línea]. Available: <https://www.encycarpedia.com/es/land-rover/08-defender-110-td4-hard-top-suv>.
- [33] «The Land Rover Page,» [En línea]. Available: <https://www.internet-tools.co.uk/blog/index.php/land-rover-hints-tips-and-tricks/>.

- [34] «Land Rover Series I (1957) - Auto Catalog Archive,» [En línea]. Available: <https://autocatalogarchive.com/wp-content/uploads/2017/05/Land-Rover-Series-I-1957-UK.pdf>.
- [35] «Coeficiente de resistencia en automóviles - Wikipedia, la enciclopedia libre,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_resistencia_en_autom%C3%B3viles.
- [36] «Land Rover Range Rover Evoque Dynamic SE (2025), precios y cotizaciones. - Autocosmos,» [En línea]. Available: <https://www.autocosmos.com.mx/catalogo/2025/land-rover/range-rover-evoque/dynamic-se/172284>.
- [37] «The Aerodynamic Development of the New Range Rover Evoque - SAE International,» [En línea]. Available: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2022-01-0890/>.
- [38] Autor, «Este es el ejemplo de una cita,» *Tesis Doctoral*, vol. 2, n° 13, 2012.
- [39] O. Autor, «Otra cita distinta,» *revista*, p. 12, 2001.

ÍNDICE DE CONCEPTOS

conceptos.....9

GLOSARIO

ISO: International Organization for Standardization	4
UNE: Una Norma Española	4