



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Proyecto de un montaje experimental de suspensión
delantera y dirección de un automóvil para la industria
automotriz

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

AUTOR/A: Cardona Álvarez, Pablo

Tutor/a: Navarro Jiménez, José Manuel

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

RESUMEN

La ingeniería automotriz ha sido testigo de continuas mejoras en el desarrollo de sistemas de suspensión y dirección, constituyéndose en un área de innovación fundamental en seguridad, comodidad y manejo del vehículo. Este proyecto propone desarrollar un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil dirigido a mejorar su enseñanza en la industria automotriz.

El prototipo se concibe como una herramienta práctica, que facilita la comprensión del funcionamiento del sistema de suspensión delantera y dirección de un vehículo automóvil así como la influencia de cada posible configuración en el comportamiento dinámico del mismo. De este modo, se pretende ofrecer a instituciones educativas, centros de formación especializados, laboratorios de investigación o empresas del sector con planes de formación integrados, una herramienta pedagógica que contribuya al desarrollo y capacitación de los profesionales actuales y futuros de la industria automotriz.

Tras analizar los elementos que componen el sistema y los parámetros de configuración más importantes, se formaliza una propuesta del montaje experimental definiendo los criterios de diseño y limitaciones. Posteriormente, se elabora un gemelo digital que pretende replicar el comportamiento del montaje real. Este permite predecir el resultado que se obtiene con el montaje físico, mejorando así la eficiencia operativa del modelo. Con dicho gemelo digital, se quiere mostrar los casos de mayor interés para el estudio, explicando de forma cualitativa el motivo de su relevancia en relación al comportamiento dinámico del automóvil. Una vez realizado el gemelo digital, la correlación entre los valores obtenidos en este y los resultados de simulación en ADAMS CAR permite dar validez al mismo.

El resultado del proyecto es, por un lado, la elaboración de un plan de fabricación detallado para poder producir más adelante la primera versión física del montaje experimental, y por otro lado, la obtención de un gemelo digital manipulable que permite comparar entre sí las ventajas y desventajas de cualquier posición que pueda adoptar el sistema de suspensión delantera y dirección de un automóvil.

Palabras clave: automóvil, suspensión, dirección, formación, gemelo digital, montaje experimental, plan de fabricación

RESUM

L'enginyeria automotriu ha sigut testimoni de contínues millores en el desenvolupament de sistemes de suspensió i direcció, constituint-se en una àrea d'innovació fonamental en seguretat, comoditat i maneig del vehicle. Aquest projecte proposa desenvolupar un muntatge experimental de suspensió davantera i direcció d'un automòbil dirigit a millorar el seu ensenyament en la indústria automotriu.

El prototip es concep com una eina pràctica, que facilita la comprensió del funcionament del sistema de suspensió davantera i direcció d'un vehicle automòbil, així com la influència de cada possible configuració en el comportament dinàmic d'aquest. D'aquesta manera, es pretén oferir a institucions educatives, centres de formació especialitzats, laboratoris d'investigació o empreses del sector amb plans de formació integrats, una eina pedagògica que contribuísca al desenvolupament i capacició dels professionals actuals i futurs de la indústria automotriu.

Després d'analitzar els elements que componen el sistema i els paràmetres de configuració més importants, es formalitza una proposta del muntatge experimental definint els criteris de disseny i limitacions. Posteriorment, s'elabora un bessó digital que pretén replicar el comportament del muntatge real. Aquest permet predir el resultat que s'obté amb el muntatge físic, millorant així l'eficiència operativa del model. Amb aquest bessó digital, es vol mostrar els casos de major interès per a l'estudi, explicant de manera qualitativa el motiu de la seua rellevància en relació al comportament dinàmic de l'automòbil. Una vegada realitzat el bessó digital, la correlació entre els valors obtinguts en aquest i els resultats de simulació en ADAMS CAR permet donar validesa a aquest.

El resultat del projecte és, d'una banda, l'elaboració d'un pla de fabricació detallat per a poder produir més endavant la primera versió física del muntatge experimental, i d'altra banda, l'obtenció d'un bessó digital manipulable que permet comparar entre si els avantatges i desavantatges de qualsevol posició que puga adoptar el sistema de suspensió davantera i direcció d'un automòbil.

Paraules clau: automòbil, suspensió, direcció, formació, bessó digital, muntatge experimental, pla de fabricació

ABSTRACT

Automotive engineering has witnessed continuous improvements in the development of suspension and steering systems, constituting a fundamental area of innovation in vehicle safety, comfort and handling. This project proposes to develop an experimental front suspension and steering assembly for an automobile aimed at improving its teaching in the automotive industry.

The prototype is conceived as a practical tool, which facilitates the understanding of the operation of the front suspension and steering system of a motor vehicle, as well as the influence of each possible configuration on the dynamic behaviour of the vehicle. In this way, the aim is to offer educational institutions, specialised training centres, research laboratories or companies in the sector with integrated training plans, a pedagogical tool that contributes to the development and training of current and future professionals in the automotive industry.

After analysing the elements that make up the system and the most important configuration parameters, a proposal for the experimental setup is formalised, defining the design criteria and limitations. Subsequently, a digital twin is created that aims to replicate the behaviour of the real assembly. This allows predicting the result obtained with the physical assembly, thus improving the operational efficiency of the model. With this digital twin, the aim is to show the cases of greatest interest for the study, explaining qualitatively the reason for their relevance in relation to the dynamic behaviour of the car. Once the digital twin has been carried out, the correlation between the values obtained in this and the simulation results in ADAMS CAR allows it to be validated.

The result of the project is, on the one hand, the elaboration of a detailed manufacturing plan to be able to produce later the first physical version of the experimental assembly, and on the other hand, the obtaining of a manipulable digital twin that allows the advantages and disadvantages of any position that the front suspension and steering system of a car can adopt to be compared with each other.

Keywords: automobile, suspension, steering, training, digital twin, experimental set-up, manufacturing plan.

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1. Justificación del proyecto: contexto y motivación	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Estructura del proyecto	4
2. Metodología	5
3. Estructura y funcionamiento del sistema de suspensión delantera y dirección de un automóvil	7
3.1. Introducción	7
3.1.1. Comportamiento dinámico del vehículo	8
3.1.2. Tipologías de suspensión delantera y dirección	9
3.2. Elementos básicos	14
3.2.1. Componentes elásticos y amortiguadores	14
3.2.2. Componentes estructurales - mecanismos	16
3.3. Parámetros de configuración específicos del sistema de suspensión delantera y dirección	20
3.3.1. Ángulo de convergencia (<i>toe</i>)	20
3.3.2. Ángulo de caída (<i>camber</i>)	21
3.3.3. Ángulo y distancia de avance (<i>caster</i> y <i>mechanical trail</i>)	23
3.3.4. Centro de balanceo	25
3.3.5. Desvío de la dirección (<i>roll steer</i> y <i>bump steer</i>)	27
3.3.6. Radio de deslizamiento (<i>scrub radius</i>)	29
3.3.7. Ángulo de salida (<i>kingpin inclination</i>)	30
3.4. Casos de estudio de interés	32
3.4.1. Posición del centro instantáneo de rotación y de balanceo	32
3.4.2. Ganancia de caída (<i>camber gain</i>)	34

4. Diseño y desarrollo	37
4.1. Contexto: Modelado del montaje mediante CAD	37
4.2. Criterios de diseño	37
4.2.1. Características comunes de los componentes	37
4.2.2. Criterios generales	39
4.2.3. Componentes del montaje	42
4.2.4. Componentes de unión	46
4.3. Gemelo Digital	50
4.3.1. Ensamblaje	50
4.3.2. Grados de libertad	56
4.3.3. Análisis de reglajes	57
4.3.4. Medición de parámetros	60
4.3.5. Limitaciones	69
5. Ensayos y simulación	71
5.1. Justificación de la adecuación del software	71
5.2. Consideraciones previas	72
5.2.1. Sistema de referencia	72
5.2.2. Parametrización de hardpoints	73
5.3. Aplicación de los casos de estudio de interés	74
5.3.1. Ganancia de caída	74
5.3.2. Localización del centro de balanceo del eje	76
6. Plan de fabricación	78
6.1. Alternativas del materiales	78
6.2. Procesos de fabricación	79
6.3. Impresión 3D	80
6.3.1. Elección del material	80
6.3.2. Elección del tipo de impresora 3D	83
6.4. Componentes del montaje físico	84
7. Conclusiones	87
8. Propuestas de mejora	87
8.1. Sistemas de medición: más exhaustivos y precisos	87
8.2. Prototipo físico adaptativo o modular	88
8.3. Colaboración directa con la industria automotriz	88

9. Bibliografía	89
A. Presupuestos	91
A.1. Presupuesto del proyecto	91
A.2. Presupuesto del producto	92
B. Pliego de condiciones	94
B.1. Condiciones de Software y Hardware	94
B.2. Condiciones de Comercialización	95
C. Componentes del montaje físico	96
C.1. Anclajes al Chasis	96
C.2. Sistema de Dirección	98
C.3. Mecanismo Muelle-Amortiguador	99
C.4. Mangueta	102
C.5. Acoplamiento Rueda-Mangueta	105
D. Planos	106
E. Ficha Técnica PETG	126
F. Relación del trabajo con los objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030	127

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Esquema del gemelo físico y gemelo digital.	2
2.	Esquema de la metodología del proyecto.	6
3.	Sistemas de un Automóvil. <i>Fuente: Mercedes-Benz (W 124, 4 MATIC), 1986.</i>	7
4.	Esquema de la tipología de suspensión dependiente.	9
5.	Esquema de la tipología de suspensión independiente.	10
6.	Sistema de suspensión McPherson.	11
7.	Sistema de suspensión de Doble Trapecio.	12
8.	Sistema de dirección de cremallera y piñón.	13
9.	Esquema de un muelle helicoidal.	15
10.	Ensamblaje del muelle helicoidal con el amortiguador integrados en el sistema de suspensión para los casos de Doble Trapecio (izquierda) y McPherson (derecha).	15
11.	Trapecio o brazo de suspensión.	16
12.	Esquema que la disposición de la mangueta.	17
13.	Esquema de la disposición y funcionamiento de las rótulas.	17
14.	Cojinete esférico.	18
15.	Esquema de la disposición del cojinete de rotación.	18
16.	Silentblock.	18
17.	Esquema general con los componentes principales del sistema de suspensión delantera y dirección en sus variantes Doble Trapecio (arriba) y McPherson (abajo).	19
18.	Esquema del criterio de signos del ángulo de convergencia (vista en planta).	20
19.	Vista en planta del vehículo desde la que se mide el ángulo de caída.	21
20.	Esquema del criterio de signos del ángulo de caída (vista frontal).	21
21.	Esquema de la deformación del neumático delantero derecho debido a un giro a la izquierda.	22
22.	Vista en planta del vehículo desde la que se mide el ángulo de avance.	23
23.	Esquema del criterio de signos del ángulo de avance (vista de perfil).	23
24.	Esquema del centro instantáneo de rotación del conjunto rueda-mangueta-trapecios.	25
25.	Esquema del centro instantáneo de rotación mediante el brazo equivalente (vista frontal).	25
26.	Esquema del centro de balanceo (vista frontal).	26
27.	Esquema del eje de balanceo de un vehículo (vista frontal).	26
28.	Esquema del diseño del sistema para evitar el desvío de la dirección (vista frontal).	27

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

29.	Esquema del desvío de la dirección ocasionado por la longitud (vista frontal).	28
30.	Esquema del desvío de la dirección ocasionado por la dirección (vista frontal).	28
31.	Esquema del convenio de signos del <i>Scrub Radius</i> o Radio de Deslizamiento (vista frontal).	29
32.	Esquema ángulo de inclinación de <i>Kingpin</i> en los sistemas de suspensión de doble trapecio (izquierda) y McPherson (derecha) (vista frontal).	30
33.	Esquema de justificación de la necesidad de introducir un cierto valor de ángulo de inclinación de <i>Kingpin</i> (vista frontal).	30
34.	Esquema del <i>Spindle Length</i> (vista frontal).	31
35.	Esquema de la posición del CIR de balanceo (vista frontal).	32
36.	Esquema del comportamiento de una rueda sometida a un CIR de balanceo que oscila entre las posiciones por encima y por debajo del terreno (vista en planta).	32
37.	Esquema del Centro de Balanceo. Fuente: <i>Diapositivas Automóviles MUII</i>	33
38.	Esquema del ángulo de caída constante o no ganancia de caída (vista frontal).	34
39.	Esquema del ángulo de caída variable o ganancia de caída (vista frontal).	34
40.	Esquema de la ganancia de caída en función de la longitud del brazo equivalente (vista frontal).	35
41.	Esquema de la influencia de la ganancia de caída en situación de curva (vista frontal).	35
42.	Esquema de la inclinación de la carrocería (cabeceo) en situación de frenada (vista lateral).	36
43.	Esquema de la influencia de la ganancia de caída en situación de frenada (vista frontal).	36
44.	Esquema de ejemplo de simplificación de los componentes.	38
45.	Representación gráfica de las partes de la mangueta.	39
46.	Trapecio delantero (imagen izquierda) y trapecio trasero (imagen derecha).	40
47.	Trapecio delantero (imagen izquierda) y trapecio trasero (imagen derecha).	40
48.	Representación simplificada en CAD del brazo o trapecio superior del sistema de suspensión delantera.	42
49.	Representación simplificada en CAD del brazo o trapecio inferior del sistema de suspensión delantera.	42
50.	Representación simplificada en CAD del brazo o trapecio inferior del sistema de suspensión delantera.	43
51.	Representación simplificada en CAD del muelle-amortiguador del sistema de suspensión delantera.	43
52.	Representación simplificada en CAD de la bieleta de dirección.	44
53.	Representación simplificada en CAD de la correa de dirección.	44
54.	Representación simplificada en CAD del chasis del vehículo.	44
55.	Soporte de la representación simplificada en CAD del chasis del vehículo.	45
56.	Explicación de los puntos de fijación del sistema de suspensión delantera y dirección al chasis del vehículo.	45

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y
DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

57.	Representación simplificada en CAD del tornillo de anclaje.	46
58.	Esquema de la rótula en Catia.	46
59.	Representación simplificada en CAD de la rótula superior e inferior de la mangueta. . . .	46
60.	Representación simplificada en CAD la rótula superior e inferior del mecanismo muelle- amortiguador.	47
61.	Representación simplificada en CAD de la unión mediante rótulas de los brazos de suspen- sión superior e inferior con la mangueta.	47
62.	Representación simplificada en CAD del anclaje empleado para fijar del sistema de sus- pensión delantera al chasis.	48
63.	Representación simplificada en CAD del anclaje empleado para fijar el muelle-amortiguador al brazo de suspensión inferior.	48
64.	Representación simplificada en CAD del anclaje empleado para variar la distancia hori- zontal (eje y) de los puntos unión del sistema al chasis.	49
65.	Representación del anclaje de los brazos de suspensión al chasis.	49
66.	Representación del anclaje del muelle-amortiguador al chasis y al brazo de suspensión inferior.	49
67.	Ensamblaje de componentes del Gemelo Digital - versión Doble Trapecio.	50
68.	Explosionado del ensamblaje de componentes del Gemelo Digital - versión Doble Trapecio.	51
69.	Ensamblaje de componentes del Gemelo Digital - versión McPherson.	52
70.	Restricciones impuestas para hacer el ensamblaje de las piezas. <i>Fuente: Catia V5.</i>	53
71.	Representación de las restricciones de coincidencia concéntrica y contacto.	53
72.	Representación de la restricción de coincidencia de rótula.	54
73.	Representación de la restricción de desviación o distancia.	54
74.	Representación de la restricción de fijado.	55
75.	Representación de la restricción de fijado conjunto.	55
76.	Esquema de grados de libertad del prototipo (plano frontal).	56
77.	Esquema de grados de libertad del prototipo (plano superior).	56
78.	Esquema de los puntos de modificación del ángulo de convergencia (<i>toe</i>).	57
79.	Esquema de los puntos de modificación del ángulo de caída (<i>camber</i>).	58
80.	Esquema de los puntos de modificación del ángulo de avance (<i>caster</i>).	59
81.	Mangueta solidaria a rueda.	60
82.	Medición del ángulo de caída en el Gemelo Digital.	61
83.	Medición del ángulo de avance en el Gemelo Digital.	61
84.	Medición del ángulo de convergencia en el Gemelo Digital.	62
85.	Radio de deslizamiento en el Gemelo Digital.	62

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

86.	Medición del ángulo de salida en el Gemelo Digital.	63
87.	Medición de la distancia <i>spindle length</i> en el Gemelo Digital.	63
88.	Localización del CIR de la rueda en el Gemelo Digital.	64
89.	Sistema de medición de ángulos en el prototipo físico. <i>Fuente: FDF Raceshop.</i>	65
90.	Sistema de medición del ángulo de convergencia en el prototipo físico.	65
91.	Sistema de medición del ángulo de caída en el prototipo físico.	66
92.	Sistema de medición del ángulo de avance en el prototipo físico.	66
93.	Sistema de localización del centro de rotación instantáneo en el prototipo físico mediante varillas metálicas.	67
94.	Sistema de localización del centro de rotación instantáneo en el prototipo físico mediante dispositivos láser.	67
95.	Sistema de medición del radio de deslizamiento en el prototipo físico mediante dispositivos láser.	68
96.	Sistema de medición del incremento de longitud de los brazos de suspensión en el prototipo físico.	68
97.	Sistema de suspensión delantera empleado en ADAMS CAR. <i>Fuente: ADAMS CAR.</i>	72
98.	Localización de hardpoints del sistema de suspensión delantera. <i>Fuente: ADAMS CAR.</i>	73
99.	Coordenadas de los hardpoints del sistema de suspensión delantera. <i>Fuente: ADAMS CAR.</i>	73
100.	Ángulo de caída con respecto al desplazamiento vertical de la rueda. <i>Fuente: ADAMS CAR.</i>	74
101.	Longitud del brazo equivalente con respecto al desplazamiento vertical de la rueda. <i>Fuente: ADAMS CAR.</i>	75
102.	Ángulo de caída con respecto al desplazamiento vertical de la rueda. <i>Fuente: ADAMS CAR.</i>	75
103.	Localización del centro de balanceo del eje delantero con respecto al desplazamiento vertical de la rueda. <i>Fuente: ADAMS CAR.</i>	76
104.	Localización del centro de balanceo y centro de masas del eje delantero con respecto al desplazamiento vertical de la rueda.	77
105.	Componentes comerciales del prototipo físico.	86
106.	Requisitos de hardware MSC Apex. <i>Fuente: Hexagon.</i>	94
107.	Requisitos de software MSC Apex. <i>Fuente: Hexagon.</i>	94
108.	Requisitos de software y hardware CATIA V5. <i>Fuente: Dassault Systems.</i>	95
109.	Esquema de los componentes de anclaje al chasis.	96
110.	Esquema de los componentes de anclaje al chasis.	97
111.	Esquema de los componentes del sistema de dirección.	98
112.	Esquema de los componentes del sistema de dirección.	98
113.	Esquema de los componentes del sistema de dirección.	99
114.	Esquema de los componentes del mecanismo muelle-amortiguador.	99

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y
DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

115. Esquema de los componentes del mecanismo muelle-amortiguador.	100
116. Esquema de los componentes del mecanismo muelle-amortiguador.	100
117. Esquema de los componentes de la mangueta.	102
118. Esquema de los componentes de la mangueta.	103
119. Esquema de los componentes del acoplamiento rueda-mangueta.	105

ÍNDICE DE TABLAS

Índice de tablas

1.	Materiales para la impresión 3D con tecnología FDM	81
2.	Puntuación de las propiedades de cada material	82
3.	Coefficientes de ponderación de las propiedades de los materiales	82
4.	Matriz de decisión de materiales ponderada	82
5.	Tipologías de tecnologías de impresión 3D más comunes en plásticos	83
6.	Tabla resumen de componentes del prototipo físico	85
7.	Tabla resumen de componentes comerciales del prototipo físico. [1-4]	86
8.	Presupuesto del proyecto	91
9.	Presupuesto del producto	93

1. Introducción

1.1. Justificación del proyecto: contexto y motivación

España es el segundo mayor fabricante de vehículos en Europa y noveno a nivel mundial según los últimos datos de 2022 [5, 6]. La industria de la automoción es un pilar estratégico para la economía española. En cuanto a cifra de negocio, la facturación representa el 8,1% del PIB del país (superior al 10% si se consideran empresas financieras, aseguradoras y distribuidoras) generando en 2022 una facturación de 70,4 mil millones de euros. Estas cifras son posibles, en parte por la importante producción y exportación de vehículos y componentes, alcanzando el 9% del total de las exportaciones españolas. Además, la propia industria invierte de media 4 mil millones de euros al año en modernización e I+D+I, impulsando así un sector que está a la vanguardia de la innovación tecnológica. España es, por tanto, un país de referencia para nuevos proyectos de la industria de la automoción, que resulta muy atractiva para inversores tanto nacionales como internacionales.

La demanda de innovación en la industria se traduce en exigencia a todos los niveles del sector y en concreto hacia los fabricantes de subsistemas. Entre todos los subsistemas, el de suspensión delantera y dirección juega un papel clave en la dinámica del vehículo, es decir, en su comportamiento en circulación, por ejemplo, en cuanto a seguridad o sensación de conducción. Sin embargo, en ocasiones las nociones sobre dinámica del automóvil resultan difíciles de entender, por lo que los fabricantes están limitados en cuanto a personal realmente cualificado que asuma dicha tarea de innovación e ingenio que demanda la industria. Esta dificultad se debe a la complejidad técnica de la dinámica en sí, ya que combina conceptos de física, mecánica y matemáticas, terminología específica e interacciones con otros sistemas. Además, la falta de experiencia práctica previa del personal agrava la brecha entre la exigencia del mundo laboral y la preparación académica de los profesionales del sector. Por ello, se ve necesario colaborar con el desarrollo de nuevas y mejores ideas que continúen estimulando y potenciando un sector tan estratégico como este.

Tras una búsqueda exhaustiva en diferentes portales académicos, oficinas de registro de patentes y bases de datos de proyectos de ingeniería, no se ha encontrado precedentes comerciales de montajes experimentales de sistemas de suspensión delantera y dirección de vehículo destinados a la formación y capacitación. Sí que se ha hallado una tesis doctoral de la Universidad de Stanford [7] y una empresa del sector automóvil que es propietaria de una cuenta de divulgación técnica sobre automóviles [8] que han desarrollado montajes similares. Sin embargo, el primero está enfocado a la investigación sobre la optimización del sistema y el segundo es un montaje casero propio. Por tanto, tras realizar el estado del arte, se concluye que resulta interesante poder elaborar un producto con estas características, es decir, considerar el enfoque didáctico como el gran distintivo de este proyecto, contribuyendo así a explorar nuevas posibilidades para sentar las bases de futuros desarrollos y avances en este campo.

Es en esta línea que se ha desarrollado el presente proyecto: la idea es contribuir al sector automóvil concibiendo una herramienta formativa que permita adquirir de manera práctica conocimientos útiles sobre el sistema de suspensión delantera y dirección de un automóvil. Está comprobado que disponer de este tipo de material pedagógico-práctico e incorporar nuevas técnicas de aprendizaje activo en el aula pueden no solo favorecer el aprendizaje sino fomentar el interés por el sector automóvil ya que así lo manifiestan varios estudios [9–11]. El proyecto aspira a que este tipo de montajes experimentales se destinen a todos los espacios formativos de la automoción.

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

La herramienta formativa desarrollada consiste en un montaje experimental del sistema de suspensión delantera y dirección de un vehículo convencional. Dicho montaje experimental se compone de un gemelo digital (*digital twin* en inglés) y un prototipo físico del sistema. Un gemelo digital es la réplica de un objeto físico (gemelo físico) y resulta ser, a día de hoy, una de las tecnologías más prometedoras que está impulsando la digitalización en varios sectores en el contexto de la Industria 4.0 y 5.0.

En la Figura 1 se muestra la lógica que sigue la tecnología del gemelo digital.

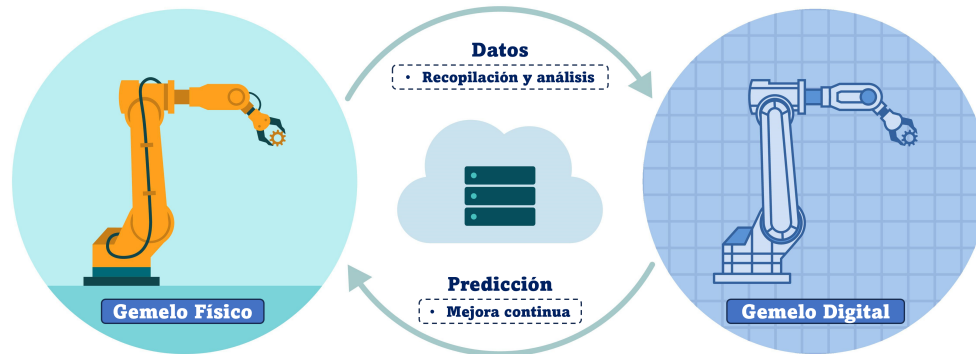


Figura 1: Esquema del gemelo físico y gemelo digital.

Los beneficios de implantar un gemelo digital en cualquier sector incluyen la reducción de costos y tiempos operativos, el aumento de productividad, el fortalecimiento de la toma de decisiones, la mejora del mantenimiento predictivo y preventivo, etc. ya que permite anticipar el comportamiento de un producto o proceso.

La industria automotriz ya está aplicando esta tecnología en la actualidad [12]: Es el caso del Grupo Volkswagen que la ha empleado para integrar una nueva estación de trabajo en una de sus plantas de fabricación: crearon un modelo 3D muy detallado de su planta y luego simularon sus procesos y procedimientos antes de agregar una nueva línea de producción. Ahorraron así tres semanas de tiempo y 40 metros cuadrados de espacio de producción. Maserati también puso en marcha un modelo digital para agregar dos nuevas líneas de ensamblaje a una de sus instalaciones. Esto les permitió ver cómo los cambios en el diseño de sus automóviles afectaban a la producción, adaptando en consecuencia sus procesos.

En el contexto de este proyecto, el gemelo digital tiene dos finalidades:

- Simular el comportamiento del sistema de suspensión delantera y dirección permitiendo así llevar a cabo una serie de análisis predictivos del mismo en diferentes escenarios de interés.
- Servir de paso previo a la fabricación del prototipo físico, es decir, representar en formato virtual el aspecto de la versión física posterior.

1.2. Objetivos

El objetivo principal del proyecto es desarrollar un montaje experimental con fines formativos que replique de forma funcional la geometría del sistema de suspensión delantera y dirección de un automóvil.

Para lograr este objetivo principal, se plantea lograr los siguientes objetivos parciales:

- Contextualizar el sistema de suspensión delantera y dirección de un vehículo en base a los componentes y parámetros de configuración interesantes que intervienen en el comportamiento dinámico del vehículo.
- Elaborar un gemelo digital del montaje experimental para hacer análisis y como apoyo al plan de fabricación.
- Establecer un plan de fabricación detallado para poder elaborar la primera versión física del montaje experimental.

1.3. Estructura del proyecto

El proyecto se organiza en cuatro bloques principales:

1. Estructura y funcionamiento del sistema sistema de suspensión delantera y dirección de un auto-móvil

Tras una introducción sobre el comportamiento dinámico del vehículo y los tipos de suspensión existentes, se examinan los elementos que constituyen el sistema y los parámetros de configuración más significativos que se desean reproducir en el montaje experimental. Se analiza la función de cada uno de ellos, se explica su importancia y se pone en valor mediante casos de estudio de interés su influencia en el comportamiento dinámico del vehículo.

2. Diseño y desarrollo del montaje experimental

Se parte del análisis de los criterios de diseño de las piezas para llevar a cabo una labor de simplificación de la geometría de las mismas. El objetivo de dicha simplificación es extraer la geometría básica que hay en el interior de la pieza optimizada ya que únicamente se quiere preservar el aspecto funcional. Se exponen entonces los componentes del montaje diseñados y las piezas de unión, para posteriormente mostrar el ensamblaje final. Asimismo, se detalla el método de medición o muestreo de parámetros significativos. Estos permiten al usuario ubicar rápidamente los puntos críticos, proporcionando así criterios para afirmar que dicha configuración del sistema supone o no un riesgo para el adecuado comportamiento del vehículo. Con todo ello, se expone el gemelo digital diseñado mostrando sus grados de libertad e indicando los posibles ajustes para conseguir la configuración deseada del sistema.

3. Ensayos y simulación

Las pruebas de desempeño permiten poner a prueba el gemelo digital. A tal efecto, se detalla la realización de simulaciones con ADAMS CAR, mediante las que se identifican escenarios interesantes dependiendo de la posición del sistema de suspensión delantera y dirección del vehículo. Particularizando el sistema por defecto de ADAMS CAR para el Gemelo Digital, y analizando los parámetros comentados en el apartado de estructura y funcionamiento, se puede anticipar el comportamiento del sistema de suspensión delantera y dirección.

4. Plan de fabricación y montaje

Se establece y documenta el plan para la posterior fabricación de la versión física del montaje experimental, es decir, un primer prototipo real. Se detallan los aspectos más importantes como las alternativas de fabricación o los materiales más apropiados para su elaboración.

Por último, se proponen algunas mejoras para el montaje experimental enmarcadas dentro de la prospectiva del proyecto, ofreciendo así una visión de futuro que permita identificar oportunidades de desarrollo y definir líneas de acción a corto y medio plazo.

2. Metodología

Tras definir los objetivos generales, se cree conveniente fijar una metodología de trabajo que sirva de guía de referencia para poder mantener en todo momento la estructura previamente definida y coherente a lo largo del proyecto.

El objetivo es mejorar la eficiencia, la eficacia y la calidad del trabajo realizado ya que permite tener una alternativa para poder reubicarse dentro del proyecto y facilitar la toma de decisiones si algún resultado no es el esperado.

Se establece así un proceso organizado en una serie de etapas incluidas en tres fases principales para poder alcanzar los objetivos planteados en el apartado anterior. Dichas fases son las siguientes y se resumen en la Figura 2.

1. Contextualización y Concepción
2. Estudio del Comportamiento
3. Plan de Fabricación

En la primera fase se contextualiza el sistema de suspensión delantera y dirección y se identifican todos los parámetros que son necesarios poder medir o localizar en el gemelo digital y posteriormente en el prototipo físico. Una vez identificados los componentes del sistema y dichos parámetros, se prosigue con el diseño. En esta etapa de la primera fase se diseñan todos los componentes del sistema para poder realizar un primer ensamblaje virtual del gemelo digital. Sobre este, se comprueban los grados de libertad, se analizan los puntos desde los que se puede regular la posición del montaje y se toman decisiones sobre la forma de medir los parámetros identificados en la etapa anterior. Si los parámetros han sido identificados incorrectamente o son insuficientes, se debe volver a la etapa anterior. Tras analizar las posibles limitaciones del gemelo digital en cuanto a emular correctamente el comportamiento real de un sistema de suspensión delantera y dirección de un vehículo, se considera que se puede proceder con la siguiente fase.

En la segunda fase se incluyen los ensayos y simulación con ADAMS CAR. Se traslada el gemelo digital al programa informático. Para ello se deben localizar los puntos de referencia o *hardpoints*. Se prueban diferentes configuraciones y se analizan los resultados en base a los parámetros medidos. Puede darse el caso de que los resultados sean incoherentes. Si es así, se cuestiona en primer lugar la parametrización de ADAMS CAR y, si esta es correcta, el error viene de la fase anterior, a la que se tiene que retroceder. Por el contrario, si los resultados son razonables, se prosigue con la siguiente fase.

La tercera fase lleva a cabo el plan de fabricación del primer prototipo físico. Se estudian las alternativas de fabricación y el material más apropiado. Sin embargo, al plantear la fabricación de un producto diseñado en CAD, pueden surgir problemas. Por ejemplo, el ensamblaje de los componentes en el gemelo digital es relativamente sencillo, no así en el prototipo físico ya que se deben tener en cuenta aspectos reales (peso de los componentes y estabilidad general del conjunto ensamblado por ejemplo). Además, en los diseños en CAD, las tolerancias son muy ajustadas y no se tiene en cuenta la posibilidad de que ciertos materiales o procesos de fabricación no puedan cumplir con estas tolerancias exactas. Por ello, llegado el momento, puede ser necesario retroceder a la fase de diseño para revisar algunos componentes concretos.

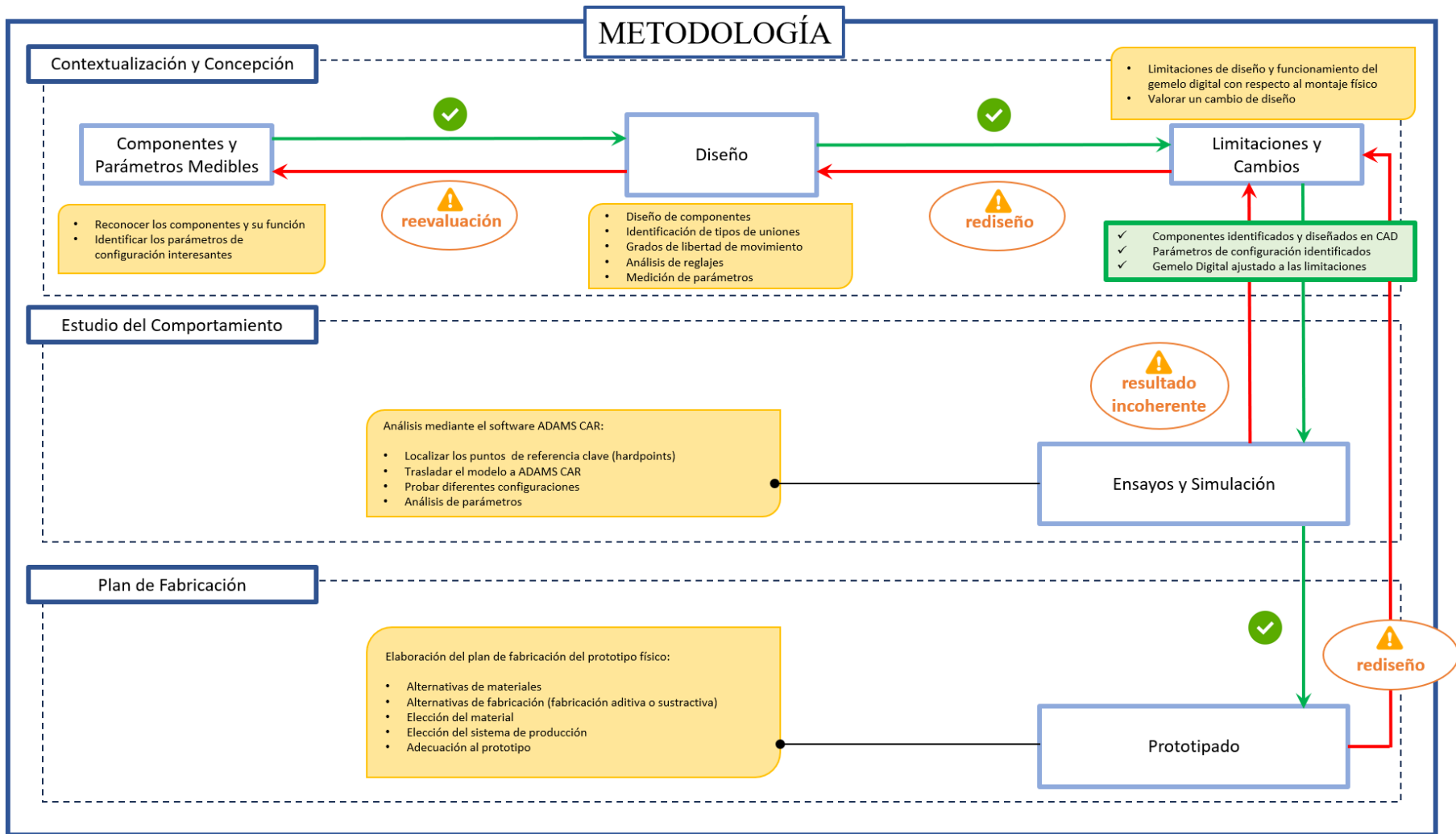


Figura 2: Esquema de la metodología del proyecto.

3. Estructura y funcionamiento del sistema de suspensión delantera y dirección de un automóvil

3.1. Introducción

Se entiende por vehículo automóvil convencional un conjunto de sistemas que, interconectados, permiten el funcionamiento y rendimiento óptimo del sistema principal. Motor y transmisión, inyección, refrigeración, lubricación, frenado y eléctrico o electrónico son algunos de estos sistemas, que se muestran en la Figura 3.

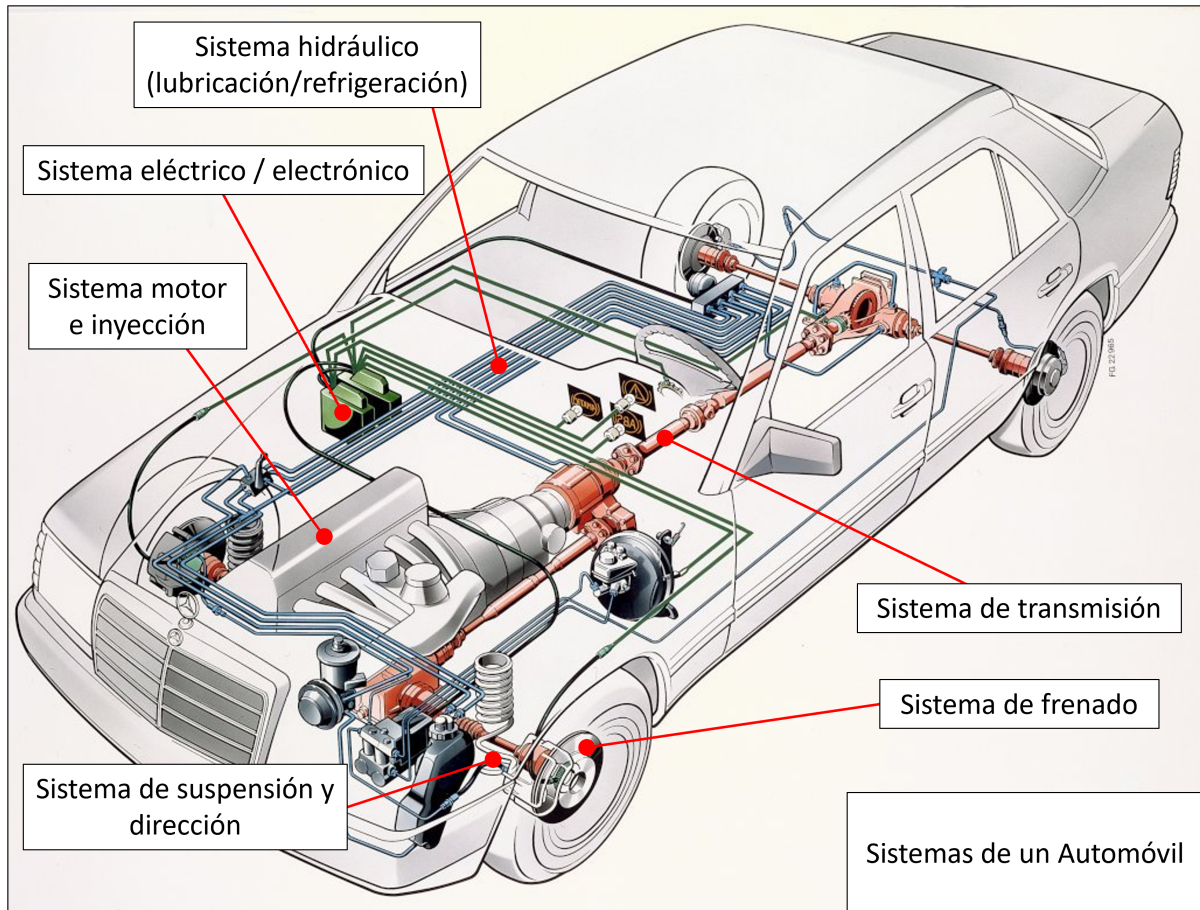


Figura 3: Sistemas de un Automóvil. Fuente: Mercedes-Benz (W 124, 4 MATIC), 1986.

Cada sistema tiene su propia complejidad y es dependiente en mayor o menor medida del resto de sistemas para poder funcionar de manera efectiva. Entre todos ellos, se destaca el sistema de suspensión delantera y el sistema de dirección, siendo estos el objeto de estudio de este proyecto.

Ambos sistemas tienen funciones diferentes pero trabajan de forma conjunta interaccionando entre sí, y están implicados directamente en la dinámica del vehículo, por lo que no se pueden tratar por separado: la intervención de los dos sistemas permite mejorar la estabilidad y el control del vehículo ante las diferentes situaciones de conducción, minimizando el impacto de las fuerzas externas, la vibración y otros factores que puedan afectar el manejo del automóvil y por tanto a la seguridad y confort de los ocupantes.

- El sistema de suspensión está formado por un mecanismo que guía el movimiento y elementos elásticos-amortiguadores que se encargan de distribuir las fuerzas que inciden sobre el sistema. Como conjunto, permite el movimiento de absorción de las vibraciones y fuerzas que actúan sobre las ruedas: la finalidad del sistema es lograr un mayor control de la oscilación del vehículo. El sistema de suspensión ayuda de esta forma a minimizar los efectos de las irregularidades del terreno sobre el vehículo, manteniendo la tracción de este siempre y cuando las fuerzas externas que los neumáticos tienen que compensar se encuentren dentro de un rango de valores asumible.
- El sistema de dirección está formado por un mecanismo que permite al conductor modificar la orientación de las ruedas en el plano longitudinal y así controlar la trayectoria del vehículo. Por otro lado, contribuye también a mantener la estabilidad del mismo, corrigiendo y evitando las posibles desviaciones involuntarias de la trazada.

Optimizar el funcionamiento del conjunto de sistemas de suspensión delantera y dirección es vital para que un vehículo circule con seguridad y obedeciendo a la voluntad del conductor en cada instante.

Antes de entrar en materia, cabe introducir el concepto de masa suspendida y no suspendida. La masa suspendida es aquella que está sustentada por el mecanismo de suspensión, es decir, la que se apoya en los elementos elásticos de esta. Esto incluye el motor y la transmisión, la carrocería y todo el compartimento interior del coche así como la carga y los ocupantes. La masa no suspendida es aquella que es solidaria a la rueda, es decir, los neumáticos o el sistema de frenos. Para un análisis simplificado, es posible distribuir la masa del vehículo únicamente en suspendida y no suspendida, repartiendo entre ellas la masa de los elementos que las unen.

3.1.1. Comportamiento dinámico del vehículo

En el apartado anterior se introducen los sistemas de suspensión y dirección como partes fundamentales en la dinámica del vehículo. El comportamiento dinámico es la consecuencia o respuesta que tiene sobre un objeto, en este caso un vehículo automóvil, a las acciones externas que actúan sobre él, incluyendo así los efectos de la aceleración, la frenada, el giro o la transferencia de peso entre otros. El comportamiento del vehículo depende de una serie de factores como son la distribución de pesos, la rigidez del chasis, las características de los neumáticos y en gran parte la geometría del sistema de suspensión delantera y dirección.

El sistema de suspensión delantera y dirección juega un papel fundamental en el comportamiento dinámico del vehículo. [13]

3.1.2. Tipologías de suspensión delantera y dirección

Tipologías de suspensión

Las suspensiones se clasifican en dos categorías en función del tipo de movimiento relativo entre las dos ruedas de un mismo eje: dependientes e independientes.

Por un lado, en el caso de las **suspensiones dependientes**, las ruedas de un mismo eje se unen mediante una barra, también llamada eje rígido, haciendo que el comportamiento de una influya en el de la otra y por tanto que sean dependientes. De este modo, los desplazamientos de una rueda están condicionados a los desplazamientos de su par en el mismo eje y no dependen exclusivamente de las variaciones geométricas del terreno por el que discurre cada una, como se puede ver en la Figura 4. Esta es, sin duda, la principal desventaja del sistema, ya que se centrará en mantener la misma relación de ángulos entre las ruedas del eje, quedando en segundo plano la relación de las ruedas con el terreno. Esto implica que el manejo del automóvil se vuelva más impredecible y que en ocasiones los neumáticos pierdan tracción al encontrarse en el aire.

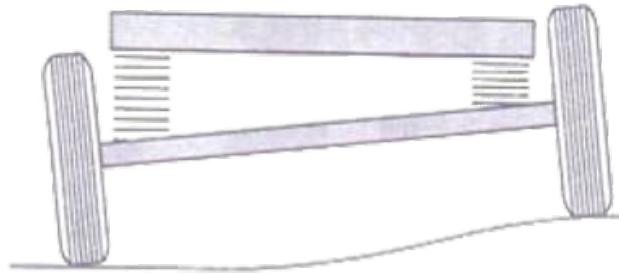


Figura 4: Esquema de la tipología de suspensión dependiente.

Además, este tipo de diseños puede hacer que aumente notablemente la masa no suspendida. Si se aumenta el peso de la masa no suspendida, las vibraciones o los baches que se sienten en la carretera pueden verse amplificadas, ya que el movimiento de la rueda es mucho más lento y le cuesta seguir las irregularidades del terreno, impidiendo así que los elementos elásticos absorban las vibraciones y que se transmitan al habitáculo. El aumento de la masa no suspendida también puede provocar problemas de control de las ruedas, especialmente durante una aceleración o deceleración brusca.

Con todo ello, a pesar de las desventajas mencionadas, es un sistema muy empleado en vehículos industriales o todoterrenos 4x4 en los que el confort de los ocupantes no es la prioridad. La principal ventaja de este sistema de suspensión es su simplicidad mecánica, que permite cumplir con su cometido aportando robustez a un coste económico bajo tanto de diseño como de fabricación.

De esta forma se consigue abaratar el coste general del vehículo aumentando su firmeza para discurrir por terrenos irregulares o poder cargar más mercancía con soltura si el uso es industrial.

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Por otro lado, el caso opuesto es el de las **suspensiones independientes**, ya que no se transmiten esfuerzos entre los extremos del eje, permitiendo así el movimiento aislado de cada rueda, como se puede ver en la Figura 5. Si bien es un sistema que incorpora mayor cantidad de piezas y que por tanto resulta más complejo, costoso y en el que su configuración es clave para garantizar su funcionamiento óptimo, permite un mejor ajuste, adaptable a las exigencias de cada tipo de vehículo, ofreciendo mejores características dinámicas.

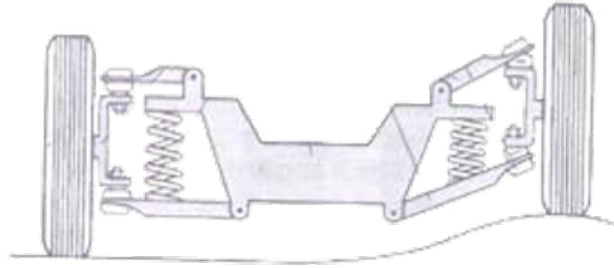


Figura 5: Esquema de la tipología de suspensión independiente.

Asimismo, es un sistema cuya estructura es mucho más ligera, disminuyendo así la masa no suspendida del vehículo y permitiendo que el movimiento, además de ser independiente, sea más preciso. El comportamiento dinámico se ve beneficiado en situaciones tanto de recta como de curva ya que el vehículo se vuelve mucho más preciso. Por último, y en vehículos con tracción total, el diferencial se puede anclar directamente al chasis en lugar de ir solidario al eje rígido como sucedía en las suspensiones dependientes. De esta forma se gana más altura libre al suelo, evitando que cualquier elemento dañe la parte baja del vehículo.

Por su uso más extendido en la mayoría de vehículos convencionales y su complejidad, el prototipo del presente trabajo monta un sistema de suspensión independiente. Este resulta ser más interesante desde el punto de vista formativo tanto por el diseño y características de sus componentes como por la versatilidad que aporta, dando la posibilidad de configurar varios parámetros que se analizarán posteriormente.

Entre los sistemas que pertenecen a la categoría de suspensiones independientes, destacan los dos siguientes por ser los más usados: McPherson y Doble Trapecio.

Sistema McPherson

La suspensión McPherson es un sistema independiente que utiliza directamente el conjunto elástico muelle-amortiguador como sistema para conectar la parte superior de la mangueta al chasis del vehículo. En la parte inferior, se emplea un brazo con forma de L que une el chasis a la mangueta. Todo ello se puede observar en la Figura 6.



Figura 6: Sistema de suspensión McPherson.

El sistema de suspensión McPherson es el más popular debido a su sencillez, compacidad y manejo.

Una de las principales ventajas de la suspensión McPherson es su simplicidad de diseño. Al tener solo un brazo de suspensión, se reduce el número de componentes y se simplifica la fabricación y el mantenimiento. Tanto es así que este sistema es especialmente adecuado para vehículos con motor delantero y tracción delantera, es decir para la mayoría de vehículos, ya que proporciona el espacio suficiente al motor. Además, la suspensión McPherson es más ligera que otros diseños de suspensión, lo que puede mejorar la eficiencia de consumo de combustible y el rendimiento general del vehículo.

Otra ventaja de la suspensión McPherson es su capacidad para proporcionar estabilidad en la dirección del vehículo, ajustándose para minimizar, por ejemplo, el cambio en el ángulo de inclinación de la rueda durante el recorrido de compresión y expansión de la suspensión. Se reduce así la variación en el ángulo de caída y convergencia de la rueda, conceptos que se detallan uno a uno en los siguientes apartados.

Sin embargo, la suspensión McPherson también tiene algunas limitaciones. Por ejemplo, al tener solo un brazo de suspensión, la geometría de la suspensión se puede ver envuelta en situaciones comprometidas por la carga lateral y la flexión del chasis, pudiendo afectar al manejo del vehículo en situaciones de mayor exigencia. Además, debido a la posición elevada del muelle-amortiguador, la suspensión McPherson puede tener una menor capacidad de amortiguación y por tanto de absorción de impactos que otros diseños de suspensión. Esto reduce considerablemente el confort de conducción en comparación con otras suspensiones más avanzadas como la de doble trapecio.

Sistema de Doble Trapecio

La suspensión de doble trapecio es un sistema independiente que utiliza dos brazos, uno superior y otro inferior, también conocidos como trapecios, para conectar la rueda al chasis del vehículo mediante cojinetes. En este caso el conjunto muelle-amortiguador se fija por un lado al chasis y por el otro a la parte inferior de la mangueta como se puede ver en la Figura 7. La diferencia con respecto a la suspensión McPherson es, además del brazo de suspensión adicional, el punto de anclaje inferior del muelle-amortiguador, ocupando menos espacio vertical.



Figura 7: Sistema de suspensión de Doble Trapecio.

La suspensión de doble trapecio se utiliza en muchos vehículos de alta gama y deportivos debido a su capacidad para proporcionar una excelente respuesta de manejo y control. Además, ofrece un mayor control del recorrido de la suspensión haciendo que este sea muy predecible ya que absorbe mejor las alteraciones transversales, lo que se traduce en una mejor precisión de la dirección, es decir, una mejor alineación de las ruedas y una mayor comodidad de conducción.

Una de las principales ventajas de la suspensión de doble trapecio es su capacidad para ajustar la geometría de la suspensión para adaptarse a diferentes situaciones de conducción. Por ejemplo, el ángulo de inclinación del pivote del trapecio inferior se puede ajustar para controlar la variación del ángulo de caída y de la curva de convergencia en la rueda durante la compresión de la suspensión. Esto ayuda a mantener el contacto del neumático con la superficie de la carretera y proporciona una mayor estabilidad en las curvas.

Sin embargo, la suspensión de doble trapecio también tiene algunas desventajas. Por ejemplo, debido a su mayor complejidad y costo de fabricación, suele ser más cara que otros tipos de suspensión. Además, su mantenimiento puede ser más complicado y costoso debido a la necesidad de conservar la geometría de la suspensión correctamente ajustada. En algunos casos, la suspensión de doble trapecio también puede ser más pesada que otros tipos de suspensión, lo que puede afectar el rendimiento del vehículo en términos de eficiencia en cuanto al consumo de combustible y capacidad de aceleración.

Ambos sistemas, McPherson y Doble Trapecio, ofrecen ventajas en términos de manejo, estabilidad y comodidad en la conducción, por lo que son muy populares entre los fabricantes de automóviles. A su vez, existen otros diseños de sistemas de suspensión independientes como el Multilink, más empleado en el eje trasero. Lo que queda claro es que cada diseño tiene sus propias ventajas y desventajas, y la elección del sistema de suspensión dependerá de una variedad de factores, como el tipo de vehículo, el presupuesto y las necesidades de conducción.

Tipologías de dirección

El sistema de dirección de un vehículo está compuesto por un conjunto de elementos que forman un mecanismo diseñado para permitir al conductor controlar la trayectoria del vehículo mediante el giro de las ruedas, llamadas ruedas directrices. El elemento principal es el volante, que actúa para iniciar el movimiento de todo el sistema de dirección. Sin embargo, tras este existe una combinación de piezas como la columna de dirección, la caja de dirección, las articulaciones y conexiones que trabajan como conjunto para transmitir los movimientos del volante a las ruedas directrices, que suelen ser las delanteras en la mayoría de casos.

El mecanismo de dirección más utilizado en los vehículos actuales es el de tipo cremallera y piñón que se puede ver en la Figura 8. En el centro del mecanismo se encuentra un bastidor llamado cremallera de dirección que está limitado, por lo que solo puede moverse en línea recta. El piñón, cuyo giro es solidario a la barra de dirección a su vez controlada por el volante, puede hacer que la cremallera se mueva en un sentido u en otro. El brazo de dirección, integrado en la mangueta, permite el giro de las ruedas y se une a la cremallera de dirección mediante una bieleta que puede tener movimiento de traslación y rotación. Se trata de un mecanismo de cuadrilátero articulado.

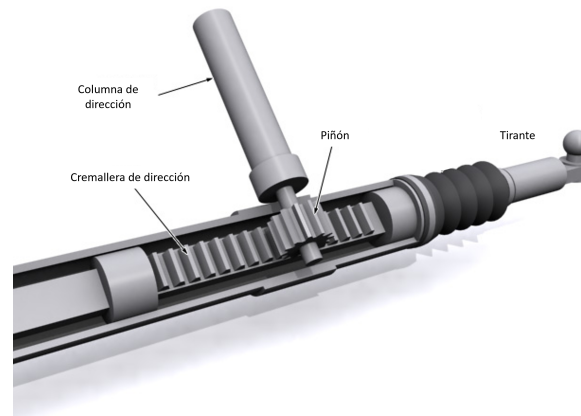


Figura 8: Sistema de dirección de cremallera y piñón.

Un mecanismo muy similar al de cremallera y piñón es el de bolas, muy típico en vehículos pesados ya que emplea esferas para suavizar el movimiento entre el piñón y la cremallera.

La dirección descrita previamente es la de tipo manual. Sin embargo, hoy en día se emplea un sistema adicional llamado dirección asistida eléctrica que permite girar el volante con mayor facilidad y precisión, con un par de rotación menor, reduciendo así el esfuerzo del conductor. Una unidad de control electrónico decide la cantidad de potencia que se transfiere a la columna de dirección en base al par aplicado por el conductor, el ángulo de giro, la velocidad de la rueda y la velocidad del vehículo.

Por otro lado y como alternativa a los sistemas mecánicos, existen también sistemas hidráulicos y electrohidráulicos.

3.2. Elementos básicos

En esta sección se detalla la estructura del sistema de suspensión delantera y dirección, es decir, los elementos que lo componen y los parámetros configurables o reglajes que permiten modificar la posición del sistema.

Los elementos básicos del sistema de suspensión delantera y dirección se pueden clasificar en:

- Elásticos y Amortiguadores
- Estructurales - Mecanismos

Cabe destacar que este proyecto se centra en el desarrollo de un modelo geométrico con el que se busca recrear el mecanismo y por tanto los movimientos del sistema de suspensión delantera y dirección de un automóvil. El estudio explícito de la dinámica del montaje experimental desarrollado queda fuera del alcance del proyecto, más allá de explicar cualitativamente los conceptos básicos para entender el comportamiento y funcionamiento del sistema. Por ello, los componentes elásticos y amortiguadores se representan en el modelo, como no puede ser de otro modo puesto que forman parte de la estructura del sistema de suspensión delantera pero no se representa su dinámica, es decir, la transmisión de fuerzas.

3.2.1. Componentes elásticos y amortiguadores

Elásticos

Los componentes elásticos del sistema son los que mediante su deformación permiten el movimiento relativo entre las ruedas y el chasis del vehículo. Estos se deforman en mayor o menor medida dependiendo de su rigidez, su capacidad para absorber la energía de impacto de las ruedas, y la devuelven recuperando su posición inicial mediante un movimiento de extensión.

El muelle helicoidal es el elemento elástico por excelencia. Se trata de un alambre enrollado en forma de hélice o espiral entorno al eje vertical. Este acumula energía mediante esfuerzos de torsión que hacen que se pliegue sobre si mismo como se puede ver en la Figura 9 y transmite una fuerza proporcional al desplazamiento.

La finalidad de los muelles helicoidales empleados en el sistema de suspensión de un vehículo es, por un lado, mantener la distancia entre la masa suspendida y el terreno lo más constante posible paliando el efecto sobre el vehículo de las irregularidades suelo. Por otro lado, el otro cometido es el de asegurar el contacto neumático-suelo el máximo tiempo posible para no perder tracción y por tanto estabilidad.

La principal ventaja de emplear muelles helicoidales es su gran sencillez constructiva, aportando ligereza y efectividad. Además se pueden montar en muchas posiciones (horizontal, vertical o inclinado) ya que así se lo permite su estructura. Sin embargo, es también su estructura la que le perjudica ya que carece de rigidez vertical suficiente como para no depender de elementos de guiado en su recorrido. Cuanto mayor sea la rigidez del muelle, mejor comportamiento dinámico tiene el vehículo, pero esto va en detrimento de la comodidad de los pasajeros. Implica por tanto un compromiso entre el confort del pasajero y la optimización del comportamiento dinámico. Por último, los muelles helicoidales no condicionan el movimiento de giro de las ruedas por lo que son elementos idóneos para incorporar en las ruedas directrices, que en la mayoría de casos son las delanteras.

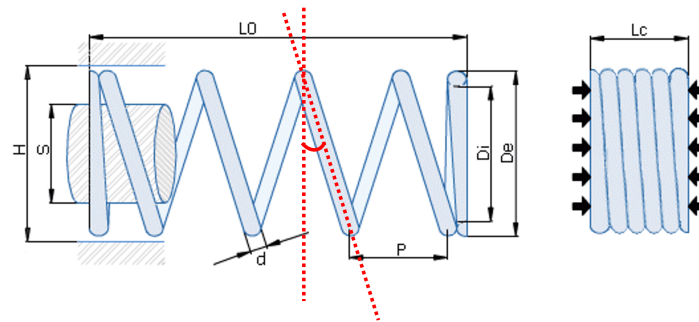


Figura 9: Esquema de un muelle helicoidal.

Existen más elementos elásticos empleados en otros sistemas de suspensión como pueden ser las ballestas (también conocidas como láminas) o las barras de torsión. Sin embargo, no se va a profundizar en el detalle de estos elementos ya que se emplean en sistemas de suspensión dependientes donde ambas ruedas de un mismo eje se encuentran interconectadas mecánicamente.

Amortiguadores

Los muelles helicoidales se asocian a menudo con amortiguadores, colocando ambos en el mismo eje concéntrico. En la Figura 10 se puede ver su colocación en los sistemas de doble trapecio y McPherson. Los amortiguadores son los responsables de absorber las vibraciones u oscilaciones producidas por los elementos elásticos, es decir, controlar y prevenir que el rebote de los muelles helicoidales no se propague en el tiempo más de lo necesario, atenuar su oscilación. Dicha energía absorbida es proporcional a la velocidad relativa entre el chasis y la rueda y se transforma en energía calorífica transmitida al fluido del interior del amortiguador (aceite, aire, grasa ...).

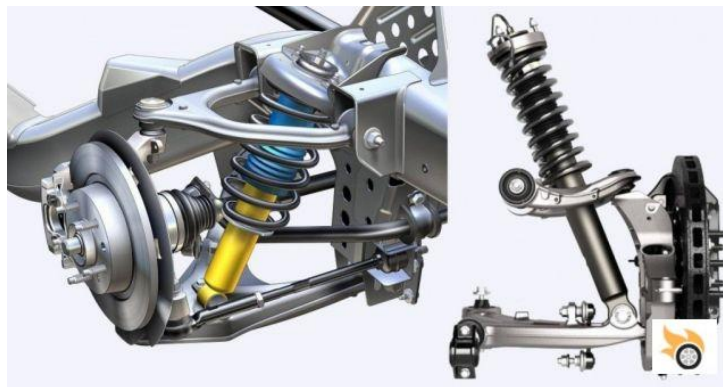


Figura 10: Ensamblaje del muelle helicoidal con el amortiguador integrados en el sistema de suspensión para los casos de Doble Trapecio (izquierda) y McPherson (derecha).

Tal y como se ha mencionado anteriormente, existe un compromiso entre el comportamiento dinámico óptimo de un vehículo y su comodidad para transportar pasajeros. Un amortiguador que absorbe demasiado las oscilaciones del muelle se traduce en un sistema muelle-amortiguador excesivamente rígido, haciendo que el movimiento del vehículo sea análogo al perfil del terreno sobre el que circula. Si este último tiene muchas irregularidades, resulta molesto para los ocupantes del vehículo.

Sin embargo, un amortiguador que no consigue eliminar los movimientos oscilantes del muelle helicoidal desestabiliza gravemente al vehículo repercutiendo así en la seguridad activa: las ruedas pierden el contacto con el terreno provocando también una disminución del confort, un incremento en la distancia de frenada y una falta de direccionalidad. El vehículo se vuelve entonces difícil de controlar para el conductor.

3.2.2. Componentes estructurales - mecanismos

La función de los componentes estructurales es guiar el movimiento de la rueda con respecto al chasis del vehículo además de acoplar los mecanismos tanto de dirección como de transmisión de tracción a las ruedas.

Se identifican varios elementos que pertenecen a esta categoría:

Trapecios o Brazos de Suspensión

El trapecio de suspensión, mostrado en la Figura 11, es un elemento estructural que se emplea para conectar la mangueta al chasis del vehículo a través de cojinetes que funcionan como pares de rotación. Es un soporte que debe ser resistente ya que tiene que lidiar con las irregularidades del terreno y a la vez asegurar el correcto recorrido que realiza la suspensión. Por ello, tiene que poder soportar esfuerzos u oscilaciones tanto transversales como longitudinales.



Figura 11: Trapecio o brazo de suspensión.

Dependiendo de si la suspensión es McPherson o Doble Trapecio, se disponen uno o dos trapecios respectivamente: siempre uno inferior, y otro superior únicamente presente en el segundo tipo de suspensión como ya se ha detallado en la sección 3.1.2. Además, suelen tener una geometría similar a la de un triángulo por lo que se suelen llamar también de este modo.

Mangueta

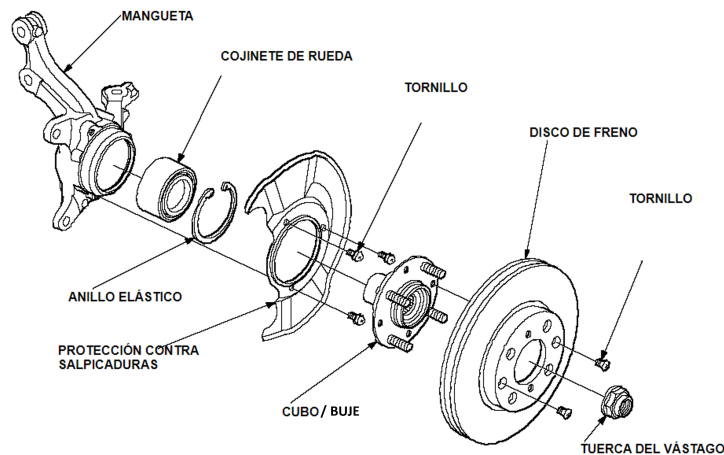


Figura 12: Esquema que la disposición de la mangueta.

La mangueta es el elemento de unión entre la rueda, concretamente el buje de la rueda, y el mecanismo de suspensión. A su vez, se acoplan a ella el sistema de frenado, los rodamientos sobre los que gira la rueda y el tirante de dirección en el caso del eje delantero para poder orientar la rueda.

Elementos de unión

Además de los ya mencionados, existen otros componentes estructurales cuya función es la de unir y articular los componentes previamente descritos entre ellos restringiendo un cierto número de grados de libertad (GDL) y que se dividen en pares esféricos (3 GDL), pares de rotación (1 GDL), uniones fijas.

Par esférico:

Se destaca la rótula (Figura 13). Consiste en una articulación con tres tipos de movimientos: Permite rotaciones de los trapecios o brazos unidos a la misma, alrededor de tres ejes perpendiculares entre sí. En la práctica, dos de las rotaciones tienen un ángulo limitado, mientras que la tercera posee un ángulo de 360°.

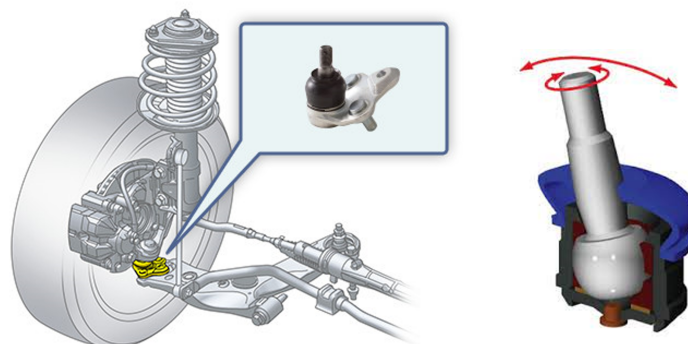


Figura 13: Esquema de la disposición y funcionamiento de las rótulas.

Existe un equivalente a la rótula que es el rodamiento o cojinete esférico, mostrado en la Figura 14.

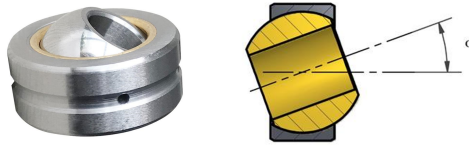


Figura 14: Cojinete esférico.

Par de rotación:

Se destaca el cojinete de rotación (Figura 15) cuya finalidad es reducir la fricción entre superficies en contacto para facilitar el movimiento rotativo. Del mismo modos, se pueden emplean rodamientos con bolas, rodillos o conos que se colocan entre las superficies de contacto.

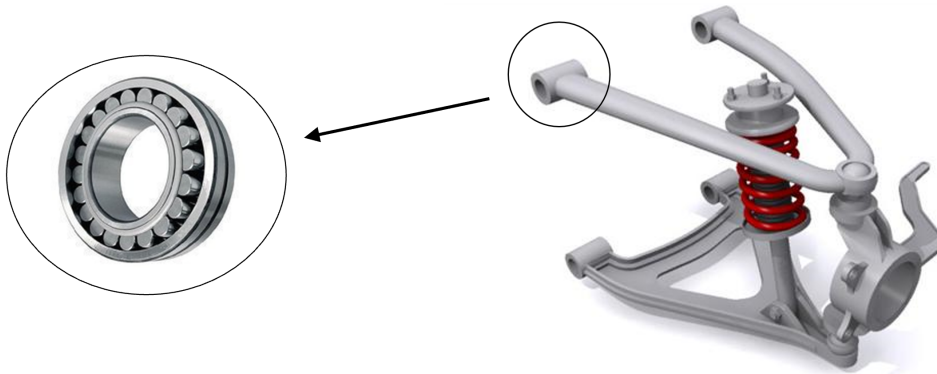


Figura 15: Esquema de la disposición del cojinete de rotación.

Unión fija:

Se destaca el silentblock (Figura 16). Permite pequeños movimientos elásticos para aislar los componentes de posibles vibraciones. Está formado por una pieza de plástico y que se inserta entre dos piezas metálicas para evitar o reducir todo lo posible que las vibraciones se transmitan entre ellas.



Figura 16: Silentblock.

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

A continuación, en la Figura 17, se muestra un esquema general con los componentes principales del sistema de suspensión delantera y dirección en sus variantes Doble Trapecio y McPherson:

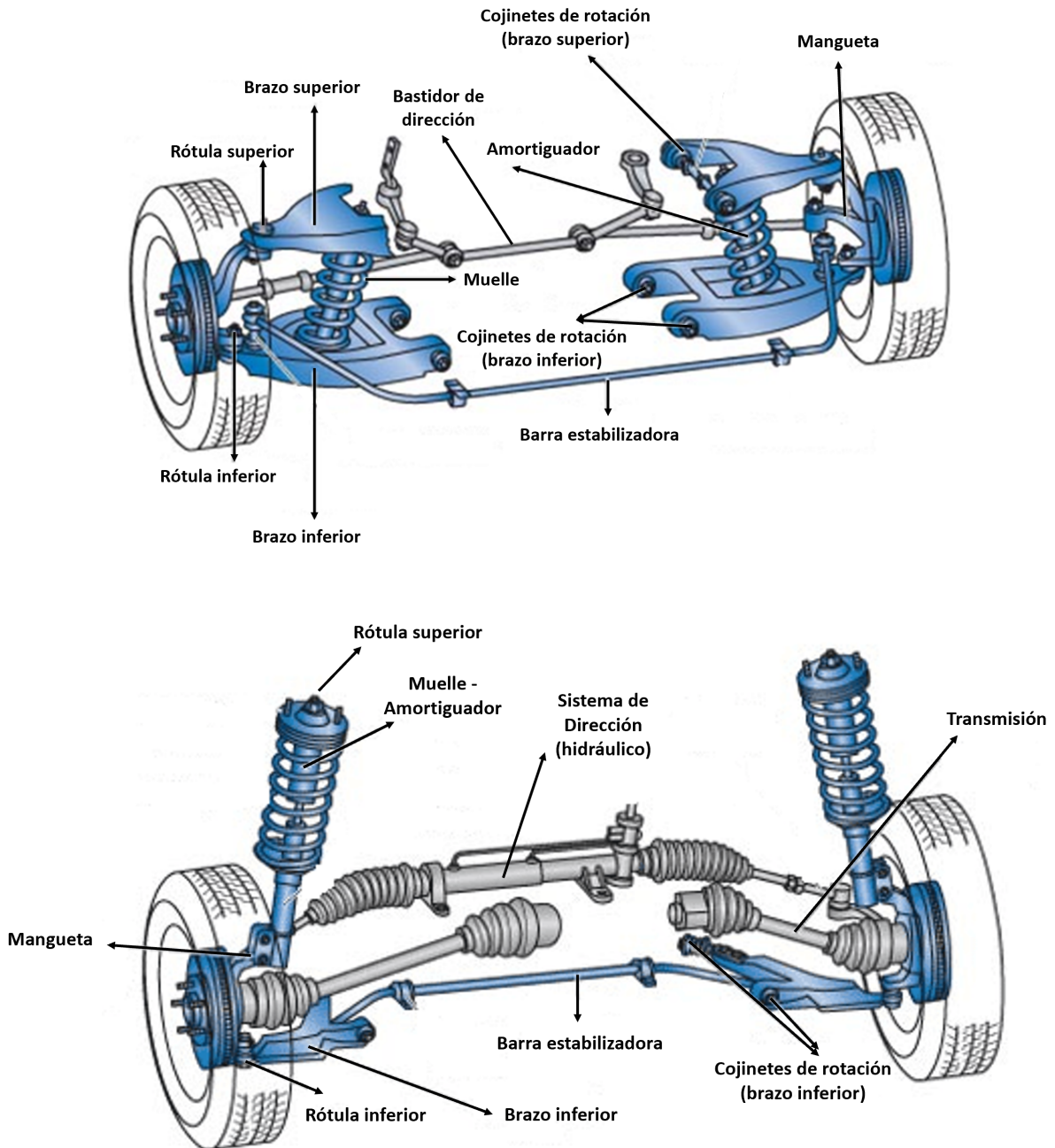


Figura 17: Esquema general con los componentes principales del sistema de suspensión delantera y dirección en sus variantes Doble Trapecio (arriba) y McPherson (abajo).

3.3. Parámetros de configuración específicos del sistema de suspensión delantera y dirección

Los parámetros descritos en esta sección se recogen en la norma española *UNE 26517:2006* (Equivalente *ISO 8855:2011*) [14].

3.3.1. Ángulo de convergencia (*toe*)

El ángulo de convergencia o *toe angle* en inglés corresponde con el ángulo que forma el plano medio de las ruedas con respecto al eje longitudinal del vehículo, medido desde la vista en planta. El valor es positivo cuando el plano medio de las ruedas del eje converge por delante de ellas (convergencia positiva o *toe-in*), nulo si los planos medios no convergen sino que son paralelos entre sí y negativo si los planos medios de las ruedas del eje convergen por detrás de ellas (convergencia negativa o *toe-out*). Todo ello se muestra en la Figura 18.

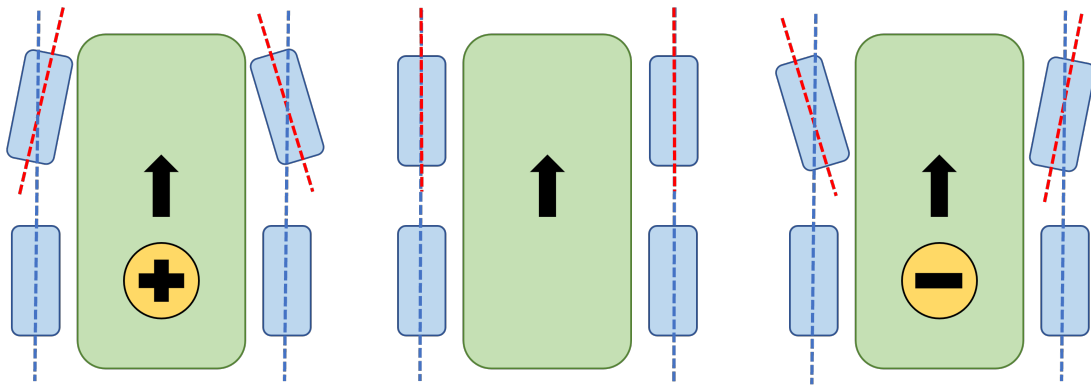


Figura 18: Esquema del criterio de signos del ángulo de convergencia (vista en planta).

Configurar el eje delantero con un ligero valor de convergencia positiva consigue que el vehículo tenga un mejor comportamiento en curva ya que mejora la estabilidad y permite que el conductor pueda cambiar la dirección más fácilmente. Sin embargo, al circular en línea recta, la convergencia positiva de las ruedas penaliza la resistencia a la rodadura ya que aparecen fuerzas adicionales que aumentan el rozamiento entre el neumático y el terreno. Con un ángulo de convergencia nulo, la resistencia es mucho menor. Por ello, existe un compromiso entre estabilidad en curva y resistencia a la rodadura, o lo que es lo mismo, configurar el eje delantero con mayor o menor ángulo de convergencia.

La convergencia negativa de las ruedas es un factor que se pretende evitar en la medida de lo posible ya que afecta de forma muy negativa a la estabilidad del vehículo tanto en recta como en curva.

Sin embargo, existen situaciones específicas en las que se configura el eje delantero para que el ángulo de convergencia sea distinto entre ambas ruedas pero se restringen al ámbito de la competición.

3.3.2. Ángulo de caída (camber)

El ángulo de caída o *camber angle* en inglés representa la desviación del eje longitudinal de la rueda con respecto a la vertical que pasa por su centro de rotación.



Figura 19: Vista en planta del vehículo desde la que se mide el ángulo de caída.

El criterio de signos se muestra en la Figura 20 y es el siguiente: cuando a la altura del terreno sobre el que circula el vehículo, la línea imaginaria del eje longitudinal de la rueda se sitúa al exterior, con respecto al vehículo, de la vertical de la rueda, la caída es negativa. Sin embargo, si esta se sitúa al interior, es positiva. Una forma más sencilla de explicar el convenio de signos es: si con el vehículo de frente, se ve más saliente la parte superior de las ruedas que su base, el ángulo es positivo. Si por el contrario se ve más saliente la base de la rueda que la parte superior, el ángulo es negativo.

El mejor valor de ángulo de caída es el que permite lograr el mejor compromiso entre el comportamiento en recta y en curva además de optimizar el desgaste de la banda de rodadura del neumático.

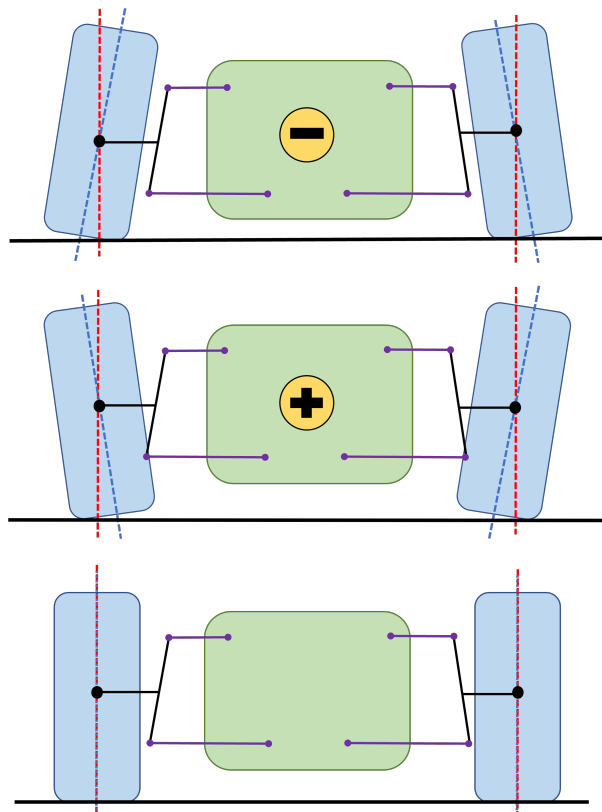


Figura 20: Esquema del criterio de signos del ángulo de caída (vista frontal).

Si el vehículo se desplaza en línea recta y con las ruedas con un ángulo de caída nulo, la superficie de contacto con el terreno es máxima, y por tanto también lo es la tracción. Sin embargo, si dicho vehículo toma una curva, se genera una fuerza (centrífuga) adicional en el punto de contacto entre la rueda y el terreno que empuja el vehículo hacia el exterior. Es decir, el equilibrio de fuerzas en la banda de rodadura del neumático que había cuando el vehículo circulaba en línea recta ya no existe, ya que la parte exterior del neumático se ve expuesta a una mayor fuerza lateral que la parte interior y que tiene que compensar para mantener la estabilidad. Esto provoca que el neumático se deforme tal y como se observa en la Figura 21.

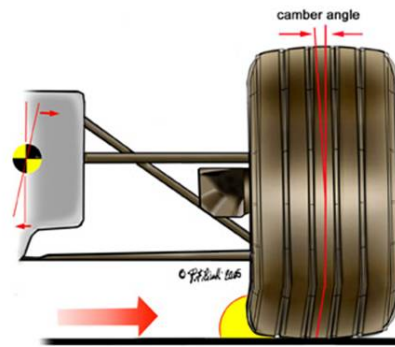


Figura 21: Esquema de la deformación del neumático delantero derecho debido a un giro a la izquierda.

En los casos en los que el ángulo de caída es diferente de cero, la rueda está inclinada y por tanto el neumático se deforma de manera natural a pesar de circular en línea recta, independientemente de si el camber es positivo o negativo. La deformación se debe a que al estar la rueda inclinada, el peso del vehículo se reparte de forma irregular en el punto de contacto neumático-suelo.

En lugar de repartirse la carga uniformemente a lo largo de toda la huella, esta es:

- MAYOR en la parte interior del neumático y MENOR en la parte exterior (cuando el camber es negativo)
- MAYOR en la parte exterior del neumático y MENOR en la parte interior (cuando el camber es positivo)

Esta diferencia en el perfil de reparto de cargas hace que en curva, configurar el sistema con ángulos positivos o negativos influya de manera distinta en el comportamiento dinámico del vehículo.

Si se emplean ángulos de caída positivos, los neumáticos ya soportan toda la carga en su parte exterior como se ha comentado previamente, por lo que la fuerza centrífuga en curva se suma a la ya soportada provocando una sobrecarga del neumático. Esto se traduce en menor capacidad de absorber mayores fuerzas laterales además de que la banda de rodadura del neumático se gasta más rápidamente.

Si se emplean ángulos de caída negativos, la carga que se disponía en la parte interior se compensa con la fuerza centrífuga que se genera en el exterior del neumático. Por ello, la presión en todo el perfil de contacto del neumático con el suelo es más uniforme que en el caso previo. El desgaste en este caso es mayor que si la caída fuese nula pero mucho menor que en el caso de caída positiva.

3.3.3. Ángulo y distancia de avance (*caster* y *mechanical trail*)

El ángulo de avance o *caster angle* en inglés representa la desviación del eje longitudinal de la suspensión delantera con respecto a la vertical que pasa por el centro de rotación de la rueda.



Figura 22: Vista en planta del vehículo desde la que se mide el ángulo de avance.

El criterio de signos se muestra en la Figura 23 es el siguiente: cuando a la altura del terreno sobre el que circula el vehículo, la línea imaginaria del eje de la suspensión se sitúa por delante de la vertical de la rueda, el avance es positivo. Sin embargo, si esta se sitúa por detrás, es negativo.

Por otro lado, el *trail* o *mechanical trail* hace referencia a la distancia que se genera a nivel del terreno entre la vertical del sistema muelle-amortiguador y el punto de contacto neumático-suelo. Está asociado con el ángulo de avance: si este es positivo, el *trail* es positivo y si es negativo, el *trail* es negativo.

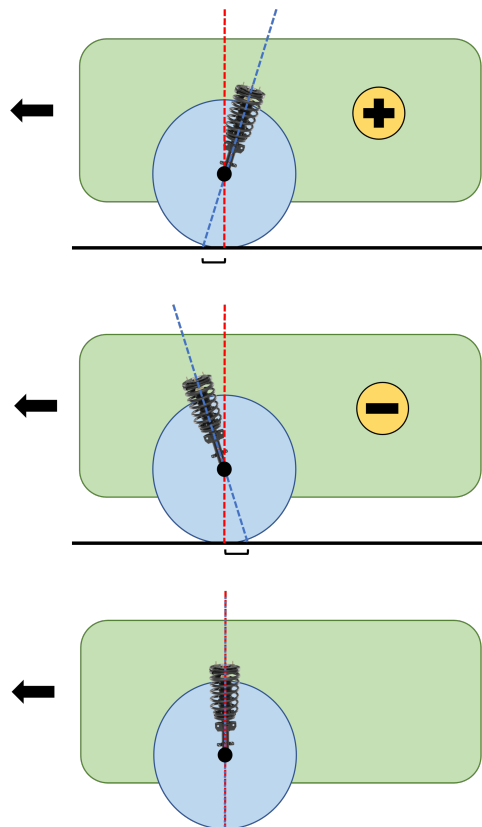


Figura 23: Esquema del criterio de signos del ángulo de avance (vista de perfil).

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

La variación del ángulo de avance o *caster* afecta al sistema de suspensión pero también al de dirección, tanto en recta como en curva: un valor positivo introduce en la rueda un momento autoalineante al girar generando más agarre del neumático y una tendencia automática a mantener recta la dirección. Este fenómeno mejora la salida de una curva ya que las ruedas tienden automáticamente a enderezarse hasta alinearse con el eje longitudinal del vehículo.

Además, por un lado, en curva, el ángulo de avance contribuye en la medida en que el ya mencionado ángulo de caída sea positivo debido al plano inclinado sobre el que gira la rueda, mejorando el comportamiento dinámico del vehículo.

Sin embargo, valores positivos del ángulo de avance endurecen la dirección provocando que el conductor tenga que hacer más fuerza para poder girar el volante. Por ello, los sistemas de dirección asistida se emplean en parte para compensar la fuerza necesaria para girar las ruedas manteniendo el avance deseado, aumentando así la capacidad de ajustar la dirección por parte del conductor.

Finalmente, si bien valores negativos del ángulo de avance facilitan el giro del volante aportando menos resistencia al sistema de dirección, introducen un momento desalineante con respecto al eje vertical, por lo que perjudican el comportamiento dinámico del vehículo reduciendo su estabilidad, ya que dificultan que este mantenga una trayectoria rectilínea.

Por tanto, se suele optar por valores de ángulos de avance ligeramente positivos que mejoran el comportamiento en curva en sintonía con el ángulo de caída del vehículo y aportan mayor estabilidad en recta.

3.3.4. Centro de balanceo

El centro de balanceo se define como el punto entorno al cual se produce la rotación (balanceo) del chasis. Al existir dos ejes transversales (delantero y trasero) unidos por el eje longitudinal del vehículo, existe un centro de balanceo en cada uno de ellos que, unidos, forman el eje de balanceo del vehículo completo. Se supone que el chasis es rígido.

En primer lugar, para conocer la posición geométrica del centro de balanceo de cada eje se tiene que obtener primero la posición del centro instantáneo de rotación (CIR) del conjunto rueda-mangueta-trapecios de cada rueda del eje. Se muestra en el esquema de la Figura 24 que dicho centro instantáneo de rotación se puede determinar mediante la intersección que forman la prolongación de la línea imaginaria de los trapecios superior e inferior en vista frontal. Este punto no es fijo sino que cambia su posición en función de la posición adoptada en cada momento de los trapecios de la suspensión.

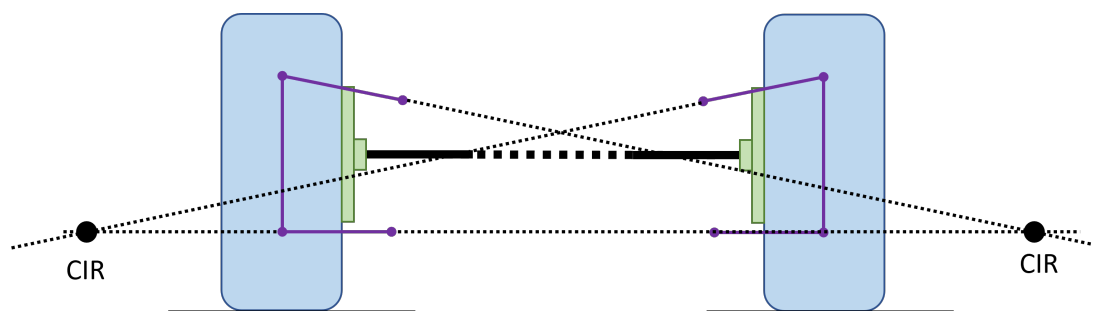


Figura 24: Esquema del centro instantáneo de rotación del conjunto rueda-mangueta-trapecios.

Del mismo modo, es posible localizar la posición del CIR mediante el teorema de Aronhold-Kennedy: los CIR de tres cuerpos con movimiento relativo entre sí están alineados. Se establece por tanto el llamado brazo equivalente, mostrado en la Figura 25.

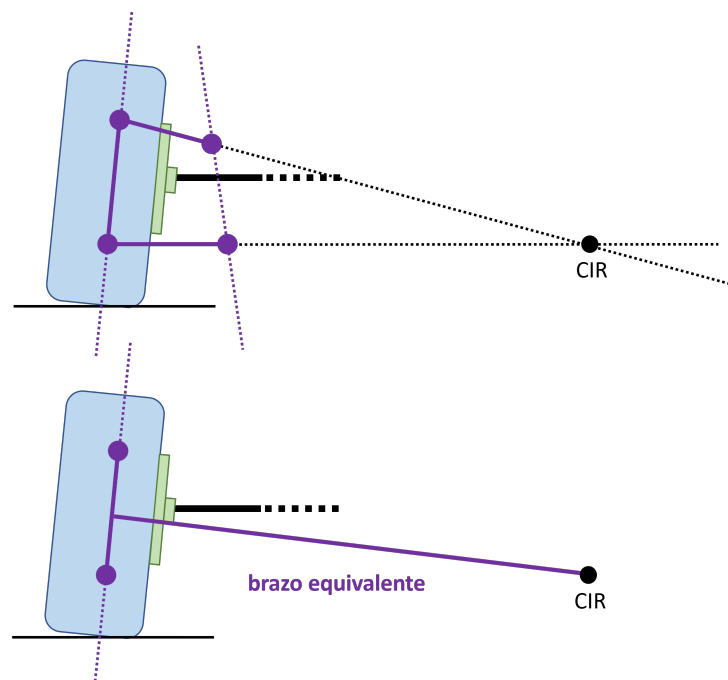


Figura 25: Esquema del centro instantáneo de rotación mediante el brazo equivalente (vista frontal).

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Conocida la posición del CIR de cada rueda del eje, el centro de balanceo se establece como la intersección de las líneas imaginarias que unen el CIR de cada rueda con su correspondiente punto de contacto neumático-terreno, tal y como se puede observar en el esquema de la Figura 26.

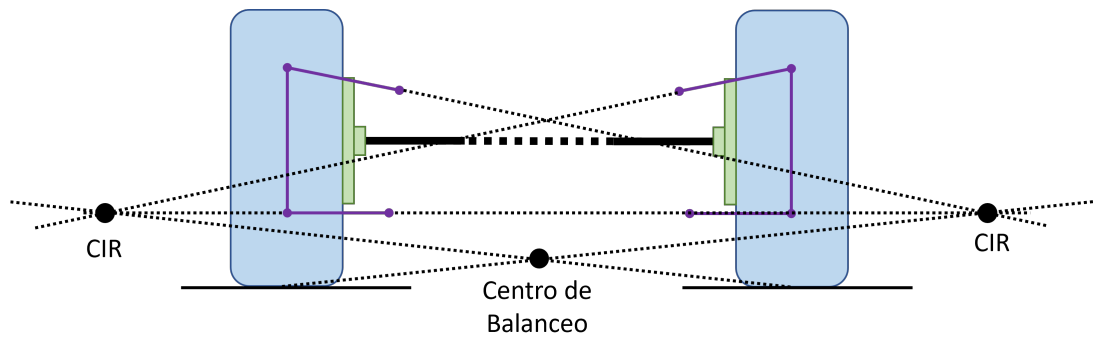


Figura 26: Esquema del centro de balanceo (vista frontal).

Asimismo, una vez hallados los centros de balanceo de cada eje (delantero y trasero), la unión de ambos determina el eje sobre el cual se produce el movimiento de balanceo del vehículo, que se muestra en la Figura 27.

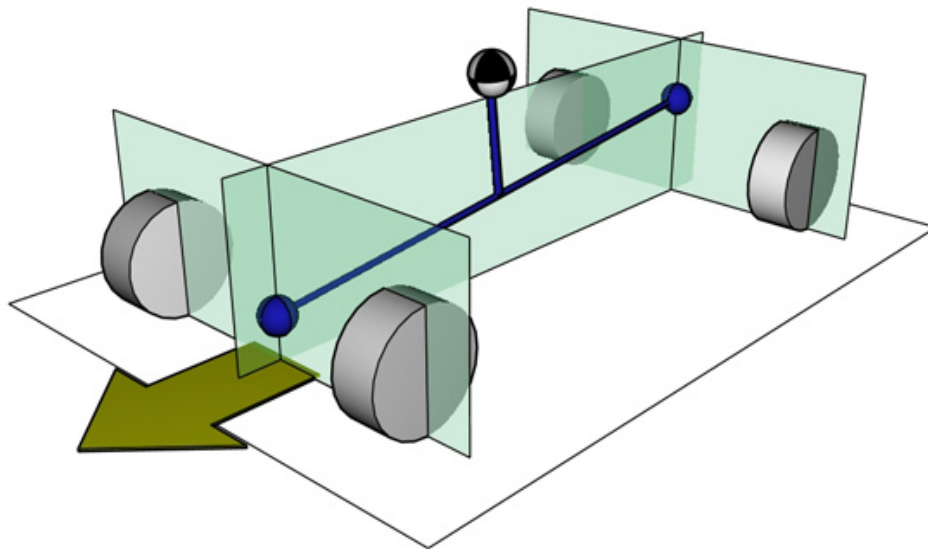


Figura 27: Esquema del eje de balanceo de un vehículo (vista frontal).

3.3.5. Desvío de la dirección (*roll steer* y *bump steer*)

El desvío de la dirección (*bump steer*) se refiere al fenómeno de giro involuntario de la dirección inducido por la suspensión a lo largo de su recorrido vertical. El fenómeno *roll steer* es análogo pero producido en el caso específico de balanceo del chasis cuando se toma una curva: las suspensiones de la parte exterior se comprimen y las de la parte interior se extienden.

El motivo del desvío de la dirección se debe a lo siguiente:

Las rótulas del sistema de suspensión trabajan al unísono, y se puede establecer el llamado brazo equivalente tal y como se comenta en el apartado anterior. Sin embargo, el eje de dirección (definido por la varilla de dirección que conecta la mangueta a la cremallera de dirección) gira entorno a un CIR distinto al anterior. De este modo, al comprimir la suspensión, el arco que siguen las rótulas de los trapecios y la rótula de dirección, es distinto. Además, tanto los trapecios como la varilla de dirección tienen una longitud determinada, por lo que, al llegar al final del recorrido de la suspensión, la rueda únicamente puede girar, para mantener así esta longitud invariable.

Este fenómeno es muy perjudicial para el comportamiento del vehículo incluso en magnitudes pequeñas, ya se afecta directamente a la sensación de conducción: respuesta y tacto de dirección que obligan a corregir movimientos indeseados.

Para evitar este giro, los sistemas de suspensión delantera y dirección se deben diseñar de manera conjunta de la siguiente forma tal y como se muestra en la Figura 28:

- La longitud de la varilla de dirección debe ser igual a la longitud de los trapecios superior e inferior.
- El punto que forma la rótula que conecta la varilla de dirección a la mangueta, debe estar alineado con las rótulas superior e inferior de la mangueta.
- El punto que forma la rótula que conecta la varilla de dirección a la cremallera de dirección, debe estar alineado con anclajes al chasis superior e inferior de los brazos de suspensión.
- La varilla de dirección (en rojo en el esquema) debe apuntar al CIR de los brazos de suspensión. Es decir que la prolongación de dicha varilla debe cortar el CIR

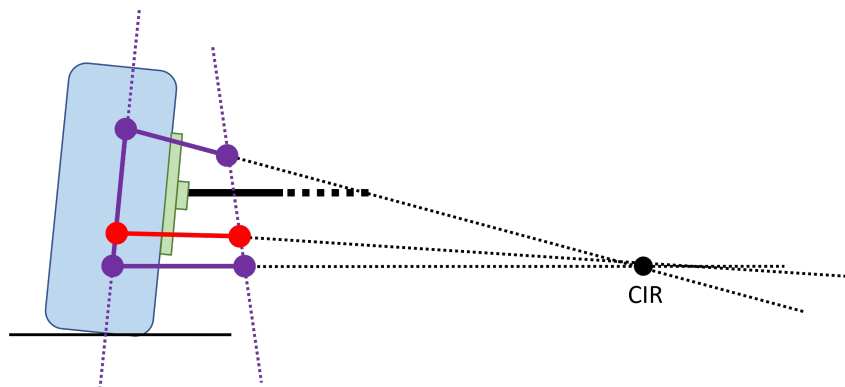


Figura 28: Esquema del diseño del sistema para evitar el desvío de la dirección (vista frontal).

Longitud de la varilla de dirección

El esquema de la Figura 29 muestra el recorrido de la rótula de la varilla de dirección y de la rótula del brazo equivalente de la suspensión de doble trapecio. Se observa que, siendo la varilla de dirección y el brazo equivalente de longitud diferente, la circunferencia recorrida por la rótula de la varilla de dirección es menor, ocasionando el giro de la mangueta y por tanto de la rueda en sus posiciones extremas (superior e inferior). Es decir, que al comprimir y expandir la suspensión, la rótula de la varilla de dirección se desplaza hacia el interior del vehículo, ya que al ser esta de longitud invariable, no puede extenderse para mantener la circunferencia del brazo equivalente.

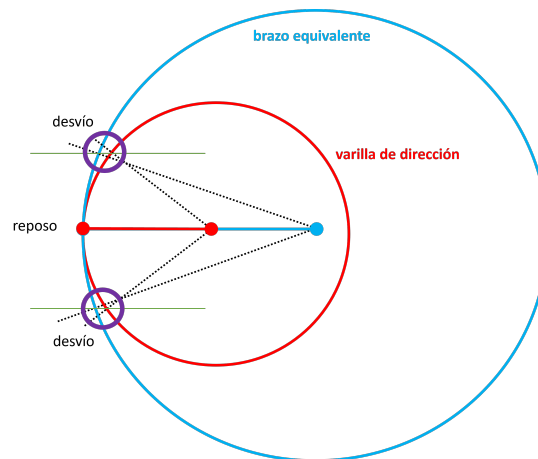


Figura 29: Esquema del desvío de la dirección ocasionado por la longitud (vista frontal).

Dirección de la varilla de dirección

Por otro lado, el esquema de la Figura 30 muestra igualmente el recorrido de la rótula de dirección y de la rótula del brazo equivalente de la suspensión de doble trapecio. En este caso, teniendo la varilla de dirección una dirección diferente, el CIR no coincide y el recorrido es distinto. Se genera desvío en la dirección en las posiciones extremas, desplazándose la rótula de la varilla de dirección hacia el interior del vehículo en la posición superior y hacia el exterior en la posición inferior.

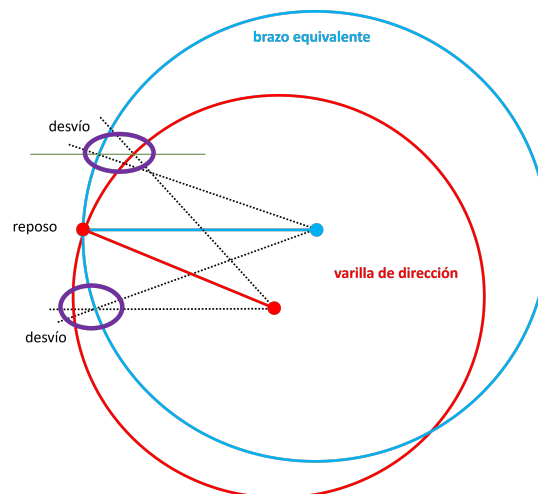


Figura 30: Esquema del desvío de la dirección ocasionado por la dirección (vista frontal).

En ambos casos, el desvío de la dirección es uno en la posición de reposo pero aumenta conforme se alcanzan las posiciones extremas, se trata de la ganancia de desvío de dirección.

3.3.6. Radio de deslizamiento (*scrub radius*)

El radio de deslizamiento es la distancia entre la vertical de la rueda y la línea imaginaria que:

- une las rótulas de los trapecios superior e inferior en el caso del sistema de suspensión de doble trapecio
- une el punto de anclaje al chasis del sistema muelle-amortiguador con la rótula del trapecio inferior en el caso del sistema de suspensión Mc Pherson

Dicha distancia se mide a nivel del suelo, entre el punto de contacto del neumático con el terreno y la prolongación de la línea imaginaria, tal y como se muestra en el esquema de la Figura 31:

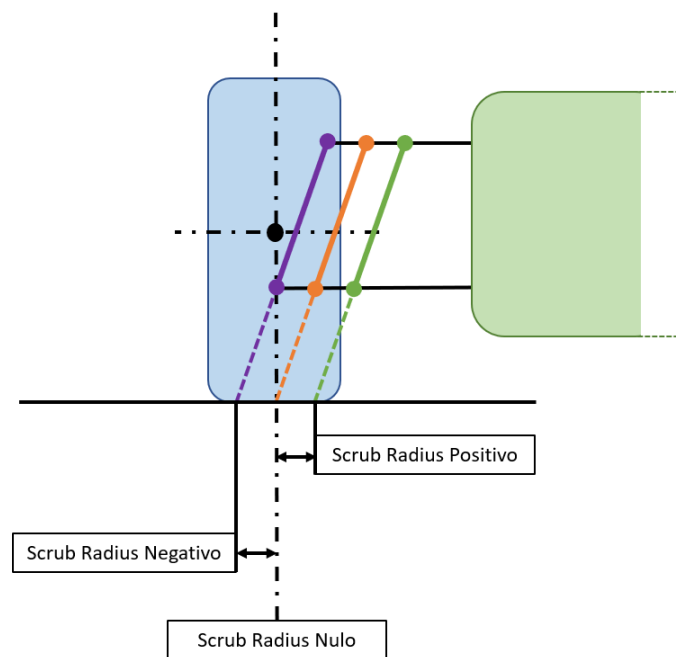


Figura 31: Esquema del convenio de signos del *Scrub Radius* o Radio de Deslizamiento (vista frontal).

Si ambas líneas se cortan en un punto a la altura del terreno, el peso del vehículo en inercia se descarga justo en el centro del neumático. De esta forma no se está introduciendo ningún par o carga adicional sobre los rodamientos y el eje de la rueda.

Sin embargo, cuanto mayor es el *scrub radius*, mayor efecto de palanca se está ejerciendo sobre el eje de la rueda y los rodamientos ya que se está descargando el peso de inercia del vehículo en un punto muy alejado del punto central de la huella de contacto neumático-terreno.

Si el radio de deslizamiento es positivo, al frenar el vehículo, se produce un par de fuerzas proporcional a este. Esto provoca que la frenada se vuelva más inestable ya que el par de fuerzas tiende a desestabilizar la dirección. Además, en este caso las irregularidades del terreno se transmiten igualmente de forma proporcional a la dirección, llegando a ser molesto para el conductor si esta es muy pronunciada.

El caso contrario se produce cuando el radio de deslizamiento es negativo, y en el momento de la frenada se produce un par estabilizador de la dirección.

3.3.7. Ángulo de salida (*kingpin inclination*)

La inclinación de *Kingpin*, tal y como se ve en la Figura 32, es el ángulo respecto a la vertical de la línea imaginaria que:

- une las rótulas de los trapecios superior e inferior en el caso del sistema de suspensión de doble trapecio.
- une el punto de anclaje al chasis del sistema muelle-amortiguador con la rótula del trapecio inferior en el caso del sistema de suspensión McPherson.

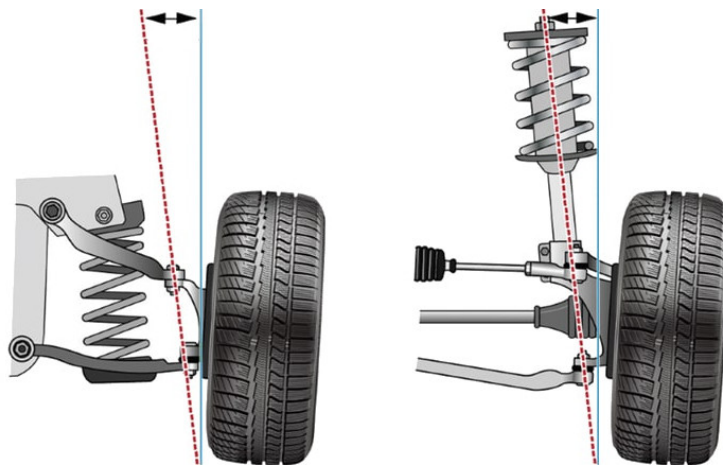


Figura 32: Esquema ángulo de inclinación de *Kingpin* en los sistemas de suspensión de doble trapecio (izquierda) y McPherson (derecha) (vista frontal).

La necesidad de introducir un ángulo de inclinación al sistema de suspensión y dirección se justifica mediante el esquema de la Figura 33:

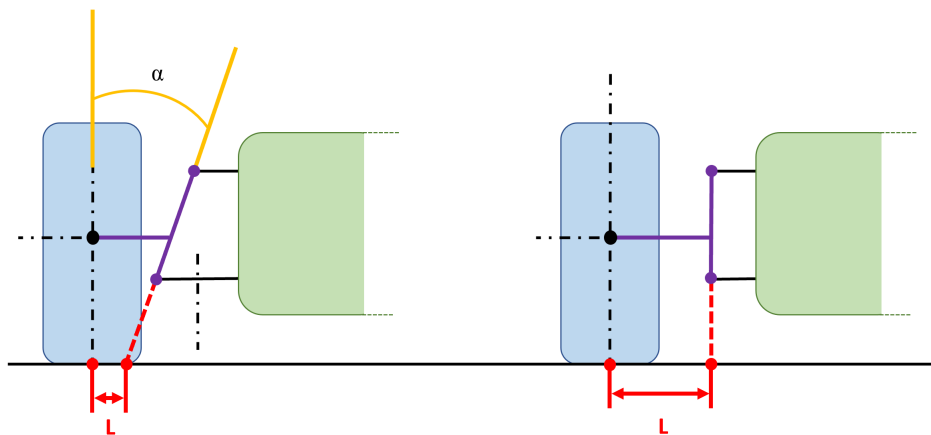


Figura 33: Esquema de justificación de la necesidad de introducir un cierto valor de ángulo de inclinación de *Kingpin* (vista frontal).

Para poder realizar el giro de la rueda se necesita vencer un par que depende del radio de deslizamiento. Dicho par es menor cuanto mayor inclinación tiene el eje de pivote, tal y como se ve en el esquema de la Figura 33, es decir, cuanto mayor es el ángulo de salida. Supóngase que se disponen la rueda y el eje de pivote de forma paralela, haciendo que el ángulo de inclinación sea nulo. En este caso el radio de deslizamiento es mayor, forzando que se tenga que vencer un par mucho mayor para poder girar la rueda.

Cuanto mayor es la inclinación de *kingpin*, menor es el esfuerzo para girar las ruedas además de aumentar la reversibilidad, es decir el autocentrado de la dirección tras un giro.

Sin embargo, demasiada inclinación es perjudicial ya que se produce una fuerza de elevación en la rueda. La razón por la que la inclinación de *kingpin* produce una fuerza de elevación es que este ángulo hace que la trayectoria del eje de la rueda se desplace según la forma de un arco invertido, en lugar de mantenerse en un plano perfectamente horizontal. Por consiguiente, cuando se realiza un cambio de dirección, las ruedas se clavan en el suelo originando el levantamiento de la parte delantera del vehículo, proporcional al ángulo de cambio de dirección.

Se puede disminuir la elevación de la rueda asociada al giro de la dirección disminuyendo un parámetro llamado *Spindle Length*. Este corresponde a la distancia entre la línea imaginaria entre las rótulas superior e inferior y otra línea imaginaria paralela a esta pero pasando por el centro de la rueda tal y como se muestra en el esquema de la Figura 34.

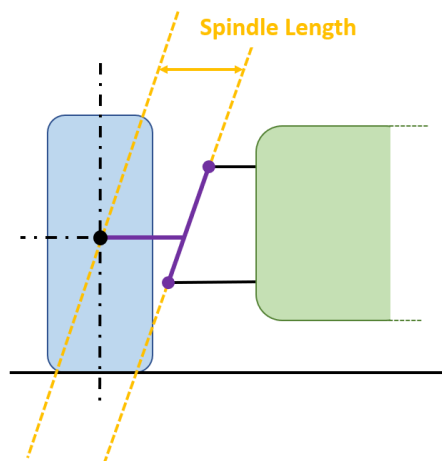


Figura 34: Esquema del *Spindle Length* (vista frontal).

Existen limitaciones estructurales en el diseño de la suspensión que imponen en última instancia la posición del eje del pivote (inclinación de *Kingpin*), el desplazamiento del centro de la rueda (*Spindle Length*) y el valor del radio de deslizamiento (*Scrub Radius*) en cualquier diseño de suspensión. En los sistemas de suspensión convencionales, es muy difícil incorporar en tan poco espacio estructuras como los brazos de control de la dirección o los frenos en la rueda, simplemente no hay espacio suficiente. Hipotéticamente, si esto fuera posible, se optaría por un eje de dirección perfectamente vertical y un radio de fricción cero al mismo tiempo. Pero como esto es imposible ya que hay que alojar otros elementos en el centro de la rueda como los citados anteriormente, se tiene que confiar en ángulo de salida inclinado.

3.4. Casos de estudio de interés

En esta sección se detallan las situaciones más relevantes que afectan al comportamiento dinámico del vehículo y cómo evitarlas mediante la configuración de los principales parámetros del sistema de suspensión delantera y dirección analizados en la sección anterior:

3.4.1. Posición del centro instantáneo de rotación y de balanceo

Tal y como se detalla en el apartado sobre el centro de balanceo, el centro instantáneo de rotación (CIR) es, como su nombre indica, el punto alrededor del cual la rueda realiza su recorrido vertical al comprimirse o expandirse el sistema muelle-amortiguador de la suspensión.

Dicho CIR genera un desplazamiento lateral de la rueda dependiendo de la altura a la que se sitúe. De acuerdo con el esquema de la Figura 35, se tienen tres situaciones:

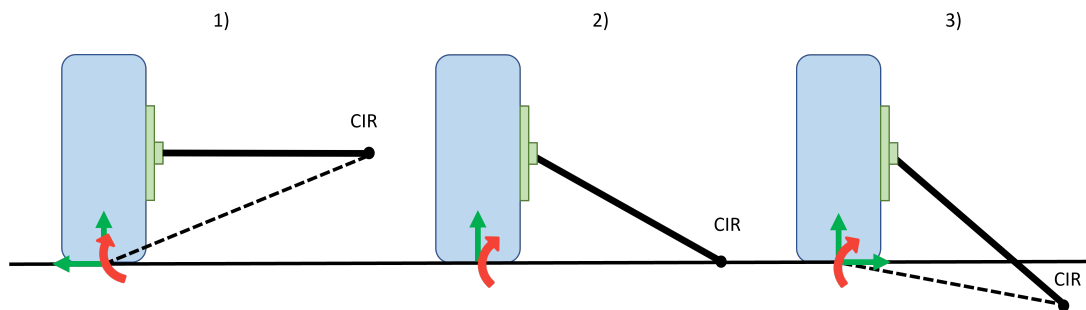


Figura 35: Esquema de la posición del CIR de balanceo (vista frontal).

1) El CIR se sitúa por encima del terreno: En ese caso el movimiento debido al recorrido de la suspensión genera un momento de giro en el punto de contacto neumático-terreno. Este momento se descompone en una fuerza vertical y otra horizontal, esta última hacia el exterior. Es la componente horizontal en sentido exterior la que produce un desplazamiento lateral en dicho sentido.

2) El CIR se sitúa justo a la altura del terreno: En ese caso la fuerza lateral que empuja el vehículo hacia el exterior es mínima y el efecto es despreciable.

3) El CIR se sitúa por debajo del terreno: En este caso la fuerza horizontal generada es en sentido interior, produciendo igualmente un desplazamiento lateral en este sentido.

Por tanto, si el CIR se ubica en una posición cercana al nivel del terreno en la que las irregularidades de la calzada hacen que cuando el vehículo circule, el CIR se desplace por encima y por debajo de este nivel, se genera un movimiento sinusoidal en cada rueda que incrementa la inestabilidad lateral del conjunto (Figura 36).

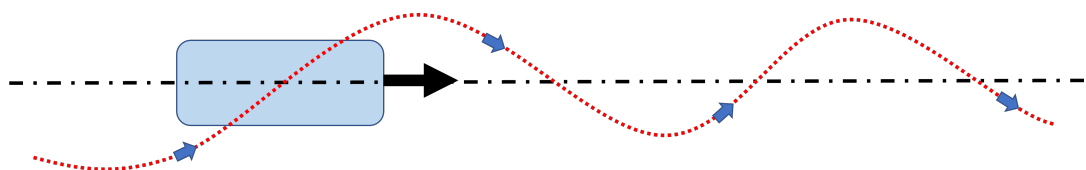


Figura 36: Esquema del comportamiento de una rueda sometida a un CIR de balanceo que oscila entre las posiciones por encima y por debajo del terreno (vista en planta).

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Desde el punto de vista de la optimización del comportamiento dinámico del vehículo, los centros de balanceo de cada eje no pueden estar situados en cualquier punto ya que de estos depende la posición del eje de balanceo, que a su vez es directamente responsable de los movimientos laterales que soporta la carrocería.

La fuerza lateral que soporta el chasis se aplica directamente en su centro de gravedad (Figura 37) por lo que la distancia entre este y el centro de balanceo (donde se produce el movimiento) determina el momento de balanceo que sufre toda la carrocería.

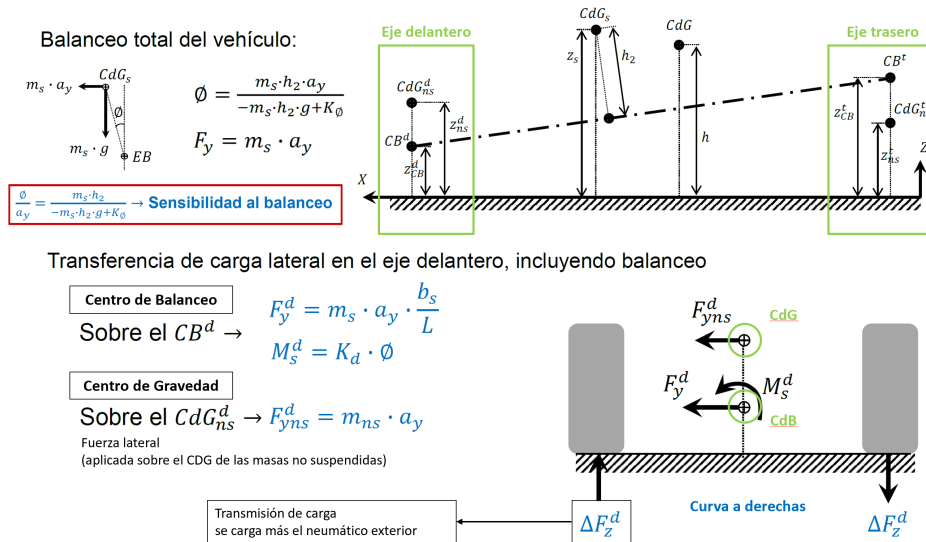


Figura 37: Esquema del Centro de Balanceo. Fuente: Diapositivas Automóviles MUII.

Esto implica que:

- A mayor distancia entre ambos puntos (centro de gravedad y centro de balanceo), mayor será el momento de balanceo y por tanto la inestabilidad del conjunto del vehículo. Para contrarrestar este efecto se suelen emplear barras estabilizadoras adicionales al chasis, que reparten los esfuerzos estructurales de manera más uniforme.
- A menor distancia entre ambos puntos, menor será el momento de balanceo y por tanto el movimiento de balanceo disminuye.

Por otro lado se diferencian tres casos:

- 1) El centro de balanceo se sitúa por encima en altura del centro de gravedad.

Si esto ocurre, el movimiento de balanceo del vehículo sería el de un tren pendular en el que, en situación de giro debido a una curva, la carrocería se inclina hacia el interior de esta, aumentando así la transferencia de carga hacia la rueda interior en lugar de hacia la exterior.

- 2) El centro de balanceo se sitúa por debajo en altura del centro de gravedad.

Si esto ocurre, la suspensión empuja al chasis hacia el terreno, hundiendo la masa suspendida.

- 3) El centro de balanceo se sitúa a la misma altura que el centro de gravedad.

Los elementos elásticos no trabajan ya que al coincidir el punto de aplicación de las fuerzas laterales (centro de gravedad) con el centro de balanceo, son los elementos del mecanismo, es decir, su estructura, la que absorbe dichos esfuerzos.

3.4.2. Ganancia de caída (*camber gain*)

Hasta ahora se ha considerado que el ángulo de caída de las ruedas es constante a medida que la rueda se mueve en el plano vertical, como se puede ver en la Figura 38.

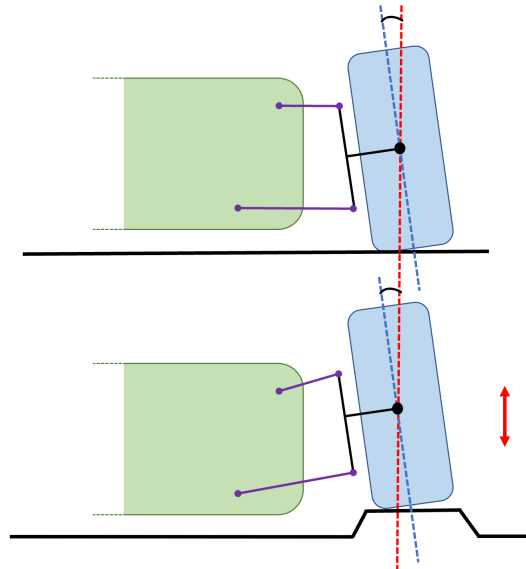


Figura 38: Esquema del ángulo de caída constante o no ganancia de caída (vista frontal).

Sin embargo, en realidad el valor cambia con el recorrido de la suspensión: este no es un movimiento vertical puro sino que el sistema rota entorno al CIR. Por ello, el movimiento vertical de la rueda modifica el valor del ángulo de caída tal y como se muestra en la Figura 39. Si la posición inicial tiene caída negativa (*camber* estático), el recorrido ascendente de la suspensión aumenta este valor en sentido negativo. Asimismo, el recorrido descendente aumenta el valor en sentido positivo. Esta es la ganancia de caída o *camber gain*: el cambio en el ángulo de caída por el desplazamiento vertical de la rueda.

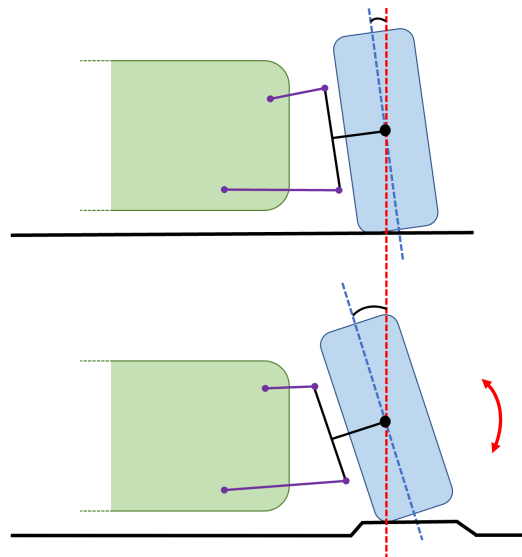


Figura 39: Esquema del ángulo de caída variable o ganancia de caída (vista frontal).

La mayor o menor ganancia de caída depende en parte de la longitud del brazo equivalente. Se muestra en la Figura 40 que la ganancia de caída es inversamente proporcional a la longitud del brazo equivalente. Es decir que cuanto mayor sea la longitud de este, menos ganancia de caída se produce.

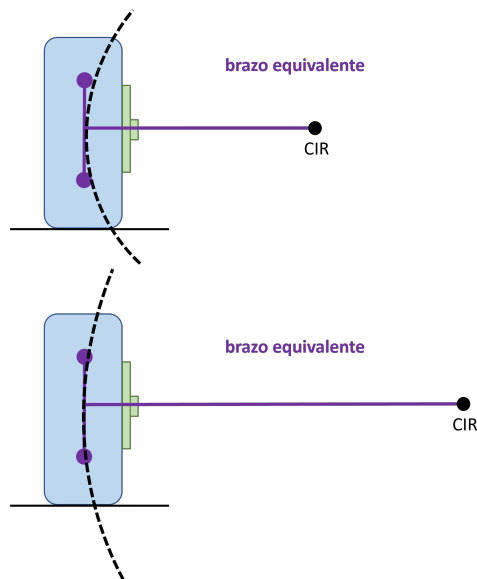


Figura 40: Esquema de la ganancia de caída en función de la longitud del brazo equivalente (vista frontal).

Por otro lado, se muestra en la Figura 41 la ganancia de caída permite, por ejemplo, que la carrocería del vehículo pueda inclinarse de manera significativa en curvas, manteniendo la zona de contacto del neumático firme en el suelo gracias a que cuanto mayor sea la inclinación, mayor carga absorbe el sistema muelle-amortiguador de la suspensión y mayor ganancia de caída hay. De lo contrario, si el vehículo mantiene la caída estática, este no soporta la transferencia de carga lateral que se origina en una curva. Esto se debe a que la zona de contacto de los neumáticos con el terreno se reduce y a su vez el agarre de estos, provocando una situación de inestabilidad en el vehículo que impide mantener la trazada.

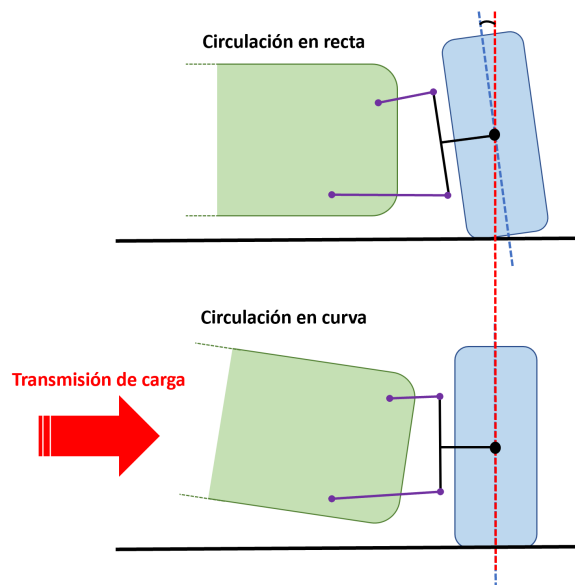


Figura 41: Esquema de la influencia de la ganancia de caída en situación de curva (vista frontal).

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Sin embargo, en situación de frenada en recta, la transferencia de carga se produce del eje trasero al delantero tal y como se muestra en las Figuras 42 y 43, provocando el hundimiento de este último y por tanto de la parte delantera del chasis. La ganancia de caída negativa aumenta entonces en ambas ruedas del eje delantero, reduciéndose así la superficie de contacto de ambos neumáticos cuanto mayor es el hundimiento. La capacidad de frenada de un vehículo con demasiada ganancia de caída se reduce considerablemente.

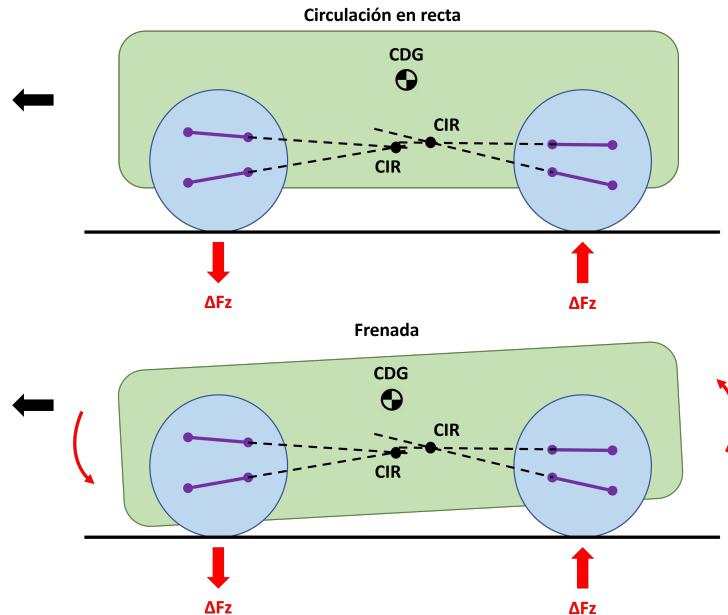


Figura 42: Esquema de la inclinación de la carrocería (cabecceo) en situación de frenada (vista lateral).

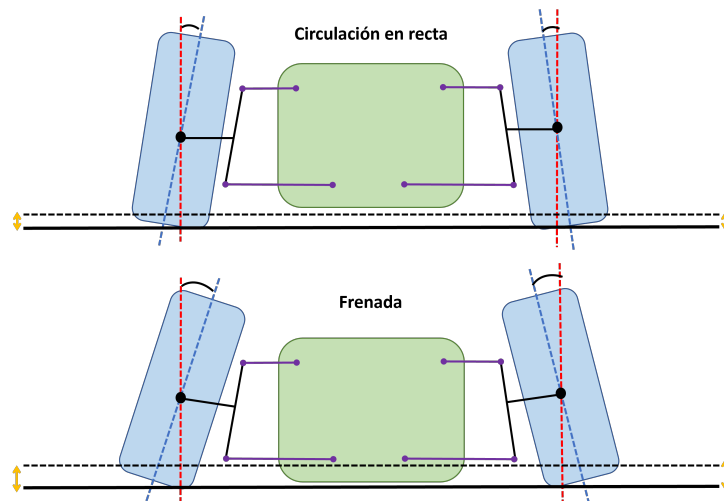


Figura 43: Esquema de la influencia de la ganancia de caída en situación de frenada (vista frontal).

Se trata de un compromiso entre estabilidad en curva y capacidad de frenada en el que el vehículo tenga suficiente ganancia de caída para absorber la transferencia de carga hacia las ruedas exteriores en curva pero que se limite para disponer del mayor agarre posible de los neumáticos en la frenada.

4. Diseño y desarrollo

4.1. Contexto: Modelado del montaje mediante CAD

Para el modelado de los componentes del prototipo se emplea un *software* de CAD (*Computer Aided Design*), es decir, una herramienta informática de diseño asistido por ordenador. La gran ventaja que aporta la utilización de este tipo de recursos es que, además de agilizar el trabajo de concepción de cada pieza, permite visualizar de manera directa el ensamblaje del producto final y jugar con diferentes diseños evitando en todo momento la necesidad de fabricar distintos prototipos físicos.

Existen dos tipos de herramientas de CAD: 2D y 3D:

- En el CAD 2D se trabaja con dibujos técnicos bidimensionales que se emplean comúnmente como base para proyectos de mayor amplitud
- El CAD 3D permite crear piezas tridimensionales con precisión y detalle, ofreciendo así una visión más real del objeto ya que proporciona la profundidad de la que el CAD 2D carece.

De entre todos los programas de diseño 3D del mercado, se opta por la herramienta de CAD por excelencia que es CATIA V5. Su uso está muy difundido en toda la industria, especialmente en los sectores de automoción, aeronáutica y en general de ingeniería mecánica, debido a su capacidad para diseñar productos complejos y detallados. Si bien dicha herramienta está sobre-dimensionada para el propósito de este proyecto debido a la gran cantidad de módulos especializados que no se van a usar, es un programa empleado por la mayoría de empresas dedicadas al diseño de componentes en el sector automóvil ya que los principales fabricantes de vehículos trabajan con él. Teniendo en cuenta que se pretende destinar el montaje experimental al ámbito formativo del sector automóvil, se cree conveniente hacer uso del mismo *software* de diseño que emplea la industria.

4.2. Criterios de diseño

4.2.1. Características comunes de los componentes

La diversidad de fabricantes dentro del sector del automóvil dedicados a la producción de un mismo componente genera una gran variedad de diseños diferentes. No existen dos componentes del sistema de suspensión y dirección de un automóvil provenientes de fabricantes distintos que sean iguales e incluso no necesariamente un fabricante dispone de un único diseño. Sin embargo y a pesar de tener características distintas como la forma, se siguen incluyendo dentro de las familias de elementos descritas en apartados anteriores: manguetas, trapecios, sistemas muelles-amortiguadores etc.

Esto ocurre en todos los sectores en los que hay producción, pero es particularmente notorio en el sector del automóvil por su complejidad y competencia interna.

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

La disparidad de diseños se debe a los siguientes factores:

- Diferentes enfoques de diseño: Cada fabricante tiene una filosofía de diseño distinta, que se refleja en la apariencia y funcionalidad del componente. Algunos fabricantes se centran en la estética y la forma del objeto, mientras que otros lo hacen en la eficiencia y la durabilidad.
- Variaciones en los procesos de fabricación: La tecnología y los procesos de fabricación, herramientas y materiales empleados son similares pero ligeramente distintos de fabricante a otro, afectando así a las características del componente final.
- Diferentes requisitos del mercado: Los fabricantes diseñan sus componentes para satisfacer las necesidades de diferentes mercados. Esto conlleva que un fabricante puede producir un componente con características específicas para un mercado que así lo requiera.

Partiendo de las características más importantes de los componentes del sistema de suspensión delantera y dirección, es necesario identificar cuáles son los criterios de diseño generales comunes a todos los fabricantes para concebir cada componente del sistema de suspensión delantera y dirección. Partiendo de que el proyecto se centra en el aspecto geométrico, esta labor se reduce a identificar la estructura básica, el esqueleto o forma simplificada del componente que hay detrás del diseño complejo y optimizado que ha generado cada fabricante. De esta forma, se eliminan los detalles que no son esenciales y que pueden suprimirse sin afectar negativamente la funcionalidad de la pieza.

Cabe recalcar que no se pretende hacer una optimización topológica de los componentes. Es decir, el objetivo no es lograr la mejor resistencia estructural de cada componente que no va a estar sometidos a fuerzas externas ni movimientos más allá de los ajustes realizados por el usuario.

Por otro lado, otro punto importante es identificar los tipos de uniones de los diferentes componentes para poder mantener así los mismos grados de libertad en el montaje experimental (pares esféricos, pares prismáticos, pares de rotación...)

Es importante tener en cuenta que la simplificación de las formas puede tener un impacto significativo en la apariencia y funcionalidad del objeto, por lo que es necesario encontrar un equilibrio adecuado entre la simplificación y preservación de las características esenciales que permiten reconocer el componente.

El esquema de la Figura 44 ilustra mediante un ejemplo sencillo el proceso de simplificación que se pretende llevar a cabo con los componentes del sistema de suspensión delantera y dirección del vehículo:

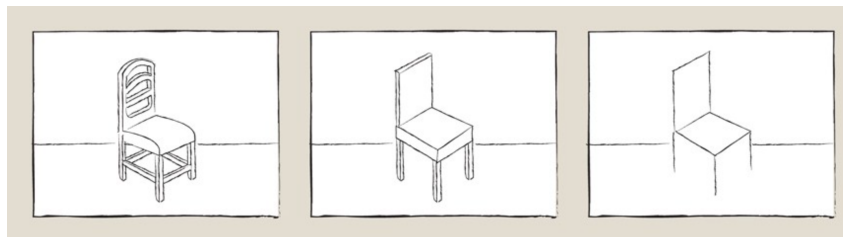


Figura 44: Esquema de ejemplo de simplificación de los componentes.

4.2.2. Criterios generales

Para poder concebir la geometría de los elementos del sistema de suspensión para el montaje en cuestión, se realiza un estudio que permite comparar los diferentes diseños por los que opta cada fabricante para un mismo componente.

A continuación se buscan las sinergias entre diseños.

Mangueta

La mangueta es el punto de unión de los sistemas de suspensión, dirección y freno del vehículo.

En cuanto su diseño, se observa en la Figura 45 que todas incluyen:

- **Brazos de control superior e inferior (rojo):** permiten acoplar la mangueta a los trapecios superior e inferior mediante rótulas o cojinetes esféricos (3 GDL).
- **Brazo de dirección (azul):** se encarga de unir la mangueta al sistema de dirección del vehículo mediante un par de rotación (1 GDL). Al estar la mangueta acoplada directamente a la rueda, el movimiento del eje de dirección permite el giro de la rueda delantera en el plano vertical en un sentido o en otro.
- **Anclajes para mordazas de freno (naranja):** permiten fijar la mordaza, que a su vez es el soporte de las pastillas y pistones de freno.
- **Eje central:** Cavidad en la que se acoplan rodamientos y el buje, que a su vez se atornilla al disco de freno.

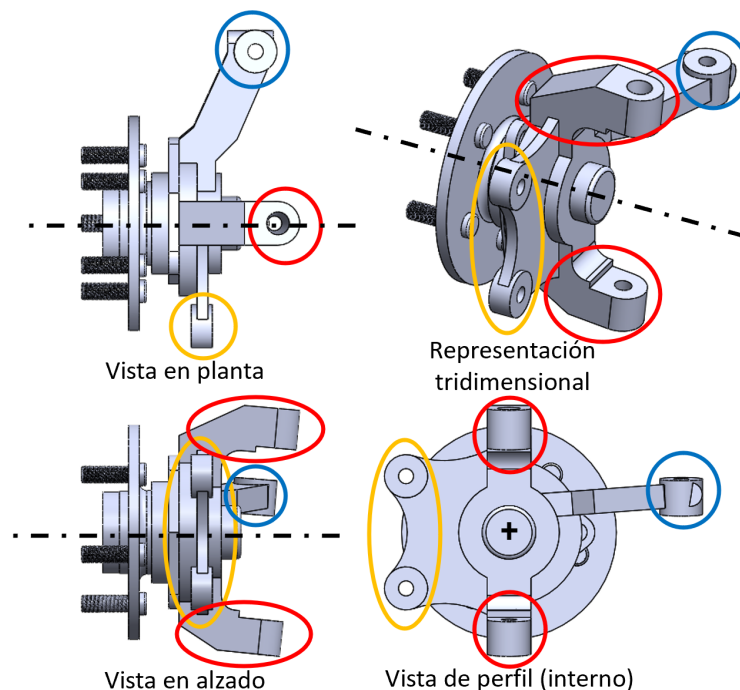


Figura 45: Representación gráfica de las partes de la mangueta.

Se puede distinguir una mangueta empleada en el sistema de suspensión McPherson observando el brazo de control superior. El punto de unión con el sistema de suspensión tiene un diámetro superior ya que es donde se acopla directamente el sistema muelle amortiguador en lugar el trapecio superior.

Trapecios

El trapecio de suspensión se encarga de unir la mangueta y por tanto la rueda, al chasis del vehículo.

Para unir el trapecio a la mangueta se suele emplear un único punto de conexión en el que se acopla una rótula o cojinete esférico. Esta permite combinar tres movimientos o planos de rotación en el espacio tridimensional (3 GDL). En la Figura 46 se indica en amarillo el punto de conexión mangueta-trapecio.

Asimismo, para unir el trapecio al chasis del vehículo se suelen emplear dos uniones que únicamente permiten el movimiento de rotación entorno al eje longitudinal del vehículo. Es el eje entorno al que las ruedas realizan su movimiento vertical. En la siguiente imagen se indica en azul los puntos de conexión chasis-trapecio.

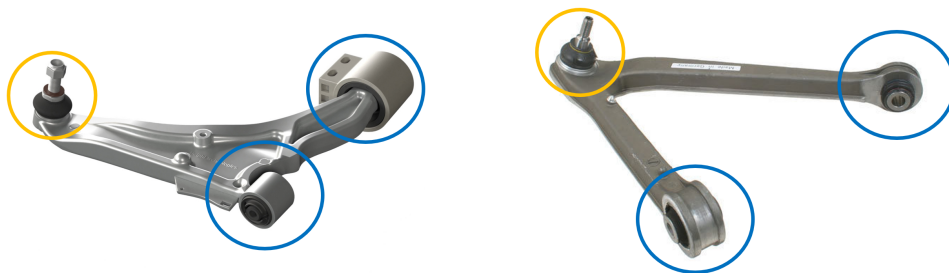


Figura 46: Trapecio delantero (imagen izquierda) y trapecio trasero (imagen derecha).

Por otro lado, existe una diferencia en cuanto a la geometría de los trapecios del sistema de suspensión delantero y trasero (Figura 47). La gran mayoría de fabricantes optan por una geometría en forma de L para el trapecio inferior del sistema de suspensión delantero mientras que optan por una geometría en forma de V o triángulo para los trapecios del sistema de suspensión trasero.

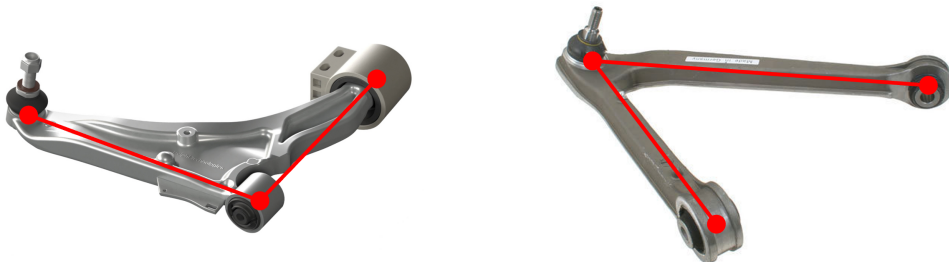


Figura 47: Trapecio delantero (imagen izquierda) y trapecio trasero (imagen derecha).

La razón principal de alterar la geometría de los trapecios en función de la ubicación del sistema de suspensión se debe a que tienen diferente funcionalidad:

- Los trapecios delanteros están diseñados no solo para soportar la transmisión de cargas sino que se tienen que ajustar a la geometría y al espacio disponible en el tren delantero, donde la limitación de espacio es notable. Por ello, la forma en L permite una mayor flexibilidad en cuanto a, por ejemplo, ubicar los componentes del sistema de suspensión y dirección. Sin embargo, se refuerza el nervio para compensar los esfuerzos longitudinales.
- Los trapecios traseros se encuentran en una posición más central y están diseñados principalmente con el objetivo de soportar la transmisión de cargas del vehículo. En ese sentido, la forma triangular es muy eficiente para poder distribuir dicha carga y proporcionar resistencia y rigidez en el eje trasero. Al estar las ruedas permanentemente alineadas con el eje longitudinal del vehículo (no se produce giro), los trapecios de suspensión están totalmente enfocados en optimizar el comportamiento de las ruedas en su recorrido vertical. No es necesario ubicar componentes adicionales en el eje trasero, como sí son necesarios en el eje delantero.

Muelle-Amortiguador

El muelle-amortiguador es común a todos los fabricantes en cuanto apariencia y funcionamiento:

- Sistema McPherson: Únicamente permite el movimiento en su eje longitudinal por lo que es asimilable a un par prismático (1 GDL).
- Sistema Doble Trapecio: El muelle-amortiguador se monta sobre dos rótulas, por lo que no tiene ninguna restricción de movimiento.

Tal y como se indica en la introducción de la sección 3.2, no se representa la dinámica del sistema muelle-amortiguador en el gemelo digital, únicamente su mecanismo.

4.2.3. Componentes del montaje

Tal y como se menciona en la introducción de la sección de criterios de diseño y partiendo del estudio geométrico previo de los componentes comerciales, se procede a detallar cada pieza diseñada indicando su finalidad y argumentando su diseño.

Componentes del sistema de suspensión delantera

Para el brazo o trapecio de suspensión superior se opta por una geometría en V respetando el diseño habitual los fabricantes como se puede ver en la Figura 48.

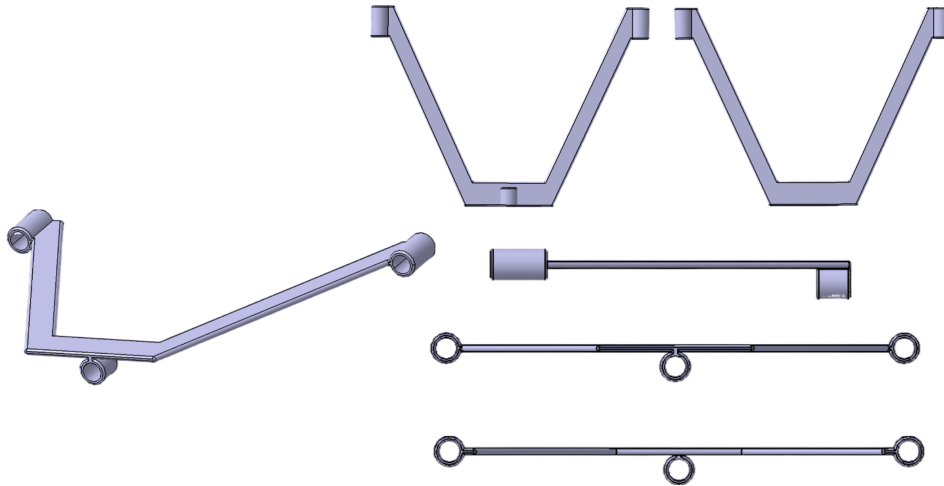


Figura 48: Representación simplificada en CAD del brazo o trapecio superior del sistema de suspensión delantera.

Para el brazo o trapecio de inferior, se opta por una geometría en L como se puede ver en la Figura 49 por las razones comentadas en la sección 4.2.2

Se añade una ranura para poder fijar la parte inferior del mecanismo muelle-amortiguador.

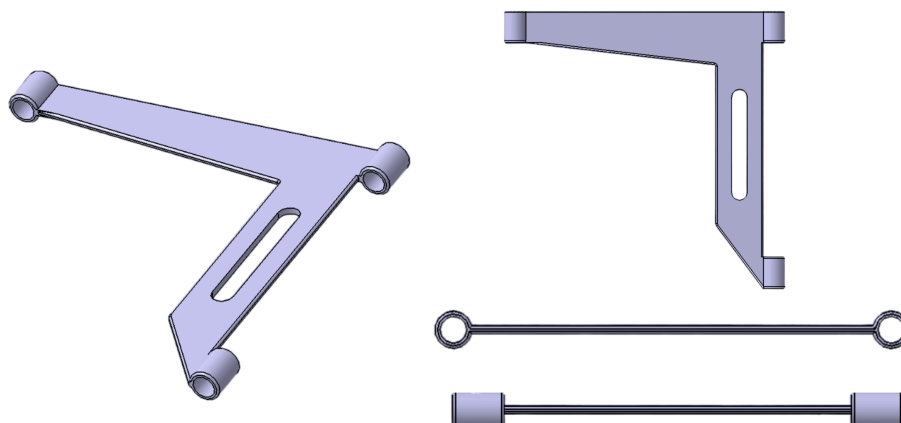


Figura 49: Representación simplificada en CAD del brazo o trapecio inferior del sistema de suspensión delantera.

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Para la mangueta, representada en la Figura 50 se ha respetado todos los criterios que se indican en la sección 4.2.2, es decir los brazos de control superior e inferior, el brazo de dirección, el eje central para la rueda y, aunque no se tienen en cuenta para este montaje de sistema de suspensión delantera y dirección, se considera incluir los huecos para las mordazas de freno como elemento estético añadido.

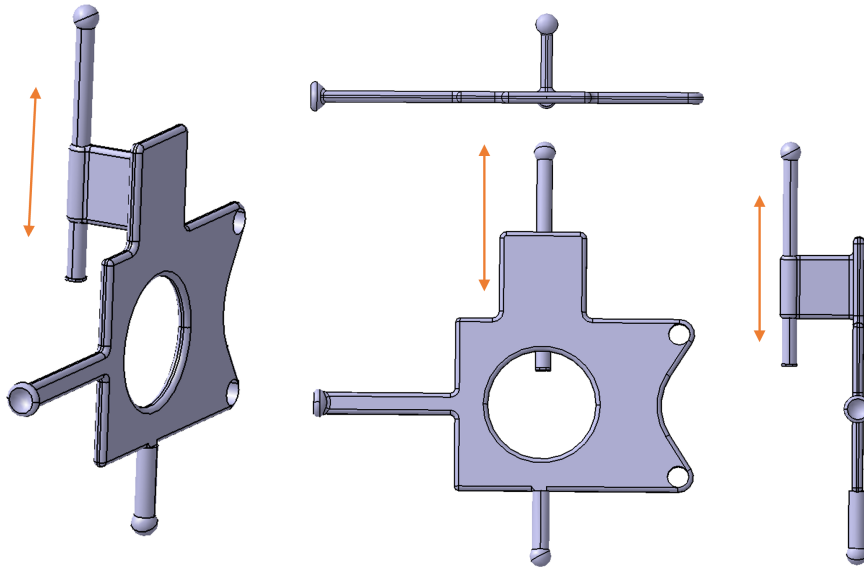


Figura 50: Representación simplificada en CAD del brazo o trapecio inferior del sistema de suspensión delantera.

En la Figura 51, se expone el sistema muelle-amortiguador. Para representar su movimiento, se disponen dos cilindros concéntricos que se introducen uno dentro del otro simulando así el funcionamiento de absorción de energía del mecanismo elástico. Se añade un muelle al gemelo digital que no tiene ninguna funcionalidad, se trata de un elemento estético para permitir al usuario visualizar de forma más sencilla el conjunto del sistema de suspensión delantera y dirección.

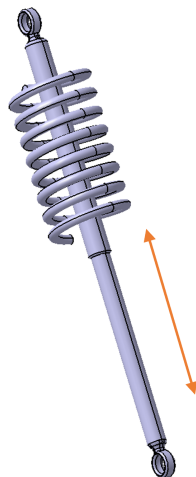


Figura 51: Representación simplificada en CAD del muelle-amortiguador del sistema de suspensión delantera.

Componentes del sistema de dirección

La cremallera y la bieleta de dirección se representan por dos barras unidas mediante un par esférico (Figuras 52 y 53), y a su vez la bieleta conectada al brazo de dirección de la mangueta mediante otro par esférico.



Figura 52: Representación simplificada en CAD de la bieleta de dirección.

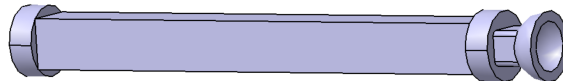


Figura 53: Representación simplificada en CAD de la correa de dirección.

Chasis

El chasis del vehículo es la estructura principal que proporciona soporte y rigidez a todo el conjunto. Este actúa como referencia para los puntos de fijación del sistema de suspensión delantera.

La ubicación de los puntos de fijación pueden variar según el diseño del vehículo ya que están situados de forma estratégica en la estructura del chasis para permitir no solo el funcionamiento eficiente del sistema de suspensión delantera sino para facilitar su la instalación y operación posterior.

Por ello, y dado que se pretende que el montaje experimental desarrollado pueda adoptar diferentes posiciones incluyendo cambios en los puntos de fijación al chasis, ya que en ello reside la utilidad del producto, se ha diseñado el componente de la Figura 54 que se detalla a continuación.

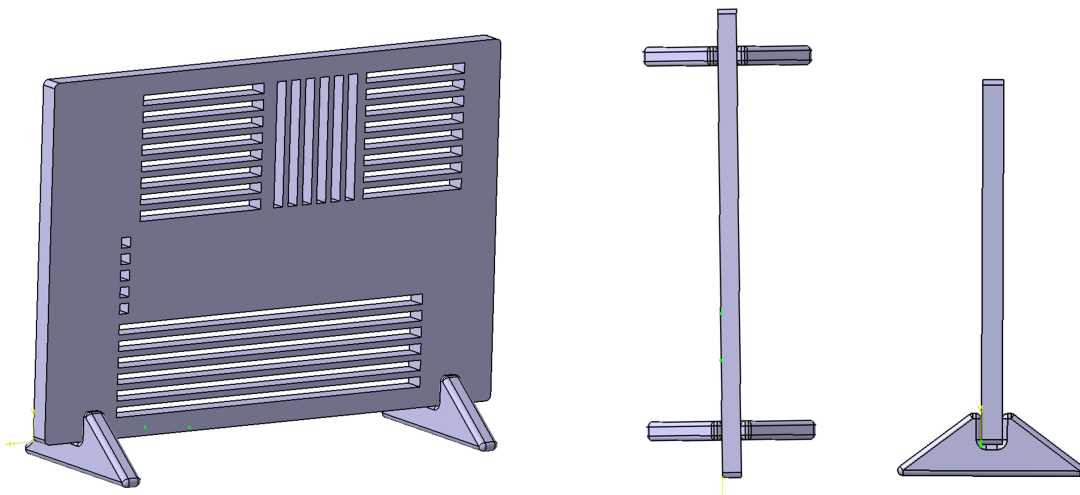


Figura 54: Representación simplificada en CAD del chasis del vehículo.

Como se puede ver en la Figura 54 anterior, el chasis representa por una lámina en la que se dispone una serie de perforaciones en forma de ranuras que permiten fijar los puntos de anclaje del sistema de suspensión delantera en un punto y adaptar la ubicación de los mismos en función de la configuración que se quiera mostrar.

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Por otro lado, considerando el objetivo de fabricación para obtener un montaje experimental físico, se emplean dos apoyos de la Figura 55 para sustentar la estructura del conjunto del sistema de suspensión delantera y dirección.

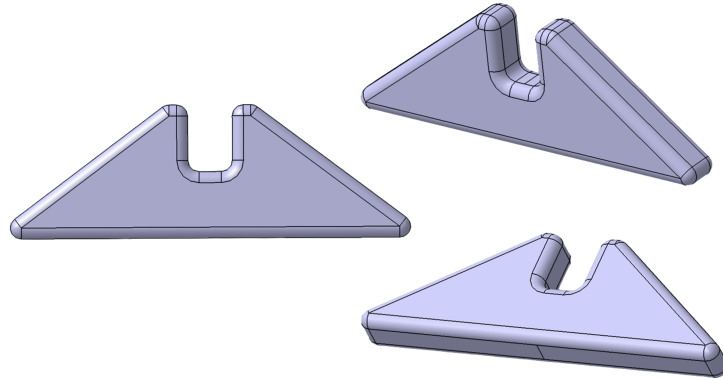


Figura 55: Soporte de la representación simplificada en CAD del chasis del vehículo.

En la Figura 56 se indican los puntos de anclaje del sistema de suspensión delantera y dirección al chasis. Estos no son realmente puntos sino zonas en las que se pueden fijar los componentes, pudiendo modificar su colocación en el plano x-z. En el apartado 4.3.3 se detallan los desplazamientos de dichos puntos.

- Las zonas A, B y C son para fijar los trapecios superior e inferior respectivamente. Las zonas A (verde) y B (azul) para el trapecio superior y la zona C (rojo) para el trapecio inferior.
- La zona D (amarillo) corresponde a la fijación al chasis del mecanismo de muelle-amortiguador simplificado.
- La zona E (morado) no es de anclaje sino a través de la que pasa la cremallera del sistema de dirección.

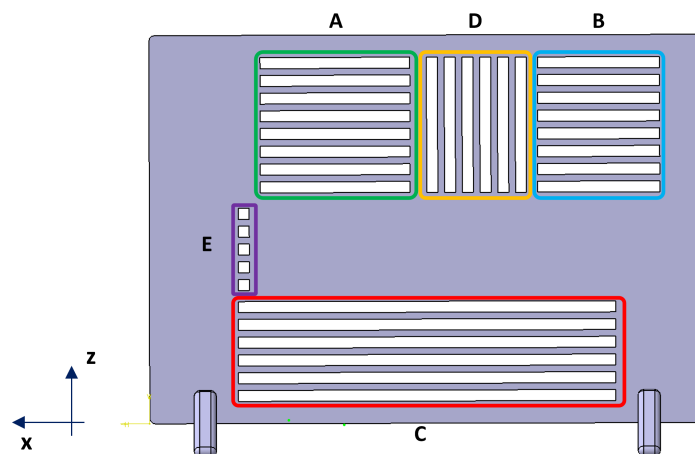


Figura 56: Explicación de los puntos de fijación del sistema de suspensión delantera y dirección al chasis del vehículo.

4.2.4. Componentes de unión

Los componentes de unión, como anclajes, tornillos, tuercas y rótulas, son piezas fundamentales para el sistema de suspensión y dirección ya que permiten conectar y controlar el movimiento del resto de componentes.

- Tornillos / Conexiones

Como se puede ver en la Figura 57, su geometría de los se simplifica considerablemente, reduciendo su geometría a un cilindro que permite unir los anclajes que se describen a continuación.

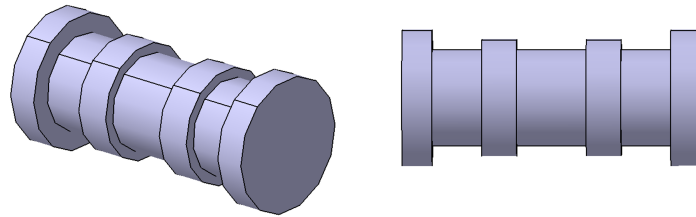


Figura 57: Representación simplificada en CAD del tornillo de anclaje.

- Rótulas

Se emplean tanto para conectar los brazos de suspensión superior e inferior a la mangueta como para conectar el muelle-amortiguador al chasis y al brazo inferior. La utilidad de las rótulas radica en que son articulaciones esféricas que permiten el movimiento rotativo con 3 grados de libertad como se puede ver en la figura 58.

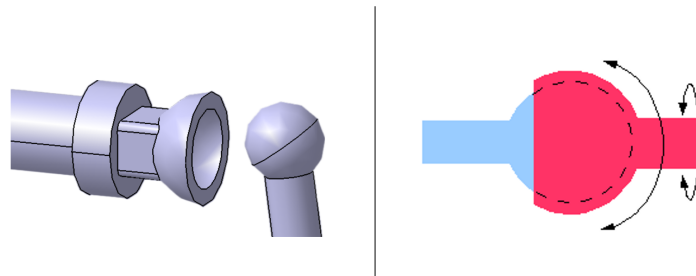


Figura 58: Esquema de la rótula en Catia.

En el caso de la unión de los trapecios superior e inferior con la mangueta, la rótula empleada se muestra en la Figura 59 y sirve a la vez de par esférico y de anclaje de traslación (como el anclaje de la figura 64).

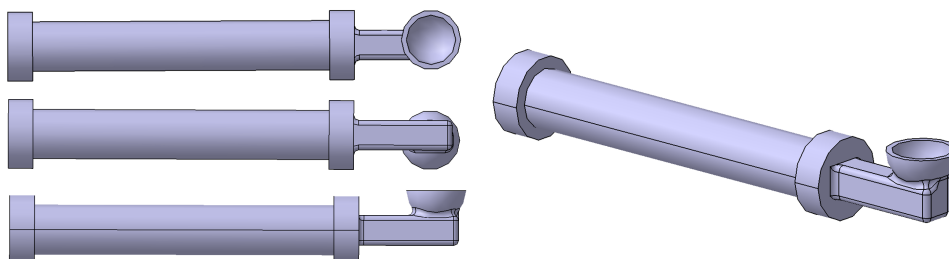


Figura 59: Representación simplificada en CAD de la rótula superior e inferior de la mangueta.

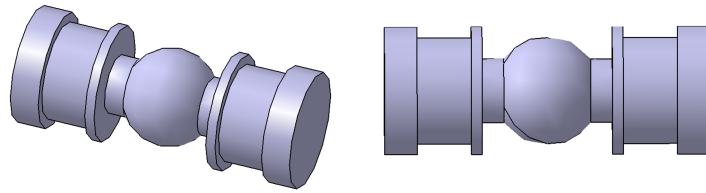


Figura 60: Representación simplificada en CAD la rótula superior e inferior del mecanismo muelle-amortiguador.

En la Figura 61 se representa la unión mediante rótulas de los brazos de suspensión superior e inferior con la mangueta. La representación de la unión mediante rótulas del muelle-amortiguador con los anclajes está en la Figura 66.

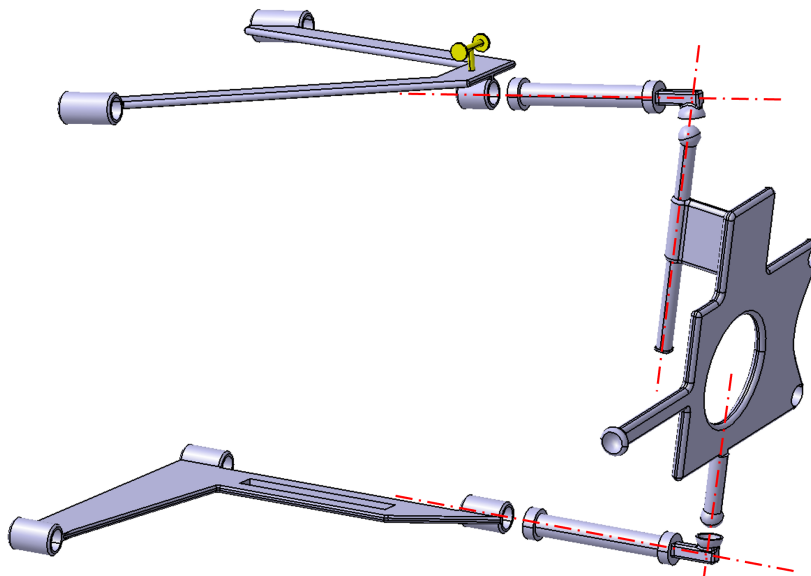


Figura 61: Representación simplificada en CAD de la unión mediante rótulas de los brazos de suspensión superior e inferior con la mangueta.

■ Anclajes

Para poder fijar los brazos de suspensión y el sistema muelle-amortiguador al chasis, se crea el anclaje de la Figura 62.

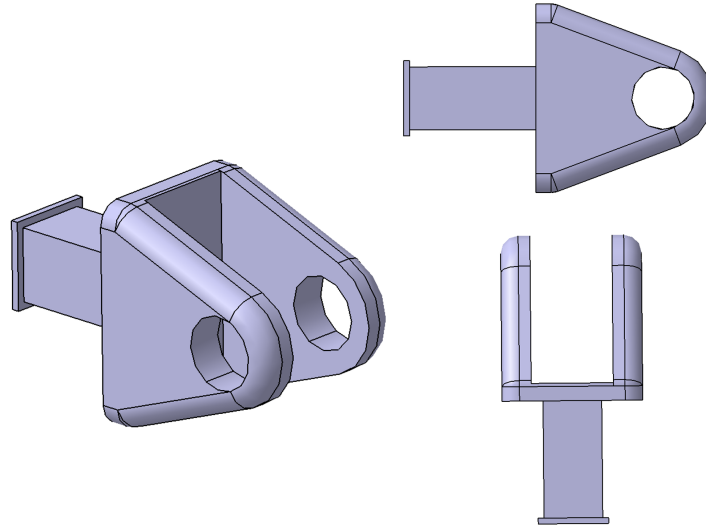


Figura 62: Representación simplificada en CAD del anclaje empleado para fijar del sistema de suspensión delantera al chasis.

Para fijar la parte inferior del sistema muelle-amortiguador al brazo de suspensión inferior, se crea el anclaje de la Figura 63. El elemento de color amarillo no forma parte de la estructura funcional del anclaje sino que se emplea para realizar el movimiento de traslación en la ranura del Trapecio Inferior, se detalla en la sección 4.3.3.

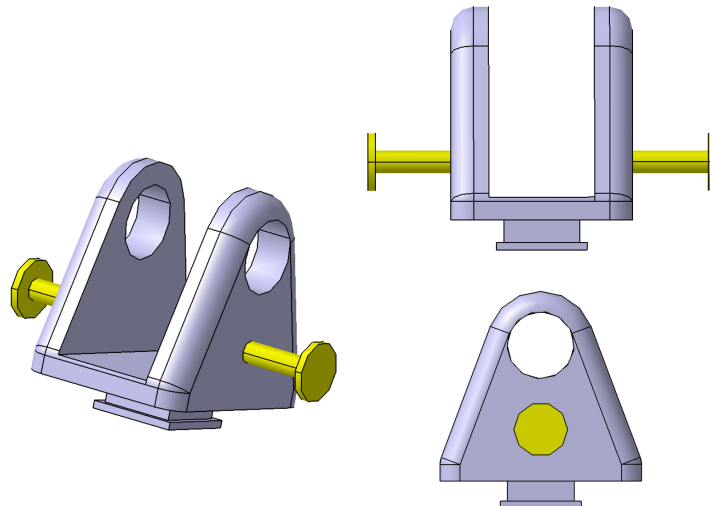


Figura 63: Representación simplificada en CAD del anclaje empleado para fijar el muelle-amortiguador al brazo de suspensión inferior.

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Por otro lado, se crea un anclaje adicional (Figura 64) que se emplea para aumentar o disminuir la longitud de los brazos de suspensión. Se detalla su utilidad en la sección 4.3.3.

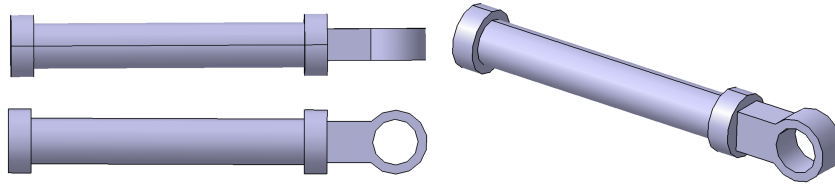


Figura 64: Representación simplificada en CAD del anclaje empleado para variar la distancia horizontal (eje y) de los puntos unión del sistema al chasis.

El anclaje de los brazos de suspensión al chasis queda de la forma en la que se ve en la Figura 65.

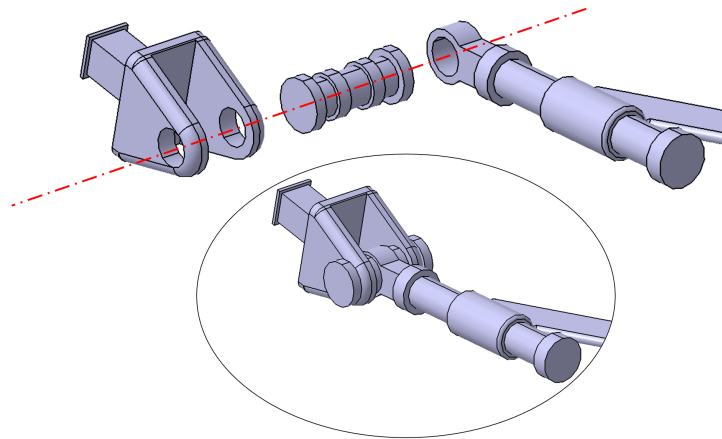


Figura 65: Representación del anclaje de los brazos de suspensión al chasis.

El anclaje del muelle-amortiguador al chasis y al brazo de suspensión inferior queda según la Figura 66.

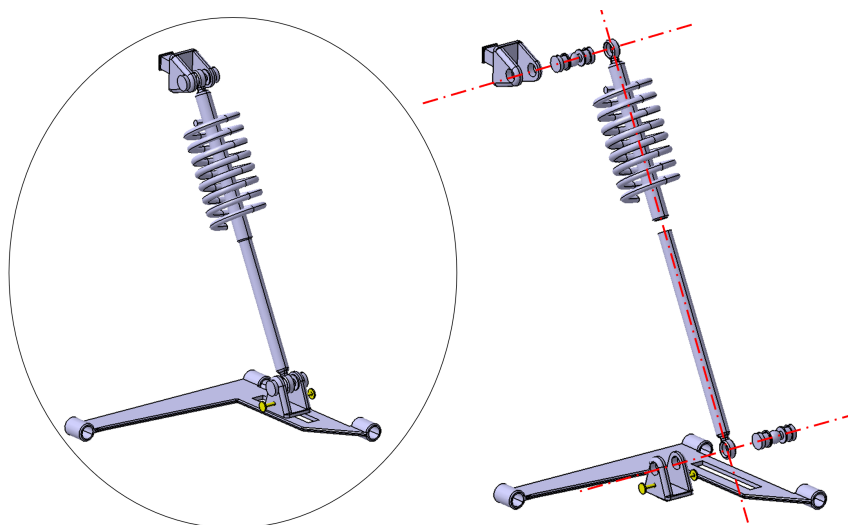


Figura 66: Representación del anclaje del muelle-amortiguador al chasis y al brazo de suspensión inferior.

4.3. Gemelo Digital

4.3.1. Ensamblaje

El sistema de suspensión delantera y dirección del vehículo es el mismo para ambas ruedas de un eje (simetría), por lo que se opta por realizar el montaje experimental de la rueda derecha.

Sistema de suspensión de Doble Trapecio

En la Figura 67 se muestra el ensamblaje de todas las piezas que componen el gemelo digital en la versión de doble trapecio, y su explosionado en la Figura 68.

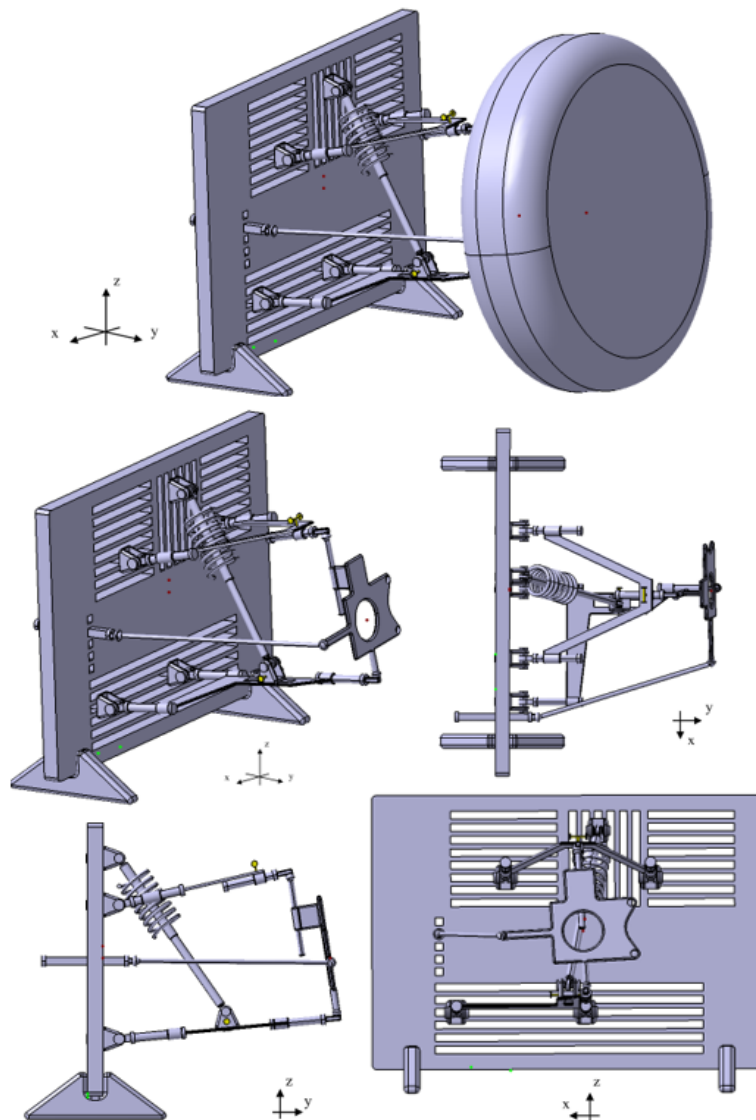


Figura 67: Ensamblaje de componentes del Gemelo Digital - versión Doble Trapecio.

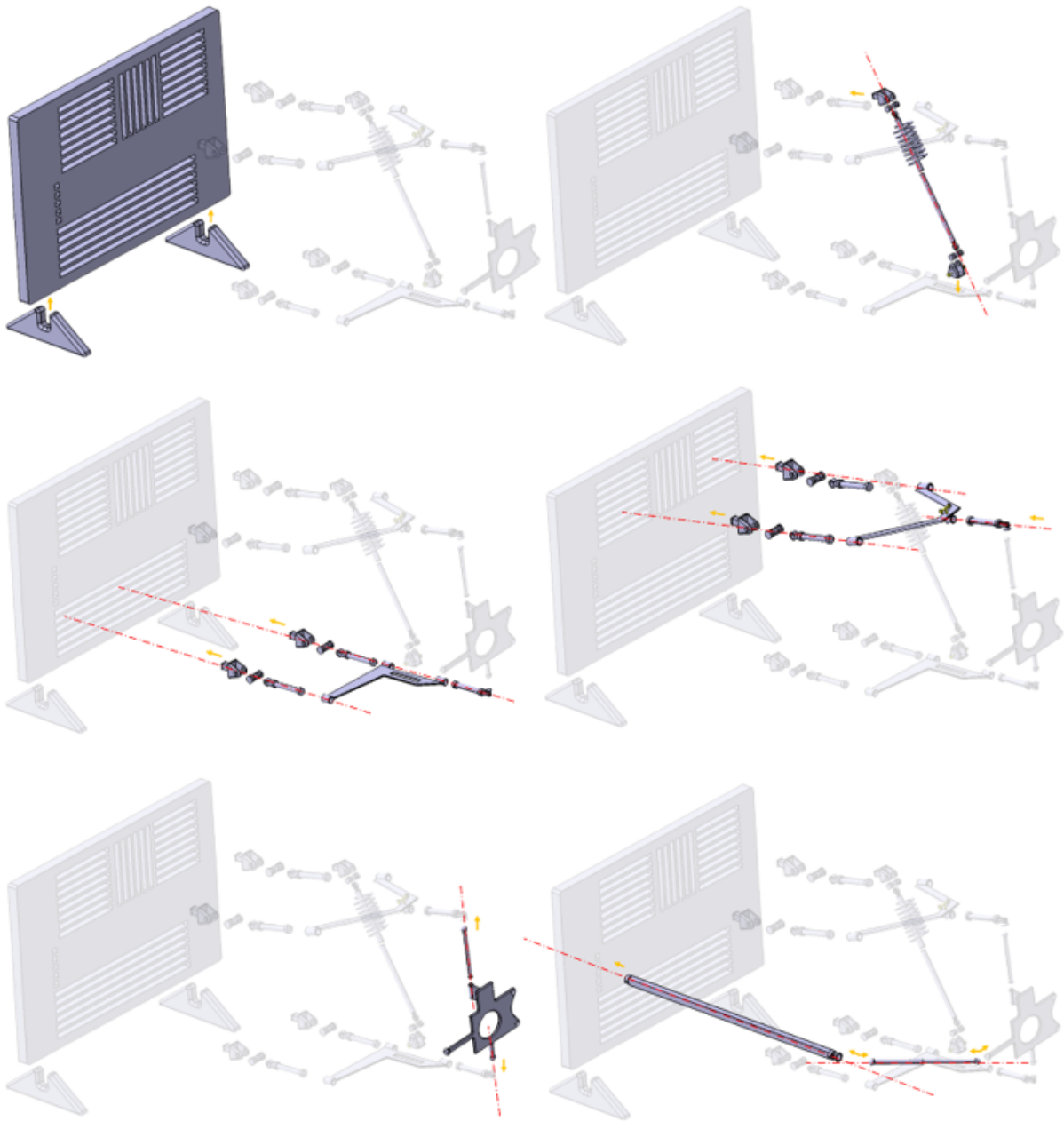


Figura 68: Explosión del ensamblaje de componentes del Gemelo Digital - versión Doble Trapecio.

Sistema de suspensión Mc Pherson

En la Figura 69 se muestra el ensamblaje de todas las piezas que componen el gemelo digital en la versión McPherson.

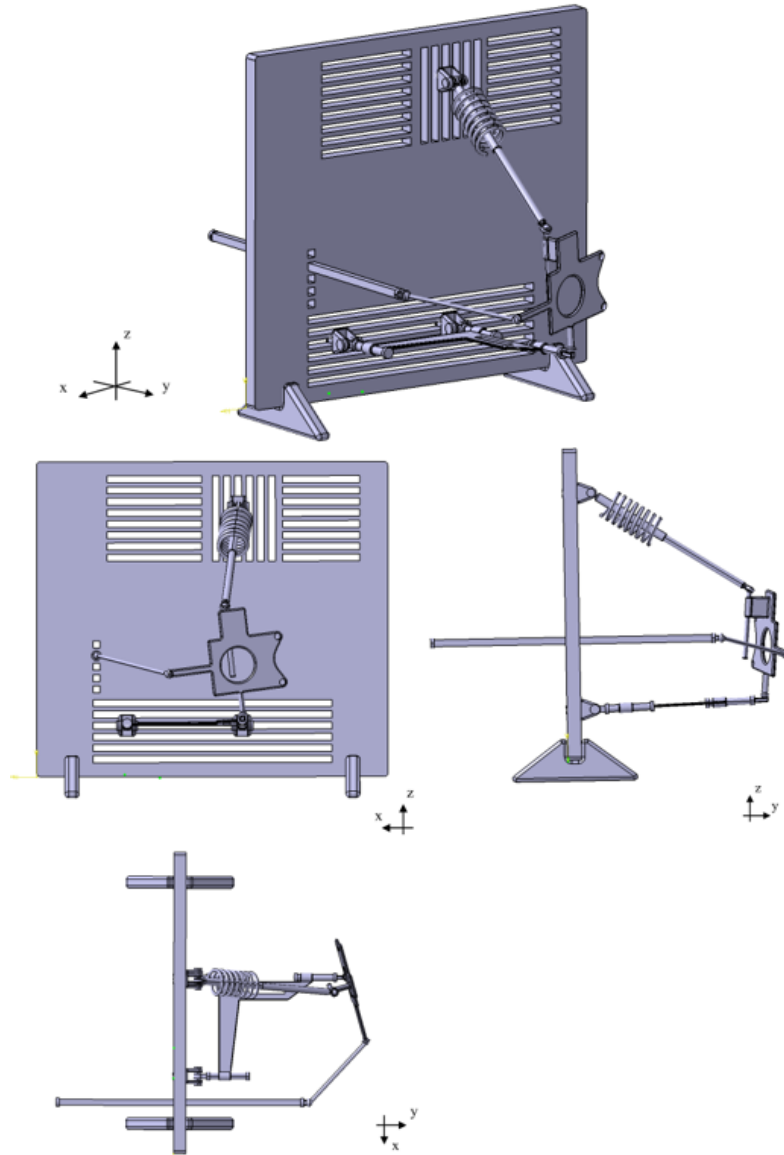


Figura 69: Ensamblaje de componentes del Gemelo Digital - versión McPherson.

La transición de suspensión de Doble Trapecio a McPherson en el Gemelo Digital es sencilla. Simplemente se deben eliminar u ocultar el trapecio superior y sus anclajes al chasis, y trasladar la restricción de coincidencia de la rótula inferior del mecanismo muelle-amortiguador a la rótula superior de la mangueta. En la Figura 70 se muestran el resto de restricciones de movimiento que permiten ensamblar las piezas del Gemelo Digital, que se detallan a continuación.

Desde este punto en adelante, se detalla únicamente la suspensión de Doble Trapecio.

Restricciones de movimientos en CAD o *constraints*

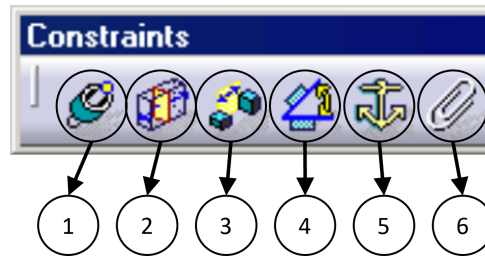


Figura 70: Restricciones impuestas para hacer el ensamblaje de las piezas. Fuente: Catia V5.

1) Restricción de coincidencia: para imponer la concetricidad de dos cilindros o el punto de rotación de la rótula.

2) Restricción de contacto: para imponer el contacto entre superficies planas.

A modo de ejemplo, en la Figura 71, se muestra:

- La restricción de coincidencia, en este caso de concetricidad representada por la línea roja del eje, entre el cojinete de rotación y sus correspondientes anclajes al chasis y al trapecio.
- La restricción de contacto entre las superficies A-A y B-B de las piezas para evitar que estas queden libres a lo largo de todo el eje y permanezcan tal y como se muestra en la figura.

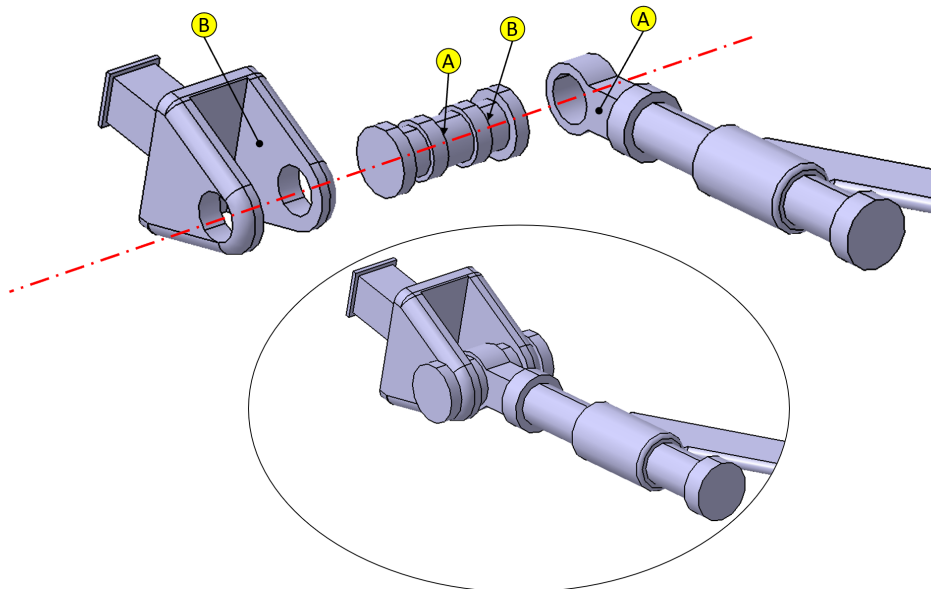


Figura 71: Representación de las restricciones de coincidencia concéntrica y contacto.

Por otro lado, en la Figura 72, se muestra el otro uso de la restricción de coincidencia, la de la rótula.

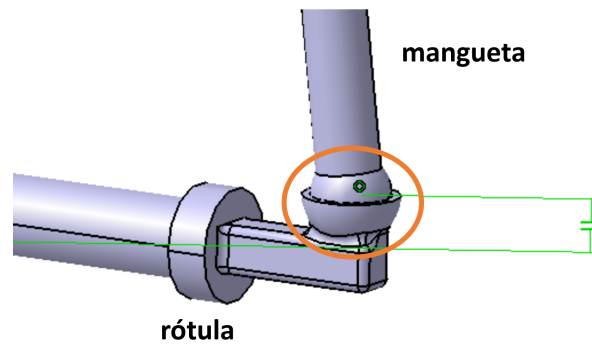


Figura 72: Representación de la restricción de coincidencia de rótula.

- 3) Restricción de desviación u *offset*: para imponer la distancia entre dos elementos.

En la Figura 73, se muestra la restricción de desviación, en este caso empleada para fijar la longitud del brazo de suspensión superior en el punto de anclaje al chasis.

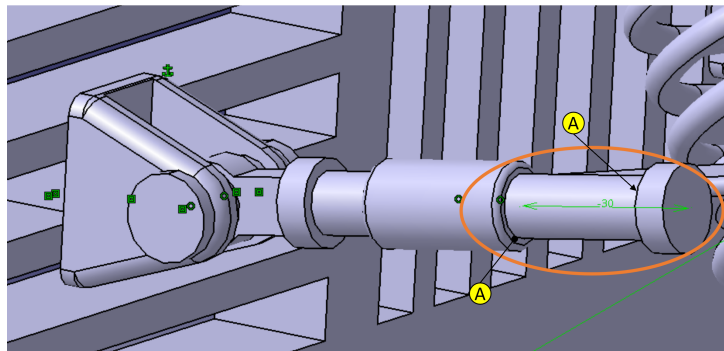


Figura 73: Representación de la restricción de desviación o distancia.

- 4) Restricción de ángulo: para imponer el ángulo de inclinación entre dos elementos.

En la Figura 72 se muestra igualmente la restricción de ángulo, que se ha empleado para mantener el paralelismo entre dos elementos, en este caso la rótula inferior de la mangueta y su correspondiente brazo de suspensión inferior, para evitar que esta rote con el movimiento del mecanismo de suspensión.

5) Restricción de fijado: para fijar un elemento en el espacio, manteniendo su posición en dichas coordenadas.

En la Figura 74 se muestra el icono del ancla, que permite identificar las piezas que permanecen fijas. Se emplea en este caso para, una vez elegida la posición de los puntos de anclaje de los trapecios superior e inferior al chasis, mantenerla durante todo el análisis hasta que se decida cambiar a otra posición,

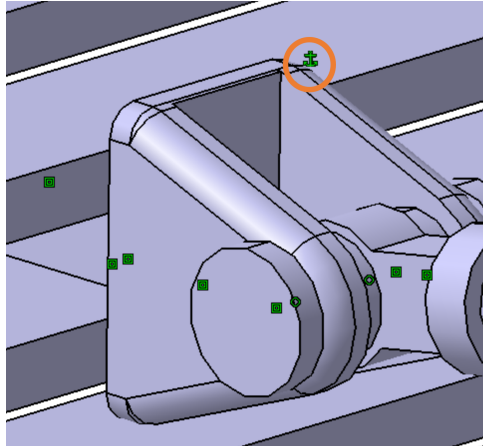


Figura 74: Representación de la restricción de fijado.

6) Restricción de fijado conjunto: para fijar dos elementos entre sí, manteniéndolos juntos en todo momento.

En la Figura 75 se muestra la restricción de fijado conjunto que en este caso se emplea entre el anclaje de la parte inferior del muelle-amortiguador y el brazo de suspensión inferior para impedir que el primero se desplace por la ranura del segundo (flecha de doble sentido naranja) durante el movimiento del mecanismo.

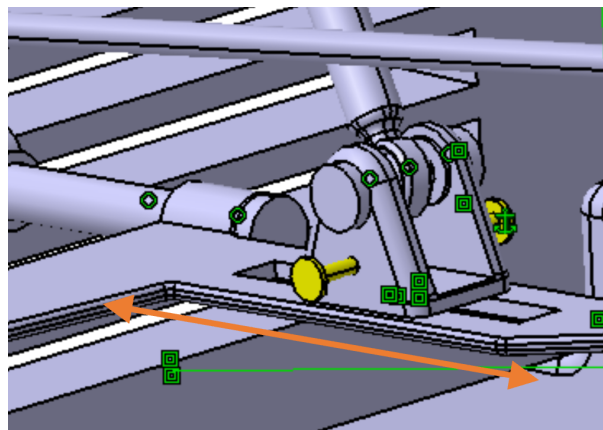


Figura 75: Representación de la restricción de fijado conjunto.

4.3.2. Grados de libertad

A continuación, se proporciona un esquema del prototipo del sistema de suspensión y dirección en el que se identifican el tipo de par cinemático y su correspondiente grado de libertad:

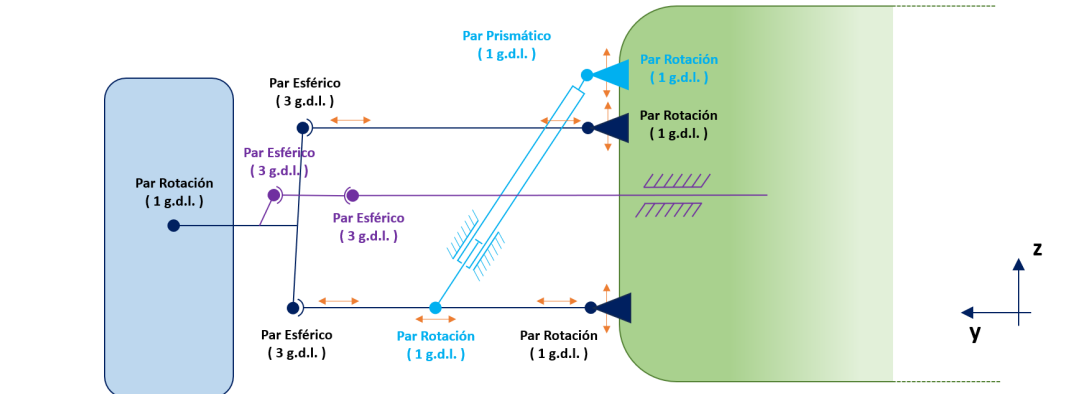


Figura 76: Esquema de grados de libertad del prototipo (plano frontal).

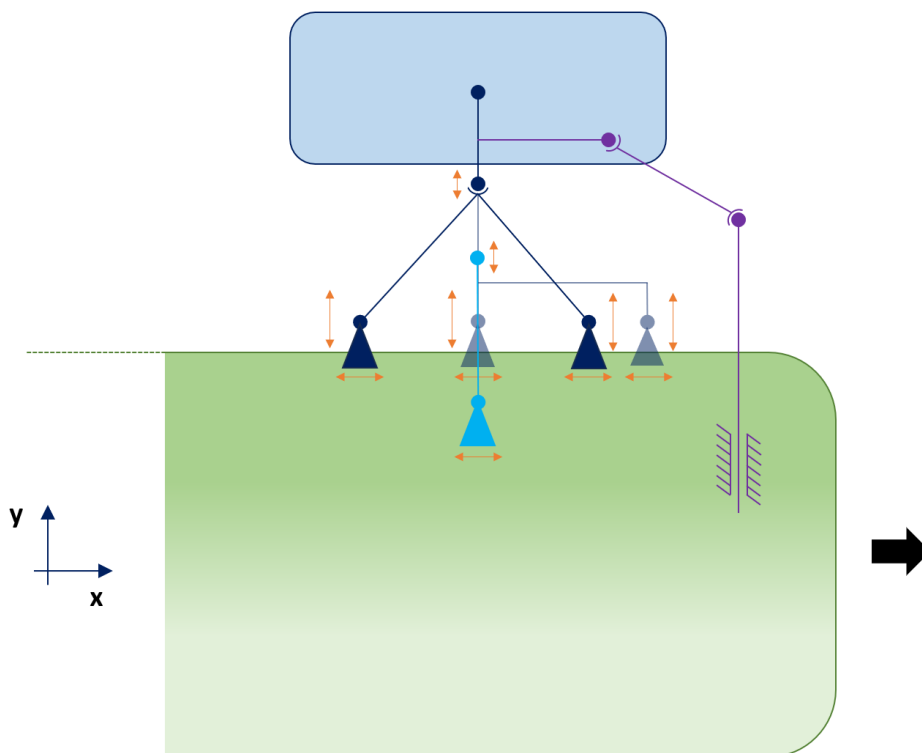


Figura 77: Esquema de grados de libertad del prototipo (plano superior).

4.3.3. Análisis de reglajes

En esta sección se presentan los puntos del gemelo digital desde los cuales se puede cambiar la configuración del mismo. Se aborda cada parámetro individualmente y se muestra desde donde se puede modificar.

Ángulo de convergencia (*toe*)

Para poder modificar el ángulo de convergencia se tiene que actuar sobre el sistema de dirección, acortando o alargando la bieleta de dirección, como se puede ver en la figura 78.

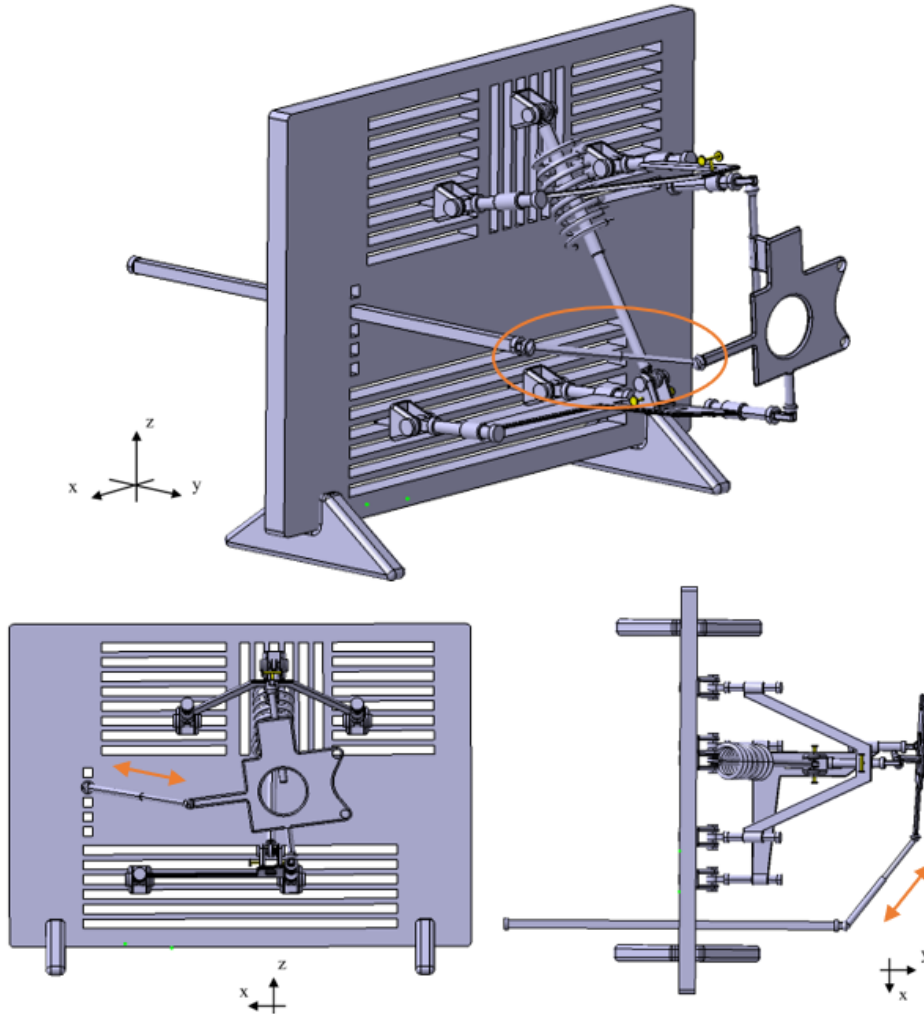


Figura 78: Esquema de los puntos de modificación del ángulo de convergencia (*toe*).

Ángulo de caída (*camber*)

Para modificar el ángulo de caída se puede actuar sobre los puntos de unión de los brazos de suspensión superior e inferior con el chasis y con la mangueta como se puede ver en la figura 79, concretamente sobre el anclaje de la figura 65.

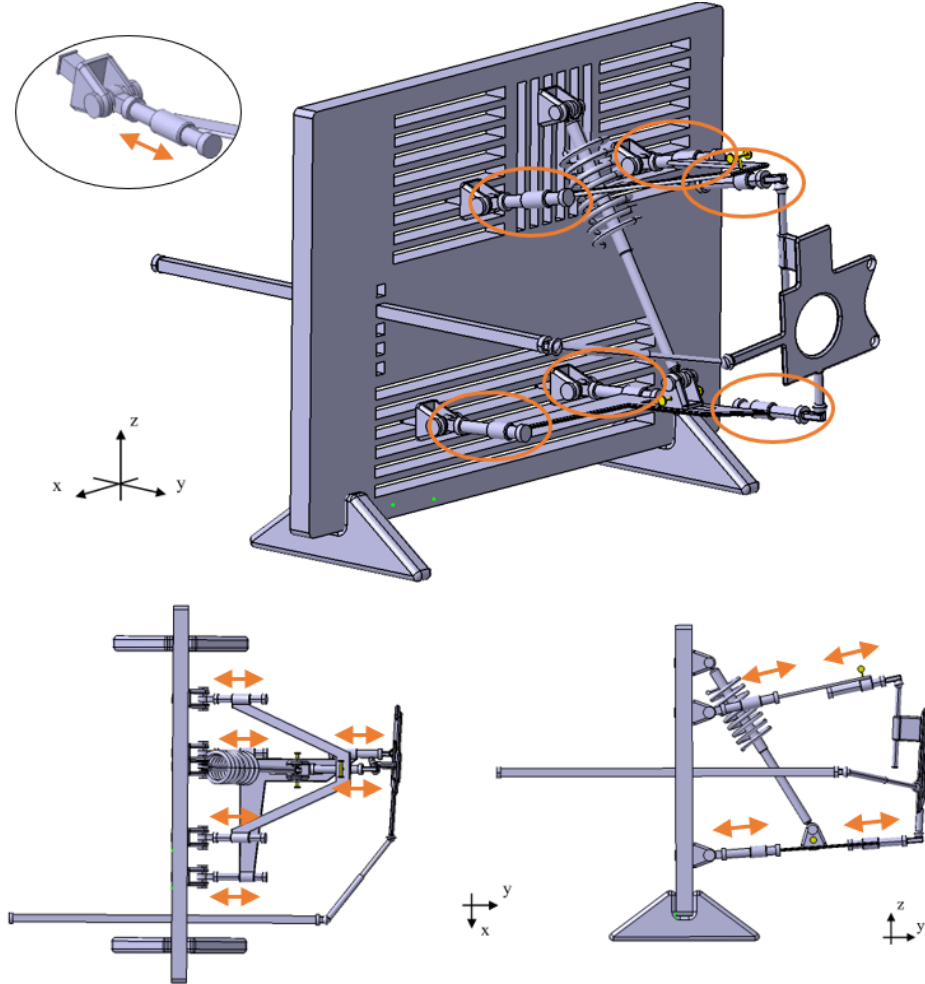


Figura 79: Esquema de los puntos de modificación del ángulo de caída (*camber*).

Ángulo de avance (*caster*)

Para modificar el ángulo de avance se puede actuar sobre los puntos de unión de los brazos de suspensión superior e inferior con el chasis como se puede ver en la figura 80, ajustando en el eje x la posición del anclaje mostrado en la figura 62.

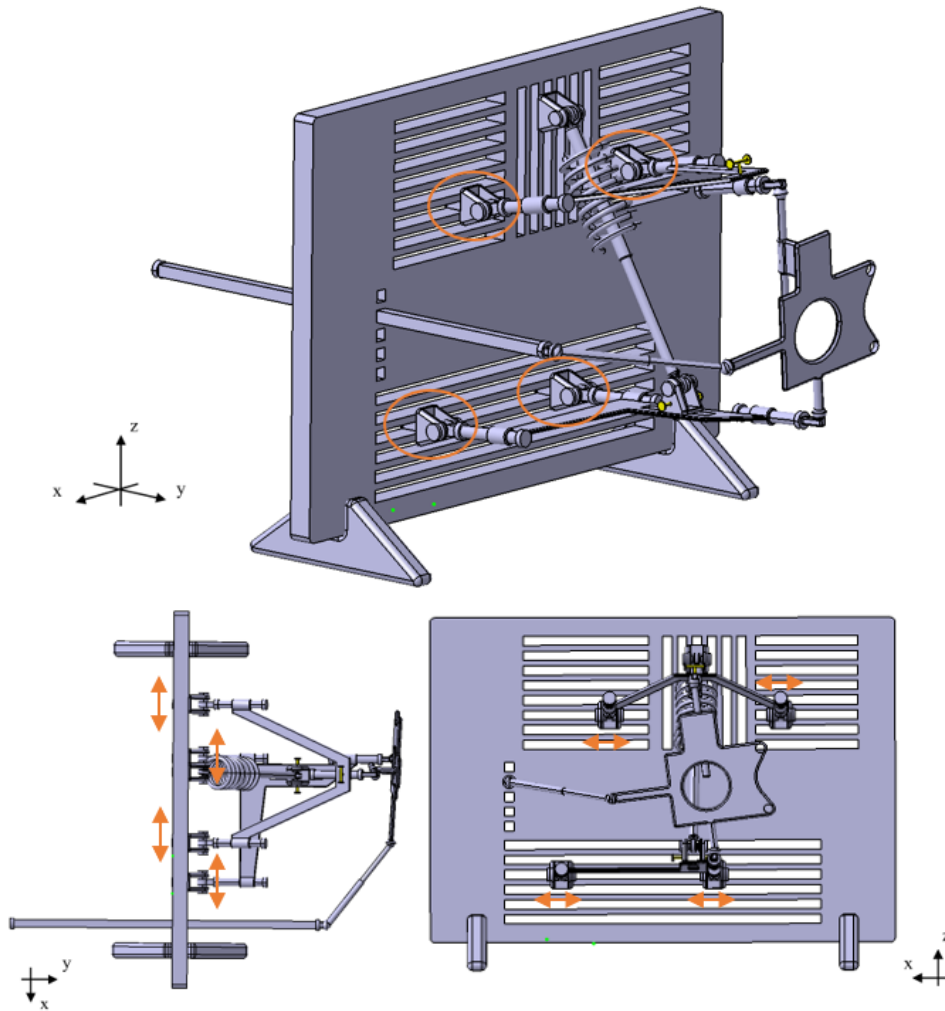


Figura 80: Esquema de los puntos de modificación del ángulo de avance (*caster*).

4.3.4. Medición de parámetros

Medición de parámetros en el Gemelo Digital

Para poder estudiar los parámetros más significativos, se añaden una serie de líneas auxiliares imaginarias, solidarias a los componentes del gemelo digital. Es decir, que si se cambia la posición del montaje, las líneas se desplazan también. No forman parte del modelo en sí ya que no tienen ninguna funcionalidad, y por tanto no se consideran como piezas adicionales, sino que únicamente sirven de referencia visual. De este modo, se pueden modificar en función del parámetro que se quiera medir a voluntad del usuario.

El código de colores es el siguiente:

- las líneas de color rojo se desplazan con la pieza y pueden cambiar de dirección.
- las líneas de color azul toman como referencia un punto de la pieza que se desplaza, por lo que se desplazan con la pieza igualmente, pero mantienen la dirección inicial.

De esta forma, se pueden medir los ángulos de caída (Figura 82), avance (Figura 83) y convergencia (Figura 84).

Estos ángulos se miden directamente en la rueda, sin embargo, para no entorpecer la visión del resto de componentes del sistema de suspensión delantera y dirección, se trasladan las líneas a la mangueta, ya que esta es solidaria a la rueda (Figura 81).

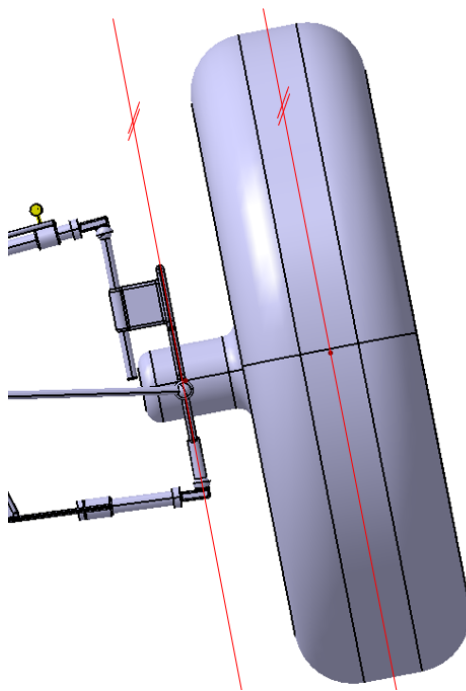


Figura 81: Mangueta solidaria a rueda.

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

En el caso de la Figura 82, el ángulo de caída es negativo ya que la parte alta de la mangueta se inclina hacia el interior del vehículo. [14]

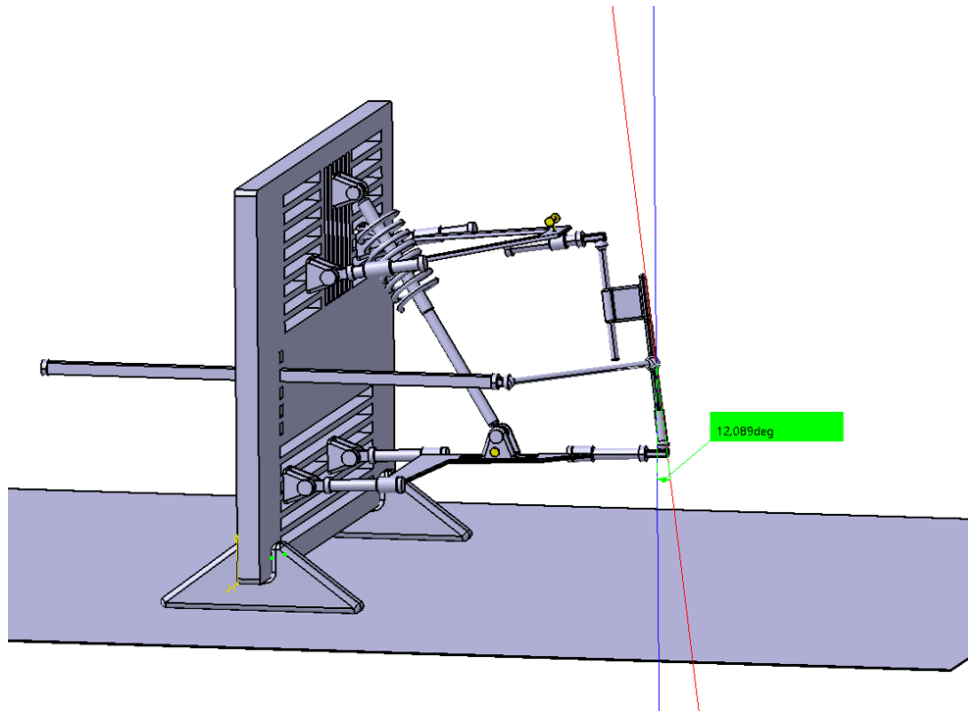


Figura 82: Medición del ángulo de caída en el Gemelo Digital.

En el caso de la Figura 83, el ángulo de avance es positivo ya que la parte alta de la mangueta se inclina hacia la parte trasera del vehículo. [14]

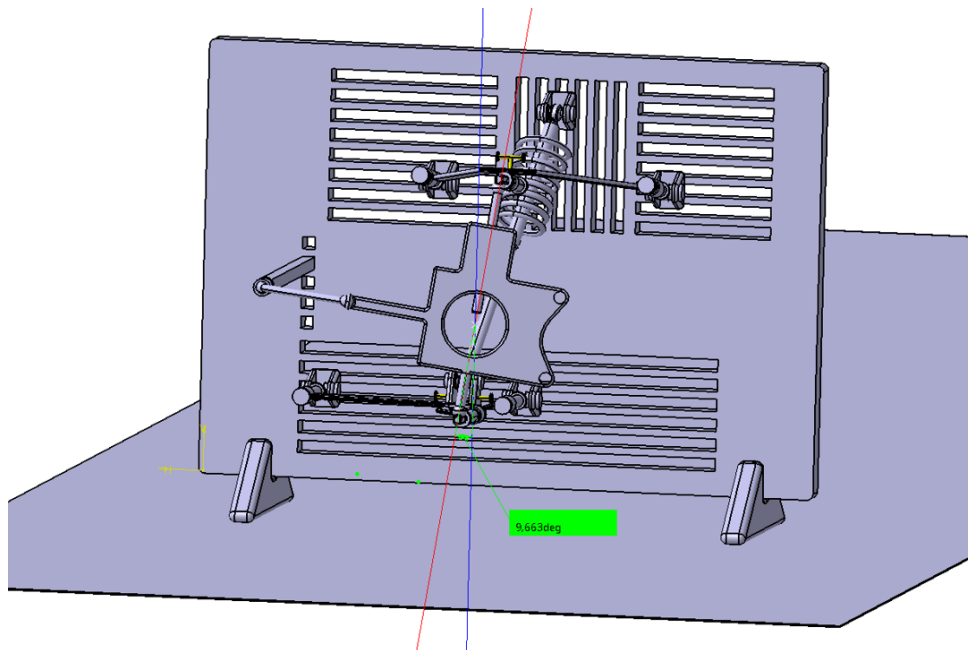


Figura 83: Medición del ángulo de avance en el Gemelo Digital.

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

En el caso de la Figura 84, el ángulo de convergencia es negativo ya que la rueda converge hacia la parte trasera del vehículo. [14]

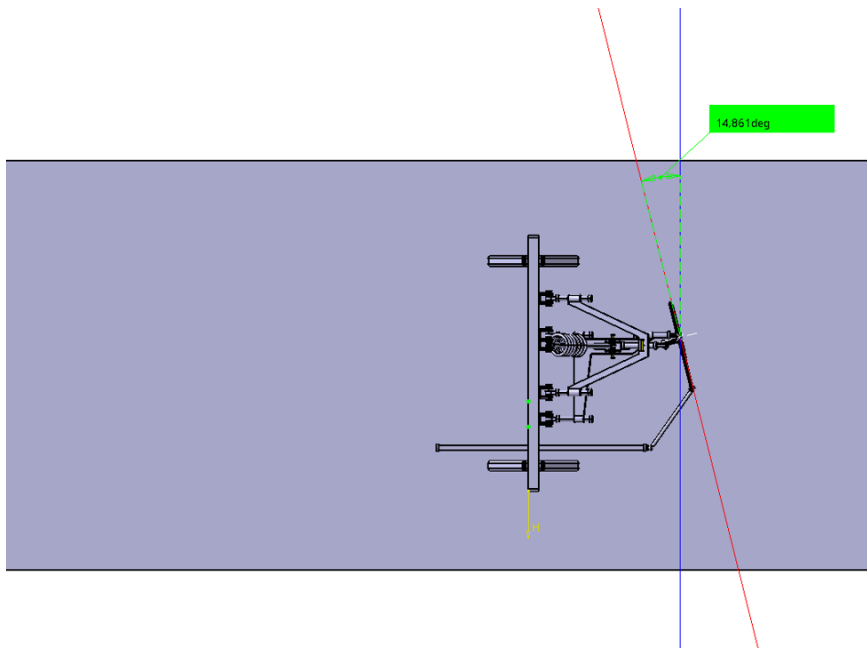


Figura 84: Medición del ángulo de convergencia en el Gemelo Digital.

El mismo método se emplea para estudiar el radio de deslizamiento o *scrub radius*, tal y como se muestra en la Figura 85. El convenio de signos determina que si la prolongación de la línea de unión de las rótulas superior e inferior se encuentra al interior con respecto a la vertical del neumático al nivel del suelo, es positivo (como es el caso de la imagen), si se encuentra al exterior es negativo.

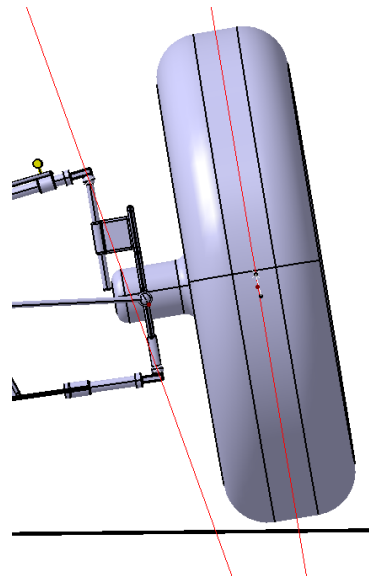


Figura 85: Radio de deslizamiento en el Gemelo Digital.

Es posible medir igualmente la inclinación con respecto a la vertical (Figura 86) y *spindle length* (Figura 87).

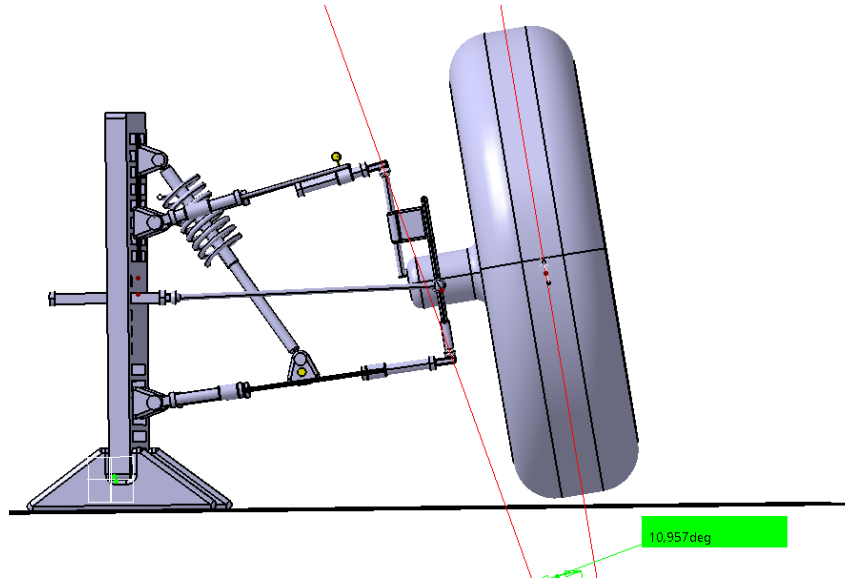


Figura 86: Medición del ángulo de salida en el Gemelo Digital.

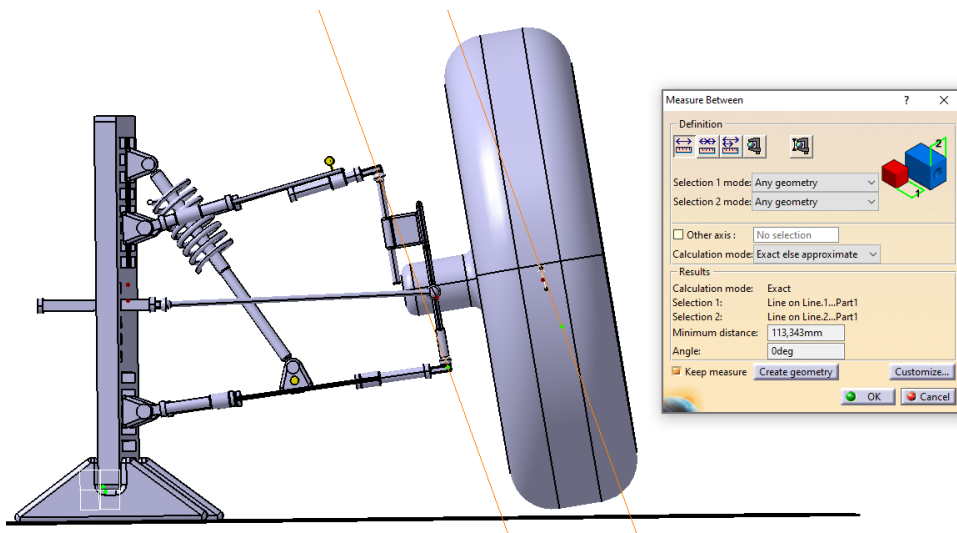


Figura 87: Medición de la distancia *spindle length* en el Gemelo Digital.

Localización del centro de balanceo

Para localizar el centro de rotación instantáneo de la rueda, se disponen dos líneas auxiliares rojas, solidarias a los brazos de suspensión superior e inferior de tal forma que en el plano y-z se pueda ver punto en el que se cortan, dónde se ubica el CIR (Figura 88).

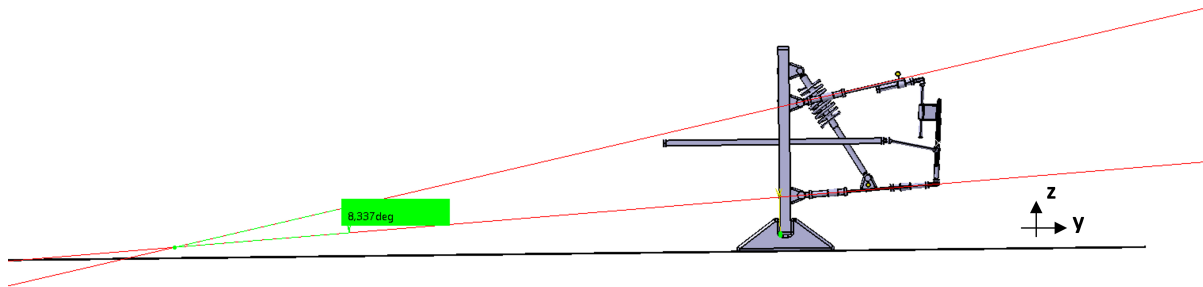


Figura 88: Localización del CIR de la rueda en el Gemelo Digital.

Recordar que la localización del CIR determina el sentido de la fuerza lateral que se genera en el punto de contacto neumático-terreno: Si el CIR se sitúa por encima del nivel del terreno, la fuerza lateral es en sentido exterior y si se sitúa debajo del nivel del terreno, la fuerza lateral es en sentido interior. Si durante el recorrido, el CIR varía por encima y por debajo del nivel del terreno, la rueda tiene un comportamiento sinusoidal. Sabiendo esto, se puede ver directamente en el plano y-z, simulando el recorrido de la suspensión en el Gemelo Digital, si con esa configuración o reglaje de los brazos de suspensión, la rueda se comporta de ese modo.

Medición de parámetros en el prototipo físico

La medición en el gemelo digital de los parámetros de configuración más significativos es relativamente sencilla teniendo en cuenta que se trata de líneas auxiliares que se pueden modificar rápidamente.

Sin embargo, la medición de los mismos parámetros en el prototipo físico resulta más compleja, ya que se trata de incorporar nuevos elementos que permitan, en este caso, la medición de ángulos y distancias.

A continuación se detalla el sistema de medición empleado para cada parámetro de configuración.

Para los ángulos de convergencia, caída y avance se emplea un transportador de ángulos solidario al prototipo, con una flecha incorporada tal y como se observa en la Figura 89. La rotación de esta flecha sobre el transportador de ángulos permite determinar el ángulo de giro del parámetro considerado.



Figura 89: Sistema de medición de ángulos en el prototipo físico. Fuente: FDF Raceshop..

En el caso del ángulo de convergencia, la disposición se muestra en la Figura 84, donde la línea azul es el eje longitudinal (fija) y la línea amarilla es la convergencia de la rueda (móvil):

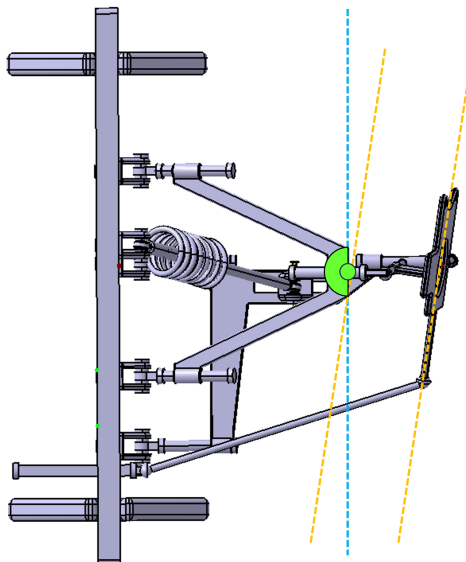


Figura 90: Sistema de medición del ángulo de convergencia en el prototipo físico.

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

En el caso del ángulo de caída, la disposición se muestra en la Figura 82, donde la línea azul es el eje vertical (fija) y la línea amarilla es la caída de la rueda (móvil):

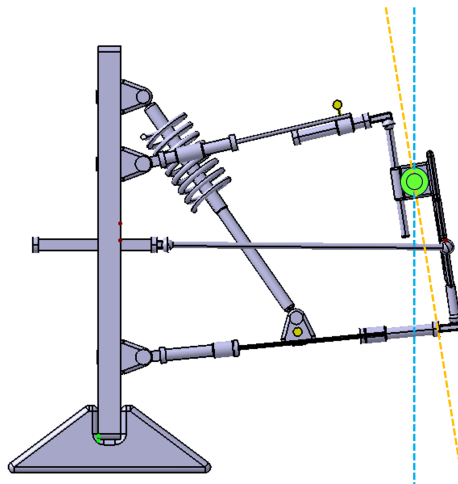


Figura 91: Sistema de medición del ángulo de caída en el prototipo físico.

En el caso del ángulo de avance, la disposición se muestra en la Figura 83, donde la línea azul es el eje vertical (fija) y la línea amarilla es el avance de la rueda (móvil):

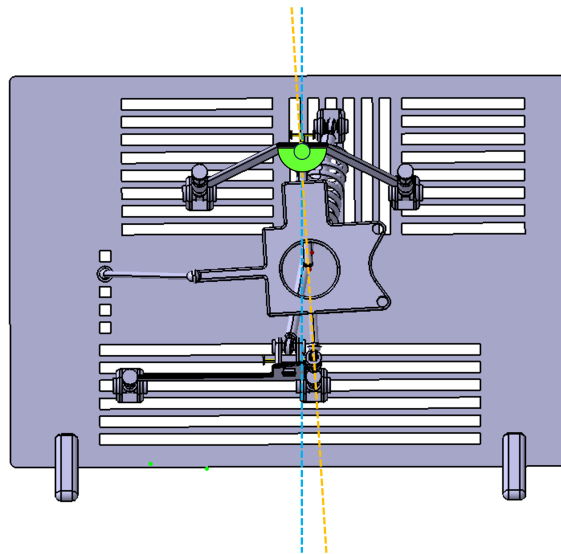


Figura 92: Sistema de medición del ángulo de avance en el prototipo físico.

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

El método de localización del centro de rotación instantáneo de la rueda es particular, ya que se podrían disponer dos varillas metálicas solidarias a los trapecios superior e inferior, tal y como se muestran en la Figura 93.

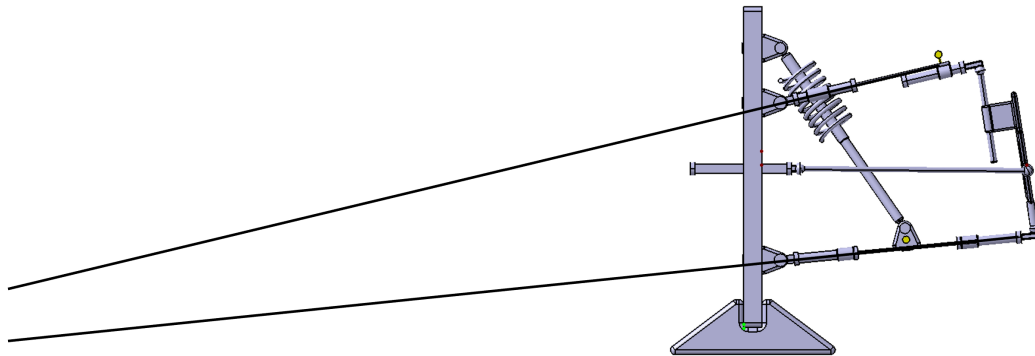


Figura 93: Sistema de localización del centro de rotación instantáneo en el prototipo físico mediante varillas metálicas.

Sin embargo, en ocasiones y tal y como se observa en la Figura 93, el CIR se encuentra muy alejado del montaje experimental, por lo que se necesitan unas varillas muy largas para poder ubicarlo. Una solución a esto es emplear varillas extensibles. Aún así, la placa que simula el chasis del vehículo en el montaje experimental puede impedir que se dispongan correctamente y entorpecer el movimiento vertical del sistema entero.

Por ello, se ha decidido emplear dos dispositivos láser de haz visible (uno por cada brazo de suspensión) que se fijan a estos y que permiten localizar igualmente el centro de rotación instantáneo. Su reducido tamaño permite colocarlos sobre los brazos de suspensión sin que afecte al movimiento y evitando colisiones con otras piezas del montaje. Dichos dispositivos láser pueden ubicarse en cualquier punto del brazo de suspensión correspondiente, evitando así que otro componente interceda en el haz de luz y permitiendo que este atraviese la placa (chasis del vehículo) por alguna de sus ranuras.

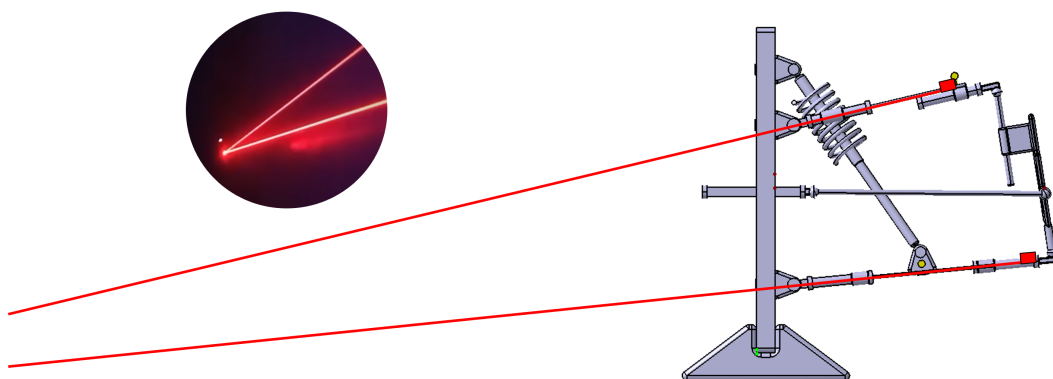


Figura 94: Sistema de localización del centro de rotación instantáneo en el prototipo físico mediante dispositivos láser.

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

El mismo método se emplea para determinar el radio de deslizamiento, tal y como se muestra en la Figura 95.

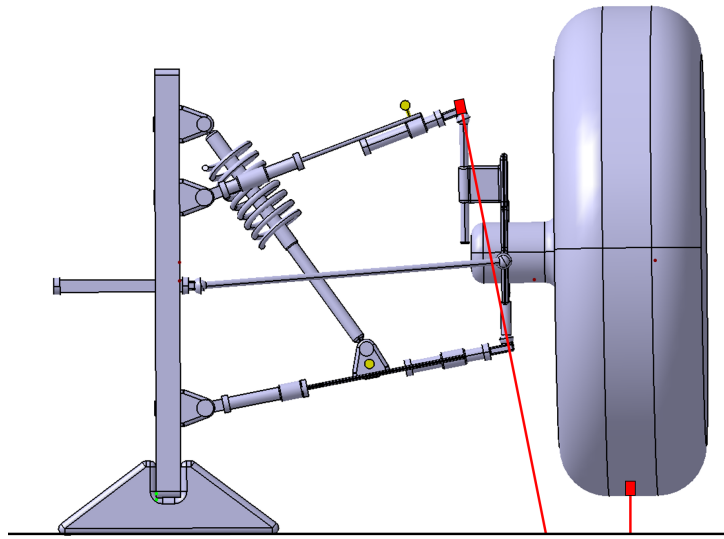


Figura 95: Sistema de medición del radio de deslizamiento en el prototipo físico mediante dispositivos láser.

El incremento en la longitud de los brazos de suspensión superior e inferior se cuantifica mediante las marcas que se disponen en los anclajes, tal y como se muestra de color verde en la Figura 96.

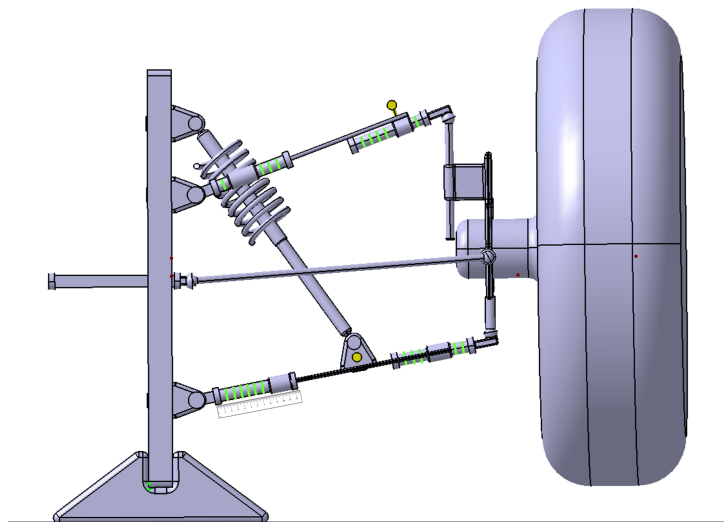


Figura 96: Sistema de medición del incremento de longitud de los brazos de suspensión en el prototipo físico.

La medición de parámetros en el prototipo físico es, sin duda, un eje de mejora. Si bien se ha propuesto una metodología concreta de medición, dicha aproximación es sencilla, simple o de baja precisión, por lo que se podría reconsiderar con el objetivo de aumentar su precisión. Todo ello se trata en la sección 8, en la que se hace referencia a las líneas de mejora del proyecto.

4.3.5. Limitaciones

Aunque se considera que CATIA V5 es una herramienta poderosa, también tiene algunas limitaciones que ha habido que afrontar a lo largo del proyecto y que condicionan el perfeccionamiento del gemelo digital.

Limitaciones intrínsecas al software

Análisis limitado:

Aunque CATIA V5 incluye algunas herramientas de análisis y simulación, no es tan avanzado en este área como algunos otros programas realmente especializados en cinemática. Sin embargo, el módulo de cinemática de CATIA V5 se ha empleado únicamente como simulador de movimientos por lo que integrar en una misma herramienta el de diseño y la simulación resulta más práctico.

Dificultades en modelos complejos:

Aunque CATIA V5 es capaz de manejar modelos 3D complejos, puede tener dificultades en proyectos grandes y detallados, lo que podría afectar al desempeño y la velocidad. En este caso, dado el elevado número de restricciones impuestas a los componentes para realizar el ensamblaje, a la hora de tratar de llevar a cabo algún movimiento de rotación o traslación del conjunto respetando dichas restricciones y evitando la colisión entre piezas, el programa reduce drásticamente su rendimiento

Inconvenientes en el cambio de configuración:

Para poder cambiar la configuración del gemelo digital se deben romper restricciones de movimiento entre piezas para posteriormente crear nuevas restricciones que permitan adoptar otra configuración. Dicha tarea, si bien no es compleja, puede ser delicada de realizar sin el conocimiento previo de las restricciones que se habían impuesto al inicio, en el momento del ensamblaje.

Limitaciones ligadas a la experiencia y conocimiento de nivel usuario

Interfaz Compleja:

La interfaz de CATIA V5 puede resultar compleja para los usuarios nuevos. La curva de aprendizaje puede ser brusca y requerir tiempo y esfuerzo para familiarizarse completamente con todas las funciones y características.

Para el diseño y ensamblaje de los componentes del gemelo digital se han empleado los módulos *Part Design* y *Assembly Design* de CATIA V5 disponibles en *Mechanical Design*. Dichos módulos forman parte de los más utilizados en CATIA V5 y son muy similares a los que se pueden encontrar en otros softwares de diseño, lo que se traduce en un manejo más sencillo e intuitivo. Sin embargo, el módulo de cinemática, empleado para la simulación de movimientos, es poco amigable y muy pocos usuarios han tratado previamente con él, ya que, como se ha mencionado previamente, existen otros softwares de simulación cinemática más comunes. CATIA V5 es exigente en cuanto a la rigurosidad de las restricciones de movimiento que debe introducir el usuario.

Conclusión sobre las limitaciones

A pesar de las limitaciones listadas, CATIA V5 sigue siendo una herramienta de CAD poderosa, razón por la cual su utilización se extiende en la actualidad a toda la industria automotriz.

Una alternativa del mismo desarrollador (Dassault Systems) es SolidWorks, más amigable y desde el que se pueden abrir ficheros generados originalmente en CATIA V5. Su funcionamiento es similar y su licencia más accesible, por lo que es una alternativa a tener en cuenta.

Sin embargo, las empresas líderes del sector del automóvil utilizan CATIA V5, por lo que suelen exigir la previa adquisición de la licencia de este programa para poder trabajar con ellas.

La posibilidad de trabajar en SolidWorks u otro programa de CAD existe, pero es compleja y no inmediata. Hay conversores directos para pasar modelos de otros programas CAD a CATIA V5, pero requieren de licencia a parte. Sin estas licencias, no se pueden conservar las propiedades nativas de los modelos: Cada programa CAD funciona con sus propios parámetros y a día de hoy dos programas CAD no son compatibles al 100% entre sí. Lo único que se puede hacer es pasar la geometría, pero "muerta", sin histórico de operaciones.

CATIA V5 tiene una barra para recuperar operaciones a un sólido "muerto", llamada **Partdesing Feature Recognition**, con ella se puede ir creando el árbol de CATIA V5 a partir de un sólido sin historia. No es capaz de reconocerlo todo, pero es una alternativa para estos casos.

5. Ensayos y simulación

Tras desarrollar el gemelo digital del sistema de suspensión delantera y dirección del vehículo, se realizan pruebas de simulación en ADAMS CAR. Se aplican los casos de interés mostrados en el apartado 3.4 a un sistema genérico de suspensión delantera de tipo doble trapecio de ADAMS, particularizado con los puntos clave del montaje experimental. Es decir, el sistema que se emplea en las simulaciones está configurado de tal forma que es análogo, cinemáticamente hablando, al diseñado en CAD. El objetivo es comprobar mediante simulación y previo a la manipulación del gemelo digital y prototipo físico, que una configuración concreta de dicho montaje es interesante para ser mostrada y estudiada. Es decir, las simulaciones en ADAMS CAR permiten anticipar el comportamiento del gemelo digital y del prototipo físico.

5.1. Justificación de la adecuación del software

El software ADAMS CAR es una herramienta de simulación de sistemas multicuerpo que se utiliza comúnmente en la industria automotriz para el modelado y análisis de vehículos y sus componentes.

Con ADAMS CAR, se pueden modelar sistemas mecánicos complejos, como en este caso el sistema de suspensión delantera y dirección, pero también se podrían incluir y simular los frenos, la transmisión, los neumáticos, el chasis y otros componentes del vehículo.

Su utilidad radica en que permite simular y evaluar el comportamiento de los sistemas mecánicos en diferentes situaciones, realizando cambios rápidos en el modelo para simular diferentes escenarios y prever cómo responde el sistema en condiciones reales de conducción.

Existen otros programas informáticos que ofrecen alternativas a ADAMS CAR que se emplean en la industria automotriz, aeroespacial y maquinaria:

1. **Simpack**: es un software de simulación multicuerpo que se diferencia de ADAMS CAR en que ofrece una amplia gama de funciones de simulación de elementos finitos, como el análisis de tensiones y deformaciones. También es más flexible en la definición de modelos, lo que permite una mayor personalización.
2. **CarSim**: está diseñado específicamente para la simulación de vehículos y ofrece una amplia gama de modelos, incluyendo automóviles, camiones, motocicletas, entre otros. También es más fácil de usar y tiene una interfaz más intuitiva.
3. **Amesim**: es un software de simulación de sistemas mecánicos y electrónicos que también se enfoca en la simulación de sistemas complejos y no en la simulación de vehículos completos.

Las necesidades principales del proyecto en curso están plenamente cubiertas por las funcionalidades que ofrece ADAMS CAR ya que permite modificar la geometría y simular un subsistema concreto del vehículo, por lo que no es necesario recurrir a otro tipo de soluciones informáticas como las listadas previamente.

5.2. Consideraciones previas

5.2.1. Sistema de referencia

El sistema de suspensión delantera escogido de base para las simulaciones se encuentra dentro de la librería <acar_concept>, y es el modelo <pickup_truck_front_SLA_torsional.sub>.

En la Figura 97 se tiene el sistema de suspensión en cuestión, mostrando el origen y sistema de coordenadas empleado por el programa.

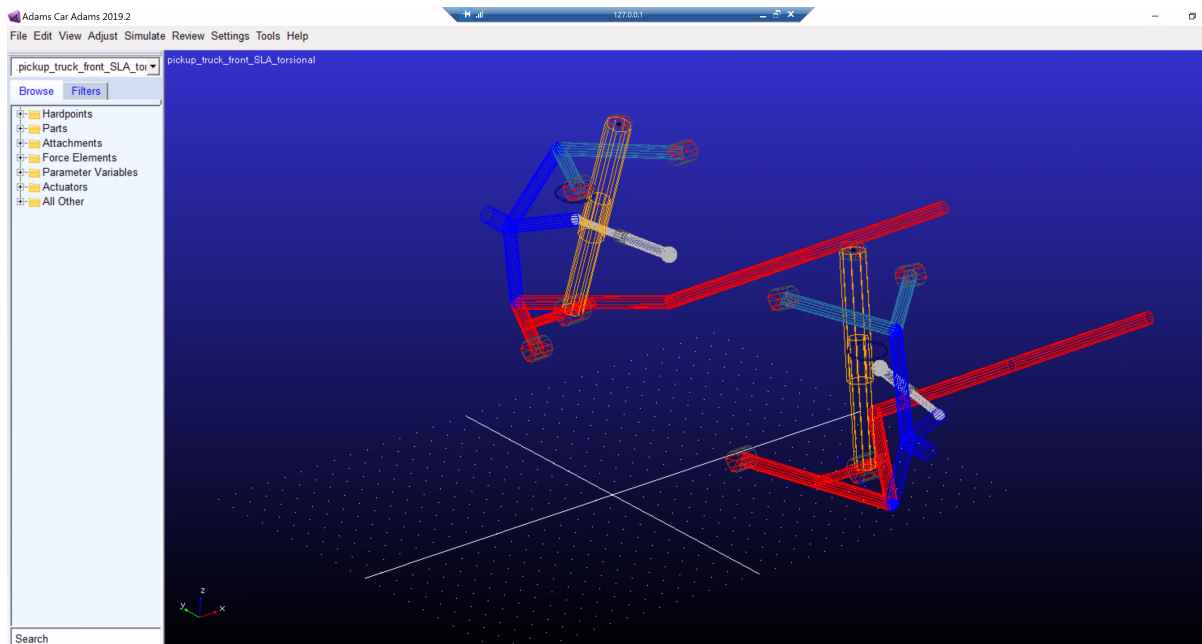


Figura 97: Sistema de suspensión delantera empleado en ADAMS CAR. Fuente: ADAMS CAR.

La orientación del sistema de referencia es la siguiente:

- El eje X se encuentra alineado con el eje longitudinal del vehículo. El sentido positivo es el que apunta a la parte trasera de este.
- El eje Y se encuentra en el plano transversal, paralelo al eje de las ruedas. El sentido positivo apunta hacia el perfil derecho del vehículo. De este modo, los puntos de la suspensión derecha e izquierda de un mismo eje comparten el valor absoluto de esta coordenada pero tienen signo opuesto.
- El eje Z se encuentra en el plano vertical. El sentido positivo es el que se aleja del terreno.

5.2.2. Parametrización de hardpoints

La parametrización de los *hardpoints* o puntos de referencia es clave para los ensayos. Estos puntos de referencia se corresponden con las coordenadas de la geometría del sistema de suspensión delantera, tal y como se muestra en la Figura 98.

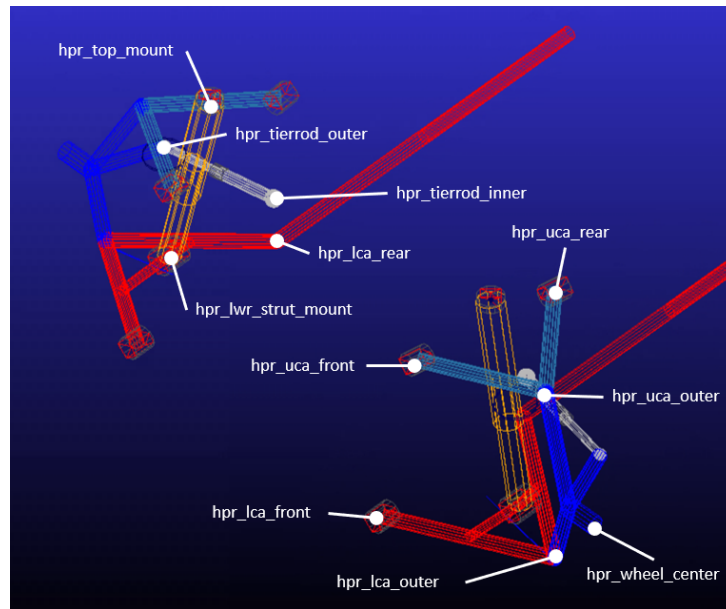


Figura 98: Localización de hardpoints del sistema de suspensión delantera.

Fuente: ADAMS CAR.

Partiendo de las coordenadas de dichos puntos en el gemelo digital de CAD, se modifica la tabla de hardpoints en consecuencia (Figura 99) de tal forma que se particulariza el sistema de suspensión de doble trapecio genérico al diseñado en CAD.

Hardpoint Modification Table					
		loc_x	loc_y	loc_z	remarks
hpr_bar_to_subframe	1300.0	940.0	104.0	(none)	
hpr_lca_front	-231.0	940.0	104.0	(none)	
hpr_lca_outer	-232.0	1219.0	123.0	(none)	
hpr_lca_rear	-67.0	940.0	104.0	(none)	
hpr_lwr_strut_mount	-209.0	1078.0	128.0	(none)	
hpr_subframe_front	-133.0	940.0	104.0	(none)	
hpr_tierrod_inner	-45.0	962.0	204.0	(none)	
hpr_tierrod_outer	-122.0	1210.0	201.0	(none)	
hpr_top_mount	-247.0	940.0	336.0	(none)	
hpr_uca_front	-313.0	940.0	276.0	(none)	
hpr_uca_outer	-220.0	1161.0	295.0	(none)	
hpr_uca_rear	-129.0	940.0	276.0	(none)	
hpr_wheel_center	-229.0	1308.0	223.0	(none)	

Figura 99: Coordenadas de los hardpoints del sistema de suspensión delantera.

Fuente: ADAMS CAR.

5.3. Aplicación de los casos de estudio de interés

La simulación a la que se recurre para los ensayos es de tipo *Parallel Wheel Travel*, que es suficiente para los casos de interés que se llevan a cabo. Se aplica para el recorrido vertical de la rueda, un límite superior (*bump*) de 60 mm y un límite inferior de (*rebound*) de -60 mm.

5.3.1. Ganancia de caída

Una vez realizada la simulación, lanzando el postprocesado se obtiene la gráfica de la Figura 100, que muestra el valor del ángulo de caída en todo el recorrido de la rueda. Recordar que el concepto de ganancia de caída surge como consecuencia del aumento del ángulo de caída cuando el mecanismo de suspensión alcanza sus posiciones límite.

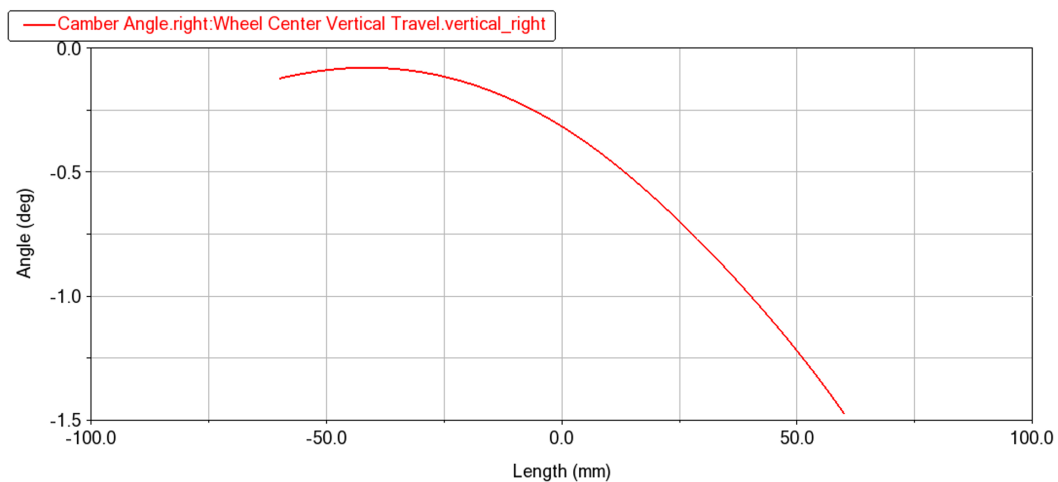


Figura 100: Ángulo de caída con respecto al desplazamiento vertical de la rueda.
Fuente: ADAMS CAR.

En este caso se observa que la posición inicial (valor nulo en el eje x que corresponde con la distancia recorrida por la rueda) ya tiene un ángulo de caída estático de 0,3 grados en sentido negativo.

Por otro lado, se observa que la caída es mínima (aproximadamente 0) en un punto en el que la posición de la rueda se aleja aproximadamente 40 mm en sentido negativo (hundimiento).

La Figura 101 muestra la longitud del brazo equivalente con respecto al desplazamiento vertical de la rueda. Se destaca que entorno al mismo valor para el cual el ángulo de caída es prácticamente nulo, la curva tiende a infinito.

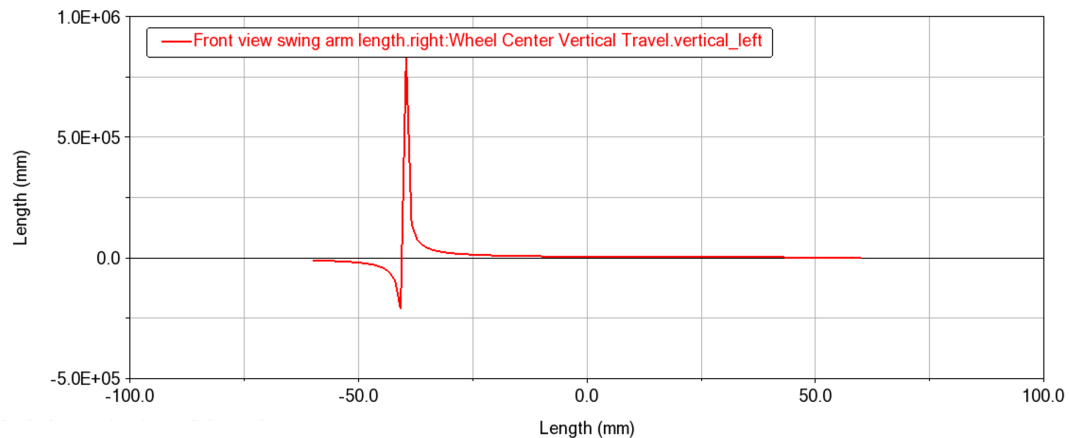


Figura 101: Longitud del brazo equivalente con respecto al desplazamiento vertical de la rueda.
Fuente: ADAMS CAR.

Se pone de manifiesto que, cuanto mayor es la longitud del brazo equivalente, menor es la ganancia de caída y viceversa.

En el punto en el que el ángulo de caída es mínimo, la derivada de la curva es nula, lo que significa que no existe ganancia de caída en ese punto ni prácticamente en valores muy cercanos al él. Esto quiere decir que si el brazo equivalente es de longitud infinita, no se produce ganancia de caída.

El caso contrario es el que se muestra en la Figura 102. Se modifica la posición de los anclajes al chasis del trapecio superior disminuyendo su coordenada en el eje z, de tal forma que se fuerza la convergencia con el trapecio inferior. Se consigue que los brazos de suspensión no sean paralelos en todo el recorrido de la rueda. La curva del ángulo de caída no tiene un máximo y, por tanto, la ganancia de caída no se anula en ningún punto. Es decir, el brazo equivalente tiene en todo momento una longitud finita.

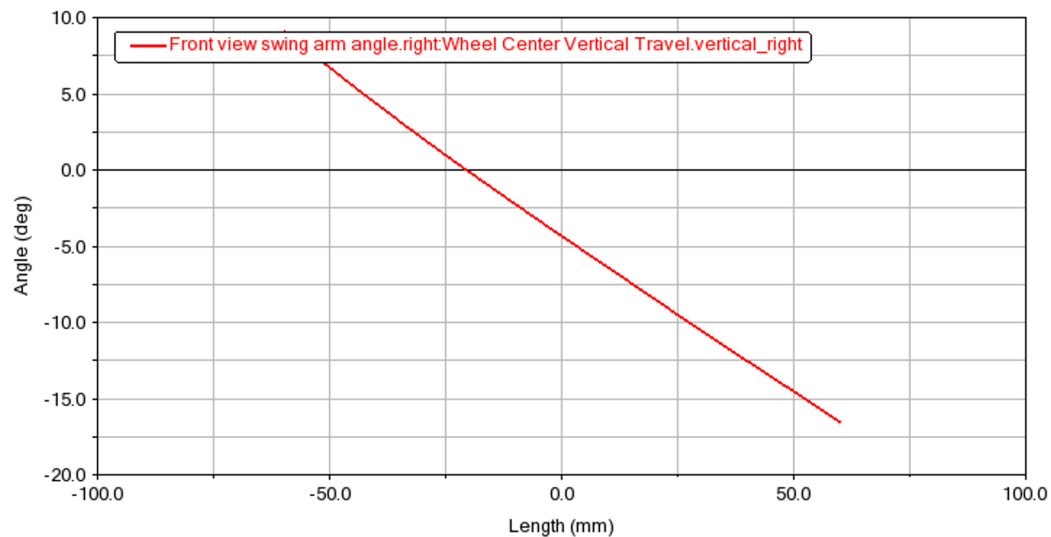


Figura 102: Ángulo de caída con respecto al desplazamiento vertical de la rueda.
Fuente: ADAMS CAR.

ADAMS CAR permite en este caso comprobar si la configuración del Gemelo Digital tendrá en algún punto un valor de ganancia de caída nulo y por tanto un brazo equivalente infinito.

Recordar que si el ángulo de caída es el mismo para las ruedas opuestas de un eje, este genera fuerzas laterales que se compensan, no así si el valor del ángulo de caída es distinto para cada una de ellas, generando inestabilidad en el vehículo.

5.3.2. Localización del centro de balanceo del eje

En la Figura 103, se tiene la localización en el eje vertical del centro de balanceo del eje.

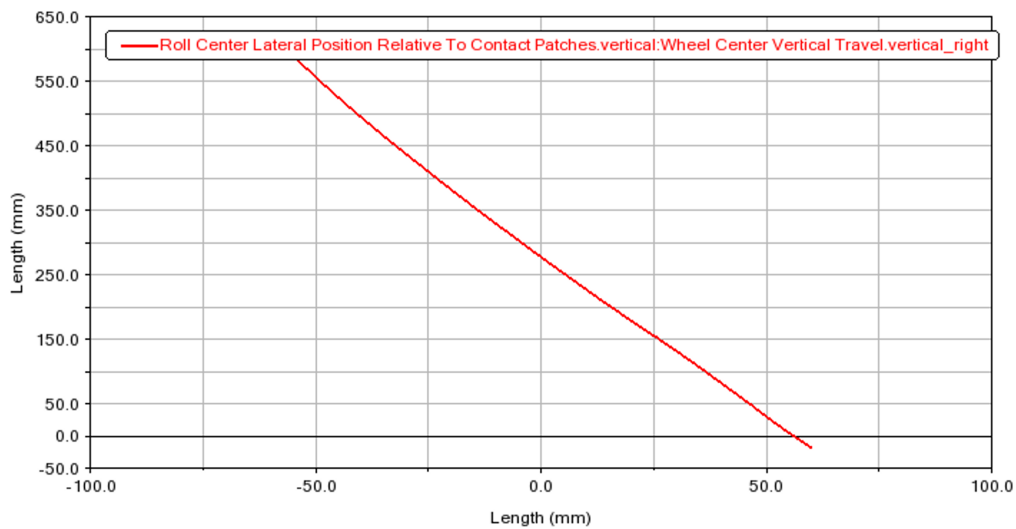


Figura 103: Localización del centro de balanceo del eje delantero con respecto al desplazamiento vertical de la rueda.

Fuente: ADAMS CAR.

Se recuerda que la fuerza lateral que soporta el chasis se aplica directamente sobre su centro de gravedad, por lo que la distancia entre este y el centro de balanceo (donde se produce el movimiento) determina el momento de balanceo que sufre toda la carrocería.

- A mayor distancia entre ambos puntos (centro de gravedad y centro de balanceo), mayor es el momento de balanceo y por tanto la inestabilidad del conjunto del vehículo.
- A menor distancia entre ambos puntos, menor es el momento de balanceo y por tanto el movimiento de balanceo disminuye.

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

En la Figura 104 se muestra la localización del centro de masas en comparación con la localización del centro de balanceo. Se distinguen los tres casos citados en la sección 3.4.1 .

- En la parte izquierda del gráfico (ruedas en su posición inferior), el comportamiento del eje es pendular (caso 1).
- En la posición de inicio de recorrido de la rueda (centro de la rueda en $z = 300\text{mm}$), los centros de balanceo y de masas coinciden (caso 3).
- En la parte derecha del gráfico (ruedas en su posición superior), el comportamiento es el deseado y el sistema de suspensión hace su función (caso 2).

Sin embargo, el tipo de simulación llevado a cabo es el de recorrido paralelo de las ruedas (ambas se hunden o se elevan a la vez). En realidad, a efectos prácticos de una curva por ejemplo, las dos ruedas de un eje no están en completa extensión sino que hay una en extensión (rueda interior) y una en compresión (rueda exterior) por lo que el efecto pendular se reduce.



Figura 104: Localización del centro de balanceo y centro de masas del eje delantero con respecto al desplazamiento vertical de la rueda.

6. Plan de fabricación

En esta sección se presenta el plan de fabricación del montaje experimental, que permite pasar de la concepción a la elaboración de un primer prototipo. Se detalla tanto el material como el proceso de fabricación elegido, y se presenta la adaptación al formato físico de los componentes previamente diseñados en CAD para el gemelo digital.

6.1. Alternativas del materiales

Entre las principales familias de materiales, los candidatos para ser utilizados en el prototipo desarrollado son los metales y polímeros. Sin embargo, si bien los metales, por regla general, son buenos conductores de calor y electricidad y tienen una alta resistencia mecánica, no son características que se requieran en este caso, por lo que se concluye que los polímeros son la opción más razonable. Su facilidad de fabricación, aislamiento, resistencia a corrosión y peso ligero posicionan a la familia de materiales plásticos la ideal para esta aplicación.

En esta sección se muestran los materiales polímeros más populares, se comparan sus propiedades y aplicaciones para poder elegir el que mejor se adapta a las necesidades del prototipo físico.

Tipos de polímeros (plásticos)

La clasificación general de polímeros se realiza según su comportamiento frente al calor, obteniéndose así tres grandes grupos: termoplásticos, termoestables y elastómeros.

- **Termoplásticos:** Deben su nombre a que se ablandan y plastifican. Son los más empleados por su capacidad de soportar muchos ciclos de fusión y solidificación. Al no producir enlaces químicos, el proceso es reversible, por lo que se pueden reciclar fundiéndolos de nuevo para posteriormente reutilizarlos con otro fin. En realidad, tras cada ciclo de fundición y solidificación, sus propiedades varían pero ligeramente.
- **Termoestables:** Los termoestables no pueden ser calentados y fundidos como los termoplásticos. Si se aumenta la temperatura lo suficiente, el polímero termoestable comienza a quemarse, degradarse y carbonizarse. Los polímeros este tipo de material se entrecruzan durante un proceso de curado, se descomponen en vez de fundirse, y no vuelven a formarse al enfriarlos. Por ello, no se pueden reciclar.
- **Elastómeros:** Se caracterizan por mostrar una gran deformación elástica cuando se les aplica una fuerza. Su baja resistencia mecánica hace que se descarte su uso para los componentes del prototipo.

6.2. Procesos de fabricación

Es importante elegir el proceso de fabricación adecuado ya que influye directamente en factores como la calidad del producto o la eficiencia y consistencia de la producción:

- **Calidad:** Puede afectar no solo a la apariencia estética por la uniformidad del material sino a la precisión dimensional o a la resistencia mecánica.
- **Eficiencia:** Puede requerir más tiempo y recursos, aumentando así el coste del producto final.
- **Consistencia:** Puede provocar variaciones en la calidad del acabado y afectar a la funcionales.

Existen varios sistemas de fabricación aditiva y sustractiva a los que la industria automovilística recurre con frecuencia.

Fabricación aditiva

1. **Moldeo por inyección:** se utiliza para la producción en masa de piezas de plástico. El proceso implica la inyección de plástico fundido en un molde que tiene la forma de la pieza deseada.
2. **Impresión 3D:** se fabrica la pieza capa por capa mediante la deposición de material o la fusión de polvo metálico según el proceso elegido. Estas capas se acumulan y se adhieren entre sí, creando un objeto sólido y tridimensional.

Fabricación sustractiva

1. **Mecanizado CNC:** una herramienta de corte da forma a la pieza a partir de un bloque de material sólido. Se emplea en plásticos y metales.
2. **Mecanizado por electroerosión (EDM):** utiliza descargas eléctricas controladas que erosionan el material y forman la geometría deseada. Se emplea en metales para mecanizar piezas de alta precisión y complejidad.
3. **Corte por láser:** con un láser de alta potencia se corta y da forma a la pieza a partir de una hoja de material. Se emplea en plásticos y metales pero también en madera y tejidos.
4. **Corte por chorro de agua:** con un chorro de agua a alta presión (a menudo mezclada con abrasivos) se corta y da forma a la pieza. Es un método versátil y preciso que genera poco calor por lo que es adecuado para materiales sensibles a la temperatura. Se emplea en plásticos y metales pero también en piedra, vidrio y compuestos.

Ambos métodos tienen sus ventajas e inconvenientes. No obstante, se opta por la fabricación aditiva y en concreto por la impresión 3D, principalmente por el menor número de herramientas necesarias, el desperdicio mínimo de material por cada pieza fabricada y la velocidad de trabajo, que permite reducir tiempos y costes.

Además, se trata de una tecnología en auge por lo que la disponibilidad de equipos es significativa. Se puede adquirir un equipo de impresión 3D con poca inversión y, aunque puede variar en función del modelo, su aprendizaje es relativamente sencillo.

6.3. Impresión 3D

Elegido el proceso de fabricación, y la familia de materiales, queda concretar la combinación de tipo de impresora 3D y polímero más adecuada.

En cuanto a los tres tipos de polímeros, se descartan igualmente los termoestables por no poder ser calentados. Su uso es incompatible con la impresión 3D ya que esta consiste precisamente en aplicar calor para fundir el polímero. Se opta por los termoplásticos.

6.3.1. Elección del material

Existe una gran variedad de termoplásticos cuyo uso está muy extendido en la fabricación con impresión 3D. En la Tabla 5 se detallan sus características y aplicaciones.

Material	Características	Aplicaciones
ABS [15]	Tenaz y duradero Muy resistente a impactos y calor Resistente a químicos Necesita una plataforma caliente para imprimirse Necesita ventilación (emite vapores tóxicos en la impresión)	Prototipos funcionales Juguetes (ej: LEGO)
ASA [16]	Propiedades similares al ABS pero con mejor resistencia a rayos UV. Ofrece mejor acabado que ABS Emite estireno al imprimirse	Piezas de entorno exterior (ej: parachoques, espejos automóviles)
PLA [17]	Fácil de imprimir Rígido pero frágil Baja resistencia al calor y a productos químicos Biodegradables No emite vapores tóxicos en la impresión	Modelos conceptuales Prototipos estéticos

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Material	Características	Aplicaciones
PETG [18]	Temperatura de impresión menor Resistente a humedad Resistente a los productos químicos Alta transparencia Inodoros	Aplicaciones impermeables Botellas de plástico
Nylon [19]	Resistente, duradero y ligero Duro y parcialmente flexible Resistente al calor y a impactos Dificultad de impresión (alta temperatura y tratamiento previo a impresión) Material abrasivo (boquilla impresión especial)	Prototipos funcionales Piezas resistentes al desgaste
Polycarbonato (PC) [20]	Resistente a impactos y arañazos Resistente al calor Resistente al tracción Baja resistencia a químicos Baja resistencia a luz UV Transparente Ligero Dificultad de impresión (temperatura elevada)	Prototipos funcionales Piezas mecánicas Moldes Bisagras Cojinetes de poleas

Tabla 1: Materiales para la impresión 3D con tecnología FDM

A pesar de tener muy buenas propiedades mecánicas y de resistencia, se descarta el polycarbonato por ser transparente.

Por otro lado, un factor importante es el efecto de la humedad en los filamentos del material de impresión 3D. [21, 22] Cuanto más homogéneas y constantes son las propiedades del filamento, mayor calidad tiene la pieza final. Un factor importante además de escoger materiales de calidad procedentes de fabricantes reconocidos, es la conservación del filamento en el momento previo a la impresión. La humedad es un aspecto crítico que se debe controlar ya que suele ser el origen de la mayoría de problemas de acabado de las piezas.

Los materiales plásticos tienen una propiedad llamada higroscopía, y esta determina la capacidad del material de absorber humedad en mayor o en menor medida.

Los materiales listados en la tabla anterior entran dentro de esta categoría. La mayoría recuperan completamente sus propiedades tras el secado pero hay algunos que no se pueden recuperar como el PLA.

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y
DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Para seleccionar el material más adaptado al uso del prototipo físico, se aplica el método de la matriz de decisiones. Para ello, se establecen en primer lugar las propiedades más importantes y se puntúa de 1 a 5 cada material en base a ellas. (Tabla 2) [23–28]

La cantidad de parámetros considerados dificulta su disposición en la hoja por lo que se considera el siguiente código alfabético:

- A: Dureza
- B: Durabilidad
- C: Flexibilidad
- D: Facilidad de impresión
- E: Resistencia
- F: Seguridad
- G: Precio

Material	A	B	C	D	E	F	G
ABS	3	4	3	3	4	1	3
ASA	3	5	3	2	4	1	2
PLA	2	1	1	5	2	5	4
PETG	4	4	4	4	3	4	3
Nylon	5	5	5	2	5	1	1

Tabla 2: Puntuación de las propiedades de cada material

Se asigna un coeficiente de 1 a 5 que pondera cada propiedad según la relevancia de la propiedad para la aplicación en cuestión. (Tabla 3)

	A	B	C	D	E	F	G
Coef.	3	3	2	4	3	4	3

Tabla 3: Coeficientes de ponderación de las propiedades de los materiales

Se obtiene una matriz de propiedades ponderadas para cada material, de la que se escoge aquel cuyo resultado es más alto. (Tabla 4)

Material	A	B	C	D	E	F	G	Total
ABS	9	12	6	12	12	4	9	64
ASA	9	15	6	8	12	4	6	60
PLA	6	3	2	20	6	20	12	69
PETG	12	12	8	16	9	16	9	82
Nylon	15	15	10	8	15	4	3	70

Tabla 4: Matriz de decisión de materiales ponderada

Se decide optar por el PETG ya que ofrece el mejor balance de propiedades. Se adjunta la ficha técnica [29] en el Anexo D. Su precio está entorno a los 25-35 €/kg de acuerdo con los principales fabricantes [30–32] pero puede llegar a los 55 €/kg si el filamento es de mayor calidad [33].

6.3.2. Elección del tipo de impresora 3D

Las tecnologías más comunes enfocadas a la impresión 3D para plásticos son las siguientes: [34]

- FDM (modelado por deposición fundida): las piezas se forman derritiendo un filamento de material termoplástico y depositándolo en el área de impresión capa sobre capa. El proceso se llama extrusión de material. [35] Materiales compatibles: ABS, ASA, Nylon, PC, PLA, PETG.
- SLA (estereolitografía): las piezas se forman curando resinas líquidas termoendurecibles mediante un laser para convertirlas en plástico endurecido. El proceso se llama fotopolimeración. [36] Materiales compatibles : similares a ABS, PC y PP.
- SLS (sinterizado selectivo por láser): las piezas se forman fundiendo pequeñas partículas de polvo de material termoplástico con un láser de alta potencia que luego solidifican. El proceso se llama fusión de polvo. [37] Materiales compatibles: Nylon, PP.

Tipología	Característica Principal	Ventajas	Desventajas
FDM	Ampliamente conocida	<ul style="list-style-type: none"> · Facilidad de manejo · Uso extendido · Mecanismo sencillo · Variedad de materiales · Rapidez de impresión · Precio reducido (impresora y filamentos) 	<ul style="list-style-type: none"> · Calibración minuciosa previa para asegurar la calidad · Menor detalle · Escalonamiento de las capas
SLA	Precisa y de alta resolución	<ul style="list-style-type: none"> · Acabado superficial liso · Posibilidad de piezas transparentes · Alta precisión 	<ul style="list-style-type: none"> · Requiere elementos de apoyo · Resistencia limitada a luz UV si se usa resina como material de impresión · Coste de impresión elevado
SLS	Populares y económicas	<ul style="list-style-type: none"> · Rapidez de impresión · No requieren soporte · Adhesión entre capas muy fuerte 	<ul style="list-style-type: none"> · Porosidad debilita su estructura · Alto índice de contracción al enfriar · Mayor producción de residuos debido al material en polvo

Tabla 5: Tipologías de tecnologías de impresión 3D más comunes en plásticos

Por su facilidad de manejo, variedad de materiales compatibles, calidad de impresión suficiente, velocidad de impresión y disponibilidad en el mercado a un coste asequible, se elige la FDM.

6.4. Componentes del montaje físico

El rendimiento del Gemelo Digital se reduce de forma considerable si se pretende simular el comportamiento de piezas muy realistas. Como ya se ha comentado en el apartado de limitaciones de CATIA V5, a pesar de ser un programa que integra las funciones de diseño CAD y simulación de movimientos, no está pensado para poder soportar montajes muy complejos con alto nivel de detalle. Esto obliga a simplificar la geometría de las piezas si se quiere simular el movimiento relativo de todo el conjunto.

Por ello, esta sección detalla la adaptación de los componentes a la fabricación, rediseñando algunos de ellos para poder conseguir un prototipo físico que sea funcional.

En el Anexo C, se detalla cada uno de ellos y se esquematiza su posicionamiento en el prototipo.

A continuación se muestra la Tabla 6 y Tabla 7, que recopila todos los componentes, tanto los propios, de los que se indica el plano que corresponde, como los comerciales, de los que se proporcionan las medidas necesarias.

Nombre	Cantidad	Descripción	Plano
Anclaje 1	5 uds	Anclaje al chasis	Plano 1
Anclaje 2	1 ud	Anclaje del Muelle-Amortiguador al Trapecio Inferior	Plano 2
Conexión 1	4 uds	Conexión del Anclaje 1 a los Trapecios Superior e Inferior	Plano 3
Conexión 2	6 uds	Conexión entre Anclajes (1 y 2) y Conexión 1	Plano 4
Conexión 3	2 uds	Conexión de los Trapecios Superior e Inferior a las Rótulas Superior e Inferior de la Mangueta	Plano 5
Bieleta de Dirección	1 ud		Plano 6
Cremallera de Dirección	1 ud		Plano 7

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Nombre	Cantidad	Descripción	Plano
Mangueta	1 ud		Plano 8
Conexión Mangueta	1 ud	Conexión entre la Mangueta y la Rótula Superior	Plano 9
Chasis	1 ud		Plano 10
Soporte del Chasis	2 uds	Sostener el Prototipo Físico sobre una superficie horizontal	Plano 11
Rueda	1 ud		Plano 12
Suspensión 1	1 ud	Pieza inferior del mecanismo Muelle-Amortiguador	Plano 13
Suspensión 2	1 ud	Pieza superior del mecanismo Muelle-Amortiguador	Plano 14
Anclaje Suspensión	1 ud	Fijar la suspensión en una posición	Plano 15
Tornillo de Fijación o Límite de Recorrido	25 uds	- Fijar los Anclajes 1 al Chasis - Fijar el Anclaje 2 al Trapecio Inferior - Límite de Recorrido de las Conexiones (1,2 y 3), de la Conexión Mangueta y de la Cremallera de Dirección	Plano 16
Trapecio Inferior	1 ud		Plano 17
Trapecio Superior	1 ud		Plano 18

Tabla 6: Tabla resumen de componentes del prototipo físico

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

En cuanto a componentes comerciales (Figura 105), que no se diseñan sino que se adquieren directamente por catálogo según las medidas necesarias, se tiene:

- Rótulas: Para articular la unión de la Mangueta con los Trapecios Superior e Inferior pero también para articular la unión de la Bieleta de Dirección con la Cremallera de Dirección y el Brazo de Dirección de la Mangueta.
- Cojinetes Esféricos: Para articular la unión superior e inferior del mecanismo Muelle-Amortiguador.
- Tuerca Hexagonales: Para limitar la longitud de los Trapecios Superior e Inferior en las Conexiones 1 y 3.

Nombre	Cantidad	Medidas	Precio Unitario
Rótula	4 uds	Roscado: \varnothing_{int} 7mm Roscado: \varnothing_{ext} 8mm	\approx 12,84 €/ud
Cojinete Esférico	2 uds	Cabeza: \varnothing_{int} 10mm Roscado: \varnothing_{int} 7mm Roscado: \varnothing_{ext} 8mm	\approx 9,05 €/ud
Tuerca Hexagonal	14 uds	Roscado: \varnothing_{int} 9mm Roscado: \varnothing_{ext} 10mm	\approx 0,37 €/ud

Tabla 7: Tabla resumen de componentes comerciales del prototipo físico. [1-4]



Figura 105: Componentes comerciales del prototipo físico.

7. Conclusiones

El proyecto se ha centrado en el desarrollo de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz. El objetivo principal del proyecto consistía en elaborar:

- Un gemelo digital que permitiese por un lado emular el comportamiento del mecanismo de suspensión en un entorno virtual y a la vez servir de referencia para realizar ensayos de desempeño en ADAMS CAR de una serie de casos de interés que influyen en el comportamiento del vehículo.
- Un plan de fabricación del primer prototipo físico del montaje experimental, partiendo del diseño en CAD del gemelo digital.

Para ello, en primer lugar se ha estudiado en detalle la estructura y funcionamiento de los sistemas de suspensión delantera y dirección, identificando los componentes que forman parte de cada uno de ellos y los parámetros de configuración que se suelen ajustar para incidir en el comportamiento dinámico del vehículo.

En segundo lugar y partiendo del estudio previo de los criterios de diseño, se han diseñado las piezas del montaje experimental que componen el gemelo digital. En esta línea, se ha mostrado el ensamblaje final, indicando los grados de libertad del mismo, los posibles reglajes y la forma de medir o localizar los parámetros más significativos identificados en la sección anterior.

La fase de ensayos con ADAMS CAR ha permitido simular el comportamiento cinemático del gemelo digital en todo el recorrido de la suspensión, analizando así qué configuraciones son críticas y por tanto interesantes para ser explicadas en un contexto de formación, ya que se deben tener en cuenta para optimizar la integración del sistema de suspensión delantera y dirección con el resto del vehículo.

Se ha establecido finalmente un plan de fabricación en el que se consideran las alternativas de procesos y materiales más apropiados para la elaboración del primer prototipo físico del montaje experimental desarrollado. Dadas las limitaciones de CATIA V5 en cuanto al rendimiento de simulación con geometrías complejas, se ha llevado a cabo una remodelación de los componentes del Gemelo Digital para tener en cuenta su acoplamiento en el prototipo físico.

En resumen, este proyecto de desarrollo de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de automóvil representa un paso importante para facilitar la comprensión de la dinámica vehicular y fomentar el interés por la innovación en este campo. Proporciona una herramienta digital y un plan de fabricación detallado listo para ser ejecutado que beneficiará al entorno formativo del sector automóvil.

8. Propuestas de mejora

8.1. Sistemas de medición: más exhaustivos y precisos

Si bien se han propuesto varias metodologías con el objetivo de medir los parámetros de configuración más importantes del sistema de suspensión delantera y dirección directamente en el prototipo físico, queda pendiente su valoración y evaluación de la viabilidad técnica real para incorporarlos al montaje.

Dicha viabilidad técnica incluye factores como la interoperabilidad. Es decir, que los equipos de medición que se quieran integrar al prototipo deben poderse adaptar, por ejemplo, a la geometría de las piezas o al movimiento relativo entre las mismas. Se trata de hacer que la nueva tecnología que se incorpore sea compatible con el montaje existente para no perturbar su funcionalidad actual.

Otro factor importante es la precisión y fiabilidad de los sistemas de medición. Los análisis de los casos de interés tratados en el proyecto son cualitativos, pero sin duda, una propuesta de mejora es lograr que se puedan realizar, además, análisis cuantitativos fiables. A tal efecto, si se pretende comparar valores precisos entre el gemelo digital y el programa de simulación con el montaje físico, la precisión de este último debe permitir obtener valores consistentes para cualquier configuración del sistema.

Para ello, algunas de las alternativas al sistema propuesto son:

- Sensores de ángulo o inclinación para medir directamente en el prototipo físico los ángulos de caída, avance y convergencia.
- Sensores de posición para conocer las coordenadas exactas de los puntos de referencia del montaje físico e introducirlos como *hardpoints* directamente en ADAMS CAR sin necesidad de pasar por el Gemelo Digital.
- Estabilizadores digitales (*gimbals*), para mantener la referencia mientras que el prototipo está en movimiento.

Obviamente, la elección de una tecnología de medición u otra depende del coste y de los recursos disponibles, incluyendo el mantenimiento del nuevo sistema que se quiera acoplar y de la capacitación del personal que haga uso del mismo.

Por ello, dependiendo de los factores previamente descritos, queda abierta la posibilidad de rediseño de ciertos componentes para adecuarlos al sistema de medición elegido para el montaje experimental físico o incluso emplear diferentes sistemas de medición para cada parámetro de configuración.

8.2. Prototipo físico adaptativo o modular

La idea es adaptar el prototipo físico del que se ha realizado el plan de fabricación, el de doble trapecio, a otro tipo de sistema de suspensión independiente, siendo así conmutable con otros tipos de sistemas de suspensión delantera y dirección: McPherson o Multilink.

El objetivo es conseguir una versión física del producto que sea modular, es decir, que existan unidades o bloques comunes a todos los sistemas de suspensión delantera y dirección que se quieran incluir y otros específicos de cada uno. De esta forma, mediante el acople y desacople de una combinación de bloques, se consigue pasar de un sistema de suspensión delantera y dirección a otro.

El resultado es poder ofrecer un único producto convertible, más fácil de transportar, que permite mejorar los tiempos y costes de fabricación, ahorrar en el material empleado en su elaboración, y disminuir así el desperdicio de recursos favoreciendo de este modo su sostenibilidad medioambiental.

8.3. Colaboración directa con la industria automotriz

La colaboración con empresas del sector del automóvil y centros de investigación adheridos a ellas puede impulsar aún más la innovación en este campo, permitiendo que el montaje experimental se mantenga actualizado con las últimas tendencias y tecnologías de la industria.

9. Bibliografía

Referencias

- [1] *Rótulas, cabezas de dirección y horquillas*. Catálogo Comercial, ISB.
- [2] *Catálogo de Rótulas*. Catálogo Comercial, MBA.
- [3] Catálogo Comercial, Suministros Industriales G.M.G.
- [4] *Rótula de Dirección*. Catálogo Comercial, Centro Rc Levante.
- [5] *Informe Anual*. Informe técnico, ANFAC, Julio 2022.
- [6] *Presentaciones Sectoriales, Sector Automoción*. Informe técnico, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo; Gobierno de España, Diciembre 2022.
- [7] Laws, Shad M.: *An active camber concept for extreme maneuverability: mechatronic suspension design, tire modeling and prototype development*. Tesis Doctoral, Universidad de Stanford, Marzo 2010.
- [8] Fallaise, Josiah: <https://www.youtube.com/c/FDFRaceshop>. Audiovisual, FDF Raceshop, Abril 2021.
- [9] Calderón-Atariguana, Raúl-Fernando ; Castro-Salazar, Ana Zulema: *Maquetación como recurso didáctico para la enseñanza – aprendizaje de la Geometría*. Tesis de Diplomado, Universidad Católica de Cuenca, Azogues, Ecuador, Noviembre 2021.
- [10] López, Yuri ; Las-Heras-Andrés, Fernando Álvarez: *Innovación docente en prácticas de laboratorio a través de TFGs y TFM s (PBINN-16-001)*. Tesis de Diplomado, Universidad de Oviedo, MES 2016.
- [11] Holgado-Terriza, Juan Antonio: *Diseño de la Maqueta Domótica para el Aprendizaje de Sistemas de Automatización Domótica*. Tesis de Diplomado, Universidad de Granada, MES 2016.
- [12] Castiglione, Arcangelo: *Applications of Digital Twin across Industries: A Review*. Artículo Científico, MDPI, Junio 2022.
- [13] Gillespie, Thomas: *FUNDAMENTALS OF VEHICLE DYNAMICS*. Libro, SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS - 9781560911999, Agosto 2013.
- [14] *UNE 26517:2006 Vehículos de carretera. Dinámica y estabilidad del vehículo. Vocabulario*. Norma (Equivalente ISO 8855:2011), AENOR, Noviembre 2006.
- [15] Alicia-M.: *Las características del ABS en la impresión 3D*. Artículo, 3dnatives, Julio 2020.
- [16] Alicia-M.: *Las características del ASA en la impresión 3D*. Artículo, 3dnatives, Mayo 2023.
- [17] Lucia-C.: *Guía completa: El filamento de PLA en la impresión 3D*. Artículo, 3dnatives, Febrero 2023.
- [18] Lucia-C.: *El plástico PETG en la impresión 3D*. Artículo, 3dnatives, Mayo 2023.
- [19] Alicia-M.: *¿Qué características tiene el nylon en la impresión 3D*. Artículo, 3dnatives, Abril 2023.
- [20] Alicia-M.: *Guía completa: El plástico de policarbonato en la impresión 3D*. Artículo, 3dnatives, Abril 2023.
- [21] Filament2print: *Conservación de materiales de impresión 3D*. Artículo, Enero 2023.
- [22] Recreus: *¿Humedad en los Filamentos?* Artículo, Junio 2023.

- [23] Michael, Dwamena: *3D Printer Filament Comparison*. Artículo, 3D Printerly, 2023.
- [24] Ricardo, Linan: *Impresión 3D FDM: Comparación de filamentos ASA, PETG y PC*. Artículo, 3D Factory MX, Diciembre 2020.
- [25] Samara, Martinez: *Los materiales de impresión 3D más utilizados*. Artículo, Intelligy, Julio 2021.
- [26] *Comparativa entre el PLA, el ABS y el Nylon*. Artículo, Markforged.
- [27] *PETG vs PLA*. Artículo, Filament2print, Enero 2019.
- [28] *PETG vs ABS vs ASA*. Artículo, Filament2print, Febrero 2019.
- [29] *Guía de selección de materiales para impresión 3D*. Artículo, Xometry Europe, Junio 2023.
- [30] *DEEP BLACK OPAQUE PETG PRO*. Tesis de Licenciatura, Atomic Filament.
- [31] *EasyFil PET*. Producto Comercial, Form Futura 3D Printing Materials.
- [32] *BLACK PETG FILAMENT - 1.75MM, 1KG SPOOL*. Producto Comercial, Hatchbox 3D.
- [33] *Prusament PETG Carbon Fiber Black 1kg*. Producto Comercial, Prusa 3D.
- [34] *Guía de materiales de impresión 3D: Tipos, aplicaciones y propiedades*. Artículo, Formlabs.
- [35] *Modelado por deposición fundida (FDM)*. Artículo, Xometry Europe.
- [36] *Estereolitografía (SLA)*. Artículo, Xometry Europe.
- [37] *Sinterización láser selectiva (SLS)*. Artículo, Xometry Europe.
- [38] Neha, Goel ; líder técnico de Fórmula SAE Japón: *MathWorks Student Competitions Team (2023). Roll Center Calculator (<https://github.com/mathworks/roll-center-calculator/releases/tag/v1.0>), GitHub*. Matlab APP Designer, Mayo 2021.
- [39] Susana-S.: *Guía completa: los plásticos en la impresión 3D*. Artículo, 3dnatives, Julio 2023.
- [40] *Real Decreto 1801/2003, de 26 de diciembre, sobre seguridad general de los productos. BOE-A-2004-511*. Real Decreto, Ministerio de la Presidencia.

A. Presupuestos

El presupuesto del proyecto difiere ligeramente del presupuesto del producto ya que este último considera el escenario de comercialización del montaje experimental. Por ello, se destina una parte del presupuesto del producto al registro de la propiedad intelectual, a la investigación y desarrollo de mejoras futuras, a la reserva para contingencias, a gastos generales administrativos, financieros o legales.

Cabe recalcar que ambos presupuestos se mantienen dentro los límites del alcance del proyecto. El montaje experimental desarrollado está compuesto por el gemelo digital y el plan de fabricación detallado del prototipo físico, por lo que no se tienen en cuenta los costes asociados a la compra de material o equipos de impresión 3D, que sí estarían incluidos en la fase de producción.

A.1. Presupuesto del proyecto

El presupuesto contempla los costes de mano de obra empleados para la elaboración del trabajo de ingeniería, de forma que se han contabilizado las horas dedicadas y se han multiplicado por los salarios de las personas implicadas. Se han incluido los costes asociados al uso de equipamiento especializado en el que se tienen en cuenta las licencias de programas informáticos y el equipo informático.

La Tabla 8 muestra el desglose económico total de ejecución del proyecto.

Descripción	Cantidad	Cantidad	Importe
Salarios y Honorarios Profesionales			
Alumno	360 h	10 €	3.600 €
Tutor	30 h	50 €	1.500 €
Equipamiento Especializado			
Licencia ADAMS CAR (anual)			3.900 €
Licencia CATIA V5 (anual)			4.700 €
Equipo informático			2.000 €
PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN			15.700 €
IVA (21 %)			3.297 €
PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN CON IVA			18.997 €

Tabla 8: Presupuesto del proyecto

A.2. Presupuesto del producto

El presupuesto del producto estima la ejecución del producto en sí, en este caso el montaje experimental del sistema de suspensión delantera y dirección de un vehículo. Abarca aspectos como la investigación, desarrollo y validación, y se crea con el objetivo tanto de prever y controlar los costes en todas estas etapas de su ciclo de vida como de recuperar la inversión realizada. Al plantear la comercialización, se tienen en cuenta aspectos adicionales, tal y como se ha comentado anteriormente.

Es importante recalcar que el presupuesto del producto no equivale a su precio o valor de mercado.

La Tabla 9 muestra el desglose económico asociado al producto.

Descripción	Cantidad	Cantidad	Importe
Salarios y Honorarios Profesionales - <i>Alumno: se tiene en cuenta en las fases del proyecto listadas a continuación</i> - <i>Tutor</i>	30 h	50 €/h	1.500 €
Capacitación y Formación - <i>Utilización de software</i> - <i>Formación sobre fabricación</i>	72 h (20 % total horas)	10 €/h	720 €
Investigación y Análisis de Mercado - <i>Estado del arte</i> - <i>Identificación de necesidades</i>	36 h (10 % total horas)	10 €/h	360 €
Diseño y Desarrollo - <i>Costes de diseño conceptual</i> - <i>Costes de diseño detallado</i> - <i>Costes de ingeniería</i>	108 h (30 % total horas)	10 €/h	1.080 €
Pruebas y Ensayos - <i>Pruebas de laboratorio (software)</i> - <i>Pruebas de campo</i>	36 h (10 % total horas)	10 €/h	360 €
Plan de Fabricación - <i>Plan de prototipado inicial</i>	108 h (30 % total horas)	10 €/h	1.080 €

PROYECTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL DE SUSPENSIÓN DELANTERA Y
DIRECCIÓN DE UN AUTOMÓVIL PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Descripción	Cantidad	Cantidad	Importe
Equipamiento Especializado			10.600 €
<i>- Equipo informático y licencias</i>			
Propiedad Intelectual			875 €
<i>- Registro de patente</i>			
PRESUPUESTO PARCIAL DE EJECUCIÓN			16.575 €
Reserva Investigación y Desarrollo (I + D) futuro (5 % total presupuesto)			828,75 €
<i>- Mejoras y Optimización futura</i>			
Reserva de Contingencias (5 % total presupuesto)			828,75 €
<i>- Margen para imprevistos</i>			
Gastos Generales (2 % total presupuesto)			331,5 €
<i>- Trámites Administrativos</i>			
<i>- Trámites Financieros</i>			
<i>- Trámites Legales</i>			
PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN			18.564 €
Beneficio industrial (6 %)			1.113,84 €
PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN			19.677,84 €
IVA (21 %)			4.132,35 €
PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN CON IVA			23.810,2 €

Tabla 9: Presupuesto del producto

B. Pliego de condiciones

Plantear el lanzamiento al mercado del producto desarrollado como herramienta formativa obliga a cumplir con una normativa de seguridad que se detalla en esta sección. Además, al usar los programas informáticos CATIA V5 y ADAMS CAR, sus desarrolladores imponen unos requisitos mínimos para garantizar su funcionamiento adecuado.

B.1. Condiciones de Software y Hardware

En el caso de ADAMS CAR, el fabricante no facilita los requisitos mínimos, por lo que se toman como referencia los de un software de análisis similar llamado MSC Apex, perteneciente al mismo fabricante. Los requerimientos de *software* y *hardware* se listan en la Figura 107.

Computer Requirements

Hardware Platforms	Intel Core 2 Duo, I7 and Intel Xeon, Intel Core 2 Quad
Memory	8 GB Minimum 16 GB (or higher) Recommended
Swap Space/Page File	Swap = 1.5 times the memory size.
Disk Space	12-20GB*
Operating Systems	Windows 10 Professional 64-bit : 1903: Certified 1709, 1803: Available
Other	3 Button Mouse Active network card for licensing.
Graphics Devices	1280x1024 or higher resolution

Figura 106: Requisitos de hardware MSC Apex. Fuente: Hexagon.

Virtual Machine Requirements

VM Operating Systems	Windows 10 Pro 64-bit
VM Virtual Processors	4
VM Memory	8 GB Minimum 16 GB (or higher) Recommended
VM Swap Space/Page File	Swap = 1.5 times the memory size.
VM Disk Space	50GB
VM Disk IOPs	1000
OpenGL	OpenGL 3.3 or higher
Screen Resolution	1280x1024 or higher resolution
Other	3 Button Mouse

Figura 107: Requisitos de software MSC Apex. Fuente: Hexagon.

En el caso de CATIA V5, los requerimientos de *software* y *hardware* se listan en la Figura 108.

CATIA

- **OS:** Windows 7 or 10 64-bit; support for Windows 11 has yet to be announced
- **Processor:** 64-bit Intel i5 or better
- **Memory:** Minimum of 4 GB of RAM; recommended 8 GB or more
- **Graphics:** Graphics card beneficial but not necessary
- **Storage:** Minimum of 10 GB of free disk space; more is recommended for smooth operation
- **Additional software:** Microsoft Office 2013 or newer, especially Excel, is necessary to generate reports or BOMs

Figura 108: Requisitos de software y hardware CATIA V5. Fuente: Dassault Systems.

B.2. Condiciones de Comercialización

En relación a la comercialización del montaje experimental como producto, se identifica el Real Decreto 1801/2003 [40] como referente en cuanto a normativa sobre seguridad general de los productos. El objetivo de este Real Decreto es garantizar que los productos que se pongan en el mercado y por tanto destinado al consumidor, sean seguros. Se establece una evaluación de la seguridad del producto y los deberes de cada parte implicada (productores y distribuidores). A tal efecto, los elementos que se tienen en cuenta para determinar la seguridad de un producto son:

- Las características del producto: composición y envase.
- El efecto sobre otros productos.
- La información que le acompaña: etiquetado sobre los posibles avisos e instrucciones de uso y eliminación, las instrucciones de montaje, instalación y mantenimiento, etc.
- Las categorías de consumidores que estén en condiciones de riesgo en la utilización del producto, en particular, los niños y las personas mayores.

C. Componentes del montaje físico

C.1. Anclajes al Chasis

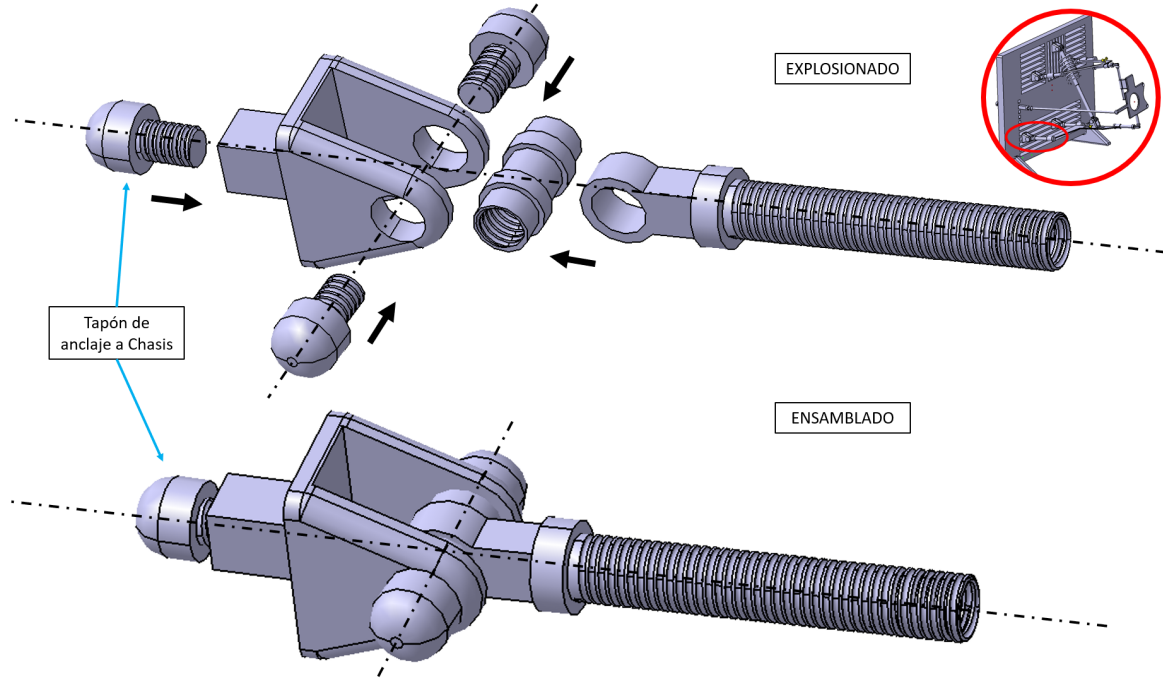


Figura 109: Esquema de los componentes de anclaje al chasis.

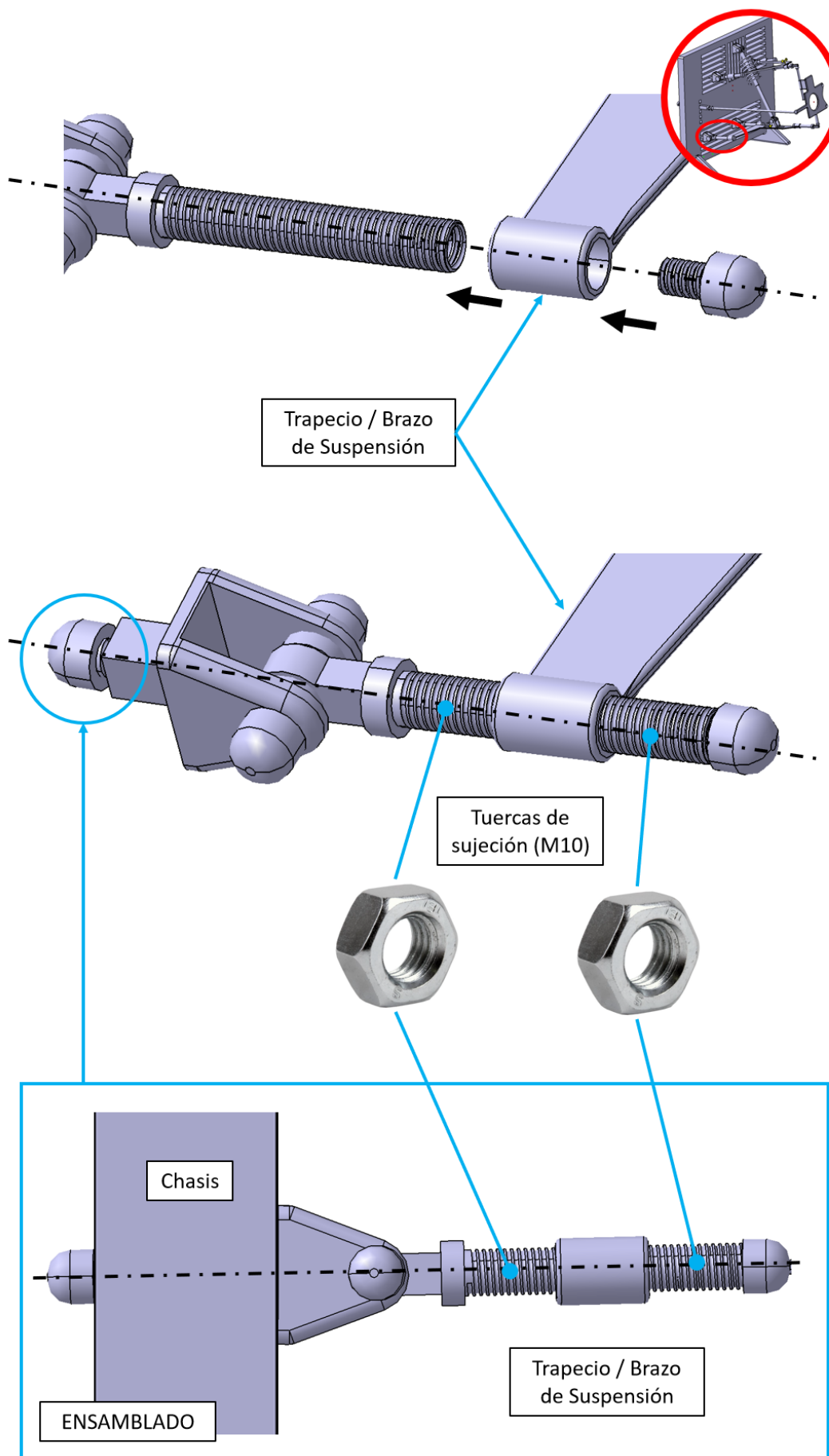


Figura 110: Esquema de los componentes de anclaje al chasis.

C.2. Sistema de Dirección

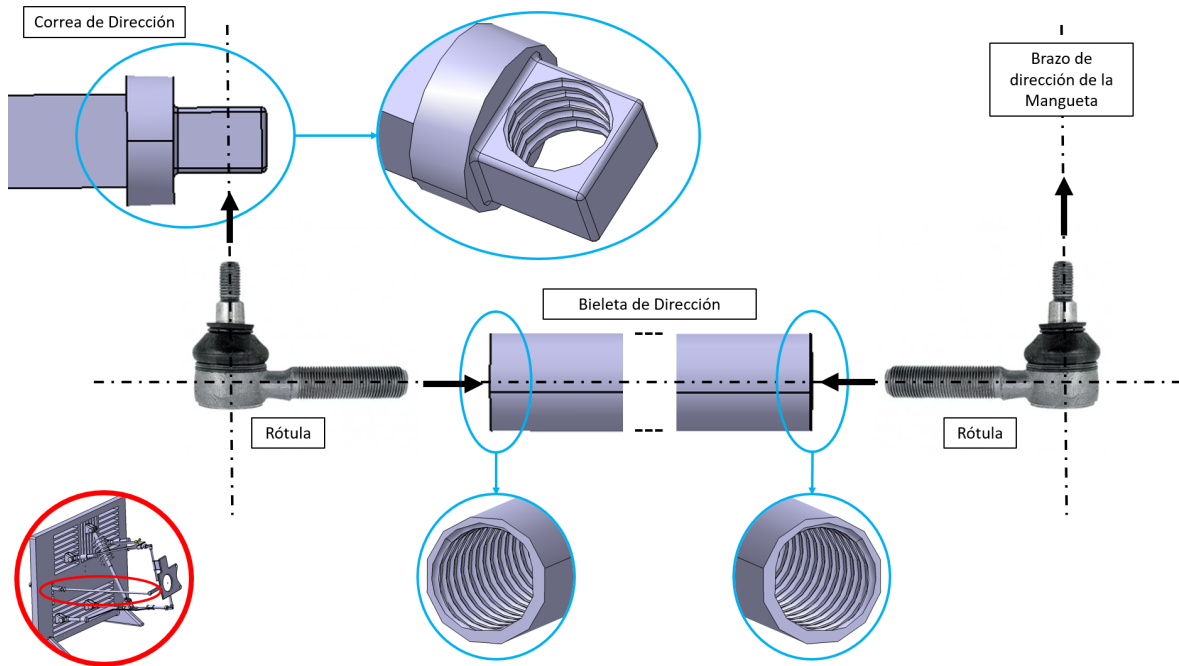


Figura 111: Esquema de los componentes del sistema de dirección.

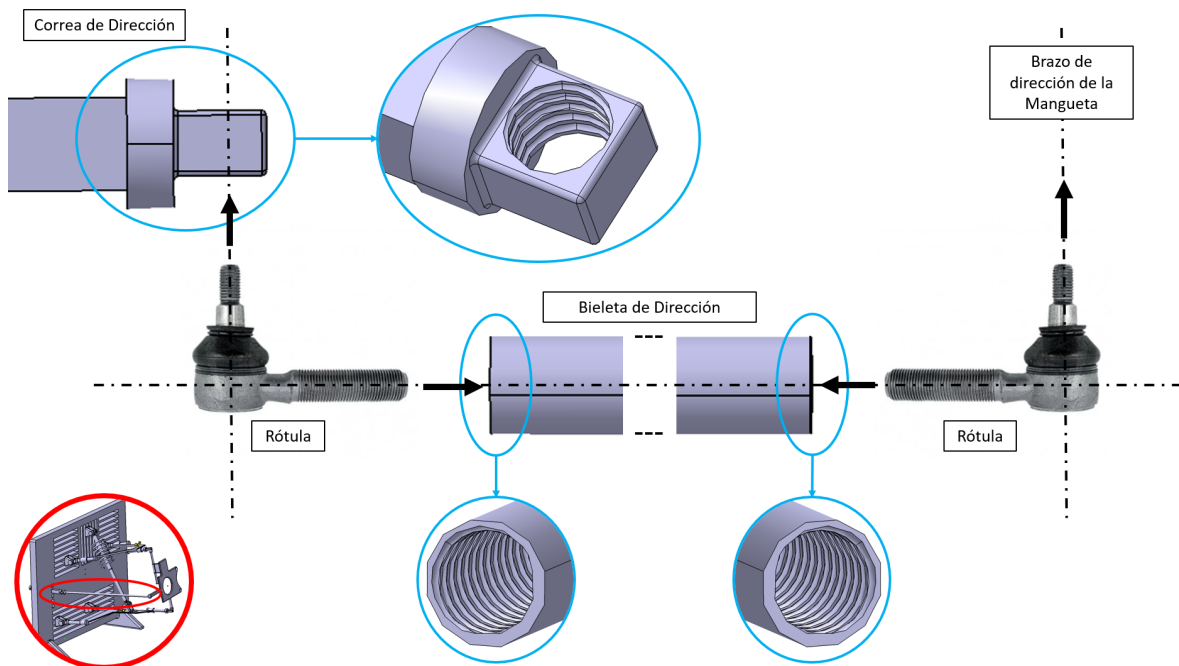


Figura 112: Esquema de los componentes del sistema de dirección.

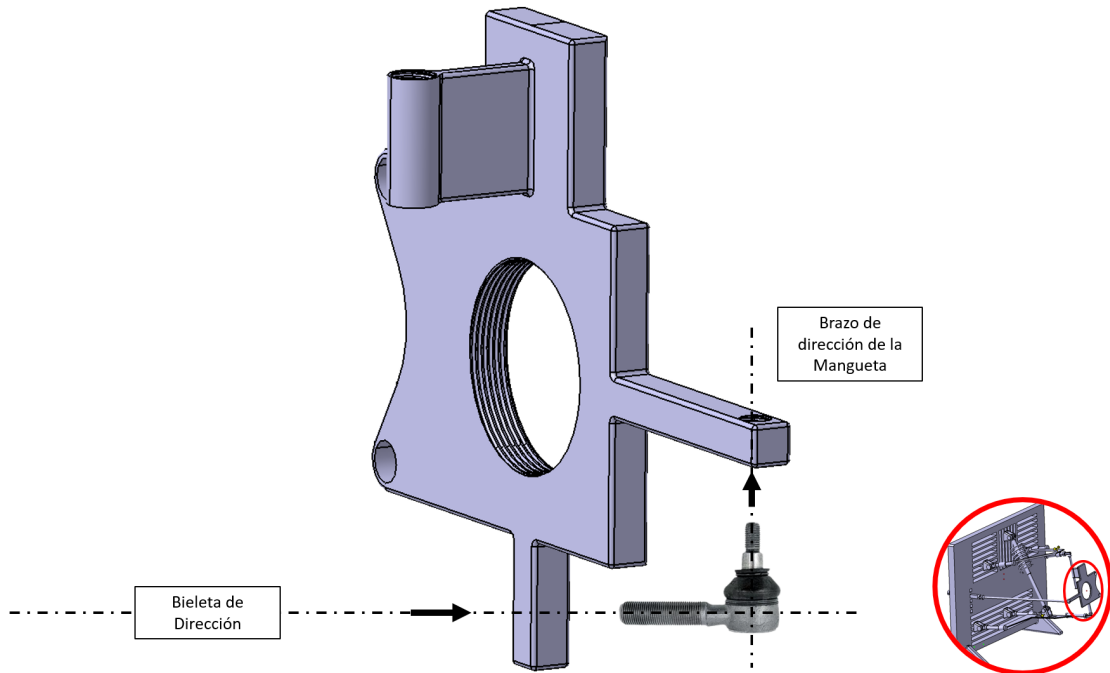


Figura 113: Esquema de los componentes del sistema de dirección.

C.3. Mecanismo Muelle-Amortiguador

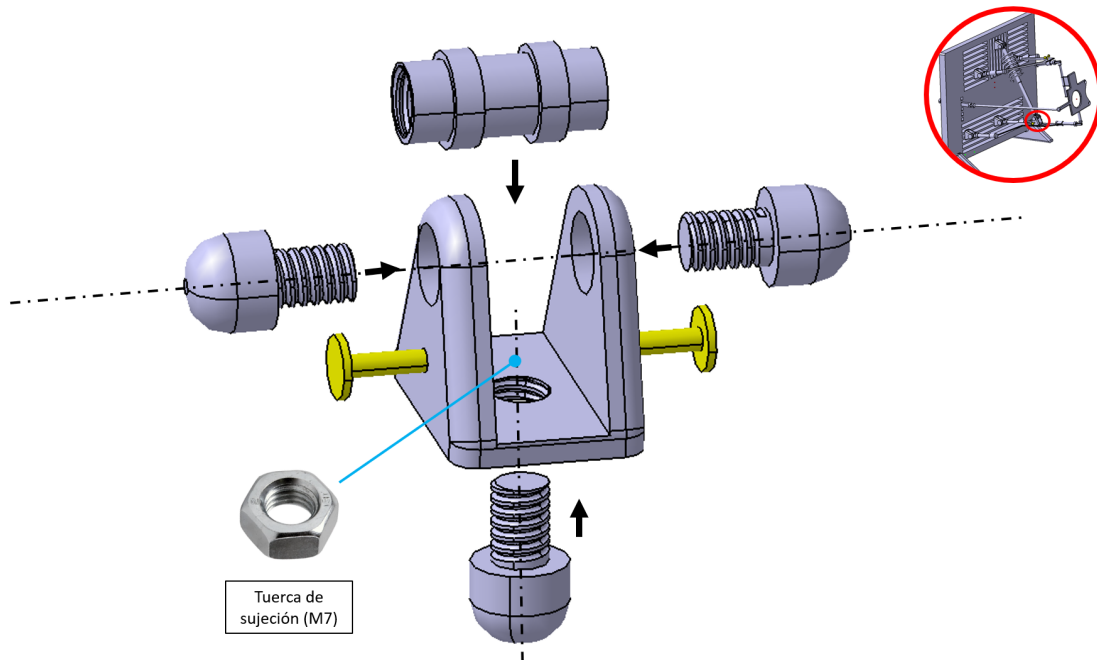


Figura 114: Esquema de los componentes del mecanismo muelle-amortiguador.

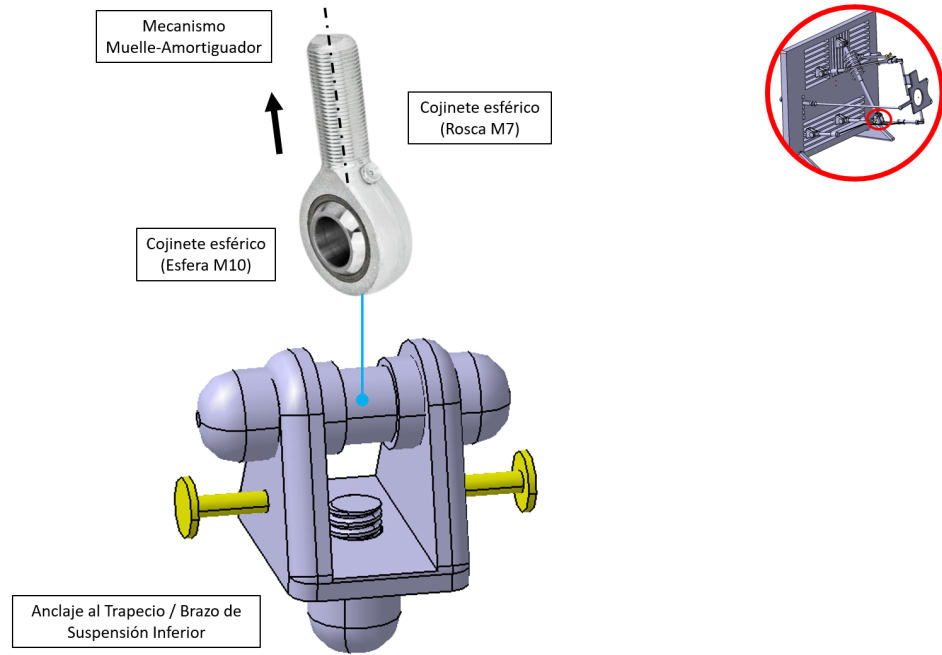


Figura 115: Esquema de los componentes del mecanismo muelle-amortiguador.

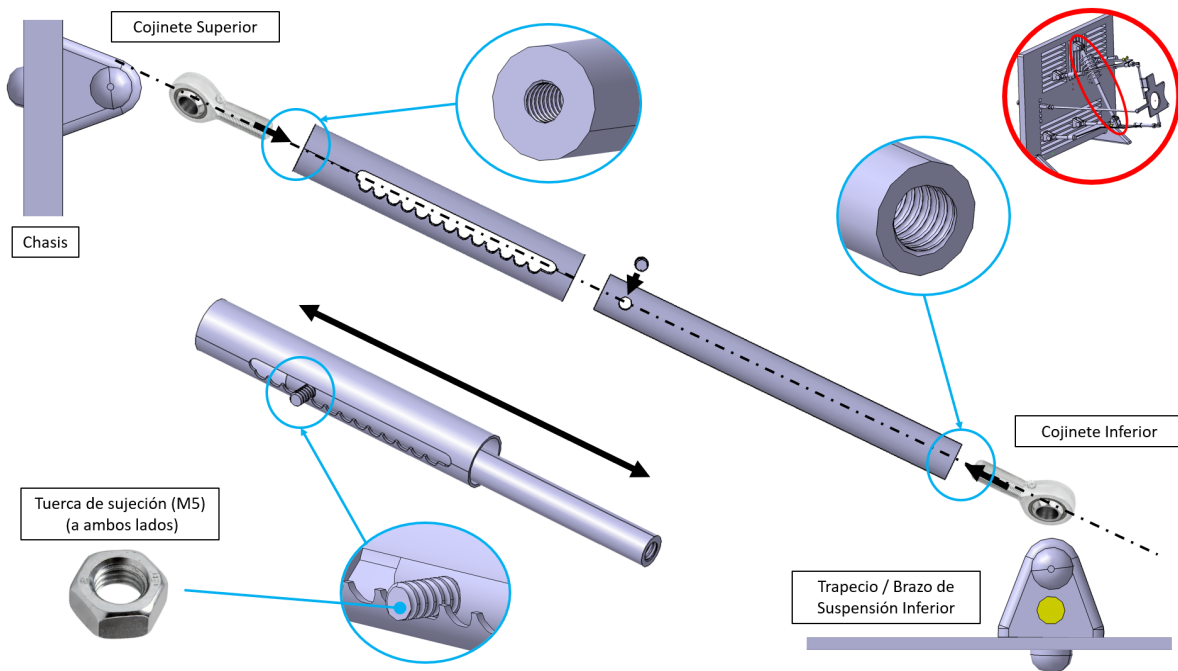


Figura 116: Esquema de los componentes del mecanismo muelle-amortiguador.

C.4. Mangueta

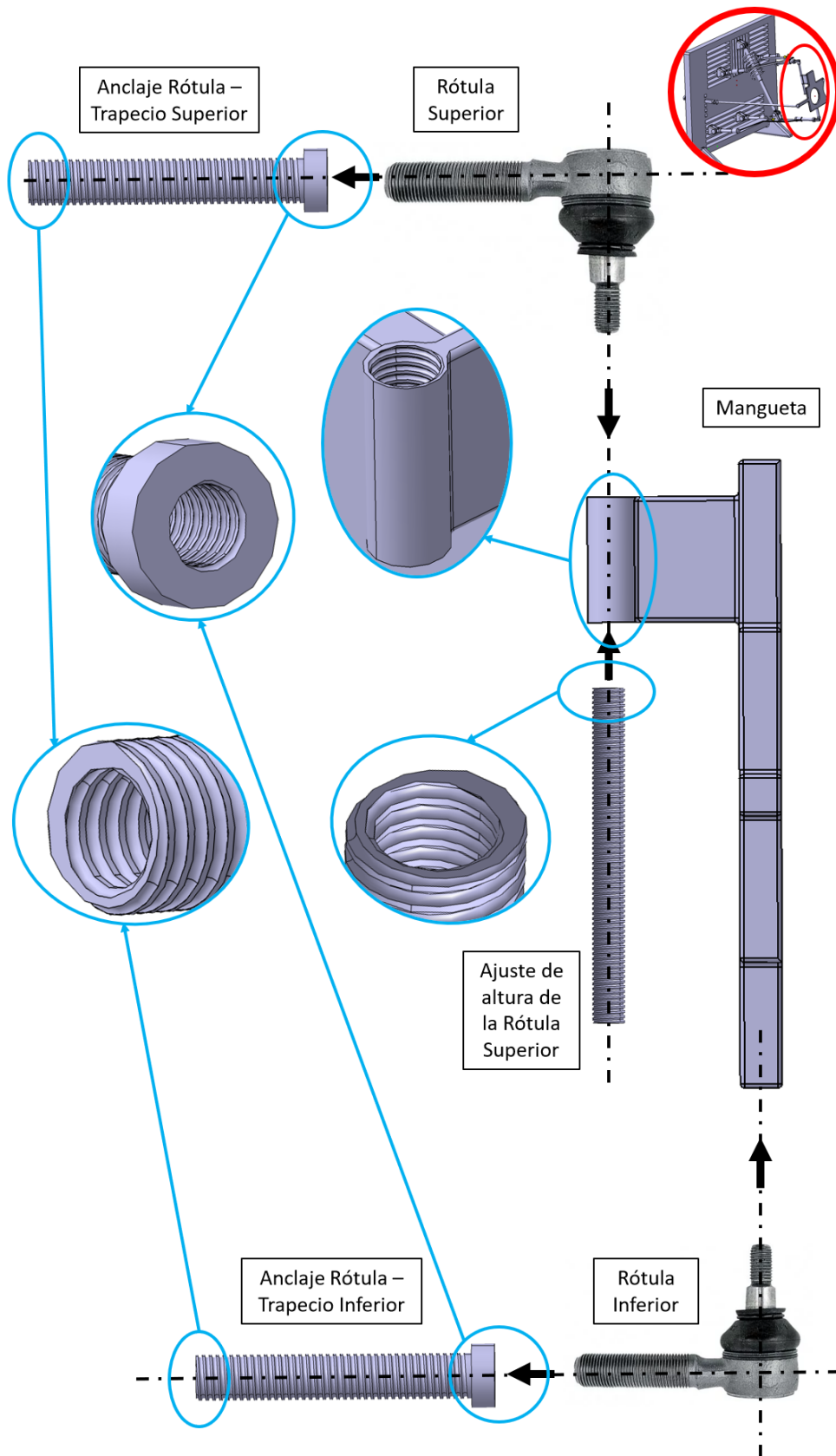


Figura 117: Esquema de los componentes de la mangueta.

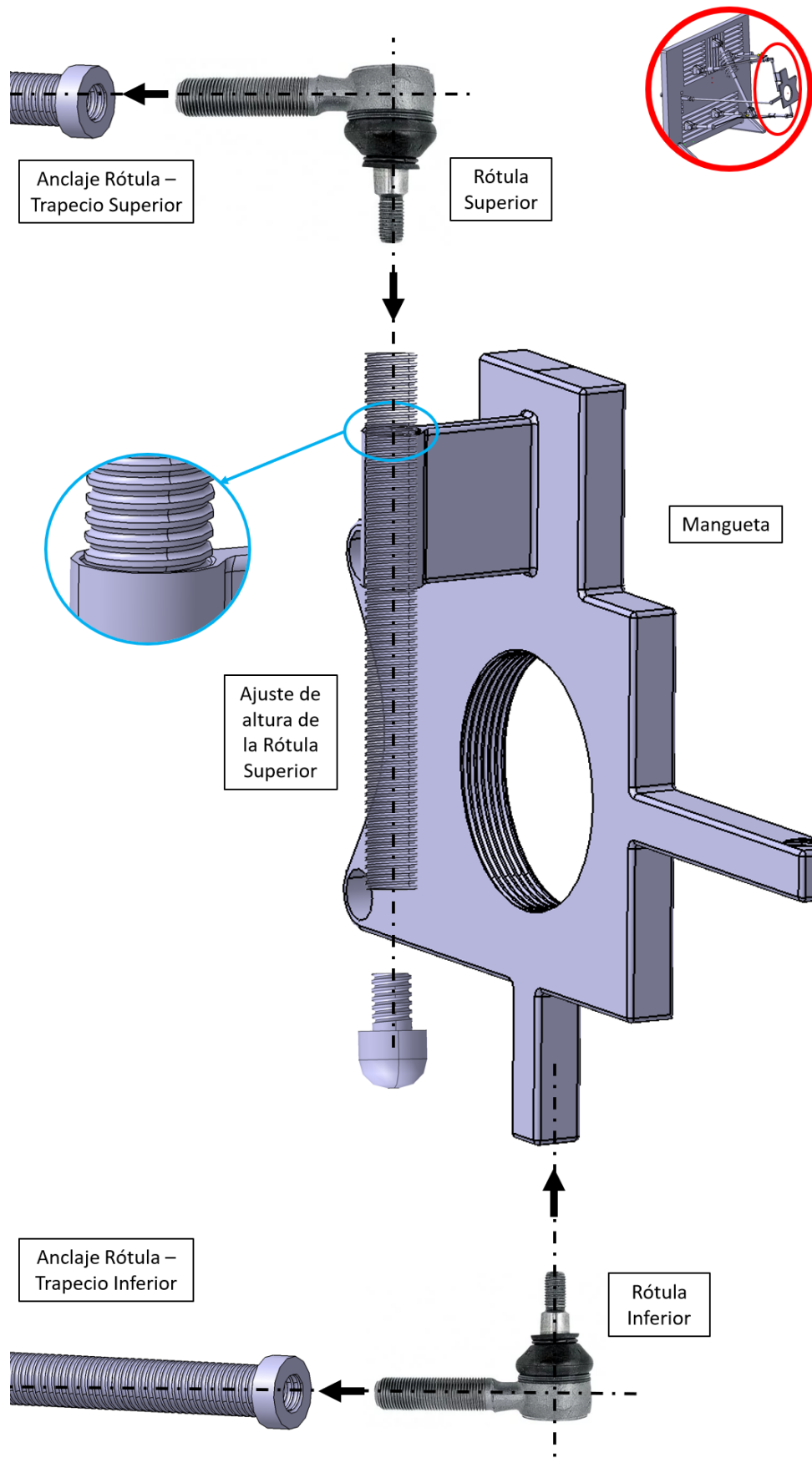


Figura 118: Esquema de los componentes de la mangueta.

C.5. Acoplamiento Rueda-Mangueta

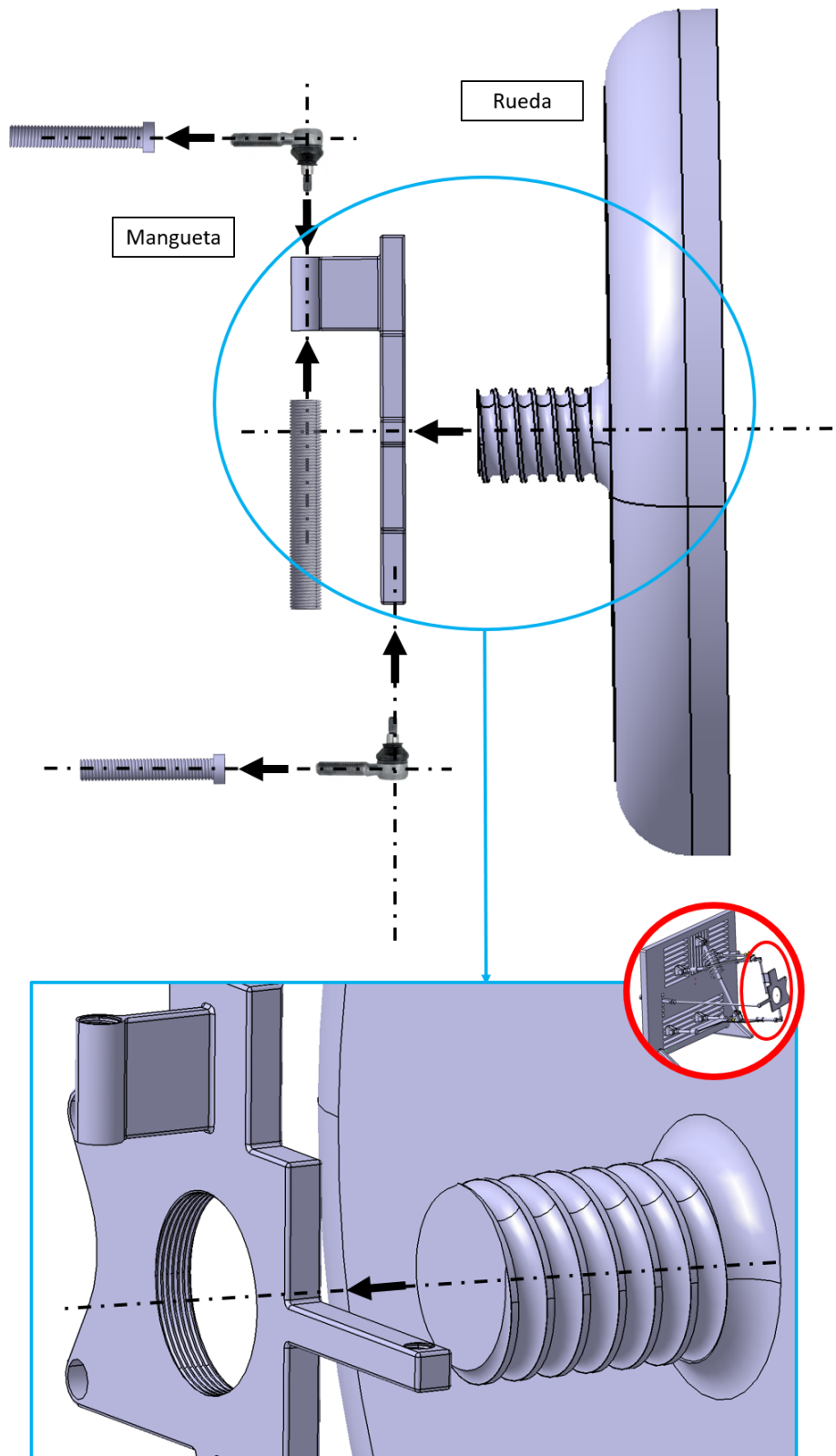
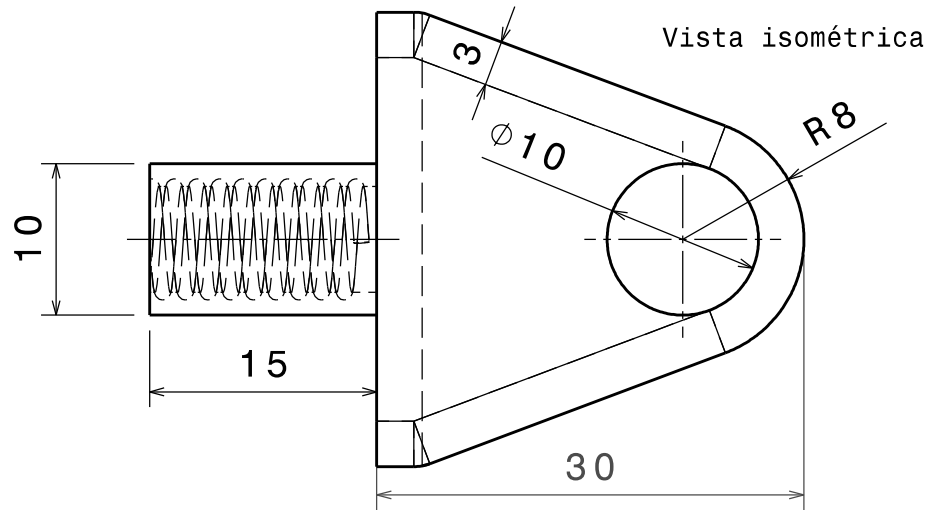
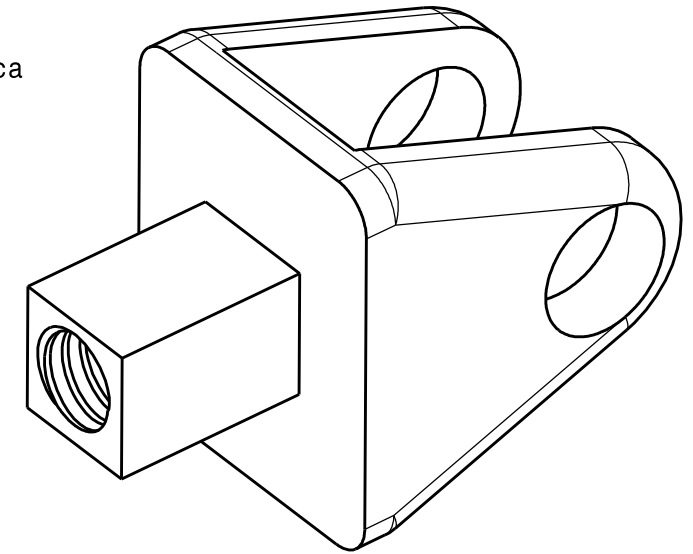


Figura 119: Esquema de los componentes del acoplamiento rueda-mangueta.

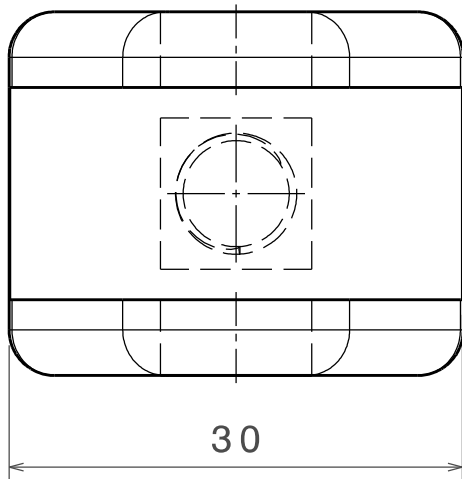
Planta



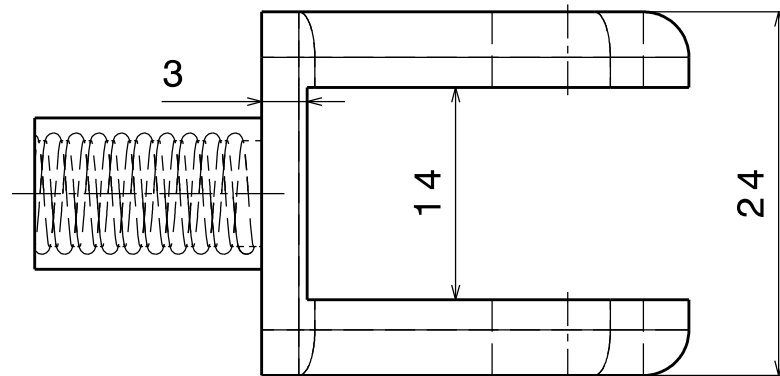
Rosca interior:
diámetro interior 7mm
diámetro exterior 8mm
paso: 1,5mm



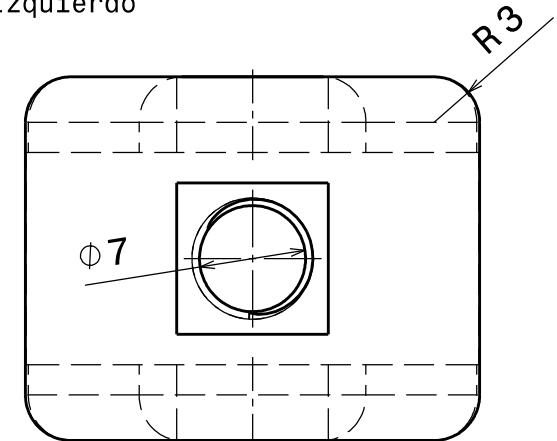
Perfil Derecho


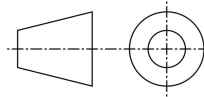


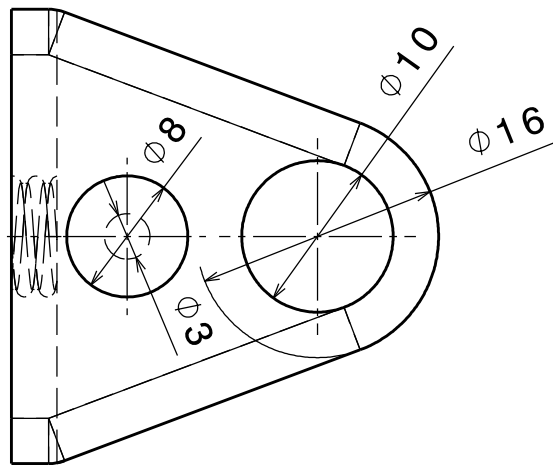
Alzado



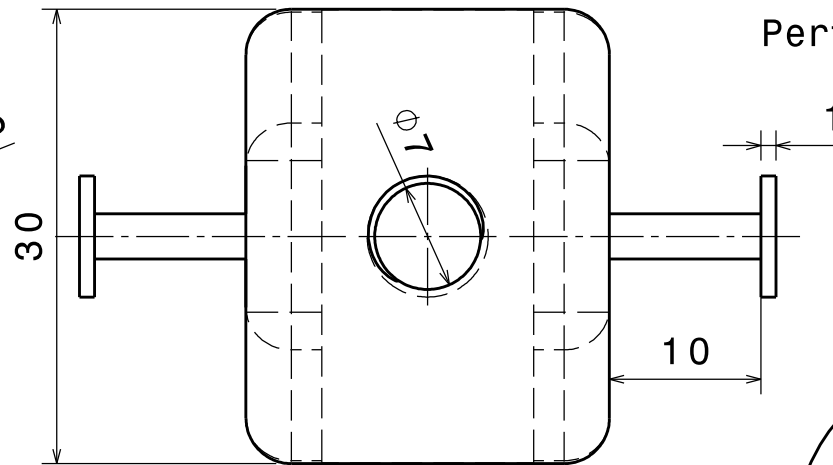
Perfil Izquierdo



Nombre Pablo Cardona Álvarez	Fecha 15/09/2023	Firma 	Proyecto de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz
Escala 2:1	Proyección 	Tamaño A4	Plano 1

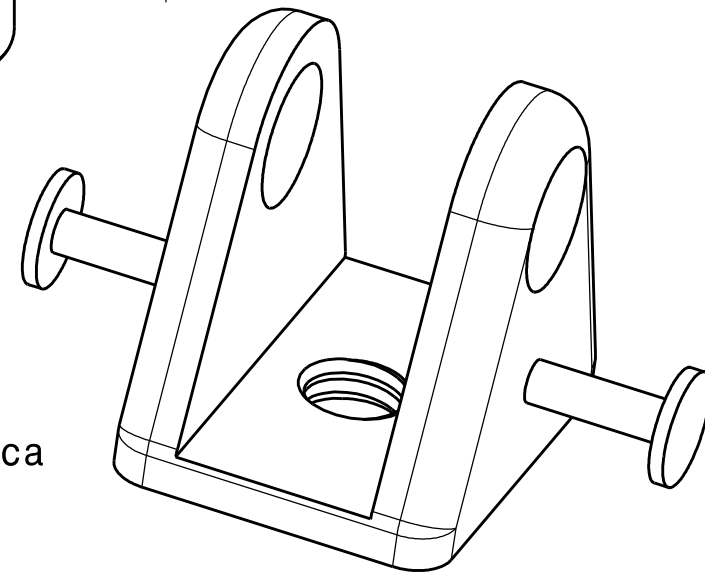


Alzado

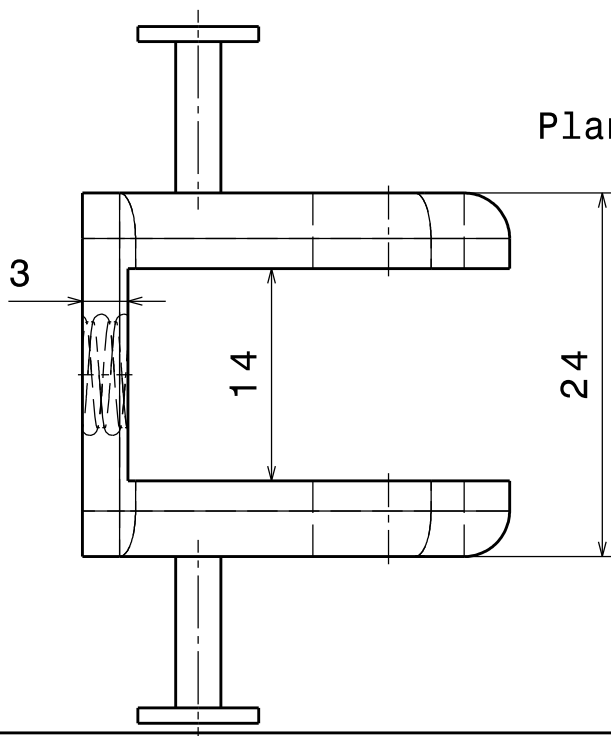


Perfil Izquierdo


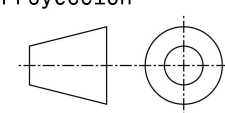
Rosca interior:
diámetro interior 7mm
diámetro exterior 8mm
paso: 1,5mm

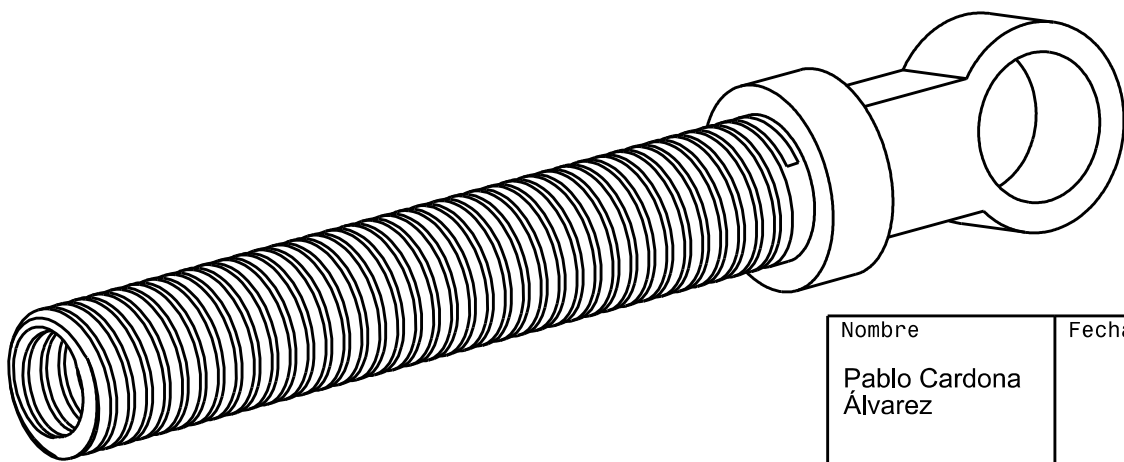
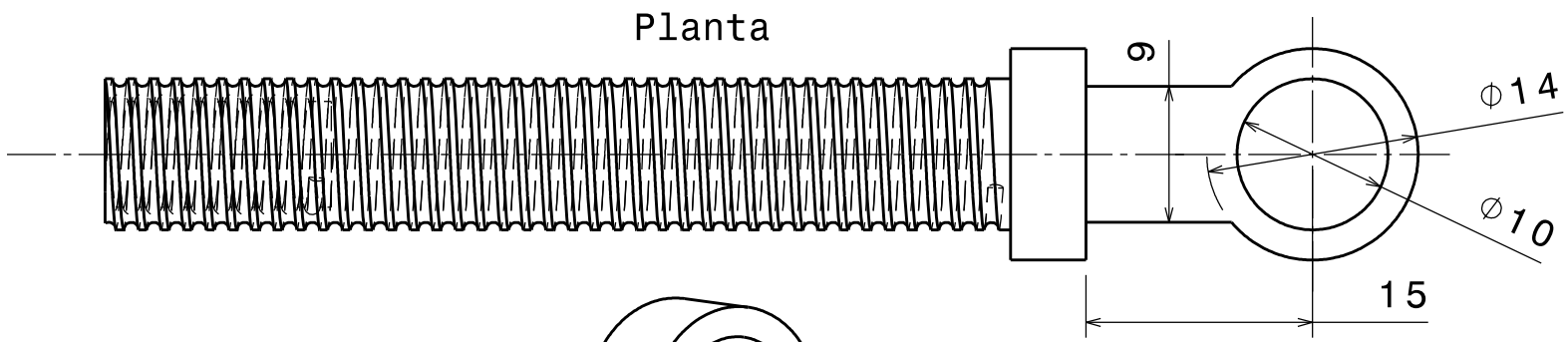
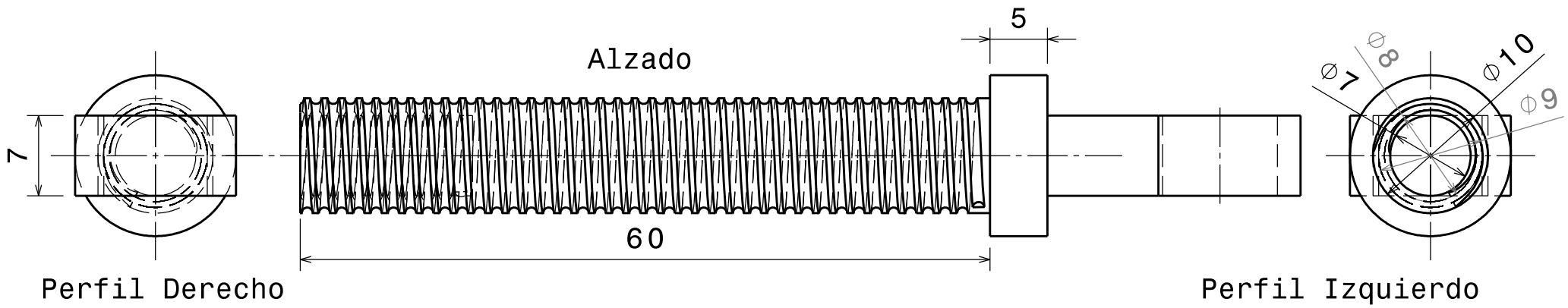


Vista Isométrica



Planta

Nombre Pablo Cardona Álvarez	Fecha 15/09/2023	Firma 	Proyecto de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz
Escala 2:1	Proyección 	Tamaño A4	Plano 2



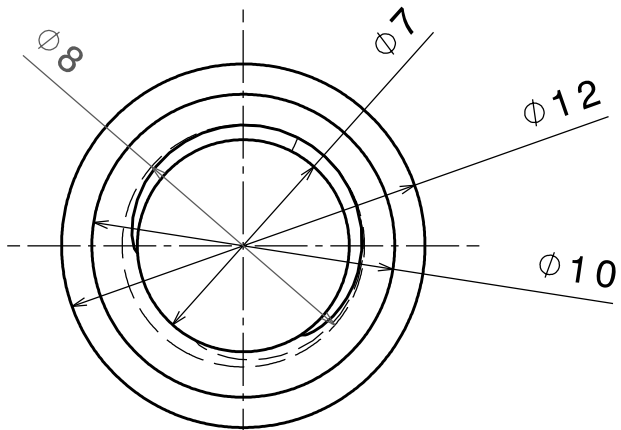
Rosca exterior:
 diámetro interior 9mm
 diámetro exterior 10mm
 paso: 1,5mm

Rosca interior:
 diámetro interior 7mm
 diámetro exterior 8mm
 paso: 1,5mm

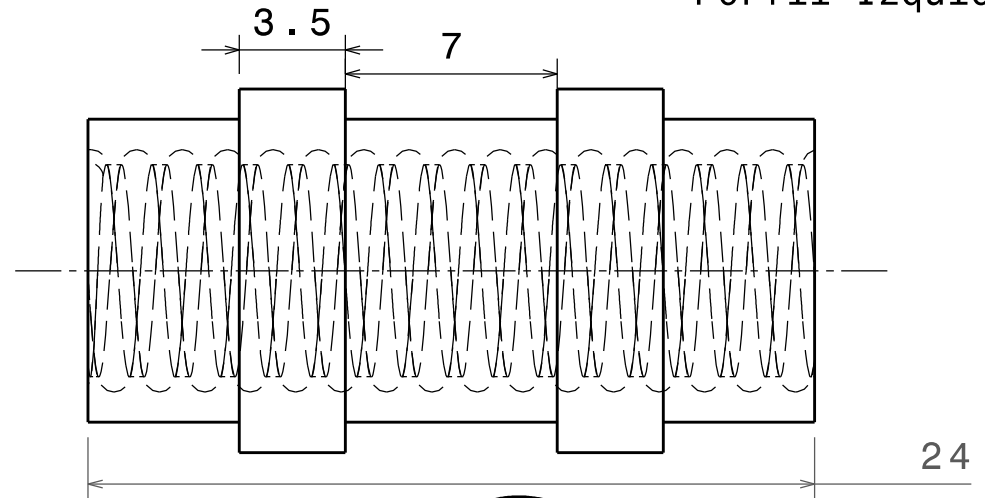
Vista Isométrica

Nombre Pablo Cardona Álvarez	Fecha 15/09/2023	Firma 	Proyecto de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz
Escala 2:1	Proyección 	Tamaño A4	Plano 3

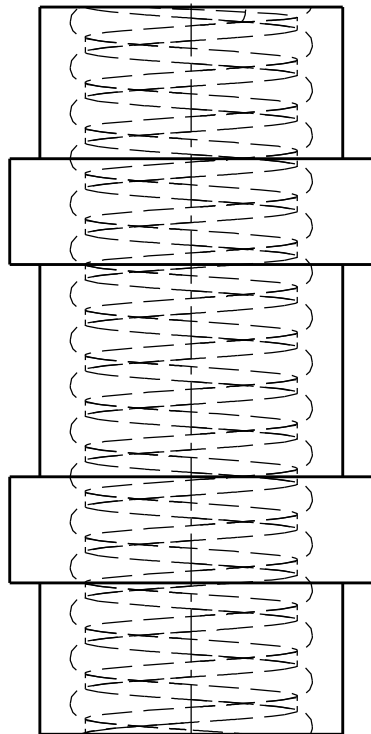
Alzado



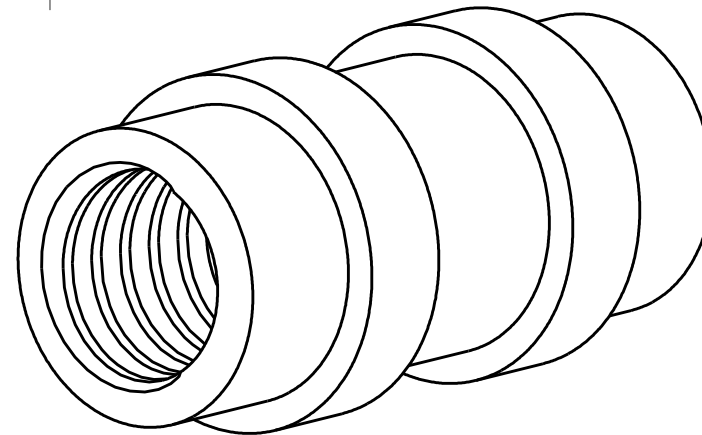
Perfil Izquierdo




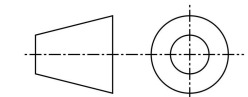
Planta

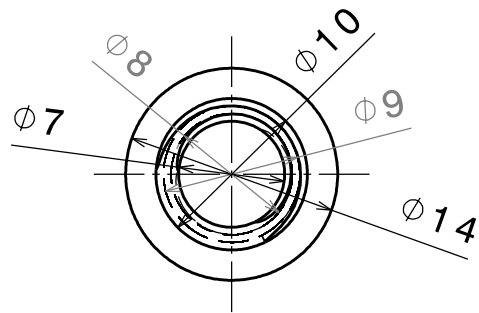


Rosca interior:
diámetro interior 7mm
diámetro exterior 8mm
paso: 1,5mm

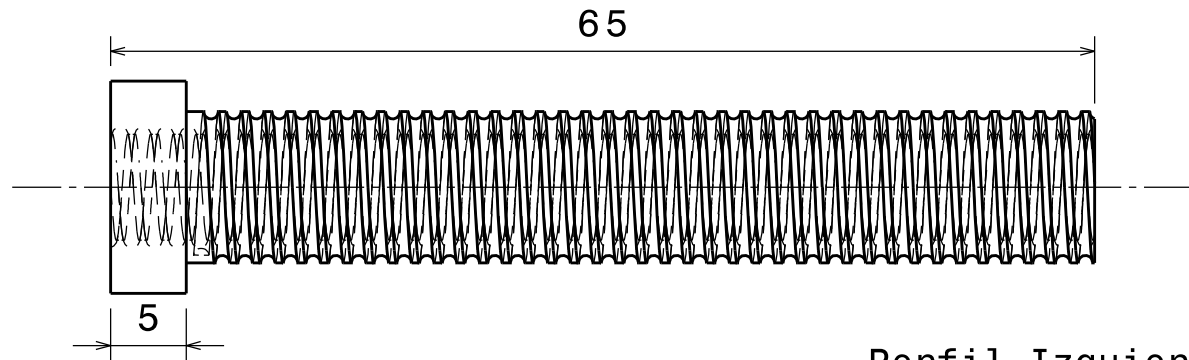


Vista Isométrica

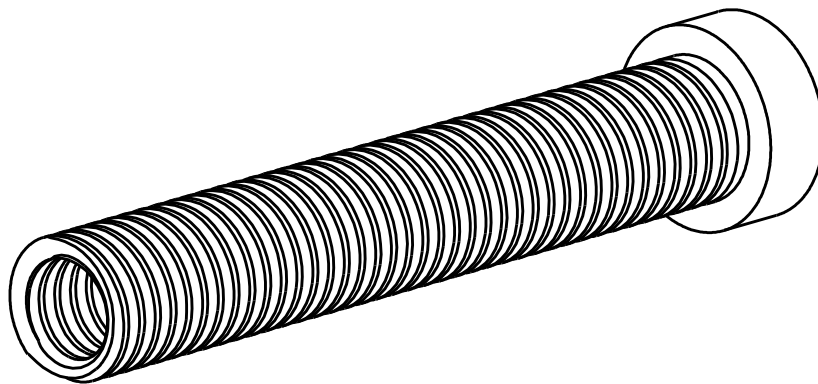
Nombre Pablo Cardona Álvarez	Fecha 15/09/2023	Firma 	Proyecto de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz
Escala 4:1	Proyección 	Tamaño A4	Plano 4



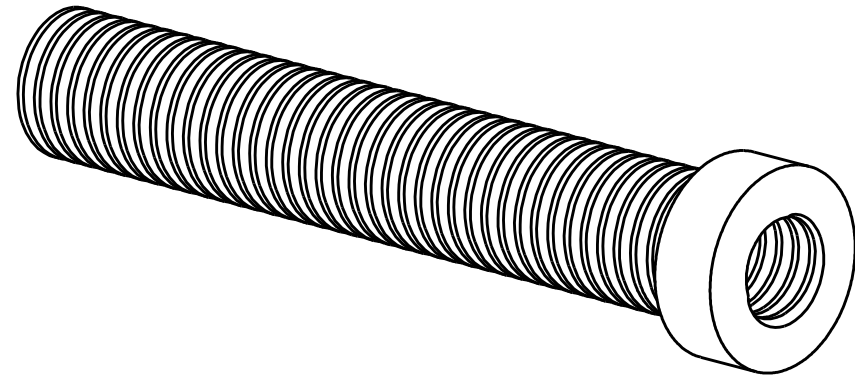
Alzado



Perfil Izquierdo




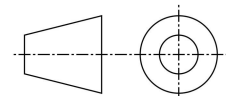
Vista Isométrica 1

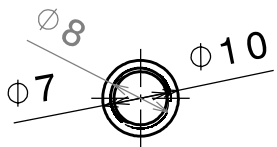


Vista Isométrica 2

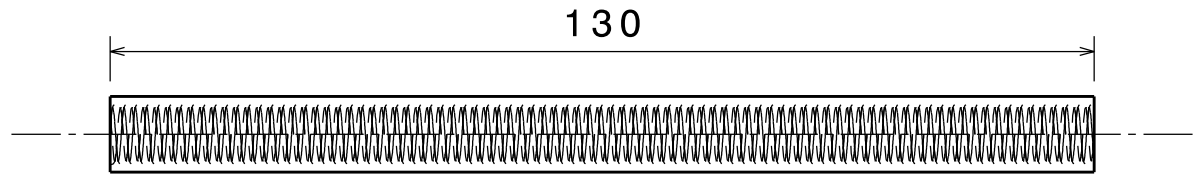
Rosca exterior:
 diámetro interior 9mm
 diámetro exterior 10mm
 paso: 1,5mm

Rosca interior:
 diámetro interior 7mm
 diámetro exterior 8mm
 paso: 1,5mm

Nombre Pablo Cardona Álvarez	Fecha 15/09/2023	Firma 	Proyecto de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz
Escala 2:1	Proyección 	Tamaño A4	Plano 5

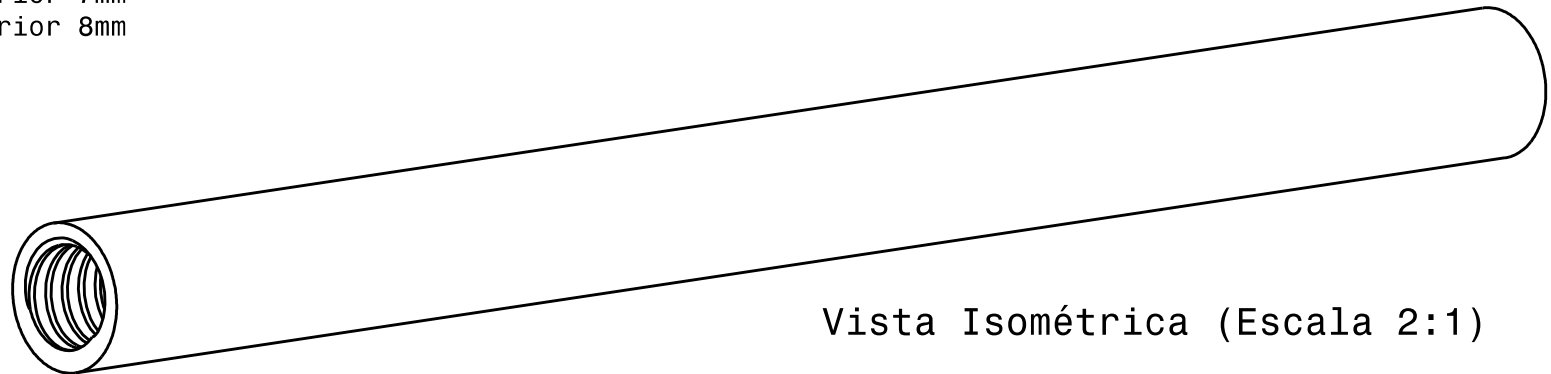


Alzado


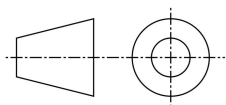


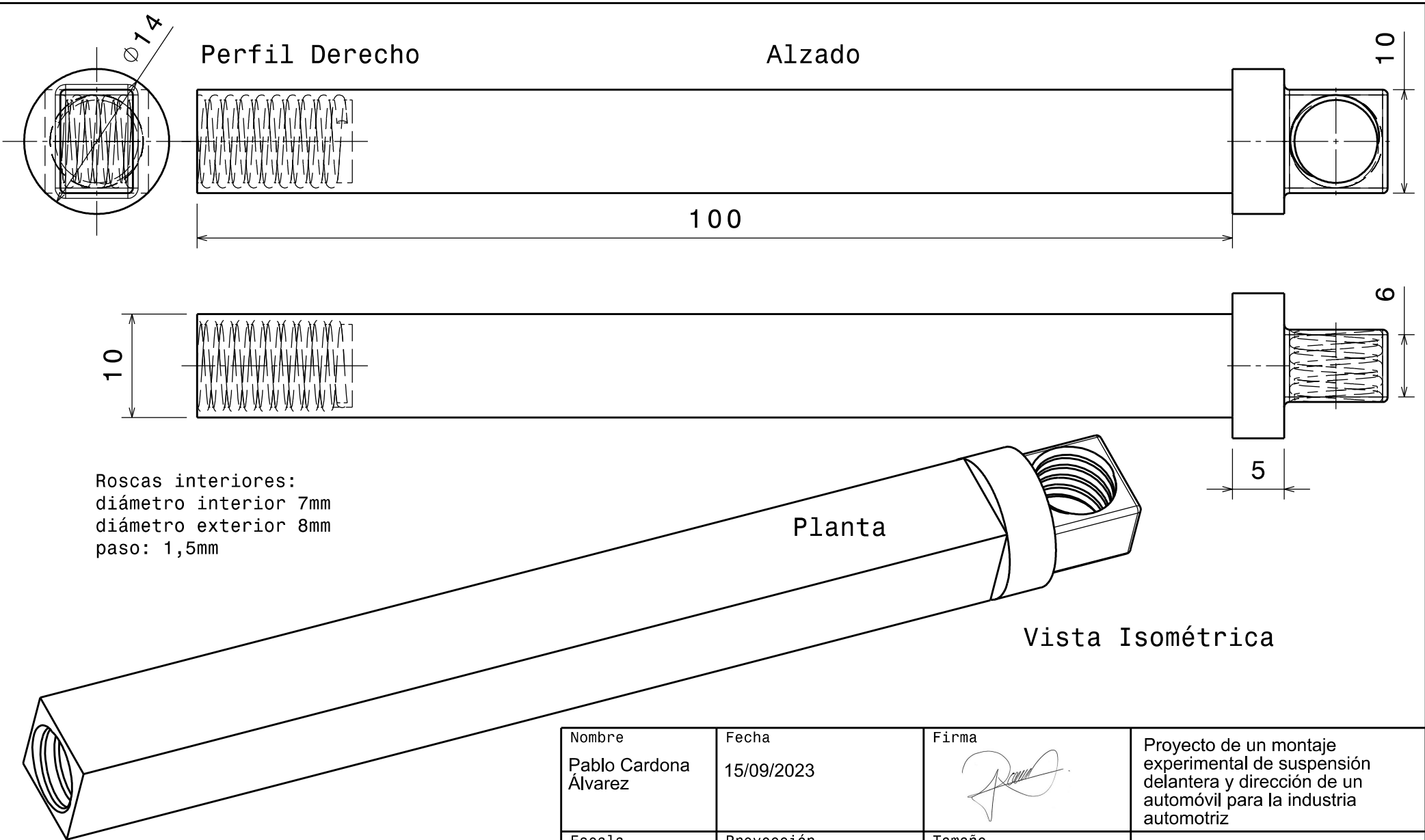
Perfil Izquierdo


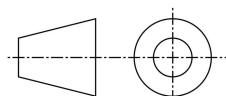
Rosca interior:
 diámetro interior 7mm
 diámetro exterior 8mm
 paso: 1,5mm

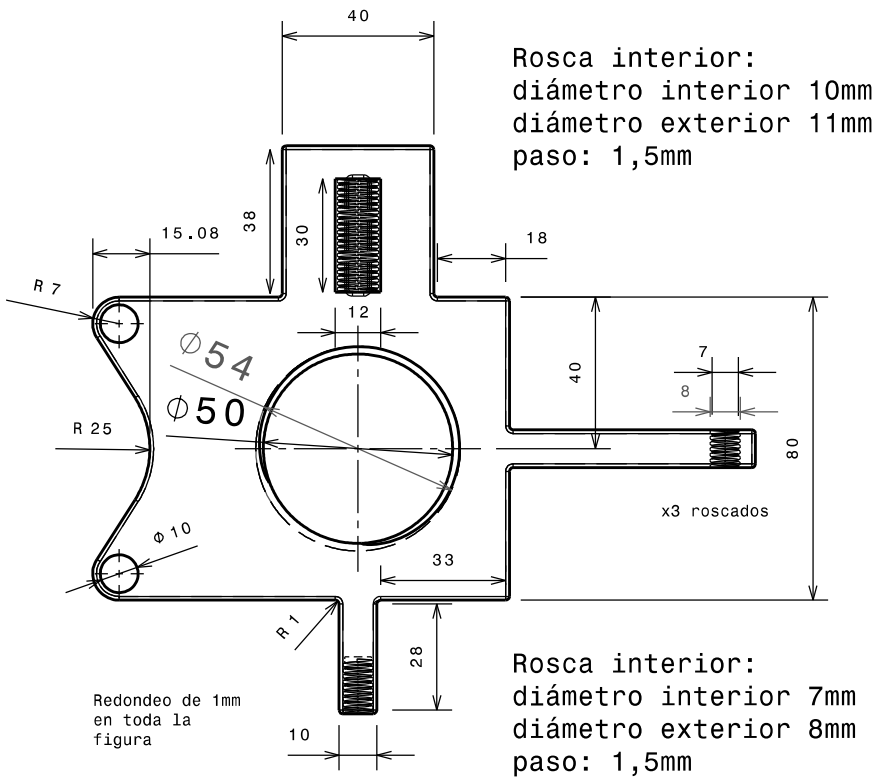


Vista Isométrica (Escala 2:1)

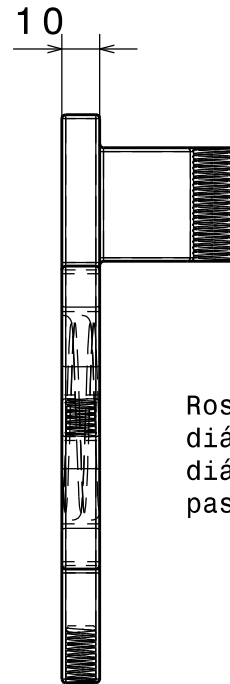
Nombre Pablo Cardona Álvarez	Fecha 15/09/2023	Firma 	Proyecto de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz
Escala 1:1	Proyección 	Tamaño A4	Plano 6



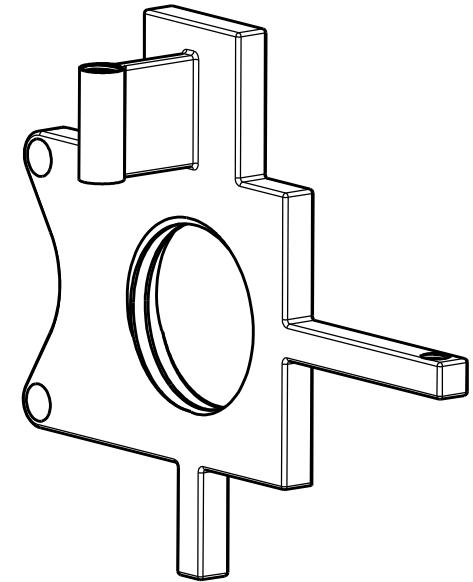
Nombre Pablo Cardona Álvarez	Fecha 15/09/2023	Firma 	Proyecto de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz
Escala 2:1	Proyección 	Tamaño A4	Plano 7



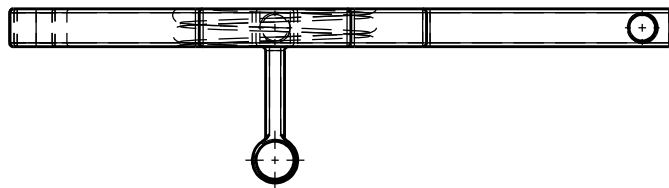
Alzado




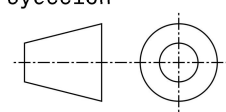
Perfil Izquierdo

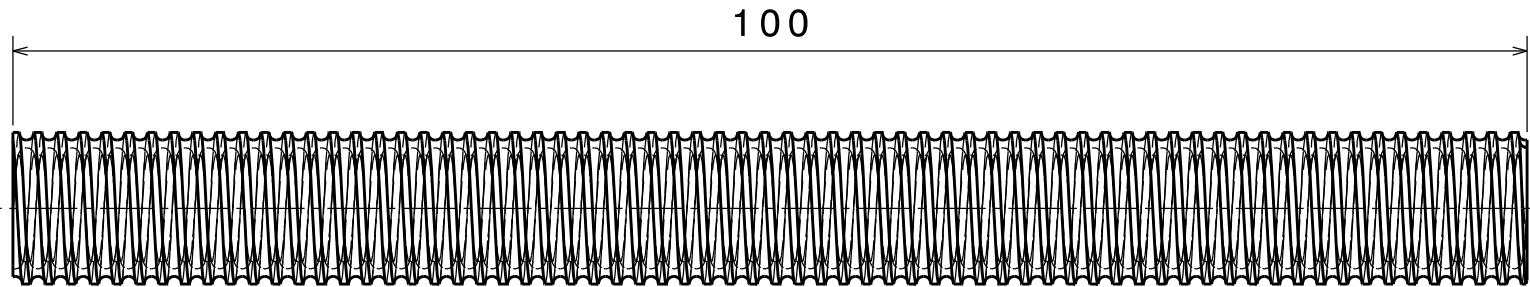
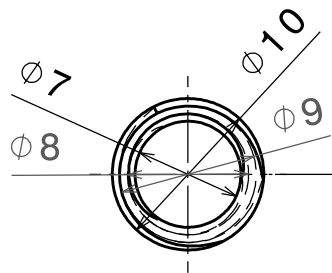


Vista Isométrica



Planta

Nombre Pablo Cardona Álvarez	Fecha 15/09/2023	Firma 	Proyecto de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz
Escala 1:2	Proyección 	Tamaño A4	Plano 8

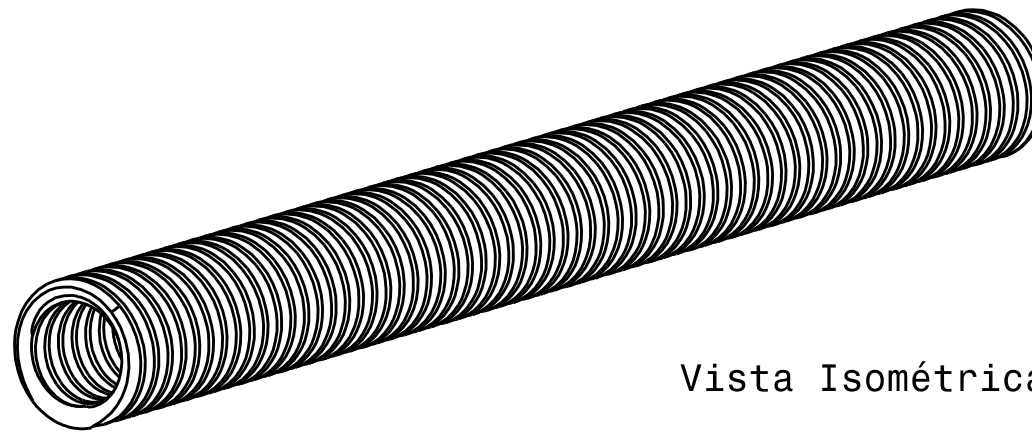


Perfil Izquierdo


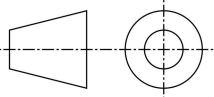
Alzado

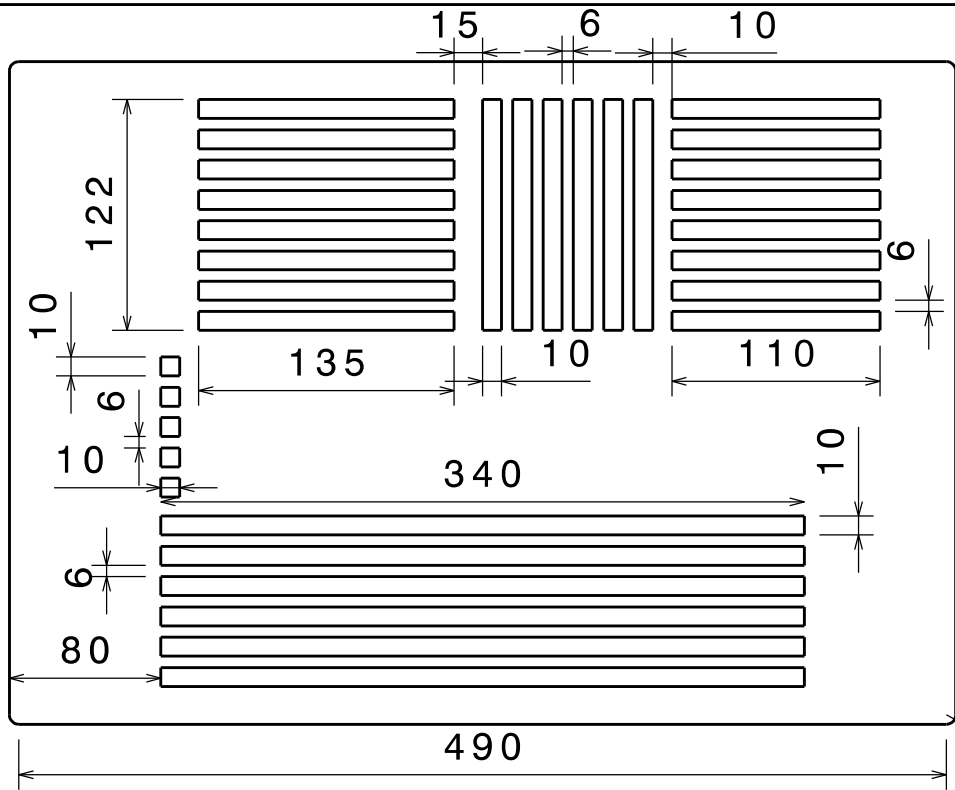
Rosca exterior:
 diámetro interior 9mm
 diámetro exterior 10mm
 paso: 1,5mm

Rosca interior:
 diámetro interior 7mm
 diámetro exterior 8mm
 paso: 1,5mm

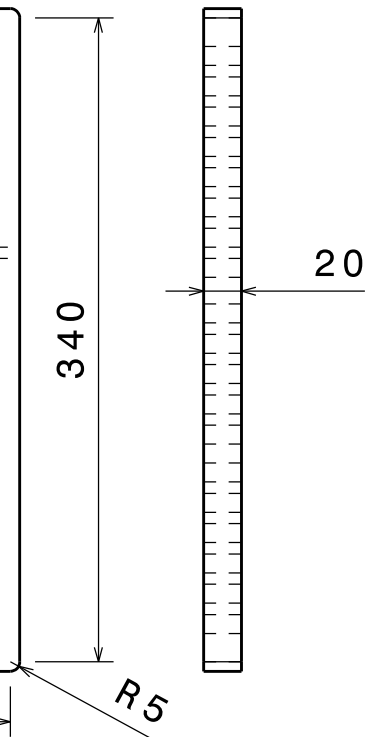


Vista Isométrica

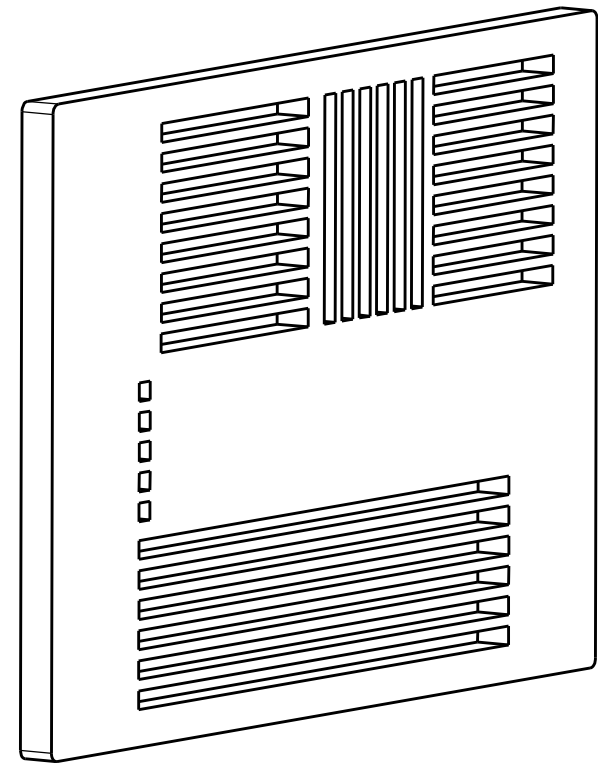
Nombre Pablo Cardona Álvarez	Fecha 15/09/2023	Firma 	Proyecto de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz
Escala 2:1	Proyección 	Tamaño A4	Plano 9



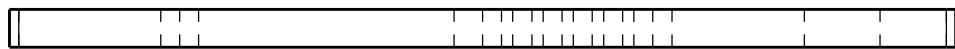
Alzado




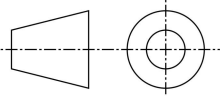
Perfil Izquierdo

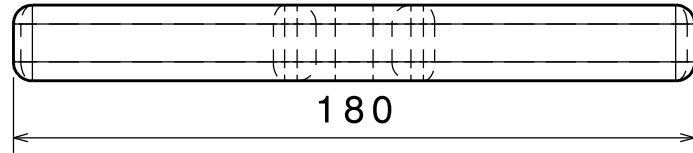


Visra Isométrica

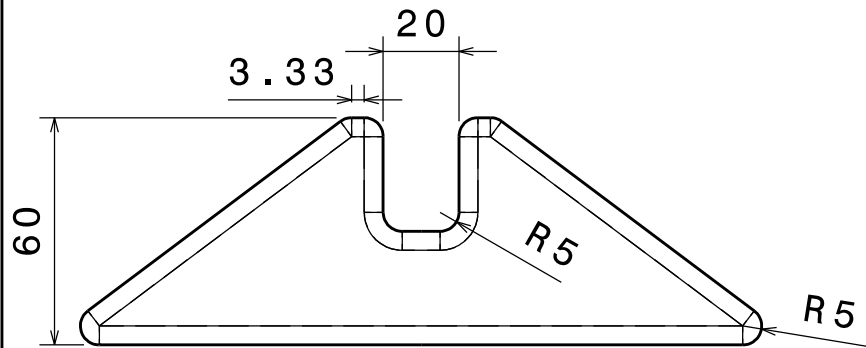


Planta

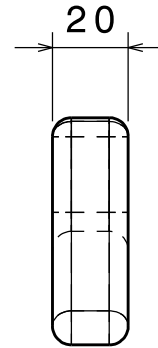
Nombre Pablo Cardona Álvarez	Fecha 15/09/2023	Firma 	Proyecto de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz
Escala 1:4	Proyección 	Tamaño A4	Plano 10



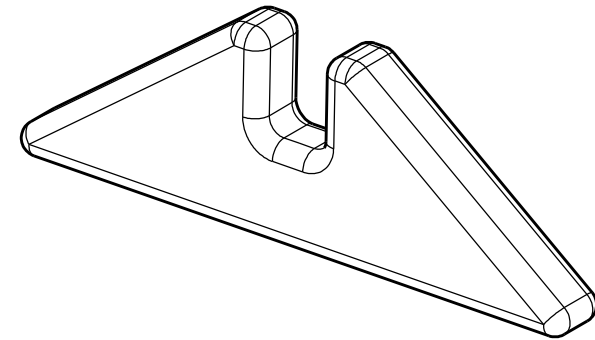
Planta Inferior



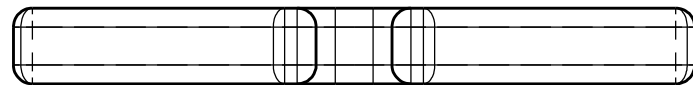
Alzado




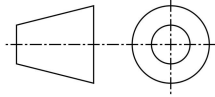
Perfil Izquierdo

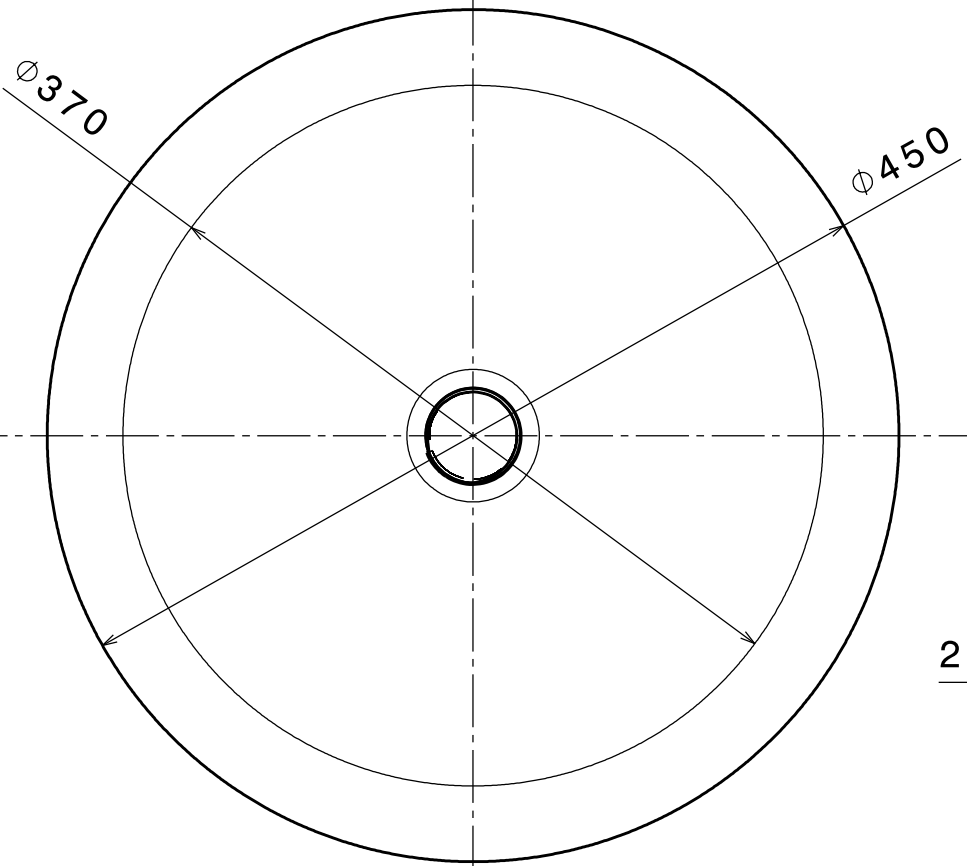


Vista Isométrica

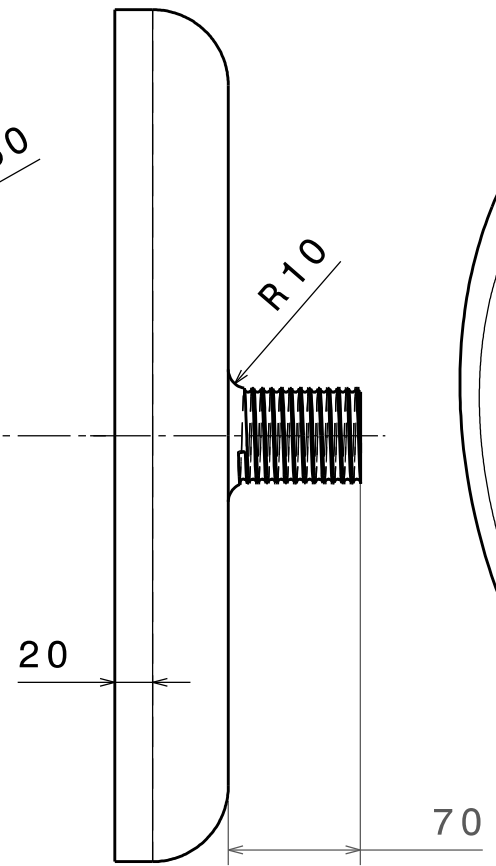


Planta Superior

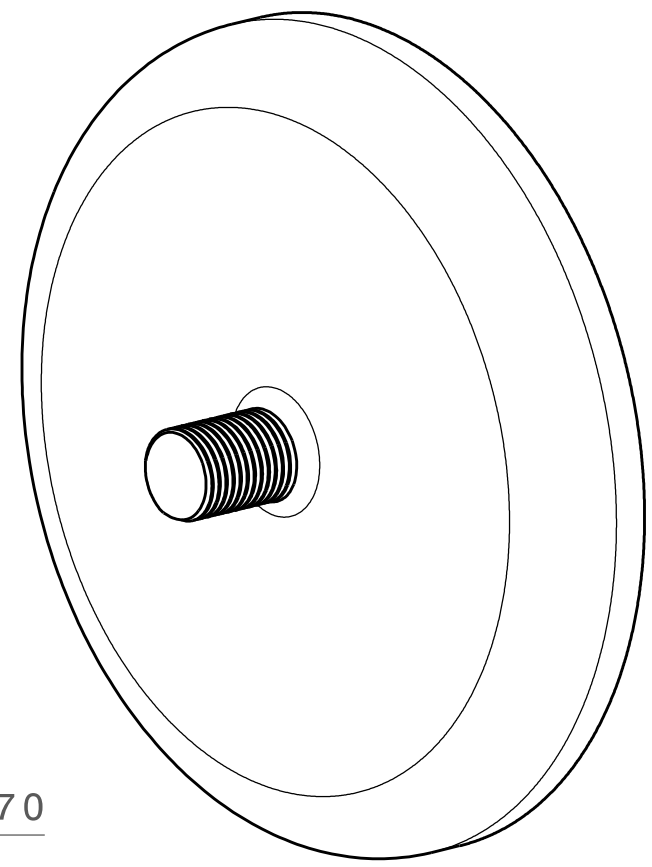
Nombre Pablo Cardona Álvarez	Fecha 15/09/2023	Firma 	Proyecto de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz
Escala 1:2	Proyección 	Tamaño A4	Plano 11



Alzado


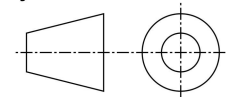


Perfil Izquierdo

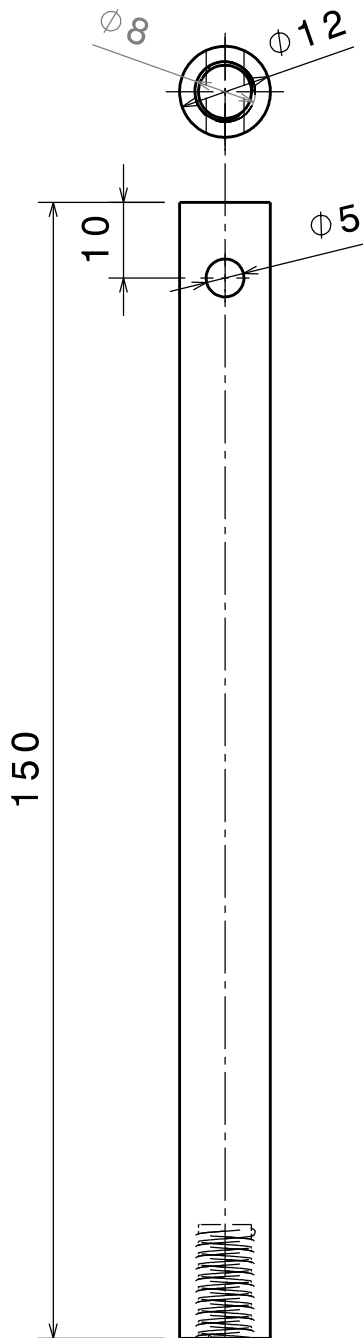


Vista Isométrica

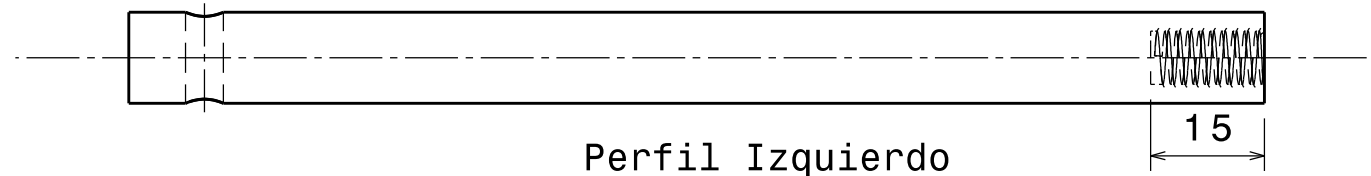
Rosca interior:
 diámetro interior 50mm
 diámetro exterior 54mm
 paso: 5mm

Nombre Pablo Cardona Álvarez	Fecha 15/09/2023	Firma 	Proyecto de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz
Escala 1:4	Proyección 	Tamaño A4	Plano 12

Alzado

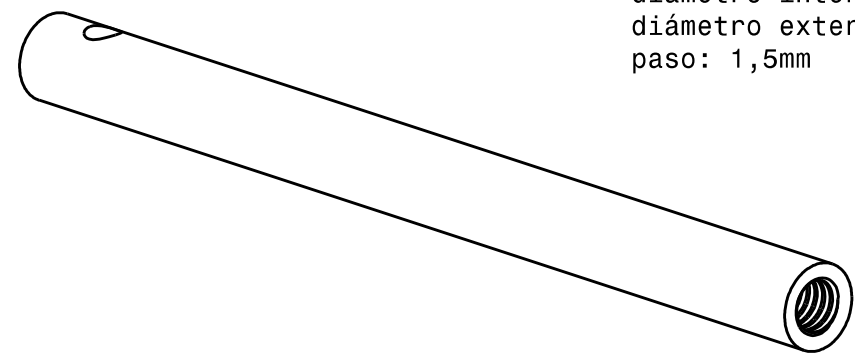


Planta



Perfil Izquierdo

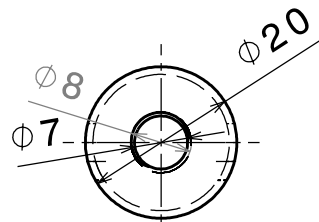
Rosca interior:
diámetro interior 7mm
diámetro exterior 8mm
paso: 1,5mm



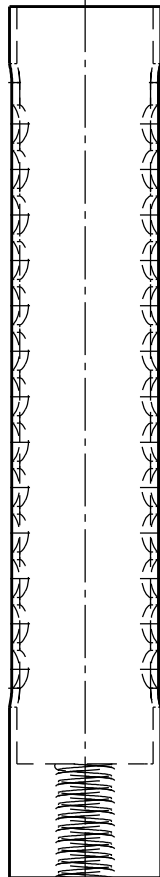
Vista Isométrica

Nombre Pablo Cardona Álvarez	Fecha 15/09/2023	Firma 	Proyecto de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz
Escala 1:1	Proyección 	Tamaño A4	Plano 13

Alzado



Planta



Rosca interior:
diámetro interior 7mm
diámetro exterior 8mm
paso: 1,5mm

115

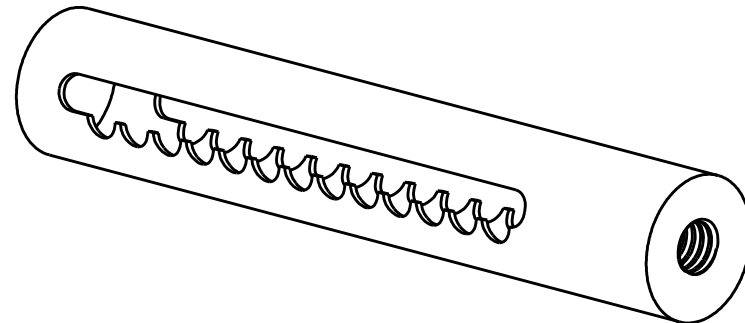
100

80

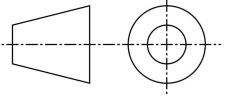
R2.5

R2.5

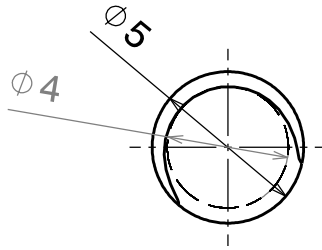
Perfil Izquierdo



Vista Isométrica

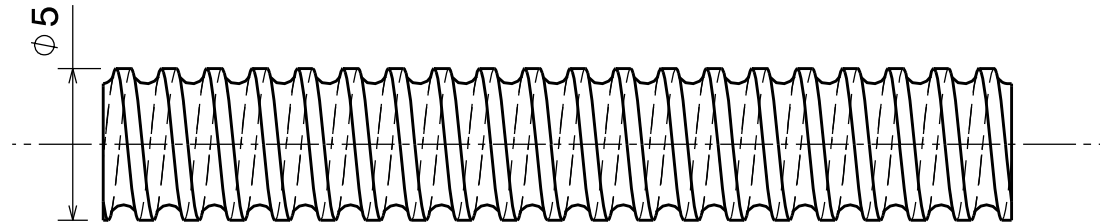
Nombre Pablo Cardona Álvarez	Fecha 15/09/2023	Firma 	Proyecto de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz
Escala 1:1	Proyección 	Tamaño A4	Plano 14

Alzado

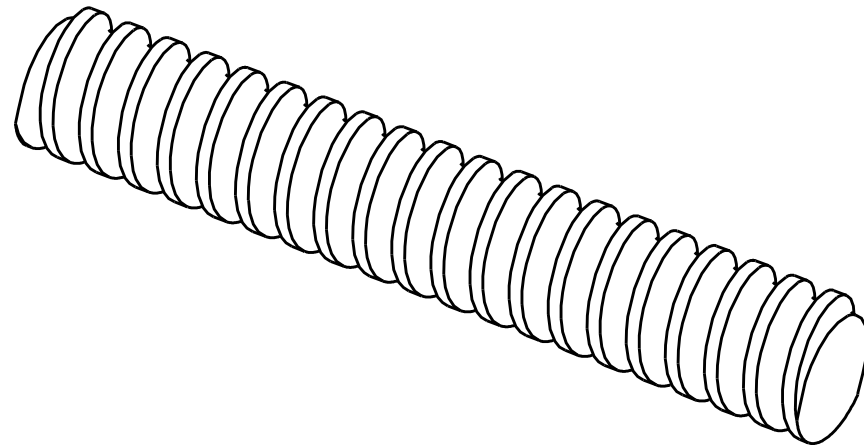



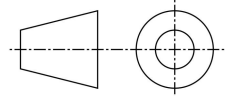
Rosca exterior:
diámetro interior 4mm
diámetro exterior 5mm
paso: 1,5mm

Perfil Izquierdo

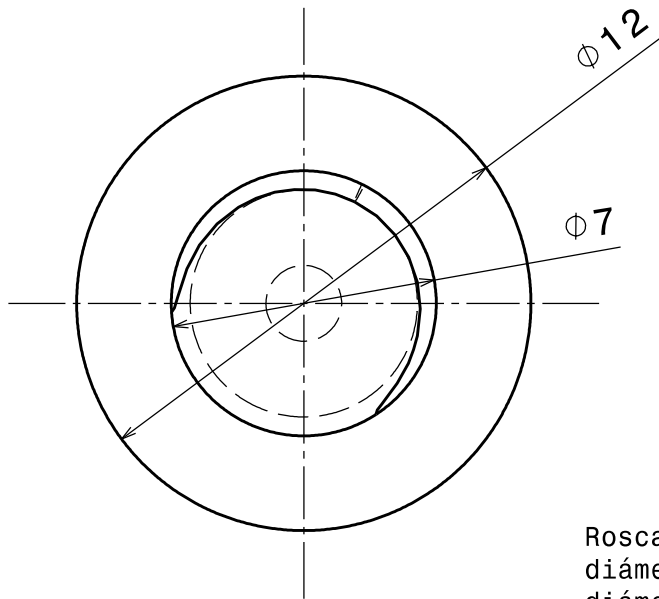


Vista Isométrica

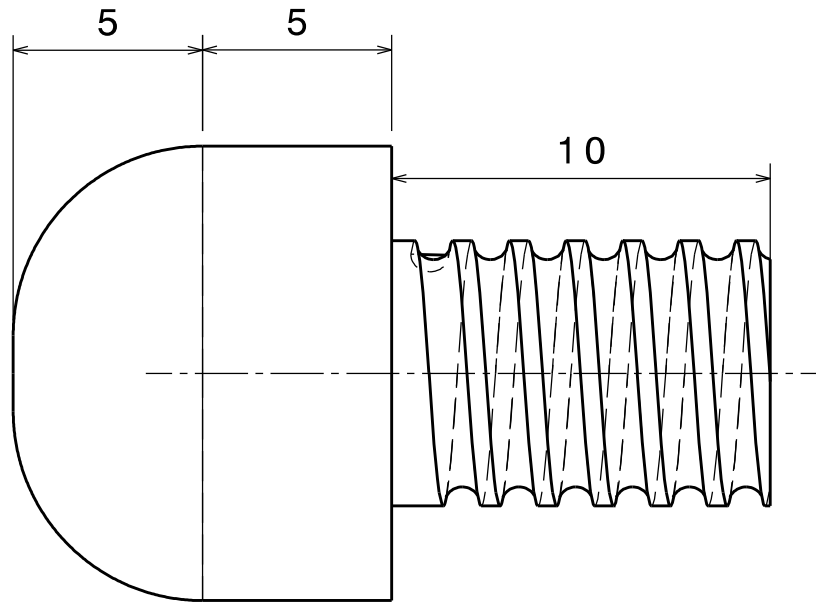


Nombre Pablo Cardona Álvarez	Fecha 15/09/2023	Firma 	Proyecto de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz
Escala 4:1	Proyección 	Tamaño A4	Plano 15

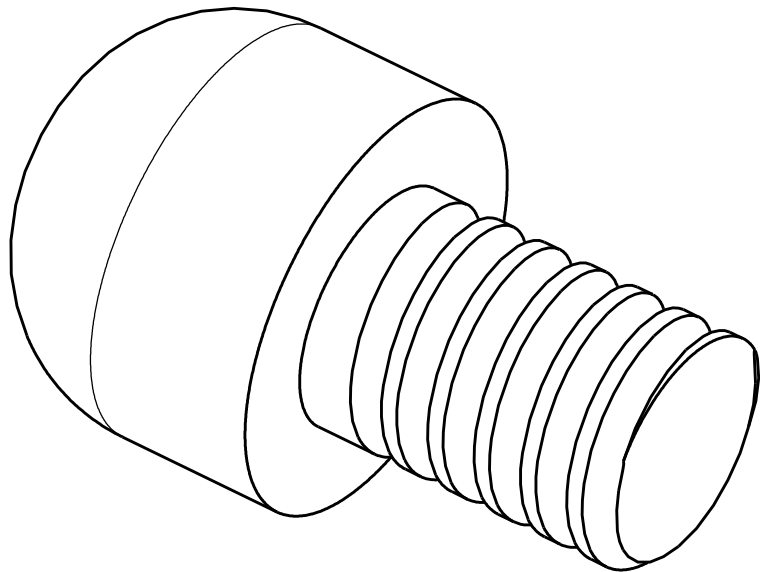
Alzado




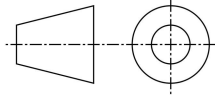
Rosca interior:
diámetro interior 7mm
diámetro exterior 8mm
paso: 1,5mm



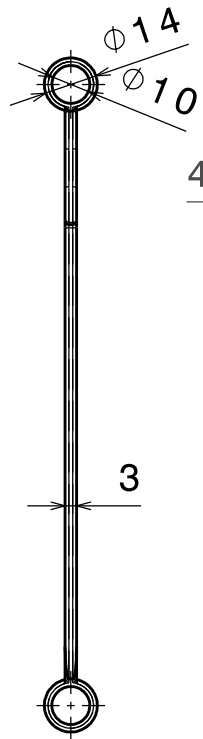
Perfil Izquierdo



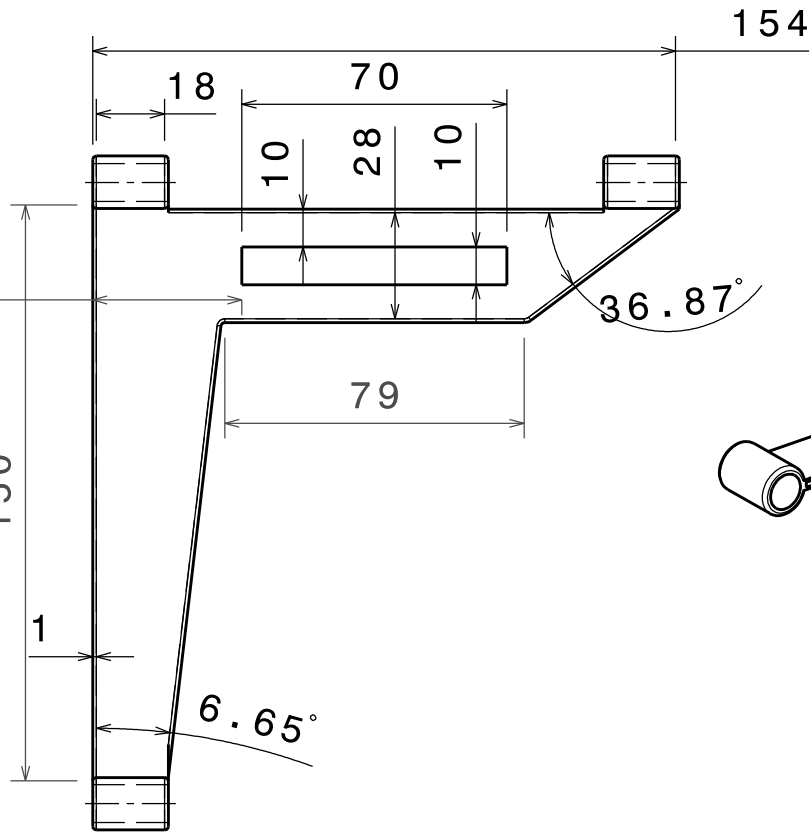
Vista Isométrica

Nombre Pablo Cardona Álvarez	Fecha 15/09/2023	Firma 	Proyecto de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz
Escala 5:1	Proyección 	Tamaño A4	Plano 16

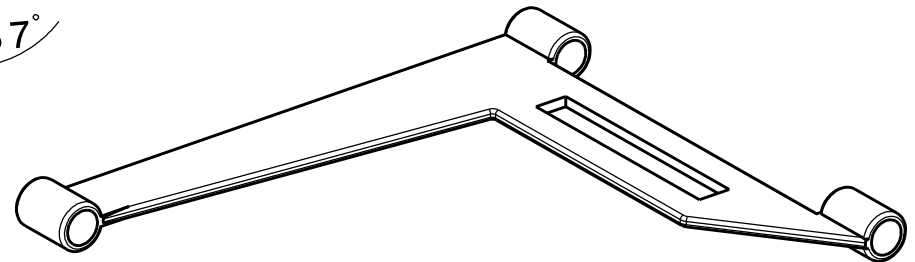
Planta Inferior



Perfil Derecho



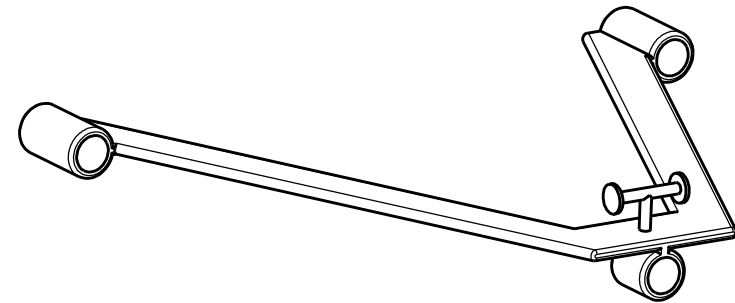
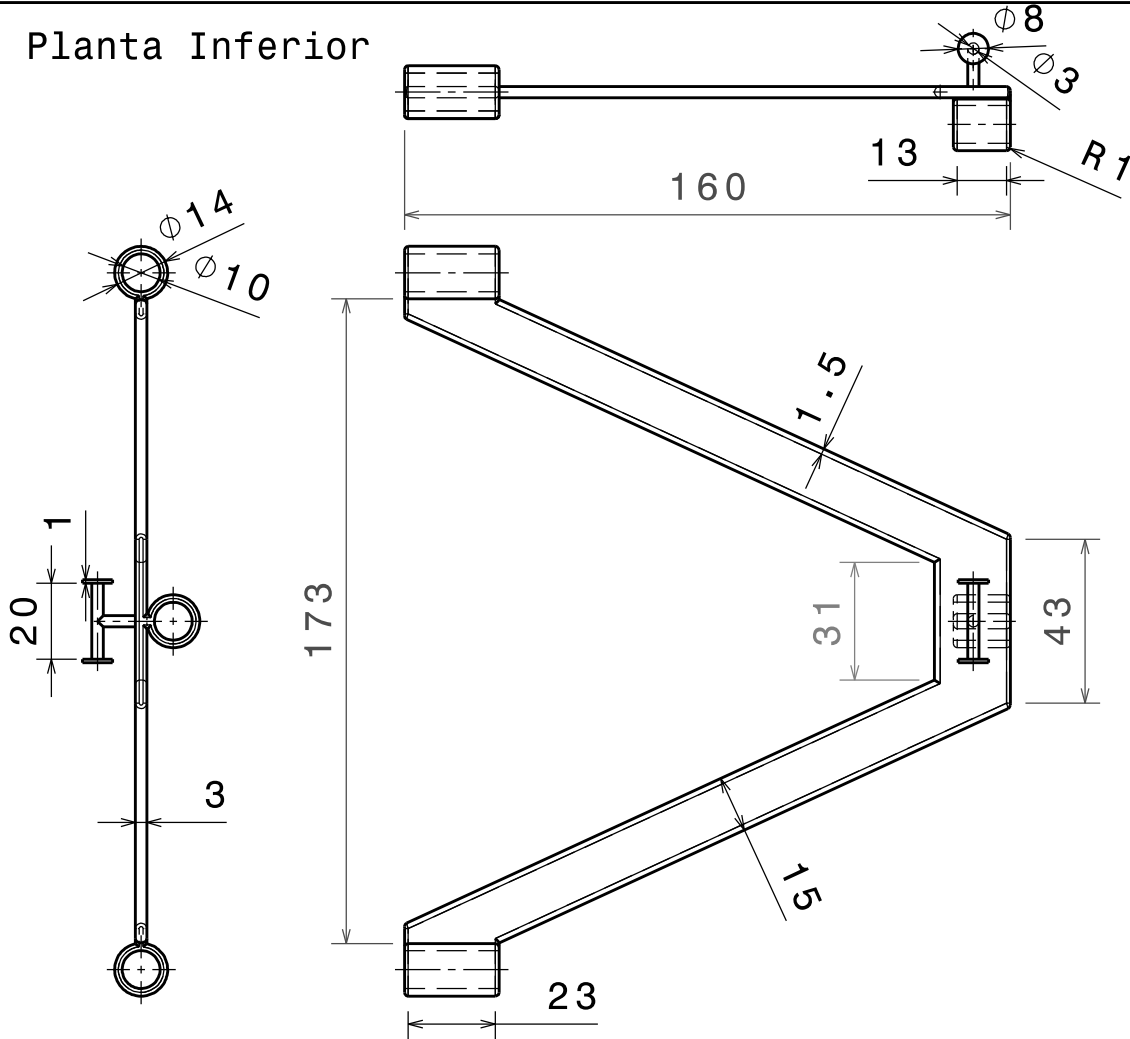
Alzado



Vista Isométrica

<p>Nombre Pablo Cardona Álvarez</p>	<p>Fecha 15/09/2023</p>	<p>Firma </p>	<p>Proyecto de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz</p>
<p>Escala 1:2</p>	<p>Proyección </p>	<p>Tamaño A4</p>	<p>Plano 17</p>


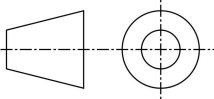
Planta Inferior



Vista Isométrica

Perfil Derecho

Alzado

Nombre Pablo Cardona Álvarez	Fecha 15/09/2023	Firma 	Proyecto de un montaje experimental de suspensión delantera y dirección de un automóvil para la industria automotriz
Escala 1:2	Proyección 	Tamaño A4	Plano 18

E. Ficha Técnica PETG



Data Sheet

PETG

Alternative Designations

Polyethylene terephthalate glycol

Key Features

Low forming temperature • Resistant chemicals • Flexible • Hard

Description

It is more durable than polyethylene terephthalate (PET) and can be heat-formed to create products that are both strong and flexible. PETG is also easy to recycle, making it an environmentally friendly option for many applications. This material has significant chemical resistance, durability and good formability. It has low forming temperatures making it popular in consumer applications. It is commonly used for food containers and bottles for liquid beverages. However, its soft surface makes it prone to wear.

Mechanical Properties

Tensile modulus	2020 MPa
Tensile strength	45 MPa
Elongation at break	35%
Flexural strength	39.2 MPa
Flexural modulus	1.17 GPa
Hardness (Shore D)	105

Thermal Properties

Heat deflection temperature (1.80 MPa)	63°C
Heat deflection temperature (0.45 MPa)	70°C
Softening temperature	80°C

Physical Properties

Density	1.27 g/cm ³
---------	------------------------

Reference

Datasheets provided by Xometry contain materials sourced through trusted OEMs, material distributors, and databases. Please visit [Materialdatacenter.com](https://www.materialdatacenter.com) for further information on this material.

F. Relación del trabajo con los objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Objetivos de Desarrollo Sostenible	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				X
ODS 2. Hambre cero.				X
ODS 3. Salud y bienestar.				X
ODS 4. Educación de calidad.	X			
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.		X		
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.				X
ODS 12. Producción y consumo responsables.				X
ODS 13. Acción por el clima.				X
ODS 14. Vida submarina.				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.				X
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.				X

Descripción de la alineación del TFM con los ODS con un grado de relación más alto.

Educación de calidad

El enfoque formativo es el gran distintivo de este proyecto. Está comprobado que disponer de este tipo de material de uso práctico e incorporar nuevas técnicas de aprendizaje activo en el aula favorecen que el alumno asimile de forma más rápida y sencilla conceptos a veces complejos, en este caso sobre dinámica del automóvil. Así lo manifiestan varios estudios [9–11], por lo que mediante el lanzamiento de este proyecto, se contribuye a hacer hincapié en la importancia de explorar nuevas posibilidades de contribuir y mejorar la educación para garantizar su calidad.

Industria, innovación e infraestructuras

La idea principal del proyecto es contribuir al sector automóvil concibiendo una herramienta formativa que permita adquirir de manera práctica conocimientos útiles sobre el funcionamiento del sistema de suspensión delantera y dirección de un vehículo. Si montajes como este llegan a los espacios formativos del sector, se potencia la preparación académica y capacitación de los profesionales con el objetivo de impulsar la innovación en un sector tan estratégico para el país.