



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIALES

Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación

TRABAJO FIN DE GRADO

**Creación de un gemelo digital de la transmisión de un
Formula Student con fines docentes. Optimización del diseño
del buje, palier y tuerca rápida, para su fabricación.**

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: Francisco Javier Serrano Arco

Tutor: Jesús Javier Jiménez Galea

MÁLAGA, septiembre de 2023



(página en blanco)

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a Jesús Jiménez, tutor de este proyecto el cual no ha parado de apoyarme, darme consejos y animarme para conseguir el resultado de este trabajo.

A mi familia y a mi pareja, por animarme y ese apoyo incondicional privándose de muchas cosas para poder darme la oportunidad de cumplir mis sueños.

Mi vida en Málaga ha sido mucho más fácil gracias, por una parte, al grupo que se ha ido formando en mi etapa universitaria, Magantos. Juntos hemos ido aprendiendo y apoyándonos hasta conseguir nuestros objetivos. Y, por otro lado, convivir con Juanra y Sergio. Los tres conseguimos que haya sido la mejor experiencia estudiantil que se haya podido tener.

Gracias al equipo de Formula Student MART, una etapa pequeña pero intensa llena de emociones, tanto buenas como estresantes, y de muchas horas de taller. Mencionar en especial a Francisco Foncubierta y Mario Domínguez, compañeros del departamento de Potencia y Transmisión, por darme la oportunidad de formar parte de este equipo y por todas las experiencias vividas juntos.

Por último, pero no menos importante, dar las gracias a Talleres Aguayo, empresa que me ha abierto sus puertas para poder sacar contenido de calidad para este proyecto y brindarme con consejos y recomendaciones procedentes de su amplia experiencia en el sector de la fabricación.



Índice General

Agradecimientos.....	III
Índice de Acrónimos.....	XX
Resumen	XXIII
Abstract (Resumen en inglés).....	XXV
1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	2
3. Conceptos previos	3
3.1. ¿Qué es la Formula SAE?.....	3
3.1.1. Inspecciones técnicas.....	4
3.1.2. Pruebas estáticas	4
3.1.3. Pruebas dinámicas	5
3.1.4. Resumen puntuación	6
3.2. Normativa Formula Student 2023.....	6
3.3. Málaga Racing Team (MART).....	8
3.4. El automóvil.....	10
3.5. Transmisión en rueda de un automóvil.....	15
3.5.1. Sistema de transmisión secundaria.....	17
3.5.2. Diferencial	19
3.5.3. Junta homocinética	24
3.5.4. Palier.....	27
3.5.5. Elementos del interior de la rueda	28
3.6. Diseño de ejes	34
3.6.1. Análisis de cargas y esfuerzos	34
3.6.2. Método de diseño a fatiga.....	37
4. Software utilizado. Solidworks.....	44



4.1.	Porqué la elección de SolidWorks	44
4.2.	Pequeño recorrido por la interfaz.....	46
5.	Creación del gemelo digital.....	51
5.1.	Componentes modelados	52
5.2.	Ensamblaje general y subensamblajes	61
5.2.1.	Piñón-cadena-corona	62
5.2.2.	Diferencial	62
5.2.3.	Portadiferencial.....	64
5.2.4.	Conjunto palier	64
5.2.5.	Rueda trasera	67
5.3.	Estudio de movimiento	70
5.3.1.	Conjunto Diferencial	71
5.3.2.	Conjunto palier	76
5.3.3.	Conjunto Rueda	78
5.3.4.	Piñón motor-cadena-corona.....	82
5.3.5.	Definir subensamblajes.....	85
5.3.6.	Creación de video	89
6.	Electroerosión por hilo	94
6.1.	Introducción	94
6.2.	Funcionamiento	95
6.3.	Partes de una erosionadora de hilo	100
6.3.1.	Estructura metálica	101
6.3.2.	Instalación tratamiento del dieléctrico.....	104
6.3.3.	Estructura eléctrica	112
6.4.	El líquido dieléctrico.....	115
6.5.	Materiales para electrodos	117



7.	Componentes creados	120
7.1.	Palier	120
7.1.1.	Diseño.....	120
7.1.2.	Material.....	129
7.1.3.	Medición longitud palieres	130
7.1.4.	Fabricación	133
7.2.	Buje trasero	134
7.2.1.	Diseño.....	134
7.2.2.	Material.....	139
7.2.3.	Fabricación	140
7.3.	Drive peg.....	148
7.3.1.	Diseño.....	148
7.3.2.	Material.....	149
7.3.3.	Fabricación	149
7.4.	Tuerca rápida	150
7.4.1.	Diseño.....	150
7.4.2.	Material.....	152
7.4.3.	Fabricación	153
8.	Experiencia en competición.....	155
9.	Conslusiones y trabajos futuros	157
9.1.	Conclusiones.....	157
9.2.	Trabajos futuros	158
	ANEXO I. Componentes modelados y las operaciones realizadas	160
	ANEXO II. Visualización de ensamblajes y del conjunto	169
	ANEXO III. Planos de los componentes creado	173
	ANEXO IV. Hoja de datos técnicos erosionadora de hilo ONA AF35	174



Referencias 175



Índice de figuras

Figura 1: Competiciones FSAE a nivel mundial [1].	3
Figura 2: Esquema circuito Skidpad [3].	5
Figura 3: Logo corporativo equipo Formula Student MART. Banco de fotos equipo MART.	9
Figura 4: Monoplaza MA22RT. Banco de fotos equipo MART.	9
Figura 5: Monoplaza MA23RT. Banco de fotos equipo MART.	9
Figura 6: Primer automóvil patentado por Karl Benz [6].	11
Figura 7: Primer motor de dos cilindros en V [6].	11
Figura 8: Primer motor Diesel [6].	12
Figura 9: Motor de gasolina con tecnología híbrida EcoBoost de Ford [6].	12
Figura 10: Conjunto eléctrico motopropulsor de Renault [6].	12
Figura 11: Fases de un motor 4T [7].	14
Figura 12: Diagrama de distribución para un motor de cuatro tiempos [7].	15
Figura 13: Esquema tracción delantera de un automóvil [8].	16
Figura 14: Esquema tracción trasera de un automóvil [8].	16
Figura 15: Esquema tracción total de un automóvil [8].	17
Figura 16: Junta cardan como método secundario de transmisión en una motocicleta [9].	18
Figura 17: Tipos de cadena utilizados como sistema de transmisión secundaria [9].	18
Figura 18: Junta cardan como método secundario de transmisión en una motocicleta [9].	19
Figura 19: Distintos componentes de un diferencial abierto [10].	19
Figura 20: Trazo de las ruedas de un vehículo al tomar una curva [11].	20
Figura 21: Explosionado de un diferencial de deslizamiento limitado por discos [11].	21
Figura 22: Componentes de un diferencial de deslizamiento limitado de rampas [11].	22
Figura 23: Elementos de un diferencial de deslizamiento limitado Torsen [11].	23
Figura 24: Sección de un diferencial de deslizamiento limitado viscoso [11].	23
Figura 25: Juntas homocinéticas en un automóvil [13].	24
Figura 26: Componentes de una junta homocinética fija [13].	25
Figura 27: Componentes de una junta homocinética desplazable de bolas [13].	25
Figura 28: Componentes de una junta homocinética desplazable de trípode [13].	26

Figura 29: Componentes de una junta homocinética desplazable circulares de trípede [13].	26
Figura 30: Componentes de una junta homocinética desplazable doble offset [13].	27
Figura 31: Palier junto con junta homocinética fija. Elaboración propia.	28
Figura 32: Interior de rueda trasera M22RT. Fuente: Elaboración propia.	29
Figura 33: Mangueta trasera M22RT. Fuente: Elaboración propia.	30
Figura 34: Configuraciones del circuito de frenado de un vehículo [17].	31
Figura 35: Partes freno de tambor (izquierda) Partes freno de disco (derecha) [18].	31
Figura 36: Secuencia de funcionamiento pinza de freno flotante [17].	32
Figura 37: Secuencia de funcionamiento pinza de freno fija [17].	32
Figura 38: En la parte de arriba se muestra un Bobbin y arandela ondulada en la inferior una arandela plana y circlip de un freno flotante [17].	33
Figura 39: Ejemplo disco de freno fijo [17].	33
Figura 40: Ejemplo disco de freno flotante [17].	33
Figura 41: Análisis de esfuerzos y deformaciones en una barra [19].	35
Figura 42: Distribución tensión cortante en una sección sólida [20].	36
Figura 43: Distribución tensión cortante en una sección hueca [20].	36
Figura 44: Diferenciación etapas de la fatiga [21].	38
Figura 45: Diagrama S-N para materiales ferrosos [21].	38
Figura 46: Representación gráfica ecuación acabado superficial [20].	40
Figura 47: Valores esfuerzo concentración en flexión en una sección circular con cambio de sección y redondeo [21].	42
Figura 48: Distintos ensayos representando la zona segura [21].	43
Figura 49: Logo corporativo SolidWorks [22].	44
Figura 50: Ventana inicial emergente con los tres módulos principales de SolidWorks. Elaboración propia.	46
Figura 51: Ejemplo plano procedente del módulo Dibujo. Elaboración propia.	46
Figura 52: Ejemplo plano procedente del módulo Dibujo. Elaboración propia.	47
Figura 53: Vista seccionada del conjunto utilizando en varios elementos opciones de visualización. Elaboración propia.	47
Figura 54: Vista del Gestor de diseño con la pestaña 'FeatureManager' activada del conjunto a la izquierda y de una pieza a la derecha. Elaboración propia.	48



Figura 55: Vista del panel de tareas utilizando el complemento ToolBox. Elaboración propia.....	49
Figura 56: Barra superior de herramienta con la opción de ensamblaje activada. Elaboración propia.....	49
Figura 57: Opciones de los apartados ‘diseño’ y ‘croquis. Elaboración propia.	50
Figura 58: Opciones de Calcular. Elaboración propia.....	50
Figura 59: Pestaña ‘Complementos de SOLIDWORKS. Elaboración propia.	50
Figura 60: Gemelo digital completo de la transmisión trasera de un monoplaza formula student. Elaboración propia.	51
Figura 61: Explosionado subensamblaje junta homocinética fija. Elaboración propia..	52
Figura 62: Vista en sección de la junta homocinética. Elaboración propia.....	53
Figura 63: Operaciones realizadas para el modelado de la junta homocinética. Elaboración propia.....	53
Figura 64: Vista sección interior campana de la junta homocinética. Elaboración propia.	53
Figura 65: Vista en sección de la junta homocinética. Elaboración propia.....	54
Figura 66: Tope para los rodamientos de la mangueta. Elaboración propia.	54
Figura 67: Vista de explosionado subensamblaje guardapolvos de la junta homocinética fija. Elaboración propia.	54
Figura 68: Vista de explosionado subensamblaje guardapolvos de la junta homocinética desplazable trípode. Elaboración propia.....	55
Figura 69: Creación de croquis y extrusión para la abrazadera de nailon. Elaboración propia.....	55
Figura 70: Ubicación operación intersección en administrador de comandos. Elaboración propia.....	56
Figura 71: Regiones detectadas en la operación intersección. Elaboración propia.....	56
Figura 72: Región a excluir. Elaboración propia.....	57
Figura 73: Pieza final obtenida por intersección. Elaboración propia.....	57
Figura 74: Operaciones realizadas para el modelado del palier. Elaboración propia.....	58
Figura 75: Palier hueco. Elaboración propia.	58
Figura 76: Tuerca rápida M45. Elaboración propia.	59
Figura 77: Drive peg. Elaboración propia.	59
Figura 78: Clip de seguridad de la tuerca rápida. Elaboración propia.	60



Figura 79: Vista en sección del buje trasero. Elaboración propia.	60
Figura 80: Operaciones realizadas para el modelado del buje trasero. Elaboración propia.	60
Figura 81: Pistón de la pinza de freno. Elaboración propia.....	61
Figura 82: Clip de seguridad del pasador de las pastillas de freno. Elaboración propia.	61
Figura 83: Explosionado subensamblaje piñón-cadena-corona. Elaboración propia....	62
Figura 84: Explosionado completo del grupo diferencial. Elaboración propia.	63
Figura 85: Explosionado más detallado del grupo diferencial. Elaboración propia.....	63
Figura 86: Explosionado más detallado del grupo diferencial. Elaboración propia.....	63
Figura 87: Explosionado subensamblaje del palier. Elaboración propia.	64
Figura 88: Explosionado subensamblaje del conjunto palier. Elaboración propia.....	65
Figura 89: Explosionado subensamblaje del palier. Elaboración propia.	65
Figura 90: Guardapolvos con bridas metálicas de la junta homocinética fija. Elaboración propia.	66
Figura 91: Guardapolvos con bridas metálicas de la junta desplazable de trípode. Elaboración propia.....	66
Figura 92: Explosionado trípode. Elaboración propia.....	66
Figura 93: Explosionado subensamblaje junta homocinética fija. Elaboración propia..	67
Figura 94: Explosionado completo del subensamblaje rueda trasera. Elaboración propia.	67
Figura 95: Explosionado buje trasero con drives peg. Elaboración propia.	68
Figura 96: Explosionado subensamblaje de la rueda trasera. Elaboración propia.	68
Figura 97: Explosionado disco de freno flotante. Elaboración propia.	69
Figura 98: Explosionado pinza de freno flotante trasera. Elaboración propia.	69
Figura 99: Explosionado conjunto mangueta. Elaboración propia.....	70
Figura 100: Grupos de relaciones de posición disponibles en SolidWorks. Elaboración propia.	71
Figura 101: Cuerpo del grupo diferencial ensamblado respecto al Eje. Elaboración propia.	72
Figura 102: Utilización de matriz circular en el grupo diferencial. Elaboración propia.	72
Figura 103: Grupo diferencial con sus respectivos tornillos. Elaboración propia.....	73
Figura 104: Grupo diferencial con elementos interiores ensamblados. Elaboración propia.	73



Figura 105: Grupo diferencial con juntas y discos de embrague ensamblados. Elaboración propia.....	74
Figura 106: Grupo diferencial totalmente funcional. Elaboración propia.....	74
Figura 107: Grupo diferencial con las juntas trípode. Elaboración propia.....	75
Figura 108: Abrazaderas de nailon ensambladas al grupo diferencial. Elaboración propia.....	75
Figura 109: Ensamblaje completo del grupo diferencial. Elaboración propia.....	76
Figura 110: Palier concéntrico al eje de referencia. Elaboración propia.....	76
Figura 111: Trípode ensamblado en el palier. Elaboración propia.....	77
Figura 112: Elementos junta fija ensamblado respecto al plano planta del núcleo. Elaboración propia.....	77
Figura 113: Subensamblaje del palier completo. Elaboración propia.....	78
Figura 114: Buje con los drives peg atornillados. Elaboración propia.....	78
Figura 115: Buje con subensamblaje del disco de freno. Elaboración propia.....	79
Figura 116: Buje con subensamblaje del disco de freno. Elaboración propia.....	79
Figura 117: Mangueta y subensamblaje de la pinza de freno añadido al buje. Elaboración propia.....	80
Figura 118: Rueda completa y tuerca añadida al subensamblaje general. Elaboración propia.....	81
Figura 119: Vista en sección con el subensamble del conjunto rueda con junta homocinética. Elaboración propia.....	81
Figura 120: Subensamblaje conjunto de rueda completo. Elaboración propia.....	82
Figura 121: Pareja de eslabones. Elaboración propia.....	82
Figura 122: Croquis de referencia para la cadena. Elaboración propia.....	83
Figura 123: Cadena creada mediante matriz de cadena. Elaboración propia.....	83
Figura 124: Cadena con corona y piñón. Elaboración propia.....	84
Figura 125: Relación de correa entre el piñón y la corona. Elaboración propia.....	84
Figura 126: Subensamblaje piñón motor-cadena-corona completo. Elaboración propia.	85
Figura 127: Grupo diferencial con portadiferencial ya definido. Elaboración propia....	86
Figura 128: Referencias piñón motor. Elaboración propia.....	86
Figura 129: Referencias subensamblajes conjunto rueda y grupo diferencial. Elaboración propia.....	87



Figura 130: Croquis para definir la posición del palier entre rueda y grupo diferencial. Elaboración propia.....	87
Figura 131: Relación de posición mecánica junta universal entre palier y junta homocinética. Elaboración propia.	88
Figura 132: Ensamblaje de la transmisión trasera de un monoplaza formula student. Elaboración propia.....	88
Figura 133: Opción para convertir subensamblajes en flexibles. Elaboración propia. ..	89
Figura 134: Pestaña de inicio para crear un estudio de movimiento. Elaboración propia.	89
Figura 135: Zonas importante de un estudio de movimiento. Elaboración propia.....	90
Figura 136: Elección de tipo de estudio. Elaboración propia.....	90
Figura 137: Forma de añadir motor rotatorio al piñón del motor. Elaboración propia. .	91
Figura 138: Visualización del motor rotatorio añadido en la línea del tiempo. Elaboración propia.....	91
Figura 139: Visualización de la línea del tiempo con una animación calculada. Elaboración propia.....	92
Figura 140: Asistente de animaciones. Elaboración propia.	92
Figura 141: Asistente de animaciones. Elaboración propia.	93
Figura 142: Máquina erosionadora por hilo ONA AF35. Elaboración propia.....	95
Figura 143: Posición de máxima profundidad entre piza y electrodo [26].	96
Figura 144: Ionización del electrodo [26].	96
Figura 145: Iniciación canal de descarga [26].	97
Figura 146: Flujo total de corriente por canal de descarga [26].	97
Figura 147: Efecto del elevado flujo de corriente por canal de descarga [26].	97
Figura 148: Arranque de material producido por la descarga [26].	98
Figura 149: Formación de cráteres en la superficie de la pieza [26].	98
Figura 150: Último estado del cráter [26].	99
Figura 151: Corte por hilo [25].	99
Figura 152: Cortes cónicos mediante corte por hilo [26].	100
Figura 153: Zonas diferenciales erosionadora ONA AF35. Elaboración propia.	101
Figura 154: Componentes columna en erosionadora ONA AF35. Elaboración propia.	102



Figura 155: Componentes mesa de trabajo en erosionadora ONA AF35. Elaboración propia.....	102
Figura 156: Elementos más específicos en la zona de trabajo de una erosionadora por hilo [27].....	103
Figura 157: Zonas principales de la zona de trabajo en erosionadora ONA AF35. Elaboración propia.....	103
Figura 158: Erosionadora en un proceso de mecanizado con el tanque lleno de dieléctrico. Elaboración propia.....	103
Figura 159: Depósito de residuos del hilo de corte en erosionadora ONA AF35. Elaboración propia.....	104
Figura 160: Vista interior del depósito de residuos del hilo de corte. Elaboración propia.	104
Figura 161: Grado de contaminación y dimensión del GAP [25].....	105
Figura 162: Limpieza a través del electrodo por presión [26].	106
Figura 163: Conicidad producida por la limpieza por presión a través del electrodo [26].	106
Figura 164: Filtro de cartucho de papel [26].....	107
Figura 165: Localización del sistema de filtrado y del tanque de líquido dieléctrico en una erosionadora ONA AF35. Elaboración propia.	108
Figura 166: Localización del sistema de decantación y del contenedor para residuos procedentes de la zona de trabajo en una erosionadora ONA AF35. Elaboración propia.	109
Figura 167: Residuo cracking procedente de la zona de trabajo y sistema de filtrado para su posterior reciclaje. Elaboración propia.	109
Figura 168: Sistema de desionización de erosionadora ONA AF35. Elaboración propia.	111
Figura 169: Sistema de refrigeración del líquido dieléctrico de la erosionadora ONA AF35. Elaboración propia.....	112
Figura 170: Concepto de funcionamiento de un generador [26].....	113
Figura 171: Parámetros fundamentales de las descargas [26].	113
Figura 172: Generador isofrecuencial de baja tensión de encendido [26].	114
Figura 173: Panel de control de la erosionadora ONA AF35. Elaboración propia.	115
Figura 174: Depósito con agua destilada y desionizada. Elaboración propia.	117



Figura 175: Bobinas de latón. Elaboración propia.	118
Figura 176: Palier con homocinética del monoplaza MA22RT [29].	120
Figura 177: Características neumático Hoosier [29].	120
Figura 178: Solicitaciones dinámicas en un vehículo [30].	122
Figura 179: Curva de potencia y par motor Honda CBR 600 RR. Base de datos equipo MART.	123
Figura 180: Telemetría MA22RT endurance FSS 2022. Base de datos equipo MART.	126
Figura 181: Telemetría MA22RT de una vuelta endurance FSS 2022. Base de datos equipo MART.	126
Figura 182: Modelo final del palier. Elaboración propia.	128
Figura 183: Modelo final del palier. Elaboración propia.	129
Figura 184: Impresión en 3D del buje con una impresora 3D. Elaboración propia.	131
Figura 185: Bujes impresos atornillados a la homocinética. Elaboración propia.	131
Figura 186: Disposición de elementos para medición de palier izquierdo. Elaboración propia.	132
Figura 187: Distancias importantes para la medición de palier izquierdo. Elaboración propia.	132
Figura 188: Mecanizado del estriado del palier de una retroexcavadora mediante un fresado en escuadra [32].	133
Figura 189: Palier con junta homocinética acoplada. Elaboración propia.	134
Figura 190: Llantas Braid Tenrace+ con sistema de cuatro tornillos. Elaboración propia.	135
Figura 191: Bujes traseros del prototipo MA22RT. Elaboración propia.	135
Figura 192: Llanta OZ Magnesium Cl 10" con sistema monotuerca [33].	135
Figura 193: Sugerencias para un buje para una llanta OZ Magnesium Cl 10" [33]. ...	136
Figura 194: Offset 0 en llantas Braid Tenrace+. Elaboración propia.	137
Figura 195: Offset positivo en llantas OZ Magnesium CL 10". Elaboración propia...	137
Figura 196: Junta homocinética fija montada en monoplaza MA22RT. Elaboración propia.	137
Figura 197: Junta homocinética fija montada en monoplaza MA23RT. Elaboración propia.	137
Figura 198: Vista en sección interna del buje trasero. Elaboración propia,	138



Figura 199: Vista frontal del modelo final del buje trasero. Elaboración propia.	139
Figura 200: Vista del modelo final del buje trasero. Elaboración propia.	139
Figura 201: Gráfico con las principales propiedades mecánicas de distintas aleaciones de aluminio [35].	140
Figura 202: Centro de mecanizado CNC de 5 ejes [37].	141
Figura 203: Bujes traseros sin estriado interior. Elaboración propia.	141
Figura 204: Representación proceso de corte brochado [39].	142
Figura 205: Representación proceso de corte brochado [39].	142
Figura 206: Bujes traseros sin estriado interior. Elaboración propia.	144
Figura 207: Posicionamiento homocinético para la toma de medidas del estriado. Elaboración propia.	145
Figura 208: Vista a través del útil del estriado de la homocinética. Elaboración propia.	145
Figura 209: Patrón obtenido de las mediciones realizadas. Elaboración propia.	145
Figura 210: Plancha de aluminio con los intentos del estriado cortados. Elaboración propia.	146
Figura 211: Fabricación del útil mediante erosión de corte por hilo. Elaboración propia.	146
Figura 212: Vista del útil ya fabricado. Elaboración propia.	146
Figura 213: Mecanizado del estriado interior del buje. Elaboración propia.	147
Figura 214: Estriado interior del buje ya cortado. Elaboración propia.	147
Figura 215: Sobrante de material al realizar el corte del estriado interior. Elaboración propia.	147
Figura 216: Comprobación de la posición correcta entre homocinética y buje trasero. Elaboración propia.	148
Figura 217: Dimensiones sugeridas por fabricante para el drive peg en la llanta OZ FS Magnesium CL 10" [33].	148
Figura 218: Orificios para alojamientos de los drives peg en la llanta OZ FS Magnesium CL 10". Banco piezas MART FS.	148
Figura 219: Representación ajuste del drive peg con llave fija de 11 mm. Elaboración propia.	149
Figura 220: Comprobación de cumplimiento de normativa de los drives peg. Elaboración propia.	149



Figura 221: Resultado de la fabricación de los drives peg. Elaboración propia.	150
Figura 222: Drives peg montados en el buje del MA23RT. Elaboración propia.	150
Figura 223: Dimensiones sugeridas por fabricante para la monotuerca en la llanta OZ FS Magnesium CL 10” [33].	150
Figura 224: Detalle de las ranuras en la monotuerca. Elaboración propia.	151
Figura 225: Monotuerca con clip de seguridad. Elaboración propia.	151
Figura 226: Resultado final del diseño de la tuerca del monoplaza. Elaboración propia.	152
Figura 227: Montaje de la monotuerca en el conjunto de rueda. Elaboración propia. .	152
Figura 228: Diferencia entre material antes (derecha) y después del ionizado (izquierda) [35]	153
Figura 229: Resultado final de la fabricación de la tuerca del monoplaza. Elaboración propia.	154
Figura 230: Monotuerca anodizada atornillada en el buje del MA23RT. Elaboración propia.	154
Figura 231: Montaje rueda trasera en FSG. Elaboración propia.	155
Figura 232: Vista trasera transmisión MA23RT antes de FSG. Elaboración propia. ..	156
Figura 233: Campana junta homotética fija.	161
Figura 234: Jaula junta homotética fija.	161
Figura 235: Núcleo junta homotética fija.	162
Figura 236: Bola junta homotética fija.	162
Figura 237: Tope rodamientos buje.	162
Figura 238: Abrazadera metálica grande guardapolvo junta homocinética fija.	163
Figura 239: Guardapolvo junta homocinética fija.	163
Figura 240: Abrazadera metálica pequeña guardapolvo junta homocinética fija.	164
Figura 241: Guardapolvo junta homocinética trípode.	164
Figura 242: Abrazadera nailon junta homocinética trípode.	165
Figura 243: Buje trasero.	165
Figura 244: Tuerca rápida.	165
Figura 245: Clip seguridad tuerca.	166
Figura 246: Drive peg.	166
Figura 247: Pistón pinza de freno.	167
Figura 248: Clip pasador pinza de freno.	167



Figura 249: Palier.	168
Figura 250: Conjunto gemelo digital de la transmisión de un monoplaza Formula Student.	170
Figura 251: Conjunto gemelo digital con transparencias de la transmisión de un monoplaza Formula Student.	170
Figura 252: Explosionado general de la transmisión de un monoplaza Formula Student.	171
Figura 253: Explosionado subensamblaje piñón-cadena-corona. Elaboración propia.	171
Figura 254: Explosionado subensamblaje del conjunto palier. Elaboración propia.....	172
Figura 255: Explosionado completo del subensamblaje rueda trasera. Elaboración propia.	172



Índice de Tablas

Tabla 1: Resumen puntuación competición.....	6
Tabla 2: Valores para factores de acabado a y b.	40
Tabla 3: Valores para el factor de confiabilidad.....	41
Tabla 4: Propiedades de los materiales para electrodo.....	119
Tabla 5: Relación de transmisión MA23RT. Base de datos equipo MART.	124
Tabla 6: Relaciones totales de transmisión por marcha MA23RT.....	124
Tabla 7: Par en eje y rueda en Nm del MA23RT.	125
Tabla 8: Porcentaje de marcha utilizada en una vuelta en FSS 2022.....	127
Tabla 9: Par en rueda con su respectivo porcentaje de una vuelta en FSS 2022.....	127
Tabla 10: Estudio de las zonas del palier.	128
Tabla 11: Composición química del acero AISI 4340 [31].....	129
Tabla 12: Características mecánicas del acero AISI 4340 en función del diámetro [31].	130
Tabla 13: Propiedades físicas acero AISI 4340 a temperatura ambiente [31].....	130
Tabla 14: Propiedades mecánicas acero AISI 4340 para sección de palier diseñado [31].	130
Tabla 15: Propiedades del Aluminio 7075-T6 a temperatura ambiente [36].	140
Tabla 16: Comparativa entre distintos procesos de fabricación.....	143
Tabla 17: Comparativa de pesos entre la transmisión actual y la diseñada.....	157



Índice de Acrónimos

MART: Málaga Racing Team

FSS: Formula Student Spain

CAD: Computer-aided design

UMA: Universidad de Málaga

mm: milímetros

Kg: kilogramos

km: kilómetros

3D: 3 dimensiones

2D: 2 dimensiones

dB: decibelios

CNC: Computer numerical control

4T: Cuatro tiempos.

RAE: Real Academia Española

AAA: Avance en la apertura de admisión

AAE: Avance en la apertura de escape

AE: Avance de encendido

AI: Avance de inyección

CAD: Computer-Aided Design

cc: Centímetro Cúbico

CV: Caballo de Vapor

XX



MCIA: Motores de Combustión Interna Alternativos

PMI: Punto Muerto Inferior

PMS: Punto Muerto Superior

RCA: Retraso en el cierre de admisión

RCE: Retraso en el cierre de escape



(página en blanco)



Resumen

En el presente trabajo final de carrera se desarrollará un gemelo virtual de la transmisión de un prototipo Formula Student. Además, se incluye el diseño y fabricación de algunos de sus componentes, como son el buje, palier y tuerca rápida, que serán testeados en el monoplaza MA23RT, desarrollado por el equipo Málaga Racing Team (MART), para la temporada 2022/2023.

Esto se llevará a cabo mediante el software de diseño CAD Solidworks y algunos de sus complementos. Partiendo del monoplaza desarrollado en la temporada 2021/2022, se intentará reducir peso, teniendo siempre como premisa la fiabilidad, en aquellas piezas de la transmisión que así lo permitan. Gracias a esto, se conseguirá una mejora de su rendimiento en pista.

Una vez se tengan todos los diseños finalizados, se creará un ensamblaje dinámico con sus respectivas relaciones geométricas que permitirán interactuar y conocer de más cerca el funcionamiento de la transmisión del monoplaza, desde ver en detalle cada una de sus piezas a simular la puesta en marcha del monoplaza, adoptando aquí su uso educativo.

Dicho ensamblaje se creará mediante distintos subensamblajes, es decir, ensamblajes con un número limitado de piezas para priorizar el rendimiento del ordenador y mejor organización de los elementos.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

**Creación de un gemelo digital de la transmisión de un Formula
Student con fines docentes. Optimización del diseño del buje, palier y
tuerca rápida, para su fabricación.**



Palabras clave: Formula Student, FSAE, palier, buje, fabricación, potencia, transmisión,
SolidWorks, tuerca



Abstract (Resumen en inglés)

In this final project a virtual twin of the transmission of a Formula Student prototype will be developed. It also includes the design and manufacture of some of its components, such as the hub, bearing and quick nut, which will be tested in the MA23RT single-seater, developed by the Malaga Racing Team (MART), for the 2022/2023 season.

This will be carried out using the CAD design software Solidworks and some of its complements. Starting from the single-seater developed for the 2021/2022 season, we will try to reduce weight, always taking reliability as a premise, in those parts of the transmission that allow it. Thanks to this, an improvement in performance on the track will be achieved.

Once all the designs have been finalised, a dynamic assembly will be created with their respective geometric relationships that will allow interaction and a closer look at the operation of the single-seater transmission, from seeing each of its parts in detail to simulating the start-up of the single-seater, adopting here its educational use.

This assembly will be created by means of different sub-assemblies, i.e. assemblies with a limited number of parts in order to prioritise the performance of the computer and better organisation of the elements.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

**Creación de un gemelo digital de la transmisión de un Formula
Student con fines docentes. Optimización del diseño del buje, palier y
tuerca rápida, para su fabricación.**



Keywords: Formula Student, FSAE, bearing, bushing, fabrication, power, transmission,
SolidWorks, nut



1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto se desarrolla en el ámbito de la fabricación de un monoplaza conjuntamente el equipo Malaga Racing Team para la competición entre universidades a nivel europeo llamada Formula Student.

Cada año se debe de fabricar un monoplaza, obligatorio por normativa, realizando cambios sustanciales en el coche construido el año anterior. Tras la exitosa temporada con el MA22RT, se llegó a la conclusión de que se debería de marcar como objetivo principal para la temporada 2022/2023 la reducción de peso, aparte de mejorar en aquellos apartados que se vieron comprometidos durante la temporada anterior.

En este documento se va a exponer el procedimiento detallado seguido del diseño y fabricación de los nuevos palieres y bujes traseros, incluyendo las tuercas, del monoplaza MA23RT.

Además, el equipo cuenta con un gemelo digital del monoplaza completo realizado en SolidWorks en el que la transmisión de este no contaba con mucho detalle, por lo que no se podían realizar mediciones con exactitud a la hora de fabricar algún componente. Por ello, se ha decidido la realización de un gemelo digital de la transmisión trasera del prototipo, lo más fiel a la realidad, que será explicado a lo largo de este proyecto.

Gracias a esto, permite la creación de una herramienta didáctica que, además de realizar mediciones, se podrá conocer todos los componentes que forma la transmisión de un vehículo y cómo funcionan por medio de estudios de movimiento, explosionados y planos. Con estas animaciones se crearán videos explicativos que servirán tanto para estudiantes como miembros del equipo, portando aquí su uso educativo.

Por último, se han intentado dar explicaciones sencillas con las que poder adquirir conocimientos básicos sobre SolidWorks y realizar tanto piezas como ensamblajes con mayor facilidad.



2. OBJETIVOS

En el presente proyecto, se ha establecido conseguir las siguientes metas enumeradas:

1. Conocimiento en profundidad de los componentes de la transmisión de un vehículo. Este sistema está compuesto por un elevado número de piezas que cumplen cierta función y que permiten transmitir la potencia generada del motor a las ruedas.
2. Crear un gemelo digital en el que se consiga ver el funcionamiento de la transmisión del coche para su uso docente. Obtener estudios de movimientos con los que poder ver el funcionamiento de la transmisión y realizar videos explicativos para su divulgación y conocer más de cerca sus componentes,
3. Conseguir la reducción de peso en la transmisión. En una competición tan ajustada es importante siempre reducir peso en aquellos componentes que así lo permitan consiguiendo un mejor rendimiento en pista del monoplaza.
4. Aprendizaje y manejo del programa SolidWorks. Este software es bastante utilizado en el mundo laboral por lo que siempre es importante adquirir nuevos comandos y herramientas que puedan ser utilizados en un futuro.
5. Adquisición de nuevos conocimientos. El estar en un proyecto universitario como MART y realizar el diseño de varios componentes de la transmisión trasera del vehículo, se podrá conseguir nuevos conocimientos de la búsqueda de información en internet o a la hora de visitar o llamar a las distintas empresas experimentadas del sector con las que intercambiar opiniones y experiencias.

3. CONCEPTOS PREVIOS

3.1. ¿Qué es la Formula SAE?

La Formula SAE, más conocida como Formula Student, es una de las competiciones más prestigiosas entre universidades a nivel internacional. En ella, se desafía a los estudiantes de las distintas instituciones a diseñar, fabricar y desarrollar un monoplaza tipo fórmula.

Dicha competición, fundada en los Estados Unidos por la Society of Automotive Engineers (SAE) en los años 80. Tenía como objetivo ser un complemento a la formación académica de los estudiantes de las universidades americanas, con la finalidad de evitar a las grandes empresas la realización de cursos de formación complementarios a sus nuevos empleados.

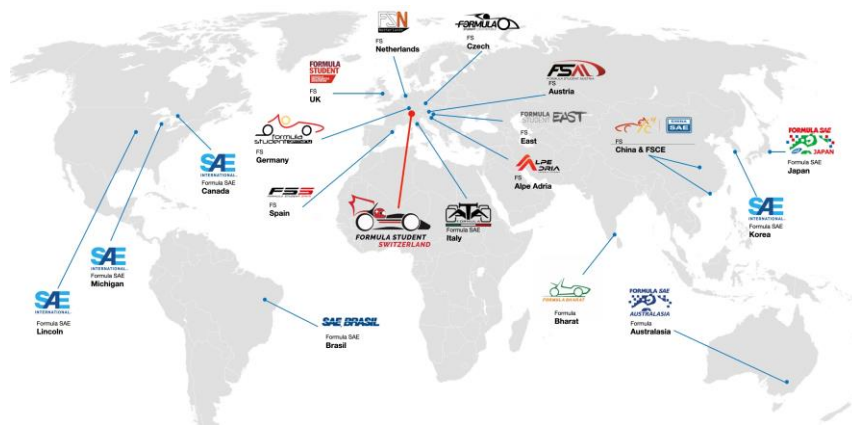


Figura 1: Competiciones FS/AE a nivel mundial [1].

Con el paso del tiempo, tras la celebración de varias ediciones, la competición fue aumentando su prestigio hasta tal punto que, en 1998, se realizó la primera competición fuera de suelo americano. Tuvo lugar en Reino Unido y fue coordinada por el Instituto de Ingeniero Mecánicos (IMechE).

La entrada de la Formula Student en Reino Unido ocasionó que la mayoría de los países europeos organizaran sus propias competiciones. Para facilitar que los equipos pudiesen participar en más de una competición, se creó un reglamento común entre los distintos países [2].

Actualmente, la competición es reconocida por universidades, instituciones y empresas internacionalmente y ven a la Formula Student como un escaparate para el reclutamiento

de futuros empleados para sus empresas. Hoy por hoy, participan monoplazas de combustión, eléctricos y autónomos. La clasificación final se obtiene mediante la obtención de puntos en las distintas pruebas estáticas y dinámicas que se realizan.

3.1.1. Inspecciones técnicas

- **Inspección previa:** el equipo debe de disponer de dos extintores, un juego de 4 ruedas de seco y otro de mojado, y el equipamiento obligatorio de los pilotos.
- **Inspección mecánica:** se verifica que el vehículo cumple con los distintos puntos de la normativa de la competición, dependiendo de la categoría a la que pertenezca el monoplaza.
- **Prueba de vuelco:** se inclina el vehículo 60° para comprobar la estabilidad a vuelco y la estanqueidad de los líquidos.
- **Pesaje:** se pesa el vehículo teniendo al máximo todos los niveles de líquidos.
- **Prueba de ruidos:** el ruido producido por el motor del vehículo no puede superar un límite de 110dB.
- **Prueba de frenado:** el vehículo debe de bloquear las cuatro ruedas y frenar en línea recta sin calar el motor.

3.1.2. Pruebas estáticas

- **Business Plan** (75 puntos): se basa en desarrollar un plan de negocio enfocado en la comercialización del monoplaza. Se evalúan aspectos como la organización, distribución y beneficios económicos.
- **Cost and Manufacturing** (100 puntos): documento donde se recoge todas las piezas del vehículo en el que se debe de explicar el porqué de su elección, el proceso de fabricación utilizado, siendo de gran interés la eficiencia económica.
- **Engineering Desing** (150 puntos): el objetivo es evaluar las decisiones tomadas tanto individualmente como en conjunto en el diseño de las piezas del monoplaza,

desde un punto de vista ingenieril, siendo conscientes de los recursos disponibles de los distintos equipos participantes.

3.1.3. Pruebas dinámicas

- **Skidpad** (50 puntos): consiste en un circuito formado por dos círculos unidos formando un ocho, tal y como se muestra en la *Figura 2*. El vehículo deberá de dar dos vueltas a cada uno de los círculos con la finalidad de comprobar las capacidades de agarre lateral del monoplaza.

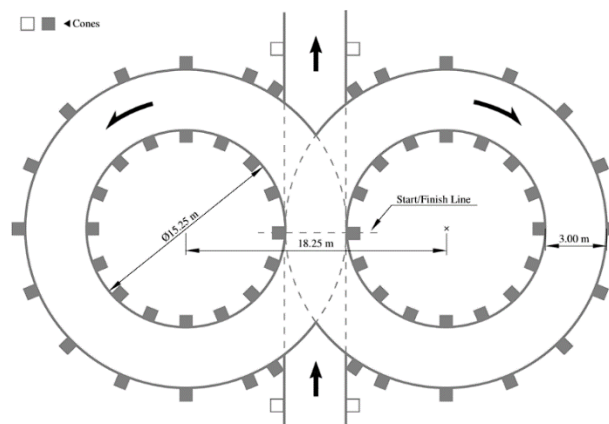


Figura 2: Esquema circuito Skidpad [3].

- **Acceleration** (75 puntos): con el coche parado, recorrer 75 metros en línea recta en el menor tiempo posible.
- **Autocross** (150 puntos): completar una vuelta a un circuito con una longitud menor de 1,5 km, delimitado por conos, en el menor tiempo posible.
- **Endurance** (300 puntos): completar varias vueltas a un circuito con una longitud de alrededor de 1 km hasta alcanzar los 22 km, en el menor tiempo posible. En esta prueba deben participar 2 pilotos diferentes.
- **Efficiency** (100 puntos): aquellos vehículos que han conseguido finalizar la prueba de Endurance, sin abandonar, se extrae una muestra del consumo del combustible.

3.1.4. Resumen puntuación

Tras la realización de las pruebas anteriormente explicadas, en la Formula Student se puede conseguir un máximo de 1000 puntos. Como se ve en la *Tabla 1*, se recoge un resumen con la puntuación de cada una de las pruebas que toman parte en la competición:

Tabla 1: Resumen puntuación competición.

	CV & EV
Pruebas estáticas	
Business Plan	75 puntos
Cost and Manufacturing	100 puntos
Engineering Design	150 puntos
Pruebas Dinámicas	
Skidpad	50 puntos
Acceleration	75 puntos
Autocross	150 puntos
Endurance	300 puntos
Efficiency	100 puntos
Total	1000 puntos

3.2. Normativa Formula Student 2023

Antes de realizar cualquier diseño, se debe de consultar la normativa de la competición [4]. En ella, se deja libertad a la creatividad y a la innovación priorizando la búsqueda de la seguridad del piloto. Debido a esto, la sección más restrictiva es la perteneciente a chasis.

- T 7.1 Transmisión

T7.1.1 El movimiento del vehículo sin una persona en el mismo y con el/los interruptor/es principal/es en la posición de apagado debe ser posible.

Por otra parte, en el caso del buje, localizado en el interior de la rueda, se deben de tener en cuenta más reglas, considerando también aquellas relacionadas con las ruedas y la tornillería. A continuación, se exponen las distintas normas:

- T 2.5 Ruedas

T 2.5.1 Todo sistema de montaje de ruedas que utilice una sola tuerca de retención debe incorporar un dispositivo para que impida el aflojamiento de la tuerca y de la rueda. Una segunda tuerca ("contratuerca") no cumple estos requisitos.

T 2.5.2 Los pernos y espárragos de las ruedas deben ser de acero o titanio. El equipo debe poder demostrar buenas prácticas de ingeniería y que proporcionan una resistencia adecuada mediante cálculos. Los pernos de las ruedas no deben ser huecos.

T 2.5.3 Se pueden utilizar tuercas de rueda de aluminio, pero deben ser de anodizado duro y estar en perfectas condiciones.

- T 10 Fijaciones

- T 10.1 Elementos de Fijación Críticos

T 10.1.1 Los elementos de fijación críticos se definen como pernos, tuercas y otros elementos de fijación utilizados en la estructura primaria estructura primaria, la dirección, los frenos, el arnés del conductor, los sistemas de suspensión y aquellos específicamente designados específicamente como elementos de fijación críticos en la norma respectiva.

T 10.1.2 Todas las fijaciones críticas roscadas deben ser de al menos 4 mm de grado métrico 8.8 (piezas OEM 3 mm grado métrico 8.8), tamaño equivalente o del especificado en la norma de referencia, el que sea mayor.

T 10.1.3 Todas las fijaciones críticas roscadas deben ser del tipo pernos hexagonales (ISO 4017, ISO 4014 o una norma equivalente.) o tornillos de cabeza hueca (ISO 4762, DIN 7984, ISO 7379 o una), incluidas sus versiones de rosca fina.

- T 10.2 Sujeción de elementos de fijación

T 10.2.1 Todas las fijaciones críticas deben estar aseguradas para que no se aflojen involuntariamente mediante el uso de mecanismos de bloqueo positivo.

T 10.2.2 Los siguientes métodos se aceptan como mecanismos de bloqueo positivo:

- Cableado de seguridad correctamente instalado.
- Pasadores de seguridad.
- Tuercas de bloqueo de nylon (ISO 7040, ISO 10512, EN 1663 o una norma equivalente) para lugares donde la temperatura no sea superior a 80 °C.
- Tuercas de bloqueo de par de apriete (DIN 980, ISO 7042 o una norma equivalente, y tuercas de chorro o tuercas K).
- Placas de bloqueo.
- Arandelas de lengüeta.

Cualquier mecanismo de bloqueo basado en el pretensado o en un adhesivo no se considera un mecanismo de bloqueo positivo.

T 10.2.3 Los anillos de seguridad o de retención según las normas DIN 471, DIN 472 o equivalentes están permitidos en aplicaciones OEM y para la fijación de rodamientos y muelles siempre que no soporten ningunas cargas en condiciones normales de conducción.

T 10.2.4 De cualquier tuerca de seguridad deben sobresalir como mínimo dos roscas completas.

3.3. Málaga Racing Team (MART)

La escudería de Formula Student de Málaga, MART, se fundó en 2016 y actualmente cuenta con la colaboración de más de 60 estudiantes de 18 diferentes titulaciones entre Grado y Posgrado de la Universidad de Málaga en el que diseñan, fabrican y compiten con un prototipo reglado por la normativa de la FSAE. Además, dispone con el apoyo de empresas e instituciones tanto locales como internacionales que ayudan económica y técnicamente en forma de patrocinio.

MART

MÁLAGA RACING TEAM

Figura 3: Logo corporativo equipo Formula Student MART. Banco de fotos equipo MART.

La primera participación del equipo en una competición fue en 2018 en la Formula Student Spain, consiguiendo en 2022 con el prototipo MA22RT el hito de ser la primera vez que se compite a nivel europeo participando en la Formula Student Netherlands, además del nacional, logrando muy buenos resultados entre ellos varios podios.



Figura 4: Monoplaza MA22RT. Banco de fotos equipo MART.

En el verano de 2023, la escudería MART participó en FSS (España) y FSG (Alemania) con el MA23RT.



Figura 5: Monoplaza MA23RT. Banco de fotos equipo MART.

Todas las ediciones citadas fueron con un monoplaza de combustión montando un motor de un Honda CBR 600 RR del año 2007. A partir del año 2024, se fabricará el primer prototipo con propulsión eléctrica.

El equipo está compuesto por siete departamentos en el que se reparten las tareas para que desde octubre a junio se lleve a la realidad todo lo que conlleva la fabricación del monoplaza. Estas divisiones son:

- Potencia y transmisión. Diseña y fabrica todos los sistemas que forman un motor y son admisión, escape, combustible, refrigeración, transmisión y programación de la ECU.
- Dinámica. Estudia la telemetría del comportamiento del vehículo en pista recogida durante varios tests mediante el uso de sensores colocados en sitios estratégicos por el monoplaza.
- Aerodinámica. Realización de simulaciones en CFD para su posterior fabricación del carenado del monoplaza en fibra.
- Chasis. Diseña y fabrica la estructura del monoplaza además de todos los anclajes donde irá los componentes fijados. Además, se encarga de la posición del piloto y la seguridad que exige la normativa de la competición.
- Suspensiones, frenos y dirección. Como su nombre indica, se encarga de mejorar la respuesta del vehículo ante irregularidades del terreno por medio de la suspensión, su repuesta de frenada y maniobrabilidad del mismo.
- Electrónica. Diseño y fabricación de todo el sistema eléctrico del monoplaza.
- Negocio. Los miembros de este departamento se encargan de posicionar la imagen del equipo a empresas, en redes y realizar eventos con asociaciones benéficas.

3.4. El automóvil

Actualmente, el automóvil es el medio de transporte que más se utiliza a nivel mundial para desplazarse de un punto a otro, pero ¿qué es un automóvil? Según se define en la R.A.E, un automóvil es que se mueve por sí mismo. Dicho principalmente de los

vehículos que pueden ser guiados para marchar por una vía ordinaria sin necesidad de carriles y llevan un motor, generalmente de combustión interna o eléctrico, que los propulsa [5].

Todo empieza en 1876, cuando Nikolaus Otto desarrolló el primer motor de combustión interna de cuatro tiempos. Tenía un sistema de encendido por chispa externa y un accionamiento alternativo de los pistones. Pasaron diez años cuando, un 29 de enero de 1886, el ingeniero alemán Karl Benz diseñó lo que se consideró como el primer vehículo propulsado por motor. Constaba de un triciclo de chasis tubular propulsado por un monocilíndrico en posición horizontal de 954 cm³ declarando una potencia de 3 CV a 250 rpm. Llegado el verano de ese mismo año, por la mano de Gottlieb Daimler, lanzaba el que sería el primer vehículo autopropulsado de cuatro ruedas con una transmisión de dos velocidades. Montaba un motor en posición central y vertical de un cilindro en un carruaje de caballos. En 1889, Daimler junto de la mano de Maybach, sacaron al mercado un automóvil que contaba con un motor bicilíndrico en V y con una caja de cambios de cuatro relaciones [6].



Figura 6: Primer automóvil patentado por Karl Benz [6].

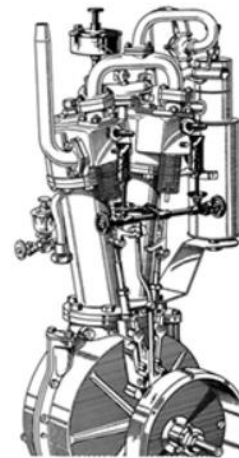


Figura 7: Primer motor de dos cilindros en V [6].

Por otro lado, Rudolf Diesel inventó en 1892 lo que hoy en día es conocido como motor Diesel. Un motor de autoignición que funcionaba con combustibles pesados, pero tenía tales inconvenientes como un gran tamaño y era lento, realizando mucho ruido, siendo muy compleja y cara su construcción a diferencia de un motor gasolina. Tienen que pasar veinte años, 1912, hasta que es implementado en una locomotora y, once años después, en un camión.

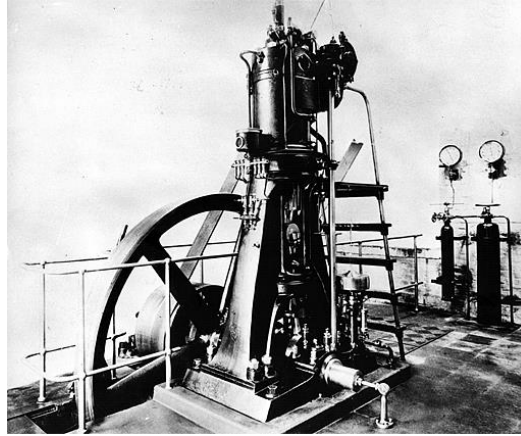


Figura 8: Primer motor Diesel [6].

Todas estas desventajas que presentaba el Diesel desaparecieron en los años 70 gracias al estudio de los materiales, ocasionando que en las siguientes décadas se convirtiera en la fuente de propulsión referente a la hora de la fabricación de automóviles utilitarios.

En la actualidad, persisten las motorizaciones Otto y Diesel, aunque están emergiendo sistemas híbridos y eléctricos con la búsqueda de disminuir la expulsión de sustancias contaminantes a la atmósfera y ser más respetuosos con el medioambiente [6].



Figura 9: Motor de gasolina con tecnología híbrida EcoBoost de Ford [6].

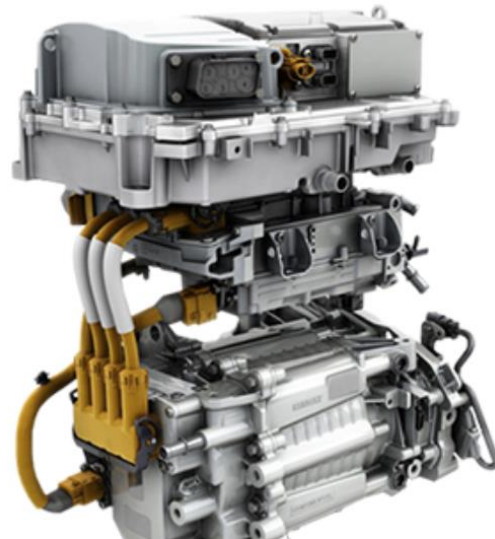


Figura 10: Conjunto eléctrico motopulsor de Renault [6].

Como se ha comentado en el párrafo anterior, los sistemas de propulsión gasolina y Diesel son los más conocidos y desarrollados hoy en día, por ello, se va a realizar una breve explicación de su funcionamiento, no sin antes introducir la definición de motor.

Un motor es un dispositivo que produce energía mecánica procedente de cualquier tipo de energía, siendo energía térmica extraída de un fluido compresible en el caso del motor térmico. Para generar esta energía térmica, la combustión se puede realizar externamente al fluido o en el propio fluido, siendo en este caso una mezcla de combustible y aire. Son los conocidos motores de combustión externa e interna [7].

De acuerdo con el proceso de combustión, los MCIAs se dividen en:

- **Motores de encendido provocado, MEP**

También conocidos como motor Otto y motor de encendido por chispa, tienen como particularidad que se produce el inicio de combustión mediante la aportación de energía externa, siendo en motores modernos mediante el salto de una chispa estimulada por una bujía. Para conseguir un rendimiento óptimo, este pulso se debe de provocar en el instante exacto. Dependiendo del lugar donde se realice la mezcla de aire y combustible, están los motores de inyección indirecta o directa. En los primeros, esta mezcla se produce fuera del cilindro y en los segundos, dentro del cilindro. Esto permite que se alcancen mayores rendimientos gracias a una combustión más precisa y eficiente.

- **Motores de encendido por compresión, MEC**

Este tipo de motor es conocido como Diesel. A diferencia de los anteriores, no se requiere de ningún sistema adicional para realizar la combustión. En estos motores, la mezcla se autoenciende cuando se producen unas condiciones de temperaturas y presiones elevadas en la cámara de combustión. Otra diferencia que destacar es una mezcla aire y combustible heterogénea, es decir, la combustión se producirá en aquellas zonas que cumplan unas condiciones adecuadas.

Según el número de revoluciones por ciclo, los motores se pueden diferenciar en cuatro tiempos y dos tiempos. Sin embargo, la gran mayoría del parque automovilístico cuenta con motores de cuatro tiempos, es decir, en un ciclo de trabajo se realizan dos revoluciones del cigüeñal completando un total de 720° . En este proceso se distinguen cuatro etapas sucesivas:

- Admisión: sucede la apertura de las válvulas de admisión y el cierre de las de escape. Al bajar el pistón provoca una onda de depresión que absorbe la mezcla

por medio de la tobera de admisión. Cuando el pistón se encuentra en el PMI, punto muerto inferior, las válvulas de admisión se cierran.

- Compresión: una vez alcanzado el PMI, el pistón comienza a subir buscando de nuevo el punto más alto llamado punto muerto superior, PMS. Dependiendo de la tecnología, en este trayecto se genera la chispa por medio de la bujía en los MEP, o se inyecta el combustible en los MEC.
- Expansión: se produce la combustión elevando la presión permitiendo que el pistón se desplace al PMI nuevamente. Esto produce la generación de trabajo que permite la producción de energía mecánica.
- Escape: cuando el pistón se encuentra en el PMI se abren las válvulas de escape permitiendo la expulsión de los gases de escape.

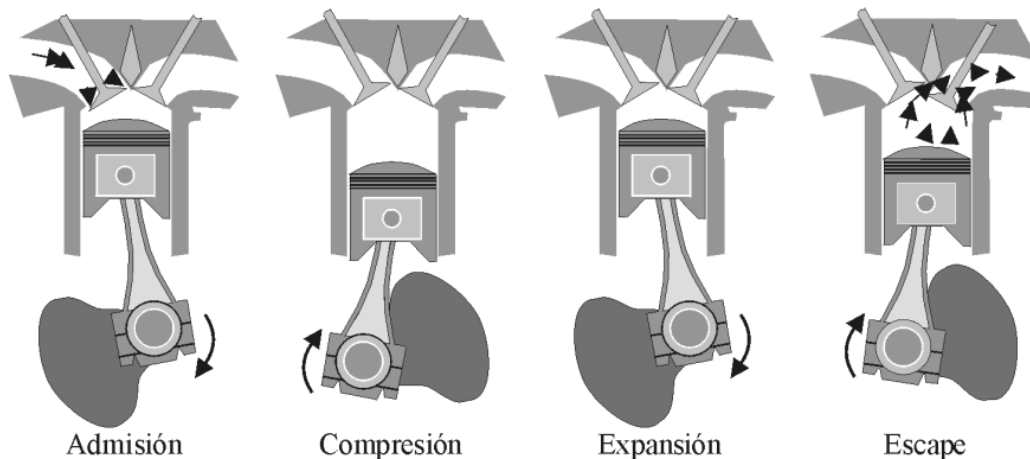


Figura 11: Fases de un motor 4T [7].

En un proceso real, ninguno de estas etapas ocurre en los puntos muertos a causa de que la combustión no ocurre a un volumen constante y el aire es compresible, teniendo que decidir el momento óptimo en el que abrir o cerrar las válvulas, expuestos a continuación.

- Avance en la apertura de admisión (AAA).
- Retraso en el cierre de admisión (RCA).
- Avance en la apertura de escape (AAE).
- Retraso en el cierre de escape (RCE).

- Avance de encendido (AE) o avance de inyección (AI).

Estos ajustes se recogen en un diagrama de distribución que representa un ciclo completo de 720° para un motor de 4T.

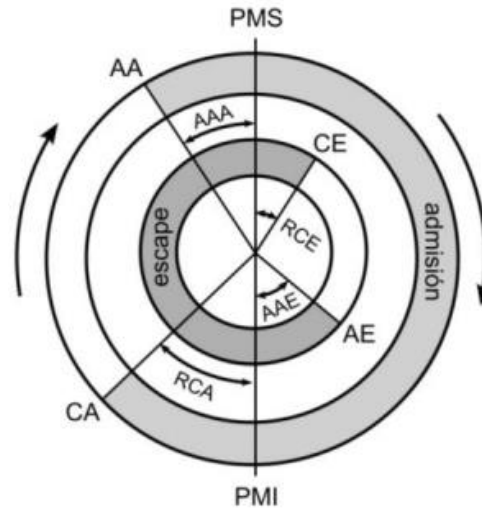


Figura 12: Diagrama de distribución para un motor de cuatro tiempos [7].

3.5. Transmisión en rueda de un automóvil

El sistema de transmisión de un automóvil se encarga de transmitir la potencia y el par generado desde el motor hasta las ruedas motrices. Para ello, se utilizan una serie de elementos que serán explicados más adelante.

Primero de todo, dependiendo de que ruedas son las motrices, existen varios tipos de tracción. Para estas variantes se va a tener en cuenta que el motor se encuentra ubicado en la parte delantera del automóvil.

- Tracción delantera. Este sistema es el más utilizado por su ahorro de componentes y peso ya que todos los elementos se ubican en el eje delantero del vehículo. El motor en posición transversal cuenta en un lateral con la caja de cambios a la que se acopla un diferencial que permitirá transmitir la potencia del motor a las ruedas delanteras por medio de los palieres.



Figura 13: Esquema tracción delantera de un automóvil [8].

- Tracción o propulsión trasera. En este caso, el motor se encuentra transversal u horizontalmente y el diferencial en la parte trasera, siendo conectados ambos mediante un eje de transmisión llamado cardan, transmitiendo la potencia del motor a las ruedas traseras. Al igual que en la tracción delantera, el diferencial se encuentra conectado a las ruedas mediante un palier. Es un sistema más complejo y pesado que el anterior, pero permite un mejor reparto de pesos.



Figura 14: Esquema tracción trasera de un automóvil [8].

- Tracción total. Es una mezcla de ambos sistemas, permitiendo la tracción en todas las ruedas. Para ello, cuenta con un transfer que se encarga de repartir la potencia

a los diferenciales. Además, los vehículos todoterreno montan una caja reductora que permite pares mayores para situaciones de pérdida de tracción que lo requieran.

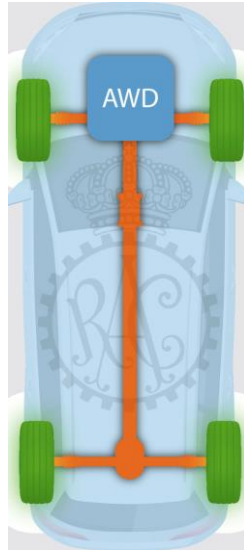


Figura 15: Esquema tracción total de un automóvil [8].

3.5.1. Sistema de transmisión secundaria

Tomando como referencia un monoplaza Formula Student, por temas de diseño, para salvar la distancia entre el piñón de la caja de cambios del motor y la corona del diferencial, existen tres posibilidades:

- Cardan: sistema que permite conectar directamente la salida de la caja de cambios con el cuerpo del diferencial mediante el uso de un árbol de transmisión y un conjunto de engranajes cónicos. Estos engranajes tienen una disposición de 90° los unos de los otros. Es un sistema limpio, con un mínimo mantenimiento con una duración muy longeva. Sin embargo, requiere de un mayor trabajo de diseño ocasionando que sea más caro y añadiendo más peso al conjunto.

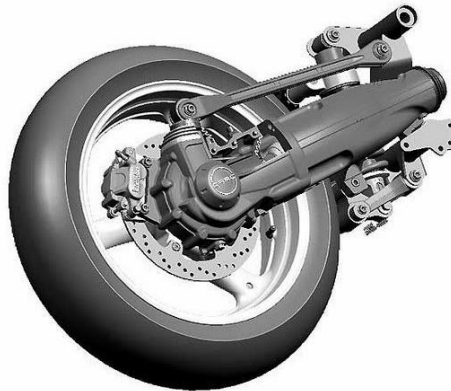


Figura 16: Junta cardan como método secundario de transmisión en una motocicleta [9].

- Cadena: permite la unión del piñón de la transmisión con un engranaje llamado corona en el diferencial siendo un sistema barato, mucho más liviano en el que se tiene una menor pérdida de potencia, aunque requiera de un mayor mantenimiento y limpieza por la suciedad provocada por los sedimentos del exterior.



Figura 17: Tipos de cadena utilizados como sistema de transmisión secundaria [9].

- Correa dentada: contiene los mismos elementos que la cadena, adaptados a una correa, y es un sistema menos silencioso y con una mayor durabilidad que una cadena, pero es poco más pesada ya que se deben de redimensionar la corona y el piñón, no apta para potencias elevadas y una mayor fragilidad en terrenos difíciles [9].



Figura 18: Junta cardan como método secundario de transmisión en una motocicleta [9].

3.5.2. Diferencial

Partiendo de la corona, la potencia debe de transmitirse a las ruedas. Puede realizarse de forma directa, uniendo ambas ruedas mediante un eje solidario, o de forma indirecta mediante la utilización de un diferencial. El primer método es más simple y económico, pero en el caso de la automoción, no es muy utilizado debido a que posee un gran número de inconvenientes decantándose por el uso de un diferencial.

Tomando como referencia un diferencial abierto que es el tipo más simple, está compuesto por los elementos señalados en la *Figura 19*.

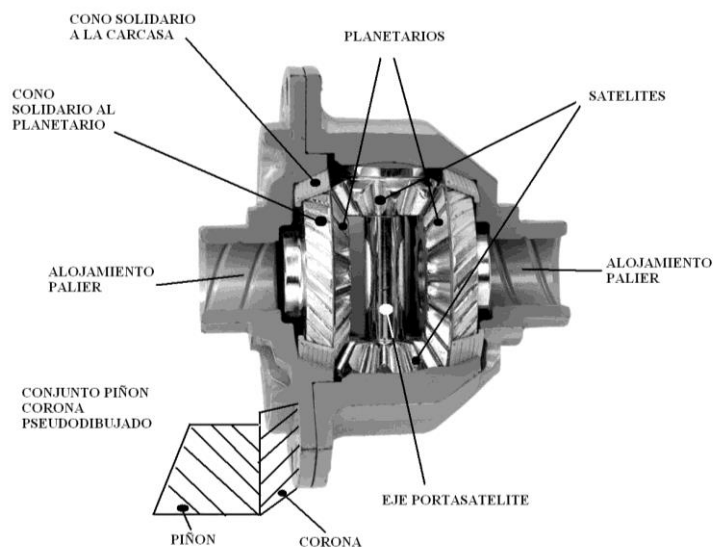


Figura 19: Distintos componentes de un diferencial abierto [10].

Para entender el funcionamiento de un diferencial, hay que conocer que el engranaje reductor está formado por el piñón que se encuentra unido al árbol de transmisión correspondiente y la corona, al grupo diferencial. En una recta, ambas ruedas giran simultáneamente, y con ello los planetarios ya que se encuentran engranados con los palieres. Sin embargo, los satélites permanecerán estacionarios. A la hora de tomar una curva con un vehículo, la rueda exterior dispone de un radio de giro mayor a la interior, luego cubrirá una mayor distancia. Con la utilización de un eje fijo, ambas ruedas tendrán una misma velocidad ocasionando que el vehículo se vuelva inestable. Sin embargo, un diferencial permitirá que un planetario gire a una velocidad más elevada respecto al otro, moviendo esta vez a los satélites, y con ello, todo el conjunto. Así, cada rueda trabajará de forma independiente pudiendo tomar de esta forma mejor una curva.

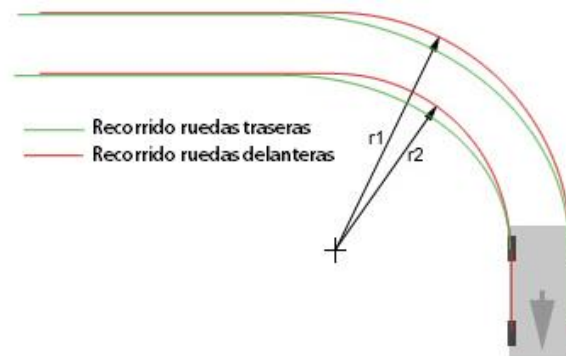


Figura 20: Trazo de las ruedas de un vehículo al tomar una curva [11].

- Diferencial abierto

Es el más simple y está compuesto por un conjunto de engranajes cónicos y planetarios como se muestra en la *Figura 19*: Distintos componentes de un diferencial abierto [10].. Cuando se produce fricción entre estos cumple la función de transmitir par individualmente a cada una de las ruedas. Sin embargo, el principal inconveniente es cuando una rueda tiene condiciones de no adherencia, este sistema transfiere todo el par a esta rueda ocasionando que la otra no pueda avanzar. Estas condiciones pueden ser un terreno con distintos coeficientes de fricción o hielo.

- Diferencial bloqueado

Este diferencial actúa muy bien antes situaciones muy bajas de adherencia girando el eje junto con el diferencial no habiendo variación de velocidad entre las ruedas. Cuando se

detecte alguna anomalía con el terreno, el diferencial disminuye la velocidad en una de las ruedas y la aumenta en la otra, oponiéndose al giro del vehículo. A medida que el radio de la curva aumenta, este efecto disminuye. Al bloquearse el eje influye en la maniobrabilidad y equilibrio del vehículo, sobre todo cuando se tienen unas condiciones de bajas velocidades donde se tiene un elevado porcentaje de producir el patinaje de las ruedas. Es muy utilizado en los vehículos 4x4.

- Diferenciales de deslizamiento limitado

Este tipo de diferenciales se cimienta en la fricción mecánica para su funcionamiento, basándose en el diferencial libre y el bloqueado.

- Por discos. Está formado por un conjunto de discos fabricados en acero endurecido a los que se le aplica una carga que permiten bloquear de forma solidaria los palieres siempre que se cumplan unas condiciones. Esta precarga se puede conseguir de dos formas distintas mediante un muelle helicoidal o una arandela Belleville, aplicando un valor mínimo de fuerza normal provocando que el diferencial se quede bloqueado con el eje cuando exista poca diferencia de par entre ruedas, por ejemplo, en recta. La segunda forma es mediante un mecanizado especial en los dientes de los satélites cargando estos discos conforme aumenta el par.

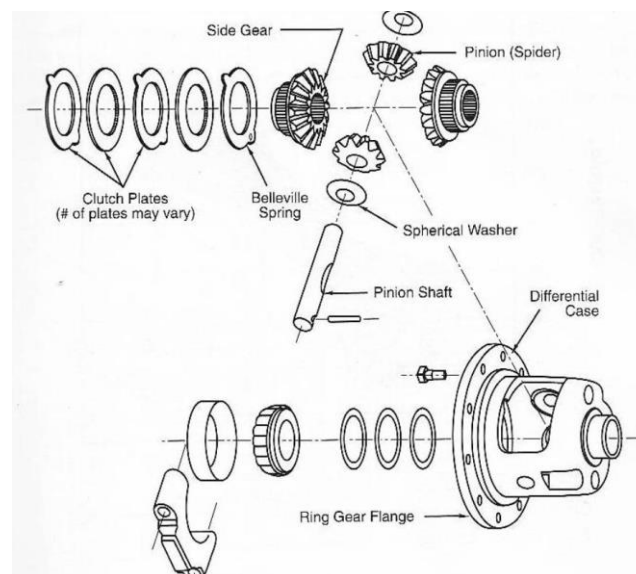


Figura 21: Explosionado de un diferencial de deslizamiento limitado por discos [11].

- Salisbury axle o de rampas. Al igual que el anterior, utiliza un conjunto de discos para bloquear los ejes, pero en esta versión, unas rampas son empujadas por el eje de los satélites dependiendo del par transmitido. Permite variar el reparto de par con base en si las condiciones son de aceleración o de frenada. De forma sencilla, se puede modificar su comportamiento con el simple hecho de cambiar la inclinación de las rampas, juegos de discos o precargar, siendo por esto muy utilizado.

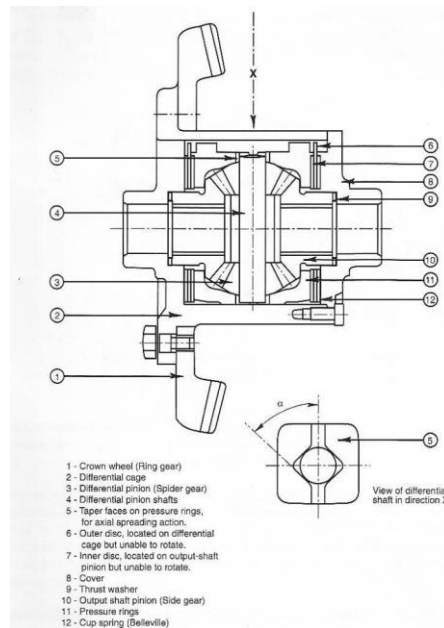


Figura 22: Componentes de un diferencial de deslizamiento limitado de rampas [11].

- Torsen. A diferencia de un diferencial libre, está compuesto por trenes de engranajes en lugar de satélites. Si se encuentra ante una situación de poco par, los engranajes estarán poco cargados por lo que tendrá un comportamiento igual al de un diferencial libre. Sin embargo, conforme el par aumenta, los trenes de engranajes friccionarán más consiguiendo el bloqueo del eje. Permiten un rango amplio de reparto de par entre los palieres dependiendo del ángulo de los engranajes, teniendo como inconveniente que no es configurable. Este diferencial transmite el par en función de la oposición que reciba de cada rueda, pero a la vez, trazando una curva se encargará que la rueda interior vaya más lenta que la exterior, aunque reciba menos par la exterior.

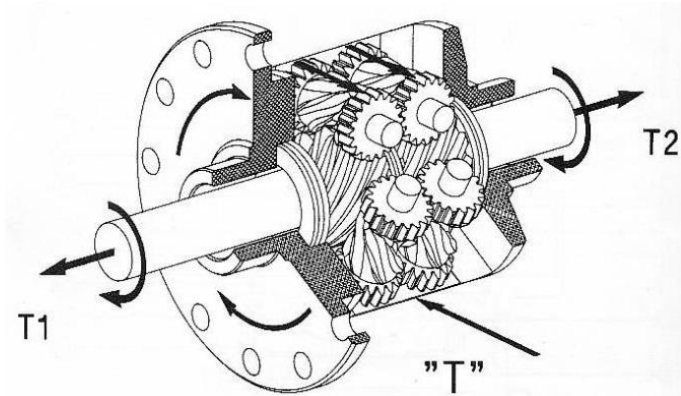


Figura 23: Elementos de un diferencial de deslizamiento limitado Torsen [11].

- Viscoso. Este diferencial utiliza un fluido viscoso para su funcionamiento. Su estructura es similar a la de un diferencial libre, pero cuenta con unos discos de fricción muy juntos bañados con este líquido. Conforme estos discos friccionan, aumenta la temperatura del fluido y, a diferencia de la mayoría de los líquidos, la viscosidad aumenta progresivamente a la vez que los semiejes se hacen solidarios. Esto sucede a partir de los 50°. Para alcanzar esta temperatura, el esfuerzo generado en una curva no es suficiente para que entre en funcionamiento este diferencial, trabajando en esta condición como uno libre. Se deben de dar condiciones de no agarre del neumático para bloquear el diferencial, ocasionando que el efecto de este diferencial no sea instantáneo.

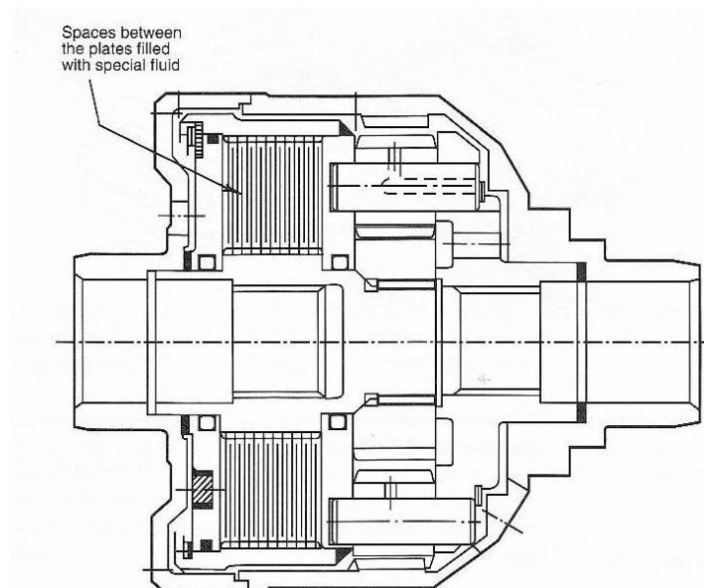


Figura 24: Sección de un diferencial de deslizamiento limitado viscoso [11].

3.5.3. Junta homocinética

Tomando como referencia que las ruedas constituyen a la masa no suspendida del vehículo y el resto de los componentes anteriormente citados, como el motor, diferencial, sistema de transmisión a la masa suspendida, es decir, aquellos componentes que son soportados por el sistema de suspensión. Por ello, la unión entre ambos conjuntos no puede ser rígida debido al movimiento que se produce en el sistema de suspensión y, en el caso del tren delantero, el pivoteo de las ruedas. Además, de la transmisión del movimiento rotacional procedente del motor hacia las ruedas.

Un elemento que cumpla con todos estos requisitos y no transmita vibraciones es la junta homocinética. Van ubicadas en los extremos de los palieres conectándolos por un lado al diferencial y por otro al motor. Los componentes internos están bañados con grasa para evitar el desgaste debido al rozamiento. Unos guardapolvos permiten que esta grasa no se contamine por agentes externos y se esparza por el resto de los elementos [12].

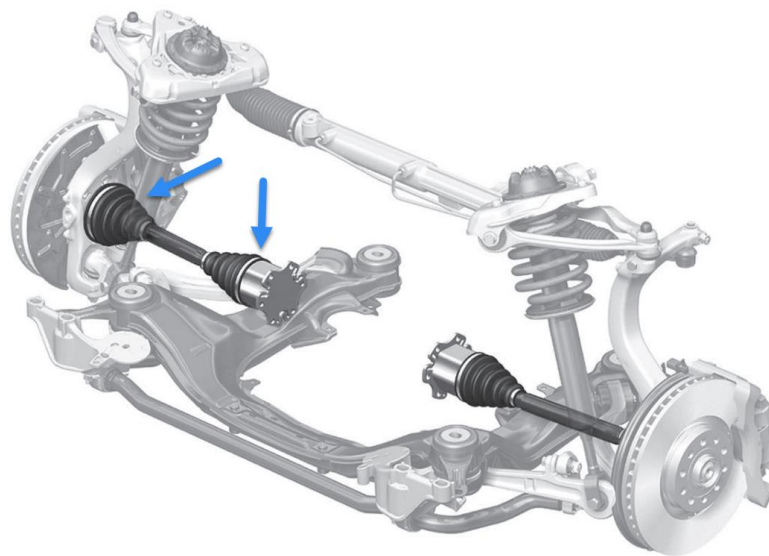


Figura 25: Juntas homocinéticas en un automóvil [13].

Dependiendo de los requisitos de funcionamiento, existen los siguientes tipos de juntas homocinéticas:

- Juntas homocinéticas fijas

Está compuesta por seis bolas periféricas alojadas en una jaula facilitando el movimiento de giro. Este tipo no admite movimientos axiales. Se ubican en el lado de la rueda y alcanzan hasta 53° de pivoteo.

Componentes:

- 1.- Campana.
- 2.- Jaula.
- 3.- Balas.
- 4.- Núcleo.
- 5.- Cubrepolvo.

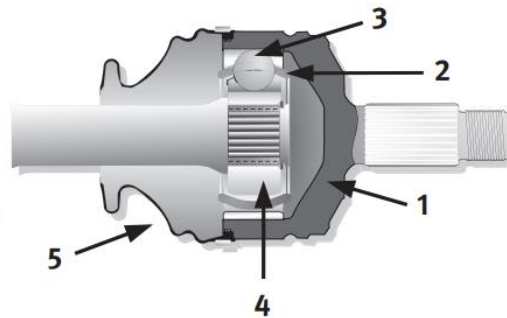


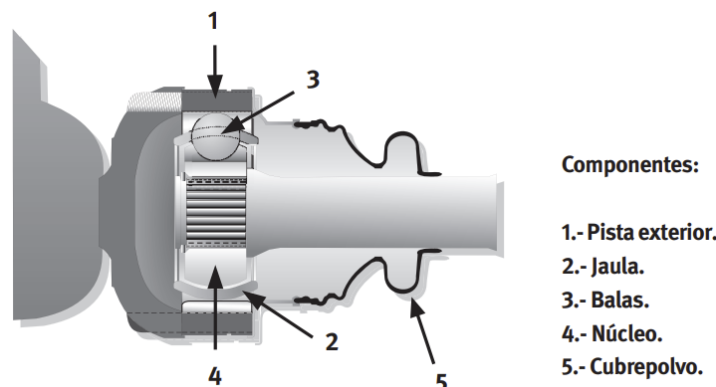
Figura 26: Componentes de una junta homocinética fija [13].

- Juntas homocinéticas desplazables

A diferencia de las anteriores, también permiten al mismo tiempo un desplazamiento axial. Se distinguen los siguientes tipos:

- De bolas.

Como característica diferenciadora es que las vías interiores tienen forma de “V”, mientras que la de las bolas es recta. Permiten hasta 22° de pivoteo y una distancia máxima de 48 mm. Suelen encontrarse en el lado del diferencial. Alta fidelidad de transmisión de par motor a elevadas velocidades.



Componentes:

- 1.- Pista exterior.
- 2.- Jaula.
- 3.- Balas.
- 4.- Núcleo.
- 5.- Cubrepolvo.

Figura 27: Componentes de una junta homocinética desplazable de bolas [13].

– De trípode

Se instalan en el lado del diferencial ya que absorben hasta un 65% de las vibraciones procedentes del motor debido a que su rozamiento entre componentes es mínimo. Transmiten una potencia ininterrumpida a las ruedas. Permiten ángulo de pivoteo de hasta 18° y desplazamientos de 55 mm. El trípode está compuesto por tres tocones, ensamblados mediante un rodamiento de agujas en contacto con los rodillos de rodadura exteriores. Dentro de la campana existen unas vías de rodadura para que los rodillos exteriores permitan el desplazamiento lineal. Estos rodamientos de agujas tienen la función de transmitir las fuerzas procedentes del diferencial al palier.

Componentes:

- 1.- Trípode.
- a) Rodadura
- b) Agujas
- c) Seguro
- 2.- Tulipán.
- 3.- Pista recta.
- 4.- Cubrepolvo.

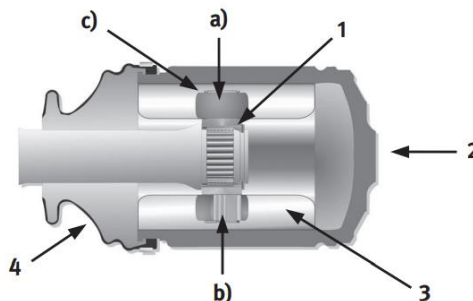


Figura 28: Componentes de una junta homocinética desplazable de trípode [13].

– Circulares de trípode

Cada tocón del trípode está compuesto por tres rodillos independientes que, al igual que las anteriores juntas, se deslizan por unas vías interiores, en este caso, en forma de ranura. Al tener forma circular, los tocones se desplazan parecido a un rodamiento oscilante. Esto asegura una transmisión uniforme y una absorción de golpes y choques de hasta un 70%. Se eligen cuando se dan condiciones de par motor elevados. Permiten ángulos de pivoteo máximos de 18° y un desplazamiento máximo de 40 mm.

Componentes:

- 1.- Pista recta.
- 2.- Rodamientos.
- 3.- Trípode.
- 4.- Cubrepolvo.

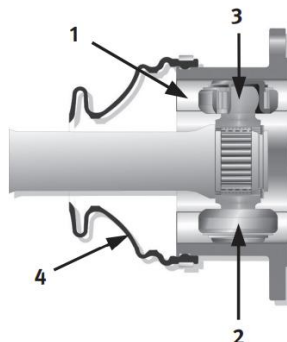


Figura 29: Componentes de una junta homocinética desplazable circular de trípode [13].

- Doble Offset (Do)

Se instala en el lado del diferencial donde hay un espacio reducido de montaje. Cuenta con un diseño combinando entre la junta homocinética desplazable de trípode y de bolas en forma de cono. Sus vías de rodadura son rectas y permite unos ángulos de pivoteo máximos de 22° y desplazamientos de 55 mm.

Componentes:

- 1.- Pista recta.
- 2.- Jaula.
- 3.- Balas.
- 4.- Núcleo.
- 5.- Cubrepolvo.

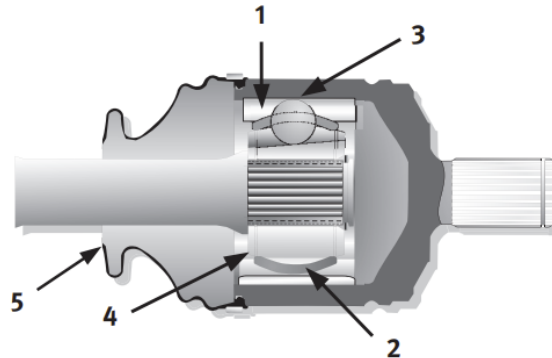


Figura 30: Componentes de una junta homocinética desplazable doble offset [13].

3.5.4. Palier

El par procedente del motor y la transmisión se debe de transmitir a las ruedas, permitiendo desplazar al vehículo hacia delante o hacia atrás. Para salvar la distancia entre el diferencial y la rueda existen unos semiejes llamados palieres que deben de cumplir las siguientes funciones:

- Transmitir el par a las ruedas con las que se encuentre ensamblado.
- Girar a las elevadas velocidades requeridas por el vehículo.
- Permitir ángulos de la dirección o la suspensión sin perder transmisión de giro.
- Misma velocidad de entrada que la de salida para obtener el máximo rendimiento en el eje de movimiento.

Las uniones cardan simples no cumplen con la mayoría de estos requisitos, por ello es necesario de la utilización de juntas homocinéticas. Dependiendo del tipo de tracción del vehículo contará con dos o cuatro palieres, siendo alguno de ellos de distinta longitud por su acople con el grupo diferencial. Sus extremos se encuentran estriados en los que van

ensambladas unas juntas homocinéticas que permiten el giro y el desplazamiento axial. Además, cuenta con unas ranuras donde fijar dichas juntas mediante unos circlips.



Figura 31: Palier junto con junta homocinética fija. Elaboración propia.

El material más utilizado por los fabricantes de automoción para la fabricación de estos semiejes es el acero, más específicamente las aleaciones de acero, según la norma AISI, 4140 o 4340 que tienen elevadas capacidades de soportar esfuerzos torsores y ser resistentes frente a la fatiga. En la competición se puede utilizar materiales como el aluminio o la fibra de carbono.

3.5.5. Elementos del interior de la rueda

- **Buje**

El buje es una pieza compleja que cumple muchas funciones [14]. A continuación, se encuentran detalladas cada una de ellas:

- Giro solidario con la llanta, siendo encajada en un sistema de fijación y atornillada por una tuerca.
- Eje de apoyo de la mangueta, separados por dos rodamientos, absorbiendo las fuerzas procedentes del neumático transmitiéndolas a la mangueta, y esta, a la suspensión. Dichas fuerzas son el rozamiento de la rueda con el asfalto, el peso o la fuerza centrífuga.
- Unión con el sistema de transmisión mediante las homocinéticas soportando el par de torsión procedente del motor.
- Acoplamiento del disco de freno a un sistema de fijación mediante cuatro pernos, soportando las fuerzas de frenado y de movimiento del propio vehículo, siendo más críticas en el eje delantero que en el trasero.

Como se muestra en la *Figura 32*, se consigue distinguir los distintos sistemas que se encuentran unidos al buje.

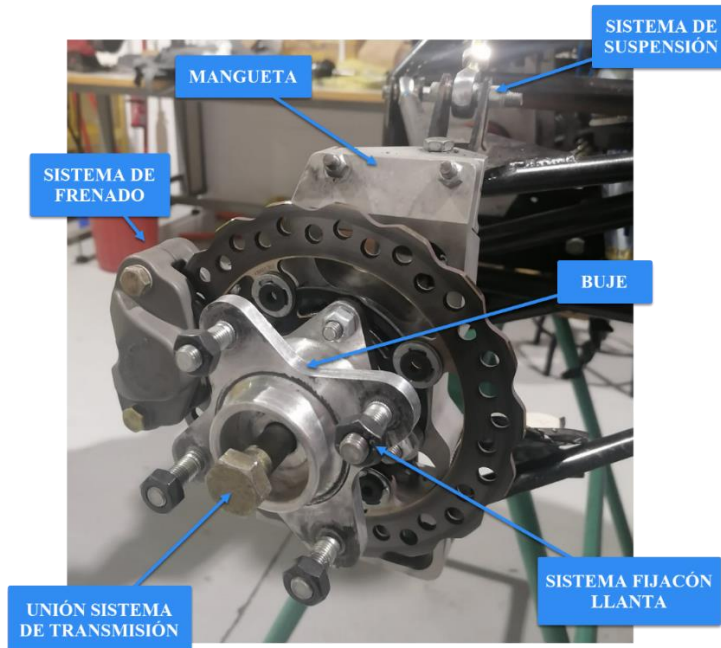


Figura 32: Interior de rueda trasera M22RT. Fuente: Elaboración propia.

En un vehículo se distinguen dos tipos de bujes, los delanteros y los traseros. Aunque ambos cumplen una función similar, la principal diferencia en vehículos de tracción trasera es que los primeros se encuentran en las ruedas no motrices atornillados al brazo de la dirección mientras que los traseros se sitúan en las ruedas motrices conectados a los extremos de los semiejes de la transmisión mediante las homocinéticas [15].

- **Mangueta**

La mangueta es un componente que influye en el sistema de frenada y suspensión, ensamblándose al buje por medio de dos rodamientos. Por un lado, esta influencia con el sistema de frenada es debida se encuentra atornillada la pinza de freno. Por el otro, los brazos del sistema de suspensión se encuentran anclados a la mangueta, transmitiendo los esfuerzos recibidos por el buje. A diferencia de la mangueta delantera, no cuenta con un anclaje para la barra de dirección.

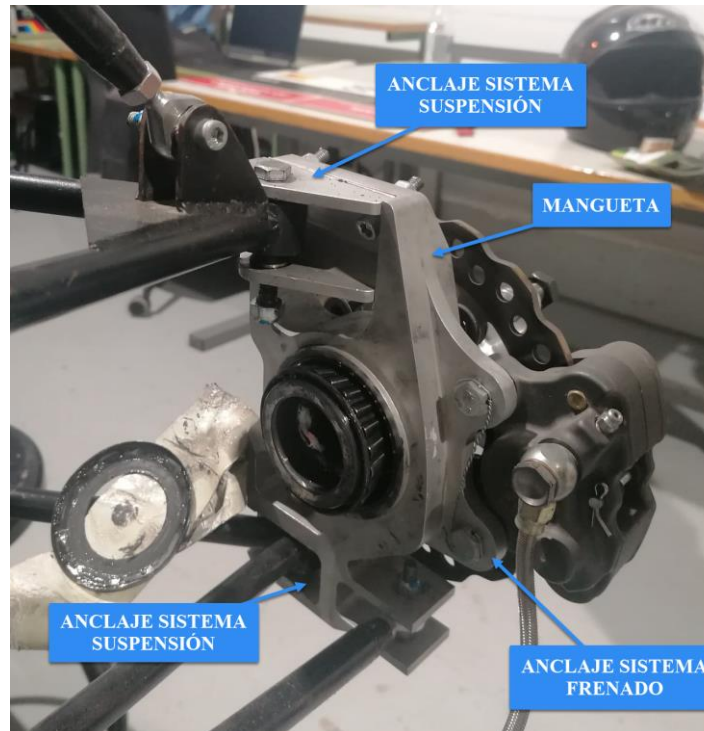


Figura 33: Mangueta trasera M22RT. Fuente: Elaboración propia.

- **Sistema de frenado**

Este sistema es un conjunto de elementos que se encargan de reducir la velocidad del vehículo llegando incluso a pararlo [16].

Existen dos configuraciones del circuito neumático:

- En paralelo o II: Al actuar el pedal de freno, la presión del líquido se distribuye por separado en cada eje pudiéndola regular mediante un repartidor de frenada.
- En cruz o X: En esta variante, al actuar el pedal de freno, la presión del líquido se distribuye en diagonal. El inconveniente de este circuito es cuando se realiza una frenada brusca se encuentran presiones distintas en las ruedas de un mismo eje pudiendo ocasionar la pérdida del control del vehículo.

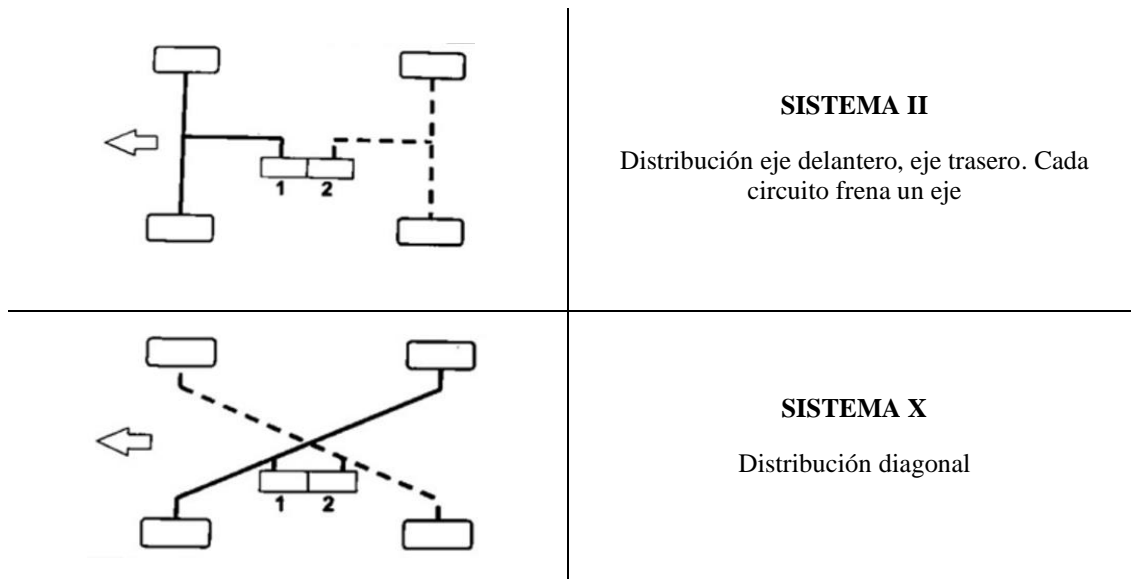


Figura 34: Configuraciones del circuito de frenado de un vehículo [17].

Mediante unas bombas que se actúan al pisar el freno, se distribuye la presión del líquido por el circuito. Para salvar la distancia entre el pedal de freno y las pinzas de freno, se utilizan latiguillos de goma o metálicos.

Existen dos tipologías de frenos de fricción: los frenos de disco y los frenos de tambor. En una frenada, se genera una energía cinética procedente del vehículo disipándose en forma de calor por el rozamiento de dos superficies. En los frenos de disco esto se produce por el rozamiento entre el disco y la pastilla de freno, accionada por la presión generada en el líquido por el pedal de freno. En el caso de los frenos de tambor, al accionar el freno la zapata interior es accionada rozando con el tambor [16].

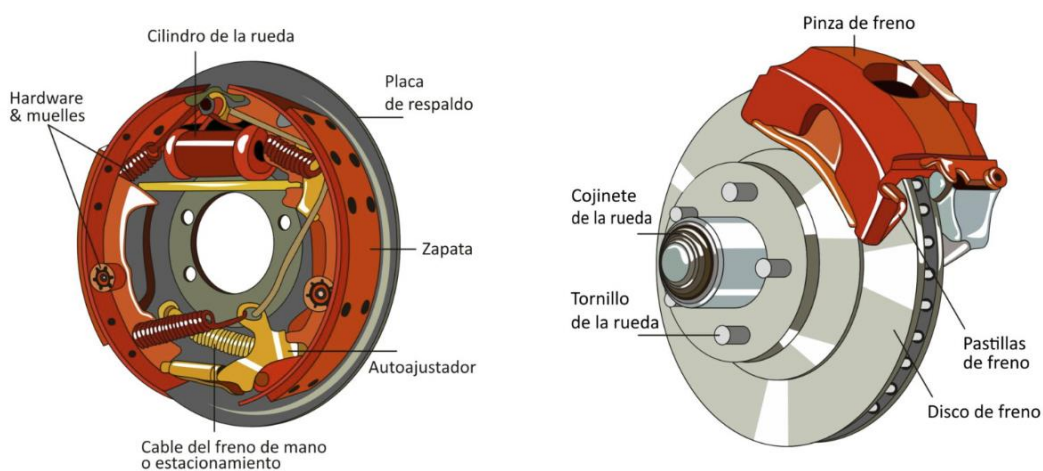


Figura 35: Partes freno de tambor (izquierda) Partes freno de disco (derecha) [18].

- Pinzas de freno

Las pinzas de freno albergan en su interior uno pistón o varios que es empujado por el líquido hidráulico al accionar el pedal freno, desplazando las pastillas de freno hacia el disco. Según la forma de actuación, se diferencian en pinzas flotantes y pinzas fijas.

Las pinzas flotantes están formadas por una parte fija anclada a la mangueta y otras móviles desplazadas por la presión del líquido hidráulico generada. A medida que ésta aumenta, el pistón se desplaza hasta contactar con el disco. Si se vence la fuerza que ejercen las partes móviles, también se moverán hacia el disco formando una especie de sándwich las pastillas con el disco, cumpliéndose así las condiciones de frenado. Tienen como inconveniente que no generan una presión de frenada homogénea.

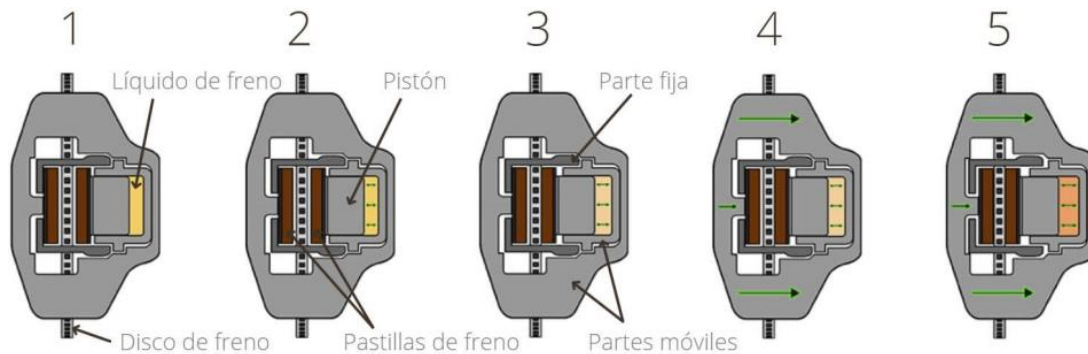


Figura 36: Secuencia de funcionamiento pinza de freno flotante [17].

Las pinzas fijas, en cambio, generan un reparto de presión homogéneo ya que disponen de un número par de pistones, encargándose cada grupo accionar su pastilla correspondiente. Esto permite un contacto uniforme por ambas caras.

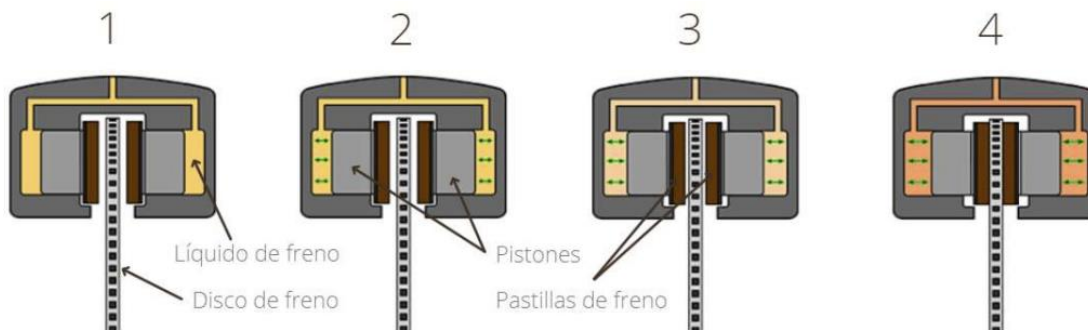


Figura 37: Secuencia de funcionamiento pinza de freno fija [17].

– Discos de freno

Este componente friccionado con las pastillas de frenos permite la desaceleración del vehículo ya que los discos se encuentran fijos al buje, transfiriéndole dicha desaceleración. Se encuentran muchas formas de clasificarlos, pero según su construcción se dividen en flotantes y fijos.

En los discos flotantes se distinguen por separado la zona de fricción y la corona. Ambas partes se unen mediante los bobbins, cilindros que permite corregir un desviamiento transversal en caso de un mal montaje del conjunto. Además, cuenta con arandelas onduladas, planas y un circlip para garantizar su fijación. La gran ventaja es que es un conjunto más ligero debido a que el material de la zona de fricción suele ser fundición gris, a diferencia de la corona que suele estar fabricada de aluminio.



Figura 38: En la parte de arriba se muestra un Bobbin y arandela ondulada en la inferior una arandela plana y circlip de un freno flotante [17].

Los discos fijos aúnan en uno la zona de fricción y la del soporte, siendo mucho más sencillo su montaje.

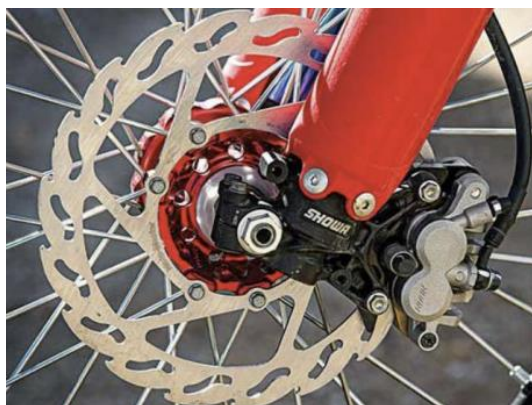


Figura 39: Ejemplo disco de freno fijo [17].



Figura 40: Ejemplo disco de freno flotante [17].

3.6. Diseño de ejes

3.6.1. Análisis de cargas y esfuerzos

- Torsión

Para este análisis se aplicaron las siguientes hipótesis:

- Las secciones transversales y planas seguirán del mismo modo una vez aplicada la torsión, al igual que una línea radial permanecerá recta.
- El material cumple con la ley de Hooke.
- Sobre la barra actúa un par de torsión puro y las secciones bajo consideración se encuentran alejadas del punto de aplicación de la carga y de un cambio de diámetro.

Tomando como referencia la *Figura 41*, el par de torsión T aplicado a una barra se puede representar con unas flechas en la superficie de la barra mostrando la dirección o con un vector par torsión a lo largo del eje x siguiendo la regla de la mano derecha [19].

Para el cálculo del ángulo de giro de una barra circular maciza en radianes se utiliza:

$$\theta = \frac{Tl}{GJ} \quad (1)$$

Donde T : par de torsión

l : longitud

G : módulo de rigidez

J : segundo momento polar del área

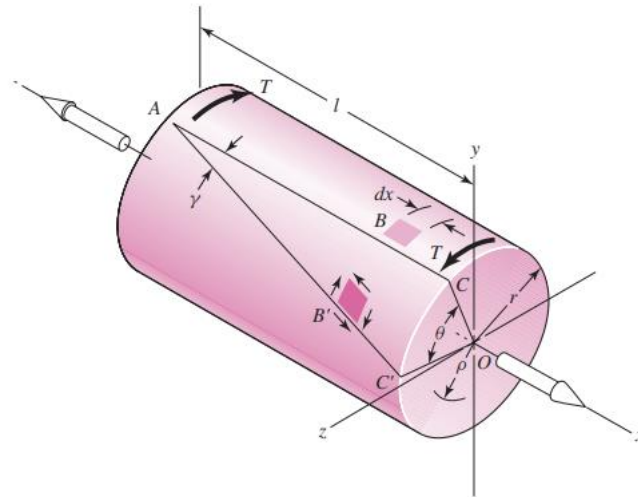


Figura 41: Análisis de esfuerzos y deformaciones en una barra [19].

A causa de este par de torsión, se generan esfuerzos cortantes en la sección transversal. Siendo estos esfuerzos proporcionales al radio ρ , están dados por:

$$\tau = \frac{T\rho}{J} \quad (2)$$

Si se toma r como el radio exterior de la superficie, se tiene:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{T r}{J} \quad (3)$$

Tomando la ecuación (2) se aplica solo a secciones transversales redondas sólidas,

$$J = \frac{\pi d^4}{32} \quad (4)$$

Y para secciones transversales redondas huecas, siendo d el diámetro de la barra:

$$J = \frac{\pi (d_o^4 - d_i^4)}{64} \quad (5)$$

Donde o e i se refieren al diámetro exterior e interior, respectivamente.

Un momento torsor provoca en una sección circular una distribución lineal de tensión a cortadura, siendo máxima en las fibras externas, como se muestra *Figura 42*:

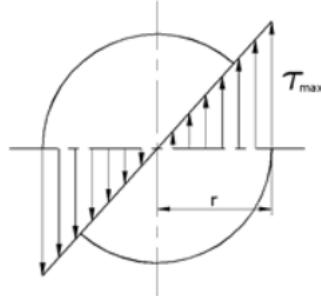


Figura 42: Distribución tensión cortante en una sección sólida [20].

Para obtener el valor de la tensión, mediante la ley de Hooke se obtiene:

$$\tau = \frac{M_t r}{I_o} \quad (6)$$

Donde τ : tensión de cortadura

M_t : momento torsor

r : radio

I_o : momento polar de inercia

La distribución para una sección hueca, *Figura 43*, muestra que en el centro de la barra va disminuyendo hasta llegar a ser nula. Por ello, a la hora de diseñar ejes es importante que sean barras huecas y no macizas para ahorra peso.

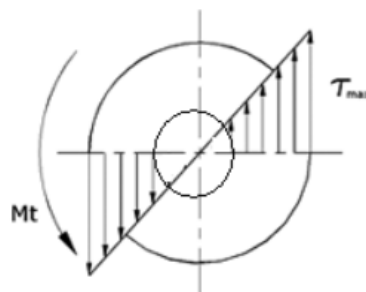


Figura 43: Distribución tensión cortante en una sección hueca [20].

3.6.2. Método de diseño a fatiga

A la hora de realizar un diseño de un eje es bastante importante tener en cuenta la resistencia a fatiga de este. Es un problema que provoca cerca del 90 % de las roturas de dichos elementos, ya que la fatiga es un fenómeno que se produce en piezas sometidas a esfuerzos fluctuantes en el tiempo.

La fractura que se origina por la fatiga comienza por una grieta imperceptible para el ojo humano, incluso para métodos de ensayo como ultrasonidos o rayos x. Esta grieta es generada por alguna discontinuidad del material como puede ser un cambio de sección, defecto de mecanizado... ocasionando una disminución de la sección resistente y, con ello, el esfuerzo aumenta favoreciendo el crecimiento de la grieta. Una vez la sección restante no sea capaz de soportar el esfuerzo, romperá bruscamente de forma repentina y sin deformación previa.

En el proceso de rotura se distinguen tres etapas:

1. Etapa I. El material siempre cuenta con inclusiones y falta de homogeneidad, aunque se haya realizado un proceso de mecanizado perfecto. Estas imperfecciones crean nucleaciones de esfuerzos que aumentarán la posibilidad de la creación de grietas. Esta situación se agrava en materiales frágiles debido a que existe una mayor sensibilidad a la entalla.
2. Etapa II. Al aparecer ya una microgrieta, se crean concentraciones de esfuerzos que ocasionarán que se siga abriendo. Al principio, el crecimiento suele ser lento, pero se irá elevando. Condiciones como la corrosión ayudan a acelerar el proceso.
3. Etapa III. La grieta sigue creciendo hasta alcanzar una sección resistente mínima que produce la rotura instantánea.

Es fácil de identificar la fractura por fatiga ya que se diferencian dos zonas. La primera es el avance progresivo de la grieta mientras que la segunda tiene el aspecto de una rotura frágil.

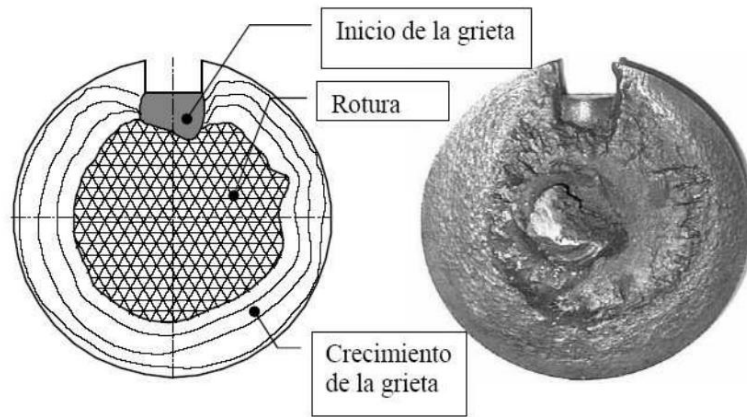


Figura 44: Diferenciación etapas de la fatiga [21].

Para intentar predecir la rotura por fatiga, Wöhler al realizar un estudio en el que sometiendo los ejes de los ferrocarriles a cargas invertidas obtuvo un diagrama S-N. Este diagrama escenificaba aquellos valores de carga que ocasionaban la rotura en función del número de ciclos. De esta forma, descubrió un valor de esfuerzo aplicado el cual si no se sobrepasaba no ocurrían roturas llamado límite de fatiga.

Del ensayo se extraen una nube de puntos dando como resultado para materiales ferrosos la *Figura 45*.

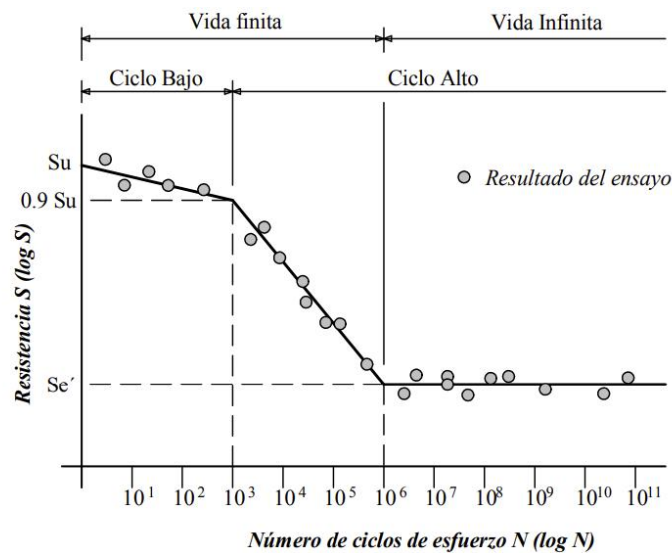


Figura 45: Diagrama S-N para materiales ferrosos [21].

Como se puede comprobar, se diferencian tres zonas en función del número de ciclos:

1. Hasta $N \approx \leq 10^3$. Es llamada como fatiga de bajo ciclo y a nivel de diseño se considera como un trabajo a cargas estáticas.

2. Desde $N \approx 10^3$ hasta $N \approx 10^{6\sim 7}$ ciclos. Este intervalo pertenece a la zona de diseño a vida finita en el que existe una relación entre la resistencia y el número de ciclos.
3. A partir de $N \approx \geq 10^{6\sim 7}$. Da igual el esfuerzo que se aplique que no ocurrirá la rotura, tomando el nombre de Límite de Fatiga Se' .

Una vez conocido esto, el límite de fatiga se puede definir como el máximo esfuerzo invertido aplicado a un cuerpo por vida infinita.

Para obtener Se' , existe una correlación con el límite de rotura en tracción Su de los materiales, estando entorno al 40% - 60%. Teniendo como resultado para los aceros:

$$\begin{aligned} Se' &= 0,5 Su & Su &\leq 1400 \text{ MPa} \\ Se' &= 700 \text{ Mpa} & Su &> 1400 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (7)$$

- Factores que modifican el límite de fatiga

Conseguir las condiciones de ensayo de la probeta en un laboratorio es una tarea casi imposible, por ello, se identificaron una serie de factores que podrían corregir esto. Partiendo de la ecuación de Marin:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S_e' \quad (8)$$

Donde k_a = factor de acabado superficial

k_b = factor de tamaño

k_c = factor de la carga

k_d = factor de temperatura

k_e = factor de confiabilidad

S_e' = límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria

S_e = límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso.

- Factor de acabado superficial (k_a). Este factor está asociado a las irregularidades superficiales del acabado superficial que tenga la pieza y los esfuerzos residuales al ser mecanizado.

$$k_a = a S_u^b \tag{9}$$

donde S_u : límite de rotura a tracción (Mpa)

a y b: factores de acabado que se encuentran en la *Tabla 2*.

Tabla 2: Valores para factores de acabado a y b.

Acabado superficial	Factor a	Exponente b
Rectificado	1,58	-0,085
Mecanizado o Estirado en frío	4,51	-0,265
Laminado en caliente	57,7	-0,718
Forjado	272	-0,995

Pudiendo también obtener el factor k_a mediante la representación de la *Figura 46*:

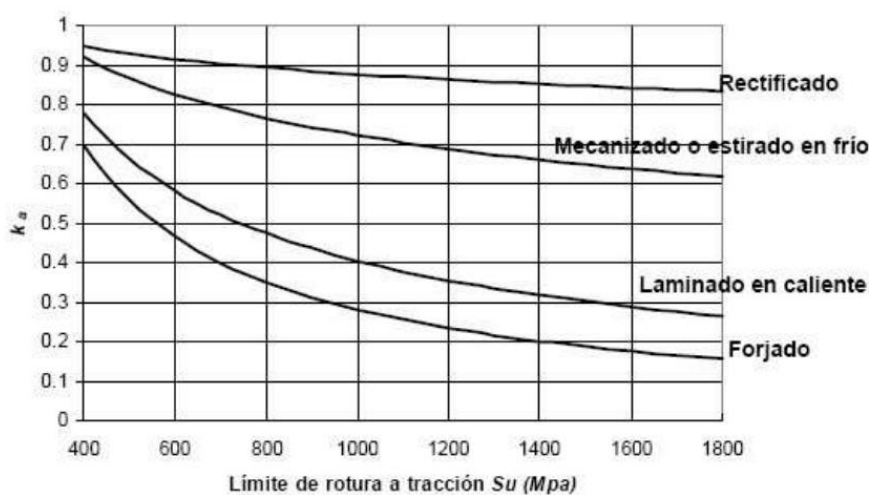


Figura 46: Representación gráfica ecuación acabado superficial [20].

- Factor de tamaño (k_b). Conforme aumenta la sección de la pieza, su resistencia a fatiga es menor debido a que se eleva la posibilidad de impurezas y disminuye la homogeneidad del material. Este factor se expresa para flexión y torsión:

$$k_b = 1 \quad d \leq 8 \text{ mm} \quad (10)$$

$$k_b = 1,189d^{-0,097} \quad 8 \text{ mm} < d \leq 250 \text{ mm}$$

- Factor de la carga (k_c). En este caso, para un ensayo de carga torsional inversa se estima que $k_c=0,577$.
- Factor de temperatura (k_d). Con la temperatura las propiedades mecánicas se ven afectadas. En condiciones normales este factor tiene un valor de 1.
- Factor de confiabilidad (k_e). Se recogen aquellos efectos que no se han considerando en los factores anteriores, como la corrosión, tratamientos térmicos... Este factor se recoge en la *Tabla 3*:

Tabla 3: Valores para el factor de confiabilidad

Confiabilidad %	Factor de confiabilidad (k_e)
50	1
90	0,897
95	0,868
99	0,814
99,9	0,753
99,99	0,702

Normalmente los elementos de máquinas o automóviles cuentan con secciones no uniformes, como en este caso, para albergar engranajes, ranuras o taladros para los clips de seguridad. Esto ocasiona una alteración en la distribución de tensiones internas, alcanzando esfuerzos mayores. La relación entre el esfuerzo máximo generado y el inicial se establece con el factor de concentración de esfuerzo teórico k_t :

$$k_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \quad (11)$$

donde σ_{max} : esfuerzo máximo

σ_0 : esfuerzo nominal

Dependiendo de los esfuerzos sometidos sobre el elemento y las protuberancias que tenga, existen tablas con valores establecidos de factores de concentración de esfuerzos, tomando como ejemplo la *Figura 47*:

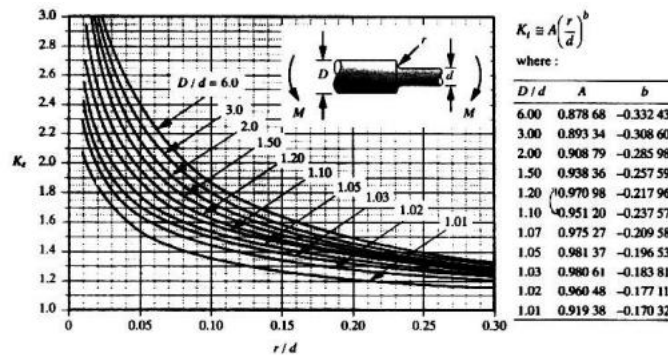


Figura 47: Valores esfuerzo concentración en flexión en una sección circular con cambio de sección y redondeo [21].

En las fases de diseño, se considera una sensibilidad de entalla $q=1$. Esta sensibilidad es definida como el comportamiento de un material frente a la concentración de esfuerzo. Tomando como valor uno, el esfuerzo máximo corresponde con el teórico, es decir, $K_t = K_f$.

Por otra parte, el palier es un elemento que estará sometido a esfuerzos fluctuantes, utilizando para ello el Método Modificado de Goodman. Este método es bastante conservador, pero en este caso nos permite obtener un resultado bastante a fin con lo esperado.

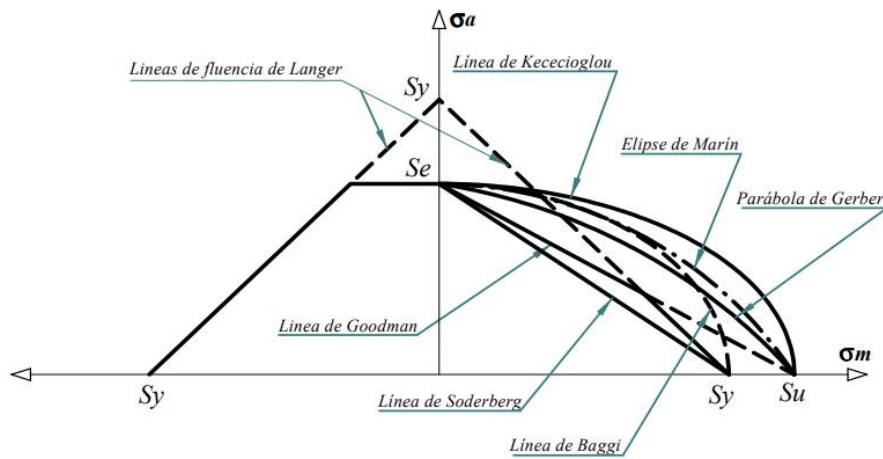


Figura 48: Distintos ensayos representando la zona segura [21].

La línea de Goodman viene representada por la siguiente expresión:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \quad (12)$$

Donde el esfuerzo medio y alternativo se determina con las fórmulas:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (13)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (14)$$

Y por último, para determinar el coeficiente de seguridad, hay que seguir la relación entre la resistencia y el esfuerzo, siendo para la línea de Goodman la expresión que se muestra a continuación:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = \frac{1}{N} \quad (15)$$

4. SOFTWARE UTILIZADO. SOLIDWORKS

La creación del gemelo digital se ha llevado a cabo mediante el Software SolidWorks-Student Edition, utilizando una licencia de uso exclusivo académico proporcionado por la Escuela de Ingeniería Industriales.

SolidWorks es un software que pertenece al sector de diseño asistido por ordenador CAD desarrollado por SolidWorks Corp., empresa filial de Dassault Systèmes, orientado al sistema operativo Windows.



Figura 49: Logo corporativo SolidWorks [22].

SolidWorks brinda muchos recursos para dar respuesta al desarrollo del producto gracias a su potente software y a la cantidad de complementos y funciones que posee. Otorga la opción de crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos del proceso de diseño.

SolidWorks contiene una amplia selección de funciones y complementos que permite seguir todo el proceso de diseño de un producto, desde su creación hasta la publicación del mismo, pudiendo gestionar cada uno de sus procesos.

4.1. Porqué la elección de SolidWorks

Existen en el mercado una amplia oferta de programas de diseño asistido por ordenador que brinda un abanico de soluciones similares como son, por ejemplo, Solid Edge o Catia V5. No obstante, la herramienta SolidWorks ha sido elegida por los siguientes motivos.

- Diseño tridimensional eficiente

La base de este programa se fundamenta en el diseño paramétrico por módulos, es decir, a la hora de crear una pieza permite el uso de fórmulas y ecuaciones para definir sus dimensiones que se muestran de forma cronológica en el árbol de operaciones. Esto

posibilita la interconexión y la automatización entre atributos, reduciendo una elevada cantidad de tiempo a la hora de realizar diseños [23].

- Compatibilidad en el mercado

SolidWorks es una empresa arraigada en el sector por lo que dispone de una amplia variedad de extensiones que permiten la conexión con otros programas consiguiendo una gran versatilidad. A nivel de usuario es una gran ventaja porque elimina posibles problemas y ahorra mucho tiempo.

- Trabajo colaborativo

Cuenta con una plataforma llamada 3DEXperience (3DX) en la que se crea un ecosistema que conecta en un mismo entorno en tiempo real a todos los departamentos que estén involucradas en un proyecto. Se pueden ver en tiempo real todos los cambios que se realizan, que personas están involucradas, incluso aquellas que se encuentran conectadas en tiempo real, pudiendo trabajar desde cualquier parte y momento ya que todo se recoge en la nube [24].

- Cantidad y calidad de complementos integrados

En el apartado de CAD 3D cuenta con una cantidad de complementos en los que permite el modelado de piezas sólidas, mecanismos, chapas, pcbs, circuitería eléctrica y representaciones visuales. Y no solo piezas sólidas, también se puede trabajar con superficies. No solo se ciñe al 2D, sino que de todos los complementos anteriores permite la creación de planos con información muy detallada.

Y, por último, cuenta con un apartado en el que se pueden crear estudios de movimiento con el que realizar videos interactivos con análisis estáticos mediante elementos finitos, análisis de fatiga, análisis térmicos entre otros tantos.

En definitiva, se puede comprobar que es una herramienta muy versátil, con una curva de aprendizaje muy rápida, que permite la realización de cualquier pieza o estudio.

4.2. Pequeño recorrido por la interfaz

Como se ha comentado anteriormente, SolidWorks es un programa muy intuitivo. Por ello, se va a realizar una explicación breve de los elementos y complementos que se suelen utilizar más.

Una vez se abre el programa, aparece una ventana emergente en la que se pueden diferenciar tres módulos principales, y estos son de izquierda a derecha:

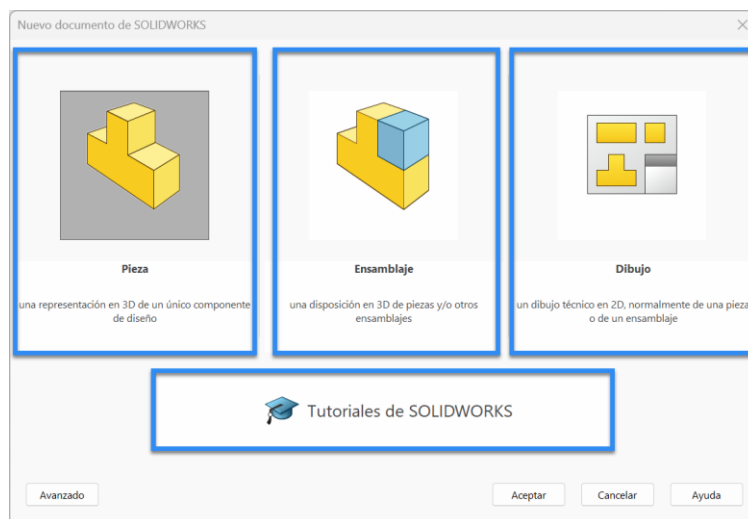


Figura 50: Ventana inicial emergente con los tres módulos principales de SolidWorks. Elaboración propia.

- Pieza. Su finalidad es el modelado de piezas individuales.
- Ensamblaje. Destinada a la creación de conjuntos de piezas llamados ensamblajes.
- Dibujo. Delineación y creación de planos técnicos de una pieza o un ensamblaje.

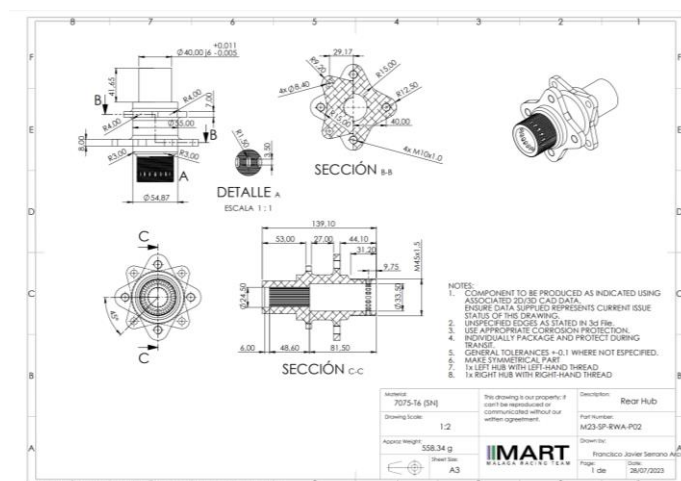


Figura 51: Ejemplo plano procedente del módulo Dibujo. Elaboración propia.

Estas tres secciones están interconectadas entre sí manteniendo la misma estructura en la que se puede diferenciar la ventana de gráficos, gestor de diseño, panel de tareas y administrador de comandos. Además, cuenta con un apartador donde se puede acceder a centenares de tutoriales de manejo del programa.

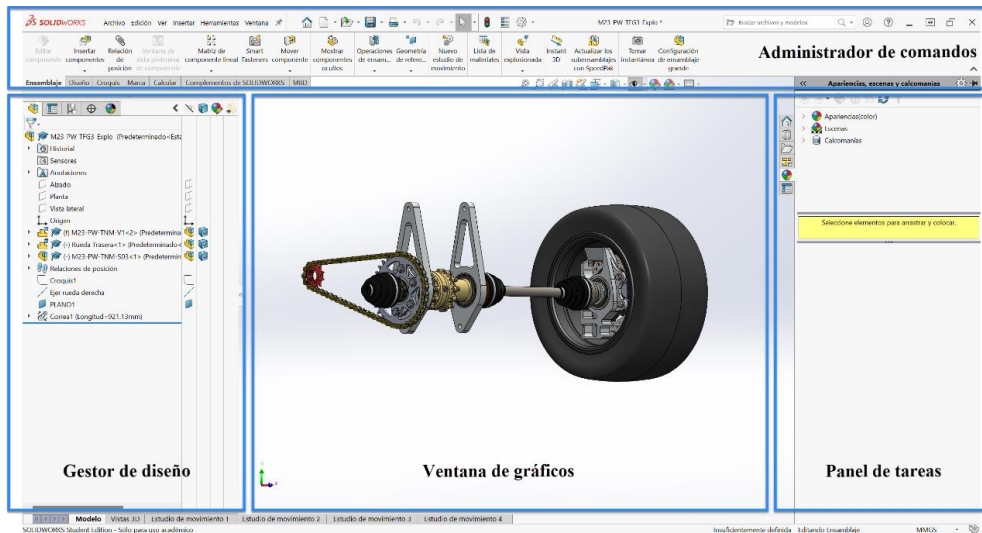


Figura 52: Ejemplo plano procedente del módulo Dibujo. Elaboración propia.

- Ventana de gráficos. Es la ventana donde se centra en la pieza que se está realizando, tomando gran porción de la pantalla. Simplemente con el uso del ratón, que permite ver desde cualquier posición el objeto modelado. Además, contiene una serie de opciones a nivel de visualización de información muy útiles, como puede ser desde ver una vista seccionada a todos los croquis que componen el modelo.

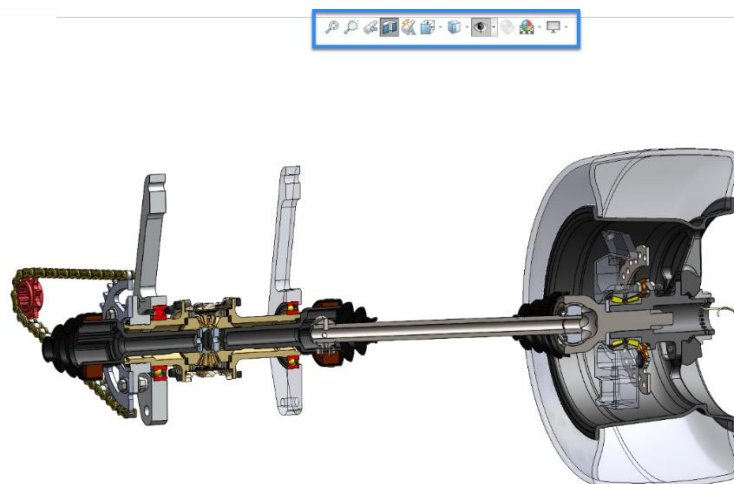


Figura 53: Vista seccionada del conjunto utilizando en varios elementos opciones de visualización. Elaboración propia.

- Gestor de diseño. Se encuentra en la parte izquierda de la venta de gráficos en el que cuenta con un desplegable con todas las acciones y configuraciones del modelo ordenadas según se han ido realizando. Se divide en: FeatureManager, PropertyManager, ConfigurationManager. DisplayManager y, alguno más en específico dependiendo del módulo en el que se esté trabajando, así como DimXpertManager, siendo visible cuando se realizan ensamblajes. En este, muestra todas las piezas y subensamblajes que forma un conjunto, pudiendo conocer y realizar un número elevado de acciones como editar las piezas, modificar sus propiedades que la vinculan al ensamblaje y un largo etcétera.

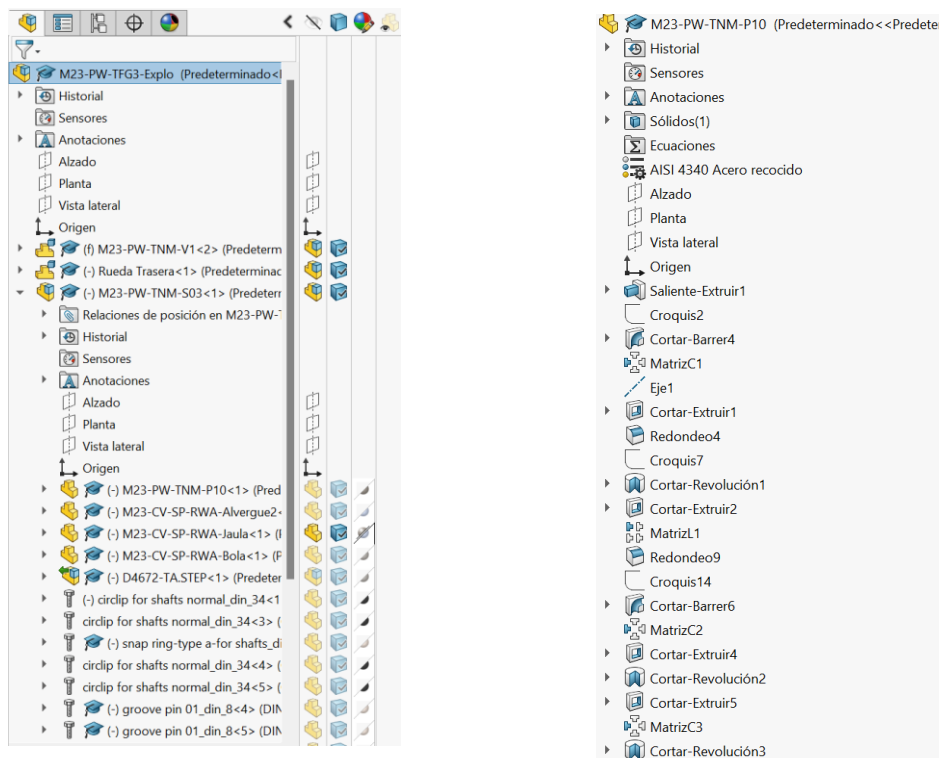


Figura 54: Vista del Gestor de diseño con la pestaña 'FeatureManager' activada del conjunto a la izquierda y de una pieza a la derecha. Elaboración propia.

- Panel de tareas. Se pueden realizar cambios en la pieza como cambiar su apariencia o el fondo de la ventana gráfica con la que dar un toque más realista a los renderizados. O usar el complemento ToolBox, en el que se pueden seleccionar centenares de componentes normalizados adaptados a la norma que rija ese país.



Figura 55: Vista del panel de tareas utilizando el complemento ToolBox. Elaboración propia.

- Administrador de comandos. Se encuentra en la parte superior de la interfaz, y dependiendo del módulo, habrá algunos cambios adaptándose al mismo. Se tomará como ejemplo el módulo de ensamblaje ya que se ha utilizado con más frecuencia.

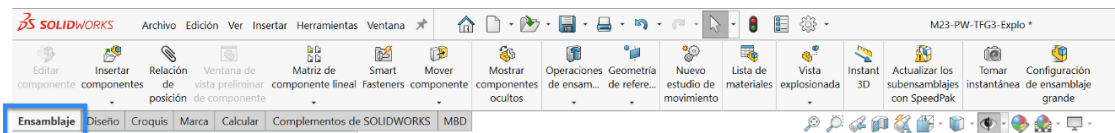


Figura 56: Barra superior de herramienta con la opción de ensamblaje activada. Elaboración propia.

Partiendo por la izquierda, se visualiza la pestaña ensamblaje en la que cuenta con una gran variedad operaciones como insertar componentes, crear relaciones de posición entre piezas, mover o girar los componentes, añadir geometrías de referencia como ejes o planos, realizar vistas explosionadas o estudios de movimiento del conjunto, entre otras muchas más.

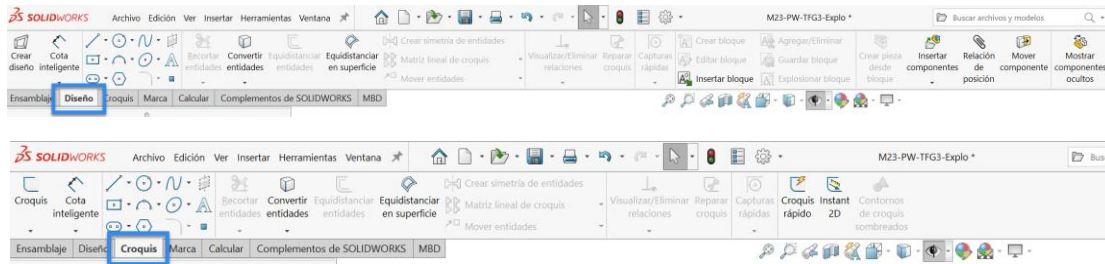


Figura 57: Opciones de los apartados ‘diseño’ y ‘croquis. Elaboración propia.

Diseño y Croquis es utilizada frecuentemente a la hora de crear modificaciones o referencias para tener en cuenta cuando se realiza el ensamblaje y sea mucho más sencillo su construcción.

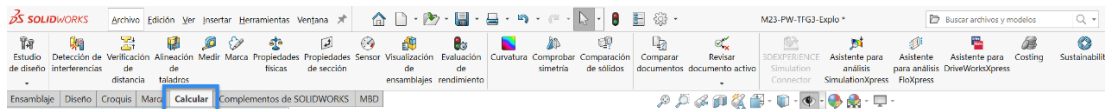


Figura 58: Opciones de Calcular. Elaboración propia.

El apartado Calcular nos permite extraer toda la información referente a propiedades geométricas y físicas de una pieza o del todo el conjunto. Además de verificaciones y asistentes para mejorar o analizar más en profundidad el modelo.

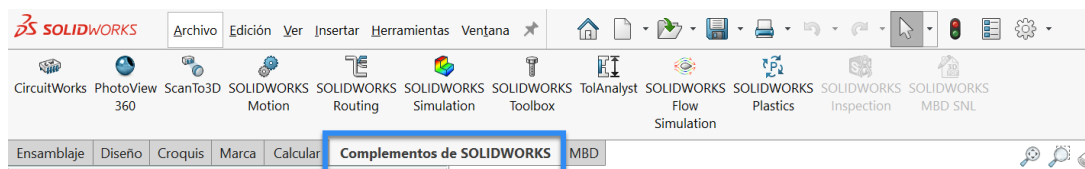


Figura 59: Pestaña ‘Complementos de SOLIDWORKS. Elaboración propia.

En la pestaña siguiente se muestra los complementos activos, pudiendo añadir más, con los que llevar a cabo renderizados, simulaciones, estudios de movimiento entre otros. Es importante tener solo activos aquellos que se vayan a utilizar para no realizar una sobrecarga computacional innecesaria consiguiendo un funcionamiento estable del programa.

5. CREACIÓN DEL GEMELO DIGITAL

La creación de un gemelo digital de tal envergadura es un proceso muy complejo y tedioso en el que es necesario de la realización de cientos de medidas para evitar producir un error humano y el propio de la herramienta de medición, llegando a la conclusión de que es imposible evitarlo y se debe de asumir cierto error. Además, la necesidad de creación de subensamblajes y estrategias para intentar un ahorro de cálculo computacional.

Para la realización de este conjunto, se ha tenido que llevar a cabo varias pruebas hasta conseguir un resultado óptimo invirtiendo unas 50 horas entre toma de medias y el modelado de ciertas piezas, cerca de 200 horas para la creación de los subensamblajes y su correcta posición en el plano y alrededor de 100 horas en búsqueda de vistas adecuadas y edición de vídeo para conseguir extractos didácticos con los que explicar el funcionamiento de los componentes o del conjunto de la transmisión de un formula student.

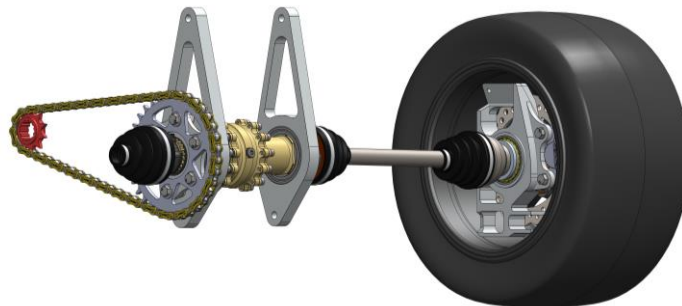


Figura 60: Gemelo digital completo de la transmisión trasera de un monoplaza formula student.
Elaboración propia.

Viendo la *Figura 60*, se puede comprobar que solo hay una rueda de las dos que tiene un monoplaza en la transmisión trasera. Esto es debido a lo citado anteriormente, es una forma de ahorrar gasto computacional para componentes que estarían duplicados y simétricos, sin una aportación de información extra. Además, permite una mejor visualización del componente a la hora de realizar los vídeos didácticos.

En los siguientes puntos, se ha detallado todos los pasos seguidos en el proceso de la creación del gemelo digital.

5.1. Componentes modelados

Algunos componentes son tomados del repositorio que cuenta el equipo MART ya que piezas como el portadiferencial o la mangueta son proyectos de fin de carrera de los propios miembros del equipo. Otros componentes que son normalizados como tornillos, arandelas o juntas son procedentes de uno de los complementos de los que dispone SolidWorks, llamado ToolBox. Por tanto, en este caso, se han modelado aquellas piezas que faltaban o que se han rediseñado en el conjunto.

- Junta homocinética fija.

Como se ha explicado en el apartado de conceptos previos, la junta homocinética fija está compuesta por una campana, jaula, núcleo y seis bolas. Para elaborar del CAD, se ha partido de una junta utilizada por la marca Suzuki en sus modelos Vitara. Realizando ingeniería inversa, se han tomado medidas mediante un pie de rey y seguido las medidas principales bridadas por el fabricante.

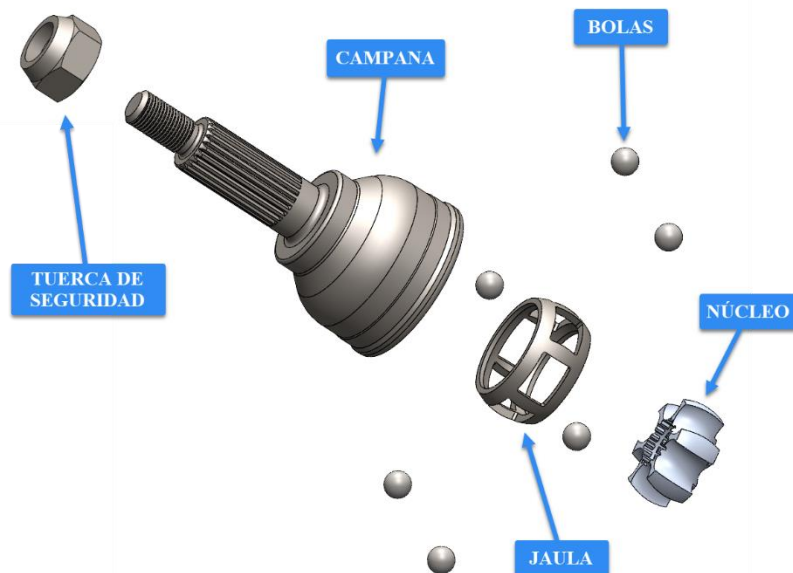


Figura 61: Explosionado subensamblaje junta homocinética fija. Elaboración propia.

De este conjunto, la campana es el componente en el más operaciones y referencias se han tomado, ya que tiene detalles como el estriado, el roscado y las cavidades internas por donde se deslizarán las bolas.

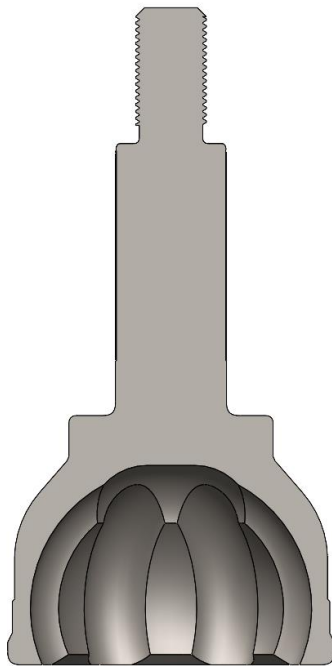


Figura 62: Vista en sección de la junta homocinética. Elaboración propia.

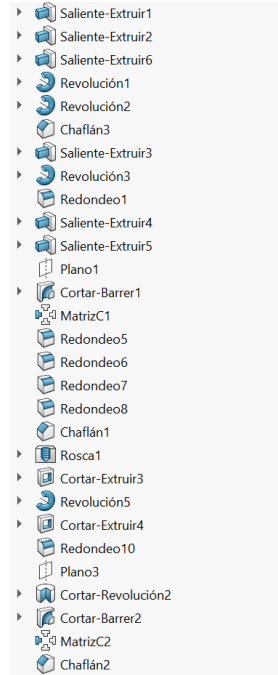


Figura 63: Operaciones realizadas para el modelado de la junta homocinética. Elaboración propia.

Por el resto de componentes se han seguido el mismo procedimiento que en la campana solo que en alguno de ellos se han tenido que ajustar las medidas para que todo el conjunto pudiese ensamblarse sin que los componentes interfiriesen entre ellos.

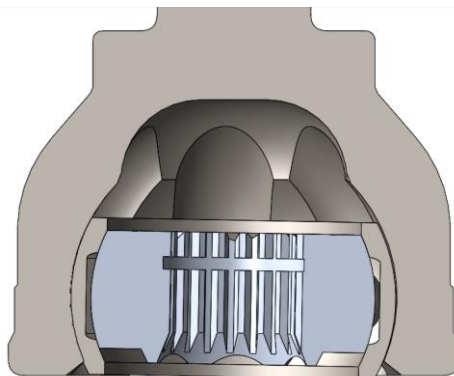


Figura 64: Vista sección interior campana de la junta homocinética. Elaboración propia.

- Tope rodamiento.

Esta pieza fabricada en aluminio tiene una forma simple pero es muy importante debido a que permite sostener al rodamiento interno del buje de la salida de su alojamiento ante esfuerzos axiales procedentes de, por ejemplo, a la hora de tomar una curva. Presionado por la homocinética, cumple esta función.

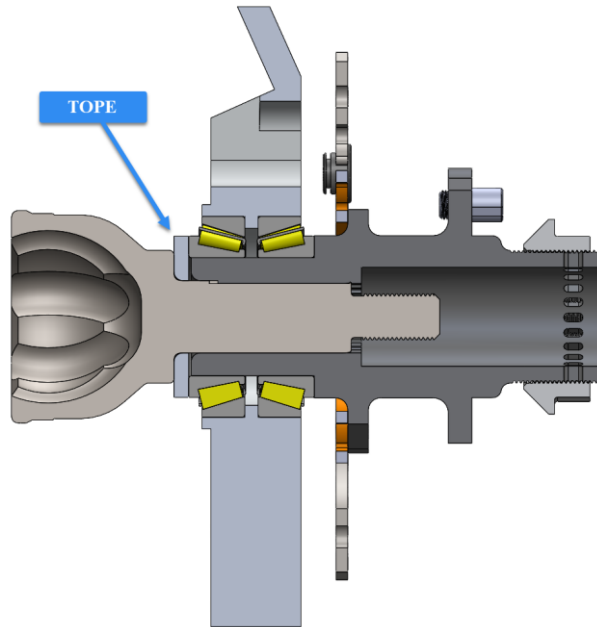


Figura 65: Vista en sección de la junta homocinética. Elaboración propia.

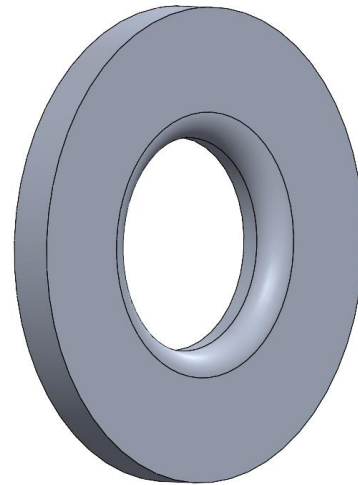


Figura 66: Tope para los rodamientos de la mangueta. Elaboración propia.

- Guardapolvos con bridas metálicas, ambos extremos

Este tipo de fuelle de goma permite que la grasa que se encuentra en el interior de las juntas homocinéticas no se desprenda al exterior ni se llene con sedimentos que puedan dañar el interior de estas. Para su fijación cuentan en sus extremos con dos bridas metálicas.

Suelen ir ubicados en cada extremo del palier en la junta homocinética fija y en la trípode, teniendo esta última unas dimensiones ligeramente menores.



Figura 67: Vista de explosionado subensamblaje guardapolvos de la junta homocinética fija. Elaboración propia.



Figura 68: Vista de explosionado subensamblaje guardapolvos de la junta homocinética desplazable trípode. Elaboración propia.

- Abrazadera de nailon de la junta trípode

Como se puede comprobar, la junta homocinética trípode tiene una forma peculiar que, gracias a esta junta fabricada en nailon, permite un mejor agarre a la brida metálica del guardapolvo. Para su modelado, se han seguido los siguientes pasos:

1. Tomando como referencia una copia del CAD de la junta homocinética desplazable, realizar un croquis con las dimensiones externas de la abrazadera para utilizar la operación de extrusión, desmarcando la opción de fusionar resultado.

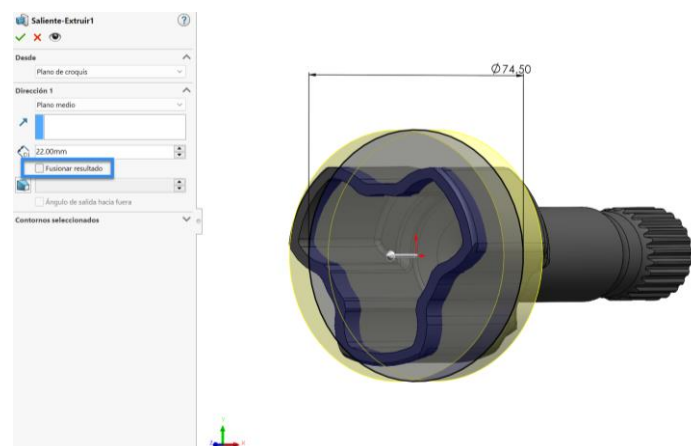


Figura 69: Creación de croquis y extrusión para la abrazadera de nailon. Elaboración propia.

2. Una vez creada esta operación, seleccionar la función de intersección en el administrador de comandos.

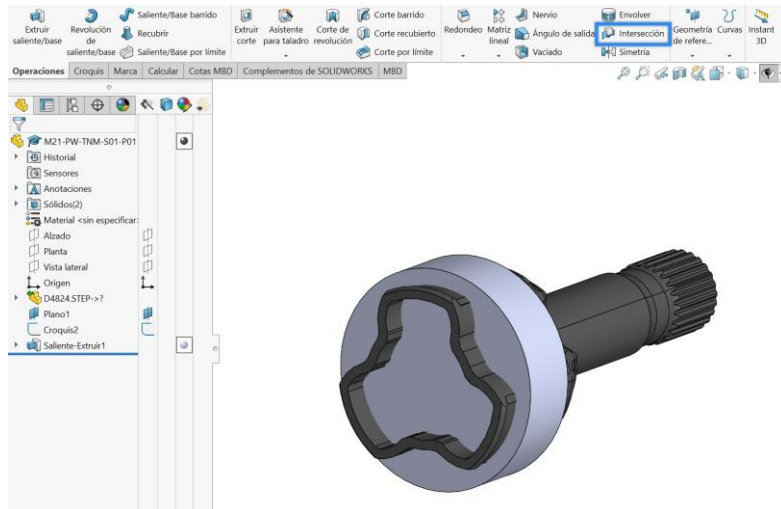


Figura 70: Ubicación operación intersección en administrador de comandos. Elaboración propia.

3. Seleccionar ambas piezas y pulsar en intersección. SolidWorks realizará un reconocimiento de ambos componentes y detectará aquellas regiones que podrán ser excluidas.

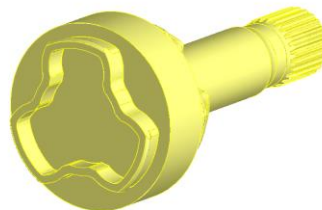
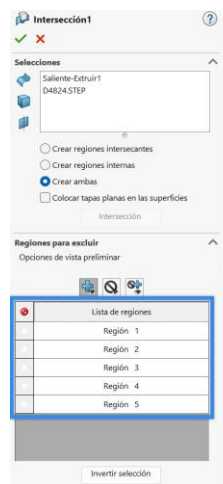


Figura 71: Regiones detectadas en la operación intersección. Elaboración propia.

4. Seleccionar aquella región que se desee obtener, sombreada en naranja en este caso. Al pulsar desaparecerá, ocasionando un efecto contrario al deseado, por lo que es necesario invertir la selección.

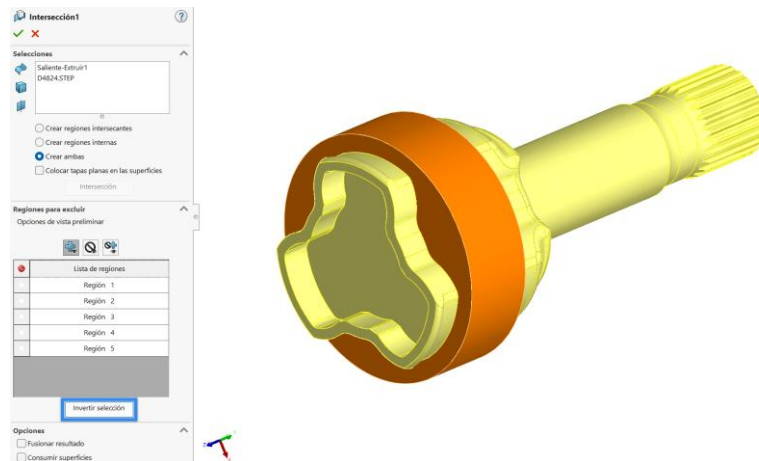


Figura 72: Región a excluir. Elaboración propia.

5. Validar la operación y ya se obtendría el CAD de la pieza modelada, a falta de guardarla.

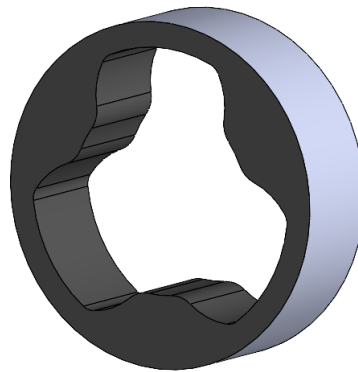


Figura 73: Pieza final obtenida por intersección. Elaboración propia.

- Palier

Este componente se encuentra bastante detallado a lo largo de este documento, pero a forma de resumen, un palier es un eje fabricado de un material que estará sometido esfuerzos a torsión procedentes del par producido por el motor en el que se pueden diferenciar varias zonas en las que será necesario de la utilización de un elevado número de operaciones para llevar a cabo su modelado. Estas zonas mencionadas son sus extremos que se encuentran estriados para ser acoplados a las juntas homocinéticas del vehículo contado con una serie de ranuras y taladros donde serán fijadas. Dependiendo de su diseño puede ser macizo o hueco.

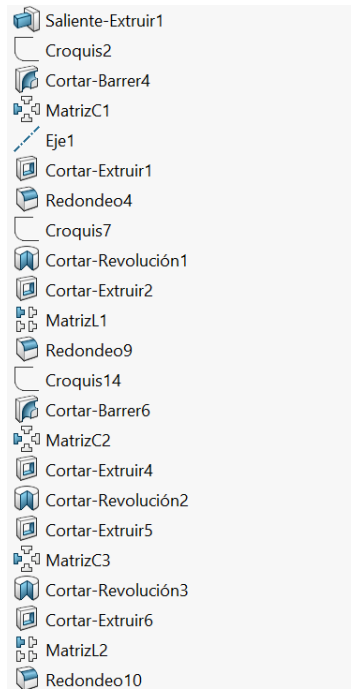


Figura 74: Operaciones realizadas para el modelado del palier. Elaboración propia.



Figura 75: Palier hueco. Elaboración propia.

- Tuerca rápida

Al igual que el anterior elemento, esta pieza se encuentra detallada en este documento, aunque para el modelado de la tuerca rápida del monoplaza se han seguido las dimensiones recomendadas por el fabricante de la llanta, adaptándose a las medidas de los vasos hexagonales del mercado y se han llevado a cabo operaciones de revolución, extrusión y roscado.

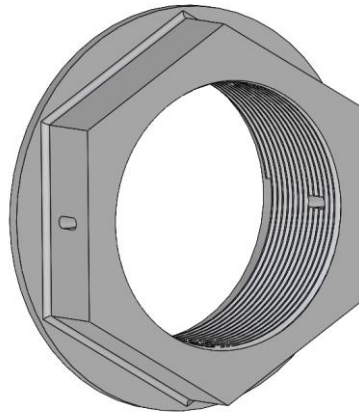


Figura 76: Tuerca rápida M45. Elaboración propia.

- Drive peg

El drive peg es un componente simple que también se encuentra detallado en unos de los apartados de este documento. El monoplaza cuenta con cuatro de ellos en cada uno de los bujes obteniendo un total de veinte. Está fabricado en aluminio y es muy sencillo de modelar en el que por medio de las operaciones de extrusión y roscado es suficiente para la obtención de CAD final.

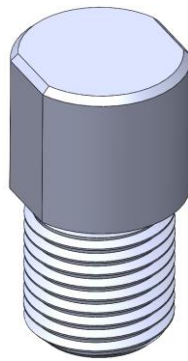


Figura 77: Drive peg. Elaboración propia.

- Clip de seguridad de la tuerca rápida

Este clip de seguridad permite que la tuerca de los bujes, por medio de las vibraciones de rodadura del monoplaza, no se aflojen ocasionando el desprendimiento de la rueda. Para su modelado se ha necesitado de la creación de una espiral por la que realizar un barrido con una sección circular.

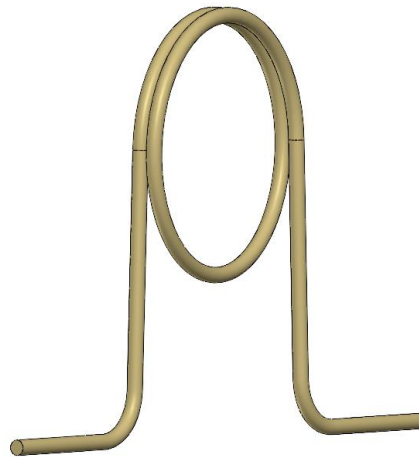


Figura 78: Clip de seguridad de la tuerca rápida. Elaboración propia.

- Buje trasero

El buje es un elemento muy importante del que se ensamblan todos los componentes rodean a la rueda. Además, se cuenta en este documento con una explicación detallada de sus funciones, diseño y fabricación. Para la realización del modelo 3D del buje trasero se han tomado las referencias y medidas obtenidas en el apartado correspondiente, contando con un gran número de operaciones destacando extrusión, corte, redondeo y roscado.

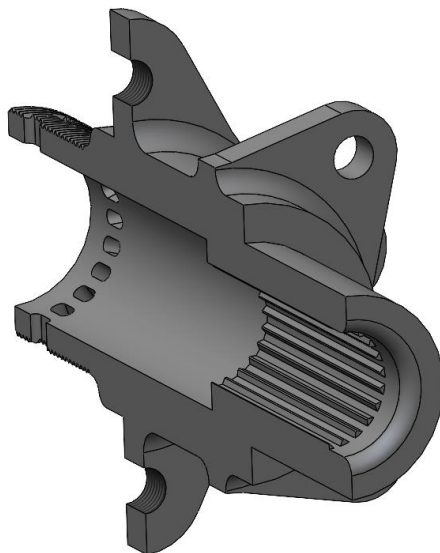


Figura 79: Vista en sección del buje trasero. Elaboración propia.

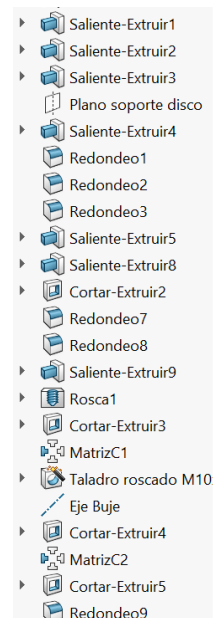


Figura 80: Operaciones realizadas para el modelado del buje trasero. Elaboración propia.

- Pistón de la pinza de freno

Al accionar el pedal del freno, el pistón se desplaza permitiendo el proceso de frenado mediante la fricción del ferodo de las pastillas contra el disco de freno. Es un elemento muy sencillo en el que, como novedad, se ha utilizado la operación de vaciado.

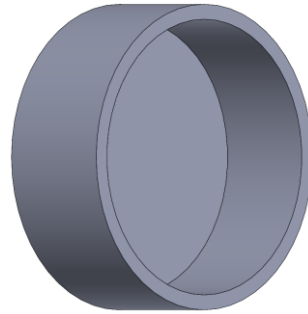


Figura 81: Pistón de la pinza de freno. Elaboración propia.

- Clip de seguridad del pasador de las pastillas de freno

Este clip de seguridad permite el posicionamiento de las pastillas de freno mediante un pasador, pudiendo de una forma sencilla quitarlo. Para la creación del CAD se ha necesitado de la realización de un croquis por el que realizar un barrido con una sección procedente de otro croquis en forma de ranura.

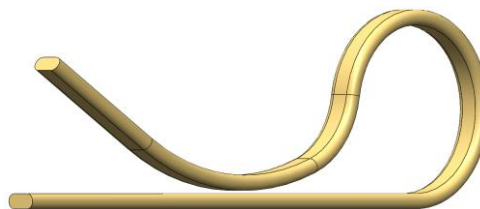


Figura 82: Clip de seguridad del pasador de las pastillas de freno. Elaboración propia.

5.2. Ensamblaje general y subensamblajes

Después de que se tengan ya modelados todos los componentes que engloban el conjunto, se ha optado por la estrategia de la creación de ensamblajes con un limitado número de piezas, llamados subensamblajes, para una mejor organización y optimización de recursos del ordenador.

Este gemelo digital de la transmisión de un monoplaça formula student cuenta con un total de 85 piezas únicas, que en el siguiente apartado serán acondicionadas para su posible movimiento.

El orden que se va a seguir es el natural tomando como referencia la salida de la potencia desde el motor a las ruedas.

5.2.1. Piñón-cadena-corona

Este conjunto simple conforma el sistema de transmisión secundario. Desde el piñón de 11 dientes posicionado en la toma de salida de la potencia del motor a la corona, estos dos componentes se encuentran enlazados mediante una cadena de rodillos. Después, la corona de 34 dientes se encuentra atornillada mediante seis tornillos M10 compuestos por arandelas y tuercas de seguridad a un soporte que permite la posición de esta y que su interior se encuentra estriado para transmitir el movimiento al grupo diferencial. Cuenta con un circlip para su correcta fijación.

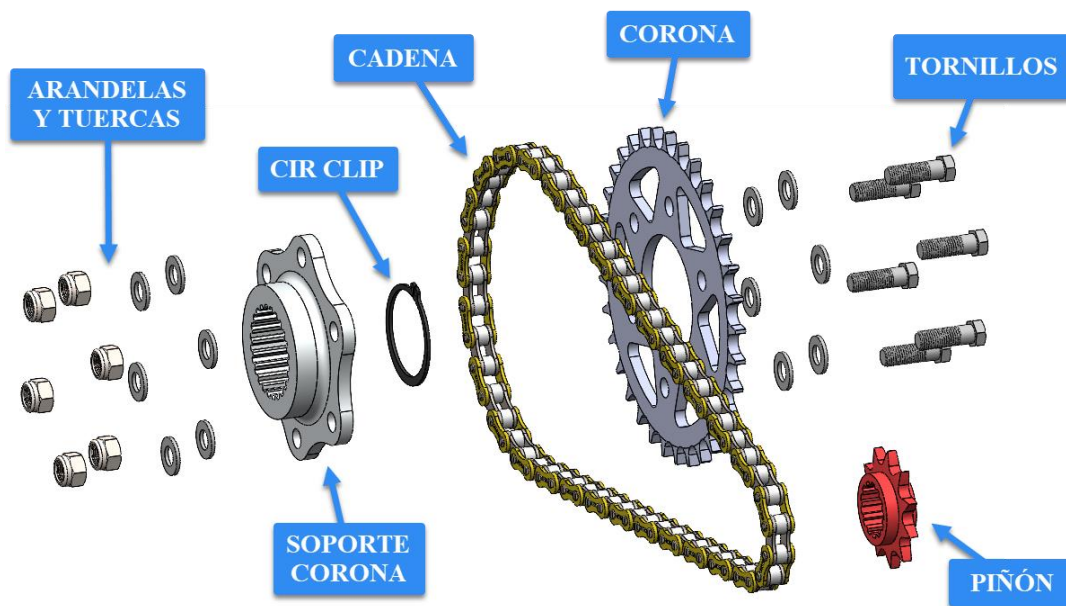


Figura 83: Explosión subensamblaje piñón-cadena-corona. Elaboración propia.

5.2.2. Diferencial

Este diferencial de deslizamiento limitado por discos que cuenta el monoplaça MA23RT es fabricado por la empresa Drexler. Permite la configuración de los discos y muelles de

prearga consiguiendo varias configuraciones de comportamiento del diferencial, pero es necesario su desmontaje para realizar dichas configuraciones. Es un componente que cuenta con una gran cantidad de piezas como se puede comprobar en la siguiente figura.

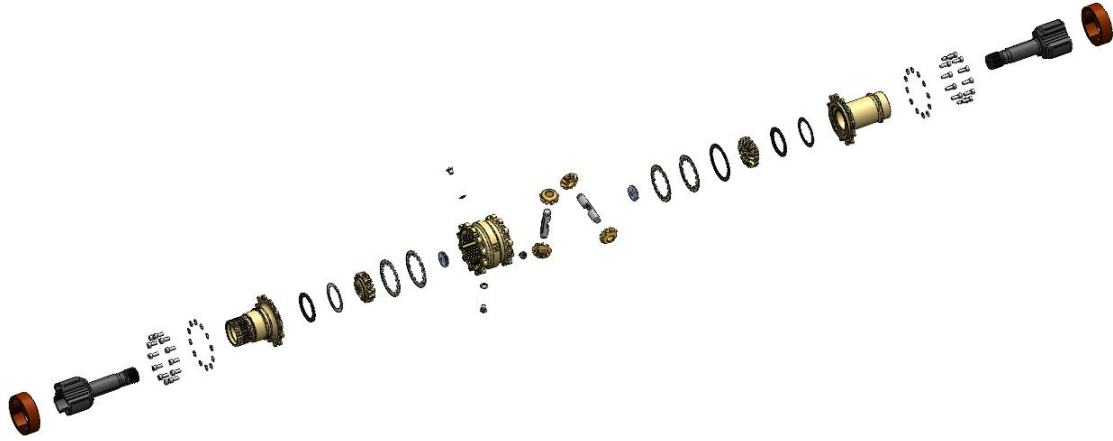


Figura 84: Explosionado completo del grupo diferencial. Elaboración propia.

En las figuras siguientes se puede examinar con un mejor detalle estos elementos.

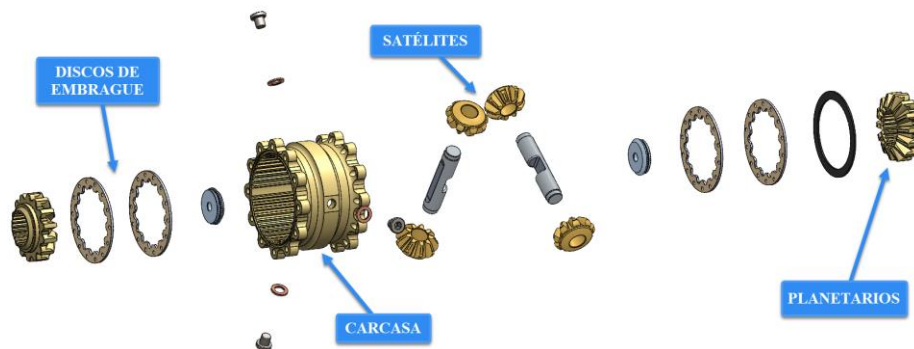


Figura 85: Explosionado más detallado del grupo diferencial. Elaboración propia.



Figura 86: Explosionado más detallado del grupo diferencial. Elaboración propia.

La junta homocinética desplazable trípode es el modelo D4825 de la empresa estadounidense RCV Permormance Producs, contando con un amplio catálogo de elementos de la transmisión de un FSAE.

5.2.3. Portadiferencial

Este subconjunto compuesto por los rodamientos y los portadiferenciales es muy sencillo, pero a la vez muy importante debido a que los portadiferenciales sirve de unión entre el chasis y el grupo diferencial y del que servirá de referencia para los demás subensamblajes.

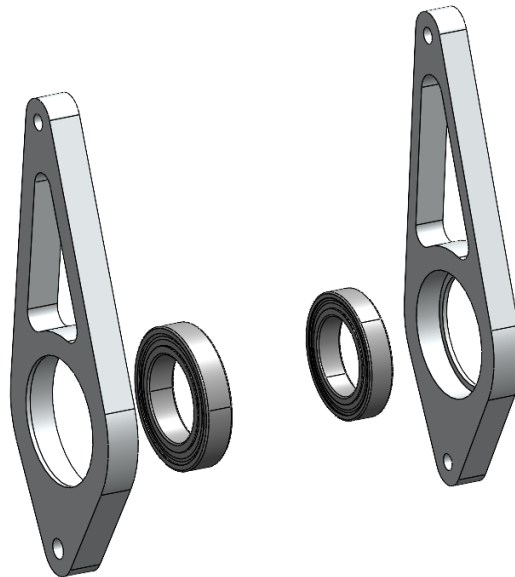


Figura 87: Explosionado subensamblaje del palier. Elaboración propia.

5.2.4. Conjunto palier

El palier es uno de los elementos diseñados desde cero. Es un conjunto compuesto por una gran cantidad de elementos y que, por facilidad, se ha dividido en varios subensamblajes.

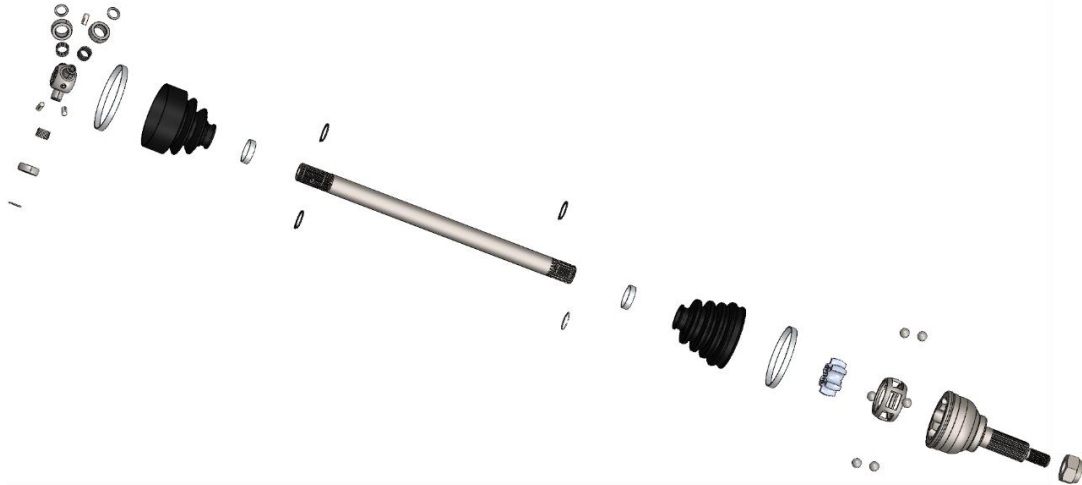


Figura 88: Explosionado subensamblaje del conjunto palier. Elaboración propia.

Comenzando por el elemento principal, el palier. A este se le añade unas juntas de retención para fijar a posteriori las homocinéticas.

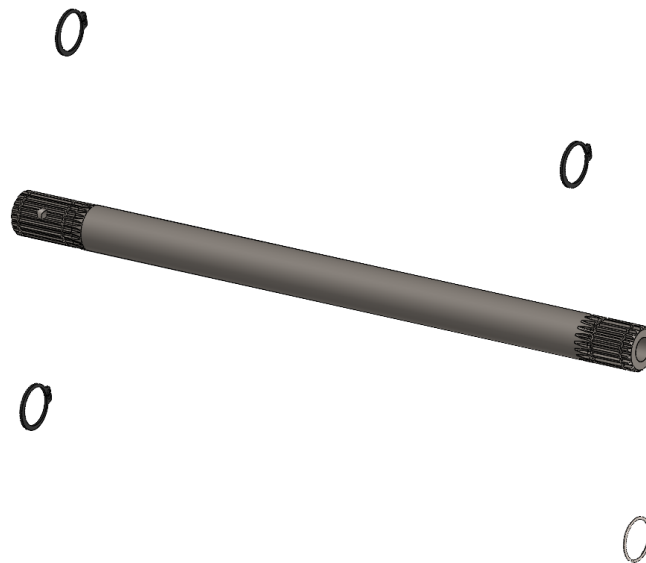


Figura 89: Explosionado subensamblaje del palier. Elaboración propia.

Junto al palier, en el extremo derecho se añade el conjunto del guardapolvo de la junta homocinética fija junto con sus abrazaderas metálicas para su correcta fijación y en el extremo opuesto, el correspondiente a la junta de trípode del diferencial.



Figura 90: Guardapolvos con bridas metálicas de la junta homocinética fija. Elaboración propia.



Figura 91: Guardapolvos con bridas metálicas de la junta desplazable de trípole. Elaboración propia.

Para permitir el movimiento axila del conjunto, existe el trípole que está formado por un conjunto de rodamientos de aguja adosados al núcleo que, junto con la junta desplazable de trípole, permiten un deslizamiento axial. Cuenta con unos pasadores para su fijación al palier.

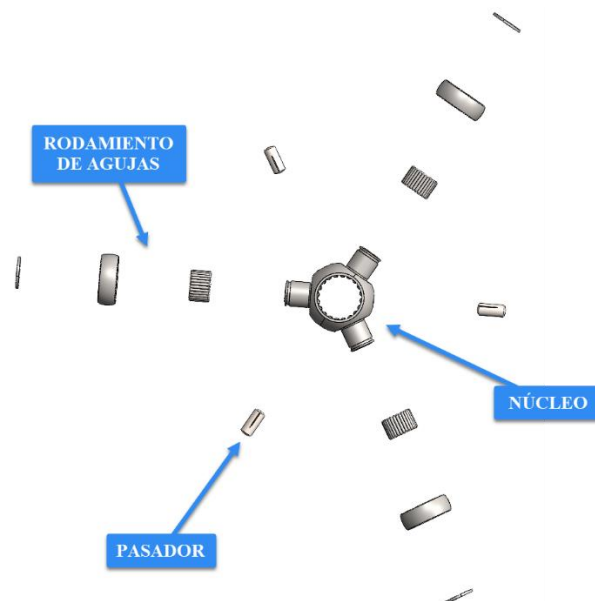


Figura 92: Explosionado trípole. Elaboración propia.

Y, por último, el grupo de la junta homocinética fija ubicado en la rueda está compuesto por los elementos señalados en la figura siguiente:

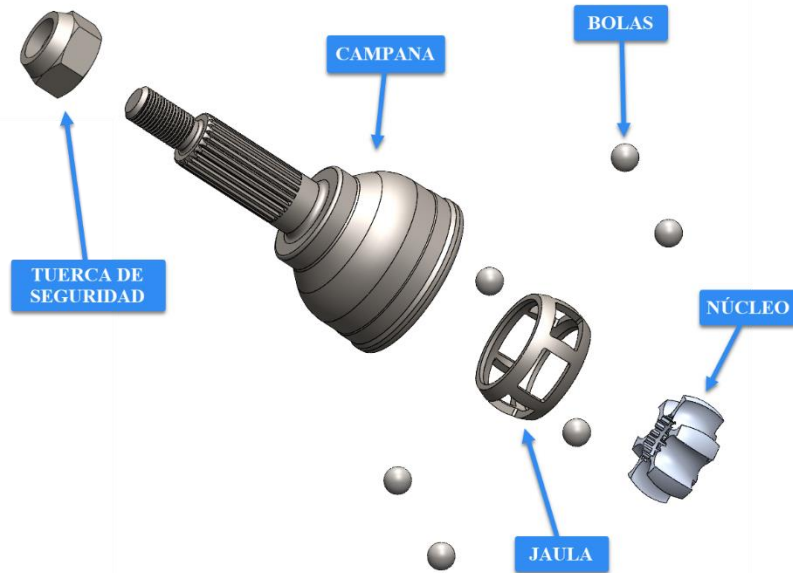


Figura 93: Explosionado subensamblaje junta homocinética fija. Elaboración propia.

5.2.5. Rueda trasera

Al igual que el anterior, la rueda trasera está compuesta por muchos subensamblajes que se irán descomponiendo a continuación.

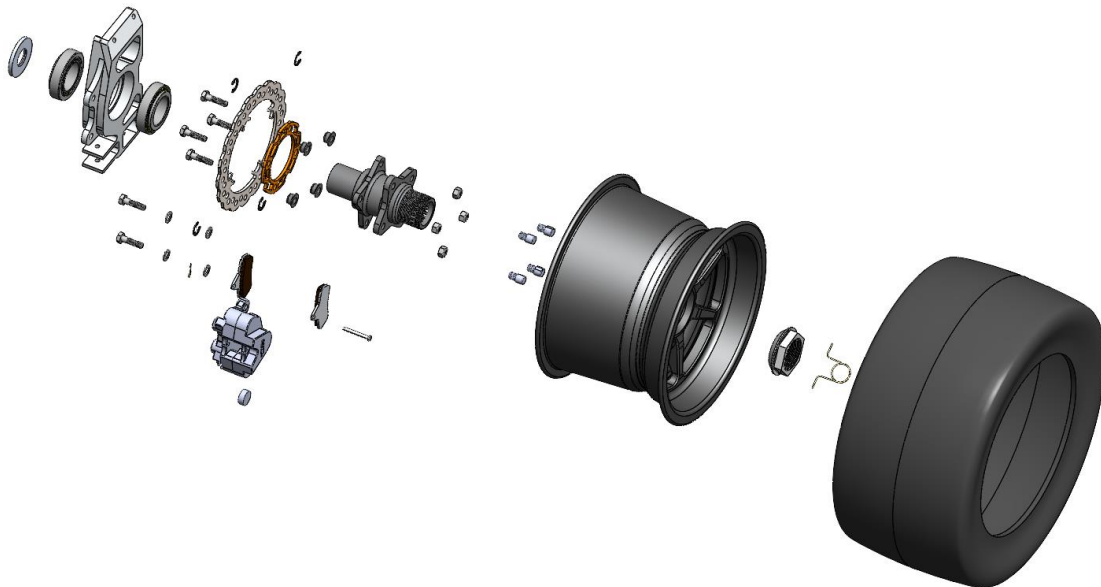


Figura 94: Explosionado completo del subensamblaje rueda trasera. Elaboración propia.

En primer lugar, la pieza central de todo este conjunto es el buje del cual se irán ramificando los siguientes subensamblajes. Al mismo van atornillados los drives peg.

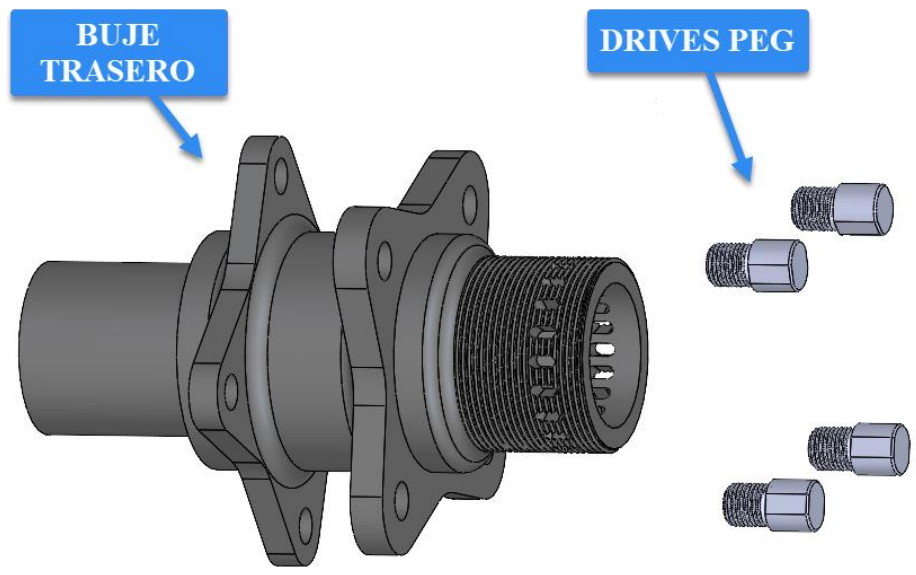


Figura 95: Explosionado buje trasero con drives peg. Elaboración propia.

Anclado a los drives peg se encuentra la llanta OZ Magnesium CL 10" siendo atornillada con una tuerca rápida M45. Cuenta con un clip de seguridad en caso de un apriete no correcto, evitando el desprendimiento del conjunto.



Figura 96: Explosionado subensamblaje de la rueda trasera. Elaboración propia.

Para el sistema de frenado se ha dividido en dos, un conjunto con las piezas de la pinza de freno y otro con las correspondientes al disco, ambos de tipo flotante.

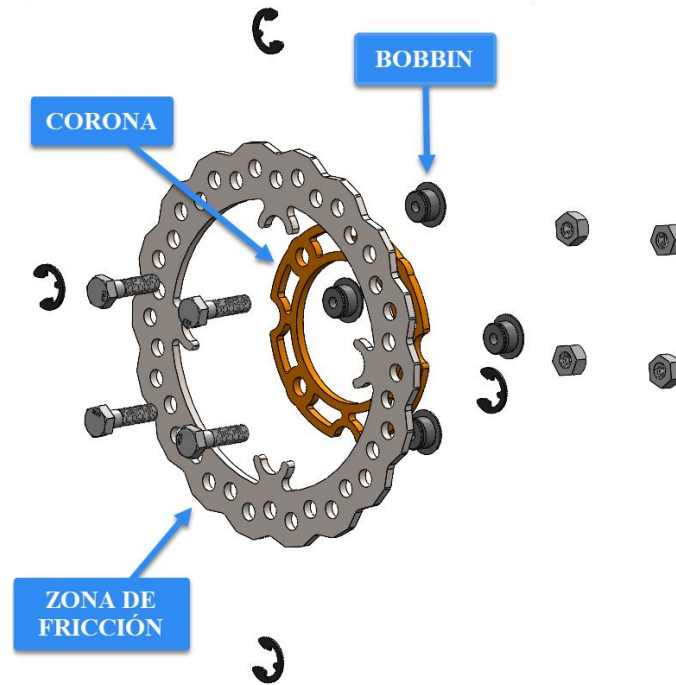


Figura 97: Explosionado disco de freno flotante. Elaboración propia.

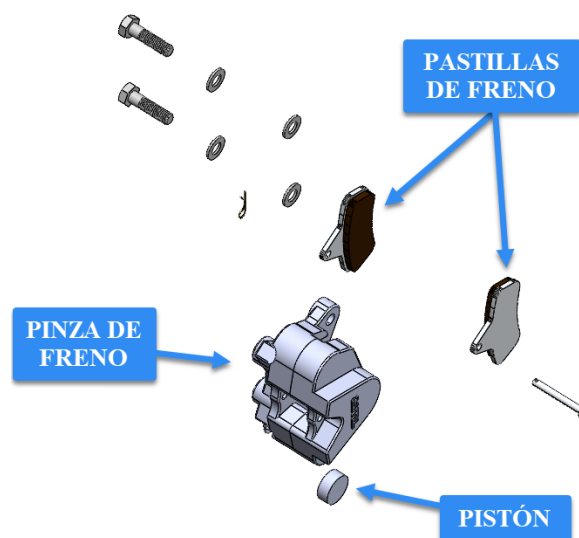


Figura 98: Explosionado pinza de freno flotante trasera. Elaboración propia.

Por último, se posicionan los rodamientos de rodillos y la mangueta al buje. Terminando con el tope que no permitirá el movimiento axial a los rodamientos de la mangueta.

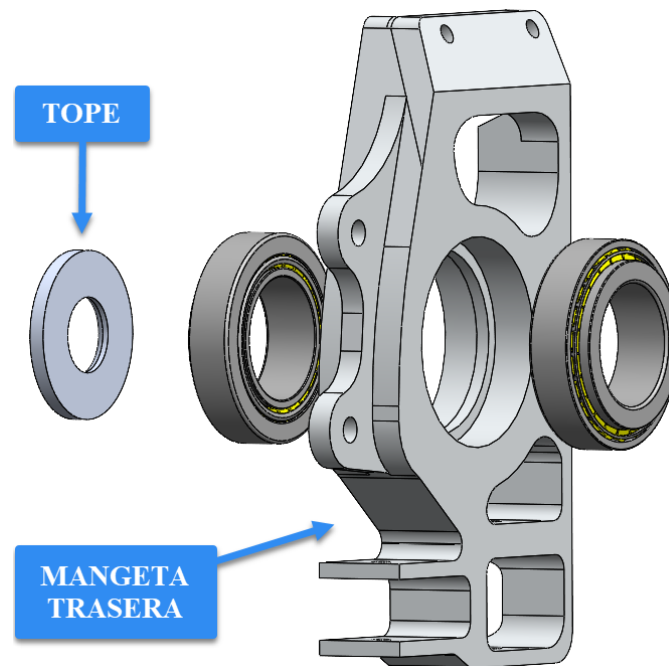


Figura 99: Explosionado conjunto mangueta. Elaboración propia.

5.3. Estudio de movimiento

Al principio del apartado se incidió sobre la importancia del tema de la acumulación de error. Esto no sería ningún problema si el conjunto fuese fijo, ya que no sería necesario el uso de relaciones de posición, pudiendo fijar las piezas en su posición correspondiente en el espacio de trabajo. Sin embargo, a la hora de realizar un estudio de movimiento fiel a la realidad es muy importante tener en cuenta las relaciones de posición y conectar los elementos mediante las referencias correctas. Para ello, se debe de invertir mucho tiempo en editar aquellos componentes para conseguir una unión perfecta, ocasionando también un consumo excesivo de cálculo computacional.

Una vez explicado en el punto anterior los ensamblajes y subensamblajes que componen el conjunto completo, se detallará en profundidad cómo se ha conseguido sincronizar todos los elementos permitiendo representar el movimiento de la transmisión de un Formula Student.

Para poder alcanzar este objetivo, SolidWorks dispone de una gran variedad de relaciones de posición divididas en 3 grupos.

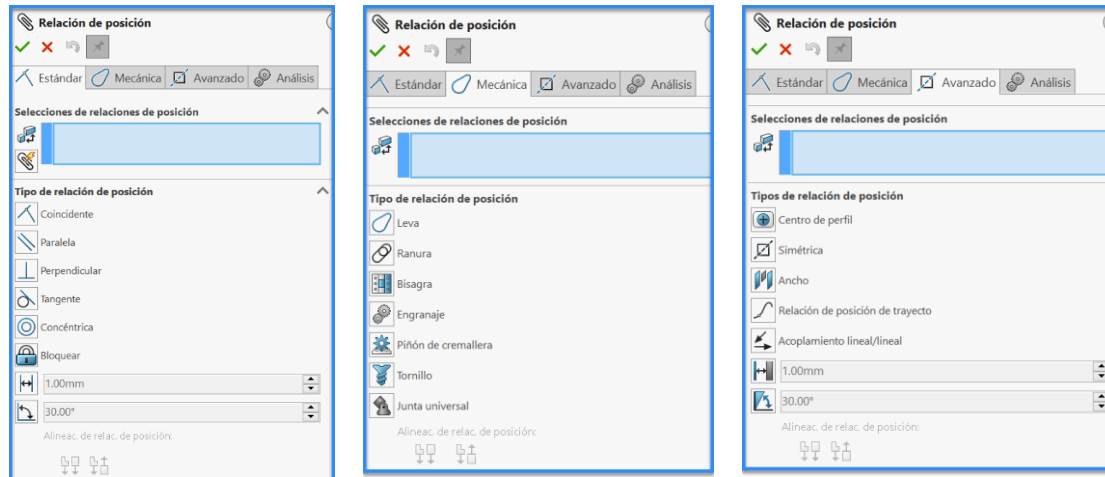


Figura 100: Grupos de relaciones de posición disponibles en SolidWorks. Elaboración propia.

El gemelo digital cuenta con 114 relaciones de posición que permiten que cada uno de los elementos tengan una posición definida en el plano permitiendo su desplazamiento y sincronización con el resto de los elementos.

Del primer grupo, estándar, se puede destacar que las más utilizadas son coincidente, separación a una distancia estimada y concéntrica, ya que se cuentan con piezas que son circulares, como por ejemplo el diferencial o el buje. Engranaje, tornillo y junta universal son las más usadas del grupo mecánica, siendo de gran ayuda en la relación de elementos, destacando junta universal, que permite unir dos elementos con cierto ángulo y que permita girar sobre su propio eje de rotación, usándola en las conexiones de los extremos del palier, uno con el diferencial y el otro con el conjunto de la rueda. Y, por último, la más utilizada en el grupo avanzado es ancho, que permite colocar dos elementos con dos caras planas a una distancia simétrica.

La gran ventaja de SolidWorks es su versatilidad ya que para un mismo resultado se pueden seguir varios caminos. Sin embargo, es importante encontrar aquella que sea más eficiente.

A continuación, se explicará por una parte aquellas las relaciones de posición que lleva cada elemento para formar los subensamblajes, y después, las uniones de estos ensamblajes conformando un conjunto completo para la comprensión del funcionamiento del modelo.

5.3.1. Conjunto Diferencial

Empezando por el grupo diferencial, es un elemento que contiene bastantes piezas en las que hay que seguir las exigencias del fabricante para un correcto funcionamiento.

En primer lugar, se crea un eje del cual se ensamblarán aquellos componentes externos que componen el cuerpo del diferencial. Luego, mediante las herramientas de visualización se podrá completar con todos los elementos interiores del diferencial. Este eje permitirá el giro de aquellos elementos que lo requieran mediante la relación de posición concéntrica.

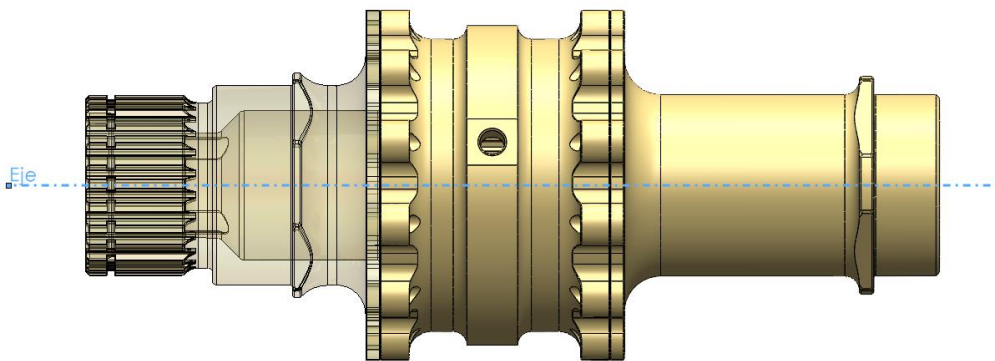


Figura 101: Cuerpo del grupo diferencial ensamblado respecto al Eje. Elaboración propia.

Para que la carcasa del grupo diferencial que se encuentra dividida en tres gire a la vez, ambos extremos cuentan con una serie de taladros al igual que el cuerpo central en los que se utiliza la relación concéntrica. Además, en cada uno de estos orificios se colocarán concéntricos su correspondiente tornillo con arandela una vez que todo esté ensamblado. Para ello, se hace uso de una matriz circular que permite editar tanto la distancia entre los componentes como el número de instancias en una circunferencia completa.

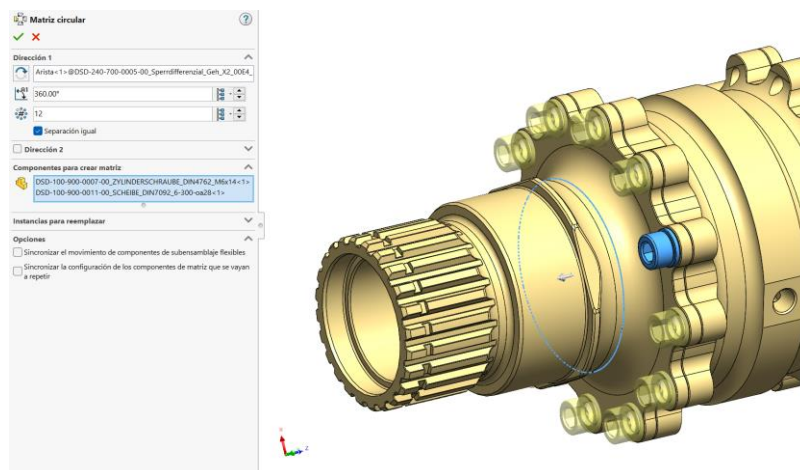


Figura 102: Utilización de matriz circular en el grupo diferencial. Elaboración propia.

Para el extremo opuesto, se utiliza una operación de simetría respecto al plano medio del conjunto de la matriz circular creada anteriormente. De este modo, se consigue en dos pasos de forma muy sencilla completar los veintitrés tornillos restantes que componen la unión entre el centro y ambos extremos del grupo diferencial.

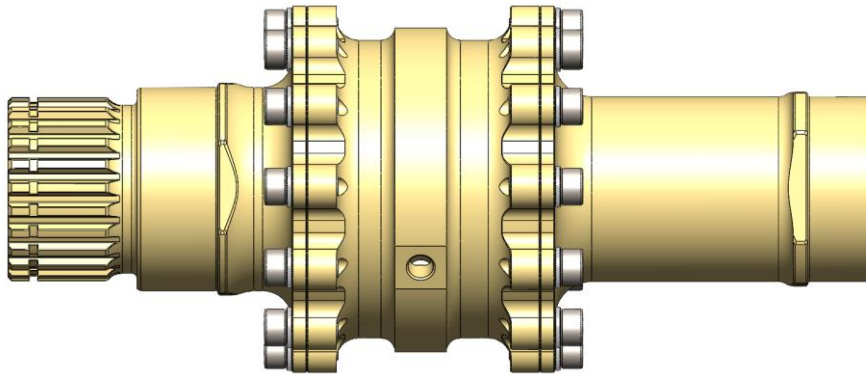


Figura 103: Grupo diferencial con sus respectivos tornillos. Elaboración propia.

Posteriormente, ocultando los componentes necesarios para un acceso más sencillo, se confeccionará todas las relaciones de posición para los elementos del interior como son por los planetarios, los satélites, las juntas tóricas y los discos de embrague. Comenzando por los planetarios, se realiza las ya mencionadas relaciones concéntrica y coincidente en ambos respecto al eje principal. Siguiendo por la posición de los ejes de los satélites, se utiliza la relación de coincidente y de perpendicularidad entre ellos. En su centro, se realiza una relación con el eje general que permitirá su giro sobre el mismo. Al igual que en los satélites, serán concéntricos a su propio eje. Para relacionar los planetarios con los satélites, se complementan mediante la relación de posición engranaje, permitiendo una gran reducción de carga computacional y el movimiento deseado de los satélites con los planetarios.

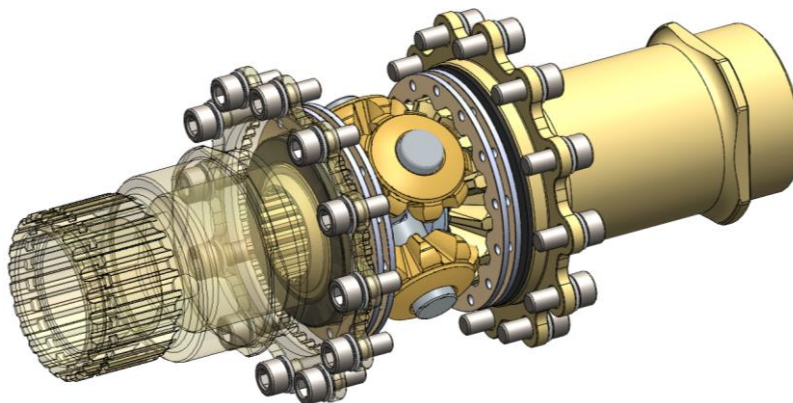


Figura 104: Grupo diferencial con elementos interiores ensamblados. Elaboración propia.

En su interior, para salvar las distancias entre los discos de embrague, se utiliza una relación coincidente imponiendo la distancia estipulada en el manual. Al tener una forma circular, estos discos y las juntas se encuentran concéntricas al eje inicial creado.

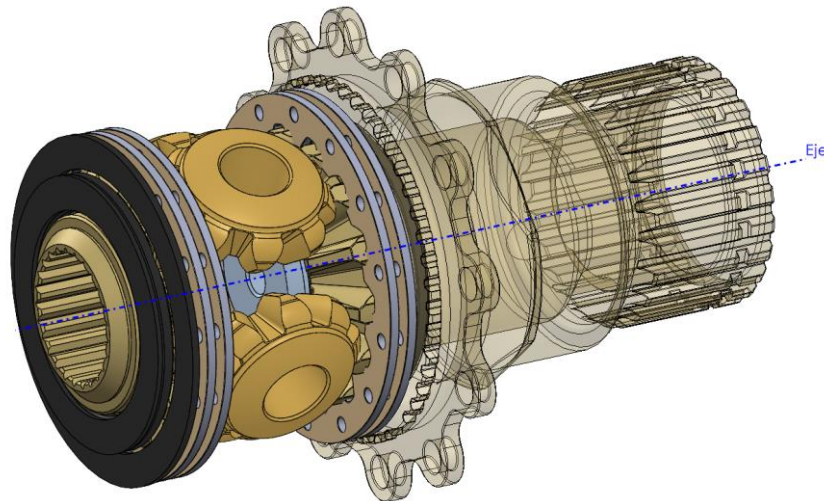


Figura 105: Grupo diferencial con juntas y discos de embrague ensamblados. Elaboración propia.

Por último, se vuelve a crear una matriz circular para los tres tornillos que conforman radialmente la carcasa central del diferencial, dando así por terminado este subconjunto.

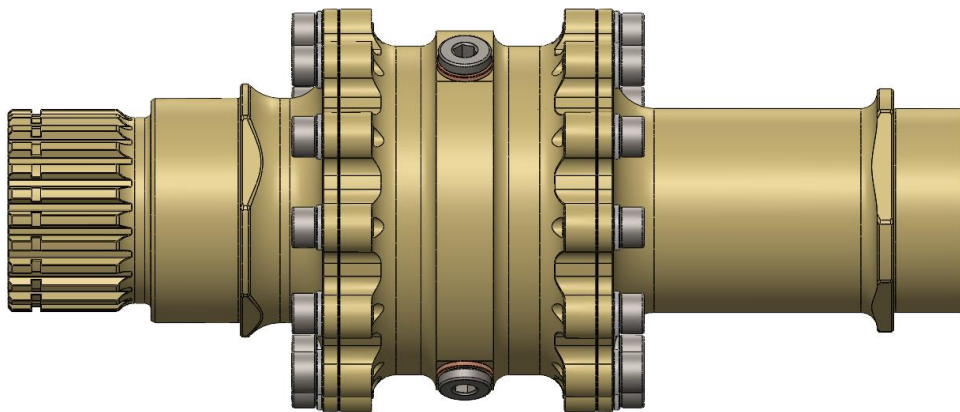


Figura 106: Grupo diferencial totalmente funcional. Elaboración propia.

Una vez se tiene el grupo diferencial funcional, a ambos extremos se le unen las juntas homocinéticas desplazables de trípode mediante la relación concéntrica al eje o al cuerpo del diferencial y una relación de engranajes 1:1 con los estriados de los planetarios, permitiendo de este modo el movimiento del conjunto con las juntas.

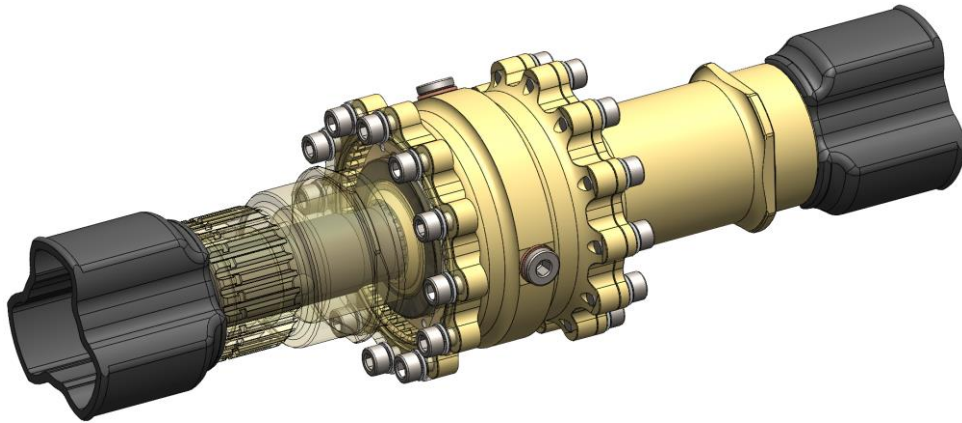


Figura 107: Grupo diferencial con las juntas trípode. Elaboración propia.

En los extremos de estas juntas homocinéticas se encuentran unas abrazaderas de nailon donde posteriormente se ensamblarán los guardapolvos. Para posicionarlas en su sitio, solo bastará con una relación de concetricidad y coincidente respecto con el labio que recorre todo el filo exterior.

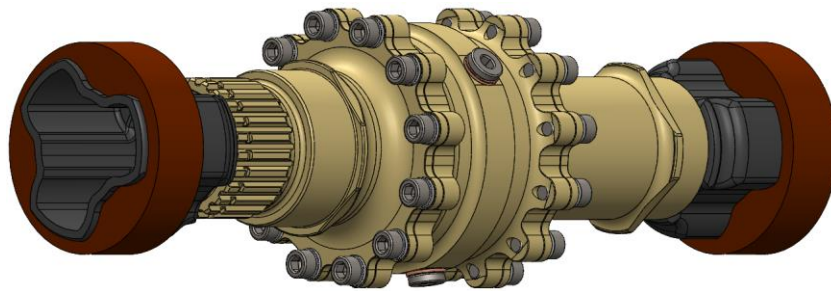


Figura 108: Abrazaderas de nailon ensambladas al grupo diferencial. Elaboración propia.

Una vez colocada esta abrazadera de nailon en ambas juntas, para evitar la salida de la grasa que contiene los trípodes, permitiendo que no haya el rozamiento entre los elementos, y con ello, disminuir la temperatura y aumentar la durabilidad del conjunto, como se ha explicado en el punto de conceptos previos, dispone de unos fuelles de goma con unas abrazaderas metálicas. Dichas piezas contienen las relaciones de posición concéntrica, bloqueando la rotación sobre sí mismas, al eje creado del diferencial. En las abrazaderas se han utilizado también la relación de ancho.

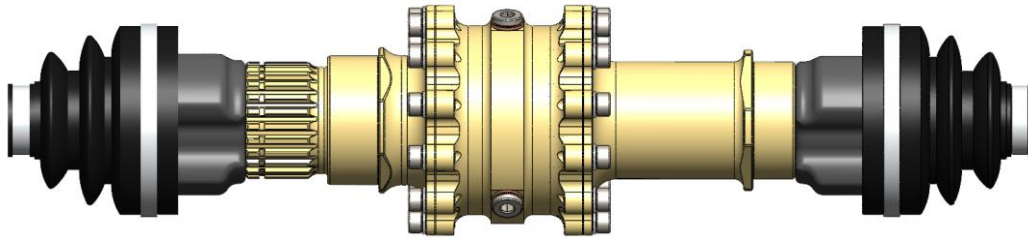


Figura 109: Ensamblaje completo del grupo diferencial. Elaboración propia.

Finalmente, aunque no se pueda apreciar, el conjunto que se muestra en la *Figura 109* es totalmente dinámico, teniendo la posibilidad de moverse aquellos componentes que así lo necesiten.

5.3.2. Conjunto palier

Al igual que en el anterior subensamblaje, se vuelve a crear un eje de referencia en la ventana de trabajo del cual se relacionarán todos los componentes.

El primer elemento que se inserta es el palier, que haciendo coincidentes su eje central con el creado, tendrá la posibilidad de girar sobre este.



Figura 110: Palier concéntrico al eje de referencia. Elaboración propia.

Los extremos del palier se encuentran estriados, donde se anclarán los componentes internos de ambas juntas homocinéticas. Empezando por el extremo izquierdo, por medio de las relaciones de posición concéntrica y la avanzada llamada ancho, se coloca en su posición el trípode. Este elemento es un conjunto de tres rodamientos de agujas en el que hay que ser muy meticuloso a la hora de colocar cada una de las piezas que lo engloba. Y, para hacerlo solidario al palier, cuenta con unos taladros que se harán concéntricos entre ambos componentes y se añadirá una especie de tubillones metálicos que lo encajarán uno contra el otro.

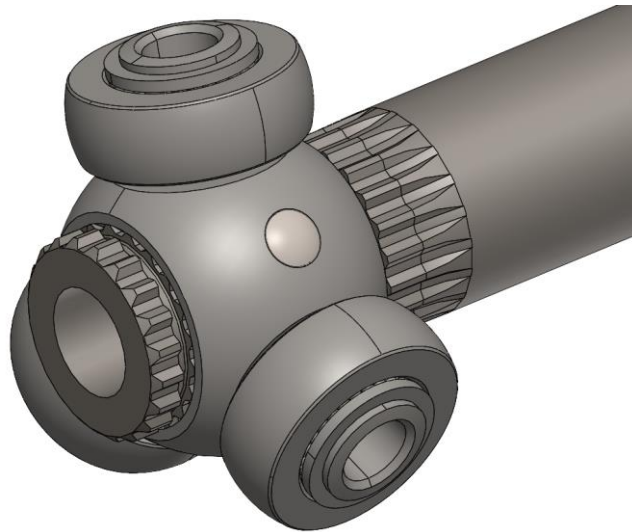


Figura 111: Trípole ensamblado en el palier. Elaboración propia.

En el otro extremo se encuentra el estriado con todo lo referente a la junta homocinética fija que va atornillada al buje. Aunque en la vida real, todo el conjunto se une al palier, hay que visualizar que los componentes internos de la homocinética girarán en función del palier no de la propia junta. Por ello, para el correcto funcionamiento de la relación mecánica de junta universal, que será explicada más adelante, se ha tenido que separar la campana por un lado y los componentes internos por otro. Para su ubicación se ha seguido el mismo procedimiento que para el trípole, solo que, para tener todos los componentes en un mismo plano, se ha tomado como referencia el plano medio del núcleo, construyendo así el resto de las componentes. Para las bolas, se ha hecho el uso de la relación tangente con el núcleo y de la creación de una matriz circular, permitiendo el posicionamiento de las seis bolas.

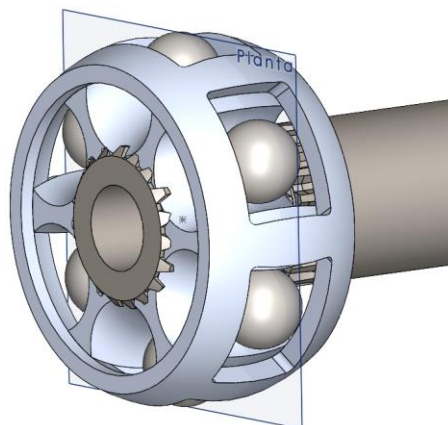


Figura 112: Elementos junta fija ensamblado respecto al plano planta del núcleo. Elaboración propia.

Una vez todos estos componentes ensamblados, faltaría colocar los circlips en las ranuras que tiene el palier, utilizando las clásicas relaciones de posición concéntrica y ancho. De esta forma, ya se tendría completado este subensamblaje como se muestra en la *Figura 113*.

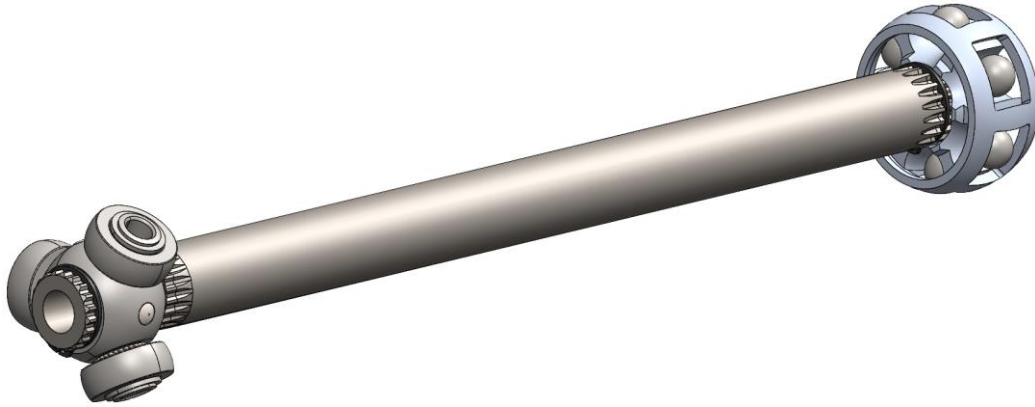


Figura 113: Subensamblaje del palier completo. Elaboración propia.

5.3.3. Conjunto Rueda

Como ya es habitual, se crea un eje que será la referencia para todo el conjunto. Partiendo del buje, mediante la relación mecánica de tornillo y una de posición concéntrica, se atornillan los drives peg.

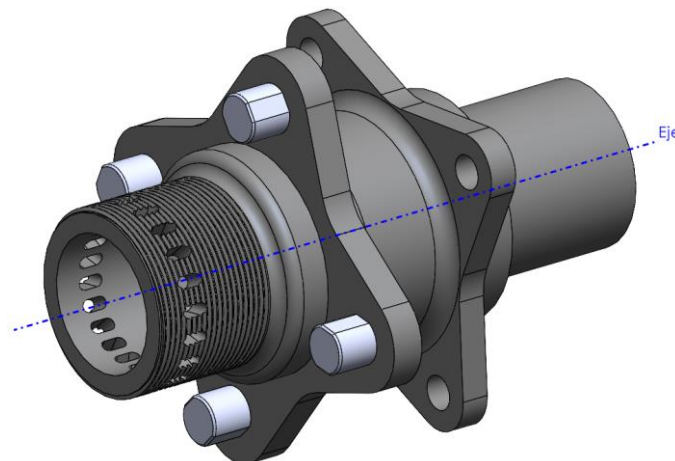


Figura 114: Buje con los drives peg atornillados. Elaboración propia.

Por otro lado, el sistema de frenada se divide en dos subensamblajes, uno con todos los elementos pertenecientes al disco de freno y el otro con los de la pinza de freno. Empezando con el primer subconjunto nombrado, se establece la corona como elemento central. Cuenta con unas protuberancias donde se colocan los bobbins concéntricos,

dejando suficiente espacio para las arandelas onduladas y los circlips correspondientes, y a su vez, a la zona de fricción. Este subensamblaje se unirá al buje en la zona específica para su anclaje mediante una serie de tornillos, arandelas y tuercas de seguridad distribuidas por medio de una matriz circular.

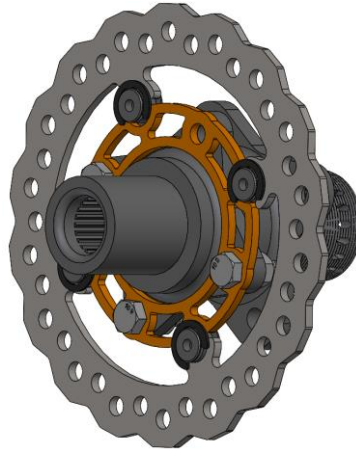


Figura 115: Buje con subensamblaje del disco de freno. Elaboración propia.

En la pinza de freno, para colocar el pistón, es necesario realizar una vista de sección ya que se encuentra en su interior. En este caso, además de una relación de posición concéntrica, se utilizará una restricción de distancia nula que será clave a la hora de realizar los videos didácticos. Para el posicionamiento de las pastillas de freno, es importante colocar antes el pasador del cual serán concéntricos los agujeros destinados a esto. Será necesario incluir una relación de posición paralela entre la vista lateral de la pinza y el de ambas pastillas. Por último, el clip de seguridad se encuentra concéntrico al agujero del pasador y perpendicular a la vista lateral anteriormente citada.

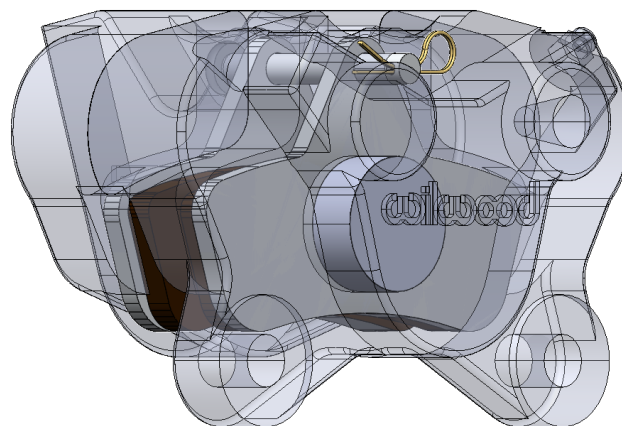


Figura 116: Buje con subensamblaje del disco de freno. Elaboración propia.

El subensamblaje de la pinza de freno se encuentra atornillado a la mangueta, por lo que es necesario primeramente insertar la mangueta con sus respectivos rodamientos en la posición correspondiente en el buje mediante las relaciones concéntrica y coincidente.

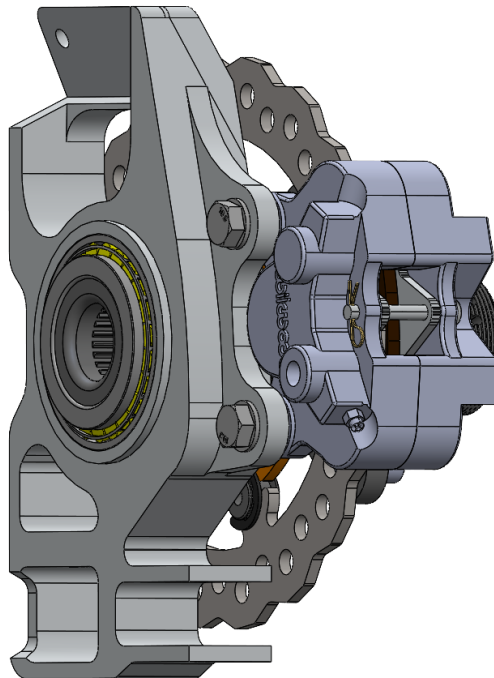


Figura 117: Mangueta y subensamblaje de la pinza de freno añadido al buje. Elaboración propia.

La llanta OZ requiere de la relación concéntrica respecto al eje y los drives peg a los numerosos orificios que cuenta, tocando esta zona con el buje. De esta forma, la llanta se encuentra anclada al buje después de que la tuerca también sea concéntrica al cuerpo al eje inicial y coincidente en la zona de contacto en forma de cono. Por último, el clip de seguridad será también concéntrico a las ranuras con las que cuenta el buje y la tuerca, y coincidente a la trayectoria entre las protuberancias de la tuerca rápida.



Figura 118: Rueda completa y tuerca añadida al subensamblaje general. Elaboración propia.

Se añade la junta homocinética junto con el tope de los rodamientos siendo concéntricos al eje central y coincidentes con la cara del rodamiento, fijando de esta forma y evitando su desplazamiento axial. Además, se añade la tuerca de seguridad en la zona roscada que tiene la junta homocinética.

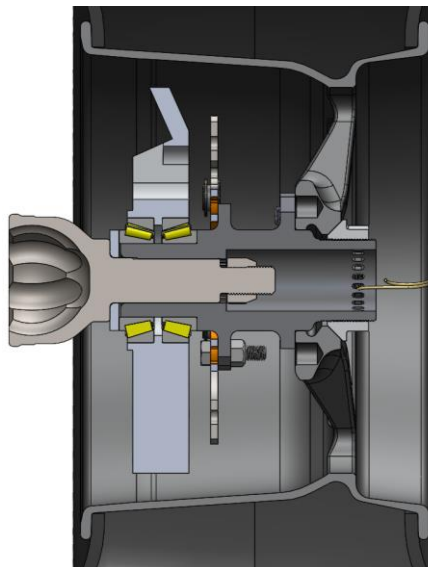


Figura 119: Vista en sección con el subensamblaje del conjunto rueda con junta homocinética.
Elaboración propia.

Por último, se coloca el subensamblaje de tres elementos compuesto por el guardapolvo y las dos bridas metálicas con las mismas relaciones de posición que en el correspondiente

de las juntas trípode añadiendo la relación centro de perfil entre la brida y la junta homocinética, consiguiendo así su posición definitiva.



Figura 120: Subensamblaje conjunto de rueda completo. Elaboración propia.

Como se puede comprobar, este es un claro ejemplo de que dentro de un subensamblaje pueden existir otros subensamblajes permitiendo una mejor organización de los elementos.

5.3.4. Piñón motor-cadena-corona

Este subensamblaje permite transmitir la potencia que produce el motor al diferencial.

Se comienza con el modelado de la cadena, en la que se deben de seguir los siguientes pasos:

- Tener una pareja de eslabones modelada.

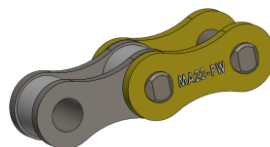


Figura 121: Pareja de eslabones. Elaboración propia.

- Mediante un croquis, dibujar la trayectoria por la que se desplazarán estos eslabones

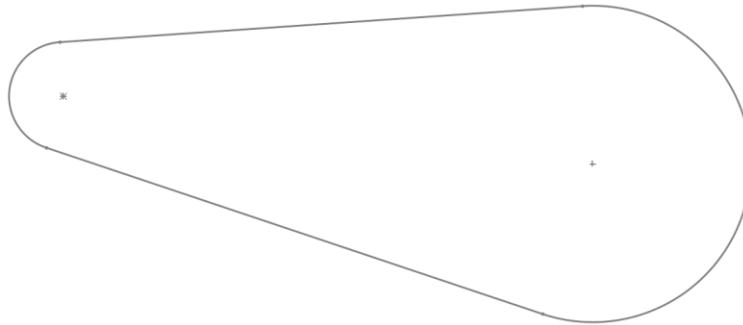


Figura 122: Croquis de referencia para la cadena. Elaboración propia.

- Utilizando la operación de matriz de la componente de la cadena se autocompleta la trayectoria mediante la opción ruta de relleno, obteniendo una cadena completa.

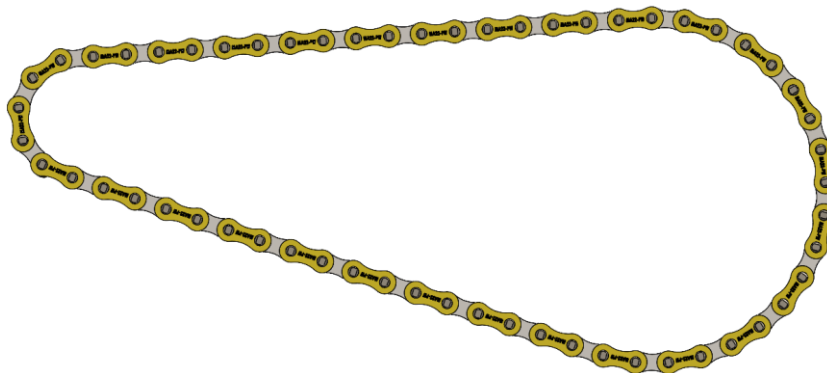


Figura 123: Cadena creada mediante matriz de cadena. Elaboración propia.

Además, por medio de la relación de posición engranaje, sería posible la sincronización de la cadena creada con los dientes de la corona y el piñón, siendo arrastrada la cadena por estos.

Aquí se hace visible el problema de arrastrar cierto error a la hora de modelar los componentes consiguiendo que SolidWorks no realice un correcto cálculo del desplazamiento del conjunto de la cadena, chocando los eslabones con los dientes de los engranajes, provocando el bloqueo del movimiento.

Por ello, tras numerosos intentos se ha tomado la decisión de no realizar esta relación de posición para que la cadena se quede estática evitando fallos futuros en el movimiento del conjunto.

Aprovechando el croquis de la cadena, tomando como referencia el centro de las circunferencias y el plano medio de la corona y el piñón, se crea un conjunto formado por estos tres componentes.

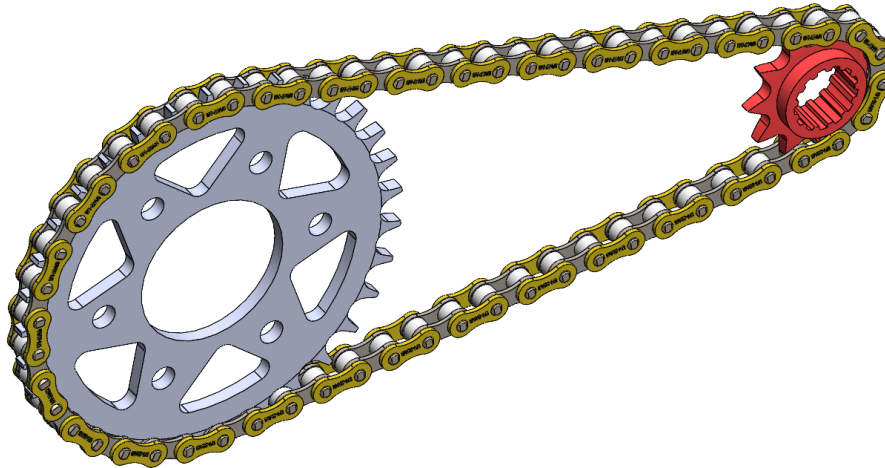


Figura 124: Cadena con corona y piñón. Elaboración propia.

Aunque no se haya llevado a cabo la relación de posición de cadena, para la unión entre el piñón y la corona se ha realizado una relación de correa, desmarcando la opción de la creación de la correa. De esta forma, esta relación permitirá el movimiento de ambos componentes a la vez.

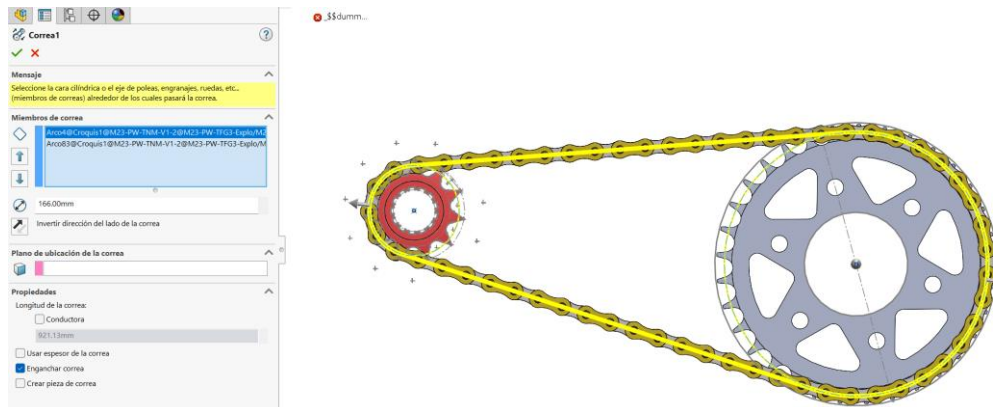


Figura 125: Relación de correa entre el piñón y la corona. Elaboración propia.

El soporte de la corona, que permite el acoplamiento con el diferencial, cuenta con una relación de posición concéntrica y coincidente con la corona. Para el resto de los componentes, que son los tornillos, arandelas y las tuercas de seguridad, se realizará el mismo procedimiento ya explicado.

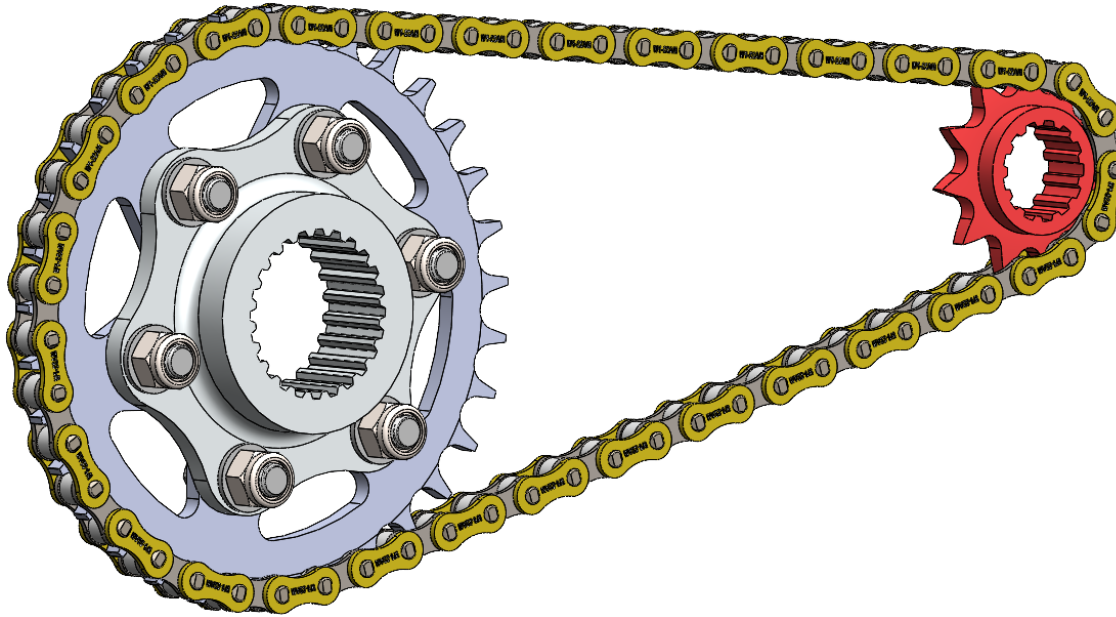


Figura 126: Subensamblaje piñón motor-cadena-corona completo. Elaboración propia.

5.3.5. Definir subensamblajes

Cuando ya se tienen todos los subensamblajes definidos, se procede a la creación de un ensamblaje general en el que se definirán las referencias principales y uniones entre los distintos subconjuntos, para finalmente conseguir un movimiento uniforme de todos los componentes.

El primer subensamblaje que se tomará como referencia es el conjunto del grupo diferencial ya que será un buen punto de partida para los subconjuntos restantes. Se posiciona en la ventana de trabajo tomando como referencia el centro de coordenadas. Cuando ya se tiene fijo el grupo diferencial, mediante una relación concéntrica y coincidente se coloca los rodamientos de rodillos y los portadiferenciales en los alojamientos pertinentes, agregando una relación paralela respecto al eje Y a estos últimos, permitiendo su posición vertical correspondiente a los anclajes que dispone en el chasis mediante una fijación atornillada. Los rodamientos permitirán el giro del diferencial respecto al portadiferencial, teniendo estos dos elementos mencionados unas protuberancias para quedar aprisionados y no permitir movimientos axiales.

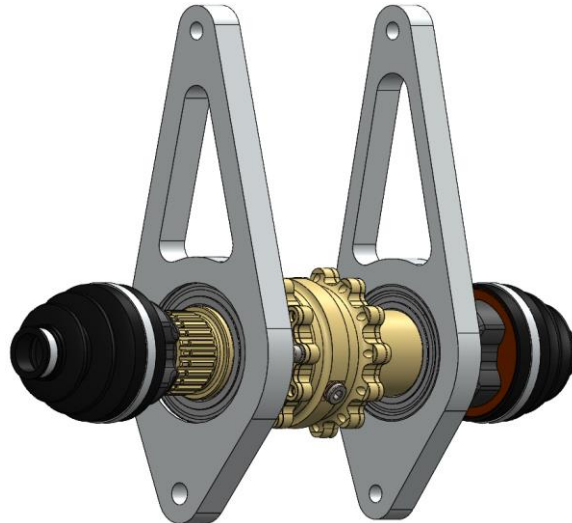


Figura 127: Grupo diferencial con portadiferencial ya definido. Elaboración propia.

El siguiente paso es el posicionamiento del subconjunto piñón-cadena-corona. La corona se coloca mediante una relación concéntrica y de engranaje 1:1 con el diferencial por la zona estriada, dejando el espacio para luego insertar un circlip para la sujeción del conjunto con el que será coincidente. Si se deja este conjunto de esta manera, pivotará respecto al diferencial. Por ello, anteriormente es necesario definir la posición del piñón del motor en la ventana de trabajo realizando un croquis con las medidas obtenidas del monoplaza.

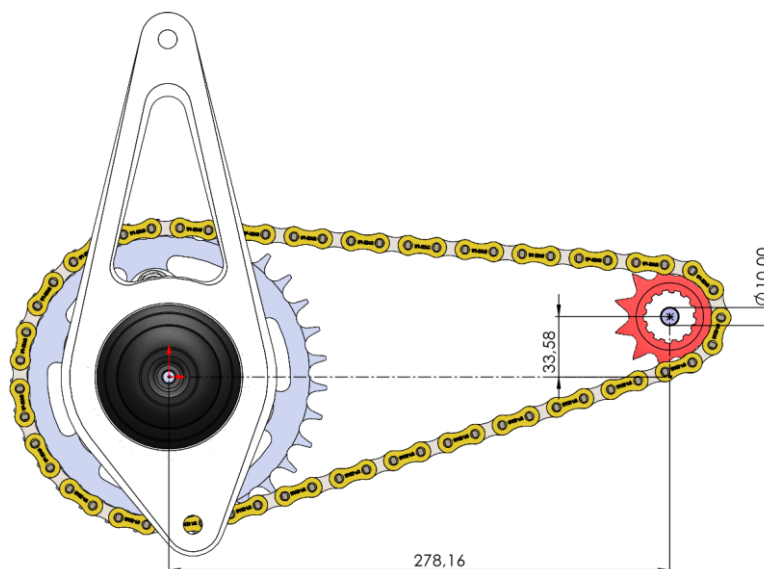


Figura 128: Referencias piñón motor. Elaboración propia.

Luego, para definir en el espacio el subensamblaje de la rueda, al igual que en los anteriores, se conocen las referencias por lo que se crean planos y ejes de referencia dejándolo fijo.

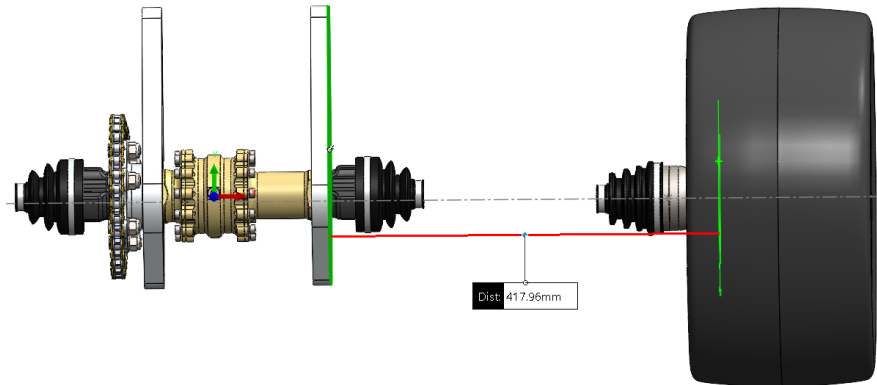


Figura 129: Referencias subensamblajes conjunto rueda y grupo diferencial. Elaboración propia.

Como ya se ha explicado, para salvar la distancia entre el grupo diferencial y la rueda se hace uso de un semieje llamado palier. La unión entre ambos extremos de este elemento con sus correspondientes juntas homocinéticas se hace uso de la relación de posición mecánica llamada como junta universal. Es importante resaltar que esta unión no se encuentra a una misma altura en Z respecto al origen de coordenadas, sino que difieren en unos milímetros. Por ello, se crea un croquis, *Figura 130*, entre ambos extremos donde se percibe dicha pendiente y que servirá como referencia para el eje central del palier. Antes de realizar esta operación, se ocultan los subensamblajes de los guardapolvos en ambos lados para tener una mejor visibilidad a la hora de realizar el croquis mencionado.

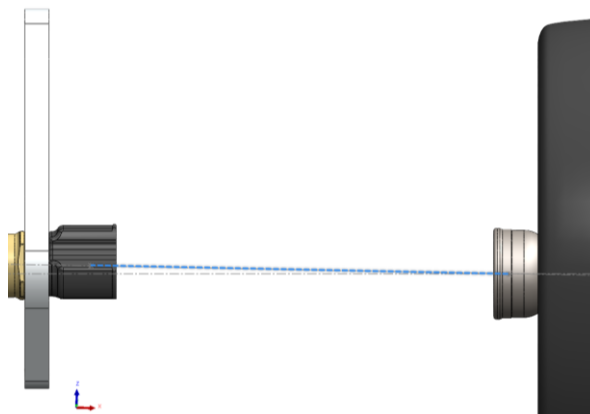


Figura 130: Croquis para definir la posición del palier entre rueda y grupo diferencial. Elaboración propia.

Teniendo ya el croquis definido, se hace coincidente el eje del palier con la línea de unión entre puntos y la relación de junta universal de ambas juntas con ambos extremos.

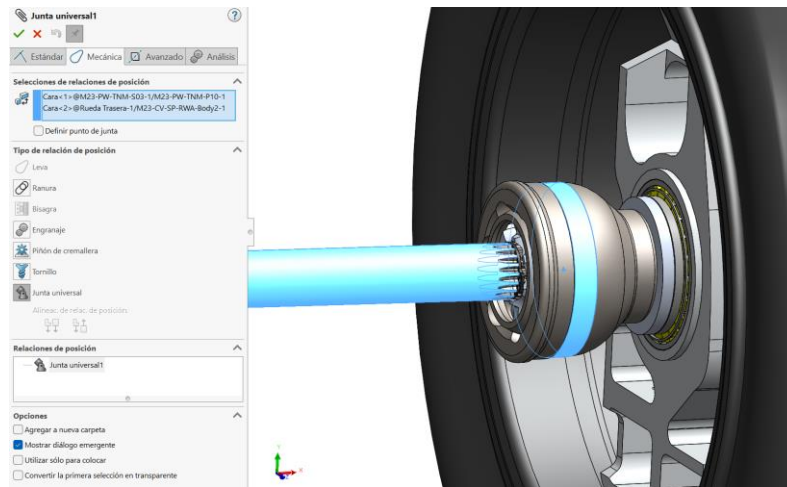


Figura 131: Relación de posición mecánica junta universal entre palier y junta homocinética. Elaboración propia.

Y, de esta forma, solo quedaría volver a mostrar aquellos subensamblajes que se ocultaron dando por finalizado la construcción de todo el conjunto.

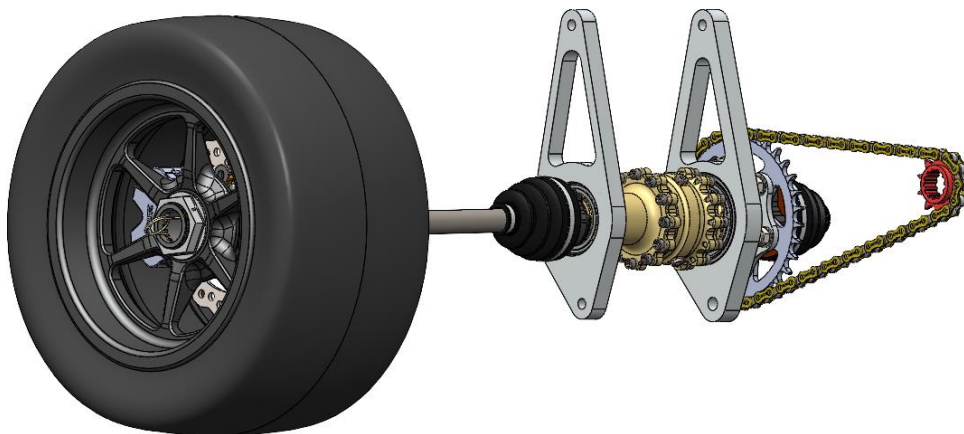


Figura 132: Ensamblaje de la transmisión trasera de un monoplace formula student. Elaboración propia.

Una vez que ya se han ensamblado todos los subconjuntos y se tiene por finalizado el ensamblaje, se comprueba que ningún elemento se mueve, permaneciendo rígido todo el conjunto. Esto es debido a que es necesario liberar en aquellos subensamblajes los grados de libertad que se dejaron sin definir, en este caso el de giro. Por ello, es muy importante tener diferenciados aquellos subconjuntos en los que es necesario convertir a flexibles, siendo así como lo llama SolidWorks. De esta forma, se comprueba que todo el conjunto

no se opondrá al giro que se le imponga dando por finalizada la creación del gemelo digital.

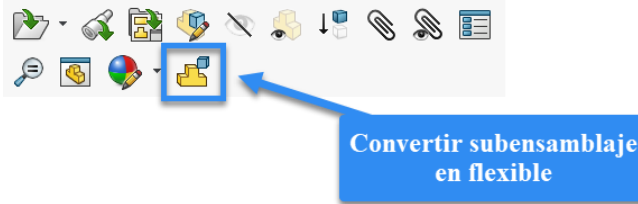


Figura 133: Opción para convertir subensamblajes en flexibles. Elaboración propia.

A modo de resumen, como se ha ido desglosando este apartado, para la creación de un gemelo digital se debe de comenzar con el modelado de los elementos que lo vayan a formar, intentado acumular el menor error posible. Después, buscar una estrategia a la hora de crear los subensamblajes para facilitar las uniones entre ellos por medio de las relaciones de posición. Finalmente, para tener un conjunto dinámico, liberar aquellos grados de libertad en los subensamblajes mediante la opción flexible.

5.3.6. Creación de video

Con todo el conjunto funcionando correctamente, se va a explicar de forma breve y concisa los pasos y configuraciones para realizar una simulación del funcionamiento de la transmisión mediante la opción de estudio de movimiento con la que cuenta SolidWorks.

En primer lugar, se accede a la pestaña de estudio de movimiento en la esquina izquierda inferior marcada en la siguiente figura:

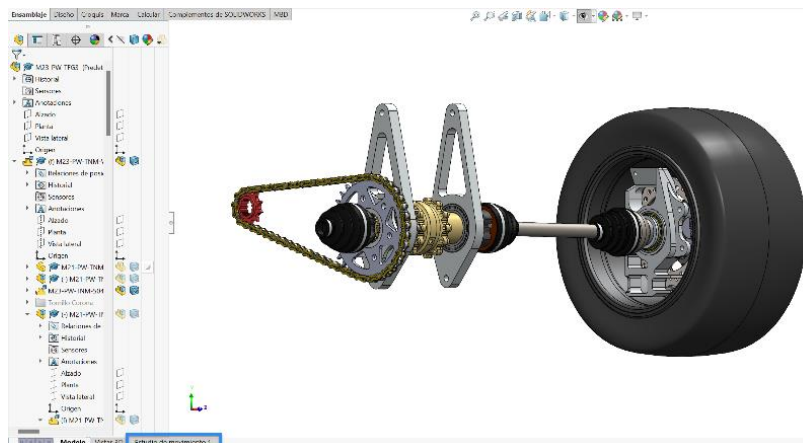


Figura 134: Pestaña de inicio para crear un estudio de movimiento. Elaboración propia.

Esta ventana, en su parte inferior, se divide en las zonas resaltadas en la *Figura 135*.



Figura 135: Zonas importante de un estudio de movimiento. Elaboración propia.

SolidWorks permite elegir entre tres tipos de estudio: animación, estudio básico y análisis de movimiento si se activa el complemento SolidWorks Motion. La principal diferencia es la cantidad de realismo visual que se le aporta al estudio, elevando el tiempo de cálculo. En este caso se ha utilizado el tipo de estudio de animación ya que es el que aporta menos realismo visual, pero permite un mejor rendimiento por ser un conjunto con tantos componentes.

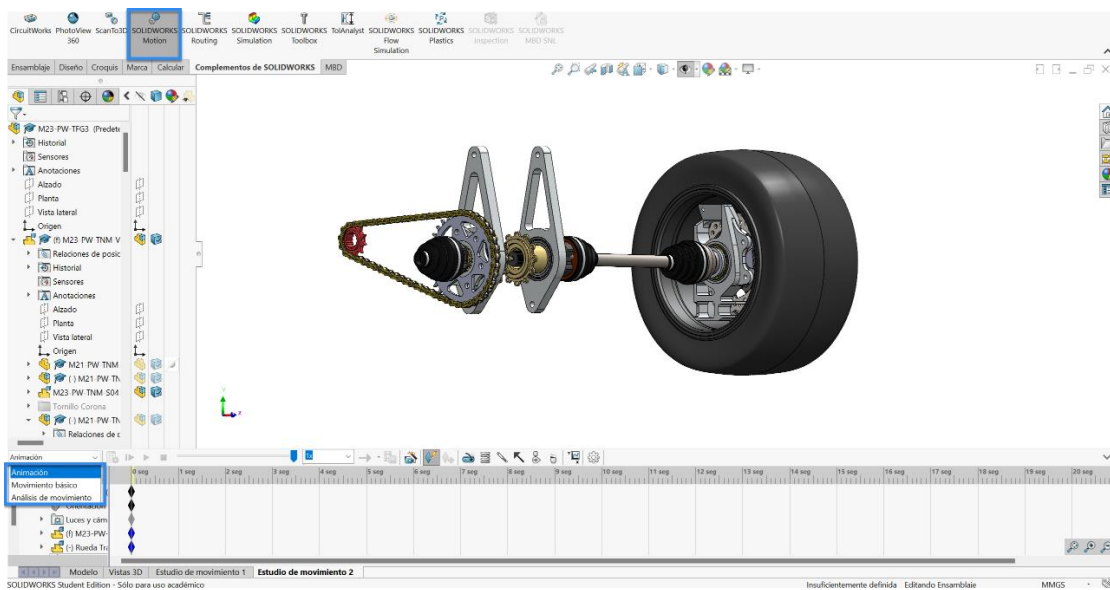


Figura 136: Elección de tipo de estudio. Elaboración propia.

Como el movimiento de la transmisión de un monoplaza es producida por el motor, se añade un motor rotario en el piñón en el que, dependiendo de la información que se tenga, se puede variar muchas funciones en el movimiento desde tener una velocidad constante a crear un segmento por puntos, pudiendo modificar su duración e invertir su dirección.

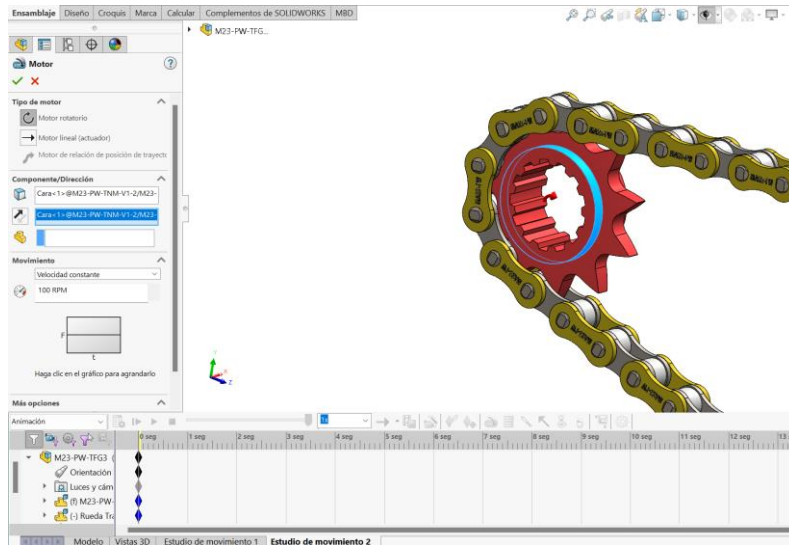


Figura 137: Forma de añadir motor rotatorio al piñón del motor. Elaboración propia.

Una vez añadido, aparecerá en la línea del tiempo el elemento definido y para ver su movimiento, es importante pulsar en el botón de calcular. Cada vez que se añada un motor o cualquier elemento, es imprescindible calcular el estudio para que el software reconozca todo aquello nuevo que se haya añadido.

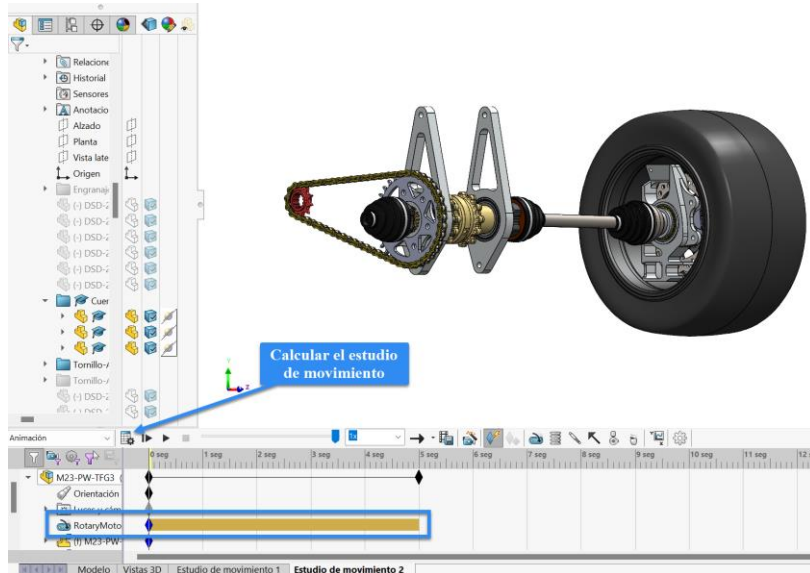


Figura 138: Visualización del motor rotatorio añadido en la línea del tiempo. Elaboración propia.

Para saber que el estudio de movimiento se ha calculado correctamente, aparecerá en amarillo la sección calculada pudiendo reproducir y navegar por la animación con los comandos señalados.



Figura 139: Visualización de la línea del tiempo con una animación calculada. Elaboración propia.

Además, se puede editar la orientación y vista de las cámaras para enfocar aquello a lo que se le quiera dar importancia, pudiendo añadir animaciones preestablecidas del conjunto pulsando en el asistente de animaciones.

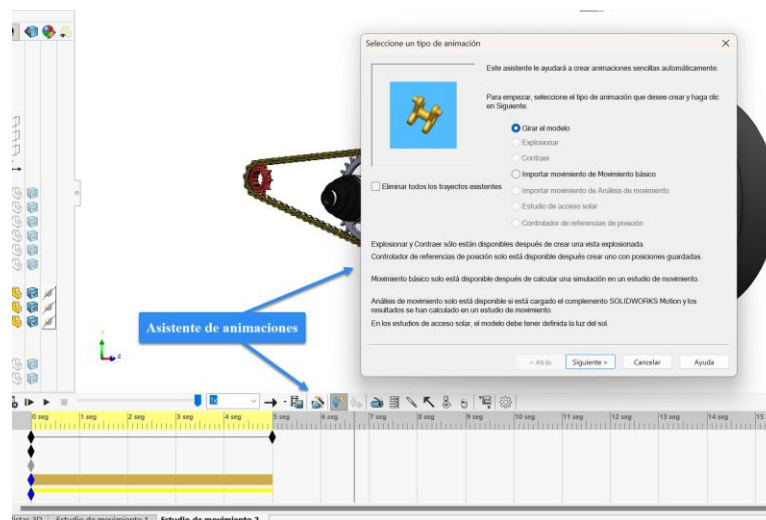


Figura 140: Asistente de animaciones. Elaboración propia.

Jugando con la línea del tiempo, se puede personalizar opciones como mostrar u ocultar elementos, cambiar su apariencia o eliminar relaciones de posición para permitir realizar desplazamientos en el elemento que así lo requiera en la animación.

A la hora de extraer un video del estudio, se hará mediante la opción de guardar animación en la que se puede modificar muchos parámetros recomendando siempre guardar el video en formato mp4.

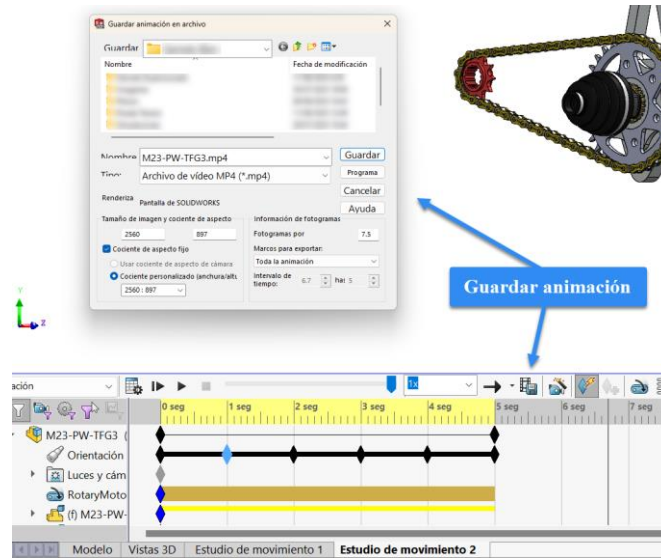


Figura 141: Asistente de animaciones. Elaboración propia.

6. ELECTROEROSIÓN POR HILO

6.1. Introducción

La electroerosión corresponde a uno de los nuevos procesos de arranque de material que ha ido cogiendo importancia rápidamente en el sector, llegando a ser hoy en día, de los más utilizados. Esto se debe a que permite el mecanizado en piezas donde con otros sistemas serían imposible por la complejidad de las mismas.

Este proceso tiene por definición como el método de arranque de viruta mediante descargas eléctricas controladas, chispas, sin contacto entre pieza y electrodo. Para conseguir un mayor efecto de las chispas, se sumerge el conjunto en un líquido dieléctrico que, a su vez, permite la limpieza de la zona de trabajo [25].

Cuenta con dos propiedades fundamentales que lo diferencia de otros procesos de mecanizado y son:

- El material a mecanizar no depende de sus propiedades mecánicas como es la dureza o que disponga de una baja maquinabilidad, sino de sus propiedades térmicas y eléctricas. Permite el corte de todo aquel material que sea conductor.
- Una gran capacidad de realizar formas complejas, tanto en zonas ciegas como pasantes.

Existen varios procesos de electroerosión, siendo los más conocidos:

- Electroerosión por penetración
- Electroerosión por hilo

Las principales diferencias entre ambos procesos es que el primero la pieza se encuentra fija y se utiliza aceite como líquido dieléctrico mientras que, en el segundo, se mueven tanto la pieza como el electrodo y el líquido dieléctrico es el agua además del uso de algunos aceites.

Durante todo este apartado, como su nombre indica, se va a hablar en profundidad de la electroerosión por hilo centrándose en el modelo de erosionadora ONA AF35 (*Figura 142*).



Figura 142: Máquina erosionadora por hilo ONA AF35. Elaboración propia.

6.2. Funcionamiento

- Formación del arco eléctrico

El proceso de la electroerosión, para la generación de la chispa, depende del tiempo de aplicación de la tensión eléctrica y la distancia entre ambos electrodos. Es un mecanizado complejo en el que el tiempo se habla en microsegundos y la distancia en el orden de las centésimas de milímetro.

Para poder explicar esto, es necesario situarse a nivel microscópico. Al situarse en el punto de máxima proximidad entre la pieza y el electrodo, la intensidad del campo eléctrico entre ambos puntos (“D” en la *Figura 143*), permitirá que en cualquier instante se exceda la tensión de disrupción del dieléctrico que los separa, dando lugar a un canal con una alta intensidad.

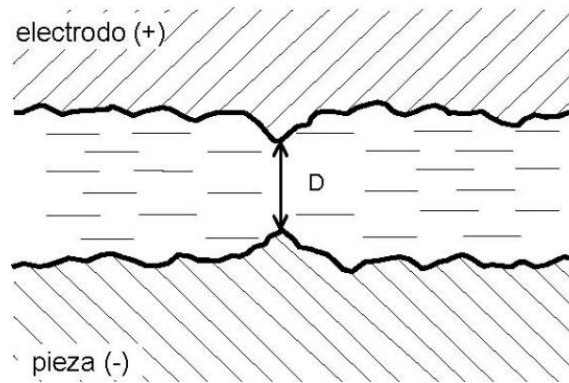


Figura 143: Posición de máxima profundidad entre piza y electrodo [26].

En este tiempo y, debido a la intensidad del campo eléctrico en los dos puntos de máxima proximidad entre electrodo y pieza se llegará a un momento en que se supere la tensión de disrupción del dieléctrico que los distancia, iniciándose la formación de un canal de elevada conductividad.

Esta intensificación y concentración del campo eléctrico desemboca en la ionización del dieléctrico y, por consiguiente, en la polarización de partículas e iones.

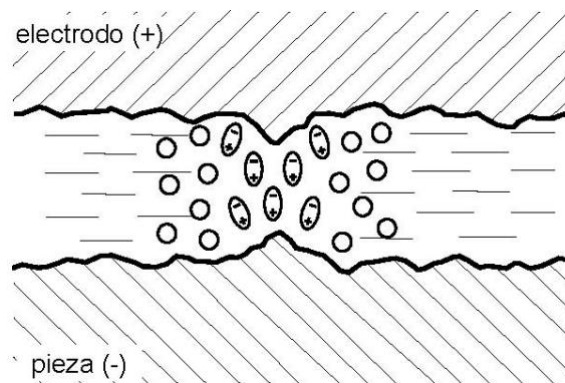


Figura 144: Ionización del electrodo [26].

Así pues, empieza a crearse el canal de la descarga, quedando envuelto por los iones positivos que lo comprimen y aíslan del medio provocando la reducción de su sección.

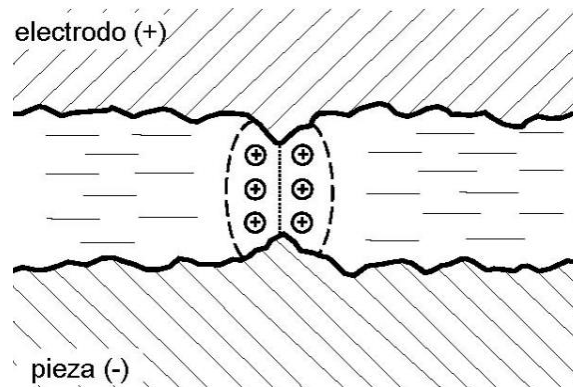


Figura 145: Iniciación canal de descarga [26].

Este estrangulamiento origina la disminución drástica de la resistencia del canal provocando valores elevados de corriente. Esta concentración permite un aumento de la ionización y, con ello, la creación de un campo magnético más potente que ocasiona un estrangulamiento mayor en el canal de la descarga produciendo su calentamiento.

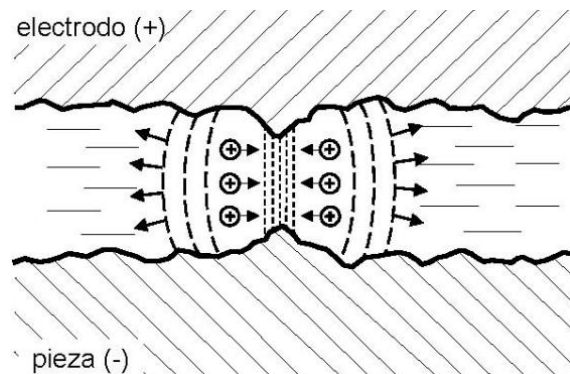


Figura 146: Flujo total de corriente por canal de descarga [26].

En este aumento de la corriente se registran unas velocidades de 10 a 100 millones de amperios por segundo y temperaturas elevadísimas en apenas 2 microsegundos.

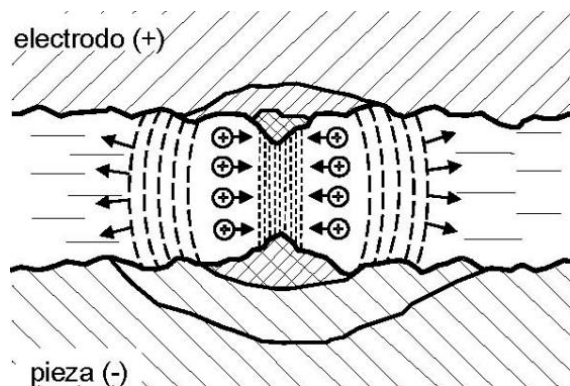


Figura 147: Efecto del elevado flujo de corriente por canal de descarga [26].

Estas condiciones tan extremas ocasionan la fusión, llegando incluso a la evaporación, de un porcentaje reducido de material tanto de la pieza como del electrodo. Además, se producen residuos debido a la ruptura del dieléctrico. Alrededor de canal, se genera una burbuja de gas.

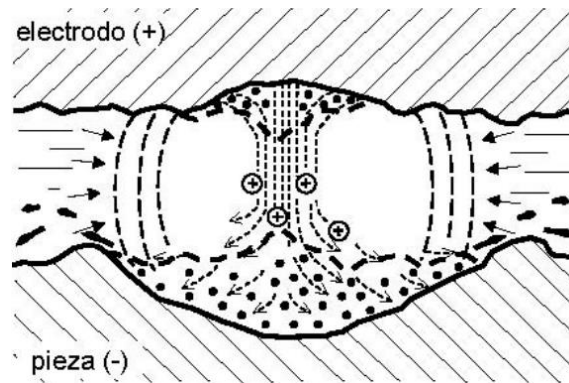


Figura 148: Arranque de material producido por la descarga [26].

En paralelo al proceso térmico, se catapulta material fundido a una elevada velocidad produciendo cráteres.

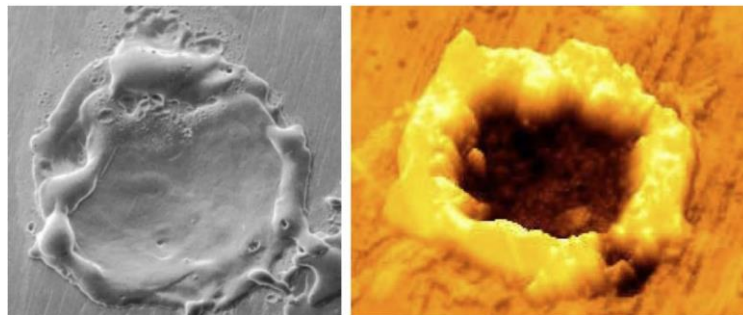


Figura 149: Formación de cráteres en la superficie de la pieza [26].

Cuando la descarga llega a su fin, al caer drásticamente la presión interior de la burbuja se genera una depresión provocando que el dieléctrico arrastre consigo los residuos que fueron eyectados en el cráter, ocurriendo el enfriamiento de su superficie al mismo tiempo, de manera que la conducción de calor es impedida hacia el interior del material.

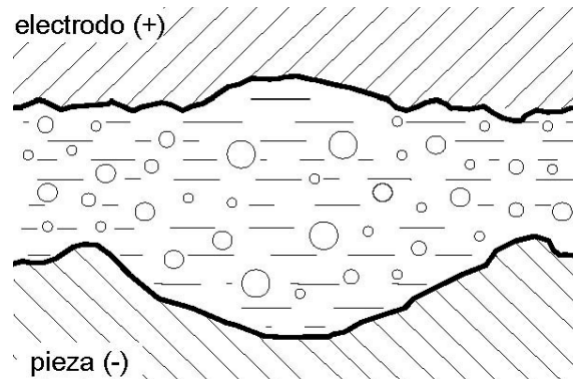


Figura 150: Último estado del cráter [26].

El ciclo llegará a su fin cuando se consuma la totalidad de la energía de descarga. Al desionizarse el dieléctrico, se cierra el canal de conductividad eléctrica volviendo a su rigidez dieléctrica inicial. Cuando se cumpla estas condiciones, se podrá dar comienzo al siguiente ciclo de descarga, que se producirá entre aquellos puntos del electrodo y de la pieza que se encuentren a una mínima distancia *Figura 150*.

Para el correcto desarrollo del proceso, la pausa entre descargas es fundamental para evitar el colapso de la chispa o la creación de un arco. El amontonamiento de residuos en la zona también puede provocar dicho fenómeno.

Por último, también hay que tener en cuenta la longitud de las chispas, GAP, a la hora de la fabricación de los electrodos.

- Electroerosión por corte de hilo

En el proceso de corte por electroerosión por hilo, el electrodo está formado por un hilo de un diámetro fluctuante entre 0,15 mm a 0,30 mm controlado por CNC, permitiendo realizar un movimiento relativo entre la pieza y el hilo.

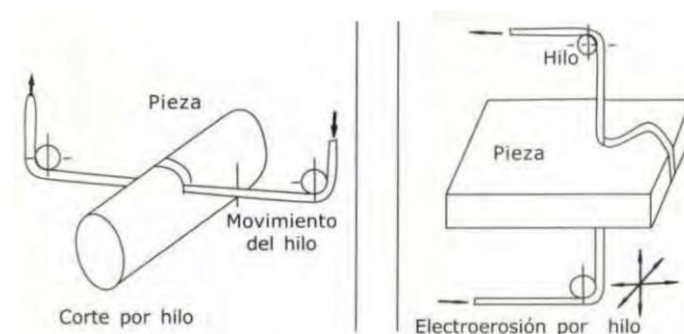


Figura 151: Corte por hilo [25].

La pieza y el electrodo se encuentran sumergidos en un líquido dieléctrico que, en esta variante de electroerosión, suele ser agua desionizada permitiendo también el uso de algunos tipos de aceite.

Es un proceso que requiere mecanizar geometrías pasantes. Aunque, también se puede realizar cortes en vertical o de gran complejidad en forma de cono mediante un descentramiento de la guía superior con respecto a la inferior.

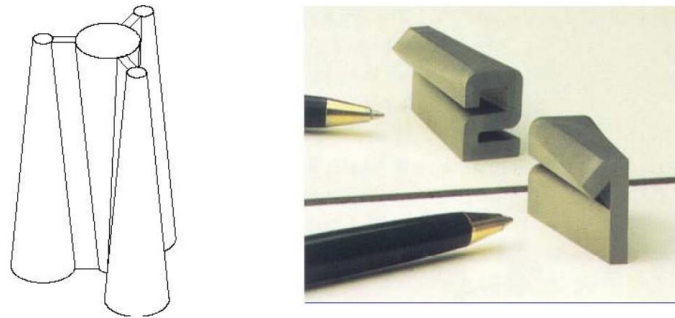


Figura 152: Cortes cónicos mediante corte por hilo [26].

La electroerosión por hilo cuenta con las siguientes ventajas:

- Rapidez. La herramienta no es necesario ni mecanizarla ni cambiarla.
- No ejerce esfuerzos mecánicos a la pieza.
- Es un proceso que tiene unas tolerancias mínimas, rondando las 5 micras.
- Excelente precisión. No existe desgaste en el hilo debido a que siempre es nuevo.
- Utilización para la mayoría de los trabajos.

6.3. Partes de una erosionadora de hilo

Para realizar un trabajo preciso, una erosionadora por hilo ha ido evolucionando a tal punto que ha llegado a una complejidad, ocupando bastante espacio, en la que podemos diferenciar tres partes fundamentales que serán explicadas detalladamente a continuación.

6.3.1. Estructura metálica

En esta parte se va a detallar aquellas zonas y elementos más generales de la máquina.

- Armazón

Constituye aquellos elementos que forman la estructura general de la máquina. Debe de servir de base de fijación de los componentes de la zona de trabajo y elementos referentes al propio proceso de la electroerosión, como la columna y el sistema de filtrado.

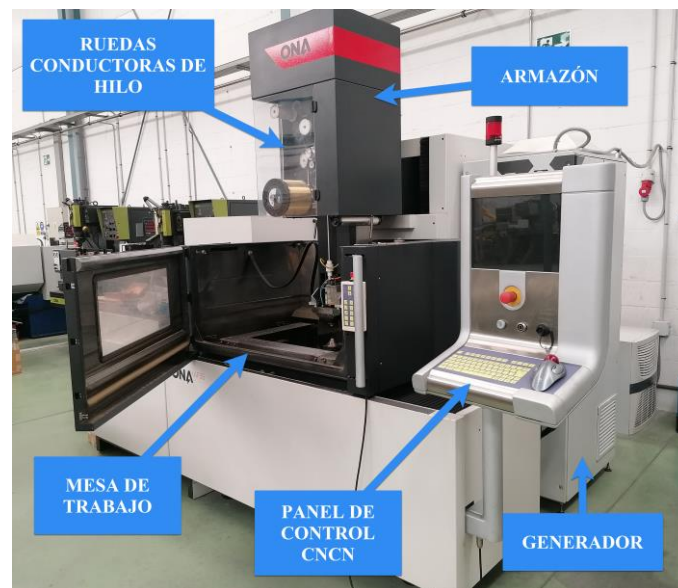


Figura 153: Zonas diferenciales erosivadora ONA AF35. Elaboración propia.

Actualmente, al existir un gran número de variantes, la posición de todos elementos es distinta ya que se ensamblan de forma modular, dependiendo de los requisitos con los que se vaya a realizar el proceso y el presupuesto. Por ejemplo, el generador suele venir en un armario aparte porque existen varias versiones y para no exponerlo a la fuente de calor y no dañar sus componentes.

- Columna

Por ella pasan todas las instalaciones eléctricas y de tuberías hacia la zona de trabajo. Cuenta con sensores y servomotores para el funcionamiento del portaelectrodos. Asimismo, a través de la ventana de metacrilato, se percibe el sistema de desenrollamiento del hilo de la bobina cuya función es prepararlo con unas condiciones óptimas para el corte. Está compuesto por unas ruedas conductoras que permiten corregir alguna

ondulación procedente de la bobina y vaya lo más firme para la zona de trabajo. También cuenta con un alojamiento donde colocar la bobina.

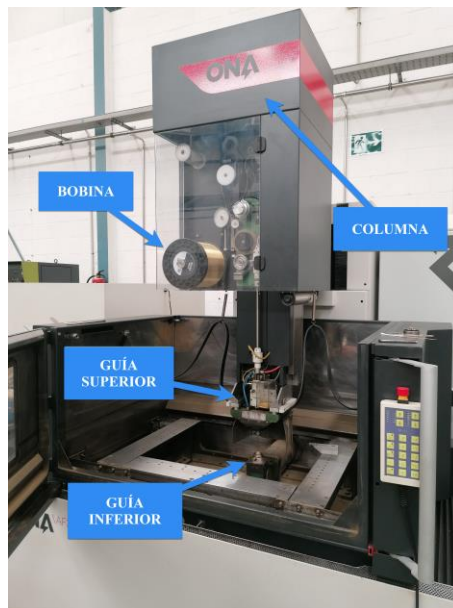


Figura 154: Componentes columna en erosionadora ONA AF35. Elaboración propia.

- Mesa de trabajo

En esta zona se fija la pieza a la máquina, mediante un utillaje, para iniciar su fabricación. Dependiendo del modelo, permite los movimientos en un recorrido máximo por las coordenadas X e Y, contado con una precisión de pocas micras.

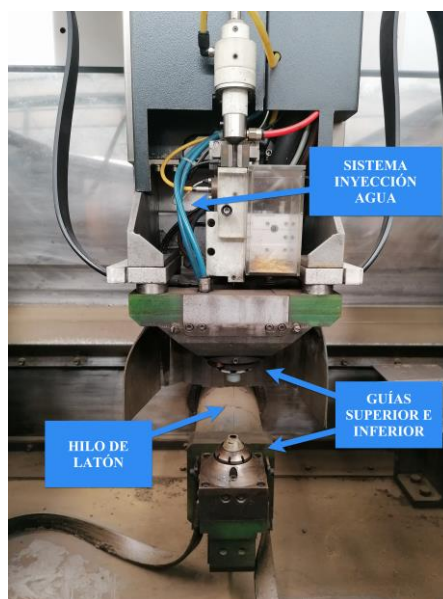


Figura 155: Componentes mesa de trabajo en erosionadora ONA AF35. Elaboración propia.

Asimismo, se encuentra visible el portaelectrodos por el que pasa el hilo y está compuesto por la guía superior e inferior. Estos elementos se encargarán de realizar el corte, conectados con los componentes procedentes de la columna, como se muestra en la *Figura 155*. Además, permite el desplazamiento en la coordenada Z.

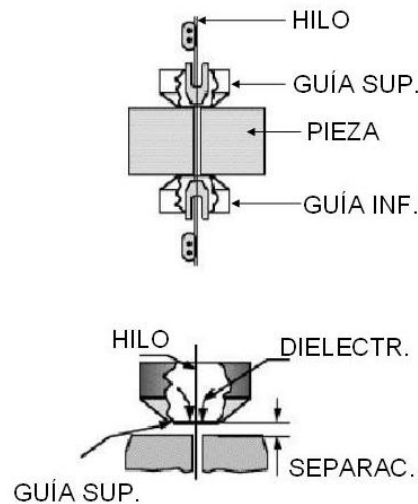


Figura 156: Elementos más específicos en la zona de trabajo de una erosionadora por hilo [27].

Como ya se comentó anteriormente, la guía superior permite un descentramiento respecto a la guía inferior pudiendo realizar cortes de gran complejidad.

Todos estos elementos se encuentran envueltos por el llamado tanque de trabajo, que a la hora de realizar el mecanizado se llena en su totalidad con un líquido dieléctrico.

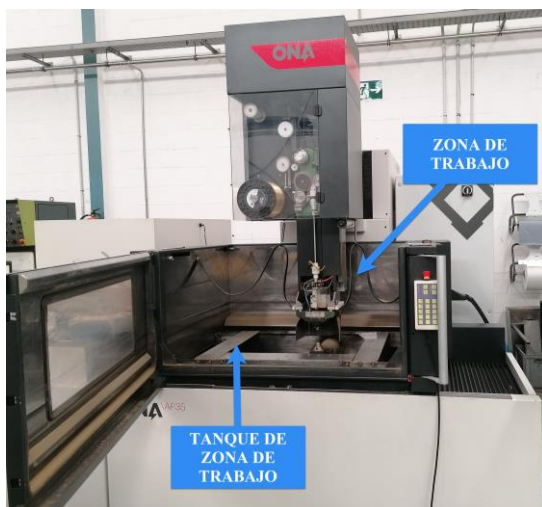


Figura 157: Zonas principales de la zona de trabajo en erosionadora ONA AF35. Elaboración propia.



Figura 158: Erosionadora en un proceso de mecanizado con el tanque lleno de dieléctrico. Elaboración propia.

Todo el hilo utilizado en un mecanizado se almacena en un depósito bañado en agua para bajar la temperatura procedente de la zona de trabajo. Cuenta con un sistema que lo corta en trozos de pequeña longitud para su fácil almacenamiento y posterior reciclaje. Así también no permite su reutilización en otro corte ya que no se tendría la misma precisión que cuando está nuevo.



Figura 159: Depósito de residuos del hilo de corte en erosionadora ONA AF35. Elaboración propia.



Figura 160: Vista interior del depósito de residuos del hilo de corte. Elaboración propia.

6.3.2. Instalación tratamiento del dieléctrico

Este apartado está compuesto por el sistema de filtrado y el de tratamiento del líquido dieléctrico que necesita un proceso como tal para conseguir un correcto funcionamiento y evitar:

- Un descenso de la capacidad de arranque.
- Una mayor tendencia a la generación de arcos voltaicos.
- La aparición de descargas parásitas que merman la precisión de la pieza.

Aunque parezca una obviedad, estos sistemas son tan importantes y necesarios como el resto explicados.

- Sistema de limpieza

Este sistema permite la limpieza de las partículas erosionadas y gases acumulados entre el espacio que hay entre el electrodo y la pieza, comúnmente llamado gap, mediante líquido dieléctrico.

Para tener un buen rendimiento en el corte por hilo, es muy importante que la zona de trabajo esté lo más limpia posible permitiendo un menor desgaste en el hilo y una buena capacidad de erosión de material. Por contraposición, si la limpieza es mala, estas características disminuirán produciendo un mal rendimiento del proceso.

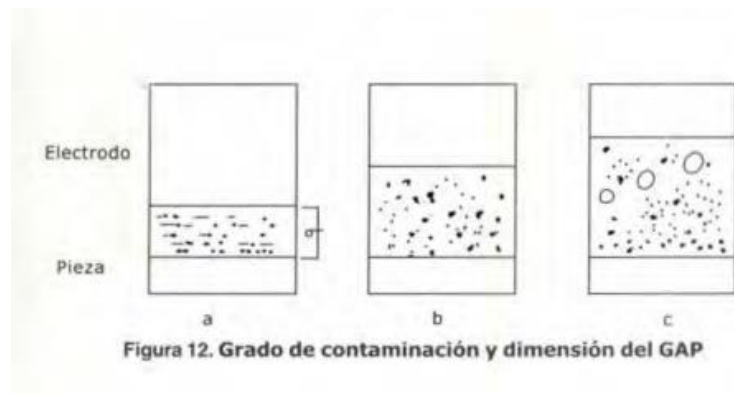


Figura 161: Grado de contaminación y dimensión del GAP [25].

Una contaminación muy elevada provoca que el dieléctrico disminuye en gran cantidad pueden ocurrir los siguientes fenómenos:

- Una gran acumulación de gases impide una formación efectiva del canal de descarga ocasionado que se ramifique disminuyendo el rendimiento del procedimiento.
- Mala focalización a la hora de fundir partículas, pudiendo fundir las partículas ya arrancadas consiguiendo una pérdida de rendimiento.
- Formación de arcos y cortocircuitos no deseados pudiendo dañar ambos electrodos.

Por consiguiente, como se ha explicado, la limpieza es muy importante en este proceso permitiendo un elevado rendimiento si se cumplen unas buenas condiciones de limpieza.

Existen varias formas de limpieza equipando la ONA AF35 la limpieza por presión a través del electrodo. En este proceso, el líquido dieléctrico es inyectado por un agujero del electrodo procedente de un tubo que está conectado a un grupo de presión.

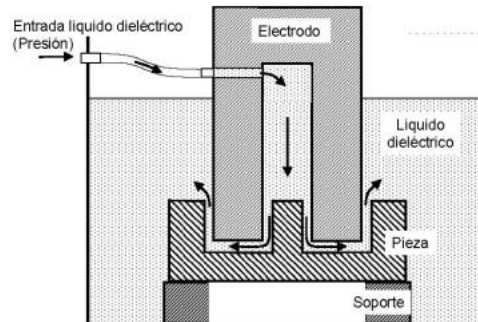


Figura 162: Limpieza a través del electrodo por presión [26].

Con este tipo de limpieza se producen orificios ligeramente cónicos (*Figura 163*). Este efecto se origina debido a una electroerosión secundaria en el gap lateral. El flujo de partículas erosionadas por el gap lateral permite que se produzcan descargas laterales, ocasionando un pequeño descenso de rendimiento debido a que estas descargas deberían de ocurrir frontalmente, no lateralmente.

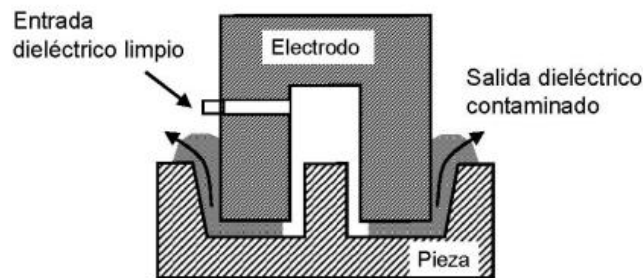


Figura 163: Conicidad producida por la limpieza por presión a través del electrodo [26].

Además, mientras se está erosionando, se crea un cilindro que forma parte de la pieza. En aquellos agujeros que sean pasantes, es necesario que cuando el electrodo llegue al final, el cilindro sea extraído para evitar que, en caso de moverse, toque las paredes del electrodo ocasionando un cortocircuito permanente.

- Sistema de filtrado

Existen distintos sistemas que permiten el filtrado del dieléctrico, pero se focalizará en la explicación del existente en la ONA AF35, mediante cartuchos.

Es un método bastante simple donde estas unidades logran una gran calidad de filtrado del líquido dieléctrico mediante el paso del líquido por un cartucho de papel que no permite el paso de los residuos procedentes de la erosión o aceites de la propia máquina.

Estos cartuchos están fabricados por un papel específico formando ondulaciones para que en una superficie menor obtener la mayor superficie filtrante posible. Dependiendo de la generación de residuos de erosión de la máquina, tendrá un número de filtros mínimo. Una vez obstruida esta superficie, es obligatorio su reposición por otro nuevo debido a que opone una resistencia al avance del líquido dieléctrico, disminuyendo el caudal entrante del mismo y consiguiendo que el excedente circule sin un correcto filtrado. Estos cartuchos deteriorados deberán ser reciclados por normativa medioambiental.

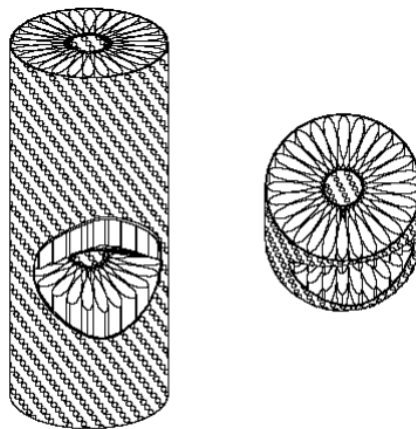


Figura 164: Filtro de cartucho de papel [26].

Los filtros se encuentran en una especie de botellas metálicas en las que, mediante el impulso de una bomba, obliga al líquido dieléctrico con residuos sometido a una presión a pasar a través del papel ondulado para ser limpiado. El líquido sin residuos es absorbido por un tubo perforado que pasa por el centro del filtro y es canalizado hacia el tanque de líquido limpio, listo para su uso en la zona de trabajo.



Figura 165: Localización del sistema de filtrado y del tanque de líquido dieléctrico en una erosionadora ONA AF35. Elaboración propia.

- Sistema de decantación

Cuando la erosionadora requiere de un mayor filtrado, por causa de un mal funcionamiento del sistema de filtrado de cartuchos de papel ocasionado por una posible dejadez de mantenimiento o un sobre exceso de demanda de líquido dieléctrico por la creación de mucho material erosionado en la zona de trabajo, cuenta con un sistema de decantación mediante polvo mineral. Aunque, en muchas ocasiones, ambos sistemas trabajan en paralelo para evitar sobrecargar en demasía uno de ellos.

La gran ventaja de este sistema, patentado por ONA, es su gran capacidad de poder ser automatizado, no teniendo que estar el operario pendiente de este a diferencia del filtrado por cartuchos de papel.

El concepto de funcionamiento es muy simple. El líquido con residuos entra por la parte superior de un depósito con este polvo mineral, dejando los restos erosionados adheridos a este polvo, saliendo el líquido por la parte inferior limpio y listo para su deposición en el tanque para su posterior uso en la zona de trabajo.

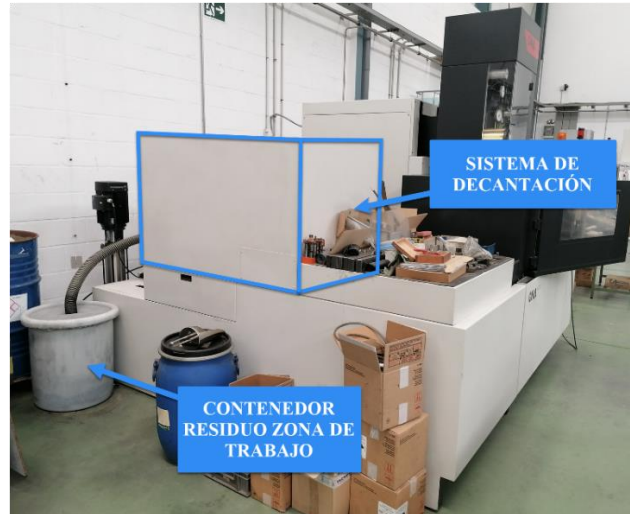


Figura 166: Localización del sistema de decantación y del contenedor para residuos procedentes de la zona de trabajo en una erosionadora ONA AF35. Elaboración propia.

Cuando la máquina detecta mediante un presostato que la capacidad filtrante se ha saturado, el polvo mineral se lava a contracorriente usando líquido limpio volviendo a verter por la parte superior del depósito los residuos. El líquido dieléctrico utilizado se podrá recuperar repitiendo el proceso de filtrado y los residuos acumulados en el depósito de decantación, cada mes aproximadamente, serán vertidos de forma automática en un contenedor para su posterior reciclaje. Los residuos depositados son parecidos a una especie de lodo conocido como residuo cracking.



Figura 167: Residuo cracking procedente de la zona de trabajo y sistema de filtrado para su posterior reciclaje. Elaboración propia.

La tres grandes ventajas que tiene este sistema son:

- El polvo mineral al lavarse, como se ha comentado anteriormente, se recupera. Por ello, no es necesario ni de su mantenimiento ni su reposición.
- El proceso de lavado a contracorriente tiene una duración estimada de cinco minutos, pudiéndose efectuar al mismo tiempo que la máquina se encuentre realizando algún corte.
- Este sistema también permite el filtrado de algunos aceites, además del agua utilizada, teniendo una gran versatilidad.

Se puede sacar la conclusión que, tanto el sistema de filtrado por cartuchos de papel y el de decantación producen residuos que son reciclados, convirtiéndose en una máquina que cumple con los estándares necesarios para respetar el medioambiente.

- Sistema de desionización

Como ya se ha explicado, en este proceso de electroerosión por hilo se trabaja con una pieza conductora sumergida en un líquido dieléctrico que se encuentra filtrado, refrigerado y parcialmente desionizado.

A modo que avanza el proceso, la conductividad del medio aumenta progresivamente. Este aumento se produce por las reacciones químicas entre el metal de la pieza y el líquido dieléctrico del medio que los envuelve, siendo generalmente agua. Cada una de las descargas eléctricas que se generan transmiten una corriente de electrones provocando la formación de iones originados por el agua, la pieza y el hilo. El aumento de conductividad es frenado por unas resinas que se encuentran depositadas dentro de una serie de depósitos de color azul señalados en la *Figura 168* conectadas con la zona de trabajo, intercambiando los iones con el medio. Su precio es elevado y es muy complicado su recuperación, por lo que se aconseja que el líquido dieléctrico venga ya desionizado permitiendo un uso mínimo de este sistema para que solo esté enfocado en el proceso de mecanizado [28].



Figura 168: Sistema de desionización de erosionadora ONA AF35. Elaboración propia.

Cada vez que se enciende la erosionadora comprueba el nivel de conductividad y no se podrá iniciar el proceso de mecanizado hasta que no se alcancen valores menores a 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

- Sistema de refrigeración del líquido dieléctrico

Durante el mecanizado se alcanzan temperaturas muy altas debido a las repetidas descargas a elevada intensidad. Esta temperatura es transferida al líquido dieléctrico que se reparte por toda la mesa de trabajo, además de la temperatura de ambiente. Si no se dispone de este sistema puede afectar directamente a la precisión del mecanizado incluso llegar a dañar componentes de la propia erosionadora, consiguiendo resultados no deseados.

Por ello, la ONA AF35 cuenta con un pequeño centro de refrigeración cuya principal misión es reducir la temperatura del líquido dieléctrico. Gracias a este sistema, se consigue mantener una temperatura de trabajo óptima en la zona de mecanizado permitiendo un trabajo continuo sin necesidad de parar el proceso.

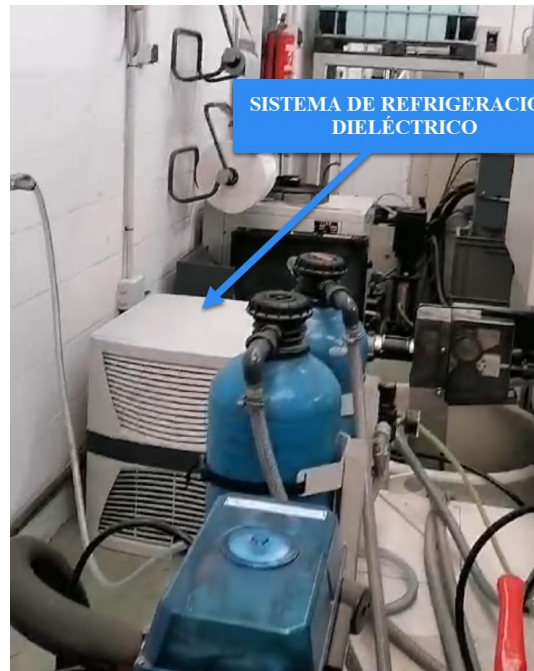


Figura 169: Sistema de refrigeración del líquido dieléctrico de la erosionadora ONA AF35.
Elaboración propia.

6.3.3. Estructura eléctrica

Por último, este grupo de elementos es de los más importantes ya que se encarga de proporcionar la tensión necesaria para el cebado o encendido de descarga, así como su mantenimiento. Además, de la configuración de todos aquellos parámetros esenciales que tomarán lugar a la hora de realizar el proceso de corte.

- Generador

Es uno de los componentes fundamentales de la erosionadora pudiendo destacar dos grandes grupos:

- Generadores de relajación
- Generadores de impulso transitorios

La función del generador es suministrar los impulsos con la tensión adecuada para el cebado de la descarga y su mantenimiento. Esta tensión de mantenimiento depende de los metales seleccionados del electrodo y la pieza siendo independiente de la intensidad de la descarga. Igualmente, el generador debe controlar tales parámetros como el tiempo y frecuencia de sucesión de las descargas, así como limitar la corriente de las mismas.

Teniendo en cuenta que la erosionadora estudiada está compuesta por un generador de impulso transitorios del tipo isofrecuencial de baja tensión de encendido, se va a estudiar en profundidad solo este tipo.

Pero, en primer lugar, un generador de impulsos transitorios permite modificar independientemente tales variables como son el tiempo de pausa (t_o), la intensidad del impulso (i_f) y el tiempo de impulso (t_i).

Para su funcionamiento, están alimentados mediante una corriente alterna trifásica a 220V o 380V aplicando a los electrodos directamente un flujo continuo de impulsos en función de las variables anteriormente mencionadas [26].

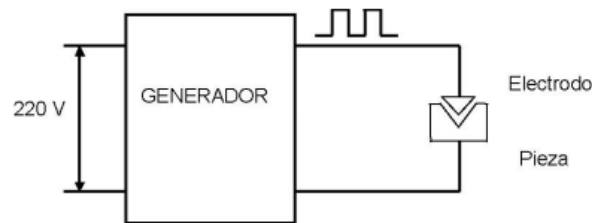


Figura 170: Concepto de funcionamiento de un generador [26].

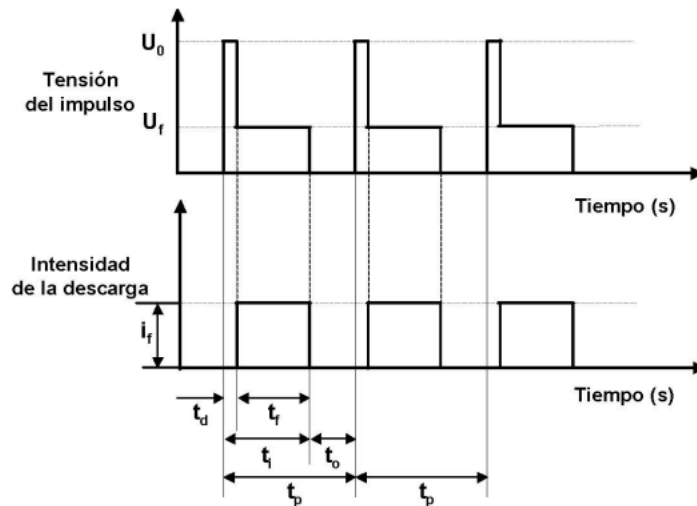


Figura 171: Parámetros fundamentales de las descargas [26].

Referente a la *Figura 171*, se expone un impulso de tensión y de intensidad que se da en un proceso habitual. Entre el electrodo y la pieza se establece una tensión de vacío (U_0). La descarga se inicia por medio del fluido dieléctrico durante un tiempo de encendido (t_d) que oscila entre 0,5 y 2 μs .

En esta situación, la tensión entre polo alcanza un valor bajo conocido como tensión de descarga (U_f). Esto provoca un impulso rectangular de intensidad y de duración t_f .

Normalmente en este tipo de generadores el electrodo es el ánodo y la pieza el cátodo.

Este tipo de generadores se pueden dividir en isoenergéticos e isofrecuenciales, y estos últimos en baja y alta tensión de encendido.

Tomando como referencia el isofrecuencial de baja tensión de encendido, montado en la ONA AF35, presenta como principal ventaja la capacidad de generar una frecuencia constante de chispeo, si ser influenciada la extensión de las pausas por el retardo de encendido de las descargas. Este retardo de encendido origina una pérdida de energía produciendo que no todas las descargas tengan un mismo potencial por lo que la rugosidad en la pieza no será uniforme, siendo esto el principal inconveniente.

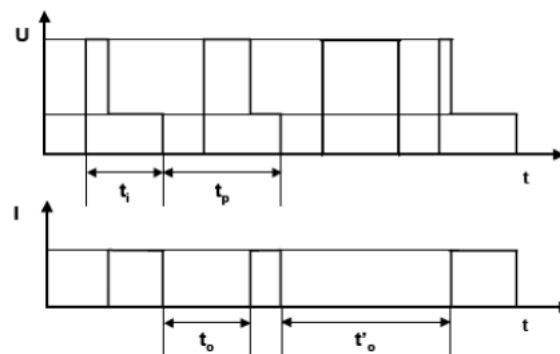


Figura 172: Generador isofrecuencial de baja tensión de encendido [26].

- Panel de mando CNC

Hoy en día, ya casi todas las máquinas en el sector de la fabricación vienen equipadas con equipos CNC, y esta no es una excepción. Mediante este panel, se pueden controlar todos los parámetros antes, durante y después del proceso, pudiendo hacer uso de la automatización. Además, se puede tener acceso a los valores de todos los sensores y actuadores que constituyen los sistemas de esta máquina.



Figura 173: Panel de control de la erosionadora ONA AF35. Elaboración propia.

- Cables de polaridad e instalación eléctrica general

Al ser un proceso en el que se utilizan altas cargas de intensidad y voltaje, cuenta con una instalación capaz de soportar estas altas cargas de corriente.

6.4. El líquido dieléctrico

En la electroerosión es muy importante el uso de un líquido dieléctrico. Por ello, a continuación, se detallan las funciones que realiza en un mecanizado:

- Concentrar la descarga en un punto. El inyectar el fluido a presión en el gap permite una capacidad muy superior de erosión a diferencia de que hubiese aire o un gas debido a que la descarga se ramificaría.
- Actuar como aislante entre electrodos.
- Arrastre de partículas. Es importante la estabilidad en el proceso, es así que mediante un sistema de limpieza adecuado, permita la limpieza de los restos erosionados de la zona de trabajo.
- Refrigerar la pieza y el electrodo. Durante el mecanizado, estos componentes tienden a alcanzar elevadas temperaturas debido al efecto térmico de las continuas descargas.

Al mismo tiempo, una vez explicadas las funciones que realiza el líquido dieléctrico, se explicarán qué características debe de cumplir para ser utilizado en este proceso.

- Suficiente rigidez dieléctrica. Entre ambos electrodos va a transcurrir tensiones que oscilan entre 60 y 300 voltios separados por un gap de entre 10 y 2500 micras, permitiendo el paso de la corriente si es en forma de descarga.
- Baja viscosidad y tensión superficial. Debe de fluir con facilidad por huecos menores a 5 micras para el arrastre de partículas erosionadas y llegar a cada rincón del gap.
- Químicamente neutros. El fluido nunca puede ser ácido para evitar deteriorar todos los componentes de la zona de trabajo.
- Volatilidad baja. No puede haber pérdidas por estar en contacto con el aire.
- Punto inflamación alto. Evitar condiciones de incendio.
- Fluido que no desprenda vapores nocivos ni pueda ocasionar algún riesgo.
- Al estar a altas temperaturas, debe evitar tanto variaciones dimensionales como poder enfriar las zonas erosionadas.
- Mínima formación de lodos. Importante para no empeorar las condiciones de mecanizado.
- Propiedades mínimamente sensibles a condiciones de mecanizado. Resistir a alteraciones de temperatura, a las partículas erosionadas y a los productos resultantes fruto de la acción de las descargas.
- Precio moderado y con disponibilidad de comprar.

Al ir aumentando la tensión entre el electrodo y pieza, llega un momento en que el líquido se ioniza ligeramente permitiendo el paso de una pequeña corriente eléctrica. Esto a su vez hace aumentar la ionización, con lo que la resistencia eléctrica del líquido eléctrico baja bruscamente. Entonces se da la descarga en forma de avalancha, que caracteriza a las descargas erosivas. Una vez terminado el impulso, el líquido debe de desionizarse, y la siguiente descarga podrá darse en el punto en que el campo eléctrico entre electrodo y

pieza sea capaz de volver a ionizarlo y de formar el canal a través del cual se dará la siguiente descarga, ocurriendo así un reparto al azar de las descargas sobre la superficie a erosionar [26].

Los líquidos que se suelen utilizar en este proceso es el agua desionizada, ya que cumple con creces los puntos explicados anteriormente. Sin embargo, en este proceso también se suelen utilizar algún tipo de aceite, aunque no es muy usual.



Figura 174: Depósito con agua destilada y desionizada. Elaboración propia.

6.5. Materiales para electrodos

Se podría pensar que para este tipo de mecanizado se podrían utilizar cualquier material conductor para la fabricación del electrodo. Sin embargo, dependiendo del generador que se esté usando, el material del que está formada la pieza y el resultado final que se desea.

El desgaste es el principal problema de los electrodos. Como se ha comentado, la erosión se produce tanto en la pieza y el electrodo, siendo el desgaste en este último mucho menor. Por ello, hay que buscar aquel material en el que el desgaste sea mínimo y debe de cumplir las siguientes propiedades físicas:

- Elevado punto de fusión. En este proceso se alcanza temperaturas muy elevadas en zonas focalizadas por lo que se requiere de un material que cuanto más elevado sea su punto de fusión, menor será el desgaste del electrodo.
- Buena conductividad térmica y eléctrica. Debido a que el calor se concentra en espacios pequeños y en intervalos de tiempo muy cortos, se requiere que éste sea

evacuado rápidamente por el resto del electrodo. Para ello, el material debe de tener una resistividad eléctrica baja o una buena conductividad térmica.

Asimismo, también se debe de entre en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales, citando a continuación las más importantes:

- Menor coeficiente de dilatación posible. En el proceso, como ya es sabido, los electrodos consiguen estar a altas temperaturas. Por ello, hay que evitar que se expanda debido al calor para no modificar las dimensiones finales de la pieza.
- Bajo peso específico. En piezas muy complejas se utiliza un gran volumen de hilo, así pues, es más fácil su almacenamiento y distribución.
- Buena estabilidad dimensional. Cuando se les realizan tratamientos y procesos físicos a algunos materiales antes de su comercialización, quedan afectados por tensiones internas. Estas tensiones son normalmente liberadas cuando estos materiales son calentados produciendo que el hilo no disponga de un diámetro constante ocasionando variaciones no deseadas en las dimensiones de la pieza.

En resumen, todas estas propiedades se deberán de tener en cuenta a la hora de la elección final del material del hilo. Además, pueden surgir otros factores como la disponibilidad de adquisición, su precio, el mecanizado que se vaya a realizar, las dimensiones del electrodo...



Figura 175: Bobinas de latón. Elaboración propia.

Un factor como es el diámetro del electrodo puede condicionar mucho en la decisión final de la elección del hilo. Uno que posea un menor diámetro se calienta más y el proceso se

deberá de realizar más lentamente que uno con un mayor espesor, que suele ser utilizado en las labores de desbaste y permite una velocidad mayor de corte, consiguiendo una tolerancia mayor a diferencia del que tenga un diámetro menor.

A continuación, se expone una tabla con las principales propiedades de los materiales más utilizados para la fabricación del electrodo.

Tabla 4: Propiedades de los materiales para electrodo.

	Cobre electrolítico	Cobre al plomo	Cupro- tugsteno	Aleaciones de aluminio	Latón	Acero	Grafito
Temperatura de fusión	Baja	Baja	Baja	Alta	Alta	Alta	Alta
Resistividad eléctrica	Muy alta	Muy alta	Alta	Muy alta	Alta	Alta	Muy alta
Maquinabilidad	Mala	Buena	Buena	Media	Muy buena	Buena	Muy buena
Coefficiente dilatación lineal	Alto	Alto	Bajo	Medio	Medio	Bajo	Muy bajo
Peso específico	Alto	Alto	Muy alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo
Desgaste	Medio	Alto	Muy bajo	Alto	Alto	Medio	Bajo
Arranque	Alto	Medio	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Medio
Precio	Medio	Medio- Alto	Muy alto	Medio	Medio	Medio	Alto

7. COMPONENTES CREADOS

7.1. Palier

7.1.1. Diseño

El monoplaza MA22RT montaba un palier comercial y una homocinética que es normalmente utilizada en vehículos del grupo VAG.



Figura 176: Palier con homocinética del monoplaza MA22RT [29].

Este palier macizo de acero F127 había sido dimensionado para un par bastante elevado de 550 Nm. Su sección central es de 27 mm de diámetro y sus extremos están condicionados al estriado de las juntas homocinéticas.

Por ello, en este punto se va a intentar obtener un par en rueda más cercano a la realidad pudiendo reducir así su sección conllevando una disminución de peso y masa rotacional.

- **Estimación par de tracción medio en rueda**

El neumático seleccionado para el monoplaza MA23RT es el modelo del fabricante norteamericano Hoosier 16.0x7.5-10 cuyas características quedan adjuntas en la siguiente figura:

artículo #	Tamaño	sobredosis	Ancho de la banda de rodadura	Ancho de la sección	Recom. Borde	borde medido	Compuesto	Aprox. Peso
43075	16,0x7,5-10	16,2"	7.3"	8.4"	6,0"-8,0"	8,0"	R20, LCO	8 libras

Figura 177: Características neumático Hoosier [29].

De la *Figura 177* es importante extraer, aunque las medidas se encuentren en pulgadas, el diámetro del neumático es de 411,48 mm. Además, cuando se consigue una

temperatura óptima de rodadura en el neumático aporta un coeficiente de fricción (μ) con el asfalto cuyo valor es de 1,4.

Por otro lado, se ha de tener en cuenta la masa del vehículo que ronda los 310 kg sumando también al piloto.

Esto son datos que serán útiles para poder calcular el par de adherencia. Este par se rige mediante la siguiente ecuación:

$$M_r = F_{T_{\max, \text{neu}}} \cdot r_c \quad (16)$$

Donde M_r : Par en rueda

$F_{T_{\max, \text{neu}}}$: Fuerza longitudinal en el neumático

r_c : radio crítico

De la ecuación anterior, resulta como incógnita la fuerza longitudinal del neumático, que se obtiene mediante:

$$F_{T_{\max}} = \mu \cdot F_z \quad (17)$$

Donde μ : coeficiente de fricción

F_z : peso por eje en la componente z del plano

Este peso por eje se tendrá en cuenta para la transferencia de carga longitudinal en el caso de la aceleración mediante un análisis dinámico. En un vehículo se pueden distinguir las siguientes sollicitaciones dinámicas:

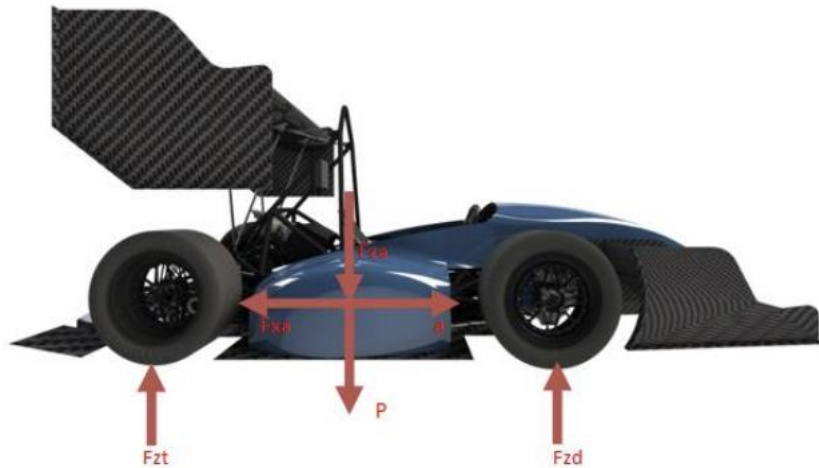


Figura 178: Solicitaciones dinámicas en un vehículo [30].

Ya que el monoplaza es de tracción trasera, para obtener el esfuerzo vertical en el eje trasero, se realiza un equilibrio de momentos que se recoge en una única extensa ecuación:

$$F_{zt} = \frac{P \cdot l_1 + \left(\frac{P}{g} \cdot a + F_{xa}\right) \cdot h + F_{za} \cdot l_1}{L} \quad (18)$$

Donde F_{zt} : peso del vehículo eje trasero

P : peso del vehículo

g : gravedad

a : aceleración longitudinal del centro de gravedad

F_{xa} : resistencia al avance (drag)

F_{za} : carga vertical descendente (downforce)

L : batalla del monoplaza (1.525 m)

l_1 y l_2 : distancia entre el centro de gravedad a los dos ejes, en este caso, mismo valor

h : altura al centro de gravedad (0.3 m)

Además, las fuerzas de drag y downforce se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$F_{xa} = \frac{1}{2} \rho C_x A_f v^2 \quad (19)$$

$$F_{za} = \frac{1}{2} \rho C_z A_f v^2 \quad (20)$$

Donde los coeficientes aerodinámicos $C_x=1.33$, $A_f=1.44 \text{ m}^2$ y $C_z=2.57$ son extraídos de otros monoplazas por falta todavía de madurez del equipo [30].

En la prueba de aceleración, y con ayuda de las ecuaciones de MRUA, se obtiene una aceleración de 12.25 m/s^2 . Con este dato, ya se puede sustituir todos los valores en la Ecuación (18), y con ello en las anteriores hasta obtener como resultado un par en rueda de 318,02 Nm. A partir de este valor, el neumático comenzará a perder tracción causando el deslizamiento de este.

Por otro lado, se debe de conocer las prestaciones que proporciona el motor y la transmisión. Desde un inicio se ha contado con un motor de una Honda CBR 600 RR del año 2007 al que se le ha realizado varias pruebas en banco de potencia, viendo en la figura siguiente la curva de potencia obtenida:

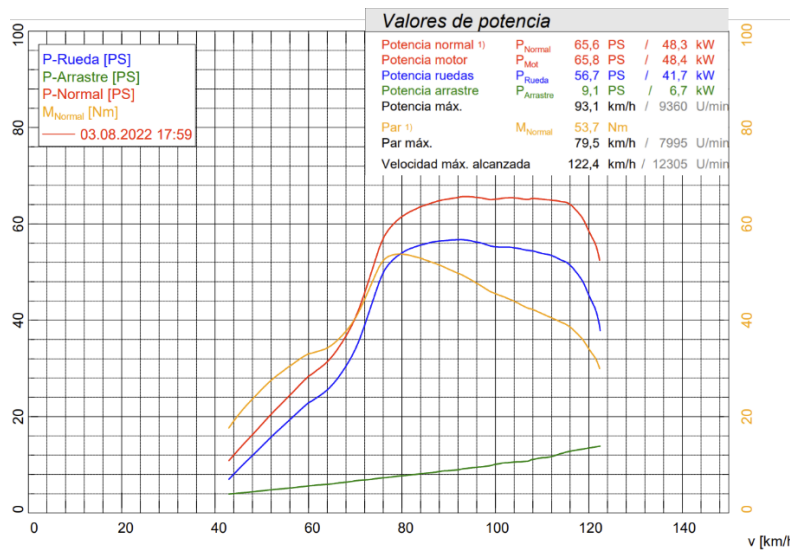


Figura 179: Curva de potencia y par motor Honda CBR 600 RR. Base de datos equipo MART.

Según la *Figura 179*, el par máximo proporcionado por este motor es de 53.7 Nm.

Este monoplaza cuenta también con la caja de cambios integrada de seis velocidades original del motor Honda que, con la cadena secundaria de cadena compuesta por una corona de 34 dientes y un piñón de 11, se obtiene una relación de transmisión:

Tabla 5: Relación de transmisión MA23RT. Base de datos equipo MART.

Marcha	Relación
Primaria	2,11 (76/36)
1 ^a	2,75 (33/12)
2 ^a	2,00 (32/16)
3 ^a	1,67 (30/18)
4 ^a	1,44 (26/18)
5 ^a	1,30 (30/23)
6 ^a	1,21 (29/24)
Secundaria	3,09 (34/11)

Con este conjunto, se obtienen unas relaciones totales de transmisión por marcha:

Tabla 6: Relaciones totales de transmisión por marcha MA23RT.

Marcha	Relación
1 ^a	17,94
2 ^a	13,05
3 ^a	10,88
4 ^a	9,42
5 ^a	8,51
6 ^a	7,88

Con las relaciones anteriores, ya se puede calcular el par en rueda teniendo en cuenta la cadena cinemática mediante la ecuación mostrada a continuación:

$$M_r = M_m \cdot \xi \cdot \eta \quad (21)$$

Donde M_m : Par motor

ξ : relación total de transmisión por marcha

η : rendimiento cadena cinemática (0.9)

Con esta ecuación es posible obtener el par en el eje trasero y por rueda del monoplaza MA23RT como se expone en la siguiente tabla:

Tabla 7: Par en eje y rueda en Nm del MA23RT.

Marcha	Par eje tractor	Par en rueda
1ª	867,26	433,63
2ª	630,73	315,37
3ª	525,71	262,86
4ª	455,39	227,69
5ª	411,24	205,62
6ª	380,96	190,48

Los pares mostrados en la *Tabla 7* son los que va a transmitir el palier dependiendo de la marcha en la que se encuentre. Para tener un cálculo más preciso, se va a tomar como referencia los datos extraídos de la ECU mediante el programa G4Link+ de la endurance de FSS de 2022 pudiendo conseguir un par medio de una competición real.

Como ya se ha explicado, esta prueba de 22 km es realizada por dos pilotos. Comparando la telemetría, se ha elegido aquella vuelta que ha sido más rápida y exigente a nivel de esfuerzos para el palier, notándose bastante diferencia entre ambos pilotos. Cada salto morado corresponde a una bajada de marcha y el de color naranja a una subida.

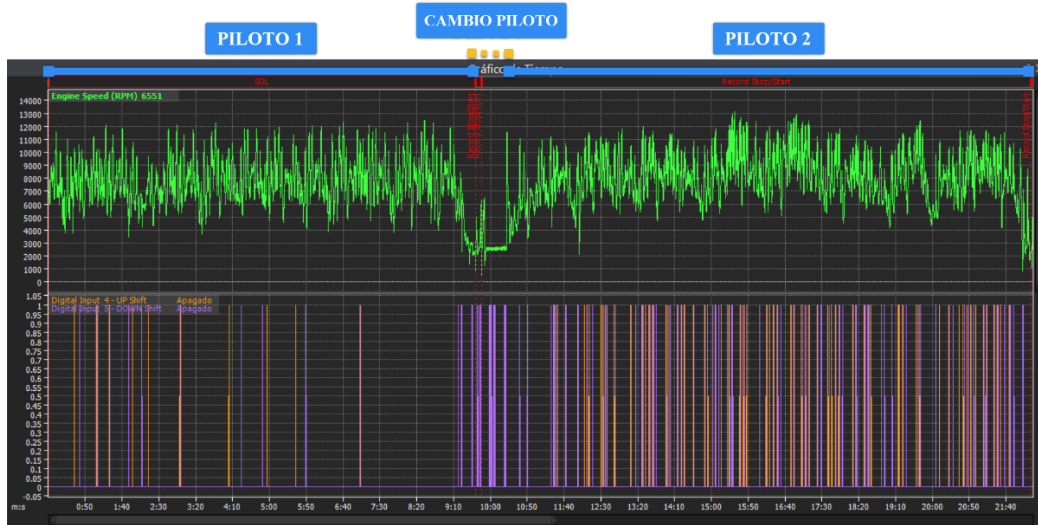


Figura 180: Telemetría MA22RT endurance FSS 2022. Base de datos equipo MART.

En la siguiente figura se muestra desde más cerca esa vuelta seleccionada, además del rango de revoluciones descrito por el motor durante la misma.

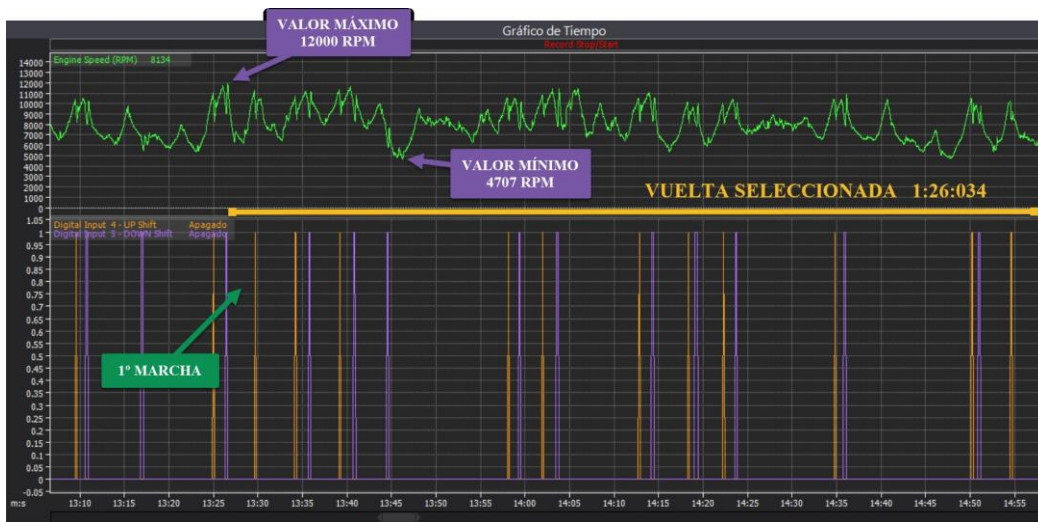


Figura 181: Telemetría MA22RT de una vuelta endurance FSS 2022. Base de datos equipo MART.

Con estos datos y comprobando con la cámara on board del vehículo, se determina que en una vuelta se utilizan el siguiente número de marchas:

Tabla 8: Porcentaje de marcha utilizada en una vuelta en FSS 2022.

Marcha	% de vuelta
1 ^a	67
2 ^a	28
3 ^a	4

Una vez obtenido el porcentaje de cada una de las marchas, se rescata el par en rueda y ya se puede obtener un par medio en rueda teniendo como referencia una prueba del calendario de la Formula Student.

Tabla 9: Par en rueda con su respectivo porcentaje de una vuelta en FSS 2022.

Marcha	% de vuelta	Par en rueda
1 ^a	67	318
2 ^a	28	315,37
3 ^a	5	262,86

Con estos datos, se realiza una media ponderada y se obtiene un par en rueda final de 313,8 Nm. Este cálculo se podría hacer de una forma más exhaustiva y exacta si se tiene en cuenta el porcentaje de las frenadas, las zonas de punto muerto...

- Estimación diámetro

Una vez que se ha obtenido el par, mediante la utilización de las ecuaciones del apartado 3.6. *Diseño de ejes*, se realiza un cálculo a nivel estático y fatiga a vida finita comprobando el diámetro mínimo que es posible utilizar en el palier para el par solicitado.

Según un estudio estático se ha obtenido un diámetro mínimo de 17,3 mm. Como el objetivo es hacerlo hueco, se busca en el mercado una caña que permita ambas condiciones. La barra seleccionada consta de unas dimensiones exteriores de 23 mm y un agujero interno de 8 mm. Tomando como referencia esto, se realiza el estudio a fatiga finita en el que se tendrá en cuenta tres zonas expuestas en la siguiente figura:

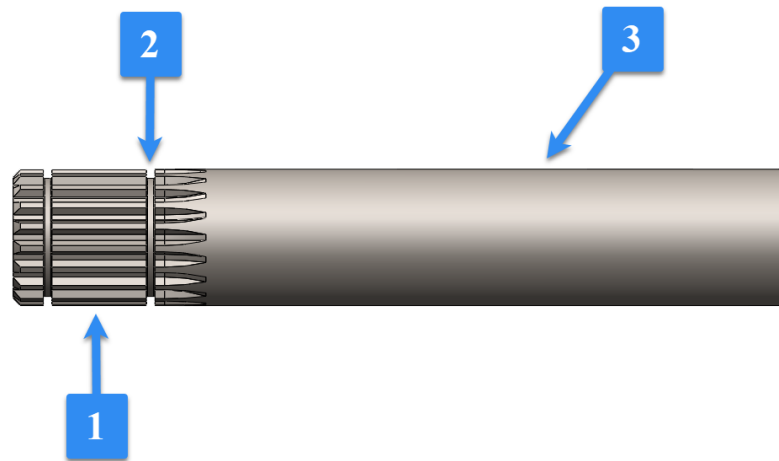


Figura 182: Modelo final del palier. Elaboración propia.

Y, como resultado, la siguiente tabla resumen del estudio de las zonas del palier:

Tabla 10: Estudio de las zonas del palier.

Zona	T (Nmm)	D _{ext} (mm)	D _{int} (mm)	τ (MPa)	Kf	Sf (MPa)	cs
1	313800	22,5	8	146,53	1,7	160,20	1,1
2	313800	19,5	8	192,13	1,98	153,24	0,82
3	313800	23	8	136,77	1	272,35	1,99

Una vez estudiadas todas las zonas críticas del palier, se comprueba que en una de las secciones da un coeficiente de seguridad menor a uno, indicando que esta zona no es segura. Sin embargo, se considera correcta ya que en dicha parte del elemento no existe mucha diferencia con el palier que se ha montado en las tres temporadas anteriores, el cual ha experimentado bastantes pruebas exigentes del calendario de la Formula Student sin resultar con ningún fallo en esta zona.

Como resultado, se obtiene un palier con las dimensiones detalladas anteriormente buscando el objetivo de que fuese hueco.

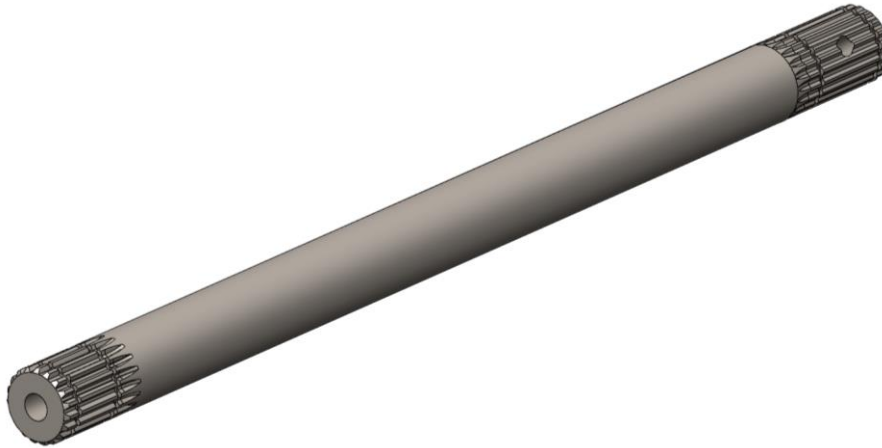


Figura 183: Modelo final del palier. Elaboración propia.

7.1.2. Material

Para la elección del material del cual se fabricarán los palieres, se ha seguido las recomendaciones de la empresa especialista en este sector. Los estriados que se encuentran en los extremos del palier van a estar en contacto con el acero de ambas homocinéticas, es así como el acero AISI 4340 (DIN 40NiCrMo7) es la mejor opción para trabajos de este estilo. Este acero aleado es utilizado para piezas que están sometidas a cargas muy elevadas y que requieren de una gran tenacidad. Es muy común en el sector de la automoción en la fabricación de ejes de transmisión, cigüeñales o bielas.

La composición química del AISI 4340 se encuentra detallada en la *Tabla 11*.

Tabla 11: Composición química del acero AISI 4340 [31].

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P
0,37-0,43	0,14-0,40	0,55-0,85	0,65-0,95	1,6-2,00	0,15-0,30	0,04	0,035

Este acero cuenta con otras propiedades bastantes importantes para un elemento como es un palier, y son su buena templabilidad y resistencia a la fatiga. Es importante recalcar, que, dependiendo del diámetro de la pieza, estas propiedades se ven mermadas como se expone en la *Tabla 12*:

Tabla 12: Características mecánicas del acero AISI 4340 en función del diámetro [31].

Diámetro barra (mm)	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite elástico (MPa)	Alargamiento %
≤ 16	1200 – 1400	> 1000	> 9
16 - 40	1100 – 1300	> 900	> 10
40 – 100	1000 - 1200	> 800	> 11
100 - 160	900 – 1100	> 700	> 12
> 160	850 - 1050	> 650	> 14

Además, en la *Tabla 13* se indica más detalladamente las propiedades físicas de esta aleación a una presión de 1 atm y una temperatura de 25 °C.

Tabla 13: Propiedades físicas acero AISI 4340 a temperatura ambiente [31].

Módulo de elasticidad (N/mm ²)	Densidad (g/cm ³)	Conductividad térmica (W/m·k)	Calor específico (J/g·K)
210000	7,84	37,7	0,46

En definitiva, para un palier con un diámetro oscilante entre 19,5 mm a 23 mm, contará con las propiedades mostradas en la *Tabla 14*.

Tabla 14: Propiedades mecánicas acero AISI 4340 para sección de palier diseñado [31].

Resistencia a la tracción (MPa)	Límite elástico (MPa)	Elongación %
1200	900	10

7.1.3. Medición longitud palieres

Cabe recalcar que se va a detallar la medición de uno de los palieres del monoplaza, en este caso el derecho, ya que para ambos se debe de seguir el mismo proceso. Se podría haber optado por la opción de sacar las medidas directamente del CAD, pero se ha optado por realizar medidas in situ con el fin de poder conocer si existe algún error de mediciones

en el modelo digital, aunque sea un proceso dependiente de otros componentes y más largo.

Mientras los bujes se encontraban en la fase de fabricación, para ahorrar tiempo, se realizó una impresión 3D de una parte significativa del buje trasero con el que poder tener una referencia real y conseguir agilizar en tiempo el proceso de construcción de la transmisión del monoplaça. Mediante el software PrusaSlicer y una impresora 3D Artillery Sidewinder X2 utilizando un filamento reciclado PLA, se eligieron aquellos parámetros que permitiesen una impresión rápida como, por ejemplo, utilizar una calidad tipo utillaje y un relleno mínimo del 10% ya que no importaba el acabado final.

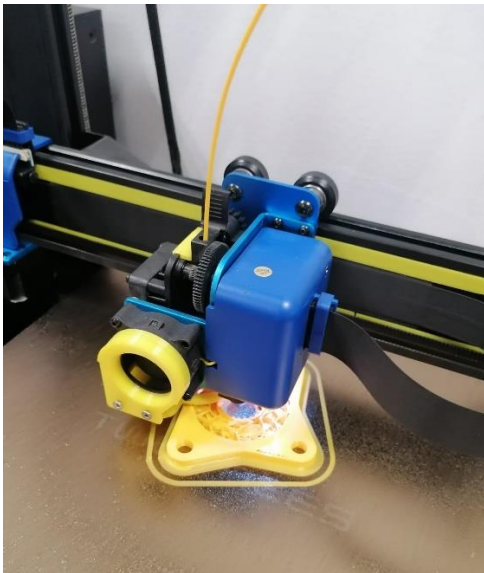


Figura 184: Impresión en 3D del buje con una impresora 3D. Elaboración propia.



Figura 185: Bujes impresos atornillados a la homocinética. Elaboración propia.

Una vez ha terminado el proceso, se efectúa el montaje de aquellas piezas que vayan a interferir en la medición de la longitud del palier, como puede ser los elementos de la suspensión, mangueta, portadiferencial y el grupo diferencial. Después, se coloca la pieza impresa en 3D en la posición en la que iría el buje como se muestra en la *Figura 186*. Una vez llegado a este punto, ya se tienen las condiciones idóneas para realizar una medición correcta de los palieres.

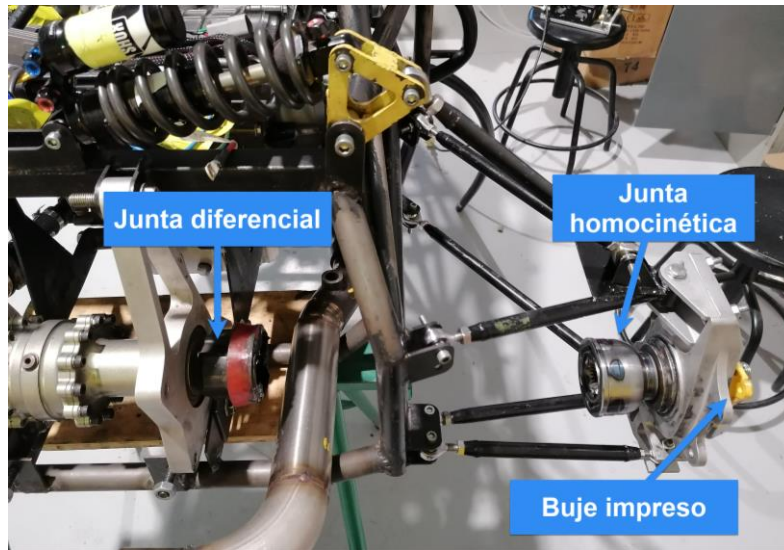


Figura 186: Disposición de elementos para medición de palier izquierdo. Elaboración propia.

Usando una barra de plástico, se mide de centro a centro la distancia entre la cara exterior de ambas homocinéticas resultando 300 mm. En el lado de la rueda, se conoce que el extremo del palier es fijo y debe introducirse una distancia de 20 mm. En el otro extremo, como el trípode permite movimiento axial, para que tenga una posición central dentro de la junta en el estado de reposo de la suspensión, se comprueba que tiene un recorrido de 16 mm, siendo 8 mm para que se encuentre en el centro. Y, por último, desde la posición del trípode al extremo final hay una distancia de 30 mm. Por lo tanto, a modo más visual, todas estas medidas se recogen en la *Figura 187* y, a modo de aclaración, se detallan en la *Ecuación (22)*.

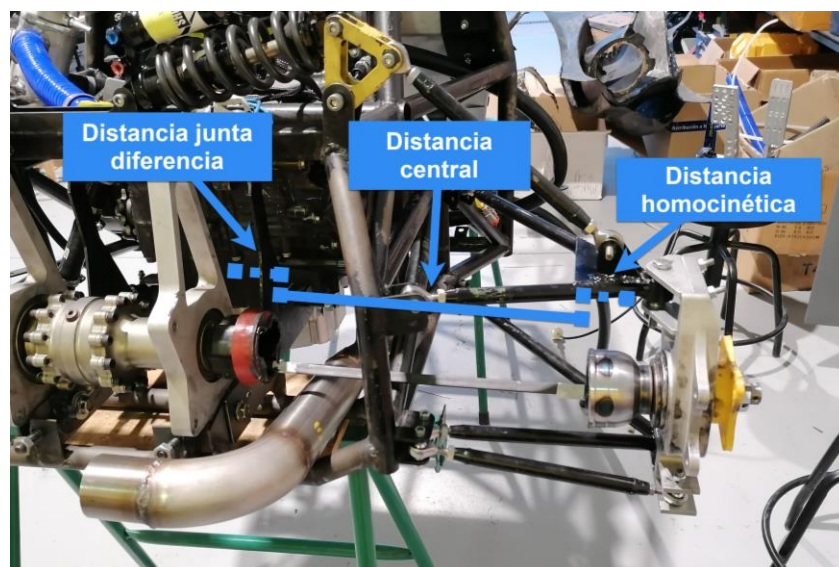


Figura 187: Distancias importantes para la medición de palier izquierdo. Elaboración propia.

$$\text{Longitud palier} = \text{Zona diferencial} + \text{zona central} + \text{zona homocinética} \quad (22)$$

$$\text{Longitud palier izquierdo} = 46 + 300 + 20 = 366 \text{ mm}$$

$$\text{Longitud palier derecho} = 38 + 300 + 20 = 358 \text{ mm}$$

Finalmente, como se expone en los sumatorios anteriores, se obtiene una longitud final del palier derecho de 358 mm y el izquierdo de 366 mm. Una vez que se disponen de estas medidas ya es suficiente para su fabricación.

7.1.4. Fabricación

En primer lugar, se realiza la búsqueda de cañas comerciales del material deseado que cumplan lo más fielmente posible las medidas estipuladas en los planos. En este caso, no se encontró una caña hueca con las dimensiones deseadas del taladro interior. Una vez seleccionada, mediante una fresadora horizontal se realiza un fresado en escuadra con una fresa de ranurar en ambos extremos con las dimensiones del ancho del ranurado del estriado.



Figura 188: Mecanizado del estriado del palier de una retroexcavadora mediante un fresado en escuadra [32].

Por otro lado, para realizar las ranuras donde se alojarán los anillos de retención se hará uso de un torno con un portaherramientas y una herramienta con el ancho de la ranura para un proceso de ranurado lateral, teniendo en cuenta la profundidad de las ranuras.

La fabricación de un palier es un proceso rápido y muy estandarizado. Finalmente, al realizar los pasos anteriormente explicados se tiene como resultado, una vez ya ensamblado con la junta homocinética:



Figura 189: Palier con junta homocinética acoplada. Elaboración propia.

7.2. Buje trasero

7.2.1. Diseño

Es necesario resaltar que la geometría del buje se verá afectada por la reutilización de componentes que se encuentran alrededor del mismo procedentes del prototipo MA22RT, como, por ejemplo, la mangueta o la distribución del sistema de frenado.

La temporada 2022 se contaba con las llantas Braid Tenrace+ que iban atornilladas al buje mediante 4 tornillos. Tras la mala experiencia en FSS 2022, donde al realizar sucesivos cambios de ruedas la llanta golpeó los espárragos que permiten fijar el conjunto de la rueda consiguiendo dañar una de las roscas. Se tuvo que reparar algunas de ellas varias veces con la mala fortuna de que una de ellas llegó a romperse. Este problema se pudo resolver, pero es una experiencia que pudo haber ocasionado la descalificación del monoplaza de la competición.



Figura 190: Llantas Braid Tenrace+ con sistema de cuatro tornillos. Elaboración propia.



Figura 191: Buje trasero del prototipo MA22RT. Elaboración propia.

Para evitar lo ocurrido, en esta temporada se decidió la adquisición de las llantas OZ Magnesium CL 10" trayendo grandes cambios sustanciales al buje. Por un lado, es la incorporación de un sistema monotuerca, resultando una gran mejora tanto a nivel de organización, seguridad y de pérdida de componentes. Con esta configuración, la tuerca solo tendrá la función de apretar la llanta dado que el conjunto de drives peg se encargarán de fijar la misma al buje, teniendo como ventaja que podrán ser sustituidos por otros en caso de resultar dañados. Este componente se encuentra detallado en el siguiente apartado.



Figura 192: Llanta OZ Magnesium Cl 10" con sistema monotuerca [33].

El mismo fabricante de las llantas proporciona unas dimensiones sugeridas para el diseño del buje del monoplaza, mostradas en la *Figura 193*, permitiendo así un anclaje perfecto. Los taladros roscados M10x1,0 donde irán de los drives peg se encuentran en un diámetro de 80 mm, teniendo los llamados orejones 105 mm de los 104,4 mm mínimo exigidos donde soportarán los esfuerzos procedentes de la rueda. Para la rosca, según las dimensiones obtenidas, tendrá una métrica M45x1,5 contando en su extremo con doce ranuras cuyas dimensiones permitirán colocar un pasador fijando la tuerca como sistema de seguridad en caso de no estar bien fijada o aflojarse y, además, dejando 2 filetes libres obligatorio por normativa. Al igual que el drive peg, la tuerca rápida se encuentra detallada en el siguiente apartado.

Dependiendo del lado derecho o izquierdo del vehículo, la rosca deberá de ir en un sentido o en otro para evitar que en el sentido de la marcha se aflojen. En este caso, en el lado izquierdo el sentido de la rosca será a izquierdas y en el derecho a derechas.

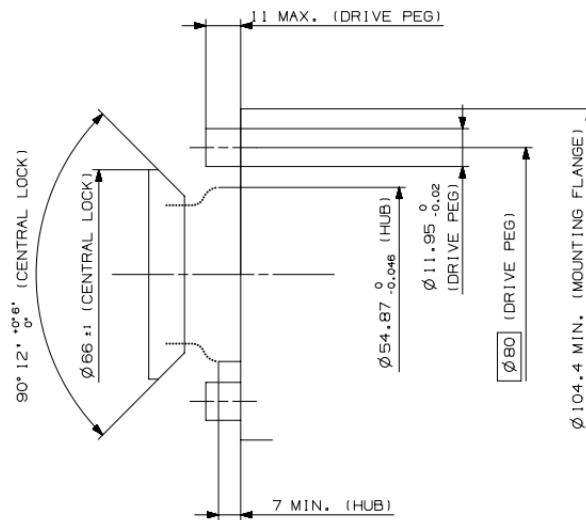


Figura 193: Sugerencias para un buje para una llanta OZ Magnesium CI 10” [33].

Por otro lado, hay que tener en cuenta que las llantas Braid cuentan con un offset neutro a diferencia de las OZ, positivo. Este término hace referencia a la posición del plano de apoyo de la llanta respecto al ancho, tomando como referencia el centro de esta [34]. Por ello, como se parten con componentes del prototipo MA22RT, se ha evitado la modificación de la posición de estos componentes no teniendo que, por ejemplo, fabricar un buje con una longitud mayor provocando un voladizo mayor que acarrearía esfuerzos mayores en este.

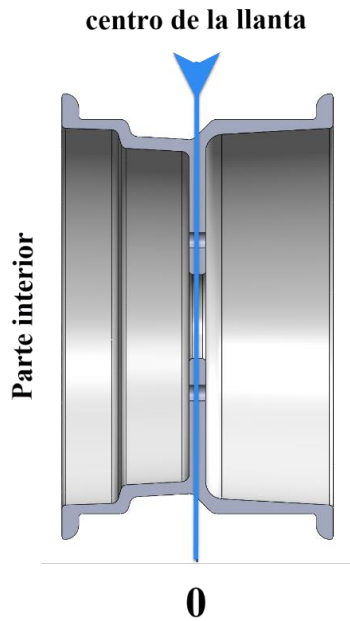


Figura 194: Offset 0 en llantas Braid Tenrace+. Elaboración propia.

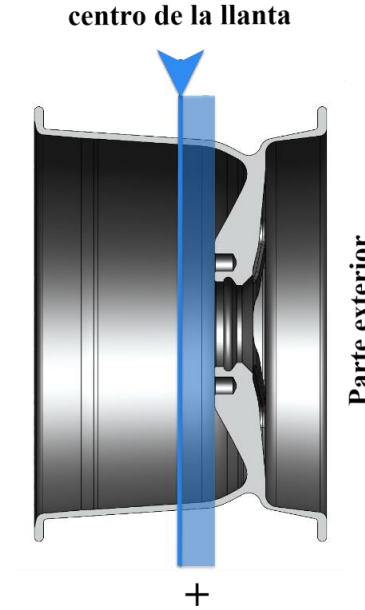


Figura 195: Offset positivo en llantas OZ Magnesium CL 10''. Elaboración propia.

También se ha cambiado de homocinética y, en este caso, consta con un sistema de fijación distinta además de unas diferencias que se muestran a modo de comparación visual en la Figura 196 y *Figura 197*. Puesto que para la tuerca de seguridad M14 se necesita utilizar un vaso hexagonal de 24 mm, se ha diseñado un alojamiento interno donde poder introducirlo con facilidad para poder apretar la tuerca. En vista de que dicho vaso hexagonal tiene un diámetro de 32 mm, se ha dejado un hueco con diámetro de 33,5 mm.



Figura 196: Junta homocinética fija montada en monoplaza MA22RT. Elaboración propia.



Figura 197: Junta homocinética fija montada en monoplaza MA23RT. Elaboración propia.

Además, la zona de contacto y el diámetro de la zona del estriado también cambia como se muestra en las figuras anteriores, pasando de una longitud de estriado de 20 mm y diámetro de 27 mm a 48,6 mm y 22,5 mm respectivamente.

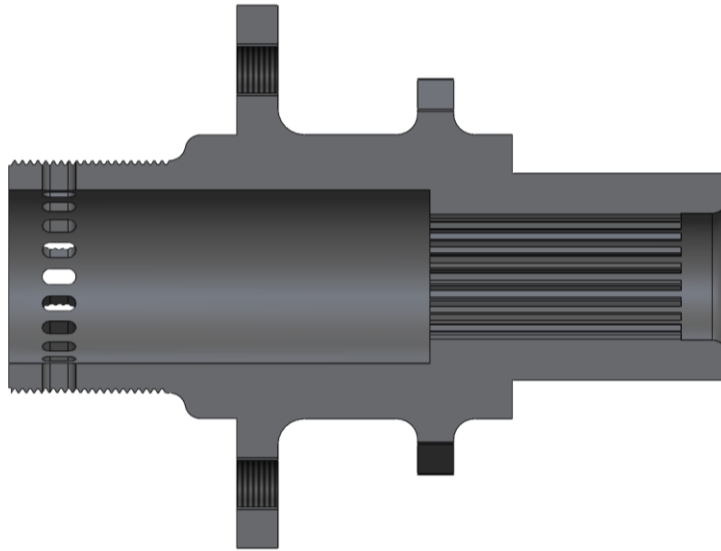


Figura 198: Vista en sección interna del buje trasero. Elaboración propia,

El buje cuenta con una sección en la que estará en contacto con la mangueta por medio de dos rodamientos, permitiendo el giro de un componente respecto al otro. Es importante que al introducir mediante una prensa el rodamiento, ni entre muy ajustado pudiendo dañar el buje ni tampoco entre con mucha facilidad, consiguiendo que no cumpla su función. Por ello, es necesario calcular la tolerancia en esta zona para obtener un apriete suave entre ambos componentes.

El rodamiento es un 32008X que tiene como diámetro nominal de 40 mm, y siguiendo los pasos en el catálogo del fabricante SKF, se obtiene un ajuste j6 en el que su desviación superior es 11 μm y su desviación inferior -5 μm .

Por último, teniendo en cuenta todas las recomendaciones y decisiones tomadas, se obtiene una versión final del buje trasero de un Formula Student, como se puede ver en las siguientes figuras.

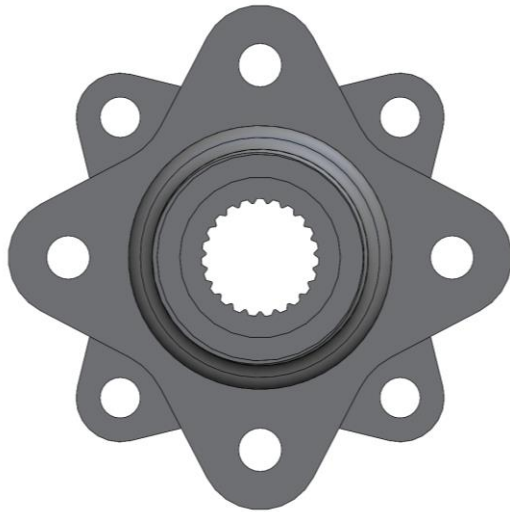


Figura 199: Vista frontal del modelo final del buje trasero. Elaboración propia.

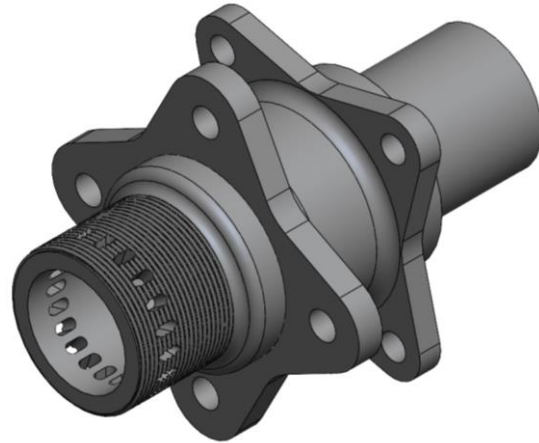


Figura 200: Vista del modelo final del buje trasero. Elaboración propia.

7.2.2. Material

De los distintos materiales existentes, se ha elegido que sea el aluminio para la fabricación del buje. Aunque lo recomendable sería que si hay contacto entre materiales sean del mismo material, en este caso dicta la experiencia que al tener el estriado de una homocinética de acero en contacto con el aluminio del estriado interior del buje, no hay ningún problema. Eso sí, hay que tener la precaución de que no puede haber ninguna holgura ya que será una pieza que estará sometida a mucha torsión provocando el desgaste de este.

Teniendo esto en cuenta, existe una gran variedad de aleaciones. Por ello, en el *Figura 201*: Gráfico con las principales propiedades mecánicas de distintas aleaciones de aluminio [35]. se comparan algunas de sus propiedades mecánicas como son la carga a rotura, el límite elástico, el alargamiento y la dureza.

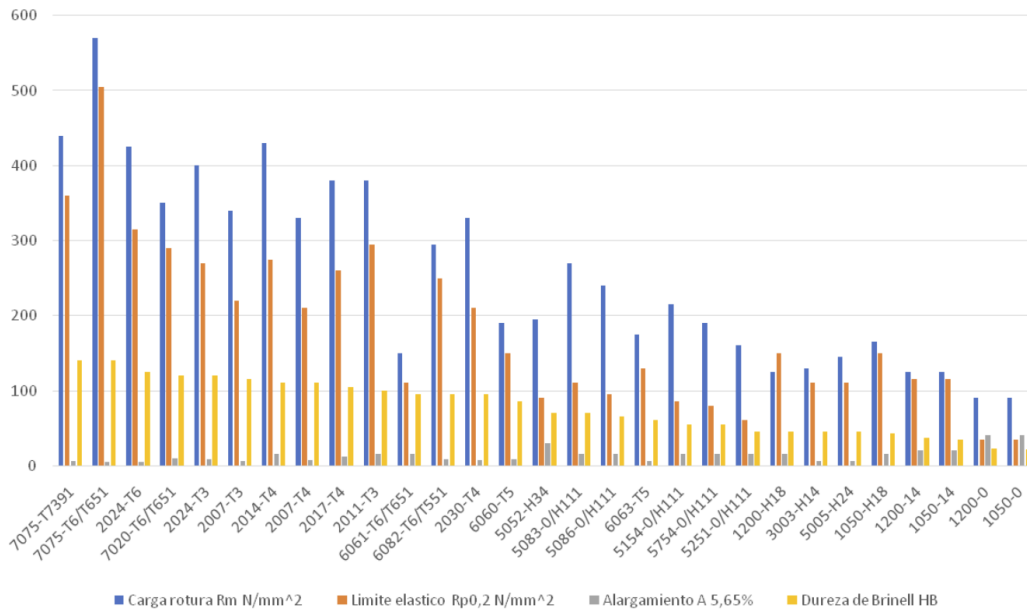


Figura 201: Gráfico con las principales propiedades mecánicas de distintas aleaciones de aluminio [35].

En definitiva, viendo la figura anterior de las distintas aleaciones destaca con notoriedad la aleación de Aluminio 7075- T6 respecto a las demás, siendo la elegida para la fabricación del buje. Asimismo, varias piezas del monoplaza como son la mangueta o el portadiferencial están fabricadas con la misma aleación. En la *Tabla 15* se expone más detalladamente las propiedades de esta aleación a una presión de 1 atm y una temperatura de 25 °C.

Tabla 15: Propiedades del Aluminio 7075-T6 a temperatura ambiente [36].

Densidad (kg/m ³)	Resistencia a rotura (MPa)	Límite elástico (MPa)	Elongación %	Dureza Hb
2810	570	505	5	140

Tal aleación es muy conocida en el sector aeronáutico y del automóvil como aluminio aeronáutico ya que presenta una relación resistencia-densidad muy alto. Además, se puede destacar su ligereza, una gran maquinabilidad y un precio no muy elevado.

7.2.3. Fabricación

Una vez que se ha obtenido un modelo final en SolidWorks, se envía este en un archivo con formato STEP a la empresa encargada de la fabricación del elemento. El buje es un elemento bastante complejo en el que se tendrá que estudiar bien en profundidad la

creación del código CNC para que el centro de mecanizado sea capaz de reproducirlo con la mayor exactitud posible y en un intervalo corto de tiempo. Existe una gran pérdida de material y es un componente en el que se han utilizado un gran conjunto de operaciones como lo son el roscado, cilindrado, taladrado, ranurado y achaflanado.



Figura 202: Centro de mecanizado CNC de 5 ejes [37].

Tomando como nota que en todas aquellas zonas roscadas como son la de la tuerca rápida y los drives peg se recomienda utilizar grasa de cobre por sus grandes virtudes. La grasa de cobre permite actuar como lubricante en la zona aplicada evitando el agarrotamiento y la corrosión en aquellos elementos roscados que serán expuestos a altas temperaturas y presiones.



Figura 203: Buje trasero sin estriado interior. Elaboración propia.

- **Estriado interior**

Una vez se ha realizado el mecanizado del buje, se procede a la realización del estriado interior, último proceso para dar por finalizado la fabricación del buje. Para este paso, se podría haber realizado mediante tres procesos como son el corte por láser, brochado y corte por hilo. A continuación, se expone una breve explicación de cada uno de los procesos adjuntando sus ventajas e inconvenientes.

- Corte por láser. Proyección de un haz de luz mediante un sistema de espejos y una lente de enfoque sobre la pieza hasta alcanzar su fundición generando el corte deseado [38].



Figura 204: Representación proceso de corte brochado [39].

- Brochado. Desplazamiento lineal de una brocha compuesta por múltiples dientes que penetran en la pieza progresivamente arrancando material [39].

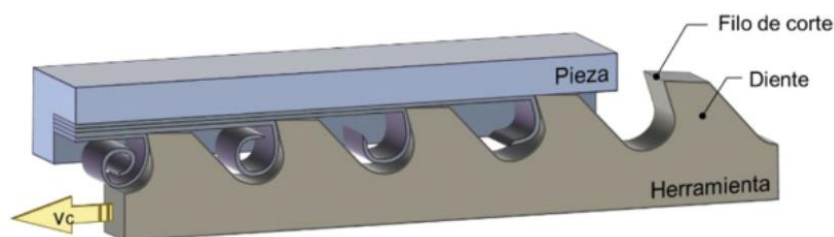


Figura 205: Representación proceso de corte brochado [39].

- Corte por hilo. Se encuentra detallado en el punto seis de este documento.

Una vez explicados brevemente cada uno de ellos, en la *Tabla 16*: Comparativa entre distintos procesos de fabricación. se observa una comparación entre estos tres procesos de fabricación.

Tabla 16: Comparativa entre distintos procesos de fabricación.

Características	Láser	Brochado	Electroerosión por hilo
Tolerancia mínima	0.15 mm	0.10 mm	0.005 mm
Perturbación en la pieza	Si, produce un cono	Si	No
Probabilidad fallo en proceso	Baja	Media	Muy baja
Desgaste herramienta	No	Si	No
Reutilización herramienta	No	Si	No
Calentamiento pieza	Si	Si	No
Utilización tipo materiales	Mucha variedad	Mucha variedad	Solo conductores
Exposición pieza a esfuerzos mecánicos	Si	Si	No
Profundidad de corte	Poca	Depende herramienta	Hasta 400 mm
Vibraciones en zona de trabajo	No	Si	No
Velocidad de corte	Rápido	Medio	Medio-Rápido
Acabado	Medio	Bueno	Muy bueno
Presupuesto	Alto	Medio	Alto
Sostenibilidad con medioambiente	Limpio	Medio	Limpio

Una vez expuestas en la tabla anterior las características principales de cada uno de los procesos, para la realización del estriado interior se ha elegido la electroerosión por hilo

ya que destaca en que es un proceso muy preciso y con una gran garantía de no dañar la pieza, ahorrando así la posibilidad de la fabricación de un nuevo buje.

A continuación, se exponen detalladamente los pasos seguidos del proceso de mecanizado para la realización del estriado interior.

Previamente, en la fabricación del buje se realizó un taladro con un diámetro menor por donde irá el estriado para facilitar la introducción del hilo. En este caso, por recomendación de la empresa que realizó el estriado, no era necesario ya que en el proceso de corte podría ocasionar que el agua que es proyectada por el cabezal no estuviese en su totalidad centrada, ocasionando desbordamientos por la pieza y, por lo tanto, al tener pérdidas, se debe de aumentar la presión de dicho fluido para un mismo trabajo ocasionando un sobreesfuerzo evitable a la máquina.



Figura 206: Bujes trasero sin estriado interior. Elaboración propia.

Al no disponer de una norma específica del ranurado del estriado, se llevó a cabo la toma de aproximadamente cien medidas en dos dientes. Para una mayor precisión, se utilizó una máquina CNC con un útil que contenía una mirilla de microscopio, con el cual permitía tener una vista perfecta del estriado.

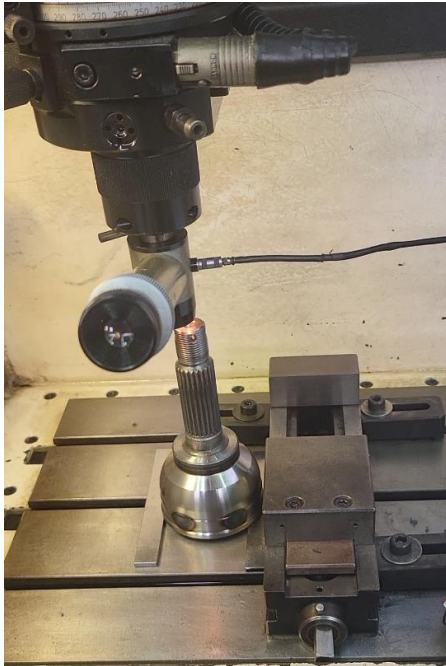


Figura 207: Posicionamiento homocinética para la toma de medidas del estriado. Elaboración propia.

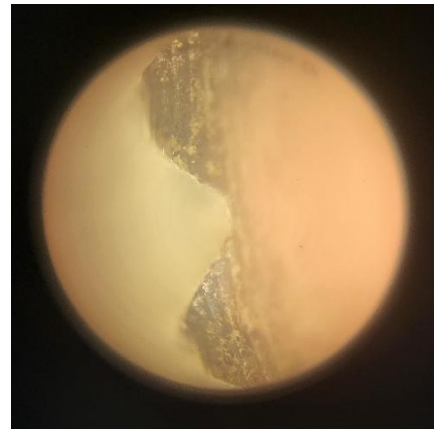


Figura 208: Vista a través del útil del estriado de la homocinética. Elaboración propia.

Una vez se tiene las coordenadas X e Y del conjunto de medidas, se exportan a un software de diseño 3D específico para obtener un primer boceto con la totalidad de los dientes del estriado.

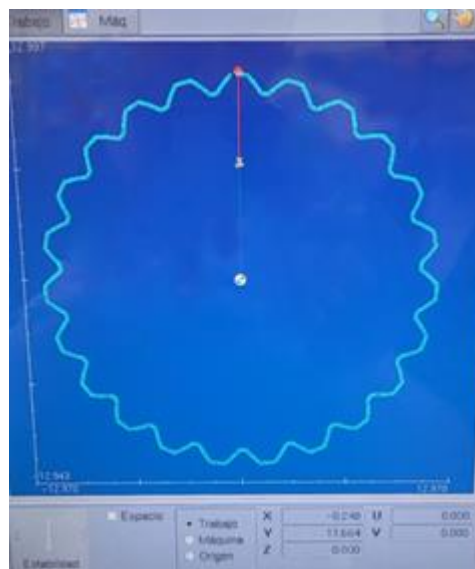


Figura 209: Patrón obtenido de las mediciones realizadas. Elaboración propia.

Así pues, se envía dicho modelo al centro de corte por hilo y se realiza un primer intento en una plancha de cualquier metal, en este caso aluminio, para no dañar la pieza final. Es complicado acertar a la primera, por ello, se debe de ir realizando ajustes en las

dimensiones del estriado hasta conseguir que la plantilla definitiva se introduzca en la homocinética no produciéndose más holgura de la estimada.



Figura 210: Plancha de aluminio con los intentos del estriado cortados. Elaboración propia.

Cuando se estime que se tiene el estriado definitivo, el siguiente paso es colocar el buje en la máquina para empezar con el corte del estriado. Sin embargo, antes de realizar el proceso, es necesario la fabricación de un utillaje realizado con la misma máquina donde fijar el buje en la zona de trabajo de la máquina. En este caso, el buje estará cogido por la zona extruida donde irán los rodamientos de la mangueta. Para conseguir un resultado excelente, se deberá corroborar que el útil coloque a la pieza de forma concéntrica y perpendicular al hilo para evitar un corte no perfecto y así ocasionar vibraciones en la conducción una vez el buje sea montado en la rueda debido a las desviaciones provocadas por el corte.

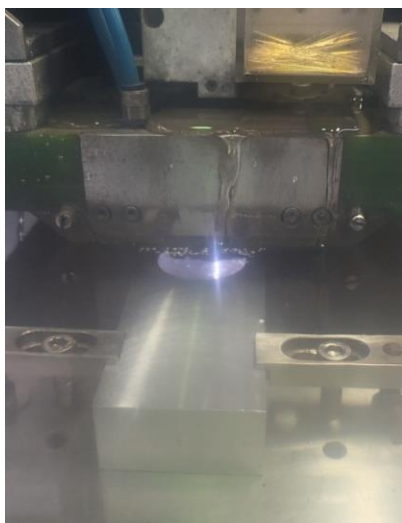


Figura 211: Fabricación del útil mediante a erosionadora de corte por hilo. Elaboración propia.



Figura 212: Vista del útil ya fabricado. Elaboración propia.

Por lo tanto, cuando ya se dispone del utillaje y de la versión final del estriado, se monta el buje en la zona de trabajo fijado con el útil y se exporta el archivo con el estriado a la máquina de electroerosión por corte de hilo. Se realiza una calibración y configuración previa y ya estaría todo listo para el corte del estriado.

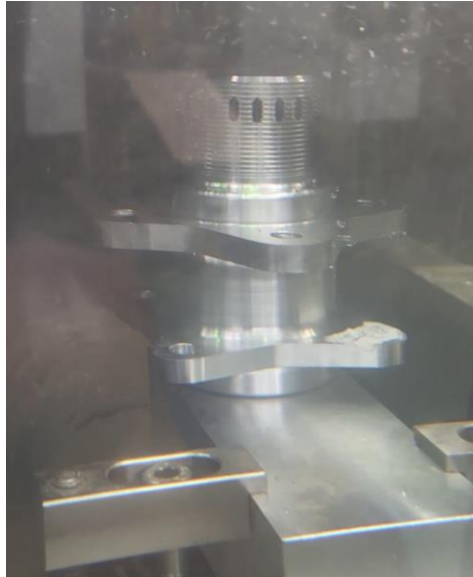


Figura 213: Mecanizado del estriado interior del buje. Elaboración propia.

En la *Figura 214* se puede ver el resultado final del estriado interior del buje.

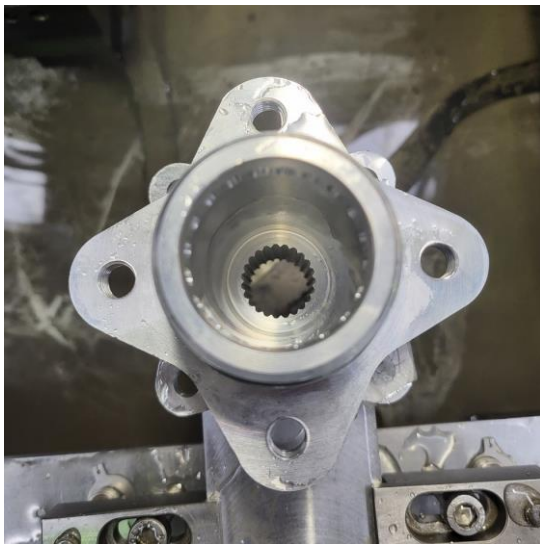


Figura 214: Estriado interior del buje ya cortado.
Elaboración propia.



Figura 215: Sobrante de material al realizar el
corte del estriado interior. Elaboración propia.

Por último, se realiza una comprobación de que el buje y la homocinética encajan de una forma correcta, como se muestra en *Figura 216*, dando así por finalizado la fabricación completa del buje.



Figura 216: Comprobación de la posición correcta entre homocinética y buje trasero. Elaboración propia.

7.3. Drive peg

7.3.1. Diseño

En primero lugar, para el diseño de los drives peg es necesario tener en cuenta las medidas de los huecos de la llanta donde van a ir encajados. En este caso se disponen de unas llantas OZ FS Magnesium CL 10" y, además, de los planos originales de las mismas.

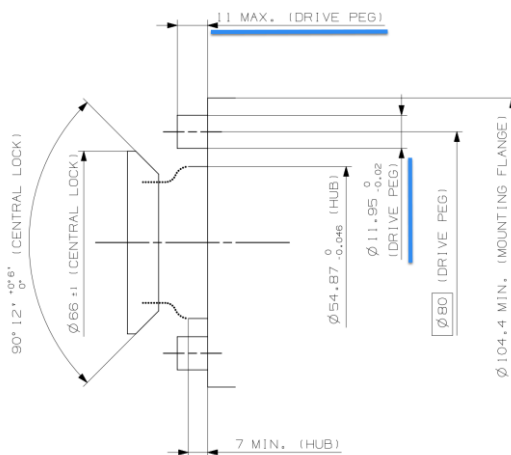


Figura 217: Dimensiones sugeridas por fabricante para el drive peg en la llanta OZ FS Magnesium CL 10" [33].



Figura 218: Orificios para alojamientos de los drives peg en la llanta OZ FS Magnesium CL 10". Banco piezas MART FS.

Viendo que el diámetro del alojamiento es de 11,95 mm, se opta por un diámetro que permita introducir con cierta facilidad el elemento en la llanta y no ocasione mucha

holgura, siendo de 11,5 mm. En el caso del tramo que va introducido en la llanta, la longitud máxima recomendada por el fabricante es de 11 mm, por ello se estima correcta una longitud de 10 mm.

El sistema de fijación al buje será mediante una rosca M10x1.0mm teniendo la zona roscada una longitud de 11 mm para cumplir la normativa de dejar sobresalir dos filetes en las zonas roscadas por seguridad. Asimismo, para poder atornillar el drive peg al buje de una forma fácil, se han dejado dos caras planas con una superficie suficiente con las dimensiones de una llave fija de 11 mm, permitiendo un apriete seguro del mismo y una zona de contacto máxima con la llanta. Para poder introducir con facilidad el drive peg en la zona roscada o en la llanta, se ha realizado un chaflán en ambos extremos.

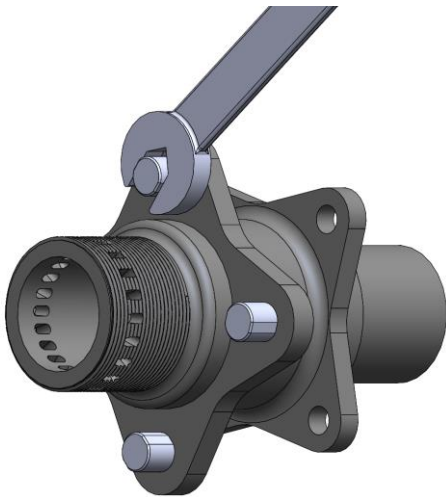


Figura 219: Representación ajuste del drive peg con llave fija de 11 mm. Elaboración propia.

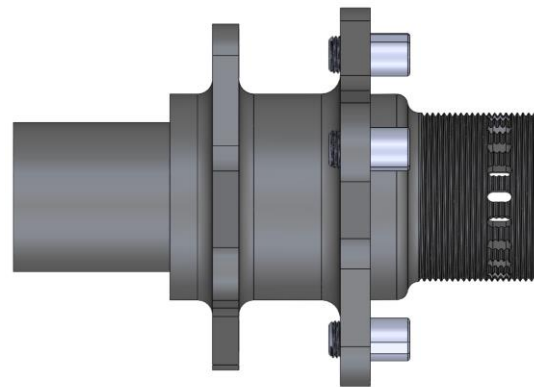


Figura 220: Comprobación de cumplimiento de normativa de los drives peg. Elaboración propia.

7.3.2. Material

Para la tuerca se ha decidido la elección del Aluminio 7075-T6, el mismo material que para el buje donde se explican sus propiedades y destacan sus ventajas.

7.3.3. Fabricación

Se ha seguido el mismo proceso que para el buje. A diferencia del componente nombrado anteriormente, este elemento es bastante más simple. Mediante las operaciones de mecanizado roscado, cilindrado y achaflanado se obtiene el resultado adjunto en las siguientes figuras.



Figura 221: Resultado de la fabricaci3n de los drives peg. Elabóraci3n propia.



Figura 222: Drives peg montados en el buje del MA23RT. Elabóraci3n propia.

7.4. Tuerca rápida

7.4.1. Diseño

Al igual que para el buje y el drive peg, se han seguido las recomendaciones del fabricante a la hora de realizar las dimensiones cr3ticas de la tuerca, marcadas en la *Figura 223*.

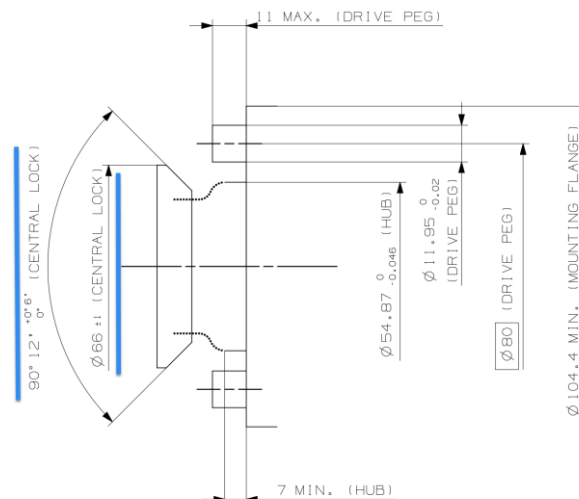


Figura 223: Dimensiones sugeridas por fabricante para la monotuerca en la llanta OZ FS Magnesium CL 10" [33].

Tomando como referencia la zona plana obtenida de las recomendaciones del fabricante, la tuerca tendr3 una geometr3a hexagonal de 54 mm entre caras y 11 mm de altura, dejando un espacio donde poder apoyar la llave de vaso hexagonal de 54 mm a la hora de apretar o aflojar dicha pieza.

En dos caras paralelas del hexágono, se ha realizado una ranura para una vez apretada con la llanta, poder insertar un clip de seguridad y fijarla con el buje, según obliga la normativa.

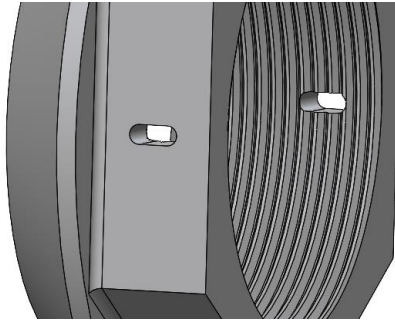


Figura 224: Detalle de las ranuras en la monotuerca. Elaboración propia.

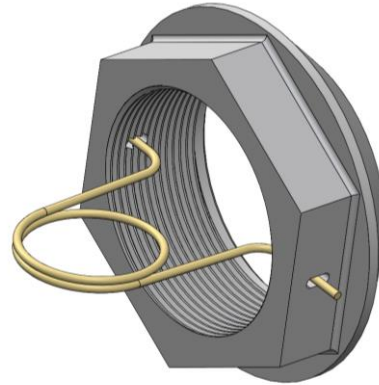


Figura 225: Monotuerca con clip de seguridad. Elaboración propia.

En el interior, se ha dejado un tramo sin rosca con un chaflán para permitir encontrar la concentricidad de la tuerca con el buje con facilidad y luego poder enroscar la tuerca, para así evitar dañar los filetes iniciales del buje. La tuerca y el buje comparten el mismo roscado, siendo un M45x1.5 con una longitud de 19,5 mm. Se ha implementado una rosca de paso fino en vez de uno mayor [40] debido a que:

- Soporta una mayor resistencia a tracción al disponer de una sección resistente mayor.
- Es menos sensible a las vibraciones siendo más difícil que se afloje, ganando en el aspecto de la seguridad.
- Permite un ajuste mucho más preciso.

Al igual que en los bujes, hay que tener en cuenta que, dependiendo del lado del coche, unas roscas irán a izquierdas y otras a derechas.

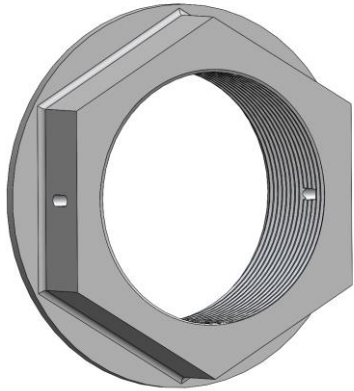


Figura 226: Resultado final del diseño de la tuerca del monoplaza. Elaboración propia.



Figura 227: Montaje de la monotuerca en el conjunto de rueda. Elaboración propia.

7.4.2. Material

Para la tuerca se ha decidido la elección del Aluminio 7075-T6, el mismo material que para el buje donde se explican sus propiedades y destacan sus ventajas. Para este componente, siguiendo en el punto T2.5.3 de la normativa de competición: *se pueden utilizar tuercas de rueda de aluminio, pero deben ser anodizadas y estar en perfectas condiciones [4]*.

Proceso de anodizado

Al entrar en contacto el aluminio con el oxígeno del aire, de forma natural se genera una capa con un espesor de unas 0,01 micras envolviendo a la pieza en toda su totalidad impidiendo el avance del proceso de oxidación llamada alúmina.

El anodizado es un proceso electrolítico en el que de manera artificial se consigue una capa de óxido protectora llegando a espesores de 150 micras permitiendo alcanzar mayores espesores y mejores condiciones de protección que de forma natural.

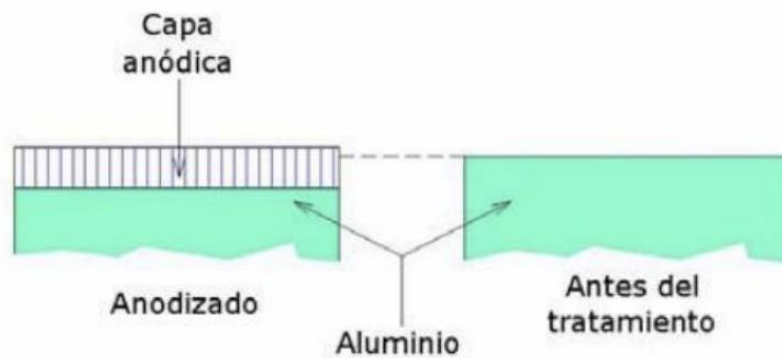


Figura 228: Diferencia entre material antes (derecha) y después del ionizado (izquierda) [35]

El proceso de electrolisis se inicia insertando en un medio electrolítico, normalmente sulfúrico, la pieza de aluminio que se comportará como ánodo. Se hace pasar corriente eléctrica entre los polos liberando el oxígeno que se encuentra en el medio dirigiéndose al ánodo, que reaccionará con el aluminio, generando esta capa de óxido protectora llamada alúmina envolviendo el ánodo con un espesor que dependerá de la intensidad aplicada y del tiempo de transcurrido de la misma. Esta capa no podrá ser raspada debido a que se integra en el propio material.

Gracias a este proceso se consigue aumentar la dureza de la pieza, además de protegerla ante los agentes corrosivos ambientales y al desgaste. A su vez, existe una gran variedad de tintes con los que se puede pintar la superficie, siendo una capa más duradera que las obtenidas por pinturas.

7.4.3. Fabricación

La tuerca es un componente que parece sencillo, pero tiene una zona cónica que es bastante difícil de replicar. Por ello, se usa un centro de mecanizado se hará uso del proceso llamado torneado cónico. Para el resto de las operaciones mediante un roscado interior, ranurado, achaflanado y un copiado para el hexágono de la propia tuerca permitirá obtener

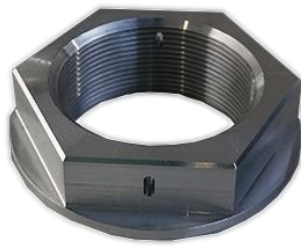


Figura 229: Resultado final de la fabricación de la tuerca del monoplaza. Elaboración propia.

Como ya se ha comentado, en la zona roscada que se encuentra en contacto con el buje se utiliza grasa de cobre debido a sus numerosas ventajas.



Figura 230: Monotuerca anodizada atornillada en el buje del MA23RT. Elaboración propia.

8. EXPERIENCIA EN COMPETICIÓN

Antes de participar en las competiciones, se llevó el monoplaza a las instalaciones de ADM Motorsport para realizar una serie de pruebas en un banco de potencia. Gracias a esto, se llevan a cabo una serie de ensayos en los que afinar aquellos parámetros de la ECU del motor intentando conseguir un mejor rendimiento dependiendo de la franja de revoluciones que lo necesite. Era necesario una reconfiguración del mapa del motor por el cambio de la geometría de la admisión respecto al prototipo anterior. El tren trasero se expuso a velocidades de 180 km/h con frenadas bruscas pudiendo comprobar tanto la actuación del sistema de frenado como el ensamblaje de la transmisión, absorbiendo sin ningún problema estas condiciones.

Una vez en las competiciones, la acción de quitar y poner las ruedas ha conseguido agilizarse respecto a la temporada anterior, solo teniendo que focalizarse en la rosca principal de la monotuerca. El uso de la grasa de cobre ha prevenido el agarrotamiento de la tuerca con el buje. El único inconveniente por mejorar es la realización de unas ranuras más grandes en la tuerca rápida e incluso añadir otras más desfasadas ya que era bastante difícil de acertar para introducir el clip de seguridad.



Figura 231: Montaje rueda trasera en FSG. Elaboración propia.

Por otro lado, se realizó una revisión tras la finalización de las competiciones donde se comprobaron los componentes diseñados donde el buje y el palier. Ambos componentes cumplieron su función y no produjeron ningún inconveniente durante la competición.



Figura 232: Vista trasera transmisión MA23RT antes de FSG. Elaboración propia.

9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

9.1. Conclusiones

Tal y como se ha recogido en el presente trabajo, se ha conseguido confeccionar un modelo a escala en 3D de la transmisión de un monoplaza formula student para su uso educativo en el que me ha permitido conocer en detalle cada uno de los componentes que la forman. Además, ha servido de ayuda a nuevos miembros del equipo a entender su funcionamiento y una base a la hora de modelar piezas y ensamblajes más complejos con el programa SolidWorks.

Por otro lado, las decisiones tomadas respecto a los nuevos diseños del palier y buje trasero han permitido la reducción del peso de la transmisión del monoplaza, consiguiendo una menor masa suspendida ayudando en el comportamiento dinámico del vehículo. En la *Tabla 17* se expone una comparativa de peso entre la transmisión del MA22RT y la nueva diseñada para el MA23RT obteniendo como resultado el peso total reducido:

Tabla 17: Comparativa de pesos entre la transmisión actual y la diseñada.

Conjunto MA22RT		Conjunto MA23RT		Resultado	
Piezas	Peso (kg)	Piezas	Peso (kg)	Diferencia (kg)	%
Homocinética	1,9	Homocinética	1,6	-0,3	- 16%
Palier macizo	1,175	Palier hueco	0,878	-0,147	- 14%
Tripod	0,15	Tripod	0,15	0	0%
Buje	0,692	Buje + Drives Peg	0,579	-0,1128	- 16%
4 tuercas	0,05	Monotuerca	0,08	+ 0,03	60%
Peso total	3,817	Peso total	3,287	-0,529	- 14%

En total se ha conseguido una reducción de 1,06 kg en el eje trasero, que con el resto de las decisiones tomadas en los distintos de departamentos, se ha conseguido un vehículo diecisiete kilogramos más ligero, aportando un mejor comportamiento en pista y una mayor agilidad a subir de vueltas buscando la zona más apropiada para la entrega de potencia.

Por último, he conseguido aumentar mis conocimientos y habilidades en el uso de un software como SolidWorks, utilizando complementos y comandos que de otra forma no hubiese aprendido como, por ejemplo, la relación de posición unión universal, utilizada en los palieres, entre muchas otras más. Además, el haber ido a las empresas donde se ha fabricado los componentes citados me ha permitido empaparme de un nuevo proceso que desconocía, como la electroerosión por hilo, y de consejos a la hora de realizar diseños de nuevos componentes.

9.2. Trabajos futuros

Tras la finalización del modelo digital y haber testado en las competiciones los componentes citados en el presente documento, se han descubierto dos posibles líneas de investigaciones que serán detalladas a continuación.

Respecto al gemelo digital, se podría tener en cuenta:

- Simular el funcionamiento real del diferencial. Por ejemplo, el accionamiento de los embragues es posible con SolidWorks ya que dispone de relaciones de posición y es capaz de generar movimientos ajenos a las fuerzas normales y del coeficiente de fricción a estas superficies.
- Escanear las piezas a modelar. Para obtener una mayor precisión y movimientos exactos, se recomienda el uso de un escáner 3D con el que se obtendrá una nube de puntos permitiendo no tener problemas con la acumulación de errores y, con ello, mayor facilidad en la creación de estudios de movimiento, tomando como referencia lo ocurrido en estudio de la cadena.
- Implantación de nuevos gemelos digitales. La creación de nuevos gemelos digitales funcionales ayudaría a entender con mayor facilidad cómo funciona cada una de las partes del monoplaza. Desde 2022, se dispone del gemelo digital del motor. En este caso, a la transmisión se podría complementar con, por ejemplo, el comportamiento dinámico de las suspensiones.

Por otra parte, en este proyecto se ha realizado el primer estudio sobre el palier del monoplaza en el equipo MART. Al igual que con el buje y la tuerca rápida, se ha tenido que adaptar a los elementos del monoplaza actual. Por lo tanto, se es consciente de que

existe un margen de mejora en estas piezas y, con ello, una mejora sustancial en el rendimiento y comportamiento del prototipo.

- Crear línea de investigación en el palier. Es importante a nivel dinámico la reducción de peso e inercia rotacional en este componente, por ello, la utilización de materiales como el aluminio o una caña de fibra de carbono con inserciones de aluminio en los extremos en la zona de los estriados para poder soportar los esfuerzos de torsión procedentes de las ruedas o del diferencial. Además, mediante la inserción de sensores y telemetría obtener los esfuerzos a tiempo real de este componente, dando la posibilidad de realizar simulaciones por el método de elementos finitos y estudios a fatiga más precisos pudiendo obtener un diseño mucha más optimizado.
- Rediseño, simulación y estudio de materiales en el buje. El uso de un material como el titanio, cuyas propiedades podrían conllevar a un aumento de prestaciones siempre que se disponga de presupuesto. Además, el rediseño para poder prescindir de la homocinética y realizar simulaciones FEM permitiría una gran reducción de peso y masa suspendida.
- Rediseño y estudio de materiales en la tuerca rápida. Como se ha comentado, la elección de otro material y el rediseño permitiendo una mejor inserción del clip de seguridad, respetando aquellas medidas recomendadas por el fabricante de la llanta. Además, se aconseja la fabricación de un vaso hexagonal a medida consiguiendo una mayor creatividad a la hora del diseño de la propia tuerca.



ANEXO I. Componentes modelados y las operaciones realizadas

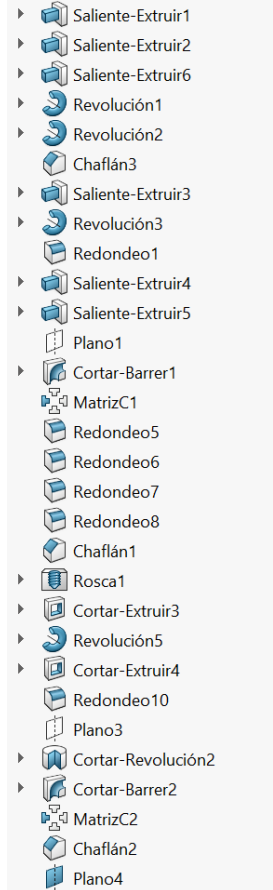
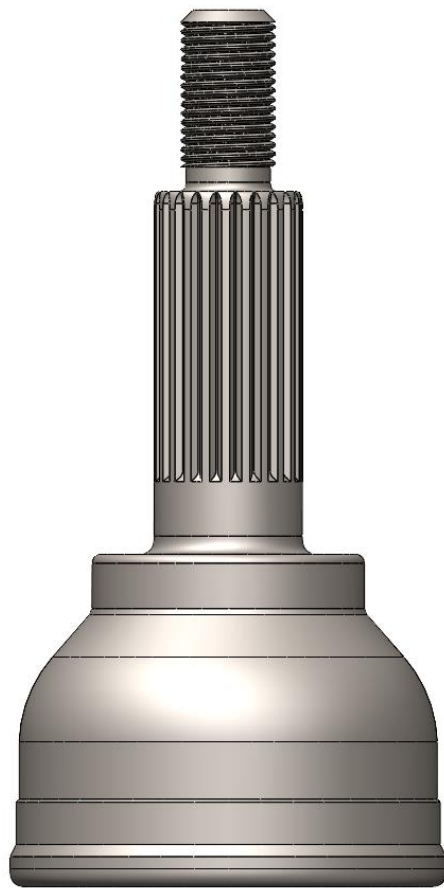


Figura 233: Campana junta homotética fija.

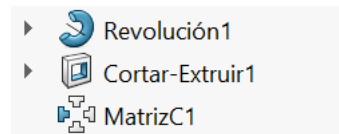
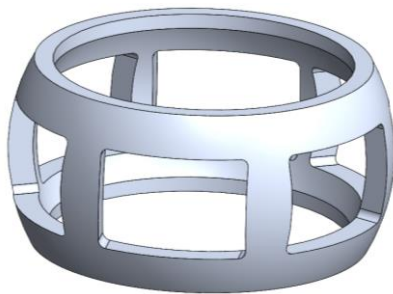


Figura 234: Jaula junta homotética fija.

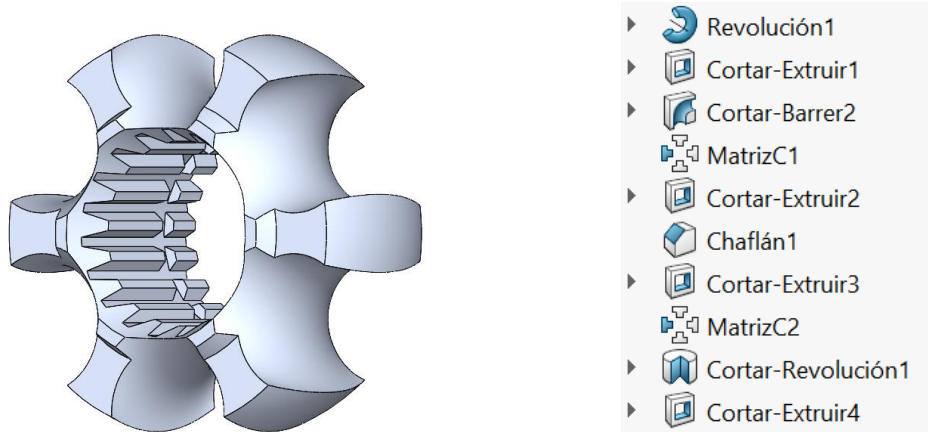


Figura 235: Núcleo junta homotética fija.

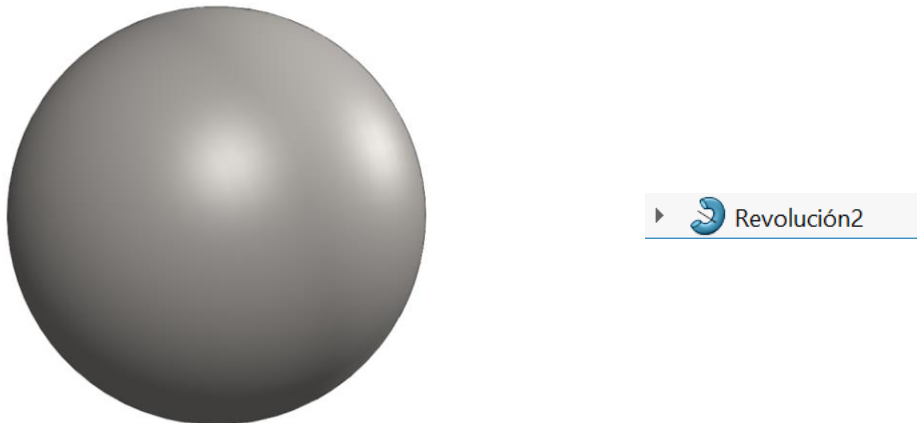


Figura 236: Bola junta homotética fija.

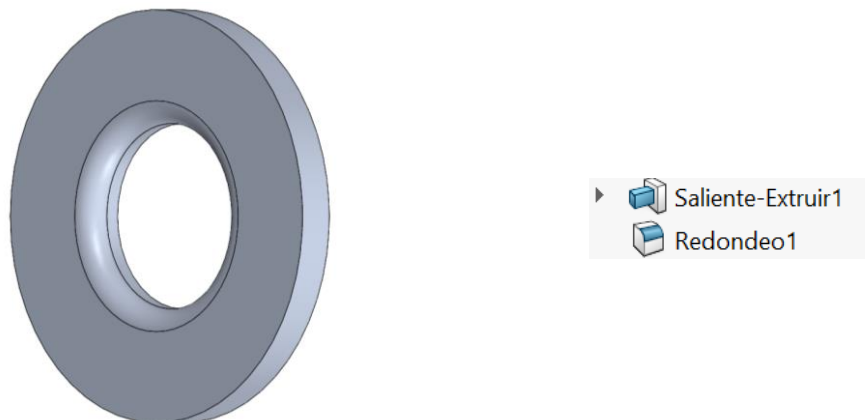
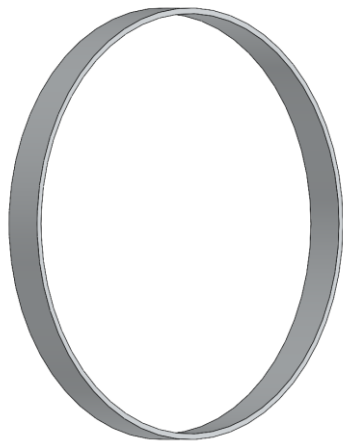


Figura 237: Tope rodamientos buje.



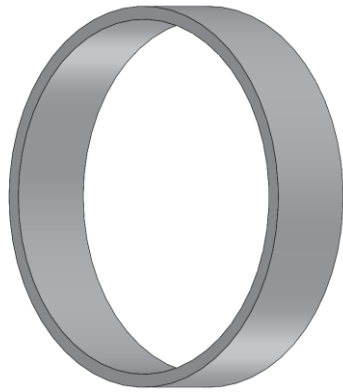
▶ Saliente-Extruir1

Figura 238: Abrazadera metálica grande guardapolvo junta homocinética fija.



▶ Revolución1
 Redondeo1
 Redondeo2
 Redondeo3
 Redondeo4
 Vaciado7

Figura 239: Guardapolvo junta homocinética fija.



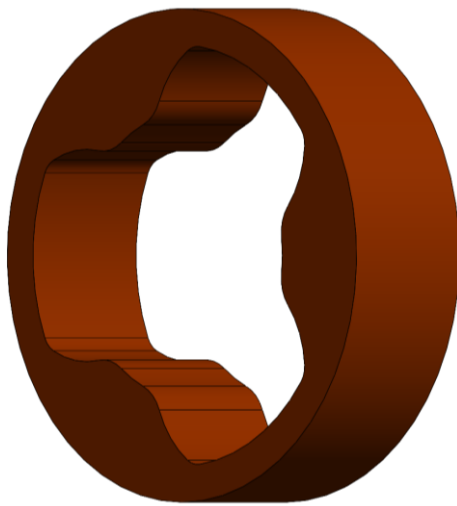
► Saliente-Extruir1

Figura 240: Abrazadera metálica pequeña guardapolvo junta homocinética fija.



► Revolución1
Vaciado7

Figura 241: Guardapolvo junta homocinética trípode.



► Saliente-Extruir1
Intersección1

Figura 242: Abrazadera nylon junta homocinética trípode.

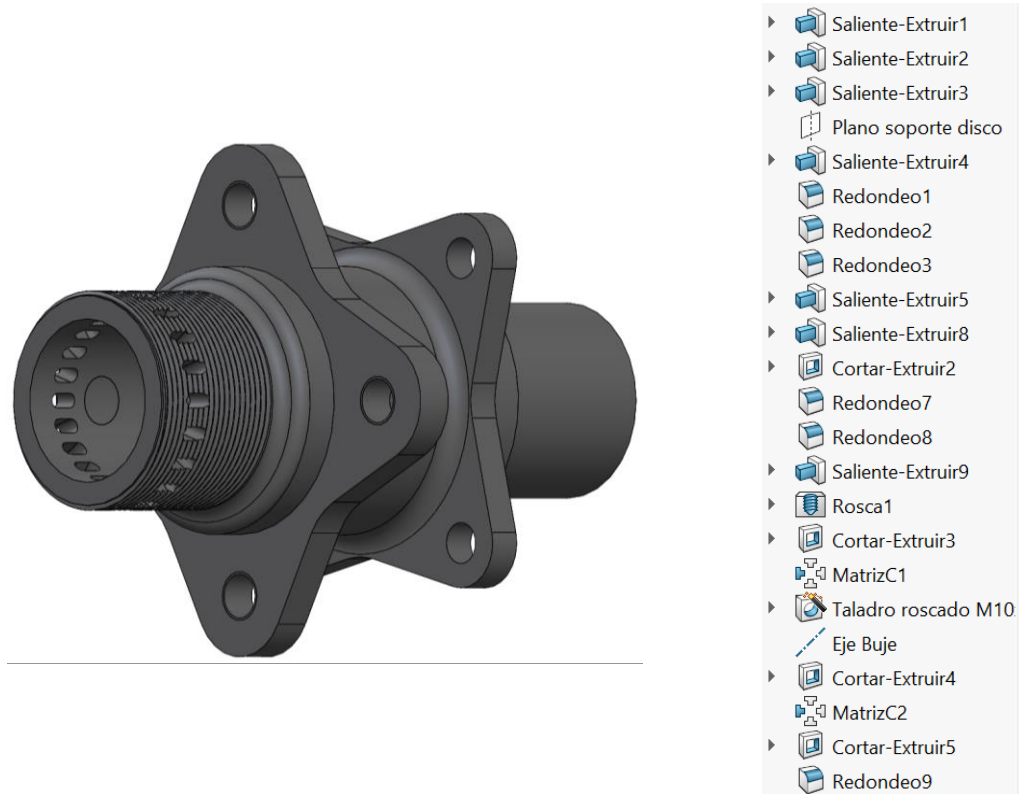


Figura 243: Buje trasero.

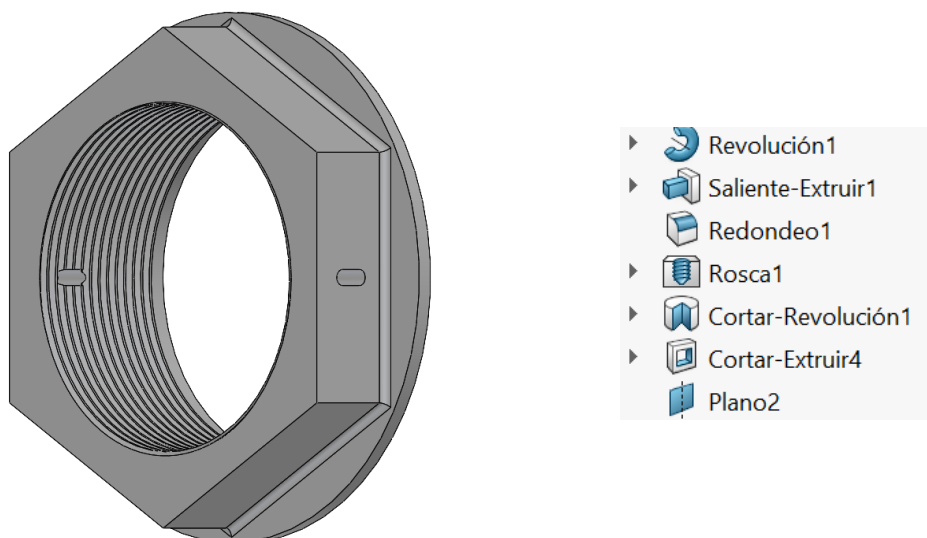


Figura 244: Tuerca rápida.

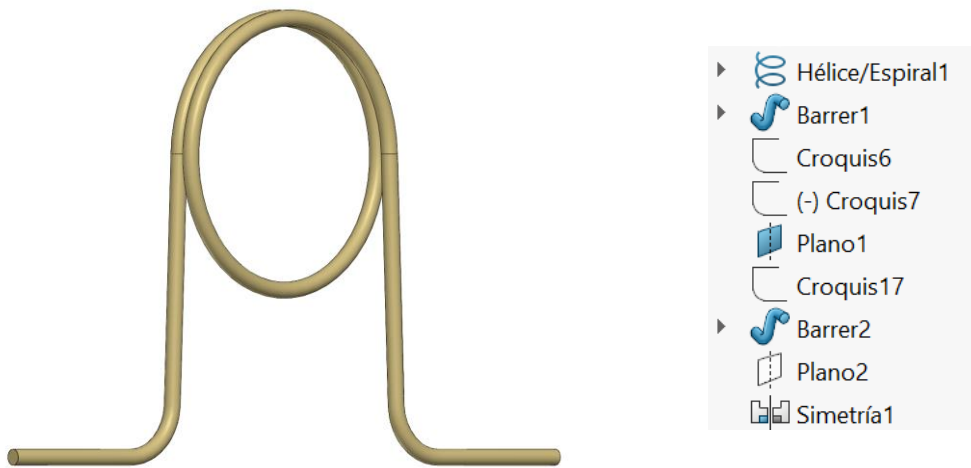


Figura 245: Clip seguridad tuerca.

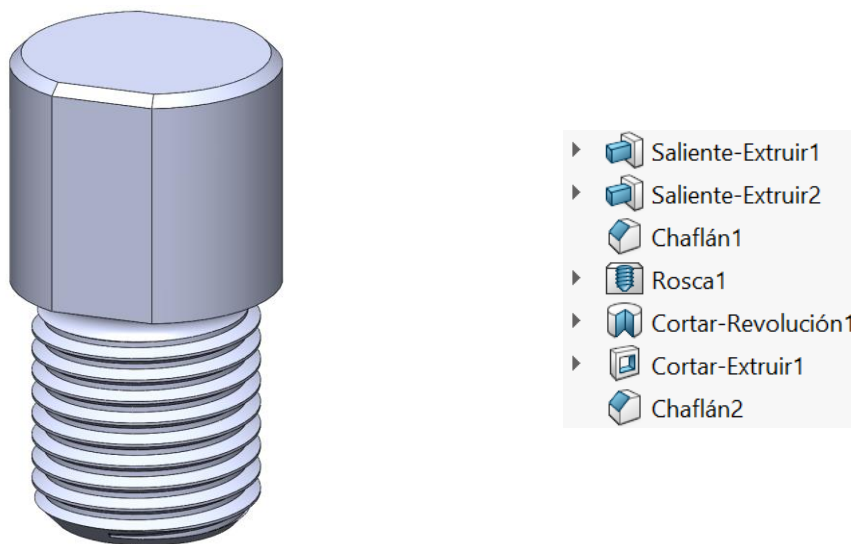


Figura 246: Drive peg.

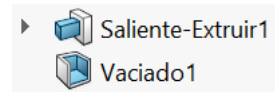
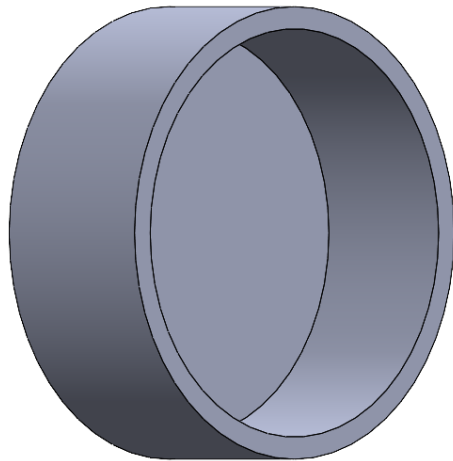


Figura 247: Pistón pinza de freno.

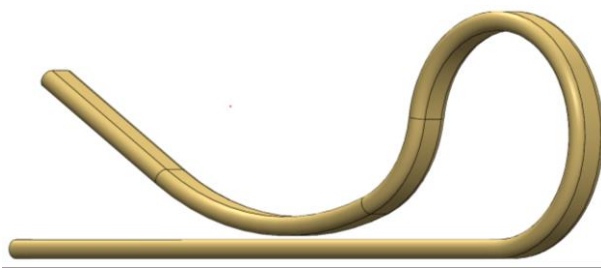


Figura 248: Clip pasador pinza de freno.



- ▶ Saliente-Extruir1
- Croquis2
- ▶ Cortar-Barrer4
- MatrizC1
- Eje1
- ▶ Cortar-Extruir1
- Redondeo4
- Croquis7
- ▶ Cortar-Revolución1
- ▶ Cortar-Extruir2
- MatrizL1
- Redondeo9
- Croquis14
- ▶ Cortar-Barrer6
- MatrizC2
- ▶ Cortar-Extruir4
- ▶ Cortar-Revolución2
- ▶ Cortar-Extruir5
- MatrizC3
- ▶ Cortar-Revolución3
- ▶ Cortar-Extruir6
- MatrizL2
- Redondeo10

Figura 249: Palier.



ANEXO II. Visualización de ensamblajes y del conjunto

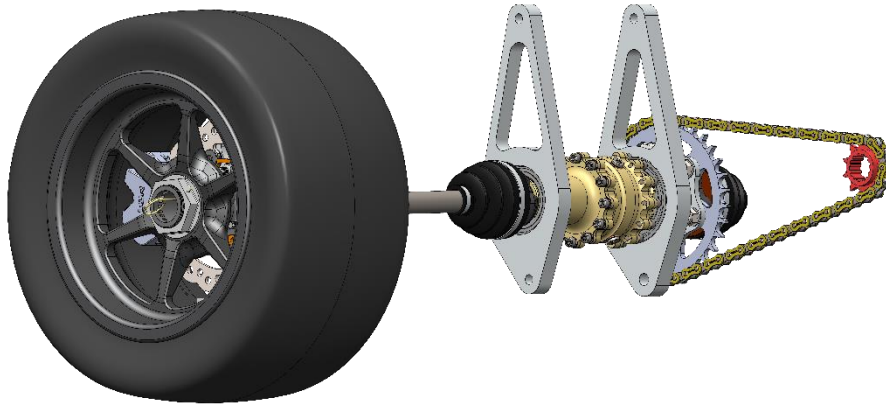


Figura 250: Conjunto gemelo digital de la transmisión de un monoplaza Formula Student.

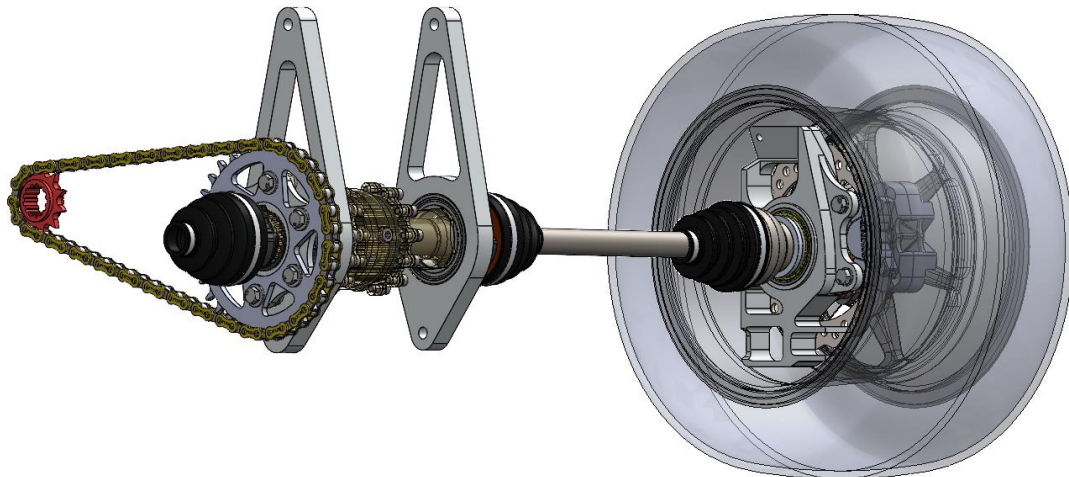


Figura 251: Conjunto gemelo digital con transparencias de la transmisión de un monoplaza Formula Student.

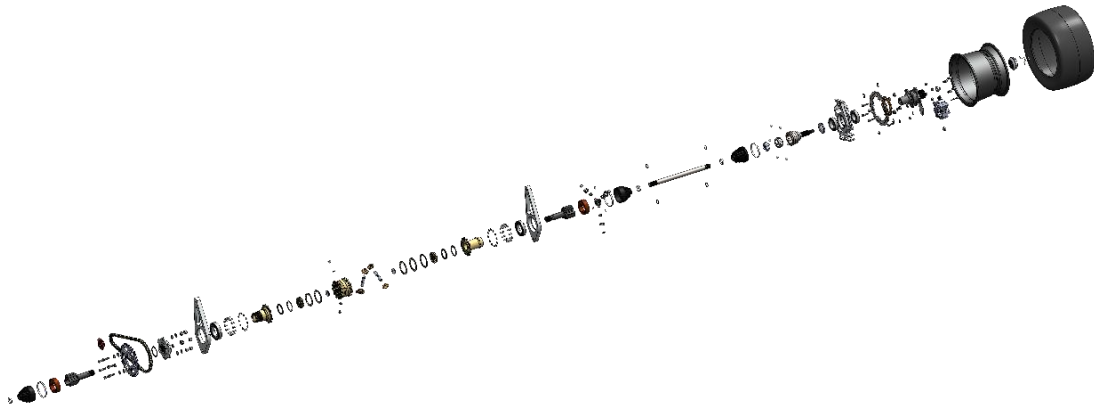


Figura 252: Explosionado general de la transmisión de un monoplaza Formula Student.

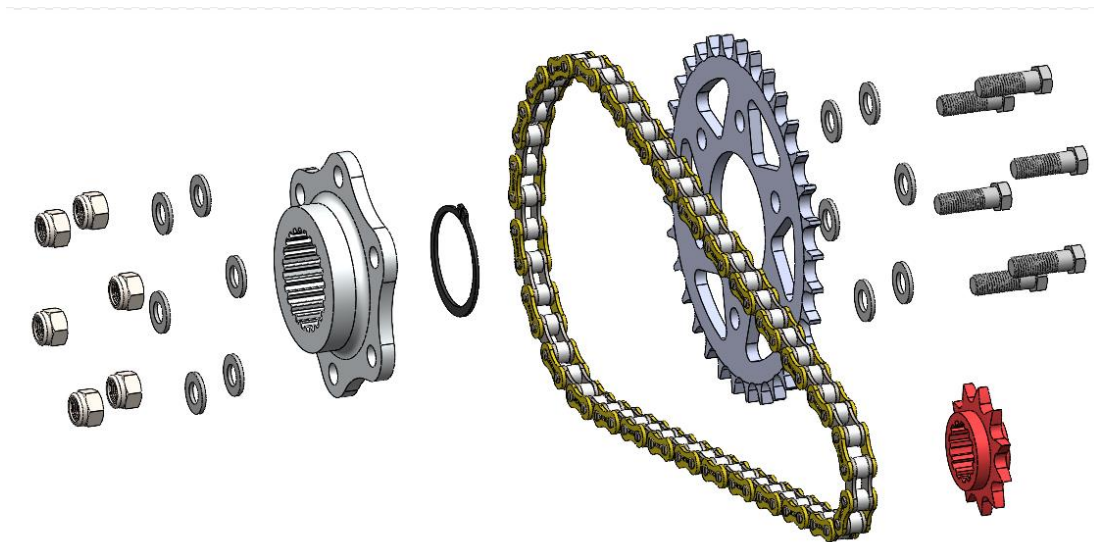


Figura 253: Explosionado subensamblaje piñón-cadena-corona. Elaboración propia.

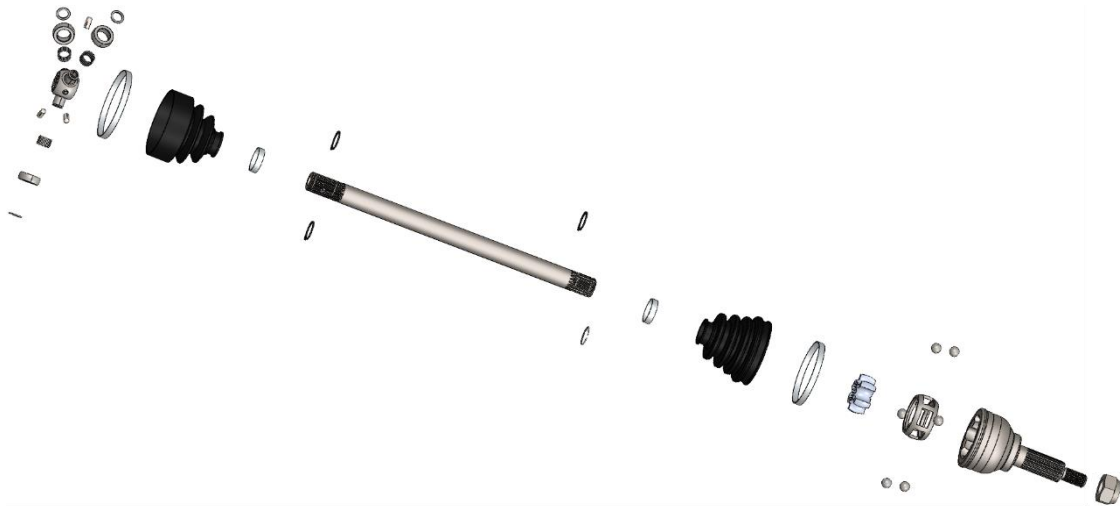


Figura 254: Explosionado subensamblaje del conjunto palier. Elaboración propia.

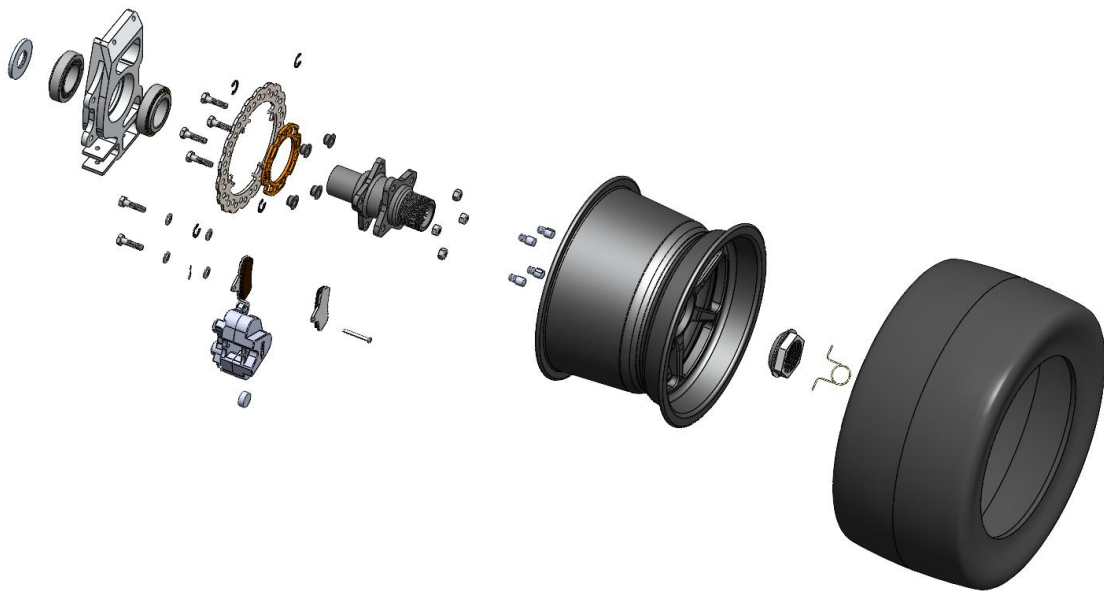


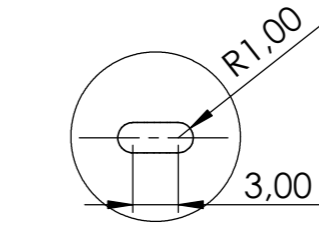
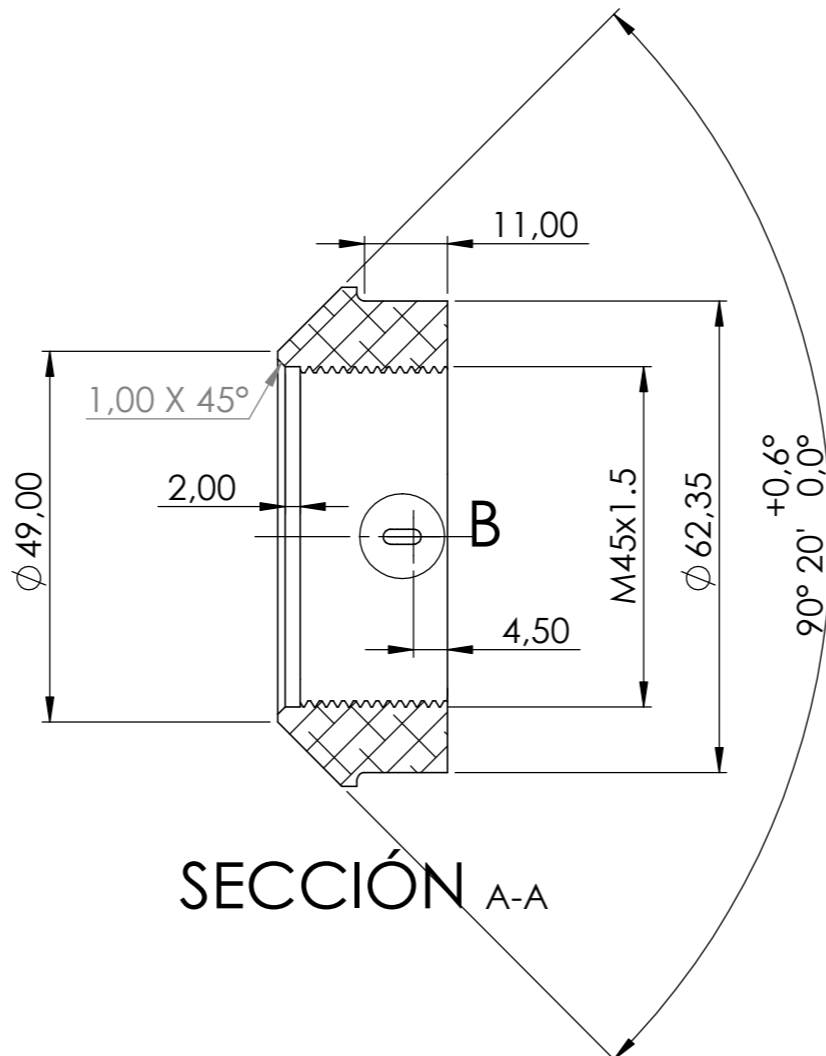
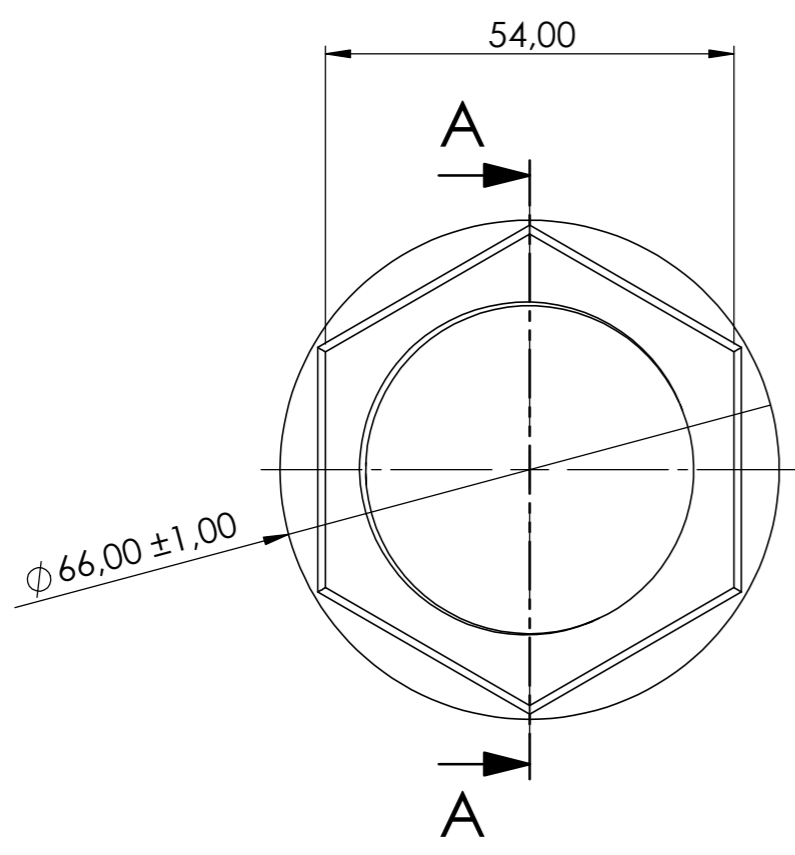
Figura 255: Explosionado completo del subensamblaje rueda trasera. Elaboración propia.



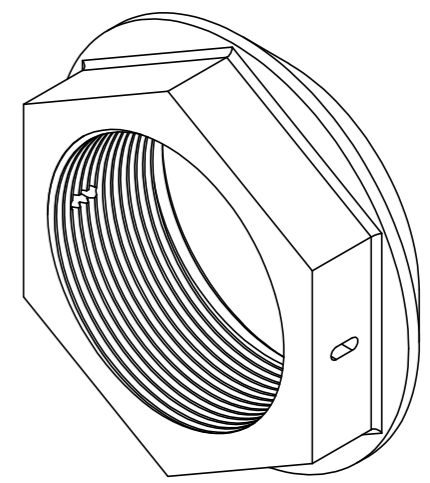
ANEXO III. Planos de los componentes creado

8 7 6 5 4 3 2 1

F
E
D
C
B
A



DETALLE B
ESCALA 2 : 1



F
E
D
C
B
A

Material: Aluminum 7570-T6	This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.	Description: Nut	
Drawing Scale: 1:1		Part Number: M23-SP-CP-P02	
Approx Weight: 0,08 kg		Drawn by: Francisco Javier Serrano Arco	
		Sheet Size: A3	Page: 1

5 4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

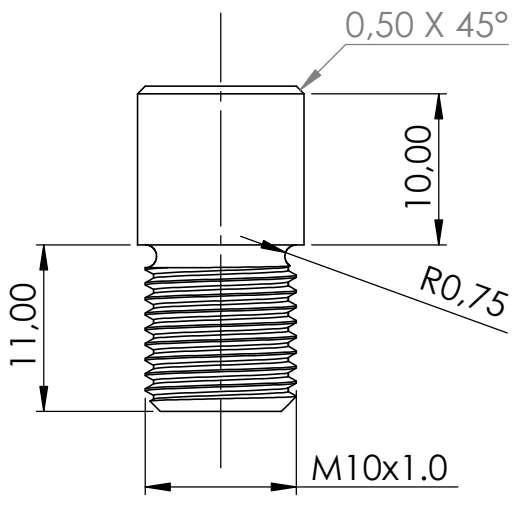
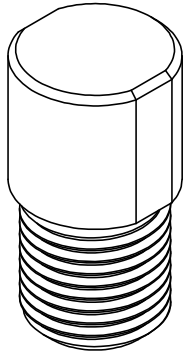
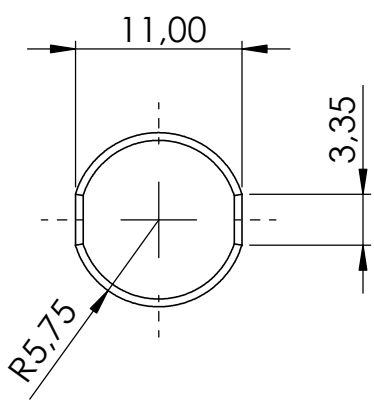
C


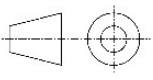
B

B

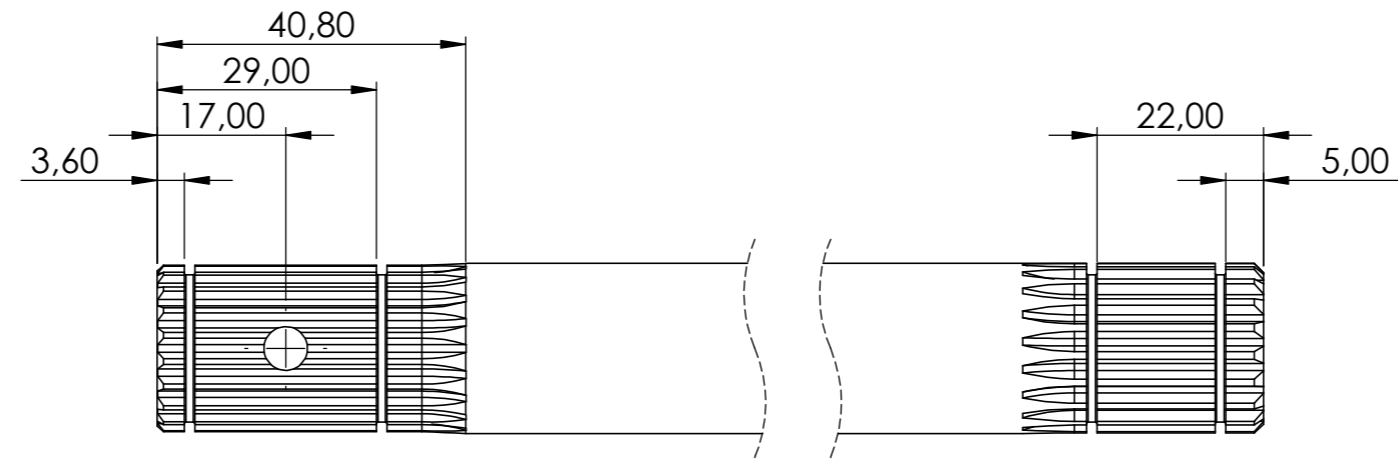
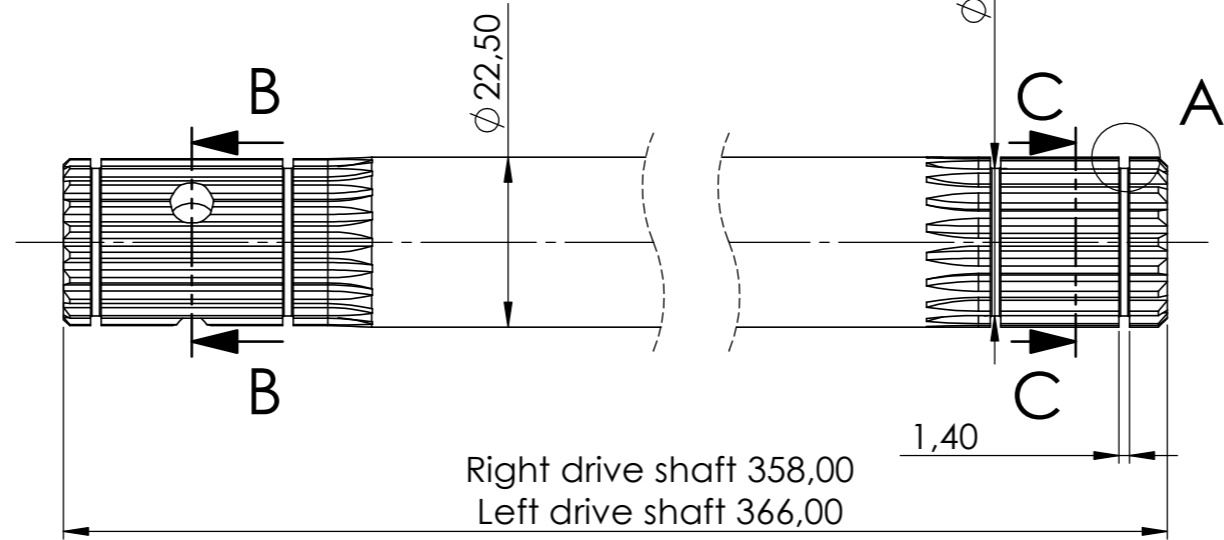
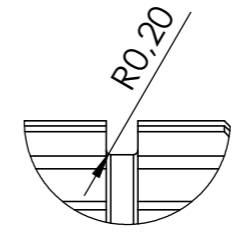
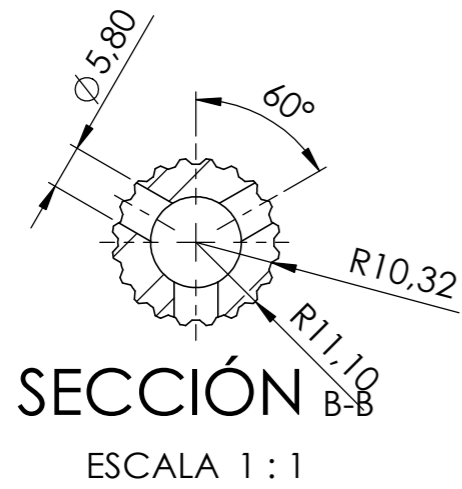
A

A

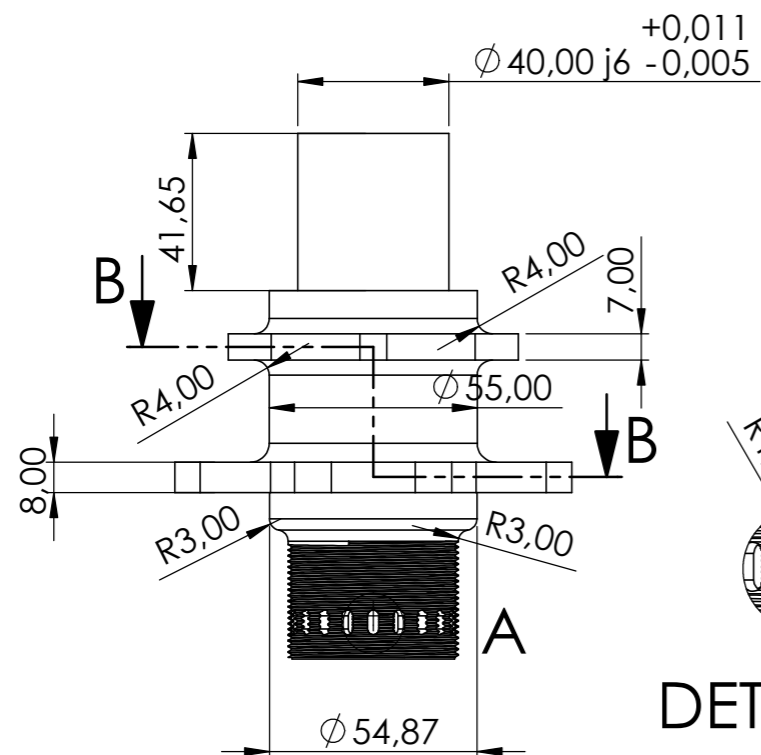


Material: Aluminiun 7075 T6		This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.	Description: Drive peg	
Drawing Scale: 2:1			Part Number: M23-SP-CP-P01	
Approz Weight: 0,005 kg			Drawn by: Francisco Javier Serrano Arco	
Sheet Size: A4			Page: 2	Date: 30/07/2023
				

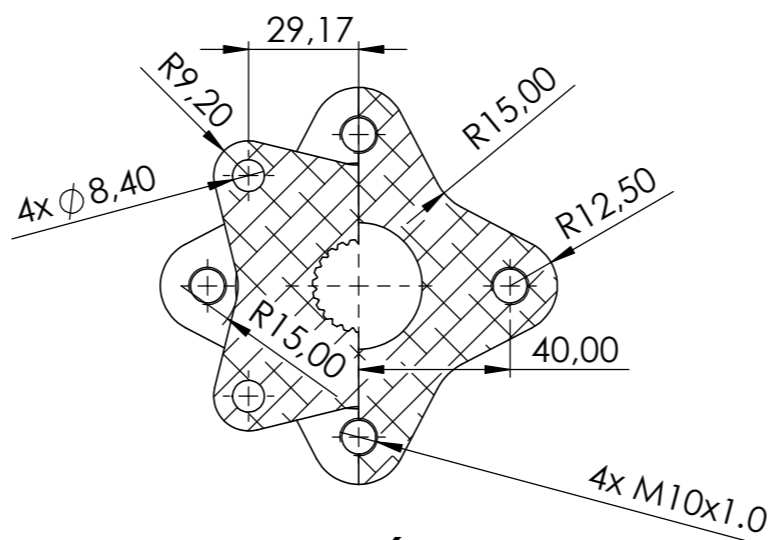
4 3 2 1



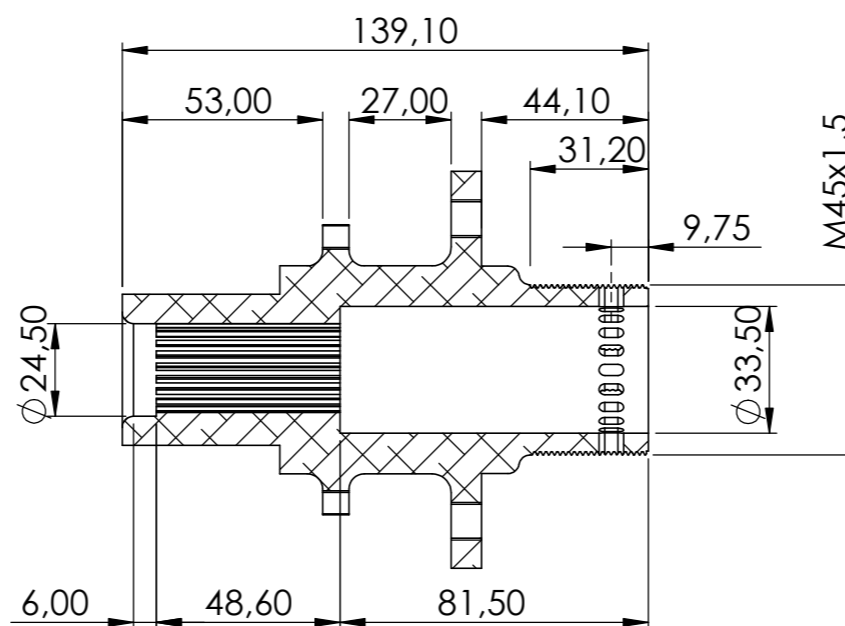
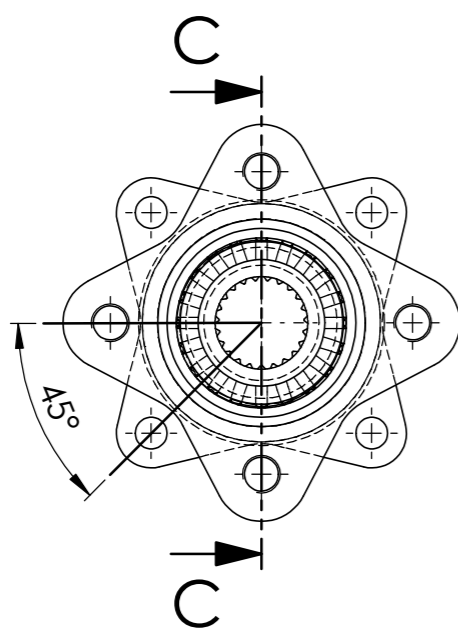
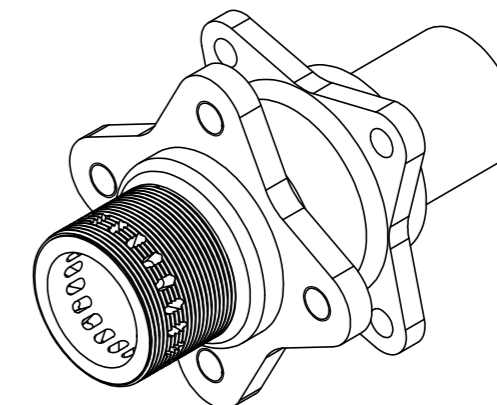
Material: AISI 4340	This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.	Description: Drive Shaft	
Drawing Scale: 1:2		Part Number: M23-PW-TNM-P10	
Approx Weight: 0,878 kg		Drawn by: Francisco Javier Serrano Arco	
		Sheet Size: A3	Page: 3



DETALLE A
ESCALA 1 : 1




SECCIÓN B-B



SECCIÓN C-C

NOTES:

1. COMPONENT TO BE PRODUCED AS INDICATED USING ASSOCIATED 2D/3D CAD DATA. ENSURE DATA SUPPLIED REPRESENTS CURRENT ISSUE STATUS OF THIS DRAWING.
2. UNSPECIFIED EDGES AS STATED IN 3d File.
3. USE APPROPRIATE CORROSION PROTECTION.
4. INDIVIDUALLY PACKAGE AND PROTECT DURING TRANSIT.
5. GENERAL TOLERANCES $\pm 0,1$ WHERE NOT ESPECIFIED.
6. MAKE SYMMETRICAL PART
7. 1x LEFT HUB WITH LEFT-HAND THREAD
8. 1x RIGHT HUB WITH RIGHT-HAND THREAD

Material: 7075-T6 (SN)	This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.	Description: Rear Hub	
Drawing Scale: 1:2		Part Number: M23-SP-RWA-P02	
Approx Weight: 558.34 g		Drawn by: Francisco Javier Serrano Arco	
Sheet Size: A3		Page: 4	Date: 28/07/2023
			



ANEXO IV. Hoja de datos técnicos erosionadora de hilo ONA AF35



ONA AF-35

EZAUGARRIAK

- Hari bidezko elektroigadura
- XY ardatzen ibilbidea: 600x400mm
- UV ardatzen ibilbidea: 120x120mm
- Z ardatzen ibilbidea 400mm
- Piezaren neurri max: 1060x750x400mm
- Piezaren pisu max 1500kg
- Mozketa konikoaren angelu maximoa: $\pm 30^\circ/87\text{mm}$
- Mozketa abiadura max (0.30 Xcc) 360mm²/min
- CNC:
 - Kontrolatutako 6 ardatz: XYUVZB
 - Aldi berean kontrolatutako ardatzak: XYUVZ
 - Gehikuntza programagarri minimoa 1mikra

CARACTERÍSTICAS

- Electroerosión por hilo
- Recorrido ejes XY: 600x400mm
- Recorrido ejes UV: 120x120mm
- Recorrido eje Z: 400mm
- Dimensiones máximas de la pieza: 1060x750x400mm
- Peso max de la pieza 1500kg
- Máximo ángulo de corte cónico: $\pm 30^\circ/87\text{mm}$
- Máx. velocidad de corte (0.30 Xcc) 360mm²/min
- CNC:
 - Seis ejes controlados: XYZUVB
 - Ejes controlados simultaneamente: XYZUV
 - Mínimo incremento programable: 1micra

Referencias

- [1] «FSSwitzerland». <https://formulastudent.ch/what-is-fs.php> (accedido 12 de agosto de 2023).
- [2] «FSAE History». <https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72> (accedido 17 de noviembre de 2022).
- [3] «Formula Student Rules 2023».
- [4] «Formula Student Rules 2023», Accedido: 22 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en:
https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2023/rules/FS-Rules_2023_v1.0.pdf
- [5] «automóvil | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE». <https://dle.rae.es/autom%C3%B3vil> (accedido 23 de julio de 2023).
- [6] «Blog Mecánicos: Historia del motor de combustión interna». http://www.blogmecanicos.com/2017/04/historia-del-motor-de-combustion-interna_4.html (accedido 23 de julio de 2023).
- [7] F. Payri González y J. M. Desantes Fernández, «MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS», *Colección Académica. Editorial UPV*, jun. 2011, Accedido: 24 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en:
<https://riunet.upv.es/handle/10251/70998>
- [8] «Diferencias entre coche con tracción delantera, trasera o total | RACE». <https://www.race.es/diferencias-coche-traccion-trasera-delantera-y-total> (accedido 5 de agosto de 2023).
- [9] «Transmisiones por cadena, correa dentada o cardan: para gustos los colores». <https://www.motorpasionmoto.com/tecnologia/transmisiones-por-cadena-correa-dentada-o-cardan-para-gustos-los-colores> (accedido 25 de julio de 2023).
- [10] «diferencial1.jpg (1307×1082)». <https://unionfenixmotors.files.wordpress.com/2014/10/diferencial1.jpg> (accedido 5 de agosto de 2023).
- [11] «Diferenciales de deslizamiento limitado, una visión general (1 de 2) – 8000vueltas.com». <https://8000vueltas.com/2008/04/16/diferenciales-de-deslizamiento-limitado-una-vision-general-1-de-2> (accedido 5 de agosto de 2023).
- [12] «Blog Mecánicos: Junta Homocinética: ¿Qué es? ¿Para qué sirve?». <http://www.blogmecanicos.com/2016/11/junta-homocinetica-que-es-para-que-sirve.html> (accedido 24 de julio de 2023).

- [13] Egon Von Ruville, «Manual técnico de juntas homocinéticas»,
- [14] Adrian Batista Martín y Diego López López, «CÁLCULO Y DISEÑO DE ELEMENTOS DE TRANSMISIÓN, SUSPENSIÓN Y FRENADA DE UN MONOPLAZA FORMULA STUDENT», UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA, 2020.
- [15] «¿Qué es el Buje? - Glosario de mecánica | Hello Auto». <https://helloauto.com/glosario/buje> (accedido 25 de julio de 2023).
- [16] Pablo. Luque Rodríguez, D. Álvarez Mántaras, y C. Vera, «Ingeniería del automóvil : sistemas y comportamiento dinámico», 2004.
- [17] Mariam Baqouah Sánchez, «DISEÑO DEL CONJUNTO INTERIOR DE RUEDA DELANTERO PARA UN MONOPLAZA DE COMPETICIÓN FORMULA STUDENT», Universidad de Málaga, 2022.
- [18] «Tema candente: Conversión de frenos de tambor a frenos de disco». <https://www.expertoautorecambios.es/magazine/conversion-de-frenos-de-tambor-a-frenos-de-disco-2433> (accedido 5 de agosto de 2023).
- [19] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, «Engranajes: descripción general», *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, vol. 136, n.º 1, pp. 669-681, 2012, Accedido: 25 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.casadellibro.com/libro-diseno-en-ingenieria-mecanica-de-shigley-9-ed/9786071507716/2026751>
- [20] «5.3.- Tensiones en elementos sometidos a torsión. | DPM04.-Resistencia de materiales.» https://ikastaroak.birt.eus/edu/es/DFM/DPM/DPM04/es_DFM_DPM04_Contenidos/website_53_tensiones_en_elementos_sometidos_a_torsin.html (accedido 26 de julio de 2023).
- [21] F. García Vacas, A. a Pérez de la Blanca Cobos, y A. Simón Mata, «Introducción al método de diseño a fatiga en ingeniería mecánica».
- [22] «SOLIDWORKS». <https://www.solidworks.com/es> (accedido 2 de agosto de 2023).
- [23] «SOLIDWORKS - Qué es y para qué sirve». <https://solid-bi.es/solidworks/> (accedido 2 de agosto de 2023).
- [24] «Plataforma 3DEXPERIENCE: un punto de inflexión para los negocios y la innovación | Dassault Systèmes». <https://www.3ds.com/es/3dexperience> (accedido 24 de julio de 2023).
- [25] P. : José y R. Rta, «PROCESO DE MECANIZADO POR ELECTROEROSION».
- [26] «INTRODUCCION A LA ELECTROEROSION».
- [27] «2.2.- Máquina de electroerosión por hilo. | DPMCM02.- Procesos de mecanizado por abrasión, electroerosión y especiales.»

- https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/PPFM/DPMCM/DPMCM02/es_PPFM_DPMC M02_Contenidos/website_22_mquina_de_electroerosin_por_hilo.html (accedido 1 de agosto de 2023).
- [28] R. FERRET POZA, A. ARANZABE GARCIA, K. CASTRILLO GOMEZ, y F. MARTINEZ MUGICA, «PROCESO DE DESIONIZACION Y CLARIFICACION DEL MEDIO ACUOSO UTILIZADO EN UNA MAQUINA DE ELECTROEROSION Y PRODUCTO PARA DICHO PROCESO», jul. 2003.
- [29] «Hoosier Racing Tires - Tires Designed for Champions». <https://www.hoosiertire.com/> (accedido 25 de agosto de 2023).
- [30] Mario Fernández Osma, «Diseño y estudio de los palieres de un monoplaza de FSAE empleando materiales alternativos», E.T.S.I Industriales (UPM), Madrid, 2017.
- [31] «Acerocorte Levante». <https://www.acerocorte.com/productos/f127/6/> (accedido 31 de julio de 2023).
- [32] SER MET Taller Metalúrgico, «Fabricación del palier para una retroexcavadora». 2020.
- [33] «The wheels - OZ Racing». <https://www.ozracing.com/es/motorsport/formula-aprendizaje/llantas> (accedido 31 de julio de 2023).
- [34] «¿Qué es el ET de una llanta? – Selsius Wheels». <https://selcus.com/blog/2020/06/04/que-es-el-et-de-una-llanta/> (accedido 24 de julio de 2023).
- [35] Carlos Manuel Valdeolmillos Carnicero, «Diseño del buje monotuerca para un monoplaza de Formula SAE», 2023.
- [36] «Aluminio 7075 Ergal | 3.4365 | AlZnMgCu1.5 | Servicio CNC Online». <https://www.weerg.com/es/mecanizado-cnc-materiales/aluminio/7075> (accedido 31 de julio de 2023).
- [37] «¿Qué es y cómo funciona un centro mecanizado CNC? -». <https://www.vurcon.com/es/que-es-y-como-funciona-un-centro-mecanizado-cnc/> (accedido 29 de agosto de 2023).
- [38] «Corte por láser: las ventajas de un proceso versátil y sostenible | Alsimet». <http://alsimet.es/es/noticias/corte-por-laser-las-ventajas-de-un-proceso-versatil-y-sostenible> (accedido 30 de julio de 2023).
- [39] «Brochado 0 defectos, monitorización intensiva de procesos críticos - Metalmecánica». <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/395386-Brochado-0-defectos-monitorizacion-intensiva-de-procesos-criticos.html> (accedido 30 de julio de 2023).



- [40] «Tipos de roscas- Clasificación | De Máquinas y Herramientas».
<https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-manuales/cuales-son-los-distintos-tipos-de-roscas-y-como-se-clasifican-una-guia-para-distinguir-las-y-conocer-las> (accedido 31 de julio de 2023).



En Málaga a 4 de septiembre de 2023

Fdo: Francisco Javier Serrano Arco