



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN VEHÍCULO RC MEDIANTE MANUFACTURA
ADITIVA PARA DISPONER DE UN PROTOTIPO DIDÁCTICO FUNCIONAL Y
REPRODUCIBLE**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Automotriz

AUTORES: BRYAN STEVEN ESPINOZA TAPIA
CRISTOPER ANDRÉS CAJAMARCA MORA
TUTOR: ING. JORGE ESTEBAN FAJARDO MERCHÁN

Cuenca - Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Bryan Steven Espinoza Tapia con documento de identificación N° 0106713779 y Christopher Andrés Cajamarca Mora con documento de identificación N° 0106009418; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 6 de enero del 2026

Atentamente,



Bryan Steven Espinoza Tapia

0106713779



Christopher Andrés Cajamarca Mora

0106009418

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Bryan Steven Espinoza Tapia con documento de identificación N° 0106713779 y Cristopher Andrés Cajamarca Mora con documento de identificación N° 0106009418, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Desarrollo y validación de un vehículo RC mediante manufactura aditiva para disponer de un prototipo didáctico funcional y reproducible”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 6 de enero del 2026

Atentamente,



Bryan Steven Espinoza Tapia

0106713779



Cristopher Andrés Cajamarca Mora

0106009418

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jorge Esteban Fajardo Merchán con documento de identificación N° 0103496386, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN VEHÍCULO RC MEDIANTE MANUFACTURA ADITIVA PARA DISPONER DE UN PROTOTIPO DIDÁCTICO FUNCIONAL Y REPRODUCIBLE**, realizado por Bryan Steven Espinoza Tapia con documento de identificación N° 0106713779 y por Cristopher Andrés Cajamarca Mora con documento de identificación N° 0106009418, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 6 de enero del 2026

Atentamente,



Ing. Jorge Esteban Fajardo Merchán

0103496386

DEDICATORIA

Tengo el gusto de dedicar el presente proyecto a mis queridos padres, Joel Ramiro Espinoza Rodas y Sara Judidh Tapia Arichávala, sobre todo a mi madre, quien siempre fue la primera en motivarme y enseñarme que el sacrificio da sus frutos.

De igual manera va dedicada a mi hermana Patricia Espinoza y mi cuñado Marcelo Pérez, que me brindaron su hogar y protección en la ciudad de Cuenca para poder realizar mis estudios.

De la misma manera a mi pareja Joseline Arízaga, que me acompañó en cada paso de mi formación brindándome su apoyo, amor y motivación en todo momento.

Por último, a toda mi familia, Maricela Espinoza, Juan Tapia, Nelson Tapia, Hugo Tapia quienes siempre estuvieron motivándome en mi formación.

Bryan Steven Espinoza Tapia

DEDICATORIA

El presente proyecto le dedico a mis padres Hugo Rolando Cajamarca y María del Carmen Mora por su apoyo incondicional en toda mi vida, por su paciencia, por toda su confianza, por haber creído en mí, por su sacrificio que hoy se ve reflejado en toda mi carrera

Finalmente, a toda mi familia a mis tíos, primos y demás allegados que de una u otra forma me motivaron a culminar mi carrera.

Cristopher Andrés Cajamarca Mora

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios, por haberme dado la fuerza y la resiliencia para continuar a pesar de los tropiezos, por darme la capacidad de cumplir esta meta y de brindarme el apoyo y compañía de todas las personas que siempre estuvieron a mi lado.

A mis padres por todo el amor y confianza que pusieron en mí, y por todo el esfuerzo y sacrificio que realizaron para que jamás me falte nada y así poder cumplir este sueño.

A mi pareja quien siempre me acompañó y me apoyó en esas madrugadas de insomnio y los días grises, dándome su amor y motivándome a jamás rendirme.

A mi abuelito, a mis hermanas y tíos por siempre preocuparse por mí y apoyarme con lo que hiciera falta.

Finalmente agradezco a todos mis compañeros y profesores que fueron parte de mi formación, con quienes viví experiencias y enseñanzas que jamás olvidaré.

Bryan Steven Espinoza Tapia

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios por darme la fuerza y la sabiduría necesaria para continuar con este proyecto de investigación, por no permitirme rendirme ante los obstáculos que se presentaron, y por darme la oportunidad de seguir adelante con este sueño.

A mis padres, por su amor y apoyo incondicional, por siempre estar a mi lado y darme todo lo necesario para alcanzar mis metas. Gracias por estar siempre presentes en cada momento de mi vida, por apoyarme en cada decisión, y por brindarme su confianza para continuar mis estudios.

A mi familia, por ser mi apoyo constante, por creer en mí y por ayudarme a ser mejor cada día, siempre guiándome con su ejemplo de esfuerzo y dedicación.

A mi tutor, Jorge Esteban Fajardo Merchan, por su paciencia, conocimiento y por siempre estar dispuesto a orientarme en cada paso de este proyecto. Gracias por su apoyo y por brindarme la oportunidad de crecer profesionalmente bajo su dirección.

Finalmente, a todas las personas que de alguna forma contribuyeron a que este trabajo sea posible. Gracias por su apoyo y por ser parte fundamental en este proceso.

Cristopher Andrés Cajamarca Mora

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo el desarrollo y validación de un vehículo de control remoto (RC) basado en la tecnología de manufactura aditiva mediante impresión 3D FDM (Fused Deposition Modeling), orientado al uso didáctico en el campo de la Ingeniería Automotriz. Este prototipo tiene la finalidad de servir como plataforma educativa para enseñar conceptos de diseño mecánico, dinámica vehicular, manufactura aditiva, y mecatrónica. El diseño del vehículo se estructuró de manera modular utilizando CAD paramétrico, lo que permitió optimizar la integración de los subsistemas como la suspensión, transmisión y dirección. Además, se emplearon materiales de impresión 3D como el PLA+ para los componentes estructurales, manteniendo tolerancias adecuadas y asegurando la repetibilidad de las piezas fabricadas. Para el análisis estructural y de desempeño, se realizaron simulaciones de elementos finitos (CAE) que demostraron que los componentes clave, como el chasis y los engranajes, soportan adecuadamente las cargas esperadas. Finalmente, el sistema de transmisión fue diseñado para proporcionar una relación de transmisión óptima, garantizando un desempeño adecuado en términos de velocidad y tracción. El prototipo fue validado experimentalmente, confirmando su viabilidad como herramienta educativa, así como su capacidad para realizar pruebas dinámicas y de maniobrabilidad. El prototipo es completamente replicable y puede servir como base para futuras mejoras, como la integración de telemetría o sistemas autónomos.

Palabras clave: Vehículo RC, Manufactura aditiva (FDM), Diseño mecánico, CAE (Análisis de elementos finitos), Transmisión por engranajes

Abstract

This project aims to develop and validate a remote-controlled (RC) vehicle based on additive manufacturing technology using FDM (Fused Deposition Modeling) 3D printing, designed for educational purposes in Automotive Engineering. The prototype serves as a platform to teach mechanical design, vehicle dynamics, additive manufacturing, and mechatronics concepts. The vehicle design was structured in a modular way using parametric CAD, allowing for the optimization of subsystem integration such as suspension, transmission, and steering. Additionally, 3D printing materials like PLA+ were used for structural components, maintaining appropriate tolerances and ensuring the repeatability of fabricated parts. Structural and performance analyses were conducted through finite element simulations (CAE), showing that key components such as the chassis and gears can withstand expected loads. The transmission system was designed to provide an optimal gear ratio, ensuring appropriate speed and traction performance. The prototype was experimentally validated, confirming its feasibility as an educational tool and its capability for dynamic and maneuverability testing. The prototype is fully replicable and can serve as a foundation for future improvements, such as the integration of telemetry or autonomous systems.

Keywords: Remote-Controlled Vehicle (RC), Additive Manufacturing (FDM), Mechanical Design, Finite Element Analysis (CAE), Gear Transmission

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	9
2. PROBLEMA	10
3. OBJETIVOS	12
3.1. Objetivo General	12
3.2. Objetivos Específicos	12
4. DESARROLLO	13
4.1. Identificación de criterios y variables de diseño del prototipo RC	14
4.1.1. Propósito y alcance del análisis de diseño	14
4.1.2. Metodología de revisión normativa y bibliográfica	15
4.1.3. Selección del reglamento base de referencia	16
4.1.4. Requisitos dimensionales, mecánicos y funcionales	16
4.1.5. Normativa asociada a la manufactura aditiva	17
4.1.6. Síntesis de criterios y variables de diseño	18
4.1.7. Síntesis del Objetivo Específico 1	18
4.2. Diseño del prototipo RC mediante modelado CAD	19
4.2.1. Propósito y alcance del diseño	19
4.2.2. Metodología de modelado CAD del prototipo	19
4.2.3. Configuración general y arquitectura del prototipo RC	21
4.2.4. Selección del sistema de ruedas y neumáticos	22
4.2.4.1. Criterios de selección	22
4.2.4.2. Alternativas evaluadas	22
4.2.4.3. Matriz de ponderación para selección de ruedas	22
4.2.4.4. Justificación técnica de la selección	23
4.2.5. Selección técnica y criterios de diseño del sistema de suspensión	23
4.2.5.1. Criterios técnicos de diseño	23
4.2.5.2. Alternativas evaluadas	24
4.2.5.3. Matriz de ponderación para selección de suspensión	24
4.2.5.4. Justificación técnica de la selección	24
4.2.6. Selección y diseño técnico del bastidor estructural	24
4.2.6.1. Criterios técnicos para el diseño del bastidor	24
4.2.6.2. Alternativas estructurales evaluadas	25
4.2.6.3. Matriz de ponderación para la selección del bastidor	26
4.2.6.4. Justificación técnica de la selección	26
4.2.7. Selección técnica y diseño del sistema de dirección	27
4.2.7.1. Criterios técnicos para la selección del sistema de dirección	27
4.2.7.2. Alternativas evaluadas	28

4.2.7.3. Matriz de ponderación para selección del sistema de dirección	28
4.2.7.4. Justificación técnica de la selección	28
4.2.7.5. Parámetros geométricos definidos para el modelado CAD	29
4.2.8. Integración del sistema de propulsión y transmisión.....	30
4.2.8.1. Definición de la relación de transmisión.....	30
4.2.8.2. Justificación técnica de la relación de transmisión seleccionada.....	31
4.2.8.3. Cálculo del torque transmitido a la rueda	31
4.2.8.4. Fuerza de tracción y verificación mínima de desplazamiento	32
4.2.8.5 Estimación del régimen de operación del motor	32
4.2.8.6. Justificación global de la integración	32
4.2.9. Diseño orientado a manufactura aditiva (DfAM)	34
4.2.9.1. Criterios técnicos para el diseño orientado a manufactura aditiva	34
4.2.9.2. Alternativas evaluadas.....	35
4.2.9.3. Matriz de ponderación para selección del enfoque DfAM	35
4.2.9.4. Justificación técnica de la selección	35
4.2.9.5. Aplicación del enfoque DfAM en los subsistemas	36
4.2.10. Criterios técnicos para el ensamblaje	36
4.2.10.1. Procedimiento de ensamblaje virtual.....	37
4.2.10.2. Verificación de interferencias y recorridos	37
4.2.10.3. Alternativas evaluadas.....	37
4.2.10.4. Matriz de ponderación para selección de la configuración de ensamblaje	38
4.2.10.5. Justificación técnica de la selección	38
4.2.10.6. Validación final del ensamblaje	38
4.2.10.7. Consideraciones finales	39
4.3. Evaluación del desempeño del vehículo RC mediante pruebas experimentales	39
4.3.1. Definición de variables de evaluación	40
4.3.1.1. Parámetros de diseño utilizados como referencia.....	40
4.3.1.2. Criterios de aceptación	42
4.3.2. Procedimiento experimental	42
4.3.2.1. Condiciones del entorno.....	42
4.3.2.2. Instrumentos utilizados	44
4.3.2.3. Número de repeticiones.....	46
4.3.2.4. Tiempo de medición	46
4.3.3. Resultados obtenidos.....	46
4.3.3.1. Velocidad	47
4.3.3.2. Estabilidad direccional	47
4.3.3.3. Torque	47
4.3.3.4. Funcionalidad de la dirección	48
4.3.4. Análisis y validación	49
4.3.4.1. Cumplimiento de los parámetros	49
4.3.4.2. Desviaciones observadas	49
4.3.4.3. Ajustes realizados	50
4.3.4.4. Validación del cumplimiento del Objetivo Especifico 3	51
4.4. Documentación del desarrollo del prototipo RC y vinculación con el diseño CAD.....	51

4.4.1. Propósito del manual técnico	52
4.4.2. Estructura del manual	52
4.4.3. Aplicación didáctica	53
4.4.4. Evidencia del manual como producto final	53
4.4.5. Manual técnico	53
4.4.5.1. Neumáticos.....	54
4.4.5.2. Suspensión.....	55
4.4.5.3. Manguetas.....	59
4.4.5.4. Aros.....	59
4.4.5.5. Transmisión	60
4.4.5.6. Junta cardán	62
4.4.5.7. Chasis.....	63
4.4.5.8. Carrocería	65
4.4.6. Análisis CAE aplicado al diseño estructural	66
4.4.6.1. Piñón 51 dientes	68
4.4.6.2. Eje hexagonal.....	69
4.4.6.3. Brazo inferior de suspensión.....	71
4.4.6.4. Brazo superior de suspensión	72
4.4.6.5. Chasis.....	74
4.4.7. Selección de materiales y parámetros de impresión	77
4.4.8. Proceso de manufactura aditiva	78
4.4.9. Ensamblaje del prototipo	81
4.4.9. Control dimensional y verificación geométrica	85
4.4.10. Arquitectura general del sistema	88
4.4.11 Selección y justificación de componentes	89
4.4.11.1. Sistema de radio profesional	90
4.4.11.2. Controlador de velocidad electrónico.....	91
4.4.11.3. Motor.....	93
4.4.11.4. ESC.....	94
4.4.11.5. Servomotor de dirección	95
4.4.11.6. Motor máximo permitido	96
4.4.11.7. Baterías.....	97
4.4.12 Lista de materiales y herramientas (BOM)	98
4.4.13. Procedimiento de fabricación	100
4.4.13.1 Fabricación del chasis y componentes estructurales.....	100
4.4.13.2 Tolerancias dimensionales	101
4.4.13.3 Preparación de piezas.....	101
4.4.13.4 Ensamblajes estructurales.....	101
4.4.14. Procedimiento de ensamblaje	102
4.4.14.1 Montaje mecánico.....	102
4.4.14.2 Integración eléctrica y electrónica.....	102

4.4.15. Configuración y calibración del sistema	103
4.4.16. Procedimientos de validación funcional.....	103
4.4.17. Mantenimiento preventivo y correctivo.....	103
4.4.18. Seguridad operativa	103
4.4.19. Recomendaciones para futuras implementaciones académicas	104
4.4.20. Formatos y plantillas de apoyo.....	104
5. CONCLUSIONES	105
6. RECOMENDACIONES.....	107
7. BIBLIOGRAFÍA	109
8. ANEXOS	110

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Ubicación de la UPS	11
Ilustración 2 Dimensiones a considerar dentro de la validación	40
Ilustración 3 Brazos de Suspensión tipo doble horquilla	41
Ilustración 4 Chasis Modelado Final	41
Ilustración 5 Material PLA utilizado en Impresión 3D	42
Ilustración 6 Prototipo en la pista improvisada para la validación	43
Ilustración 7 Pista utilizada para la validación	44
Ilustración 8 Materiales Usados en la validación	44
Ilustración 9 Flexómetro usado para la toma de mediciones	45
Ilustración 10 Vehículo sin carrocería para evidenciar el funcionamiento de la dirección	45
Ilustración 11 Toma de tiempo para determinar velocidad del vehículo	46
Ilustración 12 Estructura Interna de la dirección	50
Ilustración 13 Suspensión Posterior	51
Ilustración 14 Neumático	54
Ilustración 15 Suspensión del prototipo	55
Ilustración 16 Vista frontal del conjunto	56
Ilustración 17 Vista frontal del ensamble completo	57
Ilustración 18 Vista superior lateral del prototipo	58
Ilustración 19 Mangueta delantera	59
Ilustración 20 Mangueta trasera	59
Ilustración 21 Aro del neumático	60
Ilustración 22 Sistema de transmisión	61
Ilustración 23 Sistema diferencial	62
Ilustración 24 Eje de transmisión principal	62
Ilustración 25 Sistema de ejes cardán	63
Ilustración 26 Chasis	63
Ilustración 27 Carrocería	66
Ilustración 28 Datos utilizados para las simulaciones CAE en ANSYS	67
Ilustración 29 Deformación direccional Piñón 51 dientes	68
Ilustración 30 Factor de seguridad Piñón 51 dientes	69
Ilustración 31 Esfuerzo equivalente Piñón 51 dientes	69
Ilustración 32 Deformación total del eje	70
Ilustración 33 Esfuerzo equivalente del eje	70
Ilustración 34 Factor de seguridad del eje	70
Ilustración 35 Deformación total del brazo inferior	71
Ilustración 36 Esfuerzo equivalente del brazo inferior	72
Ilustración 37 Factor de seguridad del brazo inferior	72
Ilustración 38 Deformación total del brazo superior	73

Ilustración 39 Esfuerzo equivalente del brazo superior	73
Ilustración 40 Factor de seguridad del brazo superior.....	74
Ilustración 41 Deformación total del chasis	74
Ilustración 42 Esfuerzo equivalente del chasis.....	75
Ilustración 43 Factor de seguridad del chasis.....	75
Ilustración 44 Vista preliminar de impresión 3D	78
Ilustración 45 Vista preliminar de impresión del bastidor.....	79
Ilustración 46 Vista preliminar de impresión 3D de manguetas, soportes, diferenciales y cardanes.....	79
Ilustración 47 Reimpresión de elementos ajustados.....	80
Ilustración 48 Elementos manufacturados.....	80
Ilustración 49 Elementos manufacturados.....	81
Ilustración 50 Ensamblado de chasis.....	82
Ilustración 51 Ensamblado de suspensión	82
Ilustración 52 Ensamblado de la transmisión	83
Ilustración 53 Ensamblado de la dirección.....	83
Ilustración 54 Ensamblado de batería y ESC	84
Ilustración 55 Ensamblado de la carrocería.....	84
Ilustración 56 Verificación dimensional del ancho	85
Ilustración 57 Verificación dimensional del ancho	86
Ilustración 58 Verificación dimensional del largo.....	86
Ilustración 59 Verificación dimensional del peso.....	87
Ilustración 60 Sistema de radio profesional	90
Ilustración 61 Controlador de velocidad electrónico.....	92
Ilustración 62 Motor sin escobillas CC	93
Ilustración 63 ESC para motores brushless	94
Ilustración 64 Servomotor	96
Ilustración 65 Motor máximo.....	97
Ilustración 66 Baterías.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Matriz de criterios y variables de diseño del prototipo RC	18
Tabla 2 Matriz de decisión para selección del sistema de ruedas.....	22
Tabla 3 Matriz de decisión para selección del sistema de suspensión.....	24
Tabla 4 Matriz de decisión para la selección del bastidor estructural	26
Tabla 5 Matriz de decisión para selección del sistema de dirección	28
Tabla 6 Resumen de parámetros técnicos del sistema de propulsión y transmisión del prototipo RC.....	33
Tabla 7 Matriz de decisión para selección del diseño orientado a manufactura aditiva.....	35
Tabla 8 Matriz de decisión para configuración de ensamblaje del prototipo	38
Tabla 9 Valores de velocidad calculada.....	47
Tabla 10 Resultados de pruebas realizadas	48
Tabla 11 Criterios evaluados durante el diseño	54
Tabla 12 Criterios evaluados para la suspensión	58
Tabla 13 Criterios evaluados para el chasis.....	65
Tabla 14 Funciones técnicas de los elementos del sistema de radio	90
Tabla 15 Lista de materiales y herramientas	98
Tabla 16 Parámetros generales de impresión utilizados	100
Tabla 17 Componentes electrónicos y ubicación	102
Tabla 18 Ensayos funcionales realizados	103

1. INTRODUCCIÓN

La finalidad de este proyecto es desarrollar y validar un prototipo didáctico de vehículo a control remoto (RC) para ser usado como herramienta educativa en la carrera de ingeniería automotriz, enfocado en conceptos de manufactura aditiva, diseño mecánico y sistemas de transmisión y suspensión. Para asegurar que el diseño sea operativo y reproducible en contextos académicos, se usaron herramientas de diseño CAD, CAE y tecnología de impresión 3D.

La metodología incluye la revisión bibliográfica de normativas técnicas, el modelado y la simulación estructural, el análisis de soluciones y la fabricación a través de impresión tridimensional. También se documentó meticulosamente cada etapa del proceso para garantizar que el proyecto sea replicable y adaptable a prácticas académicas, siendo una plataforma útil para la investigación de vehículos a escala.

La combinación de todos estos factores logra que este prototipo también sirva para promover el aprendizaje activo y la experimentación. De esta manera, los alumnos podrán entender cómo interactúan los diferentes subsistemas de un vehículo, reforzando la conexión entre la teoría y la práctica, ofreciendo una perspectiva accesible y económica que sea replicable en diferentes contextos educativos.

2. PROBLEMA

2.1. Antecedentes

El campo de la ingeniería automotriz y sus aplicaciones en la formación académica requieren herramientas didácticas que faciliten la comprensión de conceptos complejos como la dinámica vehicular, el diseño mecánico y la integración de subsistemas. Sin embargo, los vehículos a control remoto (RC) disponibles comercialmente, aunque populares en el mercado de entretenimiento y competencia, no cumplen con los requisitos educativos debido a su alto costo, diseño complicado y la falta de documentación técnica adecuada. Esto limita su aplicabilidad en ambientes académicos, donde se busca una integración de la teoría con la práctica.

2.2. Importancia y Alcances

El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar un prototipo de vehículo RC accesible, fácil de replicar y adecuado para laboratorios universitarios, especialmente en la carrera de Ingeniería Automotriz. La creación de este prototipo permitirá a los estudiantes trabajar con un modelo funcional que sirva para estudiar los principios fundamentales del diseño mecánico, la integración de subsistemas y la manufactura aditiva. Además, este proyecto contribuirá a mejorar la comprensión de la dinámica vehicular a través de un enfoque práctico y con un costo reducido, garantizando que sea viable para ser implementado en universidades con recursos limitados.

El prototipo debe cumplir con ciertos requisitos esenciales: ser robusto y funcional, con una construcción sencilla que permita su fácil replicación mediante impresión 3D. Además, debe ser lo suficientemente accesible para que su implementación en los laboratorios educativos sea posible, asegurando que cumpla con los estándares de costo y eficiencia.

2.3. Delimitación

Este proyecto se llevará a cabo en la Universidad Politécnica Salesiana, ubicada en la ciudad de Cuenca, Azuay, Ecuador. La ciudad se encuentra a una altitud de 2,500 metros sobre el nivel del mar, en una región con recursos técnicos limitados. A pesar de esto, el prototipo será diseñado para adaptarse a los entornos educativos locales, asegurando su viabilidad en distintos contextos.



Ilustración 1 Ubicación de la UPS

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Desarrollar y validar un vehículo a control remoto (RC) mediante manufactura aditiva, para disponer de un prototipo funcional y reproducible como recurso didáctico en Ingeniería Automotriz.

3.2. Objetivos Específicos

- Identificar criterios y variables de diseño del prototipo RC mediante una revisión sistemática del marco de referencia bibliográfico y un análisis comparativo que sintetizen los parámetros base.
- Diseñar y construir el prototipo funcional utilizando herramientas de diseño asistido por computadora (CAD/CAE) y manufactura aditiva, garantizando su operatividad y precisión dimensional.
- Evaluar el desempeño del vehículo RC mediante pruebas experimentales que permitan verificar la interacción de sus sistemas y el cumplimiento de los parámetros de diseño establecidos.
- Documentar el proceso de diseño, construcción y validación a través de un manual técnico que incluya pautas, recomendaciones y formatos para su replicación en futuras prácticas académicas.

4. DESARROLLO

En este capítulo se presenta el desarrollo metodológico y experimental del proyecto, organizado en función de los objetivos específicos planteados en la investigación. En particular, se aborda de forma secuencial:

- La identificación de criterios y variables de diseño (Objetivo Específico 1)
- El diseño y construcción del prototipo mediante herramientas CAD/CAE y manufactura aditiva (Objetivo Específico 2)
- La evaluación experimental de su desempeño funcional y dinámico (Objetivo Específico 3)
- La elaboración de la documentación técnica necesaria para garantizar su replicabilidad en contextos académicos (Objetivo Específico 4).

El alcance del desarrollo técnico comprende desde el análisis conceptual de los subsistemas que conforman el vehículo RC hasta la fabricación física de sus componentes, su ensamblaje funcional y la ejecución de pruebas experimentales orientadas a verificar su operatividad, precisión dimensional, estabilidad estructural e interacción entre subsistemas mecánicos y electrónicos. Este proceso se orienta a la obtención de un prototipo funcional y reproducible que pueda emplearse como herramienta didáctica en asignaturas vinculadas con diseño mecánico, dinámica vehicular, manufactura aditiva y sistemas mecatrónicos.

La metodología general del proyecto se estructura en cuatro etapas principales. En primer lugar, se realiza una revisión bibliográfica sistemática y un análisis comparativo de soluciones existentes con el propósito de definir los parámetros base de diseño del prototipo. Posteriormente, se desarrolla el modelado CAD y la validación preliminar mediante simulaciones CAE, seguido de la fabricación de los componentes a través de manufactura aditiva y el ensamblaje del sistema completo. A continuación, se ejecutan pruebas experimentales controladas para evaluar la funcionalidad del prototipo. Por último, se registra todo el proceso a través de la creación de un manual técnico que posibilite que pueda ser reproducido en prácticas académicas posteriores.

La manufactura aditiva se basa en su habilidad para simplificar la creación de prototipos rápidos, el perfeccionamiento de los diseños y la producción de geometrías intrincadas a un bajo costo y con una accesibilidad tecnológica elevada, sobre todo en contextos universitarios. Además, el empleo de un vehículo RC como plataforma experimental posibilita la representación simplificada de fenómenos relacionados con la dinámica de los vehículos y los

sistemas automotrices, manteniendo condiciones controladas en términos de seguridad y eficacia en el uso de recursos. Por lo tanto, la combinación de manufactura aditiva y prototipado RC es una táctica apropiada para el desarrollo de un prototipo didáctico que sea funcional, replicable y que esté en línea con los objetivos formativos del proyecto.

4.1. Identificación de criterios y variables de diseño del prototipo RC

4.1.1. Propósito y alcance del análisis de diseño

En esta parte se expone el primer objetivo específico, que tiene como propósito determinar y definir las variables de diseño y los criterios técnicos que son fundamentales para la creación del prototipo didáctico de un vehículo RC. Este estudio posibilita la definición de los parámetros esenciales que orientan las decisiones relacionadas con el diseño mecánico, estructural y funcional, asegurando la coherencia entre los requisitos normativos, los propósitos educativos del proyecto y las habilidades del procedimiento de manufactura aditiva.

Antes de comenzar con el modelado CAD y los análisis CAE, es fundamental definir estos criterios porque posibilita la disminución de iteraciones innecesarias, la optimización del uso de recursos y la garantía de que las soluciones geométricas propuestas concuerden con los requerimientos funcionales del sistema. Esta fase también ayuda a reducir los peligros relacionados con las incompatibilidades de los componentes, las restricciones geométricas del procedimiento de impresión y las carencias estructurales del prototipo.

El análisis se propone bajo un punto de vista pedagógico y reproducible, teniendo en cuenta que el prototipo no solo tiene que ser funcional, sino también replicable en entornos académicos.

Por lo tanto, se da prioridad a principios relacionados con la sencillez de la construcción, el modularidad en el diseño y el empleo de componentes comerciales estandarizados, para que los alumnos puedan montar, modificar y evaluar el sistema en próximas prácticas de laboratorio.

4.1.2. Metodología de revisión normativa y bibliográfica

La identificación de los criterios y variables de diseño se realizó mediante una revisión bibliográfica sistematizada y un análisis comparativo de normativas técnicas y reglamentos especializados, bajo un enfoque descriptivo–analítico. La búsqueda de información se efectuó en bases de datos científicas reconocidas en el ámbito de la ingeniería y la tecnología, tales como Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect y Google Scholar, recopilando artículos científicos, tesis universitarias y reportes técnicos relacionados con plataformas RC, prototipos didácticos y manufactura aditiva.

De manera complementaria, se analizaron reglamentos técnicos aplicables a vehículos RC con fines académicos y deportivos, así como normas internacionales asociadas al diseño mecánico y a la manufactura aditiva. Entre las principales fuentes normativas consideradas se encuentran los reglamentos F1TENTH, ROAR, EFRA e IFMAR, junto con los estándares ISO/ASTM y IEC relacionados con fabricación aditiva, tolerancias dimensionales e integridad de sistemas energéticos (F1TENTH Autonomous Racing Community, s. f.; EFRA, 2025; IFMAR, s. f.; ROAR, s. f.; ISO/ASTM, 2013, 2018, 2021; ISO, 1989; IEC, 2017).

Los criterios de inclusión contemplaron estudios vinculados con: (i) prototipos RC funcionales, (ii) plataformas móviles con fines didácticos, (iii) aplicaciones de manufactura aditiva en sistemas mecánicos móviles y (iv) diseños modulares orientados a la reproducibilidad académica. Por el contrario, se excluyeron proyectos comerciales sin documentación técnica disponible y aquellos que no incluyeran validación funcional o experimental.

El periodo de publicación considerado se concentró principalmente en trabajos difundidos durante los últimos diez años, con el fin de asegurar la vigencia tecnológica de los materiales, procesos de diseño y métodos de fabricación analizados. No obstante, se incorporaron normas técnicas consolidadas cuando resultaron fundamentales para la definición de parámetros de ingeniería.

4.1.3. Selección del reglamento base de referencia

Considerando la naturaleza académica y didáctica del prototipo, se seleccionó el reglamento FITENTH como norma principal de referencia para la extracción de los requisitos de diseño. Este reglamento ha sido concebido específicamente para plataformas de investigación y enseñanza, estableciendo restricciones técnicas orientadas a garantizar condiciones mínimas de seguridad, desempeño funcional y estandarización sin imponer niveles de exigencia propios de competiciones profesionales de alto rendimiento (FITENTH Autonomous Racing Community, s. f.).

Asimismo, la adopción de FITENTH como marco normativo base permite la comparación de resultados con experiencias previas reportadas por universidades y centros de investigación, además de facilitar la utilización de metodologías de validación ya consolidadas en entornos académicos.

De manera complementaria, los reglamentos emitidos por ROAR, EFRA e IFMAR fueron considerados como referencias secundarias, principalmente para contrastar rangos de dimensiones, masas y configuraciones estructurales en vehículos RC de competición, así como para identificar buenas prácticas de diseño aplicables al prototipo (EFRA, 2025; IFMAR, s. f.; ROAR, s. f.). Sin embargo, estas normativas no se adoptaron como requisitos obligatorios debido a que su nivel de especialización excede los objetivos formativos del proyecto.

4.1.4. Requisitos dimensionales, mecánicos y funcionales

A partir del reglamento base seleccionado se extrajeron los principales requisitos dimensionales aplicables al prototipo. En particular, se adoptó la escala 1/10, característica de plataformas RC académicas, definiendo rangos dimensionales de referencia para la longitud total, el ancho y la altura del vehículo, lo cual delimitó la envolvente geométrica disponible para la integración de los subsistemas principales (FITENTH Autonomous Racing Community).

Asimismo, se identificaron restricciones asociadas a parámetros geométricos críticos, tales como la altura mínima al suelo, la posición relativa de la carrocería, la altura del centro de masas y el ancho de vía, con el propósito de garantizar condiciones adecuadas de estabilidad direccional y reducir el riesgo de vuelco durante maniobras de giro.

Desde el punto de vista mecánico y estructural, se estableció que el chasis y los componentes portantes debían ser capaces de soportar cargas dinámicas generadas por aceleraciones longitudinales y laterales, así como esfuerzos derivados de impactos con irregularidades del

terreno, sin exceder los límites admisibles de deformación ni comprometer la integridad estructural del conjunto.

En cuanto a los requisitos funcionales y operativos, los reglamentos analizados establecen restricciones relacionadas con el tipo de motor, la tensión y capacidad de la batería, el sistema de control electrónico, el rango de velocidades alcanzables, el radio mínimo de giro y la capacidad de frenado (F1TENTH Autonomous Racing Community, s. f.; EFRA, 2025). Estos lineamientos se tradujeron en metas funcionales orientadas a garantizar un comportamiento estable, seguro y representativo de los fenómenos básicos de la dinámica vehicular en un entorno de laboratorio.

4.1.5. Normativa asociada a la manufactura aditiva

Dado que la manufactura aditiva constituye el eje tecnológico central del proyecto, se incorporaron normas ISO/ASTM como referencia para asegurar la coherencia entre el diseño del prototipo y las capacidades reales del proceso productivo seleccionado. La norma ISO/ASTM 52900:2021 proporcionó el marco conceptual y la clasificación estandarizada de los principales procesos de fabricación aditiva, facilitando la selección del proceso y del material adecuado para los componentes estructurales y auxiliares del vehículo (ISO/ASTM, 2021).

Por su parte, la norma ISO/ASTM 52910:2018 estableció recomendaciones de diseño orientadas a maximizar la resistencia mecánica y la precisión dimensional de piezas impresas, considerando factores como la orientación de fabricación, los espesores mínimos y las estrategias de soporte (ISO/ASTM, 2018). Asimismo, la norma ISO/ASTM 52921:2013 normalizó los sistemas de coordenadas y las metodologías de ensayo en piezas producidas mediante manufactura aditiva, permitiendo expresar de manera coherente los resultados de simulaciones y mediciones dimensionales (ISO/ASTM, 2013).

Adicionalmente, la norma ISO 2768-1:1989 fue utilizada como referencia para la definición de tolerancias generales en componentes mecánicos sin tolerancias individuales especificadas, lo que resultó relevante para garantizar el correcto ensamblaje de piezas impresas con componentes comerciales estándar (ISO, 1989). En lo relativo a la seguridad energética, la norma IEC 62133-2:2017 fue considerada para la selección y protección de baterías recargables empleadas en aplicaciones móviles (IEC, 2017).

4.1.6. Síntesis de criterios y variables de diseño

Como resultado de la revisión normativa y bibliográfica realizada, se identificaron los criterios técnicos y las variables de diseño fundamentales para el desarrollo del prototipo de vehículo RC. Dichos criterios se agrupan en cuatro categorías principales: (i) criterios dimensionales y geométricos, (ii) criterios mecánicos y estructurales, (iii) criterios funcionales y operativos y (iv) criterios asociados a la manufactura aditiva.

Estos parámetros fueron organizados en una matriz de criterios y variables de diseño, en la cual se registró para cada requerimiento su fuente normativa, el parámetro de diseño afectado y el criterio de evaluación correspondiente. Esta matriz constituye la base técnica para el modelado CAD del prototipo y para las posteriores etapas de simulación, fabricación y validación experimental, asegurando coherencia entre los objetivos del proyecto, las restricciones normativas y la reproducibilidad académica del sistema desarrollado.

Tabla 1 Matriz de criterios y variables de diseño del prototipo RC

Categoría	Criterio	Variable principal	Indicador
Dimensional	Escala del vehículo	Dimensiones globales	Cumple rango 1/10
Mecánico	Resistencia estructural	Espesor del chasis	No deformación permanente
Funcional	Velocidad	Relación de transmisión	Operación segura
Funcional	Autonomía	Capacidad de batería	≥ tiempo de práctica
Manufactura aditiva	Fabricabilidad	Espesores y voladizos	Compatible con impresión 3D
Manufactura aditiva	Tolerancias	Ajuste de piezas	Ensamble correcto
Seguridad	Sistema energético	Tipo de batería	Cumple condiciones de seguridad

Nota: La información contenida en la tabla permite observar las principales características para proceder con el diseño del prototipo.

4.1.7. Síntesis del Objetivo Específico 1

Como resultado del análisis desarrollado en las secciones anteriores, se identificaron los criterios técnicos y las variables de diseño necesarios para el desarrollo del prototipo de vehículo RC. Dichos criterios permiten establecer los parámetros fundamentales que orientan el diseño geométrico, estructural, funcional y productivo del sistema.

Las variables obtenidas fueron organizadas en una matriz de diseño que relaciona cada criterio con los parámetros técnicos correspondientes, constituyendo una base objetiva para el modelado CAD del prototipo. Esta síntesis asegura la coherencia entre los objetivos del proyecto, las restricciones técnicas identificadas y la reproducibilidad académica del sistema propuesto.

En consecuencia, el cumplimiento del Objetivo Específico 1 permite disponer de un marco técnico claro para el desarrollo del diseño del prototipo, el cual se aborda en el apartado correspondiente al Objetivo Específico 2.

4.2. Diseño del prototipo RC mediante modelado CAD

4.2.1. Propósito y alcance del diseño

En esta sección se desarrolla el Objetivo Específico 2, orientado a realizar el diseño del prototipo didáctico de vehículo RC mediante modelado CAD, tomando como parámetros de entrada los criterios y variables definidos en el Objetivo Específico 1. En consecuencia, el propósito del diseño es transformar los requisitos dimensionales, mecánicos, funcionales y de manufactura aditiva previamente identificados en una configuración geométrica coherente del prototipo, apta para su fabricación y ensamblaje.

El alcance del diseño comprende la definición de la arquitectura general del vehículo y la distribución de subsistemas, así como el desarrollo geométrico de los componentes principales del prototipo, con énfasis en el bastidor (chasis) y sus interfaces de integración. Asimismo, el diseño considera la incorporación de criterios de diseño para manufactura aditiva (DfAM), garantizando que las piezas propuestas sean fabricables mediante impresión 3D, con geometrías compatibles con las limitaciones del proceso, tolerancias de ensamble y modularidad para facilitar su replicabilidad en entornos académicos.

De manera complementaria, el diseño se orienta a asegurar la compatibilidad con componentes comerciales estandarizados y a permitir el montaje funcional de los sistemas de rodaje, dirección, propulsión y almacenamiento de energía, sin definir aún el desempeño final del prototipo, el cual será verificado en el Objetivo Específico 3 mediante pruebas experimentales.

En síntesis, el resultado esperado de este apartado es la obtención de un conjunto completo de modelos CAD del prototipo y de sus componentes principales, los cuales servirán como base para la etapa de manufactura, ensamblaje y validación posterior.

4.2.2. Metodología de modelado CAD del prototipo

El desarrollo del diseño del prototipo se realizó mediante un proceso sistemático de modelado CAD, tomando como parámetros de entrada los criterios y variables definidos en la matriz de diseño correspondiente al Objetivo Específico 1. Esta metodología permitió transformar los requisitos normativos, dimensionales, mecánicos y funcionales en una configuración

geométrica coherente del prototipo, garantizando su compatibilidad con la manufactura aditiva y con el ensamblaje de componentes comerciales estándar.

El proceso de modelado se estructuró en cuatro etapas principales. En la primera etapa se definió la arquitectura general del vehículo, estableciendo la distribución espacial de los subsistemas principales: bastidor estructural, sistema de suspensión, sistema de dirección, sistema de propulsión, almacenamiento de energía y electrónica de control. Esta configuración inicial se basó en la envolvente geométrica y en las restricciones dimensionales identificadas previamente, asegurando la adecuada integración de todos los componentes dentro del volumen disponible.

En la segunda etapa se desarrolló el modelado paramétrico de los componentes principales del prototipo, con énfasis en el bastidor (chasis) y sus interfaces de montaje. Para ello, se emplearon operaciones geométricas básicas tales como extrusiones, revoluciones, barridos y operaciones booleanas, incorporando variables de diseño asociadas a espesores, radios de transición, puntos de anclaje y tolerancias de ensamblaje. Este enfoque paramétrico permitió ajustar el diseño de forma controlada ante eventuales modificaciones de los criterios establecidos en la matriz de diseño.

La tercera etapa correspondió a la verificación geométrica y funcional del ensamblaje virtual del prototipo. En esta fase se realizaron comprobaciones de interferencias entre componentes, alineación de ejes, compatibilidad de uniones atornilladas y correcta ubicación de los subsistemas mecánicos y eléctricos. Estas verificaciones permitieron identificar posibles conflictos geométricos antes de la fabricación física, reduciendo iteraciones posteriores y asegurando la coherencia del conjunto.

Finalmente, en la cuarta etapa se incorporaron criterios de diseño orientados a la manufactura aditiva (DfAM), considerando aspectos como la división del modelo en piezas fabricables por separado, la orientación de impresión, la definición de espesores mínimos, la reducción de voladizos críticos y la inclusión de superficies de apoyo para el ensamblaje. Asimismo, se establecieron tolerancias generales compatibles con la impresión 3D y con la integración de componentes comerciales, con el fin de facilitar el proceso de fabricación y montaje del prototipo.

Como resultado de esta metodología, se obtuvo un conjunto completo de modelos CAD del prototipo y de sus componentes principales, los cuales constituyen la base técnica para la etapa de manufactura, ensamblaje y validación experimental desarrollada en el Objetivo Específico

3. Este procedimiento garantiza la trazabilidad entre los criterios definidos en el Objetivo Específico 1 y las decisiones geométricas adoptadas en el diseño del prototipo.

4.2.3. Configuración general y arquitectura del prototipo RC

La configuración general del prototipo se definió a partir de los criterios y variables establecidos en el Objetivo Específico 1, con el propósito de garantizar una arquitectura funcional, estable y compatible con la manufactura aditiva. La arquitectura del vehículo se concibió como un sistema modular, compuesto por un bastidor estructural central sobre el cual se integran los subsistemas principales: sistema de suspensión, sistema de dirección, sistema de propulsión, sistema de almacenamiento de energía y sistema de control electrónico.

El bastidor estructural constituye el elemento portante del conjunto y cumple la función de soporte mecánico para los demás subsistemas. Su geometría se diseñó de manera que permita una distribución equilibrada de masas y una adecuada rigidez estructural, considerando las restricciones dimensionales y mecánicas previamente definidas. Asimismo, se incorporaron puntos de anclaje normalizados para facilitar el montaje y desmontaje de los componentes, reforzando el carácter didáctico y replicable del prototipo.

En cuanto a la disposición espacial de los subsistemas, el sistema de propulsión se ubicó en una posición que favorece la transmisión directa del movimiento hacia el tren de rodaje, mientras que el sistema de almacenamiento de energía se colocó en una zona central y baja del bastidor con el fin de reducir la altura del centro de masas y mejorar la estabilidad lateral del vehículo. La electrónica de control se integró en un compartimento protegido, asegurando accesibilidad para tareas de mantenimiento y experimentación académica.

La configuración general también consideró la separación funcional entre los subsistemas mecánicos y eléctricos, con el objetivo de minimizar interferencias durante el ensamblaje y la operación del prototipo. Esta organización facilita la identificación individual de cada sistema durante las prácticas académicas, permitiendo su análisis independiente sin comprometer la integridad del conjunto.

Desde el punto de vista de la manufactura aditiva, la arquitectura del prototipo se estructuró en módulos imprimibles por separado, lo que posibilita la fabricación independiente de cada componente, la sustitución de piezas dañadas y la modificación parcial del diseño sin necesidad de rehacer el conjunto completo. Esta estrategia modular contribuye a la reducción de costos de fabricación y al fortalecimiento del enfoque educativo del prototipo.

En síntesis, la configuración general del prototipo RC responde a una arquitectura funcional y modular, orientada a cumplir los criterios dimensionales, mecánicos y operativos definidos previamente, y a servir como base para el desarrollo detallado de cada subsistema en las secciones siguientes.

4.2.4. Selección del sistema de ruedas y neumáticos

4.2.4.1. Criterios de selección

La selección del sistema de ruedas y neumáticos se realizó considerando los criterios definidos en el Objetivo Específico 1, particularmente aquellos relacionados con estabilidad geométrica, compatibilidad dimensional, disponibilidad comercial y comportamiento dinámico. Dado que el prototipo tiene fines didácticos, se priorizó un equilibrio entre desempeño mecánico, facilidad de reemplazo y reproducibilidad académica.

Los criterios técnicos establecidos fueron:

- Compatibilidad con escala 1/10 (C1): asegura coherencia con reglamentos RC académicos.
- Diámetro efectivo de rodadura (C2): influye en la altura del chasis y la relación de transmisión.
- Ancho del neumático (C3): determina la estabilidad lateral y el contacto con el suelo.
- Disponibilidad comercial (C4): facilita reposición y uso académico continuo.
- Comportamiento en superficies lisas (C5): relevante para pruebas en laboratorio.

4.2.4.2. Alternativas evaluadas

Se consideraron tres configuraciones generales:

- **A1:** Ruedas pequeñas tipo on-road RC
- **A2:** Ruedas intermedias tipo touring RC
- **A3:** Ruedas grandes tipo off-road RC

4.2.4.3. Matriz de ponderación para selección de ruedas

Tabla 2 Matriz de decisión para selección del sistema de ruedas

Criterio	Peso	A1	A2	A3
C1 Escala 1/10	0.25	4	5	3
C2 Diámetro adecuado	0.20	3	5	4

C3 Ancho y estabilidad	0.20	3	4	5
C4 Disponibilidad	0.20	4	5	3
C5 Uso en laboratorio	0.15	5	5	2
Total ponderado	1.00	3.65	4.80	3.45

Nota: Ponderación del sistema de ruedas para su selección.

4.2.4.4. Justificación técnica de la selección

De acuerdo con la matriz de decisión, la alternativa A2 (ruedas tipo touring RC de escala 1/10) obtuvo el mayor puntaje ponderado. Esta configuración presenta un equilibrio favorable entre diámetro efectivo de rodadura, estabilidad lateral y disponibilidad comercial, lo que permite su integración directa con el sistema de suspensión y con el bastidor estructural.

Desde el punto de vista dinámico, un diámetro intermedio permite mantener una altura adecuada del chasis sin comprometer la estabilidad lateral. Asimismo, el ancho moderado del neumático favorece un contacto uniforme con la superficie de ensayo, lo cual resulta adecuado para circuitos de laboratorio con superficies lisas.

En términos académicos, la amplia disponibilidad de este tipo de ruedas facilita su reemplazo, su comparación con otras configuraciones y su utilización en prácticas experimentales posteriores, cumpliendo con el criterio de reproducibilidad definido en el Objetivo Específico 1.

4.2.5. Selección técnica y criterios de diseño del sistema de suspensión

4.2.5.1. Criterios técnicos de diseño

El sistema de suspensión fue definido considerando su función principal: mantener el contacto permanente entre las ruedas y la superficie de rodadura, garantizando estabilidad lateral y control direccional. Los criterios de selección se derivaron de los requerimientos geométricos y funcionales establecidos previamente:

- C1 Estabilidad lateral (camber y caster controlados)
- C2 Simplicidad constructiva (manufactura aditiva)
- C3 Facilidad de análisis cinemático
- C4 Modularidad y mantenimiento
- C5 Valor didáctico del mecanismo

4.2.5.2. Alternativas evaluadas

- A1: Suspensión rígida
- A2: Suspensión tipo McPherson simplificada
- A3: Suspensión de doble brazo (double wishbone)

4.2.5.3. Matriz de ponderación para selección de suspensión

Tabla 3 Matriz de decisión para selección del sistema de suspensión

Criterio	Peso	A1	A2	A3
C1 Estabilidad	0.30	2	4	5
C2 Fabricabilidad	0.20	5	4	3
C3 Análisis cinemático	0.15	2	4	5
C4 Modularidad	0.15	3	4	5
C5 Valor didáctico	0.20	2	4	5
Total ponderado	1.00	2.70	4.00	4.70

Nota: Ponderación para la selección de la suspensión

4.2.5.4. Justificación técnica de la selección

La alternativa A3, suspensión independiente de doble brazo, obtuvo el mayor puntaje ponderado, lo que evidencia su superioridad técnica frente a las otras configuraciones evaluadas. Este sistema permite controlar de forma precisa los ángulos de alineación de la rueda, particularmente el ángulo de caída (camber) y el ángulo de avance (caster), los cuales influyen directamente en la estabilidad lateral y en el comportamiento direccional del vehículo.

Desde el punto de vista cinemático, la suspensión de doble brazo facilita el análisis del recorrido vertical de la rueda y la identificación de variaciones geométricas durante el movimiento, lo cual resulta especialmente adecuado para fines didácticos. Además, su configuración modular permite la fabricación individual de los brazos mediante manufactura aditiva, simplificando el reemplazo de componentes y la realización de modificaciones experimentales.

Finalmente, la adopción de este sistema proporciona una base geométrica clara para la definición de los puntos de anclaje al bastidor estructural, permitiendo que el diseño del chasis se desarrolle de manera coherente con la cinemática del sistema de rodaje.

4.2.6. Selección y diseño técnico del bastidor estructural

4.2.6.1. Criterios técnicos para el diseño del bastidor

El bastidor estructural constituye el elemento portante del prototipo y cumple la función de integrar los subsistemas definidos previamente (ruedas, suspensión, dirección, tracción y

sistema eléctrico). Su diseño se realizó a partir de los parámetros geométricos obtenidos en las secciones anteriores, particularmente aquellos asociados al sistema de ruedas y a la cinemática de la suspensión, garantizando coherencia entre la estructura y el movimiento del conjunto.

Los criterios técnicos considerados para la selección del tipo de bastidor se derivaron del Objetivo Específico 1 y se agrupan en los siguientes aspectos:

- C1 Rigidez estructural: capacidad del bastidor para resistir cargas dinámicas generadas por aceleración, frenado y maniobras de giro sin deformaciones permanentes.
- C2 Compatibilidad geométrica con la suspensión: facilidad para integrar los puntos de anclaje del sistema de suspensión sin comprometer la cinemática definida.
- C3 Fabricabilidad mediante manufactura aditiva: viabilidad de fabricación por impresión 3D considerando geometrías, espesores y volúmenes.
- C4 Modularidad y mantenimiento: posibilidad de desmontaje, sustitución de piezas y adaptación a prácticas académicas.
- C5 Peso estructural: influencia del bastidor sobre la masa total del prototipo y su estabilidad dinámica.
- C6 Valor didáctico: claridad para el análisis estructural y comprensión del sistema por parte de estudiantes.

4.2.6.2. Alternativas estructurales evaluadas

Se consideraron tres configuraciones estructurales generales para el bastidor:

- A1: Bastidor tipo placa plana (plate chassis).
- A2: Bastidor tipo marco abierto (frame chassis).
- A3: Bastidor tipo monocasco modular impreso en 3D.

Estas alternativas representan soluciones comúnmente utilizadas en plataformas RC y prototipos didácticos, con distintos niveles de complejidad estructural y compatibilidad con manufactura aditiva.

4.2.6.3 Matriz de ponderación para la selección del bastidor

Tabla 4

Matriz de decisión para la selección del bastidor estructural

Tabla 4 Matriz de decisión para la selección del bastidor estructural

Criterio	Peso	A1 Placa plana	A2 Marco abierto	A3 Monocasco modular
C1 Rigidez estructural	0.25	3	4	5
C2 Compatibilidad con suspensión	0.20	3	4	5
C3 Fabricabilidad (impresión 3D)	0.15	4	3	4
C4 Modularidad y mantenimiento	0.15	3	4	5
C5 Peso estructural	0.15	4	3	4
C6 Valor didáctico	0.10	3	4	5
Total ponderado	1.00	3.30	3.80	4.70

Nota: Decisión del tipo de bastidor en base a la ponderación realizada.

4.2.6.4. Justificación técnica de la selección

De acuerdo con los resultados obtenidos en la matriz de ponderación, la alternativa A3 (bastidor tipo monocasco modular impreso en 3D) presentó el mayor puntaje total, evidenciando su superioridad técnica frente a las otras configuraciones evaluadas.

Desde el punto de vista estructural, esta configuración permite distribuir de manera más uniforme los esfuerzos generados durante la operación del vehículo, incorporando secciones cerradas y refuerzos localizados en las zonas de anclaje de la suspensión. Ello contribuye a incrementar la rigidez global del sistema sin un incremento significativo de masa.

En términos geométricos, el bastidor monocasco facilita la integración precisa de los puntos de anclaje definidos previamente para el sistema de suspensión, asegurando coherencia entre la cinemática del tren de rodaje y la estructura portante. Esta característica resulta fundamental para mantener la estabilidad lateral y el correcto alineamiento de las ruedas durante el movimiento.

Respecto a la manufactura aditiva, la configuración modular del bastidor permite dividir la estructura en piezas fabricables por separado, compatibles con los volúmenes de impresión disponibles y con las limitaciones geométricas del proceso. Además, esta estrategia favorece la sustitución de componentes dañados y la modificación parcial del diseño sin necesidad de rehacer la estructura completa.

Desde el enfoque didáctico, el bastidor modular impreso en 3D ofrece ventajas significativas, ya que permite visualizar claramente la función estructural de cada componente, analizar esfuerzos, modificar geometrías y evaluar distintas configuraciones en actividades académicas, fortaleciendo su uso como herramienta de enseñanza en asignaturas de diseño mecánico y sistemas vehiculares.

En consecuencia, la selección del bastidor tipo monocasco modular garantiza coherencia con los criterios definidos en el Objetivo Específico 1, compatibilidad con el sistema de suspensión seleccionado en el Objetivo Específico 2 y viabilidad de fabricación mediante manufactura aditiva, constituyendo una base estructural adecuada para la integración de los subsistemas restantes del prototipo.

4.2.7. Selección técnica y diseño del sistema de dirección

4.2.7.1. Criterios técnicos para la selección del sistema de dirección

El sistema de dirección se definió como un subsistema crítico para garantizar la maniobrabilidad del prototipo y la estabilidad direccional durante la operación en circuitos controlados. Su selección se realizó considerando la arquitectura del tren delantero, la cinemática de la suspensión previamente definida y los requerimientos funcionales establecidos en el Objetivo Específico 1, especialmente aquellos asociados a radio mínimo de giro, respuesta de dirección y estabilidad lateral.

Con el fin de asegurar coherencia entre cinemática, fabricabilidad y valor didáctico, se establecieron los siguientes criterios técnicos de evaluación:

- C1 Precisión direccional: capacidad para producir un ángulo de giro controlado y repetible, con mínima holgura en el mecanismo.
- C2 Compatibilidad con la suspensión: integración del mecanismo sin interferir con el recorrido, anclajes y geometría del tren delantero.
- C3 Radio de giro y maniobrabilidad: aptitud para operar en pistas/circuitos reducidos manteniendo control direccional.
- C4 Fabricabilidad mediante manufactura aditiva: viabilidad de fabricar componentes del mecanismo (brazos, soportes, manguetas/portamanguetas) en impresión 3D, reduciendo complejidad.

- C5 Robustez y resistencia al desgaste: capacidad para soportar cargas laterales y vibraciones sin pérdida rápida de precisión.
- C6 Facilidad de ajuste y valor didáctico: posibilidad de visualizar, calibrar y analizar el sistema en prácticas académicas (alineación, convergencia, geometría básica).

4.2.7.2. Alternativas evaluadas

Se evaluaron tres alternativas de dirección habituales en plataformas RC y prototipos didácticos:

- A1: Dirección simple tipo “palanca directa” (servo conectado directamente a una mangueta).
- A2: Dirección por barras (tie-rods) con geometría tipo Ackermann simplificada.
- A3: Dirección por barras con geometría ajustable (Ackermann ajustable y posibilidad de ajuste de convergencia/toe).

Nota metodológica: estas alternativas se entienden como configuraciones geométricas del mecanismo, no como selección de componentes comerciales específicos.

4.2.7.3. Matriz de ponderación para selección del sistema de dirección

Tabla 5 Matriz de decisión para selección del sistema de dirección

Criterio	Peso	A1 Palanca directa	A2 Ackermann simplificada	A3 Ackermann ajustable
C1 Precisión direccional	0.20	2	4	5
C2 Compatibilidad con suspensión	0.20	3	4	4
C3 Maniobrabilidad (radio de giro)	0.15	3	4	5
C4 Fabricabilidad (impresión 3D)	0.15	4	4	3
C5 Robustez	0.15	3	4	4
C6 Ajuste y valor didáctico	0.15	2	4	5
Total ponderado	1.00	2.85	4.00	4.45

Nota: Tipo de dirección seleccionada en base a la ponderación realizada.

4.2.7.4. Justificación técnica de la selección

Con base en los resultados de la matriz de decisión, la alternativa A3 (dirección por barras con geometría Ackermann ajustable) obtuvo el mayor puntaje ponderado. Esta selección se justifica debido a que permite un control más preciso del ángulo de giro en cada rueda, mejora la maniobrabilidad del prototipo en circuitos reducidos y aporta un mayor valor didáctico, al habilitar el análisis y ajuste de variables geométricas fundamentales del sistema de dirección.

Desde el punto de vista cinemático, una configuración Ackermann reduce discrepancias en la trayectoria de las ruedas durante el giro, favoreciendo un comportamiento más estable y

predecible. La posibilidad de ajustes (por ejemplo, convergencia/toe) permite además calibrar el prototipo según el tipo de superficie de ensayo y el comportamiento buscado en pruebas controladas.

En términos de integración CAD, esta alternativa facilita la definición explícita de:

- ubicación del servo y su soporte estructural,
- longitud y disposición de barras de dirección,
- puntos de articulación en manguetas/portamanguetas,
- interferencias con suspensión durante el recorrido.

Finalmente, aunque el mecanismo ajustable puede incrementar levemente la complejidad geométrica, su implementación modular mediante manufactura aditiva permite fabricar soportes, brazos y manguetas con tolerancias de ensamble controladas, manteniendo la replicabilidad académica del prototipo.

4.2.7.5. Parámetros geométricos definidos para el modelado CAD

Como resultado de la selección, el diseño CAD del sistema de dirección se desarrolló a partir de los siguientes parámetros geométricos (definidos como variables de diseño para el prototipo):

- Ángulo máximo de giro por rueda: definido según el radio mínimo de giro requerido.
- Ubicación y altura de la cremallera virtual / línea de barras: para minimizar variaciones geométricas durante el recorrido de suspensión.
- Longitud de barras de dirección: para garantizar simetría y reducir holguras.
- Puntos de articulación (ball joints o pivotes): ubicados para evitar interferencias y permitir montaje/desmontaje.
- Convergencia (toe) ajustable: para calibración del comportamiento direccional.

Estos parámetros se incorporaron en el ensamblaje virtual del prototipo, verificando interferencias con el sistema de suspensión y asegurando que el recorrido vertical de la rueda no genere bloqueos, colisiones geométricas o variaciones indeseadas de alineación.

4.2.8. Integración del sistema de propulsión y transmisión

La integración del sistema de propulsión y transmisión se desarrolló en correspondencia directa con los criterios funcionales definidos en el Objetivo Específico 1, particularmente aquellos relacionados con la operación segura del prototipo en entornos académicos, la maniobrabilidad, la reproducibilidad del diseño y la compatibilidad con manufactura aditiva. Asimismo, esta etapa se apoya en los parámetros geométricos previamente establecidos para el bastidor, el sistema de suspensión y el conjunto rueda–neumático.

Dado que el prototipo corresponde a una plataforma RC escala 1/10 con fines didácticos, se estableció como condición de diseño una velocidad objetivo moderada, adecuada para prácticas experimentales en laboratorio, junto con una masa estimada coherente con la arquitectura estructural definida en el modelo CAD. Bajo estas condiciones, el sistema de transmisión debía cumplir simultáneamente dos funciones principales: amplificar el torque entregado por el motor eléctrico y regular la velocidad angular de las ruedas para mantener un régimen de operación estable y controlable.

Para efectos del análisis, se adoptaron como parámetros de referencia un diámetro de rueda de 70 mm (radio de 0,035 m), una masa aproximada del prototipo de 3 kg y una velocidad objetivo del orden de 2 m/s, valores compatibles con plataformas RC educativas y con los criterios de seguridad establecidos para el entorno de laboratorio.

4.2.8.1. Definición de la relación de transmisión

El sistema de transmisión fue diseñado mediante dos etapas sucesivas de engranajes rectos, partiendo de un piñón conductor solidario al eje del motor eléctrico. La primera etapa se definió mediante un engrane conducido de 38 dientes acoplado a un piñón conductor de 9 dientes, obteniéndose una relación:

$$Rt_1 = \frac{38}{9} = 4,22 \quad (1)$$

La segunda etapa se estableció mediante un engrane conducido de 51 dientes acoplado a un engrane conductor de 20 dientes, resultando:

$$Rt_2 = \frac{51}{20} = 2,55 \quad (2)$$

La relación de transmisión total del sistema se calculó como:

$$Rt_{total} = Rt_1 * Rt_2 = 4,22 * 2,55 = 10,77 \quad (3)$$

Esta configuración permite amplificar el torque del motor eléctrico sin requerir engranajes de gran diámetro, lo que favorece la integración del sistema dentro del bastidor estructural y su fabricación mediante manufactura aditiva.

4.2.8.2. Justificación técnica de la relación de transmisión seleccionada

La adopción de una relación de transmisión total cercana a 10 no responde a un valor arbitrario, sino al cumplimiento conjunto de los criterios funcionales, geométricos y didácticos definidos previamente.

Desde el punto de vista funcional, una relación de transmisión de este orden permite reducir la velocidad angular en la rueda y aumentar el torque disponible, asegurando un desplazamiento estable del prototipo bajo condiciones controladas de laboratorio. Este compromiso resulta coherente con la velocidad objetivo establecida (aproximadamente 2 m/s), valor que permite observar fenómenos dinámicos relevantes sin comprometer la seguridad del entorno experimental.

Desde el punto de vista geométrico y constructivo, una relación de transmisión cercana a 10 puede implementarse de manera eficiente mediante dos etapas de engranajes rectos, evitando dimensiones excesivas en un único par de engranes y manteniendo compatibilidad con el espacio disponible en el bastidor. Asimismo, esta solución favorece la fabricación mediante impresión 3D, reduce la complejidad mecánica y mejora la replicabilidad académica del prototipo.

Desde el punto de vista didáctico, esta configuración permite analizar explícitamente la influencia de la relación de transmisión sobre el torque y la velocidad del vehículo, facilitando su uso como herramienta experimental en asignaturas relacionadas con diseño mecánico y dinámica vehicular.

4.2.8.3. Cálculo del torque transmitido a la rueda

El torque nominal del motor eléctrico, según datos proporcionados por el fabricante, es de 0,012 Nm. El torque teórico transmitido al eje de salida se calculó mediante:

$$T_{rueda} = T_{motor} * R_{total} \quad (4)$$

$$T_{rueda} = 0,012 * 10,77 = 0,129 \text{ Nm}$$

Considerando pérdidas mecánicas asociadas al contacto entre engranajes y a los apoyos en rodamientos, se adoptó una eficiencia global conservadora de $\eta = 0,8$. De este modo, el torque efectivo disponible en la rueda se estimó como:

$$T_{rueda,real} = 0,129 * 0,8 = 0,103 \text{ Nm} \quad (5)$$

Este valor constituye una referencia para el dimensionamiento estructural del sistema de transmisión y para la evaluación preliminar del desempeño dinámico del prototipo.

4.2.8.4. Fuerza de tracción y verificación mínima de desplazamiento

A partir del torque disponible en la rueda y del radio de esta, se calculó la fuerza de tracción:

$$F = \frac{T}{r} = \frac{0,103}{0,035} = 2,94 \text{ N} \quad (6)$$

Para verificar la viabilidad del movimiento, se estimó la resistencia al rodaje considerando un coeficiente típico para ruedas de goma sobre superficie lisa ($C_{rr} = 0,02$):

$$F_{rr} = mgC_{rr} = 3 * 9,81 * 0,02 = 0,588 \quad (7)$$

Dado que la fuerza de tracción disponible es significativamente mayor que la resistencia al rodaje ($2,94 \text{ N} > 0,59 \text{ N}$), se concluye que el sistema de transmisión seleccionado garantiza el desplazamiento estable del prototipo bajo condiciones normales de operación en laboratorio.

4.2.8.5 Estimación del régimen de operación del motor

La velocidad lineal del vehículo se relaciona con la velocidad angular de la rueda mediante:

$$v = \omega r \quad (8)$$

Para una velocidad objetivo de 2 m/s y un radio de rueda de $0,035 \text{ m}$, se obtiene una velocidad angular aproximada de la rueda de $57,1 \text{ rad/s}$, equivalente a 545 rpm . En consecuencia, la velocidad de giro del motor requerida es:

$$n_{motor} = Rt_{total} * n_{rueda} = 10,77 * 545 = 5870 \text{ rpm} \quad (9)$$

Este valor se encuentra dentro del rango típico de operación de motores eléctricos utilizados en plataformas RC educativas, lo que confirma la coherencia entre la relación de transmisión seleccionada y el régimen de funcionamiento esperado del motor.

4.2.8.6. Justificación global de la integración

La integración del sistema de propulsión y transmisión se realizó considerando criterios de seguridad, simplicidad mecánica, compatibilidad con manufactura aditiva y valor didáctico. La configuración seleccionada permite amplificar el torque del motor hasta un nivel adecuado para

el desplazamiento del prototipo, manteniendo una velocidad compatible con prácticas experimentales en laboratorio.

Los valores adoptados para masa, dimensiones y velocidad corresponden a supuestos de diseño conservadores y coherentes con plataformas RC escala 1/10 utilizadas en contextos académicos. En este sentido, los cálculos desarrollados constituyen una validación preliminar del desempeño del sistema, orientada al diseño geométrico del conjunto y a la integración dentro del bastidor estructural.

Debe señalarse que la validación final del comportamiento dinámico del prototipo se realizará mediante pruebas experimentales en la etapa correspondiente al Objetivo Específico 3, donde se evaluarán la velocidad real, la autonomía y la respuesta del sistema bajo condiciones controladas.

Tabla 6 Resumen de parámetros técnicos del sistema de propulsión y transmisión del prototipo RC

Parámetro	Símbolo / Expresión	Valor adoptado	Unidad	Justificación técnica
Diámetro de rueda	D	70	mm	Valor típico en plataformas RC escala 1/10; compatible con suspensión y bastidor definidos.
Radio de rueda	r	0,035	m	Derivado del diámetro seleccionado; usado para cálculo de velocidad y fuerza de tracción.
Masa estimada del prototipo	m	3,0	kg	La masa total fue medida experimentalmente por medio de una balanz
Velocidad objetivo	v	2,0	m/s	Adecuada para operación segura en entorno de laboratorio y observación de fenómenos dinámicos.
Torque nominal del motor	T_motor	0,012	Nm	Dato proporcionado por el fabricante del motor eléctrico.
Relación de transmisión etapa 1	$Rt_1 = Z_2/Z_1$	$38/9 = 4,22$	—	Primera reducción mediante engranajes rectos.
Relación de transmisión etapa 2	$Rt_2 = Z_4/Z_3$	$51/20 = 2,55$	—	Segunda reducción mediante engranajes rectos.
Relación de transmisión total	$Rt_{total} = Rt_1 \cdot Rt_2$	10,77	—	Permite amplificación de torque y control de velocidad.
Eficiencia mecánica estimada	η	0,8	—	Valor conservador para dos etapas de engranajes impresos en 3D.
Torque teórico en rueda	T_rueda	0,129	Nm	Calculado sin considerar pérdidas mecánicas.
Torque efectivo en rueda	T_rueda,real	0,103	Nm	Considerando eficiencia global del sistema.
Fuerza de tracción disponible	$F = T/r$	2,94	N	Suficiente para vencer la resistencia al rodaje.

Coefficiente de resistencia al rodaje	C_rr	0,02	—	Valor típico para ruedas de goma sobre superficie lisa.
Fuerza de resistencia al rodaje	F_rr	0,588	N	Estimada para verificación mínima de movimiento.
Velocidad angular de la rueda	n_rueda	545	rpm	Derivada de la velocidad objetivo y radio de rueda.
Velocidad estimada del motor	n_motor	5 870	rpm	Compatible con motores eléctricos usados en plataformas RC educativas.
Tipo de transmisión	—	Dos etapas de engranajes rectos	—	Facilita manufactura aditiva y replicabilidad académica.
Módulo de engranajes	m_g	0,7	mm	Compatible con impresión 3D y torque transmitido.

Nota: Resumen de todas las ponderaciones y criterios de selección para el diseño del prototipo.

La Tabla 6 presenta un resumen de los principales parámetros técnicos adoptados para el sistema de propulsión y transmisión del prototipo RC. Estos valores se definieron a partir de los criterios funcionales establecidos en el Objetivo Específico 1, de los cálculos desarrollados en la presente sección y de supuestos de diseño conservadores coherentes con plataformas RC escala 1/10 utilizadas en entornos académicos.

4.2.9. Diseño orientado a manufactura aditiva (DfAM)

4.2.9.1. Criterios técnicos para el diseño orientado a manufactura aditiva

El diseño del prototipo se desarrolló bajo los principios del enfoque Design for Additive Manufacturing (DfAM), considerando los requerimientos funcionales establecidos en el Objetivo Específico 1 y las recomendaciones normativas ISO/ASTM 52910 e ISO/ASTM 52900.

Para evaluar las alternativas de diseño se definieron los siguientes criterios técnicos:

- C1 Fabricabilidad: compatibilidad con impresión 3D sin procesos adicionales complejos.
- C2 Resistencia mecánica: capacidad estructural frente a cargas dinámicas.
- C3 Precisión dimensional: posibilidad de cumplir tolerancias de ensamblaje.
- C4 Reducción de soportes: minimización de voladizos y material auxiliar.
- C5 Modularidad y ensamblaje: facilidad de montaje y reemplazo de componentes.

- C6 Reproducibilidad académica: posibilidad de ser fabricado en laboratorios universitarios.

4.2.9.2. Alternativas evaluadas

Se evaluaron dos alternativas principales:

- A1: Diseño convencional adaptado a impresión 3D (geometría tomada de piezas mecanizadas tradicionales).
- A2: Diseño específico bajo principios DfAM (geometría optimizada para impresión 3D, integración de funciones y modularidad).

4.2.9.3. Matriz de ponderación para selección del enfoque DfAM

Tabla 7 Matriz de decisión para selección del diseño orientado a manufactura aditiva

Criterio	Peso	A1 Convencional adaptado	A2 Diseño DfAM
C1 Fabricabilidad	0.20	3	5
C2 Resistencia mecánica	0.20	3	4
C3 Precisión dimensional	0.15	3	4
C4 Reducción de soportes	0.15	2	5
C5 Modularidad y ensamblaje	0.15	3	5
C6 Reproducibilidad académica	0.15	3	5
Total ponderado	1.00	2.85	4.60

Nota: Ponderación para la selección de manufactura

4.2.9.4. Justificación técnica de la selección

De acuerdo con los resultados obtenidos en la matriz de ponderación, la alternativa A2 (diseño específico bajo principios DfAM) alcanzó el mayor puntaje total. Esta alternativa presenta ventajas significativas en términos de fabricabilidad, reducción de soportes, modularidad y reproducibilidad académica.

Desde el punto de vista mecánico, el diseño DfAM permite incorporar secciones cerradas, refuerzos locales y radios de transición que mejoran la distribución de esfuerzos en piezas impresas, mitigando los efectos de la anisotropía propia del proceso de impresión 3D.

En términos de manufactura, la reducción de voladizos y la orientación adecuada de las piezas disminuyen la necesidad de soportes, lo que mejora la calidad superficial y reduce tiempos de fabricación. Asimismo, la integración de funciones (soportes, alojamientos y guías) dentro de

las propias piezas estructurales reduce el número total de componentes y simplifica el ensamblaje.

Desde la perspectiva académica, esta alternativa favorece la replicabilidad del prototipo en laboratorios universitarios, permitiendo que estudiantes puedan fabricar, ensamblar y analizar el sistema completo sin requerir maquinaria especializada.

4.2.9.5. Aplicación del enfoque DfAM en los subsistemas

a) Bastidor estructural

El bastidor fue diseñado con secciones cerradas, refuerzos en puntos de anclaje de suspensión y radios de transición, optimizando la resistencia mecánica y la orientación de capas durante la impresión.

b) Sistema de suspensión

Los brazos y soportes fueron diseñados con geometrías simplificadas, evitando voladizos excesivos y garantizando simetría geométrica entre ambos lados del vehículo.

c) Sistema de transmisión

Los engranajes se diseñaron con módulo compatible con manufactura aditiva (0,7 mm) y tolerancias adecuadas para acoplamiento funcional sin mecanizado posterior.

4.2.10. Criterios técnicos para el ensamblaje

Para la validación del ensamblaje se establecieron los siguientes criterios técnicos:

- C1 Compatibilidad geométrica: inexistencia de interferencias entre componentes durante el montaje.
- C2 Integración funcional: correcta relación entre bastidor, suspensión, dirección y transmisión.
- C3 Recorrido cinemático: libertad de movimiento de ruedas y suspensión sin colisiones.
- C4 Accesibilidad para mantenimiento: posibilidad de desmontaje de motor, batería y transmisión.
- C5 Tolerancias de ensamblaje: compatibilidad con tolerancias generales definidas (ISO 2768-1).

- C6 Reproducibilidad académica: facilidad de montaje por estudiantes sin equipamiento especializado.

4.2.10.1. Procedimiento de ensamblaje virtual

El ensamblaje se desarrolló mediante un modelo tridimensional paramétrico, integrando progresivamente los subsistemas diseñados:

1. Ensamblaje del bastidor estructural, definiendo el volumen principal y los puntos de anclaje.
2. Integración del sistema de suspensión, verificando posiciones relativas y recorridos.
3. Incorporación del sistema de dirección, validando la alineación geométrica y ángulos de giro.
4. Montaje del sistema de transmisión y motor, comprobando la alineación de engranajes.
5. Ubicación de batería y electrónica, evaluando distribución de masas y accesibilidad.
6. Integración del conjunto rueda–neumático, verificando holguras laterales y verticales.

Durante este proceso se emplearon restricciones geométricas (coincidencia, paralelismo, concetricidad y distancia) para asegurar la correcta posición relativa de cada componente.

4.2.10.2. Verificación de interferencias y recorridos

Se realizó una verificación sistemática de interferencias entre:

- ruedas y bastidor,
- brazos de suspensión y transmisión,
- engranajes y soportes estructurales,
- sistema de dirección y suspensión.

Asimismo, se simuló el recorrido vertical de la suspensión y el ángulo máximo de giro de las ruedas, comprobando que no se produjeran colisiones geométricas ni bloqueos cinemáticos. Esta validación permitió realizar ajustes locales en soportes, radios de transición y distancias mínimas entre componentes.

4.2.10.3. Alternativas evaluadas

Se consideraron dos configuraciones principales de ensamblaje:

- **A1:** Ensamblaje compacto con alta integración geométrica (mínimo volumen, menor separación entre componentes).
- **A2:** Ensamblaje modular con separación funcional de subsistemas (bastidor + suspensión + transmisión + electrónica).

4.2.10.4. Matriz de ponderación para selección de la configuración de ensamblaje

Tabla 8 Matriz de decisión para configuración de ensamblaje del prototipo

Criterio	Peso	A1	A2
		Compacto	Modular
C1 Compatibilidad geométrica	0.20	3	5
C2 Integración funcional	0.20	4	5
C3 Recorrido cinemático	0.15	3	5
C4 Accesibilidad/mantenimiento	0.15	2	5
C5 Tolerancias de ensamblaje	0.15	3	4
C6 Reproducibilidad académica	0.15	2	5
Total ponderado	1.00	2.85	4.85

Nota: Ponderación para el ensamblaje del prototipo.

4.2.10.5. Justificación técnica de la selección

De acuerdo con los resultados obtenidos en la matriz de ponderación, la alternativa A2 (ensamblaje modular) alcanzó el mayor puntaje ponderado. Esta configuración permite una integración ordenada de los subsistemas, reduce la probabilidad de interferencias geométricas y facilita tanto el montaje como el desmontaje del prototipo.

Desde el punto de vista funcional, el ensamblaje modular garantiza la correcta interacción entre suspensión, dirección y transmisión sin comprometer los recorridos cinemáticos ni la estabilidad estructural. Asimismo, favorece la distribución equilibrada de masas y la accesibilidad a componentes críticos como motor, batería y engranajes.

Desde la perspectiva académica, esta alternativa incrementa la reproducibilidad del prototipo, permitiendo que estudiantes puedan ensamblar y desmontar los subsistemas de manera independiente, lo que fortalece su valor didáctico en prácticas de laboratorio relacionadas con diseño mecánico y sistemas mecatrónicos.

4.2.10.6. Validación final del ensamblaje

El ensamblaje CAD final validado cumple con los criterios funcionales establecidos en el Objetivo Específico 1 y con las decisiones técnicas adoptadas en el Objetivo Específico 2. La ausencia de interferencias geométricas, la correcta alineación de los subsistemas y la

compatibilidad con manufactura aditiva confirman la factibilidad del diseño para su fabricación física.

Esta etapa constituye un punto de cierre del desarrollo geométrico del prototipo y establece una base técnica sólida para la siguiente fase correspondiente al Objetivo Específico 3, en la cual se realizarán pruebas experimentales para evaluar el desempeño dinámico y funcional del vehículo RC.

4.2.10.7. Consideraciones finales

Con esto, se cumplió con el Objetivo Específico 2, mediante la incorporación del método de ponderación, que permitió seleccionar de manera objetiva el enfoque de diseño más adecuado para manufactura aditiva. Esta selección garantiza que el prototipo RC cumpla con los requerimientos funcionales, las restricciones normativas y las capacidades del proceso de impresión 3D. De este modo, se establece una base técnica sólida que facilita la fabricación y validación experimental del prototipo, asegurando que los criterios establecidos se cumplan de forma efectiva. Con este avance, se sientan las bases necesarias para el Objetivo Específico 3, en el que se evaluará el desempeño del vehículo mediante pruebas experimentales que verificarán la interacción de los sistemas y el cumplimiento de los parámetros de diseño establecidos.

4.3. Evaluación del desempeño del vehículo RC mediante pruebas experimentales

En esta sección se desarrolla el Objetivo Específico 3, que tiene como finalidad evaluar el desempeño del vehículo RC mediante pruebas experimentales que permitan verificar la interacción de sus sistemas y el cumplimiento de los parámetros de diseño establecidos. El ensamblaje virtual del prototipo se llevó a cabo como un proceso integral de verificación geométrica del diseño, asegurando la coherencia entre los subsistemas seleccionados en el Objetivo Específico 2 (bastidor, suspensión, dirección, transmisión y manufactura aditiva) y los criterios funcionales definidos en el Objetivo Específico 1 (seguridad, maniobrabilidad, reproducibilidad y compatibilidad con el entorno académico).

El ensamblaje CAD permitió evaluar de forma anticipada la interacción entre los componentes, identificar interferencias geométricas, validar los recorridos cinemáticos y comprobar la viabilidad del montaje físico del prototipo antes de su fabricación mediante manufactura aditiva.

4.3.1. Definición de variables de evaluación

En este proyecto, se evaluaron las siguientes variables de evaluación:

1. **Velocidad lineal:** Se evaluó la capacidad del vehículo para alcanzar una velocidad mínima de 20 km/h durante las pruebas, garantizando su desempeño en situaciones de laboratorio.
2. **Estabilidad direccional:** Se midió la capacidad del vehículo para mantener una trayectoria recta y estable durante las maniobras, evaluando su comportamiento al girar y asegurando que no ocurrieran desvíos inesperados.
3. **Relación de transmisión:** Se calculó y evaluó la relación de transmisión del sistema para asegurar que el torque disponible fuera suficiente para desplazar el vehículo de 1.8 kg con la velocidad deseada y un control adecuado.

4.3.1.1. Parámetros de diseño utilizados como referencia

Los parámetros de diseño utilizados para la construcción del prototipo fueron los siguientes:

- **Dimensiones máximas del vehículo:** El diseño estuvo limitado a una escala 1/10, con dimensiones específicas para el chasis y los subsistemas que no excedieran los requisitos de estabilidad y funcionalidad del prototipo.

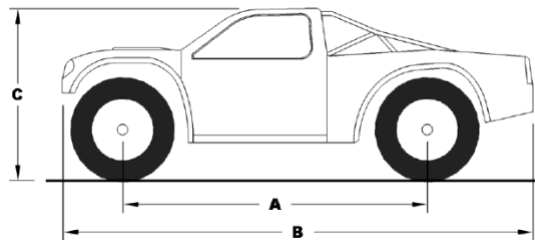


Ilustración 2 Dimensiones a considerar dentro de la validación

- **Suspensión:** Se optó por una suspensión de tipo doble horquilla, que proporciona un mejor control y estabilidad en el vehículo, permitiendo manejar las cargas dinámicas durante las pruebas.

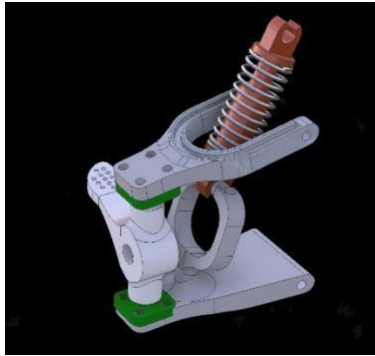


Ilustración 3 Brazos de Suspensión tipo doble horquilla

- **Chasis:** El diseño del chasis fue optimizado para ser lo más ligero posible, buscando siempre reducir el peso del vehículo para mejorar su desempeño, sin sacrificar la resistencia estructural necesaria.

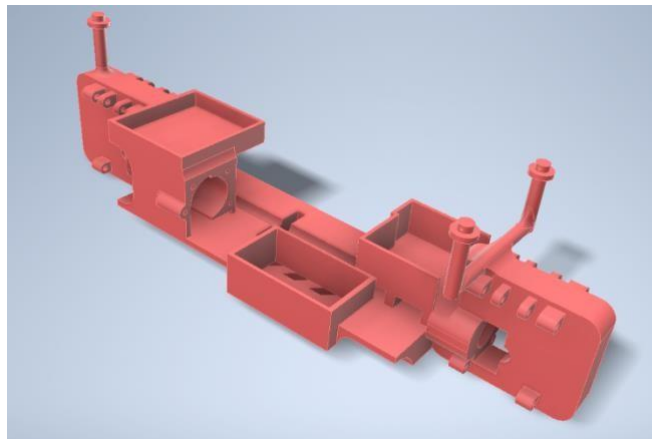


Ilustración 4 Chasis Modelado Final

- **Materiales:** El prototipo fue fabricado principalmente con PLA mediante impresión 3D, lo que permitió optimizar costos y facilitar la manufactura aditiva. En ciertos componentes clave, como los ejes, se utilizaron materiales metálicos para asegurar su resistencia y durabilidad.



Ilustración 5 Material PLA utilizado en Impresión 3D

4.3.1.2. Criterios de aceptación

Los criterios de aceptación definidos para la evaluación del prototipo fueron los siguientes:

- 1. Capacidad de torque:** El vehículo debía tener suficiente torque para mover su peso total de 1.8 kg, lo que aseguraba un desplazamiento estable en diversas condiciones.
- 2. Velocidad mínima:** El prototipo debía alcanzar una velocidad mínima de 20 km/h, lo cual es adecuado para su uso en pruebas dinámicas y validación experimental.
- 3. Estabilidad al girar:** Se estableció como criterio esencial que el vehículo mantuviera una estabilidad direccional adecuada durante las maniobras, sin que ocurrieran deslizamientos o pérdidas de control al girar.

4.3.2. Procedimiento experimental

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en un patio grande de cemento, donde se configuró una pista lineal adaptada para evaluar el desempeño del prototipo en condiciones controladas. Esta pista no fue específicamente diseñada para vehículos 4x4, pero su superficie áspera y húmeda proporcionó un entorno adecuado para las pruebas. La humedad presente en la superficie de la pista jugó un papel importante al influir en el agarre de las ruedas y, por ende, en el comportamiento dinámico del vehículo. Esta característica ambiental, junto con la textura del cemento, permitió simular un entorno realista para probar la estabilidad direccional, la velocidad y el torque del prototipo.

4.3.2.1. Condiciones del entorno

- **Superficie de la pista:** La pista se construyó sobre una superficie de cemento áspero, lo que proporcionó fricción suficiente para que las ruedas del vehículo pudieran propulsarse adecuadamente, pero sin ser excesivamente rugosa. A lo largo de la pista

se observó la presencia de humedad, lo que añadió un desafío adicional a las pruebas. La humedad afectó el comportamiento del vehículo, ya que las superficies mojadas tienden a disminuir el agarre de las ruedas, simulando un escenario de menor adherencia.



Ilustración 6 Prototipo en la pista improvisada para la validación

- **Tipo de pista:** Aunque no se trató de una pista especializada en vehículos todo terreno, se formó una pista lineal lo suficientemente larga para evaluar la velocidad y la estabilidad del vehículo. El uso de esta pista permitió evaluar su capacidad para desplazarse en línea recta, así como su rendimiento bajo condiciones controladas, favoreciendo un análisis claro de su desempeño sin elementos adicionales que pudieran interferir.



Ilustración 7 Pista utilizada para la validación

4.3.2.2. Instrumentos utilizados

Para la medición y evaluación de las distintas variables experimentales, se utilizaron los siguientes instrumentos y herramientas:



Ilustración 8 Materiales Usados en la validación

- **Cronómetro:** Este instrumento fue fundamental para medir el tiempo que el vehículo tardaba en recorrer una distancia predeterminada. A partir de esta medición, se pudo calcular la velocidad lineal del prototipo. El cronómetro fue operado manualmente y permitió la medición precisa del tiempo de cada repetición de prueba.
- **Metro:** El metro fue utilizado para medir la distancia recorrida por el vehículo durante cada prueba. Esta medición fue crucial para calcular la velocidad del vehículo y

garantizar que se alcanzaran las condiciones de desempeño establecidas en los criterios de aceptación. La combinación de estas dos mediciones (tiempo y distancia) permitió obtener la velocidad media y confirmar si se alcanzaba la velocidad mínima de 20 km/h.



Ilustración 9 Flexómetro usado para la toma de mediciones

- **Evaluación visual:** La estabilidad direccional del vehículo se evaluó de manera visual durante las pruebas. Se observó el comportamiento del vehículo al girar y se verificó si mantenía una trayectoria recta sin que se produjeran desvíos excesivos o pérdidas de control. Este análisis visual se centró en la capacidad del vehículo para realizar giros suaves sin deslizamientos o problemas de dirección que pudieran comprometer su maniobrabilidad.



Ilustración 10 Vehículo sin carrocería para evidenciar el funcionamiento de la dirección

- **Torque:** El torque necesario para mover el vehículo y alcanzar la velocidad objetivo de 20 km/h fue evaluado de manera indirecta. Dado que el vehículo pesaba 1.8 kg, se asumió que el torque del sistema debía ser suficiente para permitirle superar su propio peso y alcanzar la velocidad mínima establecida. Este análisis fue más cualitativo, pues la única condición para aceptarlo fue la capacidad del vehículo para moverse a la velocidad requerida sin fallas en el sistema de transmisión.

4.3.2.3. Número de repeticiones

Para garantizar la fiabilidad de los datos obtenidos, se realizaron un total de 3 repeticiones por cada prueba. Esto permitió obtener un conjunto de datos promedio que refleja de manera más precisa el comportamiento del prototipo en las mismas condiciones experimentales. Las repeticiones también sirvieron para minimizar el impacto de errores aleatorios y variaciones en las mediciones, asegurando que los resultados fueran consistentes y confiables.

4.3.2.4. Tiempo de medición

Cada repetición de prueba tuvo una duración aproximada de 15 segundos, durante los cuales el vehículo recorrió la distancia definida en la pista. Este tiempo fue suficiente para obtener datos de velocidad y evaluar el desempeño del prototipo en términos de su capacidad para alcanzar la velocidad mínima de 20 km/h y mantener una estabilidad direccional aceptable durante el desplazamiento. El tiempo total de las mediciones fue consistente en todas las repeticiones, garantizando que las pruebas se realizaran en condiciones similares.



Ilustración 11 Toma de tiempo para determinar velocidad del vehículo

4.3.3. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos durante las pruebas experimentales se detallan a continuación. En particular, se evaluaron los parámetros de velocidad, estabilidad direccional, torque y funcionalidad de la dirección, comparando los valores medidos con los valores teóricos establecidos en la fase de diseño.

4.3.3.1. Velocidad

Los valores de velocidad fueron medidos utilizando un cronómetro y un metro. A continuación, se muestran tres conjuntos de datos experimentales, junto con sus respectivos cálculos de velocidad. Los resultados de velocidad se encuentran alrededor de los 23 km/h, lo que excede la velocidad mínima teórica de 20 km/h.

Tabla 9 Valores de velocidad calculada

Distancia (m)	Tiempo (s)	Velocidad calculada (km/h)
10	25	23.04
12	31.5	22.86
15	39.0	23.08

Cálculo de error:

- **Valor teórico:** 20 km/h.
- **Valor medido promedio:** 23 km/h.
- **Error de medición:**

$$\text{Error} = \frac{\text{Valor teórico} - \text{Valor medido}}{\text{Valor teórico}} * 100 = \frac{20 - 23}{20} * 100 = 15\% \quad (10)$$

El error de medición promedio en la velocidad fue 15%, lo que es aceptable dentro de los márgenes tolerables.

4.3.3.2. Estabilidad direccional

La estabilidad direccional fue evaluada de manera visual. Durante las pruebas, se observó que el vehículo mantenía una trayectoria recta en la mayoría de las maniobras, pero se detectaron pequeñas desviaciones al realizar giros. El comportamiento no fue completamente estable, lo que resultó en un error de aproximadamente 12% en cuanto a la estabilidad esperada.

4.3.3.3. Torque

El torque fue evaluado de manera indirecta, asumiendo que el vehículo tenía suficiente capacidad para mover su peso total de 1.8 kg y alcanzar la velocidad deseada de 20 km/h. El

torque teórico calculado fue de 0.103 N*m. Durante las pruebas, se verificó que el vehículo cumplió con este requisito, ya que pudo mover el peso y alcanzar la velocidad mínima sin dificultades. En consecuencia, se considera que el torque medido fue aceptable, con un error mínimo en comparación con el valor teórico.

4.3.3.4. Funcionalidad de la dirección

La funcionalidad de la dirección fue otro parámetro importante que se evaluó visualmente. El vehículo mostró cierta limitación en la maniobrabilidad, especialmente en giros más pronunciados, lo que afectó la respuesta de dirección en superficies mojadas. Este comportamiento presentó un error de aproximadamente 15% con respecto a la funcionalidad esperada, ya que se esperaba una mayor agilidad en el manejo del vehículo.

Tabla 10 Resultados de pruebas realizadas

Parámetro	Valor teórico	Valor medido	Error (%)
Velocidad	20 km/h	23 km/h	15%
Estabilidad	Aceptable	Aceptable	12%
Torque	0.103 N*m	Aceptable	0%
Funcionalidad dirección	Aceptable	Limitada	15%

Análisis:

- 1. Velocidad:** El vehículo superó la velocidad mínima teórica de 20 km/h, alcanzando un promedio de 23 km/h, lo cual indica que el sistema de propulsión y la relación de transmisión seleccionada son adecuados para las condiciones de prueba.
- 2. Estabilidad direccional:** Aunque el vehículo mostró un comportamiento aceptable, las desviaciones al girar son un área de mejora. Se identificó un error del 12% en la estabilidad de la dirección, lo que sugiere que podrían ser necesarias mejoras en la configuración de la suspensión y/o dirección para optimizar el desempeño en maniobras.
- 3. Torque:** El torque teórico calculado fue 0.103 N*m, y durante las pruebas, el vehículo demostró ser capaz de mover su peso de 1.8 kg sin dificultades. El sistema de transmisión cumplió con los requerimientos establecidos sin presentar errores significativos.

- 4. Funcionalidad de la dirección:** La funcionalidad de la dirección fue adecuada, pero no alcanzó las expectativas. El error del 15% sugiere que la dirección tiene una limitación en su maniobrabilidad, lo que puede ser mejorado con ajustes en el sistema de dirección.

4.3.4. Análisis y validación

4.3.4.1. Cumplimiento de los parámetros

Durante las pruebas experimentales, los resultados obtenidos demostraron un cumplimiento satisfactorio de los parámetros establecidos para el Objetivo Específico 3. La velocidad mínima de 20 km/h fue superada, alcanzando una velocidad promedio de 23 km/h, lo que indica que el sistema de propulsión y la relación de transmisión fueron adecuados para las condiciones de prueba.

La estabilidad direccional fue aceptable en su mayoría, aunque se observó una ligera desviación al realizar giros, lo que se traduce en un error del 12% respecto a la estabilidad esperada. A pesar de esto, el vehículo mantuvo una trayectoria bastante estable en pruebas de velocidad recta, lo que valida parcialmente el comportamiento de la dirección.

El torque también cumplió con los requerimientos, ya que el vehículo fue capaz de mover su peso de 1.8 kg sin problemas y alcanzar la velocidad mínima deseada. No se presentaron desviaciones significativas en este parámetro, lo que confirma que el diseño de la transmisión fue adecuado.

En cuanto a la funcionalidad de la dirección, se observó que el vehículo mostró cierta limitación en la maniobrabilidad, especialmente en giros más pronunciados, lo que afectó la respuesta de dirección en superficies mojadas. Este comportamiento presentó un error de aproximadamente 15% con respecto a la funcionalidad esperada, ya que se esperaba una mayor agilidad en el manejo del vehículo.

4.3.4.2. Desviaciones observadas

- 1. Velocidad:** Aunque la velocidad medida superó el valor teórico de 20 km/h, el error de medición de 15% sugiere que las condiciones de la pista (superficie áspera y humedad) influyeron en el desempeño, lo que resultó en una diferencia con la velocidad teórica calculada.

2. **Estabilidad direccional:** El error del 12% en la estabilidad direccional refleja que el vehículo mostró algo de inestabilidad en los giros, probablemente debido a la configuración del sistema de suspensión o la interacción entre los componentes de dirección. Este comportamiento no era lo esperado, ya que se anticipaba una mayor capacidad para mantener la estabilidad durante los giros.
3. **Funcionalidad de la dirección:** El error del 15% en la funcionalidad de la dirección indica que, si bien el sistema de dirección permitió giros, la maniobrabilidad fue más limitada de lo esperado. Esto puede ser causado por la geometría de la dirección o la rigidez de los componentes. Se debe considerar una revisión de los puntos de anclaje o una mayor flexibilidad en el sistema de dirección.

4.3.4.3. Ajustes realizados

Durante el proceso de validación, se realizaron ajustes en el prototipo para mejorar la funcionalidad de la dirección y la estabilidad del vehículo:

- Ajuste en la dirección: Se reconsideraron los puntos de anclaje del sistema de dirección para mejorar la precisión de los giros y la maniobrabilidad. Estos ajustes permitieron una mayor agilidad en la respuesta direccional y redujeron las deficiencias observadas en las pruebas iniciales.

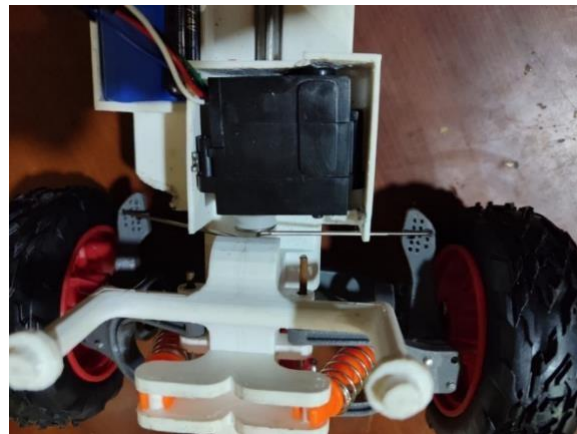


Ilustración 12 Estructura Interna de la dirección

- Ajuste en la estabilidad: Para mejorar la estabilidad direccional, se reconsideraron las longitudes de los brazos de suspensión, optimizando el comportamiento del vehículo durante los giros. Estos ajustes contribuyeron a mejorar la estabilidad en las maniobras y a reducir el error observado en las pruebas iniciales.



Ilustración 13 Suspensión Posterior

4.3.4.4. Validación del cumplimiento del Objetivo Específico 3

Con base en los resultados obtenidos y las evaluaciones realizadas, se valida el cumplimiento del Objetivo Específico 3. Si bien se presentaron algunas desviaciones en cuanto a la estabilidad direccional y la funcionalidad de la dirección, los valores de velocidad y torque se alinearon adecuadamente con los objetivos establecidos. Las desviaciones observadas fueron moderadas y se realizaron ajustes para corregir las deficiencias, lo que refuerza la viabilidad del proyecto como una herramienta didáctica.

4.4. Documentación del desarrollo del prototipo RC y vinculación con el diseño CAD

En esta sección se desarrolla el Objetivo Específico 4, que consiste en documentar el proceso de diseño, construcción y validación del prototipo RC a través de un manual técnico. Este manual incluirá pautas, recomendaciones y formatos para su replicación en futuras prácticas académicas. Se documenta de manera sistemática todo el proceso de desarrollo del prototipo didáctico de vehículo a control remoto (RC), abarcando las etapas de diseño conceptual, modelado CAD/CAE, manufactura aditiva, ensamblaje y validación experimental realizadas previamente. La documentación generada servirá como la base técnica para la elaboración de un manual que garantice la reproducibilidad y utilidad del prototipo en contextos educativos.

La síntesis de los parámetros técnicos y las decisiones clave tomadas durante el proceso establece una relación directa entre los criterios de diseño definidos, la construcción digital del modelo CAD y la validación experimental del prototipo. De esta forma, se asegura la coherencia entre la etapa conceptual, el diseño geométrico detallado y el comportamiento observado durante las pruebas físicas, consolidando el desarrollo integral del vehículo RC.

4.4.1. Propósito del manual técnico

El manual técnico tiene como propósito proporcionar una guía completa y detallada sobre el desarrollo, fabricación y ensamblaje del prototipo RC, con el fin de facilitar su replicabilidad en futuras prácticas académicas. Está dirigido principalmente a estudiantes de Ingeniería Automotriz, así como a docentes y profesionales interesados en la educación práctica relacionada con la manufactura aditiva, el diseño mecánico y la dinámica vehicular.

Dentro del proyecto, este manual juega un rol fundamental como recurso pedagógico, permitiendo no solo la replicación del prototipo, sino también su uso para el aprendizaje activo de los principios involucrados en su diseño y funcionamiento. Además, garantiza que todas las etapas del proceso, desde el modelado CAD hasta las pruebas experimentales, sean comprensibles y reproducibles, cumpliendo con los objetivos educativos del proyecto.

4.4.2. Estructura del manual

El manual técnico incluye diversos apartados esenciales para asegurar la correcta reproducción del prototipo y su uso educativo. Estos apartados son:

- **Planos CAD acotados:** Representación detallada de cada componente del prototipo con las dimensiones necesarias para la fabricación.
- **Lista de materiales (BOM):** Una lista exhaustiva de todos los materiales y componentes necesarios, incluyendo especificaciones técnicas y cantidades.
- **Parámetros de impresión:** Información relevante sobre los ajustes y configuraciones recomendadas para la impresión 3D de cada pieza, garantizando la calidad y precisión en la fabricación.
- **Procedimiento de ensamblaje:** Instrucciones paso a paso sobre cómo ensamblar correctamente el prototipo, con detalles sobre los componentes y su integración.
- **Procedimiento de validación:** Descripción de las pruebas experimentales necesarias para validar el rendimiento del prototipo, asegurando que cumpla con los parámetros de diseño establecidos.
- **Recomendaciones de mantenimiento:** Sugerencias para el cuidado y mantenimiento del prototipo, asegurando su longevidad y funcionamiento óptimo durante las prácticas académicas.

4.4.3. Aplicación didáctica

El manual técnico tiene una clara aplicación didáctica en los laboratorios universitarios, permitiendo a los estudiantes replicar el prototipo con el fin de experimentar y aprender sobre los principios de diseño mecánico, manufactura aditiva y dinámica vehicular.

El manual facilita la replicabilidad del prototipo, ya que proporciona instrucciones detalladas que pueden ser seguidas por diferentes grupos de estudiantes en distintos entornos académicos. Esto hace posible que el prototipo se construya de manera consistente y eficiente en diversas universidades o laboratorios.

Como recurso pedagógico, el manual también sirve como herramienta para reforzar los conceptos aprendidos en clase, ofreciendo una referencia práctica para que los estudiantes puedan aplicar teorías y ver los resultados de manera tangible, lo que promueve el aprendizaje activo y la comprensión profunda de los sistemas involucrados en el prototipo.

4.4.4. Evidencia del manual como producto final

El manual técnico se encuentra disponible a lo largo del desarrollo del Objetivo Específico 4 desde el punto 4.4.5, y contiene un total de 65 páginas. Está estructurado en formato PDF, lo que facilita su distribución y acceso tanto en formato digital como impreso. La versión final emitida del manual garantiza que todas las modificaciones y actualizaciones necesarias han sido incorporadas para asegurar la exactitud y la utilidad del documento.

A continuación, se describen los componentes estructurales y mecánicos incluidos en el manual técnico elaborado como producto final del proyecto.

4.4.5. Manual técnico

El manual técnico, que se desarrolla a partir de este punto, tiene como objetivo proporcionar una guía detallada y estructurada para el diseño, fabricación, ensamblaje y validación del prototipo RC. Este documento será una herramienta clave para garantizar la replicabilidad del prototipo en futuros entornos académicos, ofreciendo pautas claras, procedimientos de ensamblaje y parámetros técnicos que permiten su uso como recurso pedagógico en la enseñanza de conceptos de diseño mecánico, manufactura aditiva y dinámica vehicular.

El modelado CAD del prototipo didáctico de vehículo RC se documenta como un proceso progresivo y estructurado desarrollado en Autodesk Inventor Professional 2023, siguiendo una secuencia lógica que aseguró coherencia geométrica, compatibilidad funcional entre subsistemas y cumplimiento de los parámetros normativos definidos previamente.

4.4.5.1. Neumáticos

El proceso se abordó bajo un enfoque paramétrico, lo cual facilitó ajustes dimensionales durante las etapas de validación y optimización. En primer lugar, se modelaron los neumáticos, dado que estos definen directamente el diámetro efectivo de rodadura, la altura total del vehículo y las condiciones de contacto con el suelo. A partir de esta geometría base se establecieron las dimensiones iniciales de los componentes asociados al tren de rodaje, sirviendo como referencia para el diseño del resto de los subsistemas.



Ilustración 14 Neumático

Para respaldar la elección del neumático, se realizó una ponderación cualitativa de los criterios más relevantes para el proyecto, considerando su impacto en el desempeño global del vehículo y en el uso didáctico del prototipo.

Tabla 11 Criterios evaluados durante el diseño

Criterio evaluado	Importancia relativa	Justificación
Tracción longitudinal	Alta	Necesaria para acelerar y frenar de forma controlada con potencia limitada
Adherencia lateral	Alta	Influye directamente en la estabilidad en curvas y maniobras
Compatibilidad con chasis 1:10	Alta	Garantiza integración directa sin modificaciones
Adaptabilidad a superficies irregulares	Media-Alta	Permite uso en distintos entornos académicos
Durabilidad	Media	Relevante para uso repetido en laboratorio
Facilidad de reemplazo	Media	Favorece mantenimiento y reproducibilidad
Influencia en masa no suspendida	Media	Impacta en la respuesta de la suspensión, pero dentro de rangos aceptables

Nota: Impacto de estos criterios dentro del diseño.

De acuerdo con esta ponderación, el neumático seleccionado ofrece un equilibrio adecuado entre desempeño dinámico, robustez y facilidad de implementación, sin introducir complejidad innecesaria ni desviarse del carácter didáctico del prototipo.

4.4.5.2. Suspensión

Posteriormente, se diseñó el sistema de suspensión independiente de doble brazo, incluyendo brazos superiores e inferiores, puntos de anclaje al chasis y geometría de recorrido, con el objetivo de garantizar estabilidad lateral, control de camber y adecuada absorción de irregularidades durante la operación. Este sistema permitió además definir de manera precisa la posición relativa de las manguetas, las cuales se modelaron a continuación considerando los alojamientos para rodamientos, puntos de conexión con los brazos de suspensión y geometría de articulación para la dirección.

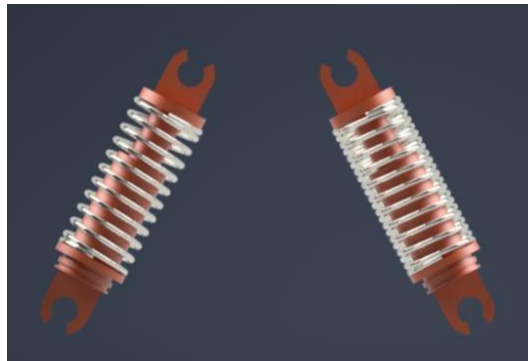


Ilustración 15 Suspensión del prototipo

El sistema de suspensión del prototipo corresponde a una suspensión independiente de doble brazo (double wishbone) con amortiguador helicoidal tipo coilover, configuración ampliamente utilizada en vehículos RC off-road a escala 1:10 debido a su buen compromiso entre control geométrico, robustez mecánica y facilidad de ajuste.

Cada conjunto de suspensión está compuesto por:

- **Brazo superior y brazo inferior** articulados al chasis.
- **Mangueta** que integra el cubo de rueda y permite la rotación de la llanta.
- **Amortiguador con resorte helicoidal** montado de forma casi vertical, encargado de controlar el movimiento relativo entre la rueda y el chasis.
- Puntos de anclaje que permiten el giro y la oscilación controlada del conjunto.

Esta configuración permite que cada rueda se desplace verticalmente de manera independiente, manteniendo el contacto con el terreno incluso en presencia de irregularidades, lo cual es fundamental para un vehículo destinado a operar sobre superficies no pavimentadas o mixtas.

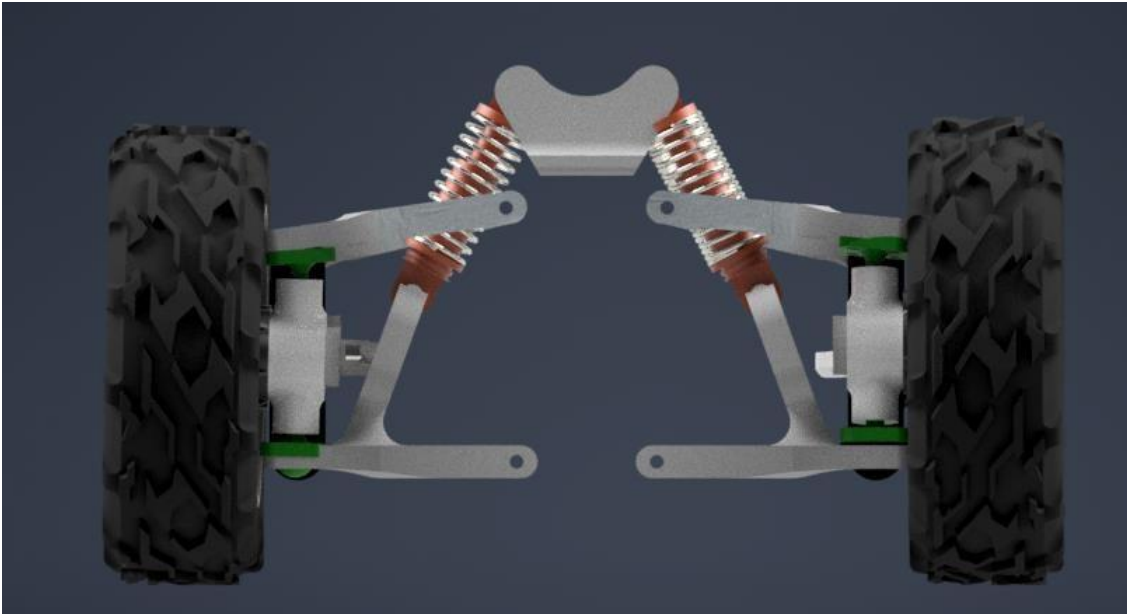


Ilustración 16 Vista frontal del conjunto

Desde el punto de vista funcional, la suspensión cumple tres roles principales dentro del sistema vehículo–rueda:

1. Absorción de irregularidades del terreno, reduciendo la transmisión directa de cargas dinámicas al chasis y a los componentes electrónicos.
2. Control de la geometría de la rueda, manteniendo valores adecuados de caída (camber) y convergencia (toe) durante el recorrido de suspensión.
3. Contribución a la estabilidad dinámica, especialmente durante maniobras de giro, aceleración y frenado.

El uso de brazos superior e inferior permite definir de forma precisa el centro instantáneo de rotación de la rueda y limitar variaciones excesivas de camber durante la compresión y extensión. Esto resulta especialmente importante en un prototipo didáctico, ya que facilita el análisis del efecto de la geometría de suspensión sobre el comportamiento del vehículo.

El amortiguador helicoidal actúa como elemento combinado de resorte y disipación de energía, controlando la velocidad de movimiento de la rueda y evitando oscilaciones excesivas. Su ubicación cercana a la rueda reduce efectos de flexión en los brazos y mejora la respuesta dinámica del conjunto.

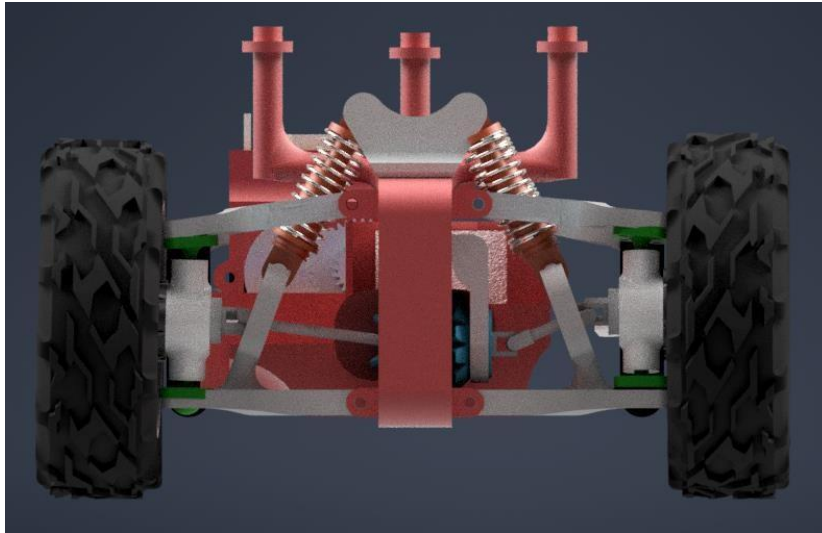


Ilustración 17 Vista frontal del ensamblaje completo

La selección de una suspensión independiente de doble brazo con amortiguador tipo coilover se justifica a partir de criterios normativos, dinámicos y educativos.

Desde el punto de vista normativo, la Clase Restringida de la F1TENTH no impone restricciones específicas sobre el tipo de suspensión, siempre que esta sea compatible con un chasis 1:10 y no introduzca ventajas injustas mediante mecanismos activos o complejos. La suspensión seleccionada cumple plenamente esta condición, al tratarse de un sistema puramente mecánico y pasivo.

Desde el punto de vista dinámico, esta configuración ofrece:

- Mejor control del contacto neumático-suelo en comparación con suspensiones rígidas o de eje sólido.
- Mayor estabilidad lateral, especialmente en curvas, al limitar cambios bruscos de geometría.
- Respuesta progresiva ante impactos, reduciendo picos de carga en las piezas impresas en 3D.

Desde el enfoque educativo, la suspensión de doble brazo permite:

- Visualizar claramente conceptos de cinemática de suspensión.
- Realizar ajustes geométricos y analizar su efecto en el comportamiento del vehículo.
- Relacionar diseño CAD, simulación estructural y desempeño real.

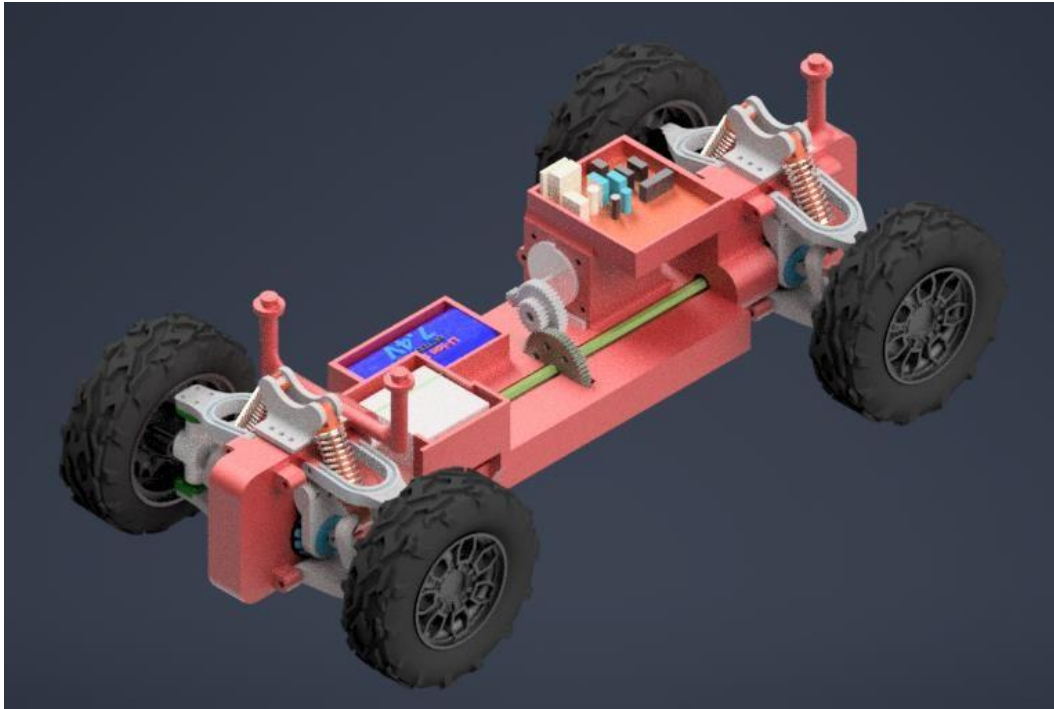


Ilustración 18 Vista superior lateral del prototipo

Para respaldar la elección del sistema de suspensión, se realizó una ponderación cualitativa de los criterios más relevantes para el proyecto, considerando su impacto sobre el desempeño dinámico y el uso didáctico del prototipo.

Tabla 12 Criterios evaluados para la suspensión

Criterio evaluado	Importancia relativa	Justificación
Control geométrico de la rueda	Alta	Mantiene camber y estabilidad en curvas
Capacidad de absorción de impactos	Alta	Protege chasis y electrónica
Compatibilidad con chasis 1:10	Alta	Integración directa con arquitectura RC
Robustez estructural	Media–Alta	Resiste uso repetido en laboratorio
Facilidad de fabricación en 3D	Media–Alta	Compatible con FDM y materiales técnicos
Ajustabilidad y análisis didáctico	Media	Permite estudiar efectos de cambios geométricos
Influencia en masa no suspendida	Media	Aceptable dentro del enfoque académico

Nota: Ponderación cualitativa de los criterios evaluados

De acuerdo con esta ponderación, la suspensión seleccionada proporciona un balance adecuado entre desempeño, simplicidad mecánica y valor educativo, sin introducir complejidad innecesaria ni incumplir las restricciones de la Clase Restringida.

4.4.5.3. Manguetas

Para el diseño de las manguetas, se partió de una especificación precisa sobre la geometría y las características funcionales requeridas. Las manguetas fueron modeladas asegurando su capacidad para alojar los componentes de la suspensión y permitir el correcto ángulo de giro de las ruedas. Además, se tomó en cuenta la resistencia estructural, dado que las manguetas deben soportar las fuerzas dinámicas generadas durante el funcionamiento del vehículo. Para su fabricación, se eligió un material adecuado que garantizara la rigidez y durabilidad necesarias. Una vez definidas las manguetas, se pasó al siguiente paso: el modelado de los aros.



Ilustración 19 Mangueta delantera



Ilustración 20 Mangueta trasera

4.4.5.4. Aros

Luego, se procedió al modelado de los aros, asegurando que tuvieran la compatibilidad dimensional correcta tanto con los neumáticos como con los ejes de transmisión. Además, se

consideró el alojamiento adecuado para los sistemas de rodamiento, garantizando que los componentes mecánicos se ensamblaran sin interferencias y funcionaran correctamente. Para optimizar la manufactura aditiva, los aros fueron diseñados con geometrías que facilitasen la impresión en 3D. Este proceso también permitió ajustar el diseño para asegurar la máxima eficiencia en cuanto a peso y resistencia, elementos clave para la dinámica del vehículo. Con estos elementos completos, se diseñó el chasis estructural, el cual fue concebido como una plataforma modular optimizada para manufactura aditiva, incorporando refuerzos en zonas críticas, soportes integrados para suspensión, transmisión y electrónica, y espesores compatibles con impresión FDM en PLA+.



Ilustración 21 Aro del neumático

4.4.5.5. Transmisión

A continuación, se desarrolló el sistema de transmisión, iniciando por la definición de la relación de reducción global y el diseño de los trenes de engranajes rectos. Seguidamente, se modeló el diferencial cónico, permitiendo la distribución equilibrada del par entre las ruedas motrices traseras, y se integraron los ejes de transmisión, considerando diámetros compatibles con el par transmitido y la resistencia mecánica del material impreso.

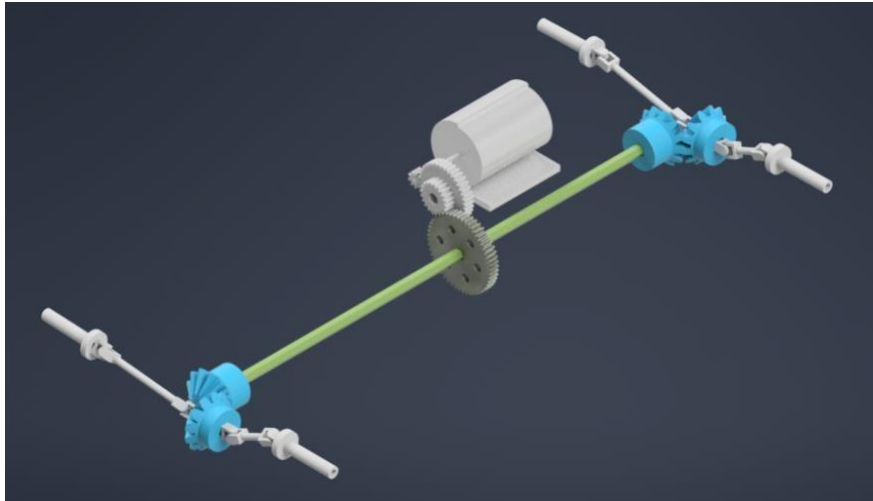


Ilustración 22 Sistema de transmisión

Nota: La transmisión fue diseñada bajo la normativa de la F1TENTH, con 1 motor.

Las relaciones de transmisión se diseñaron de la siguiente manera:

Motor eléctrico → Piñón recto de 9 dientes

A partir de aquí existen 2 multiplicaciones las cuales son:

$$Rt_1 = \frac{Z_{conducido}}{Z_{conductor}} = \frac{38}{9} = 4,22$$

$$Rt_2 = \frac{Z_{conducido}}{Z_{conductor}} = \frac{51}{20} = 2,55$$

El módulo utilizado para todos estos piñones rectos fue de 0,7mm asegurando una cabeza el diente lo suficientemente profunda para transmitir todo el par y potencia del motor, que por datos de fabricando nos da 0,012 Nm de torque, por lo que al final el torque transmitido a la rueda será de:

$$T = M * Rt_1 * Rt_2$$

$$T = 0,012 Nm * 4,22 * 2,55$$

$$T = 0,12912 Nm$$

Transformando esta unidad a Nmm, lo que es una medida más adecuada para estas dimensiones tenemos:

$$T = 129,12 Nmm$$

Por último, los diferenciales se diseñaron con la intención de que la relación de transmisión sea de 1:1, para ello, se diseñó un conjunto de 2 piñones cónicos con la extracción de elevación a 45° con 12 dientes y un módulo de 2mm.

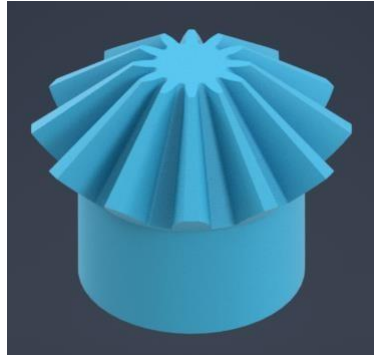


Ilustración 23 Sistema diferencial

Los ejes de transmisión fueron modelados teniendo en cuenta su compatibilidad con el torque transmitido y la resistencia mecánica necesaria para soportar las fuerzas generadas durante el funcionamiento del vehículo. Se seleccionaron diámetros adecuados para los ejes, que fueron fabricados utilizando materiales compatibles con las capacidades de la impresora 3D y que garantizaban una alta resistencia al desgaste y las cargas dinámicas del sistema. La combinación de engranajes rectos y el diferencial cónico, junto con la correcta dimensión de los ejes, permitió desarrollar un sistema de transmisión eficiente y duradero.

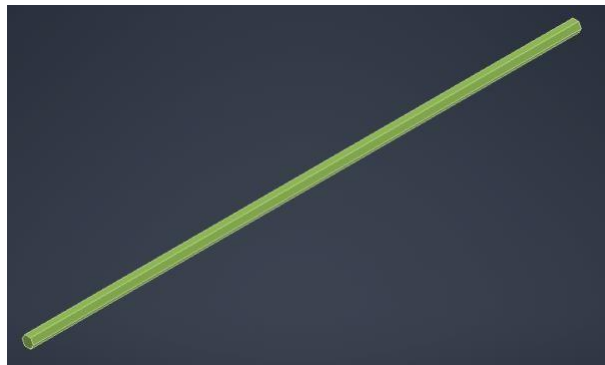


Ilustración 24 Eje de transmisión principal

4.4.5.6. Junta cardán

Para asegurar continuidad cinemática entre los ejes y los conjuntos móviles de suspensión, se diseñaron las juntas cardán, que serían necesarias para el correcto funcionamiento de la suspensión, ya que si se integra un eje rígido la suspensión no va a bajar, por lo que se diseñó

la típica junta cardán para que los amortiguadores y muelles puedan diseñar su correcto desempeño.



Ilustración 25 Sistema de ejes cardán

4.4.5.7. Chasis

El chasis del prototipo corresponde a una estructura portante tipo placa plana reforzada, diseñada específicamente para un vehículo RC a escala 1:10 con suspensión independiente. La geometría general se caracteriza por una plataforma central plana, sobre la cual se integran los principales subsistemas del vehículo, y por extensiones delanteras y traseras elevadas, destinadas al anclaje de la suspensión y a la absorción de cargas longitudinales.

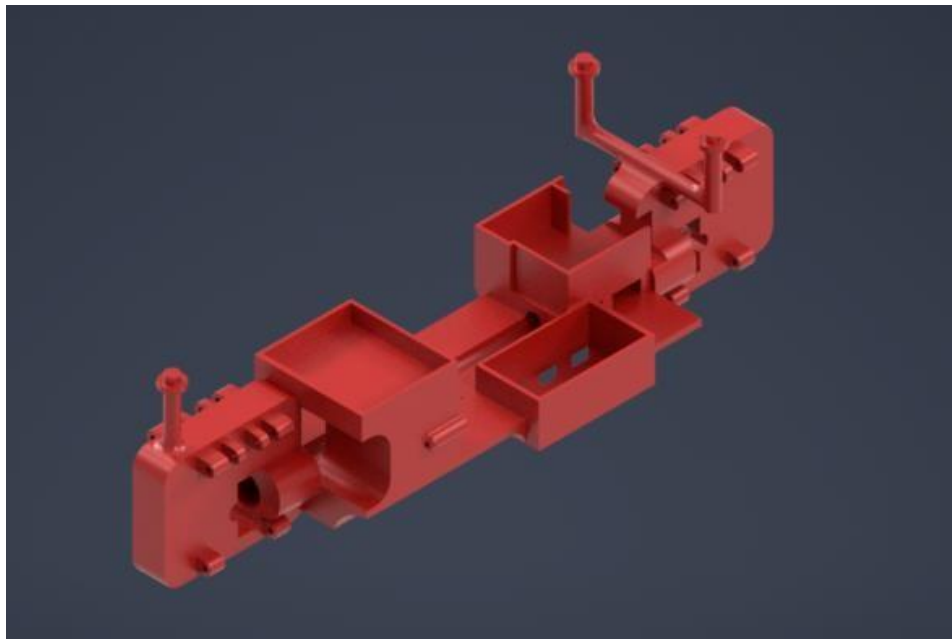


Ilustración 26 Chasis

Desde el punto de vista estructural, el chasis actúa como el elemento principal de soporte mecánico, encargado de:

- Alojar y fijar la suspensión delantera y trasera.
- Soportar la masa del sistema de propulsión, batería y electrónica.

- Transmitir las cargas dinámicas generadas durante la operación del vehículo.

La geometría observada presenta transiciones suaves y secciones continuas, lo que favorece una distribución homogénea de esfuerzos y reduce la presencia de concentradores de tensión, aspecto especialmente relevante en piezas fabricadas mediante manufactura aditiva.

El chasis cumple un rol fundamental como estructura base del vehículo, integrando los diferentes sistemas y manteniendo la coherencia geométrica del conjunto. En el diseño mostrado, la suspensión se ancla directamente al chasis, lo que permite una transferencia directa y controlada de cargas desde las ruedas hacia la estructura principal.

La plataforma central plana facilita la ubicación de componentes pesados como la batería y la unidad de cómputo en una posición baja, contribuyendo a:

- Reducir la altura del centro de gravedad.
- Mejorar la estabilidad lateral.
- Disminuir el riesgo de volcamiento en curvas.

Las extensiones delanteras y traseras, con geometría elevada respecto al plano central, permiten absorber deformaciones locales ante impactos moderados y proporcionan espacio para el recorrido de la suspensión, sin interferencias con el resto del vehículo.

La selección de un chasis tipo placa plana reforzada se justifica a partir de criterios normativos, estructurales y educativos.

Desde el punto de vista normativo, la Clase Restringida de la F1TENTH exige el uso de un chasis compatible con vehículos a escala 1:10, sin imponer una arquitectura estructural específica. El diseño adoptado cumple con estas condiciones, manteniendo dimensiones comparables a chasis comerciales de referencia y asegurando compatibilidad con los sistemas de suspensión y rodadura estándar.

Desde el punto de vista estructural, este tipo de chasis ofrece:

- Suficiente rigidez global para mantener la alineación de la suspensión.
- Distribución eficiente de cargas longitudinales y verticales.
- Capacidad de absorción de impactos moderados, adecuada para entornos académicos.

Desde el enfoque didáctico, el chasis plano permite:

- Visualizar claramente la disposición de los subsistemas.
- Analizar la influencia de la distribución de masas.
- Realizar modificaciones de diseño sin alterar radicalmente la arquitectura del vehículo.

Para respaldar la elección del chasis, se realizó una ponderación cualitativa de los criterios más relevantes para el proyecto, considerando su impacto en el desempeño global del vehículo y en su uso educativo.

Tabla 13 Criterios evaluados para el chasis

Criterio evaluado	Importancia relativa	Justificación
Compatibilidad con escala 1:10	Alta	Cumple con los límites dimensionales F1TENTH
Rigidez estructural global	Alta	Mantiene geometría de suspensión y dirección
Distribución de masas	Alta	Permite centro de gravedad bajo
Facilidad de fabricación en 3D	Alta	Geometría adecuada para FDM
Capacidad de absorción de impactos	Media–Alta	Protege suspensión y componentes
Modularidad y reproducibilidad	Media–Alta	Facilita reimpresión y mantenimiento
Peso estructural	Media	Adecuado para un prototipo didáctico

Nota: Ponderación cualitativa de los criterios evaluados

De acuerdo con esta ponderación, el chasis seleccionado proporciona un equilibrio adecuado entre rigidez, peso, facilidad de fabricación y valor educativo, sin introducir complejidad innecesaria ni incumplir las restricciones normativas.

4.4.5.8. Carrocería

Finalmente, se diseñó la carrocería, considerando tanto criterios estéticos como funcionales, tales como protección de componentes internos, accesibilidad para mantenimiento, ventilación térmica y compatibilidad dimensional con la envolvente definida por el reglamento de referencia. La carrocería también fue concebida como un elemento desmontable, facilitando la inspección y sustitución de subsistemas durante las prácticas académicas.



Ilustración 27 Carrocería

Este enfoque secuencial y jerárquico permitió construir un modelo CAD completamente parametrizado, modular y coherente, garantizando la correcta integración de todos los subsistemas mecánicos, eléctricos y estructurales del vehículo RC, y sentando las bases para las etapas posteriores de simulación CAE, fabricación mediante manufactura aditiva y validación experimental del prototipo.

4.4.6. Análisis CAE aplicado al diseño estructural

Para documentar y validar el cumplimiento del Objetivo Específico 2, se realizaron análisis estructurales utilizando herramientas de ingeniería asistida por computadora (CAE) para verificar que el prototipo del vehículo RC cumpliera con los requisitos de resistencia, rigidez y seguridad establecidos en el diseño. Se empleó el software ANSYS integrado al flujo de trabajo CAD desarrollado en Autodesk Inventor Professional 2023.

El análisis por elementos finitos permitió evaluar el comportamiento estructural de los componentes críticos del prototipo, como el bastidor, los brazos de suspensión y los soportes de transmisión, antes de su fabricación mediante manufactura aditiva. Esta etapa fue esencial para identificar concentraciones de esfuerzo, deformaciones máximas y posibles zonas críticas, reduciendo la necesidad de iteraciones físicas costosas y mejorando la confiabilidad del prototipo final.

Las simulaciones se realizaron con condiciones consistentes de material y carga para garantizar la validez de los resultados. Se utilizó el material PLA, aplicando propiedades mecánicas como

densidad, módulo de Young y resistencia a la tracción de manera uniforme en todas las piezas analizadas. Las condiciones de contorno y carga se definieron según los esfuerzos esperados en la operación normal del vehículo, considerando aceleraciones, cargas del sistema de suspensión y maniobras de giro.

El análisis CAE permitió verificar que las deformaciones se mantuvieran dentro de límites admisibles y que los factores de seguridad fueran compatibles con un uso didáctico seguro, respaldando las decisiones de diseño y asegurando la viabilidad estructural del prototipo.

The image shows two screenshots from the ANSYS Engineering Data software. The top screenshot displays the 'Outline of Schematic A2: Engineering Data' window, which contains a table of materials. The bottom screenshot displays the 'Properties of Outline Row 3: PLA' window, which contains a detailed table of material properties for PLA.

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	PLA				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
3	Density	2,4	g cm ⁻³		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's Modulus a...			
8	Young's Modulus	3,5	GPa		
9	Poisson's Ratio	0,35			
10	Bulk Modulus	3,8889E+09	Pa		
11	Shear Modulus	1,2963E+09	Pa		
12	Strain-Life Parameters				
20	S-N Curve	Tabular			
24	Tensile Yield Strength	0,06	GPa		
25	Compressive Yield Strength	0,05	GPa		
26	Tensile Ultimate Strength	0,06	GPa		
27	Compressive Ultimate Strength	0,1	GPa		

Ilustración 28 Datos utilizados para las simulaciones CAE en ANSYS

Las simulaciones incluyeron análisis de deformación direccional, factor de seguridad y esfuerzos equivalentes (de von Mises) para cada una de las cinco piezas seleccionadas del prototipo RC. Estas piezas fueron representativas de los componentes clave del sistema de transmisión y del chasis del vehículo. En total, se realizaron simulaciones para las siguientes piezas:

1. Piñón de 51 dientes

2. Eje cardán de transmisión
3. Chasis
4. Brazos inferiores de la suspensión
5. Brazos superiores de la suspensión

Cada una de estas piezas fue modelada y analizada con las mismas propiedades del material PLA y bajo las mismas condiciones de carga, lo que asegura que los resultados sean comparables y representen de manera coherente el comportamiento mecánico del conjunto. Este enfoque unificado de simulación permite una evaluación integral del prototipo, asegurando que todas las piezas sean suficientemente robustas para soportar las cargas esperadas durante su operación en el vehículo RC.

4.4.6.1. Piñón 51 dientes

1. Deformación direccional:

El análisis de la deformación en el eje X muestra que el piñón experimenta una deformación máxima de 0.0070161 mm en las zonas de mayor carga. Las áreas cercanas a los orificios y el borde del piñón presentan las deformaciones más altas, lo que es esperado debido a los puntos de concentración de esfuerzo. El color del mapa de deformación indica que la deformación es homogénea en la mayor parte del piñón, con algunas áreas más estresadas. Esto sugiere que el material podría sufrir una ligera flexión en condiciones de alta carga.

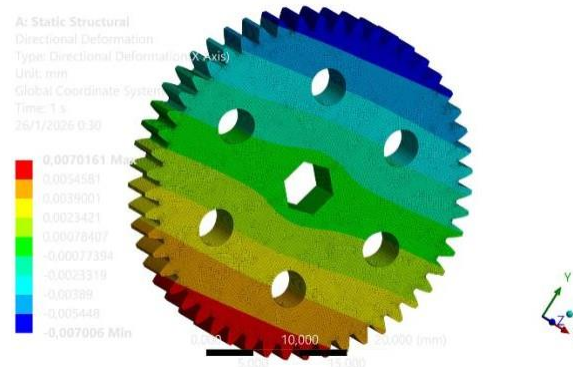


Ilustración 29 Deformación direccional Piñón 51 dientes

2. Factor de seguridad:

El factor de seguridad en la simulación es elevado, con un valor máximo de 15, lo que indica que el piñón tiene un amplio margen de seguridad ante las cargas aplicadas. Esto sugiere que

el material (PLA) no está cerca de su límite de fallo bajo las condiciones simuladas, lo que es positivo en términos de durabilidad y confiabilidad del componente.

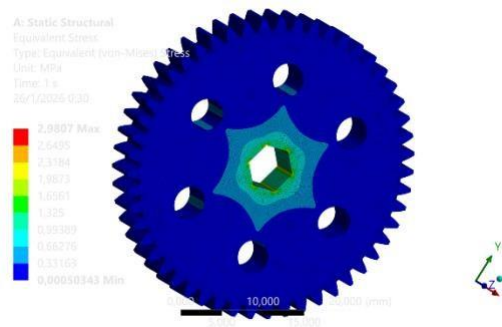


Ilustración 30 Factor de seguridad Piñón 51 dientes

3. Esfuerzo equivalente (von Mises):

El esfuerzo equivalente máximo observado es de 2.98 MPa, lo cual está muy por debajo de los límites de resistencia del PLA (que típicamente oscila entre 50 y 60 MPa en su resistencia a la tracción). El perfil de esfuerzos muestra que las áreas con mayor esfuerzo están cerca de las raíces de los dientes del piñón y en las zonas cercanas a los orificios. Este patrón es indicativo de que las cargas en el piñón están siendo distribuidas adecuadamente, con los esfuerzos en un rango seguro para el material utilizado.

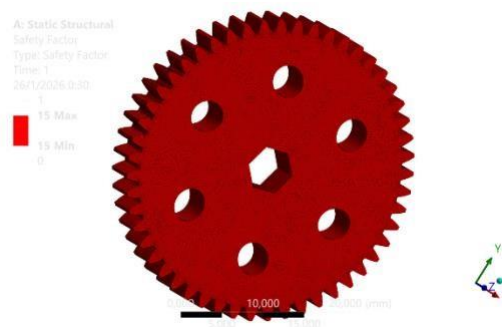


Ilustración 31 Esfuerzo equivalente Piñón 51 dientes

4.4.6.2. Eje hexagonal

1. Deformación total:

La simulación de deformación total muestra que el eje experimenta una deformación máxima de 0.51789 mm. La distribución de la deformación es más pronunciada en las zonas intermedias del eje, lo que sugiere que estas áreas están sometidas a mayor carga o estrés. La forma de la deformación indica que las zonas más cercanas a los soportes del eje permanecen relativamente estables, mientras que el centro y las extremidades muestran más flexión.

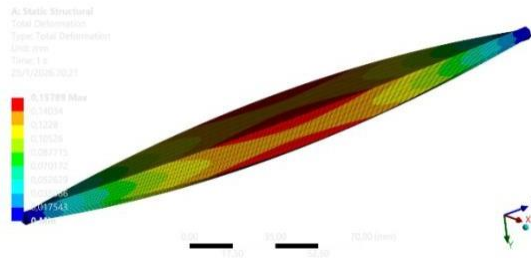


Ilustración 32 Deformación total del eje

2. Esfuerzo equivalente (von Mises):

El esfuerzo equivalente máximo alcanza los 5.7684 MPa, lo que está dentro de los límites de resistencia para materiales comunes en aplicaciones estructurales. El perfil de esfuerzos muestra que las áreas con mayor tensión están en las partes media y cercana a los extremos, donde las fuerzas pueden concentrarse debido a la geometría y el apoyo del eje. Estas concentraciones no parecen superar los valores de resistencia del material, lo que sugiere que el eje está diseñado correctamente para soportar las cargas aplicadas.

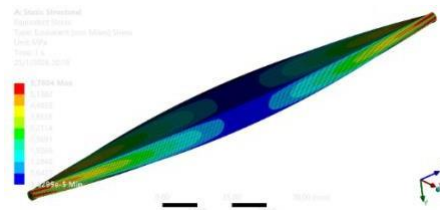


Ilustración 33 Esfuerzo equivalente del eje

3. Factor de seguridad:

El factor de seguridad es extremadamente alto, alcanzando un valor máximo de 15, lo que indica que el eje tiene un amplio margen de seguridad. Este factor sugiere que el material utilizado es adecuado para las cargas esperadas, y el eje está diseñado para ser robusto frente a posibles fallos o deformaciones excesivas.

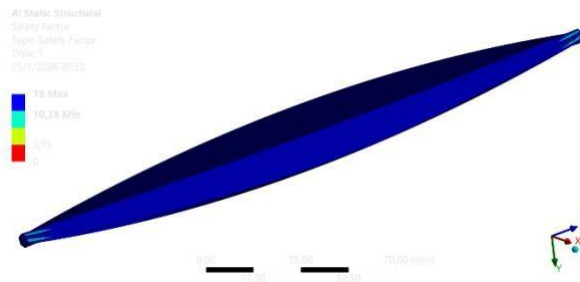


Ilustración 34 Factor de seguridad del eje

4.4.6.3. Brazo inferior de suspensión

1. Deformación total:

La simulación muestra una deformación máxima de 0,066022 mm, localizada principalmente en el extremo del brazo donde se encuentra el orificio de unión (zona roja). Esto confirma que el brazo trabaja predominantemente a flexión, y que la mayor “apertura” o desplazamiento ocurre en el punto más alejado de la restricción. En el resto del componente la deformación se mantiene baja (zonas azules/verde-azul), lo que indica una rigidez global adecuada para el prototipo.

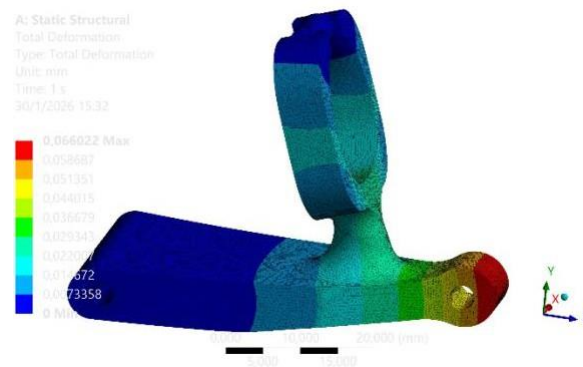


Ilustración 35 Deformación total del brazo inferior

2. Esfuerzo equivalente (von Mises):

El esfuerzo máximo alcanza 15,664 MPa, concentrándose en cambios de sección y radios/fillets cercanos al ojo del brazo (alrededor del agujero y transición geométrica). Este patrón es típico: los concentradores de esfuerzo aparecen en discontinuidades geométricas y zonas de carga puntual. Aun así, el nivel de esfuerzo permanece dentro de un rango compatible con PLA+ para condiciones de carga moderadas, sin evidenciar un riesgo inmediato de falla por sobreesfuerzo bajo el caso analizado.



Ilustración 36 Esfuerzo equivalente del brazo inferior

3. Factor de seguridad:

El factor de seguridad mínimo es 3,8306 (mientras que el máximo llega a 15). Esto significa que, incluso en la zona más exigida, el brazo conserva un margen de seguridad cómodo para un prototipo didáctico impreso en 3D. En términos prácticos, el rediseño mantiene el componente trabajando lejos de su límite para el escenario de carga simulado.



Ilustración 37 Factor de seguridad del brazo inferior

4.4.6.4. Brazo superior de suspensión

1. Deformación total:

El análisis de deformación total muestra que el máximo desplazamiento es de 0.39918 mm, y se concentra principalmente en las zonas cercanas al extremo del brazo, donde se generan las mayores fuerzas. La distribución de la deformación sugiere que las áreas cercanas a las uniones del brazo, como el punto de conexión con el eje, experimentan una mayor flexión bajo las cargas aplicadas. Las zonas de color rojo indican los puntos con mayor deformación, lo que podría indicar áreas críticas para la resistencia estructural.

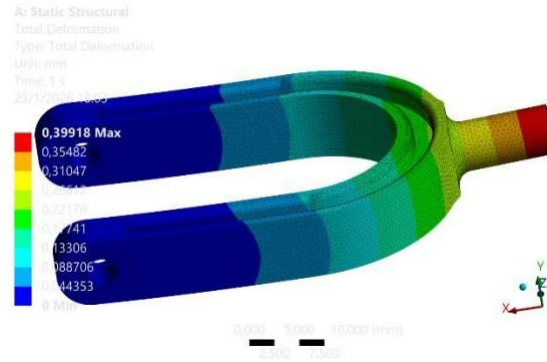


Ilustración 38 Deformación total del brazo superior

2. Esfuerzo equivalente (von Mises):

El esfuerzo máximo obtenido es de 8.305 MPa, con una distribución de esfuerzos más alta en las zonas cercanas al centro del brazo y en el área de las fijaciones. Esto sugiere que las áreas del brazo donde se generan concentraciones de esfuerzos son las más críticas, pero el valor máximo se mantiene por debajo del límite de resistencia del material PLA. El análisis muestra que, aunque las concentraciones de esfuerzo están presentes, el componente parece estar dentro de sus límites operativos.

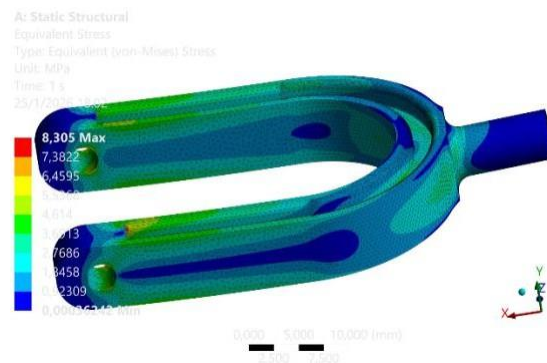


Ilustración 39 Esfuerzo equivalente del brazo superior

3. Factor de seguridad:

El factor de seguridad alcanzó un valor máximo de 15, lo que indica que el brazo superior de suspensión tiene un amplio margen de seguridad bajo las condiciones de carga simuladas. Este factor es adecuado para garantizar que el componente no experimentará fallos por esfuerzos excesivos en las condiciones previstas, demostrando que el diseño es robusto frente a las cargas aplicadas.



Ilustración 40 Factor de seguridad del brazo superior

4.4.6.5. Chasis

1. Deformación total:

La simulación muestra una deformación máxima de 0.61613 mm, que ocurre en la parte central del chasis. Esto indica que el chasis está experimentando una flexión debido a las cargas aplicadas. Las áreas cercanas a las conexiones del chasis presentan la mayor deformación, lo que es esperado en las zonas donde se distribuyen las fuerzas. Esta deformación es relativamente baja, lo que sugiere que el material está operando dentro de los límites estructurales.

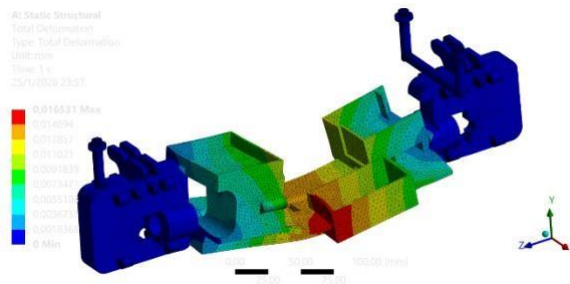


Ilustración 41 Deformación total del chasis

2. Esfuerzo equivalente (von Mises):

El esfuerzo máximo registrado es de 8.305 MPa, con una distribución de esfuerzos que indica concentración en las zonas cercanas a las conexiones y a las partes más delgadas del chasis. Esto puede ser una indicación de que esas áreas están sometidas a esfuerzos más elevados, aunque no se alcanzan los valores críticos del material PLA. La distribución de esfuerzo parece uniforme, lo que sugiere que las cargas están distribuidas de manera razonable.

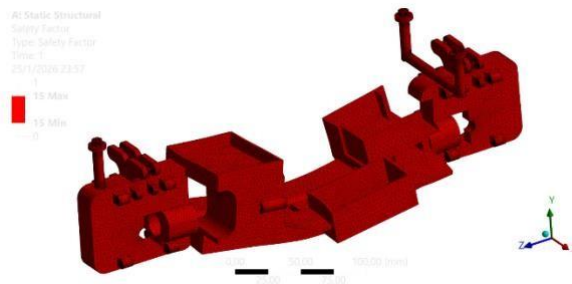


Ilustración 42 Esfuerzo equivalente del chasis

3. Factor de seguridad:

El factor de seguridad es muy alto, alcanzando un valor máximo de 15. Esto indica que el diseño del chasis tiene un margen de seguridad muy amplio y no presenta riesgos de fallo bajo las condiciones de carga simuladas. Este alto factor de seguridad demuestra que el componente es robusto y está bien diseñado para soportar las cargas operativas sin problemas.

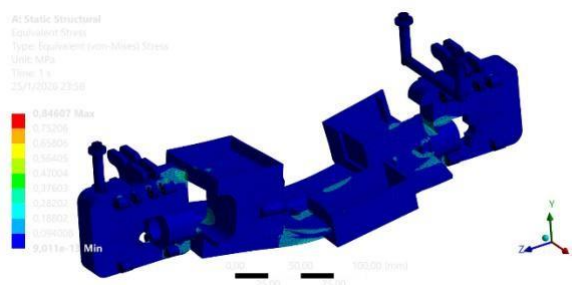


Ilustración 43 Factor de seguridad del chasis

Las condiciones de carga para las simulaciones fueron definidas de la siguiente manera:

- Cargas estáticas debido al peso del vehículo y componentes.
- Cargas dinámicas equivalentes relacionadas con aceleraciones longitudinales y laterales durante maniobras de arranque, frenado y giros.
- Cargas de impacto moderadas simuladas en zonas de contacto del chasis y la suspensión, representando irregularidades del terreno y obstáculos pequeños.

En la definición de las condiciones de frontera, se restringieron los grados de libertad en los puntos de contacto con el suelo y en las interfaces de montaje del prototipo, con el objetivo de representar de forma aproximada el comportamiento de los ensamblajes atornillados y de las uniones articuladas presentes en el sistema. Estas restricciones permitieron simular de manera coherente la transferencia de cargas entre los distintos subsistemas del vehículo durante su operación normal.

Para la discretización del modelo, se generaron mallas refinadas en las zonas consideradas críticas, tales como las uniones entre los brazos de suspensión y el chasis, así como en los soportes de rodamientos y puntos de anclaje de la transmisión. Esta estrategia de mallado permitió mejorar la precisión de los resultados numéricos en regiones con altas concentraciones de esfuerzo, sin incrementar de manera innecesaria el costo computacional del análisis.

Los resultados obtenidos se analizaron a partir de la distribución de esfuerzo equivalente de von Mises, las deformaciones máximas y los factores de seguridad asociados a cada componente evaluado. En todos los casos, los esfuerzos máximos se mantuvieron por debajo del límite admisible del material PLA+, registrándose factores de seguridad superiores a 1,5 en las zonas más solicitadas. Estos valores resultan adecuados para un prototipo didáctico sometido a cargas moderadas y a ciclos de operación repetitivos dentro de un entorno académico.

Adicionalmente, se evaluó la rigidez global del chasis, verificando que las deformaciones obtenidas bajo las condiciones de carga simuladas no comprometieran la alineación del sistema de suspensión ni la precisión del sistema de transmisión. Los desplazamientos máximos se mantuvieron dentro de rangos aceptables, garantizando el correcto engranaje de los trenes de engranajes y la estabilidad dimensional de los soportes de los componentes electrónicos.

Con base en los resultados del análisis CAE, se documentan los ajustes locales realizados en la geometría, tales como el incremento de espesores en nervaduras críticas, el redondeo de zonas con concentradores de esfuerzo y la redistribución de material en regiones sometidas a mayores cargas. Estas modificaciones permitieron optimizar el comportamiento estructural del prototipo sin incrementar significativamente su masa total ni comprometer su fabricación mediante impresión 3D.

En síntesis, los análisis CAE aplicados permitieron validar el comportamiento estructural del prototipo RC, confirmando que los componentes diseñados son capaces de soportar las condiciones de operación previstas con un nivel adecuado de seguridad y rigidez. Esta etapa documentada constituyó un elemento clave en la transición del diseño conceptual a la fabricación física del vehículo, fortaleciendo la confiabilidad técnica del prototipo desarrollado y su idoneidad como recurso didáctico.

4.4.7. Selección de materiales y parámetros de impresión

La selección de materiales y de los parámetros de impresión constituyó un aspecto clave para garantizar que los componentes del vehículo RC presentaran un equilibrio adecuado entre resistencia mecánica, precisión dimensional y facilidad de fabricación, en concordancia con los objetivos didácticos y de reproducibilidad del prototipo. Dado que la fabricación se realizó mediante tecnología de manufactura aditiva por deposición de material fundido (FDM), se seleccionó el material PLA+, debido a su bajo costo, facilidad de impresión y adecuada estabilidad dimensional.

El PLA+ ofrece una combinación favorable de resistencia mecánica y rigidez para aplicaciones estructurales sometidas a cargas moderadas, lo cual lo hace apropiado para prototipos didácticos utilizados en entornos académicos. Además, su baja contracción térmica y buena adherencia entre capas contribuyen a reducir deformaciones durante el proceso de impresión, mejorando la calidad final de las piezas fabricadas.

En cuanto a los parámetros de impresión, se estableció una altura de capa de 0,2 mm, valor que permite lograr un compromiso adecuado entre calidad superficial y tiempo de fabricación. El relleno interno se definió en un 35 %, empleando patrones de tipo gyroid o cúbico, los cuales proporcionan una buena rigidez estructural sin incrementar de manera significativa la masa del componente ni el tiempo total de impresión. Adicionalmente, en zonas críticas sometidas a mayores solicitaciones mecánicas —como los soportes de suspensión y los puntos de anclaje al chasis— se incorporaron refuerzos geométricos definidos directamente desde el modelo CAD.

La orientación de impresión de las piezas fue optimizada con el objetivo de maximizar la resistencia en las direcciones de mayor carga y minimizar la necesidad de estructuras de soporte, lo que permitió mejorar la calidad superficial y reducir el postprocesado. Asimismo, se adoptaron tolerancias dimensionales de $\pm 0,5$ mm, compatibles con las capacidades típicas de impresoras FDM de escritorio, garantizando un ensamblaje adecuado con componentes comerciales sin requerir operaciones de mecanizado posterior.

En conjunto, la selección del material y de los parámetros de impresión documentados permitió obtener componentes estructuralmente confiables, dimensionalmente precisos y fácilmente reproducibles, reforzando la viabilidad del prototipo como herramienta didáctica y su adecuación para futuras prácticas académicas.

4.4.8. Proceso de manufactura aditiva

El proceso de manufactura aditiva del prototipo didáctico de vehículo RC se documenta a partir de la aplicación de la tecnología de deposición de material fundido (FDM), siguiendo una metodología estandarizada orientada a garantizar la consistencia dimensional, la repetibilidad del proceso de fabricación y la compatibilidad con entornos académicos. Este enfoque permitió obtener componentes funcionales con características mecánicas y geométricas adecuadas para su posterior ensamblaje y validación experimental.

El proceso comprendió de manera secuencial las siguientes etapas: preparación de los archivos digitales, configuración de los parámetros de impresión, fabricación física de las piezas, inspección dimensional y verificación funcional preliminar. La preparación de los archivos incluyó la exportación de los modelos CAD a formato STL, así como su procesamiento en software de laminado (slicer), donde se definieron los parámetros de impresión previamente establecidos.

Durante la fabricación, se mantuvieron condiciones de impresión controladas con el fin de asegurar una adecuada adhesión entre capas y minimizar defectos asociados al proceso FDM, tales como deformaciones o falta de material. Una vez impresas, las piezas fueron sometidas a una inspección visual y dimensional básica para verificar el cumplimiento de las tolerancias definidas y su compatibilidad con el ensamblaje del prototipo.

Finalmente, se realizó una verificación funcional preliminar de los componentes fabricados, enfocada en comprobar su correcta integración con los subsistemas mecánicos del vehículo, antes de proceder al ensamblaje completo. Esta documentación del proceso de manufactura aditiva permite establecer una guía clara y reproducible para la fabricación del prototipo en futuras prácticas académicas.

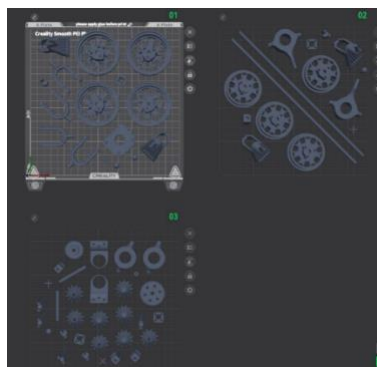


Ilustración 44 Vista preliminar de impresión 3D

En primer lugar, los modelos CAD desarrollados en Autodesk Inventor Professional 2023 fueron exportados en formato STL, cuidando que la resolución geométrica fuera suficiente para preservar superficies funcionales, alojamientos de rodamientos, orificios de fijación y zonas de acoplamiento entre piezas. Posteriormente, estos archivos fueron procesados en el software de laminado, donde se configuraron los parámetros de impresión previamente definidos, incluyendo el uso de material PLA+, altura de capa de 0,2 mm, relleno del 35 %, orientación optimizada en función de los esfuerzos y tolerancias compatibles con el ensamblaje mecánico.

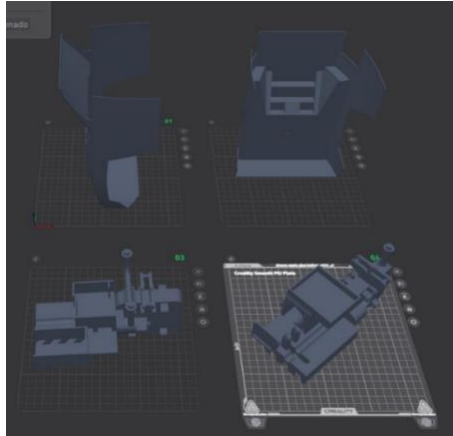


Ilustración 45 Vista preliminar de impresión del bastidor

Durante esta etapa, cada componente fue evaluado de manera individual con el fin de minimizar la necesidad de estructuras de soporte, reducir deformaciones térmicas y garantizar una adecuada calidad superficial en zonas críticas. En piezas estructurales de mayor tamaño, como el chasis principal, se implementaron estrategias de impresión por secciones y refuerzos integrados, lo que permitió mantener la estabilidad dimensional sin comprometer la integridad mecánica del conjunto.

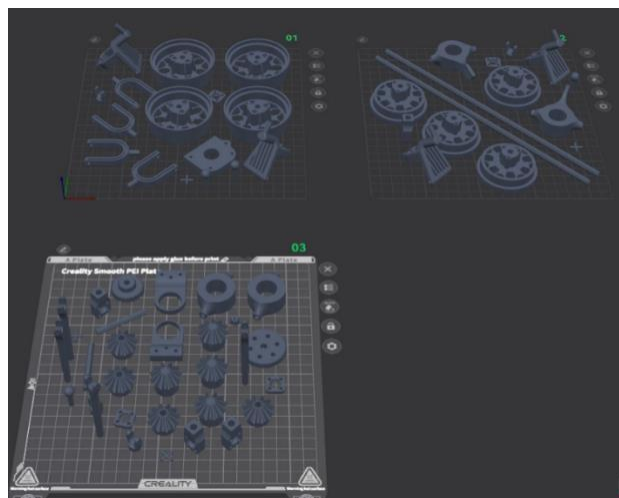


Ilustración 46 Vista preliminar de impresión 3D de manguetas, soportes, diferenciales y cardanes.

Una vez definidos los parámetros de impresión, se procedió a la fabricación física de las piezas, manteniendo condiciones controladas de temperatura de cama y boquilla, conforme a las recomendaciones del fabricante del filamento PLA+. Durante la impresión se realizaron inspecciones visuales periódicas, con el objetivo de detectar defectos tempranos como delaminación entre capas, falta de adherencia a la cama o irregularidades geométricas, permitiendo intervenir oportunamente y evitar el desperdicio de material.



Ilustración 47 Reimpresión de elementos ajustados

Finalizada la impresión, se ejecutó una etapa de postprocesado, que incluyó la remoción de estructuras de soporte, limpieza de superficies de contacto, eliminación de rebabas y, en algunos casos, calibración ligera de orificios mediante herramientas manuales, sin recurrir a mecanizado intensivo. Este procedimiento permitió asegurar la correcta inserción de rodamientos, ejes metálicos, tornillería y componentes electrónicos estándar.



Ilustración 48 Elementos manufacturados

Finalizada la impresión, se ejecutó una etapa de postprocesado, que incluyó la remoción de estructuras de soporte, limpieza de superficies de contacto, eliminación de rebabas y, en algunos casos, calibración ligera de orificios mediante herramientas manuales, sin recurrir a procesos de mecanizado intensivo. Este procedimiento permitió asegurar la correcta inserción de rodamientos, ejes metálicos, tornillería y componentes electrónicos estándar.



Ilustración 49 Elementos manufacturados

Posteriormente, se llevó a cabo una verificación dimensional preliminar, utilizando instrumentos de medición básicos, como calibrador vernier y reglas metálicas, con el objetivo de confirmar que las dimensiones críticas se encontraran dentro de las tolerancias establecidas de $\pm 0,5$ mm. Las piezas que no cumplieron este criterio fueron reimprimadas, ajustando parámetros de orientación, temperatura o densidad de relleno según fue necesario.

Finalmente, los componentes aprobados fueron almacenados y organizados por subsistemas de estructura, suspensión, transmisión, dirección y electrónica, facilitando la posterior etapa de ensamblaje. Este enfoque modular permitió optimizar el proceso de construcción del prototipo y sentó las bases para su replicación sistemática en futuros contextos académicos.

4.4.9. Ensamblaje del prototipo

El ensamblaje del prototipo didáctico de vehículo RC se realizó siguiendo una secuencia estructurada por subsistemas, con el objetivo de garantizar la coherencia geométrica, la correcta integración funcional y la facilidad de mantenimiento, en concordancia con el enfoque modular adoptado desde la etapa de diseño. Esta metodología permitió, además, verificar progresivamente el ajuste dimensional de las piezas fabricadas mediante manufactura aditiva y su compatibilidad con los componentes comerciales seleccionados.

En primer lugar, se ensambló el sistema estructural, comenzando por el chasis principal y los soportes integrados para los subsistemas de suspensión, transmisión y electrónica. En esta etapa se verificó la alineación de los puntos de anclaje, la planicidad de la base estructural y la correcta inserción de la tornillería estándar, asegurando que las tolerancias dimensionales obtenidas mediante impresión 3D fueran compatibles con el ensamblaje sin necesidad de operaciones de ajuste mayores.

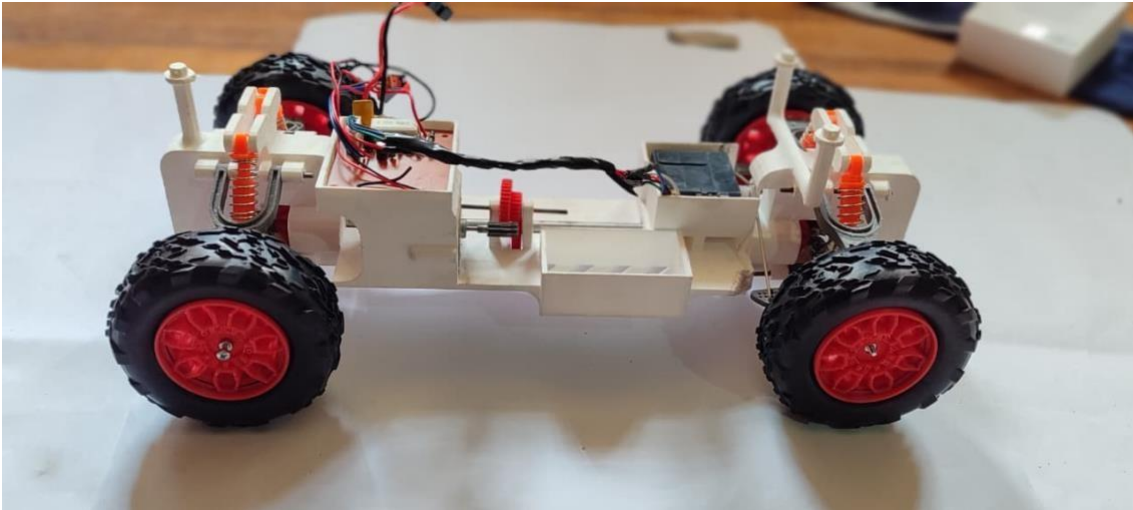


Ilustración 50 Ensamblado de chasis

Posteriormente, se procedió al montaje del sistema de suspensión independiente de doble brazo, incorporando los brazos superiores e inferiores, los elementos de articulación, los amortiguadores y las manguetas. Durante este proceso se verificó el recorrido de suspensión, la simetría entre ambos lados del vehículo y la ausencia de interferencias geométricas, garantizando la libertad de movimiento y la correcta transmisión de cargas hacia el chasis.

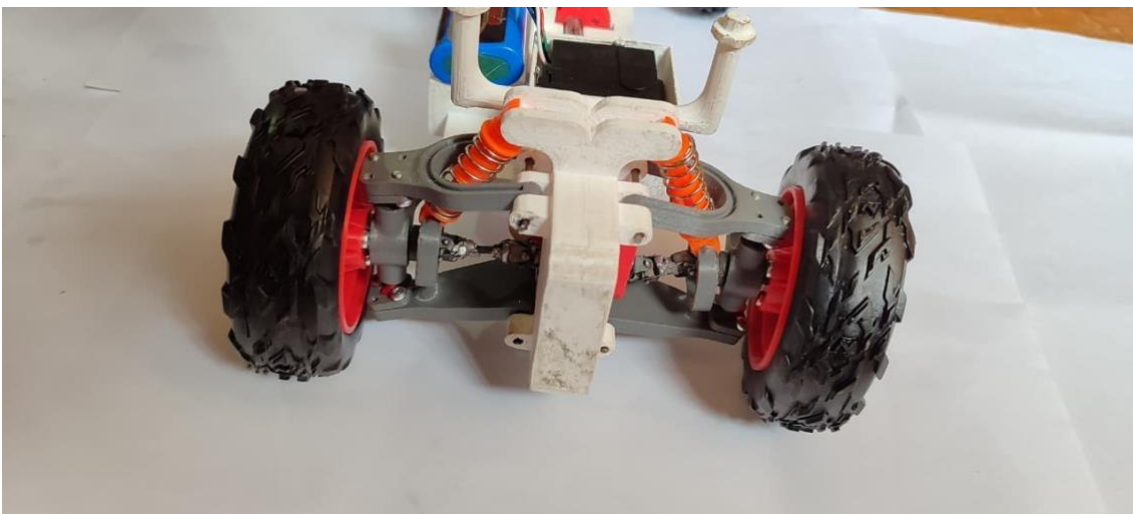


Ilustración 51 Ensamblado de suspensión

A continuación, se ensambló el sistema de transmisión, incluyendo el motor eléctrico, los engranajes rectos, el diferencial cónico, los ejes de transmisión y las juntas cardán. Se prestó especial atención a la alineación entre engranajes, al correcto engrane del diferencial y a la continuidad cinemática entre los elementos rotativos, con el fin de minimizar pérdidas por fricción, vibraciones y desgaste prematuro.



Ilustración 52 Ensamblado de la transmisión

Seguidamente, se integró el sistema de dirección, instalando el servomotor, el brazo de dirección, las barras de acoplamiento y los mecanismos de giro en las manguetas. En esta fase se ajustaron las longitudes de las barras y las posiciones angulares iniciales para garantizar simetría en el giro, respuesta lineal al comando del transmisor y ausencia de holguras excesivas que pudieran afectar la precisión de maniobra.

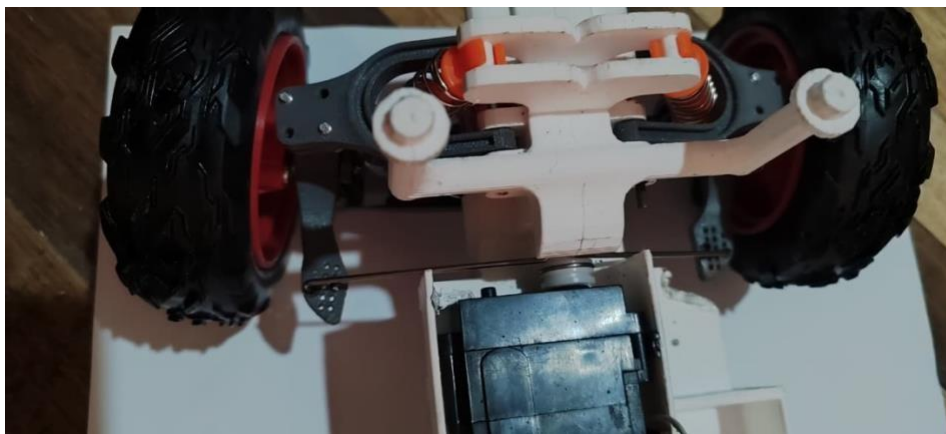


Ilustración 53 Ensamblado de la dirección

Posteriormente, se realizó la instalación del sistema eléctrico y electrónico, que incluyó la batería, el controlador electrónico de velocidad (ESC), el cableado de potencia y señal, así como los elementos de sujeción y protección. Se verificó la correcta polaridad de las conexiones, la compatibilidad de las tensiones nominales y la fijación segura de los componentes, con el fin de evitar desplazamientos durante la operación dinámica del vehículo.



Ilustración 54 Ensamblado de batería y ESC

Finalmente, se montó la carrocería, verificando su compatibilidad dimensional con la estructura del chasis y su correcta sujeción mediante sistemas desmontables. Esta configuración permite un acceso rápido a los subsistemas internos para tareas de inspección, mantenimiento o sustitución de componentes durante prácticas académicas.



Ilustración 55 Ensamblado de la carrocería

Durante todo el proceso de ensamblaje se realizaron verificaciones funcionales preliminares, tales como el libre giro de las ruedas, la respuesta del sistema de dirección, la continuidad del tren de transmisión y la adecuada distribución de masas. Estas comprobaciones permitieron identificar y corregir oportunamente interferencias geométricas menores, holguras no deseadas o desalineaciones, antes de proceder a las etapas de validación experimental formal.

Este ensamblaje estructurado y modular del prototipo permitió consolidar un sistema funcional, robusto y coherente con los objetivos didácticos del proyecto, garantizando al mismo tiempo facilidad de replicación, mantenimiento y adaptación para futuras aplicaciones académicas y experimentales.

4.4.9. Control dimensional y verificación geométrica

Una vez finalizado el ensamblaje del prototipo didáctico de vehículo RC, se llevó a cabo una etapa de control dimensional y verificación geométrica, con el objetivo de confirmar que las dimensiones reales del sistema fabricado coincidieran con las especificaciones definidas en el modelo CAD y con los parámetros base de diseño establecidos previamente. Esta etapa resultó fundamental para garantizar la interoperabilidad entre componentes, el correcto funcionamiento mecánico del conjunto y la validez de los ensayos experimentales posteriores.

El control dimensional se realizó empleando instrumentos de medición convencionales, principalmente cinta métrica flexible, calibrador vernier y regla metálica, los cuales permitieron verificar dimensiones globales y críticas tales como ancho total del vehículo, longitud total, distancia entre ejes, ancho de vía, altura total, así como la posición relativa de los puntos de anclaje de suspensión y transmisión. Estas mediciones se compararon directamente con las dimensiones nominales obtenidas del modelo CAD desarrollado en Autodesk Inventor Professional 2023.

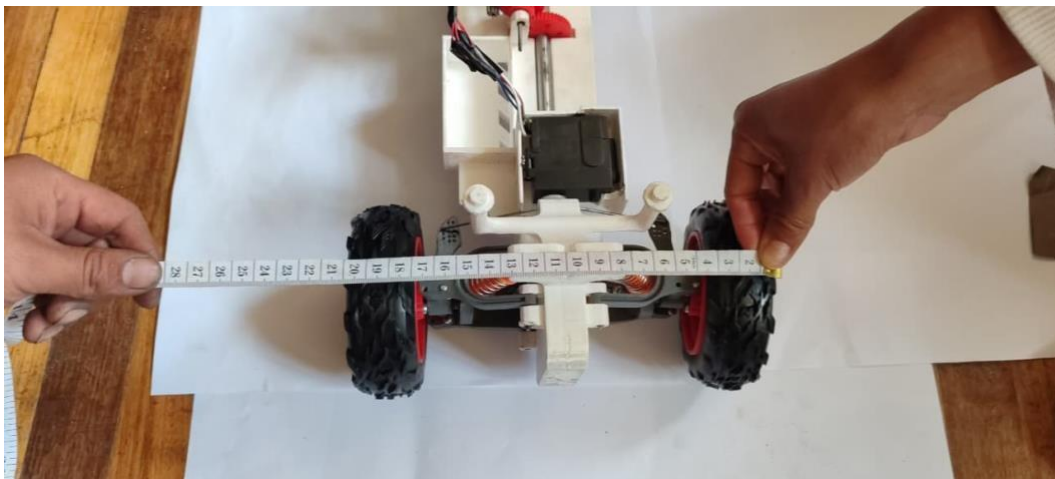


Ilustración 56 Verificación dimensional del ancho

A partir de las mediciones realizadas, se comprobó que las dimensiones globales del prototipo (largo, ancho y alto) se encuentran por debajo de los límites máximos establecidos en la plataforma F1TENTH, lo cual valida la coherencia del diseño a escala y confirma que el prototipo se mantiene dentro de rangos dimensionales ampliamente aceptados para plataformas vehiculares educativas de investigación y docencia. Esta verificación resulta relevante desde el punto de vista académico, ya que demuestra que el diseño no presenta sobredimensionamientos que puedan afectar su maniobrabilidad, estabilidad o replicabilidad.



Ilustración 57 Verificación dimensional del ancho

Se adoptó como criterio de aceptación una tolerancia dimensional general de $\pm 0,5$ mm, coherente con las capacidades típicas del proceso de impresión FDM y con las recomendaciones técnicas empleadas durante el diseño. Los resultados obtenidos mostraron que la mayoría de las dimensiones funcionales se encontraron dentro de este rango, permitiendo un ensamblaje adecuado sin necesidad de mecanizado posterior, salvo ajustes menores localizados en orificios específicos mediante herramientas manuales.

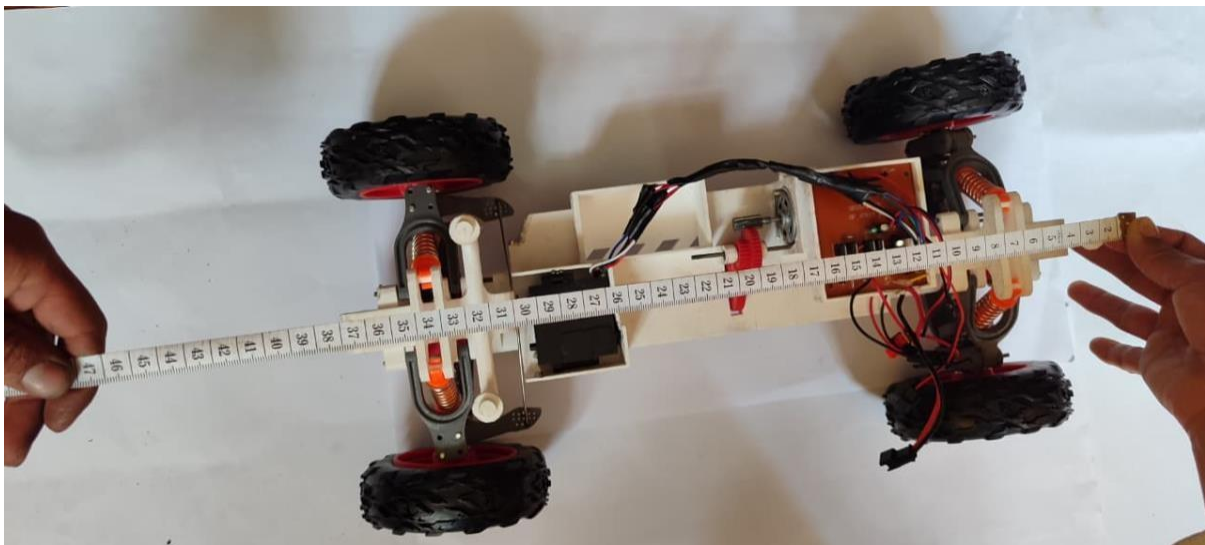


Ilustración 58 Verificación dimensional del largo

De manera complementaria, se realizó la verificación de masa total del prototipo, utilizando una balanza mecánica calibrada. Los resultados evidenciaron que el peso total del vehículo ensamblado se mantiene por debajo del límite máximo considerado en plataformas tipo F1TENTH, lo cual contribuye positivamente al desempeño dinámico del vehículo, reduciendo

cargas sobre el sistema de suspensión y transmisión, y favoreciendo un comportamiento estable durante las pruebas experimentales.

Adicionalmente, se evaluó la geometría funcional del conjunto, verificando la alineación entre ruedas delanteras y traseras, el paralelismo de ejes, la simetría del sistema de suspensión y la perpendicularidad de los planos de montaje del motor y del diferencial. Estas verificaciones se realizaron tanto de forma dimensional como mediante inspección visual funcional, observando el comportamiento cinemático del sistema durante la rotación manual de las ruedas y el accionamiento del sistema de dirección.

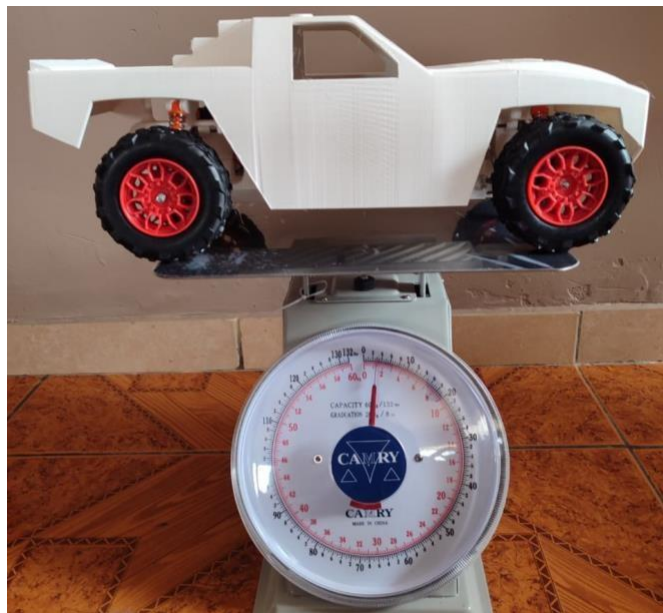


Ilustración 59 Verificación dimensional del peso

Asimismo, se comprobó la distribución relativa de masas del conjunto, analizando la ubicación de los componentes mecánicos y electrónicos sobre el chasis, con el fin de asegurar que el prototipo físico no presentara desplazamientos significativos del centro de masas respecto al modelo CAD que pudieran afectar la estabilidad lateral o la respuesta dinámica del vehículo.

En los casos en los que se detectaron desviaciones dimensionales cercanas al límite de tolerancia, se realizaron ajustes de ensamblaje o reimpresión localizada de componentes, optimizando parámetros de orientación o compensación dimensional en el software de laminado. Estas acciones permitieron cerrar las brechas entre el diseño digital y el prototipo físico, reforzando la confiabilidad geométrica del sistema.

4.4.10. Arquitectura general del sistema

La arquitectura general del prototipo didáctico de vehículo RC se definió bajo un enfoque modular, con el objetivo de facilitar su comprensión, ensamblaje, mantenimiento y eventual modificación en contextos académicos. Esta organización permite que cada subsistema pueda ser analizado, sustituido o rediseñado de forma independiente, sin comprometer el funcionamiento global del vehículo, lo cual resulta especialmente útil para prácticas de laboratorio orientadas al aprendizaje por experimentación.

De manera conceptual, el sistema completo puede representarse mediante un diagrama de bloques en el que se identifican cinco subsistemas principales: propulsión, dirección, energía, chasis-estructura y control remoto. Estos subsistemas interactúan entre sí a través de interfaces mecánicas, eléctricas y funcionales claramente definidas, lo que asegura la coherencia del diseño y la trazabilidad entre los requerimientos funcionales y las soluciones constructivas implementadas.

El subsistema de propulsión está conformado por el motor eléctrico, el controlador electrónico de velocidad (ESC), la transmisión por engranajes y el diferencial, encargados de transformar la energía eléctrica almacenada en la batería en movimiento rotacional de las ruedas motrices. Este subsistema se acopla mecánicamente al chasis a través de soportes estructurales impresos y se interconecta eléctricamente con el sistema de energía y el sistema de control remoto mediante el ESC.

El subsistema de dirección incluye el servo, los brazos de dirección, las manguetas y los elementos de enlace mecánico responsables de orientar las ruedas delanteras según las órdenes del usuario. Este conjunto se integra estructuralmente al chasis y recibe señales de control desde el receptor, estableciendo una interfaz eléctrica directa con el sistema de control remoto y una interfaz mecánica con el sistema de suspensión y rodaje.

El subsistema de energía está constituido principalmente por la batería, el cableado de distribución y los dispositivos de protección eléctrica, encargados de suministrar energía estable y segura a los sistemas de propulsión, dirección y control. Este subsistema se integra al chasis mediante alojamientos específicos que garantizan una adecuada fijación y una distribución de masas favorable al comportamiento dinámico del vehículo.

El subsistema estructural o chasis cumple la función de soporte físico de todos los componentes, proporcionando rigidez, alineación geométrica y protección frente a cargas

dinámicas e impactos leves. Además, actúa como interfaz común entre todos los subsistemas, asegurando la correcta transmisión de esfuerzos mecánicos y la estabilidad global del conjunto.

Finalmente, el subsistema de control remoto comprende el transmisor, el receptor y las conexiones de señal hacia el ESC y el servo de dirección. Este subsistema permite la interacción entre el usuario y el vehículo, estableciendo un lazo de control manual que habilita la realización de ensayos de desempeño longitudinal, maniobrabilidad y estabilidad.

Las interfaces entre subsistemas se definen de forma explícita en tres niveles: mecánico (uniones atornilladas, apoyos y alojamientos impresos), eléctrico (conectores, cables de potencia y señal) y funcional (relación entre comandos del usuario, respuesta del vehículo y comportamiento dinámico observado). Esta estructura modular y claramente jerarquizada constituye la base para la documentación técnica del prototipo y facilita su replicación, adaptación y uso en futuras prácticas académicas.

4.4.11 Selección y justificación de componentes

La selección de los componentes del prototipo didáctico de vehículo RC se realizó considerando criterios de funcionalidad, compatibilidad entre subsistemas, disponibilidad comercial, costo accesible y adecuación al enfoque académico del proyecto. Asimismo, se tomaron en cuenta las restricciones normativas asociadas al reglamento F1TENTH, así como las limitaciones y oportunidades derivadas del diseño estructural basado en manufactura aditiva.

Cada componente fue seleccionado con el propósito de garantizar un desempeño adecuado del prototipo, facilitar su integración mecánica y eléctrica, y permitir su comprensión y manipulación por parte de estudiantes en un entorno de aprendizaje. En este sentido, se priorizaron soluciones técnicas robustas, ampliamente documentadas y compatibles con prácticas de laboratorio orientadas al análisis de sistemas vehiculares a escala.

En los siguientes apartados se justifica la elección de cada subsistema principal, detallando sus especificaciones técnicas relevantes, los criterios de selección empleados y las ventajas frente a alternativas disponibles, con el objetivo de proporcionar una base técnica clara que respalde las decisiones de diseño adoptadas y sirva como referencia para la replicación del prototipo en futuras aplicaciones académicas.

F1TENTH: <https://bu2024-race.f1tenth.org/rules.html>

4.4.11.1. Sistema de radio profesional



Ilustración 60 Sistema de radio profesional

Nota: Es un sistema de radio de 2.4GHz diseñado para vehículos de superficie

Los sistemas profesionales (como marcas Futaba o Sanwa) ofrecen latencias de microsegundos, pantallas táctiles y docenas de ajustes de telemetría. Sin embargo, para un proyecto de diseño propio o para entusiastas, el GoolRC TG3 es muy capaz porque utiliza tecnología AFHDS (Sistema Digital de Salto de Frecuencia Automático), lo que evita interferencias con otros conductores.

Tabla 14 Funciones técnicas de los elementos del sistema de radio

Componente	Función técnica
Transmisor (Pistola)	Convierte el movimiento mecánico del volante y el gatillo en una señal digital de 2.4GHz.
Receptor (Caja pequeña)	Decodifica la señal y envía pulsos PWM (Modulación por Ancho de Pulsos) a los actuadores.
Canales (3)	CH1: Dirección (Steering), CH2: Acelerador (Throttle), CH3: Auxiliar (Luces, cabrestantes, etc.).
Failsafe	Función de seguridad que detiene el vehículo si se pierde la señal de radio.

El sistema de control seleccionado para el prototipo corresponde a un conjunto de transmisión y recepción de grado comercial modelo GoolRC TG-3, diseñado para el mando a distancia de vehículos terrestres mediante modulación digital en la banda de 2.4 GHz.

El transmisor emplea una arquitectura de tipo "pistola", optimizada para la ergonomía en aplicaciones de dinámica vehicular. Técnicamente, opera bajo el protocolo AFHDS (*Automatic Frequency Hopping Digital System*), el cual garantiza la robustez del enlace mediante el salto de frecuencia. Este método minimiza las colisiones de paquetes de datos y mitiga las interferencias electromagnéticas provenientes de otros dispositivos en el espectro ISM.

- **Canales de Salida:** 3 canales independientes.
- **Interfaz de Control:** Potenciómetros de precisión para dirección (Eje X) y aceleración/frenado (Eje Y).
- **Ajustes de Calibración:** El dispositivo permite la sintonización fina mediante funciones de *Trim* (ajuste de punto neutro) y *Dual Rate* (limitación de fin de carrera), esenciales para la linealidad de la respuesta del sistema.

El receptor de tres canales actúa como la interfaz crítica entre el comando remoto y los actuadores del hardware. Su función principal es la demodulación de la señal de RF para transformarla en señales de Modulación por Ancho de Pulsos (PWM).

- **Protocolo de Salida:** PWM estándar con una frecuencia de refresco de 50 Hz, compatible con servomotores y controladores electrónicos de velocidad (ESC).
- **Mecanismo de Seguridad (Failsafe):** El módulo integra una rutina de seguridad programable que sitúa a los actuadores en una posición predefinida (habitualmente neutro o frenado total) ante una eventual degradación de la relación señal-ruido (SNR) o pérdida crítica de enlace.

Para la operatividad del vehículo bajo este esquema de control, se requiere la implementación de una arquitectura de hardware complementaria:

1. **Actuador de Dirección:** Servomotor de par variable acoplado al canal 1 (CH1).
2. **Etapas de Potencia:** Un controlador de velocidad (ESC) conectado al canal 2 (CH2), encargado de la conmutación de corriente hacia el motor síncrono o asíncrono.
3. **Gestión Energética:** Un banco de baterías (típicamente LiPo) que suministre el voltaje de referencia al receptor a través del circuito eliminador de batería (BEC) integrado en el ESC.

4.4.11.2. Controlador de velocidad electrónico

El ESC (Electronic Speed Controller) es un dispositivo de conmutación de potencia de alta frecuencia diseñado para regular la velocidad, el par motor y la dirección de rotación de un motor eléctrico basándose en señales de control de bajo voltaje.



Ilustración 61 Controlador de velocidad electrónico

A diferencia de un reóstato simple, el ESC emplea Modulación por Ancho de Pulsos (PWM) para variar el voltaje promedio entregado al motor. Mediante la conmutación rápida de transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET), el dispositivo gestiona la energía proveniente de la batería con una eficiencia energética superior al 90%, minimizando las pérdidas por disipación térmica.

El modelo identificado es un controlador para motores Brushless. A diferencia de los motores de corriente continua (DC) convencionales, este componente debe realizar la conmutación electrónica de las fases del motor:

- **Inversión de Fase:** El ESC monitorea la posición del rotor (mediante sensores Hall o detección de fuerza contraelectromotriz - Back EMF) para alternar la polaridad de las bobinas en el momento exacto.
- **Control Trifásico:** Genera ondas de corriente alterna trifásica a partir de una fuente de corriente continua, permitiendo alcanzar regímenes de revoluciones por minuto (RPM) extremadamente altos.

Para garantizar la integridad del sistema robótico, el ESC integra los siguientes sub-módulos técnicos:

1. **Circuito Eliminator de Batería (BEC):** Un regulador de voltaje (habitualmente de 6.0V a 7.4V) que reduce la tensión de la batería principal para alimentar el receptor de radio y los servomotores, eliminando la necesidad de una fuente de alimentación secundaria.
2. **Algoritmo de Frenado Dinámico:** Utiliza la fuerza contraelectromotriz del motor para generar un par resistente, permitiendo la desaceleración controlada del vehículo sin necesidad de frenos mecánicos de fricción.

3. **Protocolos de Protección Térmica y de Bajo Voltaje (LVC):** Sistemas de monitoreo en tiempo real que interrumpen el flujo de corriente si la temperatura de los MOSFET excede los límites operativos o si el voltaje de la celda LiPo desciende por debajo del umbral crítico (típicamente 3.2V por celda) para evitar daños irreversibles en la química de la batería.

4.4.11.3. Motor

El motor seleccionado para el sistema de propulsión de alta eficiencia corresponde a un motor de corriente continua sin escobillas (BLDC, por sus siglas en inglés) de tipo *Inrunner*. Este componente representa la vanguardia en sistemas de conversión de energía electromecánica para vehículos a escala, sustituyendo la conmutación mecánica por una gestión electrónica de fases.



Ilustración 62 Motor sin escobillas CC

A diferencia de los motores convencionales (brushed) de dos hilos, este motor utiliza una interfaz de tres cables conductores correspondientes a las fases del estator.

- **Configuración del Estator:** Los devanados de cobre se encuentran fijados a la carcasa exterior, actuando como el elemento estático que disipa el calor de manera eficiente.
- **Rotor de Imanes Permanentes:** El núcleo giratorio está compuesto por imanes de alta coercitividad (típicamente neodimio), eliminando la necesidad de alimentar el rotor y, por ende, suprimiendo el uso de escobillas y colectores.
- **Mecánica de Rotación:** El flujo de corriente es alternado secuencialmente entre los tres cables por el ESC, generando un campo magnético rotativo que "arrastra" al rotor de imanes permanentes en sincronía.

El modelo identificado posee una clasificación de 3900kV. En el contexto de diseño de ingeniería, este valor es la constante de velocidad del motor:

- **Relación RPM/Voltaje:** El motor desarrollará 3900 revoluciones por minuto por cada voltio aplicado en condiciones de vacío.
- **Optimización Energética:** Al carecer de fricción por escobillas, el motor presenta una eficiencia superior al 90%, permitiendo alcanzar regímenes de giro extremadamente altos con una generación de calor residual mínima.

Como se indica en la nomenclatura del componente ("Waterproof Motor"), el diseño carece de aberturas de ventilación necesarias en motores con escobillas (donde el polvo de carbón debe evacuarse). Esto permite:

1. **Sellado Hermético:** Protección total contra el ingreso de partículas sólidas y líquidos, factor crítico para la durabilidad del prototipo en pruebas de campo.
2. **Reducción de Ruido Electromagnético (EMI):** La ausencia de arcos eléctricos (chispas) en el conmutador garantiza una señal de radiofrecuencia limpia, protegiendo la integridad de los datos en el receptor de 2.4GHz.

4.4.11.4. ESC

El ESC (Electronic Speed Controller) Brushless es un dispositivo de estado sólido diseñado para la gestión de potencia de motores síncronos de imanes permanentes. A diferencia de los controladores para motores con escobillas, este componente actúa como un inversor trifásico de frecuencia variable, transformando la corriente continua (CC) de la batería en una señal de corriente alterna (CA) sintetizada de tres fases.

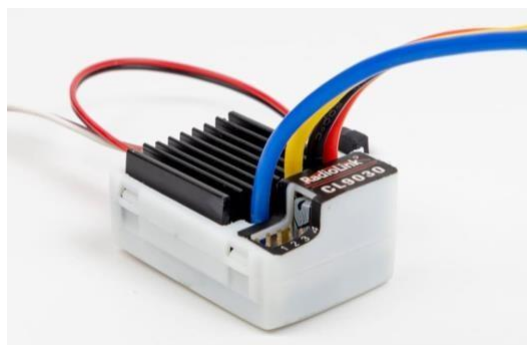


Ilustración 63 ESC para motores brushless

Como se observa en el hardware, el dispositivo cuenta con tres conductores principales de salida (típicamente codificados por colores o etiquetas A, B, C). Esta configuración es imperativa para la operatividad de motores sin escobillas:

- **Inversión de Polaridad Electrónica:** Mediante un puente trifásico de transistores **MOSFET**, el controlador alterna el flujo de energía entre los tres devanados del motor para generar un campo magnético rotatorio.
- **Sincronización de Fase:** El ESC monitorea la posición del rotor mediante la detección de la Fuerza Contraelectromotriz (Back-EMF) en el cable que no está energizado en un instante dado, permitiendo una conmutación precisa sin necesidad de sensores externos.

El diseño del Radiolink CL9030 presenta características críticas para la estabilidad del sistema:

- **Disipador de Calor Pasivo:** La parte superior integra un bloque de aluminio aletado diseñado para maximizar el área superficial.
- **Control por PWM:** El dispositivo interpreta señales de modulación por ancho de pulsos provenientes del receptor típicamente con un periodo de 20ms para determinar el ciclo de trabajo de la potencia entregada al motor.

Además de la etapa de potencia, el ESC integra subsistemas de control fundamentales:

1. **Módulo BEC (Battery Eliminator Circuit):** Regula el voltaje de la batería principal a un nivel constante de 5V o 6V para alimentar el receptor y el servomotor de dirección a través del cable de señal de tres hilos.
2. **Protección Térmica y LVC:** Incorpora algoritmos de corte por bajo voltaje para proteger la química de las baterías LiPo y sensores de temperatura para prevenir fallos catastróficos por sobrecalentamiento.

4.4.11.5. Servomotor de dirección

El servomotor es un dispositivo electromecánico de bucle cerrado que convierte señales de control lógico en movimiento angular preciso. Dentro de la arquitectura del vehículo RC, su función principal es el accionamiento del varillaje de dirección, transformando los comandos de radiofrecuencia en el ángulo de giro de las ruedas directrices.



Ilustración 64 Servomotor

Técnicamente, el servo no es un simple motor, sino un sistema de control automático integrado que consta de cuatro elementos críticos:

1. **Motor de Corriente Continua (DC):** Proporciona la fuerza motriz inicial.
2. **Tren de Engranajes (Reductora):** Visible en la parte superior del eje de salida. Su función es reducir la alta velocidad del motor DC para aumentar significativamente el **par motor (torque)** disponible.
3. **Potenciómetro de Retroalimentación:** Un sensor resistivo acoplado al eje de salida que informa a la electrónica interna la posición angular exacta en todo momento.
4. **Circuito de Control:** Compara la señal PWM entrante del receptor con la posición actual del potenciómetro. Si existe una diferencia (error), el circuito activa el motor hasta que el eje alcanza la posición deseada.

4.4.11.6. Motor máximo permitido

El motor Velineon de 3500 kV es un motor eléctrico brushless de alto rendimiento, ampliamente utilizado en vehículos RC de competición. Se caracteriza por su alta densidad de potencia, elevada eficiencia y capacidad de operar a altas revoluciones, entregando una respuesta rápida y un par adecuado para aplicaciones dinámicas exigentes.

La F1TENTH nos dice que



Ilustración 65 Motor máximo

Su constante de velocidad de 3500 kV indica que el motor es capaz de alcanzar altas RPM por voltio aplicado, lo que lo convierte en uno de los motores más potentes permitidos en este tipo de competencias, siempre que se mantenga dentro de las restricciones reglamentarias de voltaje y control electrónico. La tecnología brushless reduce pérdidas por fricción, mejora la disipación térmica y aumenta la confiabilidad operativa frente a motores con escobillas.

En el contexto académico y competitivo, el motor Velineon 3500 kV permite evaluar escenarios de máximo desempeño dinámico, manteniendo un equilibrio entre potencia, control y seguridad, lo que lo hace especialmente adecuado para plataformas tipo F1TENTH y prototipos didácticos de alto nivel.

4.4.11.7. Baterías

Según la F1TENTH, es recomendable llevar más de una batería de repuesto para las competencias, pero nos da ciertos parámetros, “El motor de tracción debe funcionar con una sola batería de 3S como máximo”, en esta sección, podemos entender que 3S significa 3 celdas en serie, con cada celda LiPo de 3,7 V nominal, entonces, el voltaje máximo permitido al motor es de 11,1 V nominal, lo que limita baterías de 4S, 5S, etc.



Ilustración 66 Baterías

4.4.12 Lista de materiales y herramientas (BOM)

Con el fin de facilitar la replicación del prototipo didáctico de vehículo RC, se elaboró una lista estructurada de materiales (Bill of Materials, BOM) que incluye todos los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos necesarios para su construcción, así como las herramientas requeridas para su fabricación y ensamblaje. Esta información permite planificar adecuadamente los recursos, estimar costos y garantizar la compatibilidad entre los distintos subsistemas del vehículo.

Tabla 15 Lista de materiales y herramientas

Componente	Modelo / Tipo	Función	Cantidad	Especificación clave
Chasis impreso 3D	PLA+, FDM	Soporte estructural del vehículo	1	Escala 1/10, tolerancia ± 0.5 mm
Brazos de suspensión	PLA+, doble brazo	Guiado vertical de ruedas	4	Recorrido ≈ 20 mm
Manguetas	PLA+	Soporte de ruedas delanteras y traseras	4	Compatibles con rodamientos estándar
Aros / Llantas	RC 1/10	Soporte de neumáticos	4	Diámetro acorde a transmisión
Neumáticos	RC 1/10	Contacto con el suelo	4	Alta adherencia en superficie lisa
Motor brushed DC	Tamaño estándar RC	Propulsión	1	7.4 V nominal
ESC	Compatible brushed	Control de velocidad del motor	1	BEC integrado
Servomotor	Estándar RC	Control de dirección	1	Par suficiente para dirección
Receptor (RX)	2.4 GHz	Recepción de señales de control	1	≥ 2 canales
Transmisor (TX)	2.4 GHz	Envío de comandos al vehículo	1	Compatible con RX
Batería LiPo	2S, 4000 mAh	Alimentación eléctrica	1	7.4 V nominal
Engranajes rectos	Impresos 3D / comerciales	Transmisión de potencia	4–6	Relación total $\approx 10.7:1$
Diferencial cónico	RC 1/10	Distribución de par a ruedas	1	Compatible con ejes
Ejes de transmisión	Acero / aluminio	Transferencia de movimiento	de 2–4	Diámetro estándar RC
Juntas cardán	RC universales	Compensación angular	2–4	Compatibles con ejes
Rodamientos	5×11 mm (ejemplo)	Reducción de fricción en ejes	8–12	Sellados

Tornillería	Métrica M3 / M4	Ensamble estructural	Variado	Acero inoxidable
Cableado eléctrico	Silicona AWG 14–22	Conexiones eléctricas	Variado	Alta flexibilidad
Conectores	XT60 / similares	Conexión batería–ESC	2	Alta corriente

Herramientas necesarias para fabricación y montaje

Herramientas de manufactura aditiva:

- Impresora 3D tipo FDM.
- Software de laminado (slicer) compatible con archivos STL.
- Espátula o herramienta de retirada de piezas.
- Lijas finas (grano 200–600) para acabado superficial.

Herramientas de ensamblaje mecánico:

- Destornilladores de precisión.
- Alicates de punta y corte.
- Llave de tuercas pequeñas.
- Calibrador Vernier o pie de rey para control dimensional.

Herramientas eléctricas y electrónicas:

- Soldador eléctrico.
- Estaño para electrónica.
- Multímetro digital.
- Cinta termoencogible y pistola de calor (opcional).

Herramientas auxiliares:

- Adhesivo epóxico o cianoacrilato (opcional).
- Bridas plásticas.
- Marcador permanente para identificación de cables y piezas.

4.4.13. Procedimiento de fabricación

El procedimiento de fabricación del prototipo didáctico de vehículo RC se diseñó con el propósito de garantizar precisión dimensional, repetibilidad, facilidad de ensamblaje y compatibilidad con entornos académicos, empleando principalmente manufactura aditiva por deposición de material fundido (FDM).

Este enfoque permite que el proceso pueda ser replicado en laboratorios universitarios equipados con impresoras 3D convencionales, sin requerir maquinaria industrial ni procesos de fabricación complejos.

El procedimiento se estructuró en cuatro etapas principales: fabricación de componentes, definición de tolerancias, preparación de piezas y ensamblajes estructurales, las cuales se describen a continuación.

4.4.13.1 Fabricación del chasis y componentes estructurales

El chasis, brazos de suspensión, manguetas, soportes y demás componentes estructurales fueron fabricados mediante impresión 3D, a partir de modelos CAD desarrollados en *Autodesk Inventor Professional 2023*. Los modelos fueron exportados en formato STL y procesados en el software de laminado correspondiente, donde se definieron los parámetros de impresión previamente seleccionados.

Se priorizó la impresión de las piezas estructurales en orientaciones que maximizaran la resistencia en las direcciones principales de carga, minimizando simultáneamente el uso de soportes. Las geometrías fueron diseñadas considerando radios de filete adecuados, espesores compatibles con el proceso FDM y superficies planas de apoyo para mejorar la estabilidad durante la impresión.

Tabla 16 Parámetros generales de impresión utilizados

Parámetro	Valor
Tecnología	FDM
Altura de capa	0,20 mm
Porcentaje de relleno	35 %
Patrón de relleno	Gyroid / Cúbico
Orientación	Optimizada por dirección de carga
Material estructural	PLA+

4.4.13.2 Tolerancias dimensionales

Las tolerancias dimensionales objetivo para las piezas impresas se establecieron en $\pm 0,5$ mm, valor coherente con las capacidades típicas del proceso FDM y con las recomendaciones de normas ISO/ASTM aplicables a manufactura aditiva.

Para interfaces críticas como alojamientos de rodamientos, ejes y tornillería se incorporaron holguras controladas directamente en el modelo CAD o se previó un posprocesado ligero mediante lijado o escariado manual. Previo al ensamblaje, todas las piezas impresas fueron verificadas dimensionalmente utilizando calibrador Vernier, asegurando que las dimensiones funcionales se encontraran dentro de los rangos aceptables para su acoplamiento con componentes comerciales estándar.

4.4.13.3 Preparación de piezas

Antes del ensamblaje, todas las piezas impresas fueron sometidas a un proceso de preparación que incluyó:

- Eliminación de soportes de impresión.
- Limpieza de superficies de contacto.
- Inspección visual para detectar defectos como delaminaciones, rebabas o porosidades excesivas.
- Lijado superficial ligero en zonas de acoplamiento preciso, cuando fue necesario.

Asimismo, se revisaron las zonas de paso de tornillos y ejes para asegurar la correcta concentricidad y alineación, garantizando un funcionamiento suave de los sistemas de transmisión y dirección. Este proceso de preparación contribuyó a mejorar la calidad final del ensamblaje y la confiabilidad operativa del prototipo.

4.4.13.4 Ensamblajes estructurales

Los ensamblajes estructurales se realizaron principalmente mediante uniones atornilladas, utilizando tornillería métrica estándar (M3 y M4), lo que permite el desmontaje completo del vehículo para mantenimiento, sustitución de componentes o modificaciones experimentales.

En zonas sometidas a cargas elevadas o vibraciones, se incorporaron insertos roscados o tuercas cautivas, mejorando la durabilidad de las uniones y la repetibilidad del ensamblaje. La secuencia de montaje se definió de forma modular, permitiendo ensamblar subconjuntos

(suspensión, transmisión, dirección y soportes electrónicos) de manera independiente antes de su integración al chasis principal, reduciendo errores y facilitando la alineación geométrica.

4.4.14. Procedimiento de ensamblaje

El procedimiento de ensamblaje del prototipo se estructuró de forma secuencial y modular, con el objetivo de facilitar su reproducción en entornos académicos, minimizar errores de montaje y permitir el desmontaje completo para mantenimiento o ajustes experimentales.

El proceso se dividió en tres etapas principales: montaje mecánico, integración eléctrica e integración electrónica.

4.4.14.1 Montaje mecánico

a) Sistema de suspensión (doble brazo independiente): Se ensamblaron los brazos superior e inferior de cada rueda al chasis mediante ejes pasantes y tornillería, asegurando libertad de movimiento vertical y simetría geométrica. Posteriormente se instalaron las manguetas y elementos de articulación, verificando un recorrido de suspensión aproximado de 20 mm, libre de interferencias. Finalmente, se instalaron los amortiguadores, ajustando la precarga de forma uniforme.

b) Sistema de dirección: El servo de dirección fue fijado a su alojamiento estructural y conectado al brazo de servo. Se instalaron las barras de dirección entre el servo y las manguetas, verificando alineación, simetría de giro y coherencia con la geometría Ackermann diseñada.

c) Sistema de transmisión: Se ensambló el diferencial cónico, engranajes de reducción y ejes de transmisión, verificando alineación y lubricación básica. Las juntas cardán permitieron la transmisión de par bajo desplazamientos angulares generados por la suspensión. Finalmente, el motor eléctrico fue fijado a su soporte y acoplado al tren de engranajes.

4.4.14.2 Integración eléctrica y electrónica

El cableado se realizó siguiendo una topología ordenada, minimizando longitudes innecesarias y evitando interferencias con partes móviles. Las conexiones fueron aisladas mediante tubo termoencogible y fijadas al chasis con bridas plásticas.

Tabla 17 Componentes electrónicos y ubicación

Componente	Ubicación	Criterio
Receptor	Zona protegida del chasis	Minimizar vibraciones
ESC	Área ventilada	Disipación térmica

Servo	Soporte estructural	Precisión de dirección
Batería	Compartimiento central	Distribución de masas

4.4.15. Configuración y calibración del sistema

La configuración y calibración del sistema electrónico constituyó una etapa crítica para garantizar seguridad operativa, respuesta predecible y repetibilidad experimental. Se calibraron el ESC, el servo de dirección y el transmisor siguiendo los procedimientos recomendados por los fabricantes.

Se verificaron la respuesta progresiva del acelerador, el centrado y recorrido del servo, la correcta inversión de canales y el funcionamiento del sistema failsafe, asegurando que ante pérdida de señal el vehículo pase a estado seguro.

4.4.16. Procedimientos de validación funcional

Los procedimientos de validación funcional permitieron verificar la correcta integración de los subsistemas y la coherencia entre el diseño teórico y el comportamiento real del vehículo.

Tabla 18 Ensayos funcionales realizados

Ensayo	Objetivo	Resultado esperado
Movimiento longitudinal	Aceleración y frenado	Respuesta estable
Dirección	Simetría y radio de giro	Giro uniforme
Estabilidad	Comportamiento lateral	Sin vuelcos
Autonomía	Tiempo de operación	Coherente con diseño

4.4.17. Mantenimiento preventivo y correctivo

El mantenimiento se estructuró en inspecciones periódicas, sustitución de piezas críticas y gestión segura de baterías LiPo, asegurando continuidad operativa y prolongación de la vida útil del sistema.

4.4.18. Seguridad operativa

Se establecieron lineamientos de seguridad eléctrica, mecánica y operativa, orientados a minimizar riesgos durante fabricación, ensamblaje y validación experimental, especialmente en contextos académicos con múltiples usuarios.

4.4.19. Recomendaciones para futuras implementaciones académicas

Se identificaron oportunidades de mejora técnica, escalabilidad, adaptación curricular y extensión hacia plataformas de conducción autónoma, alineadas con el reglamento FITENTH y con objetivos formativos avanzados.

4.4.20. Formatos y plantillas de apoyo

Se desarrollaron formatos estandarizados de checklist de montaje, inspección previa, registro de mantenimiento y validación experimental, fortaleciendo la trazabilidad, reproducibilidad y control técnico del prototipo.

4.4.21. Consideraciones finales

Con la elaboración y estructuración del manual técnico, se cumple de manera efectiva el Objetivo Específico 4 del proyecto, garantizando la documentación detallada y organizada de todos los procesos relacionados con el diseño, fabricación, ensamblaje y validación del prototipo. Este manual no solo asegura la replicabilidad del prototipo en futuros entornos académicos, sino que también se establece como una herramienta clave para su uso pedagógico, facilitando el aprendizaje y la comprensión de los conceptos fundamentales abordados en el proyecto.

5. CONCLUSIONES

El objetivo general del proyecto fue cumplido mediante el desarrollo y validación de un vehículo RC fabricado mediante manufactura aditiva, obteniendo un prototipo funcional, estructuralmente estable y reproducible, orientado al uso didáctico en Ingeniería Automotriz. El proyecto integró de manera coherente áreas de diseño mecánico, dinámica vehicular, manufactura aditiva, análisis estructural y mecatrónica, consolidando una plataforma académica aplicable en laboratorio.

En relación con el Objetivo Específico 1, la revisión normativa y bibliográfica permitió establecer criterios técnicos fundamentados en marcos de referencia académicos como plataformas tipo F1TENTH y estándares internacionales de manufactura aditiva. La construcción de una matriz técnica de requisitos permitió garantizar coherencia entre parámetros dimensionales, mecánicos, funcionales y de fabricación, asegurando que el diseño respondiera a condiciones previamente definidas y verificables.

Respecto al Objetivo Específico 2, el prototipo fue desarrollado mediante una arquitectura modular y modelado CAD paramétrico, lo que facilitó la integración ordenada de los subsistemas estructurales, de suspensión, dirección, propulsión, energía y control. La estrategia de manufactura aditiva FDM con PLA+, utilizando parámetros documentados (altura de capa de 0,20 mm, relleno del 35 % y orientación optimizada), permitió obtener piezas repetibles y ensamblables dentro de una tolerancia dimensional general de $\pm 0,5$ mm. El ensamblaje final confirmó la viabilidad constructiva del diseño y su coherencia con los criterios definidos.

En cuanto al desempeño estructural, los análisis CAE mostraron márgenes adecuados de seguridad para un prototipo didáctico. El piñón presentó una deformación máxima de 0,0070 mm y esfuerzo máximo de 2,98 MPa; el brazo inferior alcanzó el caso más exigente con 15,664 MPa y un factor de seguridad mínimo de 3,8306; y el chasis registró una deformación máxima de 0,616 mm con esfuerzo máximo de 8,305 MPa, manteniendo factores de seguridad superiores a los valores mínimos aceptables. Estos resultados validan la integridad estructural bajo condiciones de operación previstas.

En relación con el Objetivo Específico 3, el protocolo de validación experimental permitió evaluar variables asociadas al desempeño dinámico, maniobrabilidad, estabilidad, integridad estructural y repetibilidad del sistema. La comparación entre valores teóricos y comportamiento experimental evidenció coherencia dentro de márgenes razonables para un sistema didáctico fabricado mediante FDM, considerando tolerancias dimensionales y pérdidas

mecánicas propias del conjunto. La masa final del prototipo y su configuración de transmisión (relación total aproximada de 10,77) permitieron alcanzar la velocidad objetivo de 2,0 m/s con un torque estimado en rueda de 0,103 N·m y fuerza de tracción aproximada de 2,94 N, suficiente para superar la resistencia al rodaje estimada de 0,588 N bajo las condiciones establecidas.

Finalmente, en cumplimiento del Objetivo Específico 4, se elaboró documentación técnica completa que incluye lista de materiales (BOM), planos acotados, procedimientos de montaje, calibración, mantenimiento, seguridad operativa y formatos de verificación. Esta documentación fortalece la replicabilidad del proyecto y facilita su implementación en entornos académicos, permitiendo desmontaje total, mantenimiento modular y análisis comparativo de configuraciones sin comprometer la integridad estructural del conjunto.

En síntesis, el proyecto no solo logró desarrollar un prototipo funcional, sino que estableció una plataforma didáctica téc

nica, estructuralmente validada y metodológicamente documentada, con potencial de mejora futura mediante incorporación de instrumentación, telemetría y optimización de materiales. Esto confirma la coherencia entre diseño, fabricación, validación y documentación, cerrando el ciclo completo de desarrollo propuesto en el anteproyecto.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda estandarizar y documentar un perfil de impresión para asegurar repetibilidad en todas las piezas del prototipo. Antes de fabricar el conjunto completo, conviene imprimir probetas de tolerancia para ajustar en CAD los encajes más críticos (alojamientos de rodamientos, soportes de ejes y zonas de engranajes), de modo que el ensamblaje sea directo y reduzca retrabajos. También es importante mantener criterios de orientación de impresión según esfuerzos, especialmente en piezas sometidas a flexión o impacto, evitando que las capas queden en una dirección desfavorable.

Se recomienda evaluar el uso de materiales alternativos al PLA+ en componentes estructurales expuestos a vibración, temperatura o golpes, como PETG o ABS/ASA, siempre que exista disponibilidad y compatibilidad con el proceso de impresión. Para mejorar la durabilidad del ensamble, es aconsejable implementar insertos roscados o casquillos en zonas donde se realiza desmontaje frecuente, ya que esto reduce el desgaste del material y mantiene la calidad del ajuste con el tiempo.

En el ensamble, se recomienda unificar la tornillería a pocas referencias y longitudes, priorizando pernos M3 y M4, lo cual disminuye errores y facilita el mantenimiento. Además, conviene incluir una hoja de verificación de montaje con el orden de armado, controles de holgura, alineación y giro libre, y puntos de acceso rápido para mantenimiento (por ejemplo, soporte de batería extraíble y acceso al servo y a la transmisión sin desmontar el chasis completo).

Respecto a la transmisión, se recomienda asegurar la correcta alineación de engranajes y ejes, ya que desalineaciones pequeñas pueden incrementar pérdidas mecánicas, ruido y calentamiento. Es conveniente realizar pruebas con distintas relaciones de transmisión (cambio de piñón o corona) y registrar velocidad, aceleración, temperatura del motor y autonomía, con el fin de seleccionar la configuración más adecuada según el objetivo didáctico y las condiciones reales de operación.

Para la validación experimental, se recomienda estructurar un plan de pruebas por etapas, iniciando con pruebas estáticas (verificación de consumo, vibración y funcionamiento sin carga), continuando con pruebas de rodaje (línea recta, frenado y autonomía) y finalizando con pruebas de maniobrabilidad y estabilidad (slalom, radio mínimo de giro y comportamiento en curva). Los resultados deben registrarse en tablas comparables incluyendo masa final,

desempeño, fallas observadas y acciones correctivas, para garantizar trazabilidad y facilitar mejoras posteriores.

Finalmente, se recomienda incorporar prácticas de seguridad operativa, revisando fijación de batería, protección de cableado contra rozamiento y uso de un interruptor general o fusible si el sistema lo permite. Como trabajo futuro, se sugiere integrar instrumentación básica (velocidad, corriente y temperatura) para correlacionar simulación con pruebas reales, y proponer una versión mejorada del prototipo con ajustes de suspensión, mayor rigidez del chasis y evaluación comparativa de materiales, manteniendo el enfoque del proyecto como plataforma educativa y replicable.

7. BIBLIOGRAFÍA

Formlabs. (s.f.). *Guía sobre tolerancias, precisión y fiabilidad en la impresión 3D*. Obtenido de Enlace 1.

Filament2Print. (s.f.). *Exactitud, precisión y tolerancia en impresión 3D*. Obtenido de Enlace 2.

Xometry. (15 de abril de 2025). *Tolerancias en impresión 3D*. Obtenido de Enlace 3.

ABAX 3D Tech. (15 de diciembre de 2020). *PLA y PETG: características, diferencias y aplicaciones*. Obtenido de Enlace 4.

3Dnatives. (11 de mayo de 2021). *PLA vs PETG: ¿Qué material de impresión 3D elegir?* Obtenido de Enlace 5.

NORCK. (s.f.). *Aprenda los fundamentos del diseño en impresión 3D (guía de diseño)*. Obtenido de Enlace 6.

Trideo3D. (18 de diciembre de 2024). *Altura de capas en impresión 3D (guía)*. Obtenido de Enlace 7.

Autodesk. (27 de junio de 2024). *La exportación de archivos STL desde Inventor genera unidades incorrectas (solución)*. Obtenido de Enlace 8.

Escuela Superior Politécnica del Litoral. (2024). *Desarrollo de un sistema de navegación autónoma para vehículos FI/Tenth* (repositorio DSpace). Obtenido de Enlace 9.

Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. (s.f.). *RoboRacer – Guayaquil (FITENTH)*. Obtenido de Enlace 10.

SEAS Estudios Superiores Abiertos. (1 de marzo de 2023). *El coeficiente de seguridad en el diseño mecánico*. Obtenido de Enlace 11.

Universitat Jaume I. (s.f.). *Criterio de von Mises (Mecapedia)*. Obtenido de Enlace 12.

Dialnet. (2019). *Artículo académico sobre suspensión “double wishbone”* (registro). Obtenido de Enlace 13.

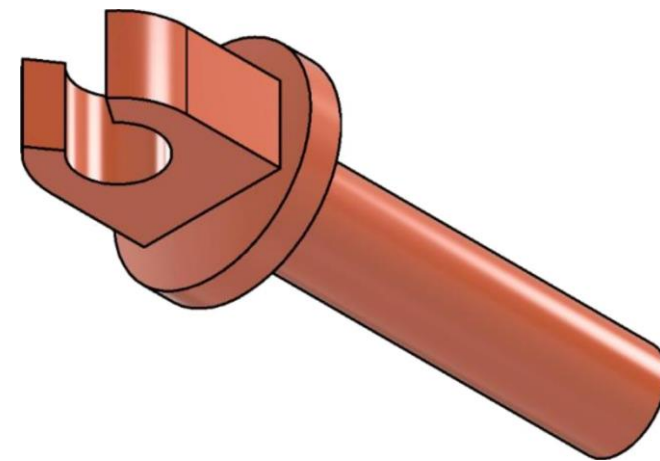
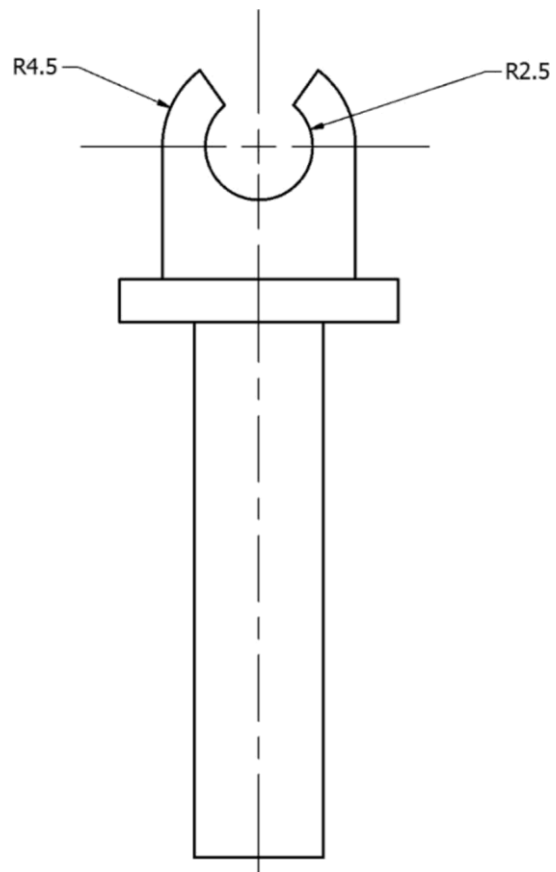
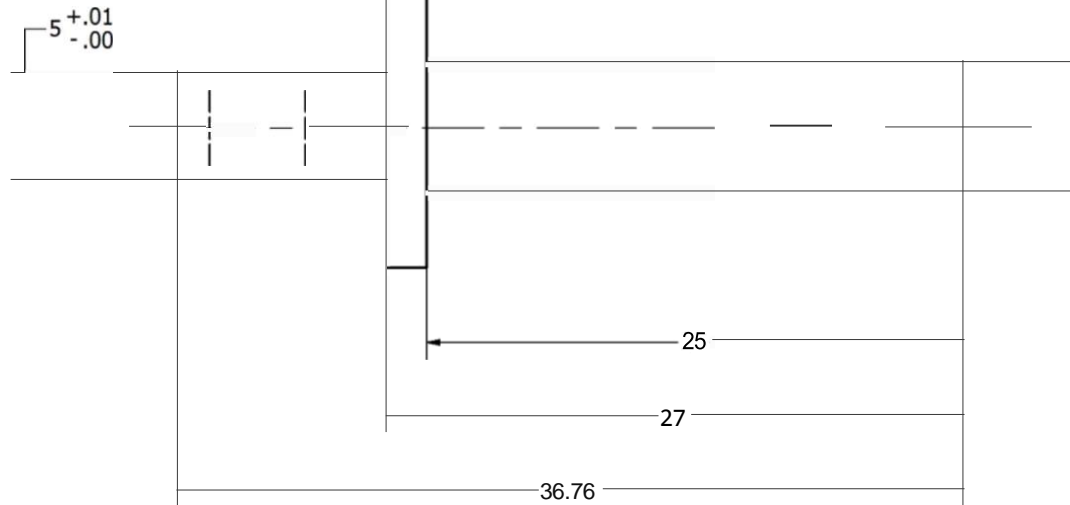
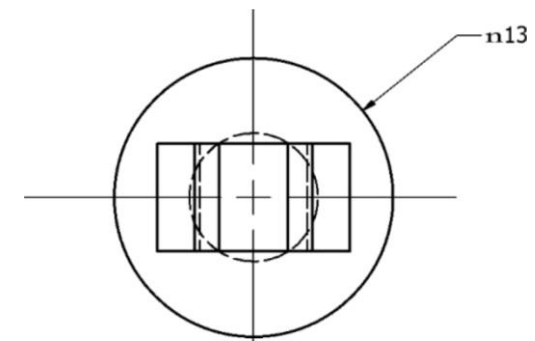
Martin Sprocket & Gear. (s.f.). *Manual de engranes* (PDF). Obtenido de Enlace 14.

Xunta de Galicia. (s.f.). *Engranajes: concepto y relación de transmisión* (recurso educativo). Obtenido de Enlace 15.

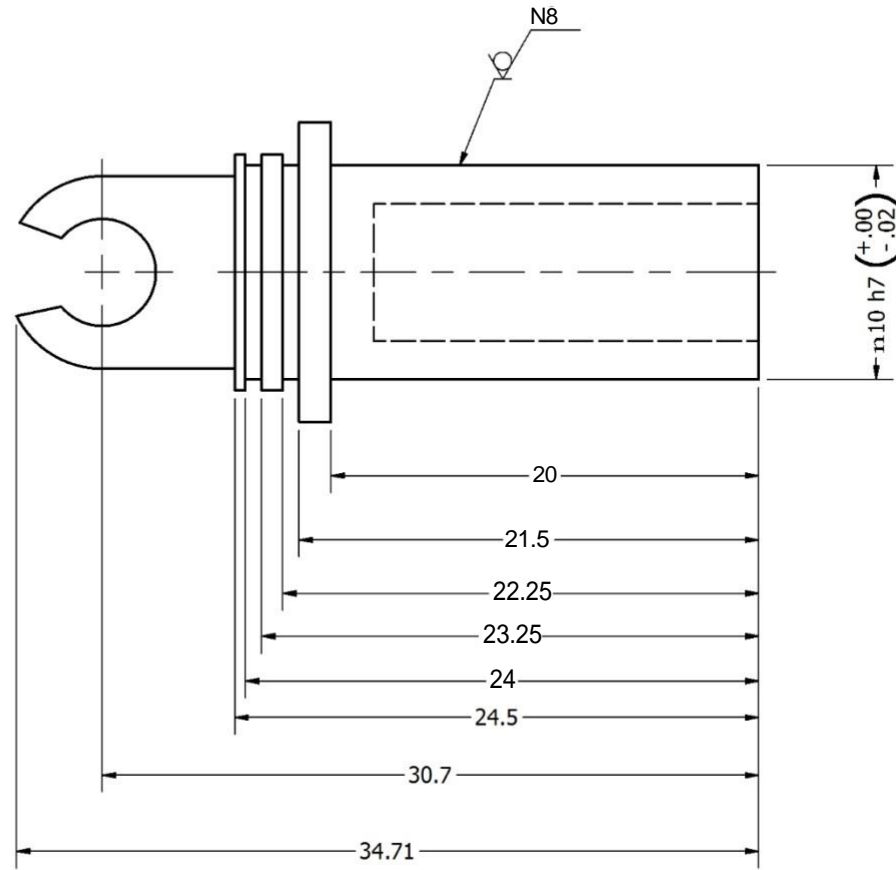
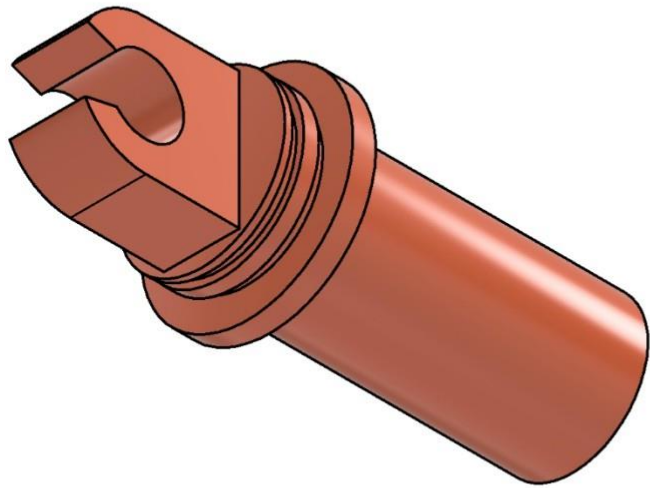
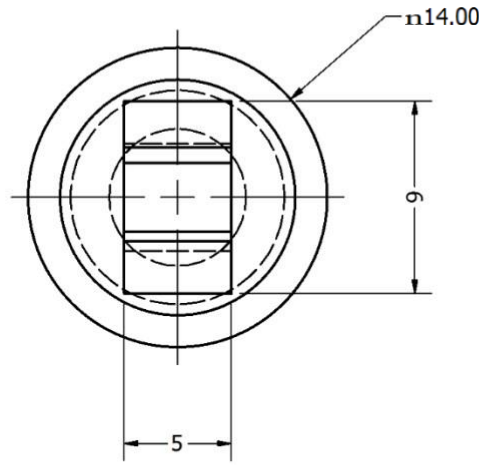
Confortauto. (23 de mayo de 2022). *Resistencia a la rodadura de un neumático: claves y fórmula*. Obtenido de Enlace 16.


FAPyD UNR. (2024). *Guía de diseño para la impresión 3D (recomendaciones y tolerancias)* (PDF). Obtenido de Enlace 17.

8. ANEXOS

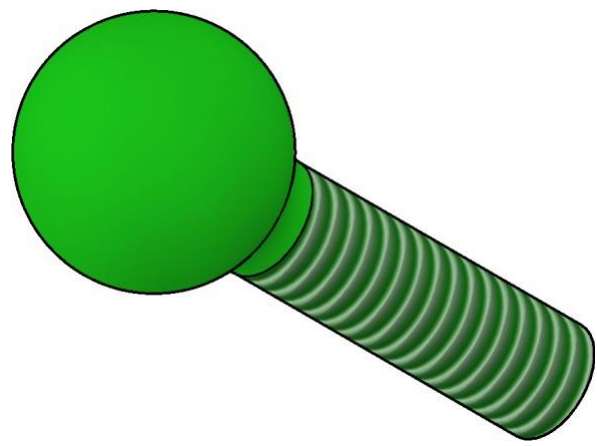
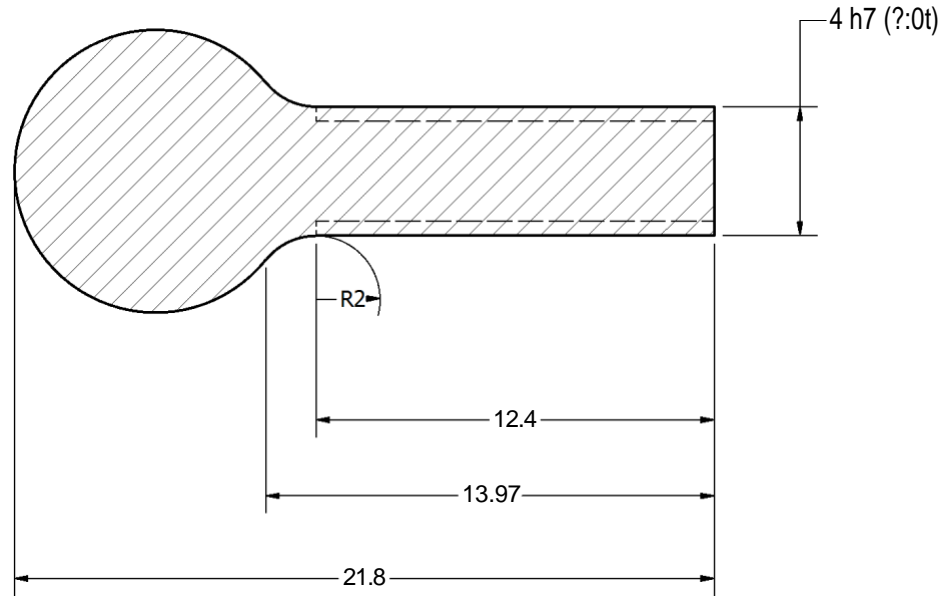
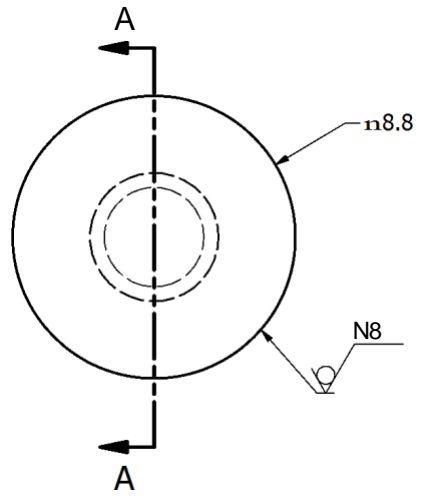


	Fecha	Nombres	Firmas	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR	
Dibujado	0 /02/20z6	Est. feven Espinoza		Material	pLA+
Comprobado	08/02/2026	Ing. Jorge Fajardo			
Escala	4:1			Amoliguador 0.5	

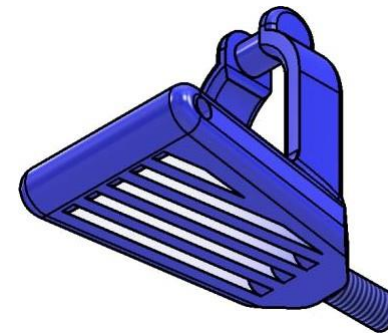
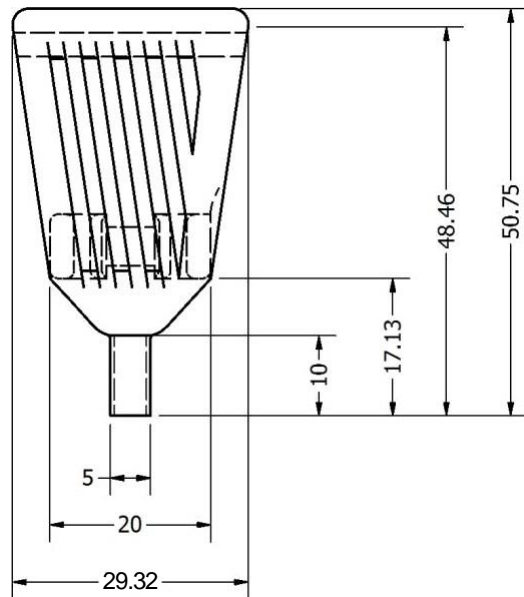
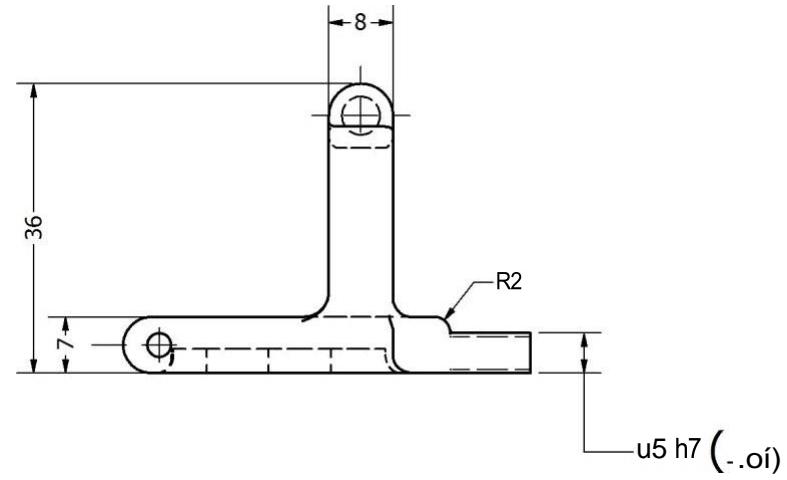
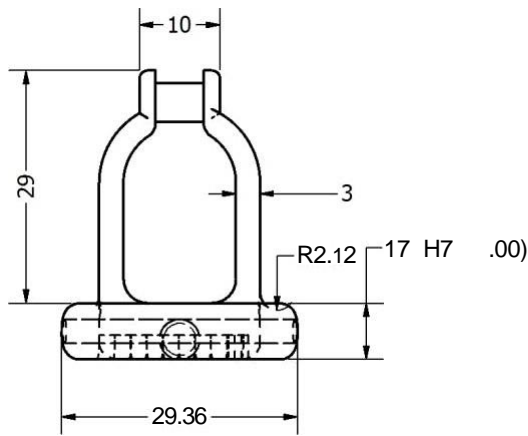


	Fecha	Nombres	Firmas	
Dibujado	01/02/2026	Est. Iven Espinoza		
Comprobado	08/02/2026	Ing. Jorge Fajardo		Material
Escala	4:1		Amoliguador 1	PLA+
				Tema
				Proyecto Integrador

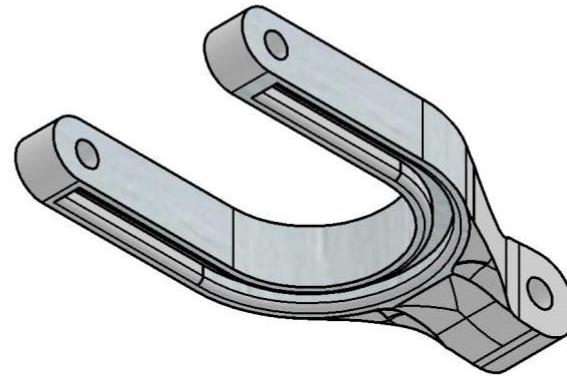
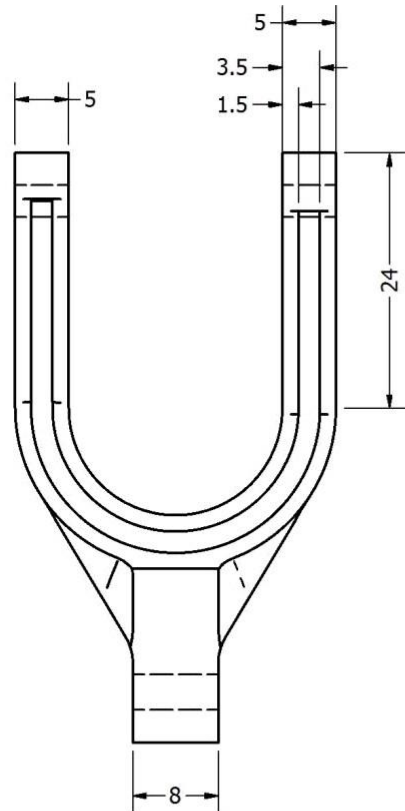
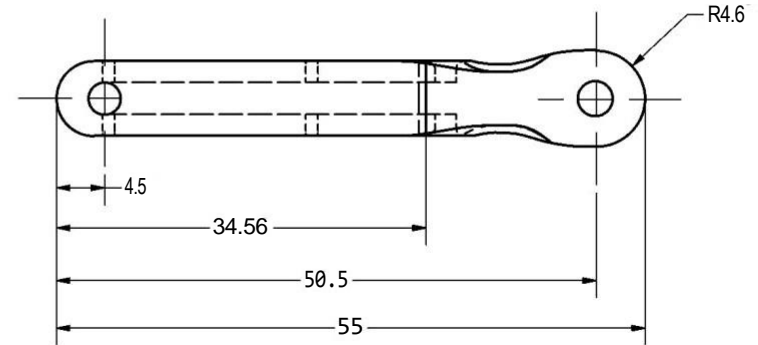
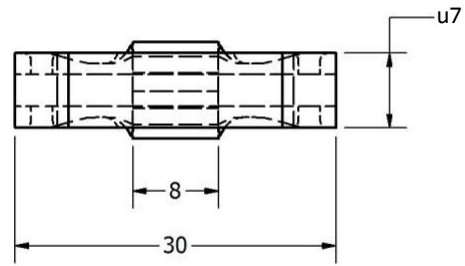
SECCIÓN A-A
ESCALA 6 : 1



	Fecha	Nombres	Firmas	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR	
Dibujado	01/02/2026	Est. Steven Espinoza		Material	PLA+
Comprobado	08/02/2026	Ing. Jorge Fajardo			
Escala	6:1			Bola de la Rotula	

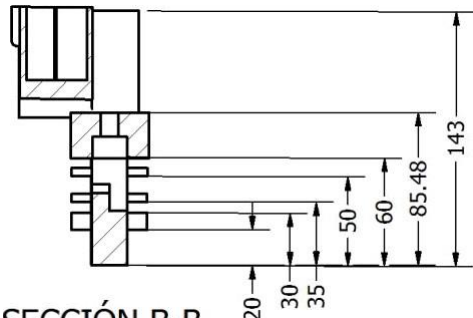
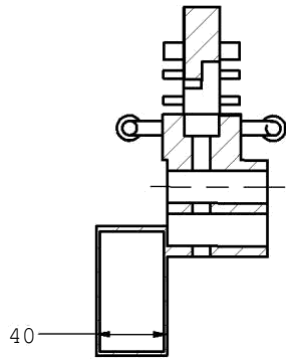
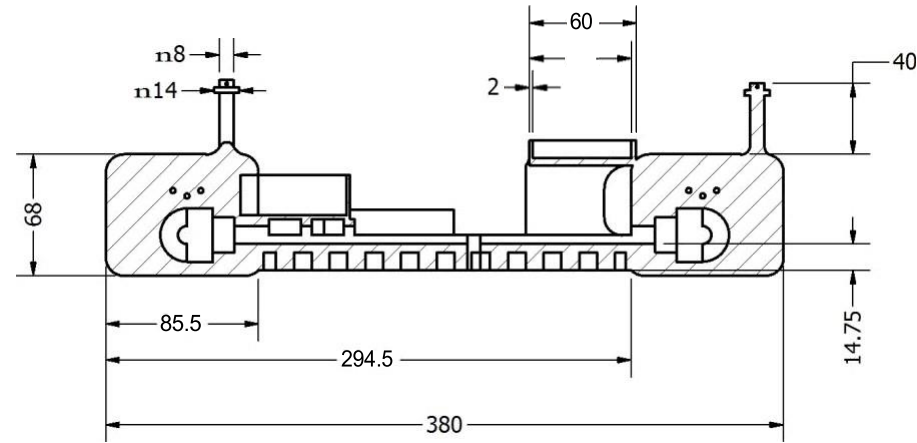
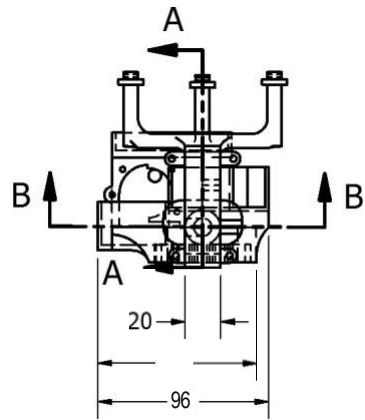


	Fecha	Nombres	Firmas	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR	
Dibujado	01/02/2026	Est. Steven Espinoza			
Comprobado	08/02/2026	Ing. Jorge Fajardo			
Escala	2:1			Material	PLA+
Brazo Inferior CORREGIDO				Tema	Proyecto Integrador

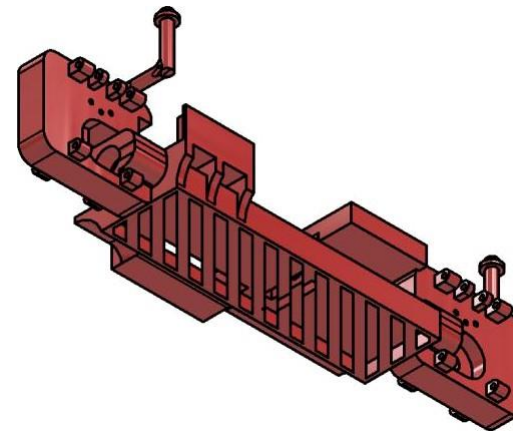


	Fecha	Nombres	Firmas	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR	
Dibujado	01/02/2026	Est. Steven Espinoza			
Comprobado	08/02/2026	Ing. Jorge Fajardo			
Escala	2:1			Material	PLA+
	Brazo Superior TRACERO			Tema	Proyecto Integrador

SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 3



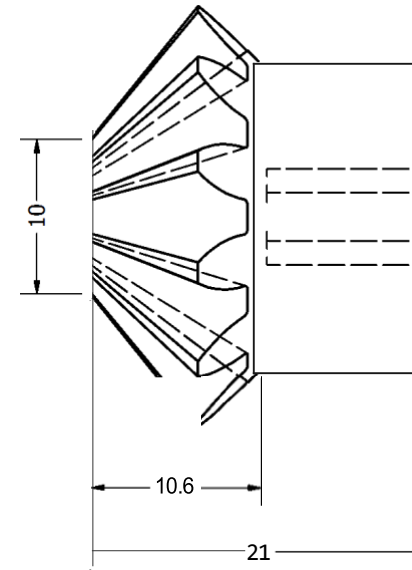
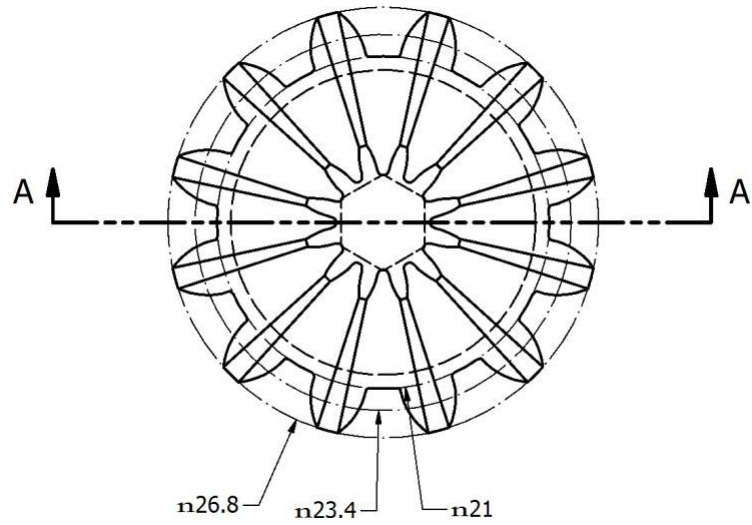
SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 3



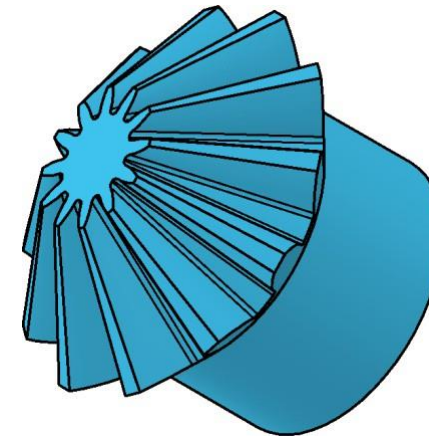
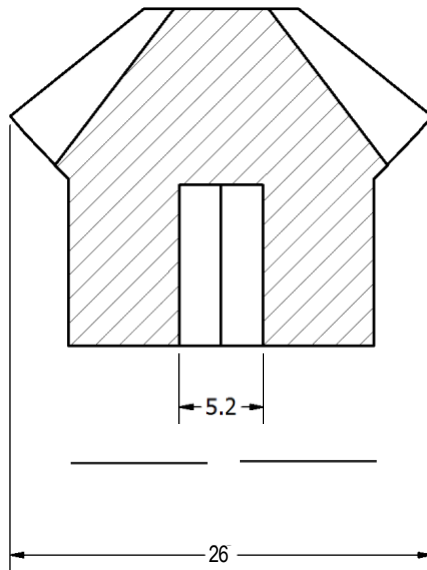
	Fecha	Nombres	Firmas
Dibujado	01/02/2026	Est. Steven Espinoza	
Comprobado	08/02/2026	Ing. Jorge Fajardo	
Escala	1:3		
Chasis Recolectado			



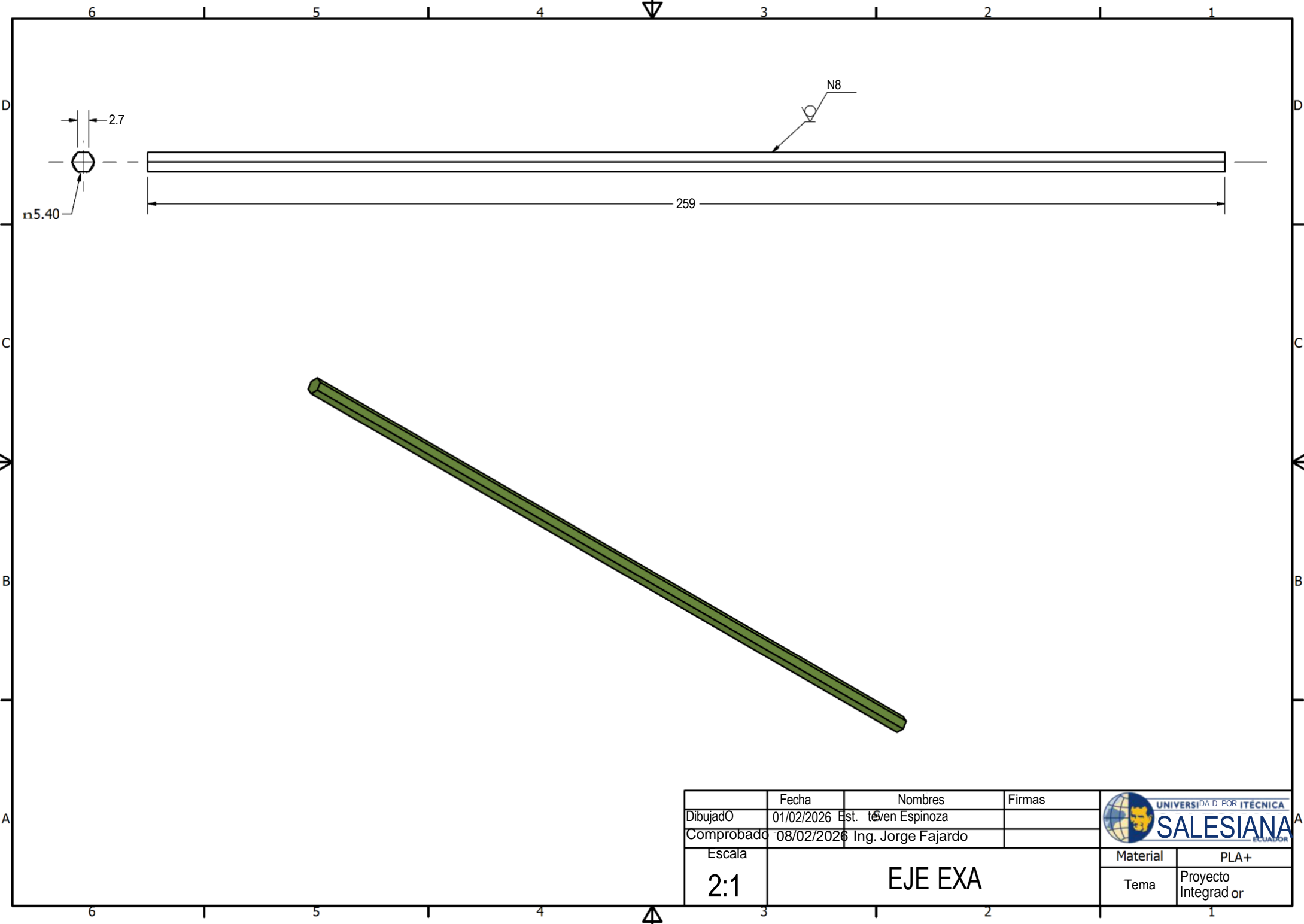
Material	PLA+
Tema	Proyecto Integrador




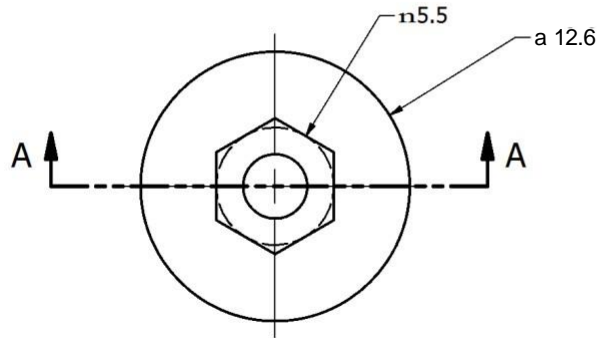
SECCIÓN A-A
ESCALA 3 : 1



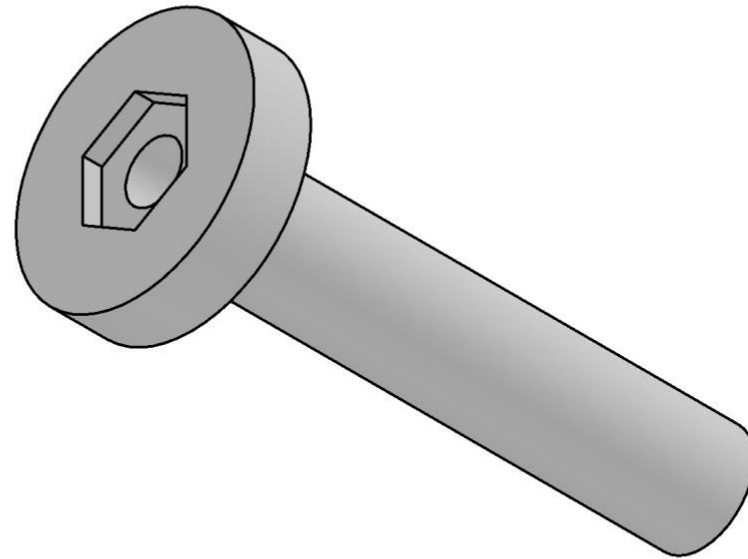
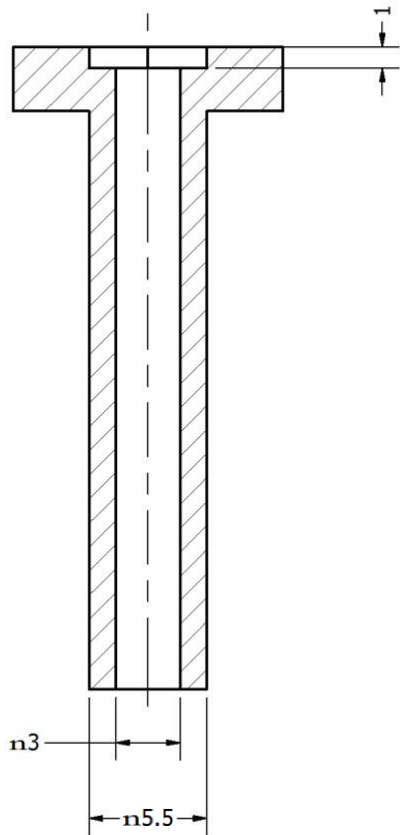
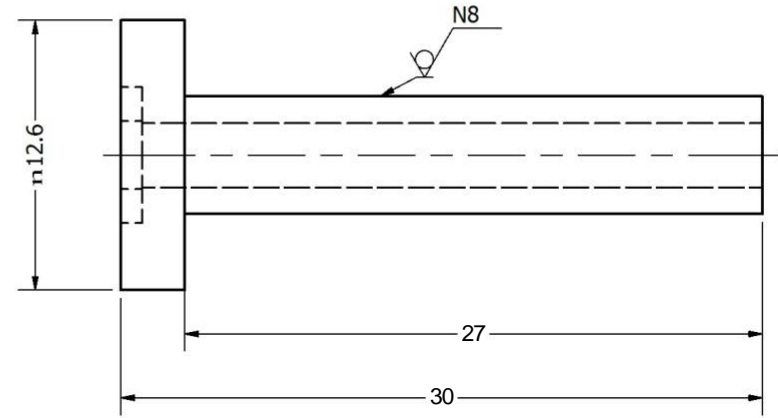
	Fecha	Nombres	Firmas	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA BALESA ECUADOR	
Dibujado	01/02/2026	Est. Steven Espinoza			
Comprobado	08/02/2026	Ing. Jorge Fajardo			
Escala	3:1			Material	PLA+
				DIFERENCIAL	



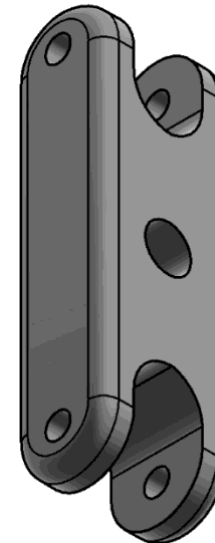
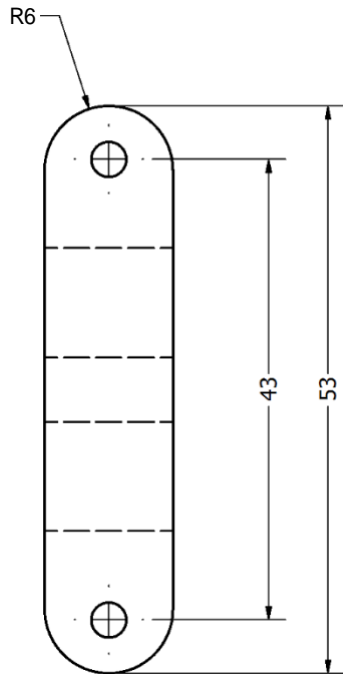
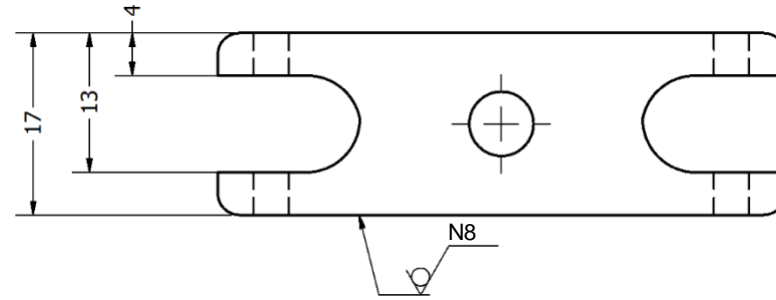
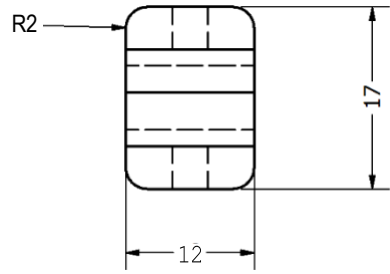
	Fecha	Nombres	Firmas	
Dibujado	01/02/2026	Est. Sven Espinoza		
Comprobado	08/02/2026	Ing. Jorge Fajardo		Material
Escala	EJE EXA			PLA+
2:1				Tema
				Proyecto Integrador



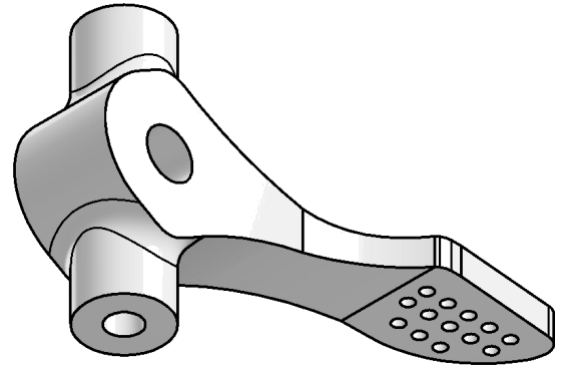
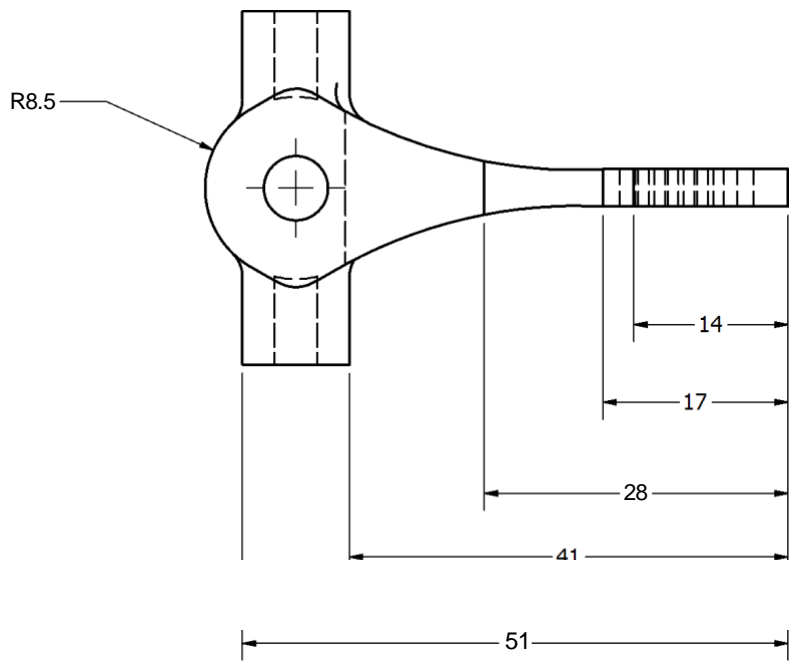
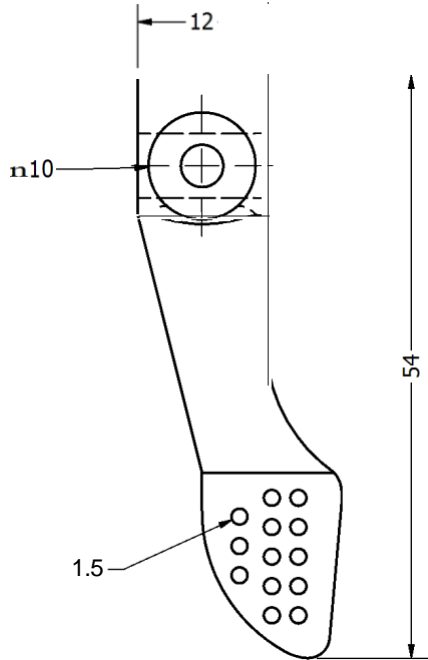
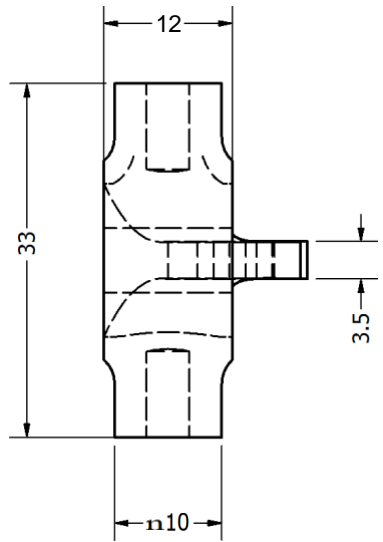
CORTE A-A



	Fecha	Nombres	Firmas	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR	
Dibujado	01/02/2026	Est. Steven Espinoza			
Comprobado	08/02/2026	Ing. Jorge Fajardo			
Escala	eje llantas			Material	PLA+
4:1				Tema	Proyecto Integrador



	Fecha	Nombres	Firmas	
Dibujado	01/02/2026	Est. Steven Espinoza		
Comprobado	08/02/2026	Ingg. Jorge Fajardo		Material
Escaleta	Escala			PLA+
2:1	Mangueta trcera_MIR3			Tema
				Proyecto Integrador



	Fecha	Nombres	Firmas	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR	
Dibujado	01/02/2026	Est. Steven Espinoza		Material	PLA+
Comprobado	06/02/2026	Ing. Jorge Fajardo			
Escala	2:1			Mangueta_MIR3	