



Universidad Nacional de San Luis  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias

***Análisis, Desarrollo y Construcción de Silla Monorrueda  
Motorizada para Personas con Movilidad Reducida***

Autor: Diaz, Mauro Exequiel.

Trabajo Final de Ingeniería Mecatrónica.

Director  
Dr. Ing. Guillermo R. Catuogno  
Co-Director  
Ing. Ramiro Rodrigo

Villa Mercedes, San Luis

2025

## **Derechos de Autor**

© 2025, Mauro Exequiel Díaz

Se autoriza la reproducción total o parcial de este trabajo con fines académicos, de investigación o divulgación, siempre que se cite la fuente y se reconozca la autoría del mismo.

Queda prohibida su utilización con fines comerciales o de lucro sin el consentimiento expreso del autor.

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este proyecto.

En primer lugar, a mis padres, a mi tía y a mis abuelos, por su apoyo incondicional, su paciencia y por acompañarme en cada paso de mi formación.

A mi tío **Sebastián**, por su valioso aporte en materiales y por brindar gran parte de los recursos utilizados en la construcción del prototipo; su colaboración fue fundamental para concretar este trabajo.

A mi gatito **Kratitos**, que con su compañía constante estuvo presente en mis horas de estudio, proyectos y finales, convirtiéndose en mi gran compañero de camino.

A mi pareja, por su cariño y por recordarme, cada día, la importancia de seguir adelante y terminar lo que uno empieza.

A mis amigos y compañeros de la facultad, con quienes compartí años de esfuerzo, aprendizajes y momentos inolvidables que hicieron de este trayecto una experiencia única.

Agradezco profundamente a la **Universidad Nacional de San Luis (UNSL)** por brindarme los conocimientos y el espacio para crecer como profesional.

Finalmente, extendiendo mi agradecimiento al **Dr. Guillermo Catuogno**, director del proyecto, y al **Ing. Ramiro Rodrigo**, codirector, por su acompañamiento, su guía constante y su compromiso en cada etapa del desarrollo de esta tesis.

A todos ellos, gracias por ser parte de este recorrido que marcó una de las etapas más importantes de mi vida académica y personal.

# Resumen

El presente trabajo final desarrolla el diseño, análisis y construcción de una silla monorrueda motorizada destinada a personas con movilidad reducida, orientada a actividades al aire libre como trekking y senderismo. Se trata de un *rediseño de bajo costo inspirado en el concepto de la silla Joëlette*, incorporando asistencia motriz para mejorar la movilidad en terrenos irregulares y ampliar las posibilidades de uso recreativo e inclusivo. El objetivo principal es brindar una solución innovadora que permita desplazarse con un menor esfuerzo físico y mayor seguridad.

El proyecto contempla el diseño estructural mediante software CAD (SolidWorks), donde se modelan todos los componentes principales, incluyendo el bastidor, sistema de suspensión, rueda central, sistemas de transmisión y control, así como mecanismos de ajuste y plegado para facilitar el transporte. Sobre el modelo tridimensional se realizan análisis para evaluar la resistencia estructural ante cargas, optimizando así el peso y la rigidez de la estructura.

La propulsión está a cargo de un motor eléctrico, cuya alimentación provendrá de un sistema autónomo configurable según las necesidades del usuario, pudiendo adaptarse a diferentes tecnologías de almacenamiento y carga de energía. El control de velocidad y frenado será evaluado para garantizar la seguridad en pendientes y terrenos con baja adherencia.

En la fase experimental se desarrolló el bastidor real, siguiendo las dimensiones y tolerancias obtenidas en el modelado, incorporando ajustes y refuerzos según la respuesta mecánica esperada. Se incluyó evidencia fotográfica del montaje, así como los resultados de los ensayos preliminares de funcionamiento.

Este trabajo integra conocimientos de mecánica, diseño estructural, electrónica y ergonomía, con un enfoque centrado en la accesibilidad y la adaptación a entornos exigentes, contribuyendo al desarrollo de soluciones de movilidad inclusivas y sostenibles.

**Palabras clave** — silla monorrueda; Joëlette; motor hub; diseño 3D; motor BLDC; verificación de materiales; ergonomía; accesibilidad.

# Índice de Contenido

Resumen.....	4
Índice de Contenido.....	5
Índice de Figuras.....	9
Índice de Tablas.....	11
Capítulo 1: Propuesta.....	12
1.1. Introducción.....	12
1.2. Objetivos.....	14
1.2.1. Objetivo General.....	14
1.2.2. Objetivos Específicos.....	14
1.3. Alcances y Limitaciones.....	15
1.3.1. Alcances.....	15
1.3.2. Limitaciones.....	15
1.4. Justificación del Proyecto.....	17
1.5. Estado del Arte.....	18
1.6. Marco Teórico.....	19
Capítulo 2: Estructura y Bastidor.....	25
2.1. Introducción al Diseño Estructural.....	25
2.2. Selección de Materiales.....	26
2.3. Modelado del Bastidor en SolidWorks.....	27
Metodología de Modelado.....	27
Criterios Geométricos y de Rigidez.....	28
Preparación del modelo para verificación.....	29
2.4. Consideraciones sobre Análisis por Elementos Finitos (FEA).....	31
2.5. Proceso de Fabricación.....	31
2.5.1. Documentación Fotográfica.....	33
2.6. Verificación Analítica de Esfuerzos.....	40
2.6.1. Verificación a Tracción: Estructura del Asiento.....	41
2.6.2. Verificación a Compresión:Estructura de Asiento.....	43
Planteo del equilibrio.....	44
2.6.3. Verificación a Flexión: Estructura de Asiento.....	45
2.6.4. Verificación por Von Mises (Esfuerzos Combinados).....	48
2.6.5. Verificación Unión Asiento-Respaldo con Planchuela en L, 1 Tornillo y 1 Pasador de Pivote.....	51
2.6.6. Caño Pivote Inferior (Despliegue hacia la horquilla).....	55
2.6.7. Manillar trasero pivot.....	57
2.6.8. Barras de Agarre del Manillar.....	58
2.6.9. Verificación de la Horquilla.....	60
2.7. Resumen Capítulo 2: Estructura y Bastidor.....	61
Capítulo 3: Sistema de Tracción.....	63
3.1. Concepto General de la Tracción.....	63
3.2. Esfuerzo Humano de Empuje y Cargas Típicas.....	64

3.3. Integración del Motor de Asistencia en la Tracción.....	67
3.4. Transmisión y Acoplamiento.....	68
Introducción teórica.....	68
Formulación general.....	69
Análisis representativo.....	70
3.5. Resumen Capítulo 3: Sistema de Tracción.....	70
Capítulo 4: Motor de Asistencia.....	72
4.1. Motor Disponible y Contexto de Integración.....	72
4.2. Característica Generales del Motor Utilizado.....	73
4.3. Tipo de Motor y Sistema de Conexión.....	74
Motor Brushless (BLDC).....	74
Controlador y sistema de conexión.....	75
Ventajas del sistema BLDC.....	76
4.4. Desempeño del Motor.....	77
4.5. Integración Mecánica y Eléctrica del Motor en el Bastidor.....	78
4.6. Resumen Capítulo 4: Motor de Asistencia.....	81
Capítulo 5: Sistema de Suspensión y Neumático.....	83
5.1. Suspensión.....	83
Introducción teórica.....	83
Consideraciones de diseño.....	84
Análisis preliminar.....	85
5.2. Neumático.....	86
Introducción teórica.....	86
Consideraciones de diseño.....	88
5.3. Suspensión + Neumático en Conjunto.....	89
Introducción teórica.....	89
Modelo matemático simplificado.....	90
5.4. Resumen Capítulo 5: Sistema de Suspensión y Neumático.....	92
Capítulo 6: Sistema de Frenado.....	93
Introducción teórica.....	93
6.1. Fundamentos Teóricos y Criterios de Diseño.....	94
Introducción teórica.....	94
Modelo de frenado.....	95
6.2. Dimensionamiento del Sistema de Freno.....	96
Introducción teórica.....	96
Lectura de resultados.....	97
6.3. Integración Mecánica.....	97
Introducción teórica.....	97
Desarrollo.....	98
6.4. Resumen Capítulo 6: Sistema de Frenado.....	98
Capítulo 7: Ergonomía y Seguridad.....	100
Introducción teórica.....	100
7.1. Diseño del Asiento y Respaldo.....	100
Introducción teórica.....	100

Consideraciones de diseño.....	100
7.2. Sistema de Sujeción: Cinturones de Seguridad.....	101
Introducción teórica.....	101
Consideraciones de diseño.....	102
7.3. Empuñadura y Maniobrabilidad para los Acompañantes.....	102
Introducción teórica.....	102
Consideraciones de diseño.....	103
7.4. Accesibilidad y Confort en el Uso.....	103
Introducción teórica.....	103
Consideraciones de diseño.....	104
7.5. Resumen Capítulo 7: Ergonomía y Seguridad.....	104
Capítulo 8: Mejoras y Trabajos Futuros.....	106
Introducción.....	106
8.1. Mejoras Propuestas al Diseño.....	106
8.2. Resumen Capítulo 8: Mejoras y Trabajos Futuros.....	107
Capítulo 9: Recursos y Análisis de Costos.....	109
9.1. Recursos Humanos y Materiales.....	111
9.1.1. Recursos Humanos.....	111
9.1.2. Recursos Materiales.....	112
9.1.3. Recursos Financieros.....	113
9.2. Conclusión de Recursos Utilizados.....	113
9.3. Resumen Capítulo 9: Recursos y Análisis de Costos.....	114
Presentación Final de la Silla Monorrueda.....	115
Resumen Presentación Final de la Silla Monorrueda.....	122
Conclusión del Proyecto Final de Carrera.....	123
Glosario.....	125
Bibliografía.....	127
Anexos – Planos.....	129

## Índice de Figuras

Figura 1: Vista Isométrica del Modelado en SolidWorks.....	27
Figura 2: Vista del Modelado en SolidWorks Sin Horquilla.....	28
Figura 3: Vista trasera del Diseño CAD.....	29
Figura 4: Vista trasera en la cual se puede Visualizar Detalles y Uniones.....	29
Figura 5: Vista trasera del Diseño Estructural en Pie.....	33
Figura 6: Sistema de sujeción de la horquilla similar al CAD.....	33
Figura 7: Incorporación de amortiguador desde el caño pivote hacia la horquilla.....	34
Figura 8: Unión del asiento y respaldo con planchuela “L”.....	34
Figura 9: Amortiguador con soportes que se utilizaron.....	35
Figura 10: Parte de la horquilla soldada.....	35
Figura 11: Horquilla punteada a caño de anclaje a la estructura principal.....	36
Figura 12: Vista superior de la horquilla incluida ya en la estructura.....	36
Figura 13: Tipo de uniones utilizadas para fácil armado.....	37
Figura 14: Silla Monorrueda asentada sobre su propio caballete (Descanso seguro con usuario montado).....	37
Figura 15: Vista frontal de la silla asentada sobre su propio caballete.....	38
Figura 16: Vista superior del asiento.....	38
Figura 17: Vista lateral de la silla asentada sobre su caballete.....	39
Plano obtenido mediante software CAD SolidWorks.....	39
Figura 18: Verificación Asiento con sus Solicitaciones.....	41
Figura 19: Verificación Asiento con sus Solicitaciones.....	43
Fig 20: Verificación Asiento con sus Solicitaciones.....	45
Figura 21: Verificación Planchuela “L” con Tornillo y Pasador.....	51
Figura 22: Verificación caño pivote de horquilla.....	54
Figura 23: Verificación caño pivote de manillar.....	56
Figura 24: Verificación Agarre de manillar.....	58
Figura 25: Vista de ubicación de la horquilla.....	59
Figura 26: Vista del Manillar (Empuje Trasero).....	63

Figura 27: Motor incluido en la Rueda (motor hub).....	73
Figura 28: Diagrama de Conexión al Motor Brushless.....	75
Figura 29:Diagrama de Funcionamiento.....	80
Figura 30: Diseño del Amortiguador.....	85
Figura 31: Diseño del neumático Utilizado.....	86
Figura 32:Estructura completa donde se observa Neumático, Amortiguador y Horquilla ensambladas.....	88
Figura 33:Silla Completa en Posición de Uso.....	115
Figura 34:Autor con Prototipo en su Etapa Final.....	115
Figura 35:Autor con Prototipo en su Etapa Final.....	116
Figura 36: Prototipo sobre su Caballete.....	116
Figura 37:Prototipo en Vista Lateral.....	117
Figura 38:Vista Frontal del Prototipo sobre su Caballete.....	117
Figura 39:Vista Lateral, Prototipo en Pie.....	118
Figura 40:Vista Lateral, Prototipo sobre Caballete.....	118
Figura 41:Vista Lateral del Prototipo.....	119
Figura 42:Vista lateral en detalle del Prototipo.....	119
Figura 43:Vista trasera en detalle del Prototipo, se puede observar la integración de sus componentes.....	120
Figura 44:Vista frontal del prototipo, asentado sobre caballete y apoya pies.....	120
Figura 45:Vista lateral del prototipo en reposo, sin asiento ni respaldo para apreciar con detalle sus componentes.....	121
Figura 46 :Imagen representativa del LabTA.....	123

## Índice de Tablas

Tabla 1: Características Generales del Motor.....	63
Tabla 2: Descripción del Motor BLDC.....	66
Tabla 3: Mejoras Futuras.....	92
Tabla 4: Análisis de Costos y Materiales Utilizados.....	94
Tabla 5: Comparativa Silla Comercial vs Prototipo.....	95
Tabla 6: Principales Participaciones en el Desarrollo.....	96

# Capítulo 1: Propuesta

## 1.1. Introducción

La movilidad es un aspecto esencial en la calidad de vida de las personas, especialmente en aquellas que presentan algún tipo de discapacidad motriz. En entornos urbanos, las soluciones tecnológicas como las sillas de ruedas eléctricas han avanzado significativamente, ofreciendo mayor autonomía y confort. Sin embargo, cuando se traslada esta necesidad a entornos rurales o senderos de montaña, la accesibilidad continúa siendo un desafío no resuelto de manera efectiva.

En actividades como el trekking o el senderismo, las irregularidades del terreno, las pendientes pronunciadas y la ausencia de caminos adaptados limitan la posibilidad de que una persona con movilidad reducida participe de forma autónoma. En estos contextos, la asistencia de uno o dos acompañantes continúa siendo indispensable, y el desarrollo propuesto tiene como finalidad facilitar y optimizar ese acompañamiento, reduciendo el esfuerzo físico requerido y mejorando la seguridad del desplazamiento.

Frente a esta problemática, se propone el desarrollo de una **silla monorrueda motorizada** especialmente diseñada para entornos agrestes. La incorporación de un bastidor robusto, un sistema de amortiguación eficiente y tracción motorizada permitirá atravesar terrenos de distinta complejidad manteniendo la estabilidad y el confort del usuario. Asimismo, el diseño busca facilitar el transporte y el armado, considerando mecanismos plegables y materiales livianos para reducir el peso total de la estructura.

Dentro de las soluciones existentes para actividades al aire libre, la silla **Joëlette** se ha consolidado internacionalmente como la referencia más utilizada para transporte asistido en montaña. Se trata de una silla monorrueda diseñada para ser operada por **dos acompañantes**, donde el asistente delantero se encarga principalmente de la tracción y el acompañante trasero de la estabilización y el frenado. Su estructura liviana, su sistema de amortiguación y su configuración monorrueda permiten atravesar senderos estrechos o irregulares con buena estabilidad.

Si bien la Joëlette presenta numerosas fortalezas —robustez, maniobrabilidad y ergonomía— también posee limitaciones importantes: su costo elevado, la necesidad de personal entrenado para operarla con seguridad, y la ausencia de asistencia motriz en su

versión tradicional, lo que exige un esfuerzo físico considerable para superar pendientes prolongadas o terrenos con baja adherencia.

El presente proyecto retoma el concepto estructural de la Joëlette, pero propone un **rediseño orientado a la accesibilidad económica y la asistencia a los acompañantes**, incorporando un motor eléctrico en la rueda central. En este esquema, el acompañante trasero pasa a cumplir un rol más activo en la tracción asistida, lo que responde tanto a razones ergonómicas como a criterios de seguridad: desde la posición posterior se obtiene mayor control del equilibrio, la alineación y la respuesta del sistema motorizado, especialmente en ascensos pronunciados. De esta forma, el diseño combina las ventajas operativas de la Joëlette con una tracción híbrida que reduce la fatiga del equipo acompañante y mejora la seguridad del desplazamiento.

Este proyecto integra conocimientos de diseño mecánico, análisis estructural, electrónica, control y ergonomía, con el objetivo de generar una solución que no solo responda a una necesidad puntual, sino que contribuya a la inclusión y la equidad en el acceso a actividades recreativas y deportivas. La propuesta pretende sentar las bases para futuras mejoras y adaptaciones, ampliando así las posibilidades de movilidad para quienes se enfrentan a limitaciones físicas en entornos naturales.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

Diseñar y construir un prototipo funcional de una silla monorrueda motorizada, orientada a mejorar la movilidad y accesibilidad de personas con movilidad reducida en terrenos irregulares, integrando conceptos de diseño mecánico, análisis estructural, ergonomía, electrónica y control adquiridos durante la carrera de Ingeniería Mecatrónica.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- **Analizar** las necesidades de movilidad en terrenos complejos para definir los requerimientos del diseño.
- **Diseñar** el bastidor y sus componentes estructurales empleando modelado tridimensional (SolidWorks) y criterios mecánicos.
- **Verificar** la resistencia del bastidor mediante cálculos de tracción, compresión, flexión, cortante y combinaciones de esfuerzos.
- **Seleccionar** materiales y geometrías adecuados considerando disponibilidad, costo y reciclado.
- **Integrar** un sistema de tracción eléctrica mediante motor brushless y controlador asociado.
- **Diseñar** un sistema ergonómico de asiento, respaldo y sujeción que garantice confort y seguridad del usuario.
- **Construir** el prototipo empleando recursos de taller y materiales reciclados.
- **Evaluar** el desempeño del prototipo en condiciones reales de uso.
- **Documentar** el proceso completo para su presentación académica y futura reproducción o mejora.

## 1.3. Alcances y Limitaciones

### 1.3.1. Alcances

El presente proyecto contempla el diseño y construcción de un **prototipo funcional** de una silla monorrueda motorizada orientada a mejorar la movilidad de personas con dificultades motoras en terrenos irregulares.

Los alcances específicos incluyen:

- **Diseño conceptual y detallado** del bastidor, asiento, sistema de sujeción y elementos estructurales.
- **Modelado 3D** de la estructura mediante SolidWorks, incluyendo análisis preliminares de ensamblajes y interferencias.
- **Cálculo estructural** de los componentes principales, evaluando esfuerzos y combinaciones de esfuerzo mediante criterios clásicos de resistencia de materiales.
- **Selección e incorporación** de un sistema de tracción eléctrica basado en un motor brushless y su controlador asociado.
- **Construcción artesanal del prototipo**, utilizando materiales reciclados y procesos de fabricación manual (soldadura, corte, perforado, ajuste).
- **Diseño ergonómico básico**, asegurando confort, postura adecuada y sistema de retención seguro para el usuario.
- **Prueba preliminar de funcionamiento**, verificando maniobrabilidad, estabilidad y respuesta del sistema de tracción.
- **Documentación completa** del proceso, resultados, cálculos principales y evaluación de factibilidad.

### 1.3.2. Limitaciones

Si bien el prototipo cumple con los objetivos planteados, se reconocen las siguientes limitaciones derivadas del alcance temporal, económico y material del proyecto:

- **Fabricación artesanal:** la construcción se realizó íntegramente en taller doméstico, por lo que las tolerancias y terminaciones no alcanzan el nivel industrial.

- **Ensayos restringidos:** las pruebas de campo se acotaron a evaluaciones preliminares; no se realizaron ensayos de fatiga, certificaciones normativas completas ni pruebas en diferentes tipos de usuarios.
- **Materiales reciclados:** el uso de materiales recuperados implica variabilidad en propiedades mecánicas respecto a piezas nuevas certificadas.
- **Sistema de tracción básico:** el motor brushless empleado cuenta con un controlador estándar incluido por el director del proyecto, sin integración de electrónica avanzada o telemetría.
- **Ausencia de un sistema de fabricación en serie:** el prototipo demuestra la viabilidad técnica, pero no incluye un estudio profundo de optimización industrial o producción masiva.
- **Limitaciones regulatorias:** no se aborda una homologación formal bajo normas IRAM completas.

Estas limitaciones no afectan la validez del prototipo, pero definen el marco realista dentro del cual se desarrolló el proyecto.

## 1.4. Justificación del Proyecto

El presente proyecto surge de la necesidad de brindar una solución accesible, robusta y económicamente viable para el transporte de personas con movilidad reducida en terrenos irregulares, donde las sillas de ruedas convencionales no pueden operar adecuadamente.

Las sillas monorrueda comerciales disponibles —como la Joëlette— poseen gran calidad y rendimiento, pero sus costos elevados las vuelven inaccesibles para la mayoría de los usuarios particulares, instituciones y organizaciones comunitarias. Las versiones motorizadas importadas, además, presentan dificultades de mantenimiento y reposición de componentes en Argentina.

Frente a esta problemática, se plantea el diseño y construcción de un prototipo **económico, fabricable localmente, reparable**, y basado en **materiales reciclados**, sin comprometer la seguridad estructural ni la funcionalidad. La integración del sistema de tracción eléctrica permitirá reducir el esfuerzo físico del acompañante, ampliando las posibilidades de uso en actividades recreativas, deportivas o de senderismo.

Este proyecto constituye una oportunidad para aplicar conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, desarrollar un dispositivo inclusivo y contribuir al bienestar de personas con movilidad reducida, reafirmando el compromiso social que debe acompañar a toda práctica ingenieril.

## 1.5. Estado del Arte

El diseño de dispositivos de movilidad asistida para actividades al aire libre ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, impulsado por la necesidad de promover la inclusión de personas con movilidad reducida en entornos naturales, turísticos y recreativos. Dentro de este campo, las **sillas monorrueda para trekking** se han consolidado como una solución práctica y eficiente, destacándose por su capacidad para desplazarse en terrenos irregulares con la asistencia de una o dos personas.

El referente más reconocido a nivel internacional es la **silla Joëlette**, desarrollada originalmente en Francia y adoptada por numerosas organizaciones de senderismo inclusivo. Este dispositivo utiliza una estructura ligera de aluminio, una única rueda central y un sistema de asistencia manual por parte de dos operadores. En sus versiones modernas incorpora mejoras en ergonomía, frenos y estabilidad, y existen variantes motorizadas que emplean motores eléctricos compactos para aliviar el esfuerzo del equipo acompañante.

A nivel tecnológico, los avances recientes incluyen la integración de **motores hub**, baterías de litio, controladores electrónicos programables y sistemas de frenado hidráulico, permitiendo ampliar la autonomía y mejorar la seguridad del usuario. Asimismo, el uso de herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) y la verificación por simulación han permitido optimizar la geometría estructural y reducir el peso de estos dispositivos.

En paralelo, las líneas de investigación sobre **ergonomía aplicada** han reforzado la importancia de incorporar asientos ajustables, apoyos anatómicos y sistemas de sujeción multipunto, orientados a garantizar la estabilidad del pasajero durante recorridos prolongados o de alta exigencia.

En Argentina, el desarrollo de soluciones de movilidad adaptada para senderismo es aún incipiente y se encuentra mayormente limitado a iniciativas artesanales o proyectos académicos. Esto contrasta con la creciente demanda de dispositivos accesibles y de bajo costo que permitan promover el turismo inclusivo y la participación plena de personas con movilidad reducida en actividades recreativas.

En este contexto, la presente tesis se inserta dentro de una corriente de **tecnologías apropiadas**, combinando materiales reciclados, diseño estructural optimizado y un sistema de tracción asistida mediante motor eléctrico. El trabajo aporta una alternativa local, económica y funcional, fundamentada en criterios técnicos contemporáneos y alineada con las tendencias actuales en movilidad adaptada.

## 1.6. Marco Teórico

El marco teórico constituye la base conceptual y técnica que sustenta el desarrollo del proyecto de la silla monorrueda motorizada para personas con movilidad reducida. En esta sección se recopilan, analizan y explican los principios, teorías y conocimientos previos necesarios para comprender el funcionamiento del sistema y justificar las decisiones de diseño.

Para la elaboración de este marco teórico, se considerarán aportes provenientes de diversas áreas de la ingeniería mecatrónica, tales como mecánica, electrónica, control y ciencia de los materiales. Además, se incluirán conceptos relacionados con la selección de componentes, la dinámica vehicular, la ergonomía aplicada a la movilidad asistida y la interacción hombre-máquina.

El objetivo de esta sección es ofrecer una visión integral que sirva como referencia para el diseño, construcción y evaluación del prototipo, asegurando que las soluciones adoptadas estén respaldadas por fundamentos técnicos sólidos y alineadas con los requerimientos del usuario final.

### Bastidor y Estructura

El bastidor y la estructura representan el núcleo mecánico de la silla monorrueda, ya que sobre ellos se montan todos los componentes funcionales y de seguridad del vehículo. Su principal función es garantizar un soporte resistente, rígido y duradero, capaz de absorber y distribuir de forma uniforme las cargas a las que estará sometido el conjunto durante el uso en condiciones reales. Estas cargas incluyen el peso del usuario, el peso propio de los componentes, los esfuerzos derivados del desplazamiento en terrenos irregulares y las sollicitaciones dinámicas como vibraciones, impactos y fuerzas de frenado.

La geometría del bastidor se diseña buscando un centro de gravedad óptimo y una distribución equilibrada del peso, factores determinantes para la estabilidad del vehículo. A diferencia de otros desarrollos con sistemas de auto equilibrio electrónico, en este proyecto la estabilidad general se logra principalmente mediante la configuración mecánica, las dimensiones del bastidor y la elección adecuada de los materiales.

En cuanto a materiales, se prioriza el uso de caños estructurales de acero reciclados, principalmente provenientes de bicicletas en desuso, conocidos por su elevada relación resistencia-peso y por presentar una buena resistencia a la corrosión cuando

cuentan con recubrimientos protectores. Además, este tipo de acero ofrece excelente comportamiento en procesos como corte, soldadura y mecanizado, lo que facilita su reutilización. Esto no solo reduce la masa total del conjunto, mejorando la maniobrabilidad, sino que también optimiza la eficiencia energética del sistema al requerir menor esfuerzo del sistema de tracción.

El diseño del bastidor contempla puntos de anclaje reforzados para el asiento, la rueda principal, el sistema de tracción, los elementos de suspensión y posibles accesorios adicionales. También se estudia la accesibilidad para tareas de mantenimiento, permitiendo un montaje y desmontaje rápido de componentes clave.

Para validar el diseño y garantizar su fiabilidad, se realizaron verificaciones analíticas considerando solicitaciones típicas de **tracción, compresión y flexión**, complementadas con un análisis de **esfuerzos combinados mediante el criterio de Von Mises**. Este procedimiento permite representar las condiciones de uso más críticas y detectar posibles zonas de concentración de tensiones. Los resultados obtenidos orientan la toma de decisiones respecto a espesores mínimos de los perfiles, la incorporación de refuerzos en áreas críticas y la optimización del peso total de la estructura sin comprometer la seguridad ni la resistencia mecánica.

Finalmente, el bastidor no solo cumple una función estructural, sino que también influye en la ergonomía y seguridad del usuario. Por ello, se consideran dimensiones que aseguren una postura cómoda, puntos de apoyo estables y un diseño que minimice riesgos en caso de vuelco o impacto.

## Sistema de Tracción

En la silla monorrueda propuesta, la tracción principal es generada por la persona que empuja desde la parte trasera, mientras que la persona ubicada al frente actúa como guía, controlando la dirección y contribuyendo a mantener la estabilidad durante el desplazamiento. El motor incorporado tiene la función de asistencia, aliviando el esfuerzo físico necesario para mover la carga, especialmente en terrenos irregulares o pendientes pronunciadas.

Este sistema asistido permite que el empuje manual siga siendo el principal medio de avance, manteniendo un diseño funcional y seguro, pero reduciendo la fatiga del operador trasero y mejorando la capacidad de la silla para afrontar tramos exigentes. La

potencia del motor se aplica a la rueda principal de manera controlada, evitando movimientos bruscos que puedan comprometer la estabilidad del conjunto.

La transmisión entre el motor y la rueda se diseña para ser simple, eficiente y de bajo mantenimiento, con el objetivo de garantizar una respuesta suave y progresiva. La disposición de los elementos busca mantener el centro de gravedad equilibrado, para que el peso del sistema de asistencia no altere la maniobrabilidad de la silla.

De esta manera, el sistema de tracción combina la fuerza humana con la asistencia motorizada, logrando un desplazamiento más fluido y menos demandante, sin perder el control manual como elemento principal de operación.

## Suspensión

La suspensión es el conjunto de elementos mecánicos diseñados para absorber y amortiguar las irregularidades del terreno, garantizando confort, seguridad y estabilidad durante el desplazamiento. En el caso de una silla monorrueda destinada a actividades de trekking y senderismo, la suspensión cumple un papel fundamental, ya que debe adaptarse a superficies irregulares, pendientes y obstáculos naturales, evitando que las vibraciones y golpes lleguen directamente al ocupante.

El sistema de suspensión no solo mejora la comodidad del usuario, sino que también contribuye a la integridad estructural del bastidor, reduciendo las solicitaciones mecánicas sobre sus uniones y componentes. Esto es especialmente importante en entornos montañosos o rurales, donde las solicitaciones dinámicas pueden ser elevadas.

En la silla monorrueda, la suspensión se localiza principalmente en el conjunto que conecta la rueda con el bastidor, y su diseño debe equilibrar la capacidad de absorción de impactos con la estabilidad general del sistema. La selección del tipo de suspensión —ya sea de muelles helicoidales, elastómeros o sistemas hidráulicos— dependerá de factores como el peso total soportado, el tipo de terreno y la facilidad de mantenimiento.

Al tratarse de un vehículo de asistencia manual con ayuda motorizada, la suspensión debe permitir que la fuerza ejercida por la persona encargada de la tracción y estabilización no se vea obstaculizada, asegurando que la rueda mantenga un contacto constante y seguro con el suelo. Esto permite un desplazamiento más fluido, reduce el riesgo de pérdida de control y protege al usuario ante impactos bruscos.

## Neumático

El neumático constituye uno de los elementos fundamentales para garantizar la movilidad, el confort y la seguridad de la silla monorrueda motorizada. Su función principal es proporcionar la superficie de contacto entre la rueda y el terreno, asegurando la adherencia necesaria para la transmisión de fuerzas y la absorción parcial de irregularidades del camino.

En este proyecto, la elección del neumático está directamente relacionada con el tipo de uso previsto: terrenos irregulares, caminos de montaña y senderos con superficies variables, que pueden incluir tierra, piedras, pasto o barro. En este sentido, se prioriza un diseño con dibujo profundo y compuesto de goma de alta resistencia, capaz de ofrecer un agarre óptimo en condiciones de tracción y frenado, así como un buen desempeño en situaciones de humedad.

Además de su capacidad de tracción, el neumático desempeña un papel importante en la amortiguación primaria, reduciendo la transmisión de vibraciones y golpes al bastidor. El dimensionamiento del mismo se realizará considerando factores como el diámetro exterior, el ancho de la banda de rodadura y la presión de inflado, buscando un equilibrio entre maniobrabilidad, estabilidad y esfuerzo requerido para el desplazamiento.

Finalmente, la elección del neumático deberá contemplar la disponibilidad en el mercado y la facilidad de reposición, así como su compatibilidad con el sistema de fijación de la rueda y el tipo de eje utilizado.

## Motor

El motor en la silla monorrueda no constituye el medio de tracción principal, sino un **sistema de asistencia eléctrica** diseñado para reducir el esfuerzo físico del acompañante que empuja la silla, especialmente en terrenos con pendientes, superficies irregulares o largas distancias.

Si bien la fuerza humana sigue siendo el elemento principal de propulsión, la asistencia eléctrica permite mantener una velocidad más constante, disminuir la fatiga y facilitar maniobras que requerirían un esfuerzo elevado, como ascensos prolongados o superar obstáculos naturales.

Se propone utilizar un motor eléctrico por sus ventajas frente a alternativas de combustión: funcionamiento silencioso, mayor eficiencia, ausencia de emisiones locales y menor mantenimiento. Además, la entrega inmediata de par que caracteriza a los motores eléctricos favorece arranques suaves y controlados, así como una ayuda puntual en momentos críticos del recorrido.

Los criterios de selección incluyen:

- **Potencia nominal:** suficiente para asistir el desplazamiento de la carga total (usuario + estructura + carga adicional).
- **Par máximo:** necesario para brindar apoyo en pendientes o en suelos de mayor resistencia al rodamiento.
- **Tensión y compatibilidad:** el motor debe integrarse con el controlador y el sistema de baterías para garantizar un funcionamiento eficiente y seguro.
- **Tipo de transmisión:** se evaluará si es más conveniente una conexión directa a la rueda o mediante un sistema de engranajes o correas, considerando el equilibrio entre eficiencia, simplicidad y mantenimiento.

Este motor, al funcionar como asistente, no elimina el trabajo humano, sino que lo complementa, prolongando la autonomía del acompañante y permitiendo que la experiencia de uso sea más segura y menos exigente físicamente.

## Sistema de Frenado

El **radio efectivo** de un disco de freno es la distancia desde el centro del eje de rotación hasta el punto medio donde actúa la pastilla sobre la pista de frenado. Este valor es fundamental para el cálculo del momento de frenado, ya que determina el brazo de palanca sobre el cual actúa la fuerza de fricción generada por el caliper. Para el dimensionamiento, se toma el diámetro total del disco y se promedia la zona de contacto efectiva de la pastilla, evitando considerar las áreas externas e internas donde no existe fricción útil.

En el caso de la silla monorrueda, se empleará un **disco ventilado** de diámetro  $D$ , con un radio efectivo  $R_e$  calculado como:

$$R_e = \frac{R_{\text{externo}} + R_{\text{interno}}}{2}$$

La fuerza de frenado requerida debe superar la componente tangencial del peso y la resistencia al avance, pudiendo expresarse como:

$$F_{freno} \geq m * g * \sin(\theta) + F_{rodadura} * \cos(\theta)$$

Donde:

- m es la masa total del sistema (usuario + silla).
- g es la aceleración gravitatoria.
- $\theta$  es el ángulo de pendiente del terreno.
- $F_{rodadura}$  Es la fuerza de resistencia por deformación del neumático y contacto con el suelo.

Es importante considerar que durante frenadas prolongadas, especialmente en descensos, la fricción genera un aumento significativo de la temperatura en el disco y pastillas, lo que puede ocasionar **fading** que implica una pérdida de eficacia en el frenado. Por ello, la elección de un disco ventilado, materiales con buen coeficiente de fricción estable y una correcta disipación térmica es fundamental para garantizar un rendimiento seguro y constante.

## Ergonomía y Seguridad

El diseño del bastidor ha sido concebido considerando una posición específica y una inclinación cuidadosamente calculada para favorecer la postura natural del usuario, reduciendo la fatiga muscular y mejorando la comodidad durante trayectos prolongados. Esta configuración no solo busca optimizar la experiencia de uso, sino también prevenir dolencias asociadas a posturas inadecuadas, especialmente en recorridos de montaña o senderos irregulares.

En cuanto a la seguridad, se contempla la incorporación de un cinturón doble en forma de "X", el cual asegura un amarre firme al respaldo de la silla y distribuye la fuerza de sujeción de manera uniforme sobre el torso del usuario. Este sistema es especialmente relevante en terrenos sinuosos, donde los movimientos bruscos podrían desplazar al individuo, provocando desde incomodidad hasta, en el peor de los casos, accidentes de gravedad. La combinación de un diseño ergonómico y un sistema de sujeción seguro constituye un aspecto clave para garantizar la protección del usuario sin comprometer su confort.

# Capítulo 2: Estructura y Bastidor

## 2.1. Introducción al Diseño Estructural

El diseño estructural de la silla monorrueda motorizada constituye uno de los aspectos más críticos del proyecto, dado que de él dependen tanto la resistencia mecánica como la estabilidad, la ergonomía y la seguridad del conjunto. El bastidor actúa como la columna vertebral del sistema, integrando y soportando todos los subsistemas: rueda principal, sistema de tracción asistida, suspensión, asiento, frenos y accesorios adicionales.

En el presente desarrollo se persigue una estructura optimizada que garantice:

- Alta resistencia frente a cargas estáticas y dinámicas.
- Bajo peso para facilitar el transporte y la maniobrabilidad.
- Capacidad de absorción de vibraciones e impactos.
- Geometría que favorezca la estabilidad y un centro de gravedad controlado.

Para ello, el diseño parte de la definición de requisitos mecánicos y funcionales, considerando las condiciones reales de uso:

- **Carga total prevista:** peso del usuario (hasta 80 kg), peso de la estructura y accesorios.
- **Entorno de trabajo:** senderos montañosos, caminos irregulares y pendientes pronunciadas.
- **Solicitaciones dinámicas:** esfuerzos derivados de vibraciones, impactos y frenadas bruscas.

La elección del material base del bastidor se realiza considerando criterios de resistencia mecánica, disponibilidad, costo y facilidad de trabajo en taller. En la construcción del prototipo se optó por el uso de aceros reciclados, principalmente caños provenientes de bicicletas en desuso y caño estructural, debido a su bajo costo, accesibilidad y la posibilidad de soldarlos con herramientas comunes. Esta decisión responde tanto a la idea de aprovechar materiales disponibles como a un enfoque sustentable en el desarrollo del dispositivo.

El diseño en SolidWorks permite modelar con precisión la geometría, posicionar los puntos de anclaje y prever el espacio para la integración de otros sistemas. Posteriormente, el modelo se somete a simulaciones como se mencionó anteriormente, lo que posibilita

identificar zonas críticas y optimizar el espesor de los perfiles sin comprometer la seguridad estructural.

Este capítulo detalla el proceso de concepción, dimensionamiento y validación del bastidor, integrando fundamentos teóricos con herramientas de ingeniería asistida por computadora, para garantizar que el prototipo final cumpla los requisitos técnicos, ergonómicos y de seguridad definidos en la etapa de diseño.

## 2.2. Selección de Materiales

La elección del material del bastidor constituye un aspecto clave en el diseño de la silla monorrueda, ya que condiciona la resistencia estructural, el peso total, la maniobrabilidad y la seguridad del usuario.

En esta primera versión del prototipo se optó por el uso de **acero al carbono de bajo contenido (SAE 1010/1020 o equivalentes), proveniente en su mayoría de caños estructurales reciclados y tubos de bicicletas en desuso**. Esta decisión responde a la **disponibilidad local de materiales, la facilidad de trabajo en taller doméstico y el bajo costo**, lo que permitió avanzar en la construcción sin necesidad de adquirir insumos nuevos.

Las razones que justifican esta elección son:

- **Resistencia mecánica adecuada:** los aceros al carbono de bajo contenido presentan límites elásticos en el rango de 300–390 MPa, suficientes para soportar las solicitaciones previstas (peso del usuario, cargas dinámicas por terreno irregular, impactos y esfuerzos de frenado).
- **Facilidad de soldadura y mecanizado:** se trata de materiales ampliamente utilizados en estructuras tubulares, que permiten uniones confiables mediante soldadura por arco eléctrico y cortes sencillos con herramientas manuales.
- **Disponibilidad y costo reducido:** al recurrir a piezas recicladas se disminuyen los gastos de construcción y se fomenta la reutilización de materiales, alineándose con una perspectiva de sustentabilidad.
- **Robustez comprobada:** aunque con mayor peso en comparación con el aluminio, el acero garantiza la rigidez necesaria para las condiciones de uso previstas en terrenos irregulares.

Cabe destacar que, en futuras versiones optimizadas del dispositivo, podría contemplarse la utilización de **aleaciones de aluminio estructural** (por ejemplo, serie 6000, como la 6061-T6), cuyo menor peso específico permitiría reducir la masa total y mejorar la maniobrabilidad. Sin embargo, para este prototipo inicial se priorizó la **viabilidad de fabricación con recursos accesibles y reciclados**, manteniendo la seguridad estructural como criterio principal.

## 2.3. Modelado del Bastidor en SolidWorks

El modelado CAD del bastidor se realizó en SolidWorks siguiendo un enfoque paramétrico orientado a fabricación y montaje. Se definió una **geometría tubular y rectangular** con trayectorias curvas y refuerzos inclinados para favorecer la continuidad estructural y repartir cargas entre la zona del asiento, el nodo de la horquilla/rueda y el manillar trasero. Las decisiones de diseño se basaron en tres criterios:

1. **Resistencia y rigidez** ante cargas estáticas (peso del usuario + estructura),
2. **Comportamiento ante solicitaciones dinámicas** (baches, frenadas, maniobras),
3. **Fabricabilidad** con caños reciclados y operaciones de corte/soldadura habituales.

### Metodología de Modelado

- **Esqueleto:** se creó un croquis 3D guía con ejes principales, cotas clave y ángulos de inclinación del bastidor para asegurar repetibilidad de dimensiones y simetrías.
- **Estructura tubular:** se utilizaron operaciones tipo *Structural Member* (o barrido) para generar los caños con sus diámetros nominales, manteniendo radios de empalme que reduzcan concentraciones de tensiones.
- **Nodos y uniones:** en intersecciones se resolvieron *miter cuts* y *end trims* para mejorar el asiento de las soldaduras. Se añadieron *gussets* (chapitas de refuerzo) en las esquinas más exigidas.
- **Puntos de anclaje:** se modelaron placas/orejas para el asiento, la fijación del freno y el soporte de horquilla. Los agujeros se normalizaron a **tornillería M8** para compatibilidad y robustez.

- **Tolerancias y ensamblaje:** se dejaron separaciones mínimas funcionales (juego) en encuentros críticos para facilitar el armado y compensar variaciones de corte.

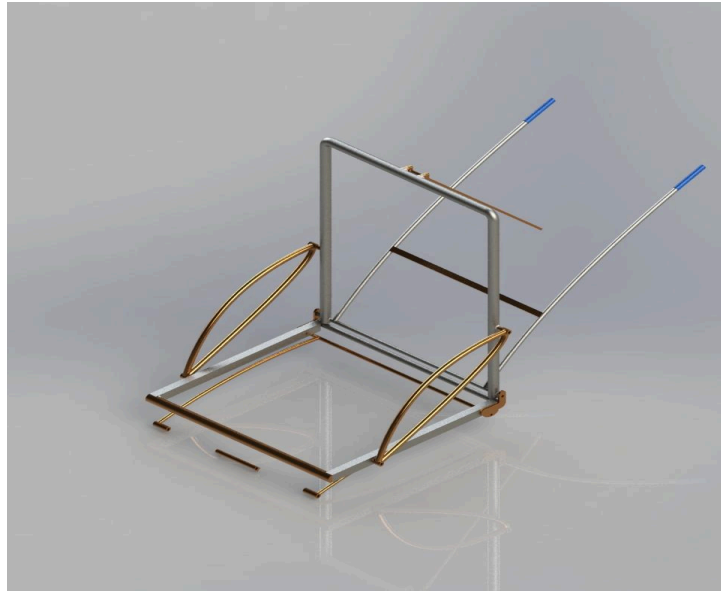


Figura 1: Vista Isométrica del Modelado en SolidWorks

### **Criterios Geométricos y de Rigidez**

- **Líneas de carga:** los caños principales alinean la trayectoria de carga desde el asiento hacia la rueda, reduciendo momentos flectores en tramos largos.
- **Refuerzos inclinados:** se agregaron elementos diagonales que trabajan a **tracción/compresión** para limitar flechas y torsión del conjunto.
- **Altura e inclinación del conjunto:** se fijaron para mantener el **centro de masa** dentro de una “zona de estabilidad” en maniobras y pendientes moderadas.

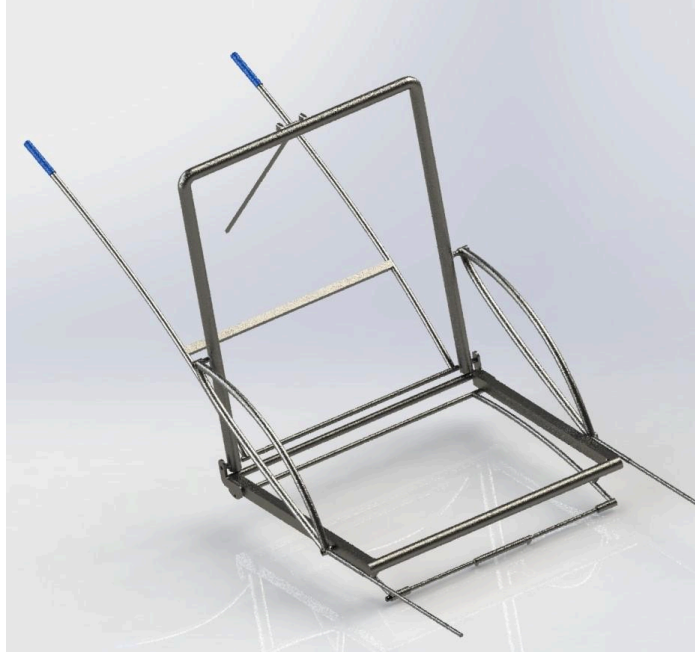


Figura 2: Vista del Modelado en SolidWorks Sin Horquilla.

### **Preparación del modelo para verificación**

Aunque el análisis detallado se desarrolla más adelante, el modelo quedó preparado para evaluación estructural mediante:

- **Definición de espesores** y materiales equivalentes de aceros al carbono típicos de caños de bicicleta (módulo de elasticidad y límite de fluencia representativos).
- **Identificación de apoyos y cargas:** superficies de contacto asiento–usuario, reacción en el eje de rueda, esfuerzos de frenado en la oreja del caliper y empuje en el manillar.
- **Superficies de soldadura:** longitud efectiva de cordones y accesibilidad para proceso MIG/MAG.

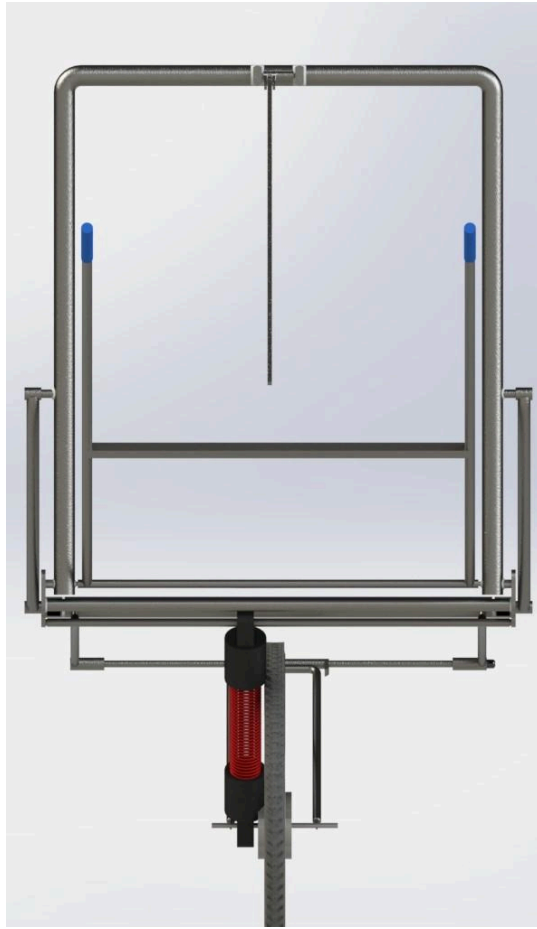


Figura 3: Vista trasera del Diseño CAD.

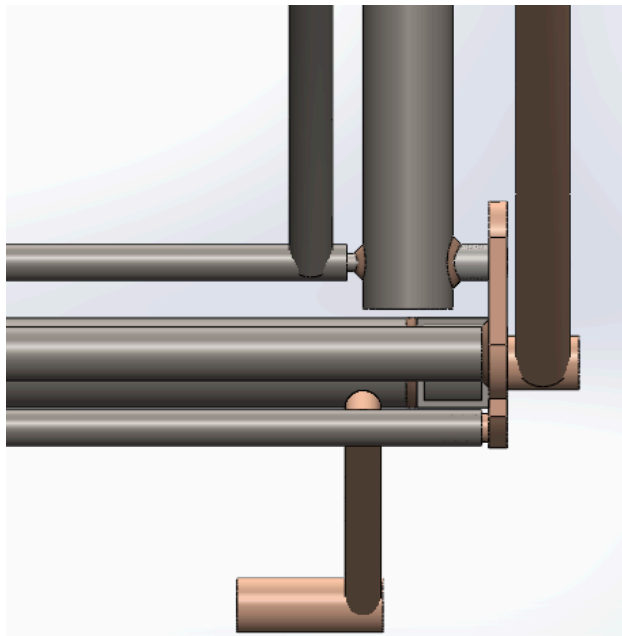


Figura 4: Vista trasera en la cual se puede Visualizar Detalles y Uniones.

## 2.4. Consideraciones sobre Análisis por Elementos Finitos (FEA)

Inicialmente se evaluó la posibilidad de complementar la verificación estructural con un análisis por elementos finitos (*Finite Element Analysis*, FEA), una técnica numérica que permite estimar tensiones, deformaciones y factores de seguridad mediante la discretización del modelo en pequeños elementos interconectados. Esta metodología es ampliamente utilizada en ingeniería mecánica para validar diseños complejos y optimizar geometrías antes de la construcción del prototipo (Beer & Johnston, 2015; Logan, 2016).

Sin embargo, en el marco de este proyecto se priorizó un enfoque analítico directo, realizando los cálculos manuales de tracción, compresión, flexión y esfuerzos combinados mediante el **criterio de Von Mises**, también llamado “tensión equivalente” o “energía de distorsión”. Este criterio permite evaluar si un material dúctil alcanza o no el límite de fluencia cuando está sometido a esfuerzos multiaxiales y constituye un método estándar en el diseño mecánico (Shigley et al., 2015).

Esta decisión metodológica se fundamenta en que los cálculos analíticos, planteados bajo hipótesis conservadoras, permiten comprobar con suficiente rigor la resistencia del bastidor, al tiempo que brindan un control más transparente sobre cada hipótesis y resultado. Además, la tensión equivalente de Von Mises es **equivalente conceptualmente** a la utilizada en los post-procesados de FEA, por lo que los resultados obtenidos mediante cálculo manual son adecuados para la etapa de prototipo funcional.

El análisis por elementos finitos queda planteado como una herramienta complementaria recomendable para futuras versiones del dispositivo, especialmente si se busca optimizar el espesor de los tubos, reducir peso o analizar escenarios de carga más complejos. No obstante, para la etapa actual, los cálculos desarrollados garantizan la seguridad y confiabilidad de la estructura bajo las condiciones de carga previstas.

## 2.5. Proceso de Fabricación

La construcción del bastidor de la silla monorrueda se llevó a cabo en un entorno de taller personal, utilizando recursos disponibles y priorizando la reutilización de materiales como tubos de bicicletas en desuso. Esta elección no sólo respondió a la necesidad de optimizar costos, sino también a criterios de sostenibilidad, aprovechando componentes

metálicos ya existentes que mantienen propiedades mecánicas adecuadas para este tipo de estructura.

El proceso inició con la **selección y corte de los tubos de acero**, ajustando sus dimensiones de acuerdo con las medidas obtenidas en el diseño CAD. Se emplearon herramientas manuales y eléctricas básicas, tales como amoladora, taladro y elementos de marcado, garantizando precisión en el dimensionado de las piezas.

Posteriormente, se procedió al **ensamblaje preliminar del bastidor**, realizando un montaje en seco para verificar la correcta alineación de los elementos antes de la unión definitiva. En esta etapa se ajustaron ángulos y posiciones críticas, como la inclinación del asiento y el eje de la rueda, con el fin de asegurar que la geometría coincidiera con la proyectada en el modelo.

Las uniones entre tubos se realizaron mediante **soldadura eléctrica por arco**, utilizando una soldadora de uso personal disponible en el taller. Se aplicaron cordones continuos en las zonas de mayor esfuerzo, mientras que en áreas secundarias se emplearon cordones intermitentes para reducir el aporte térmico y evitar deformaciones excesivas. Una vez finalizado el proceso de unión, se efectuaron repasos con amoladora en las soldaduras, con el doble objetivo de mejorar la estética y eliminar posibles concentraciones de tensión en bordes irregulares.

El armado casero, si bien se diferencia de un proceso industrial con maquinaria especializada, permitió obtener un bastidor plenamente funcional y robusto, acorde a los requerimientos del prototipo. Además, el enfoque artesanal pone en valor la **capacidad de adaptación del proyecto**, evidenciando que con recursos limitados es posible materializar soluciones tecnológicas orientadas a la inclusión y la movilidad asistida.

Finalmente, el bastidor fue sometido a una inspección visual y pruebas preliminares de resistencia, asegurando que las soldaduras y uniones mantuvieran la rigidez estructural prevista en los análisis. En etapas posteriores, este proceso será documentado con fotografías del taller y del bastidor real en sus distintas fases de armado, como evidencia complementaria del desarrollo.

#### **Flujo resumido de fabricación del bastidor:**

1. Selección de tubos reciclados.
2. Corte y preparación de piezas.
3. Ensamblaje preliminar (alineación y verificación).

4. Soldadura por arco eléctrico.
5. Repaso y terminación de cordones.
6. Validación preliminar de rigidez.

### 2.5.1. Documentación Fotográfica

Con el objetivo de complementar la descripción técnica del proceso de fabricación, se presenta a continuación una serie de registros fotográficos que evidencian las distintas etapas de construcción del bastidor. Estas imágenes permiten ilustrar el carácter práctico del trabajo, desde la selección de los materiales hasta el montaje final de la estructura.

Cada fotografía constituye una evidencia directa del avance real del proyecto, mostrando de manera clara los pasos seguidos en la construcción, tales como el corte de perfiles, el punteo inicial para verificar alineaciones, las soldaduras definitivas y el resultado final de la estructura ensamblada.

Este registro gráfico no solo aporta transparencia al proceso, sino que también facilita la comprensión del lector al visualizar la transición entre el diseño CAD y la materialización física de la estructura.



Figura 5: Vista trasera del Diseño Estructural en Pie.



Figura 6: Sistema de sujeción de la horquilla similar al CAD.

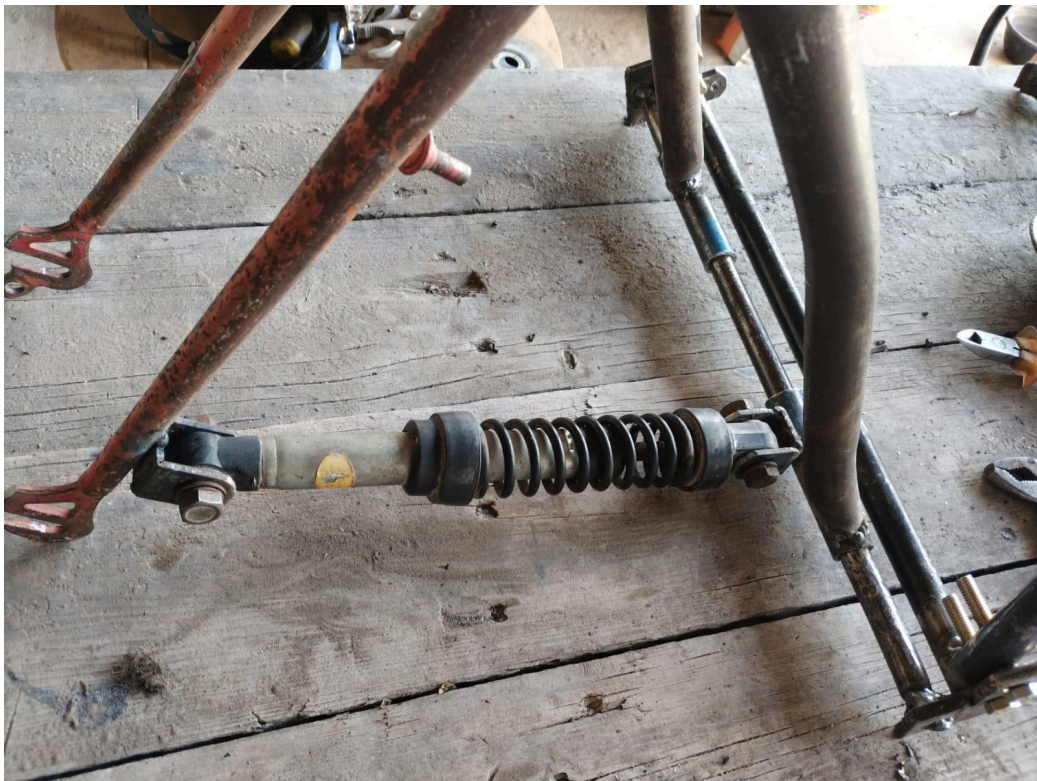


Figura 7: Incorporación de amortiguador desde el caño pivote hacia la horquilla.

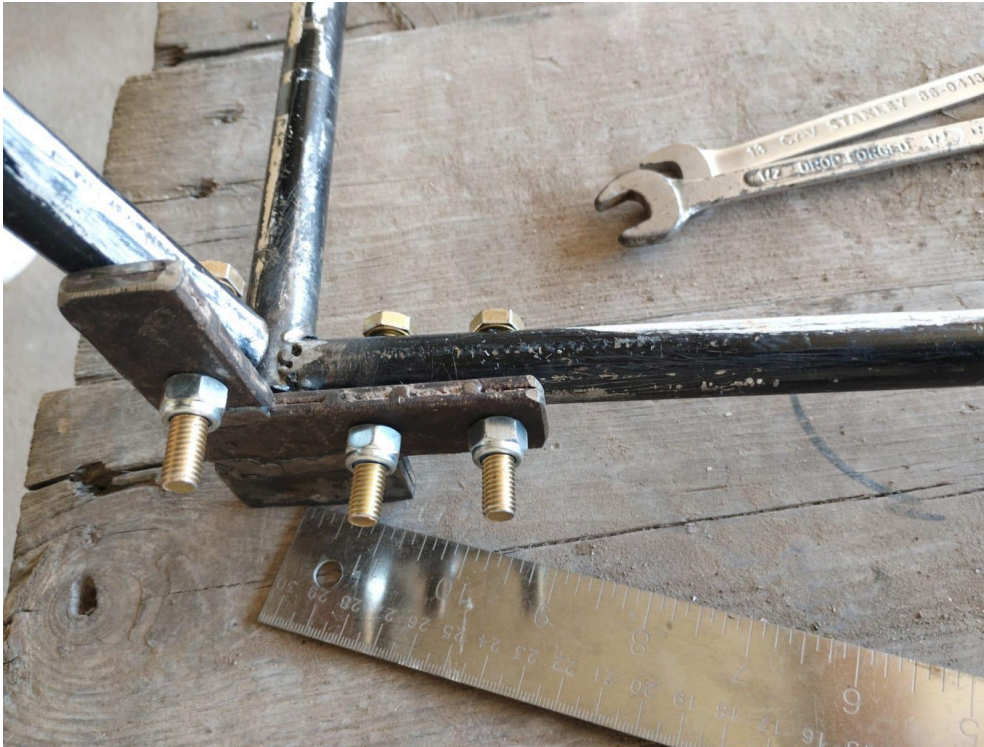


Figura 8: Unión del asiento y respaldo con planchuela "L".



Figura 9: Amortiguador con soportes que se utilizaron.



Figura 10:Parte de la horquilla soldada.



Figura 11:Horquilla punteada a caño de anclaje a la estructura principal.



Figura 12: Vista superior de la horquilla incluida ya en la estructura.



Figura 13: Tipo de uniones utilizadas para fácil armado.



Figura 14: Silla Monorrueda asentada sobre su propio caballete (Descanso seguro con usuario montado).



Figura 15: Vista frontal de la silla asentada sobre su propio caballete.

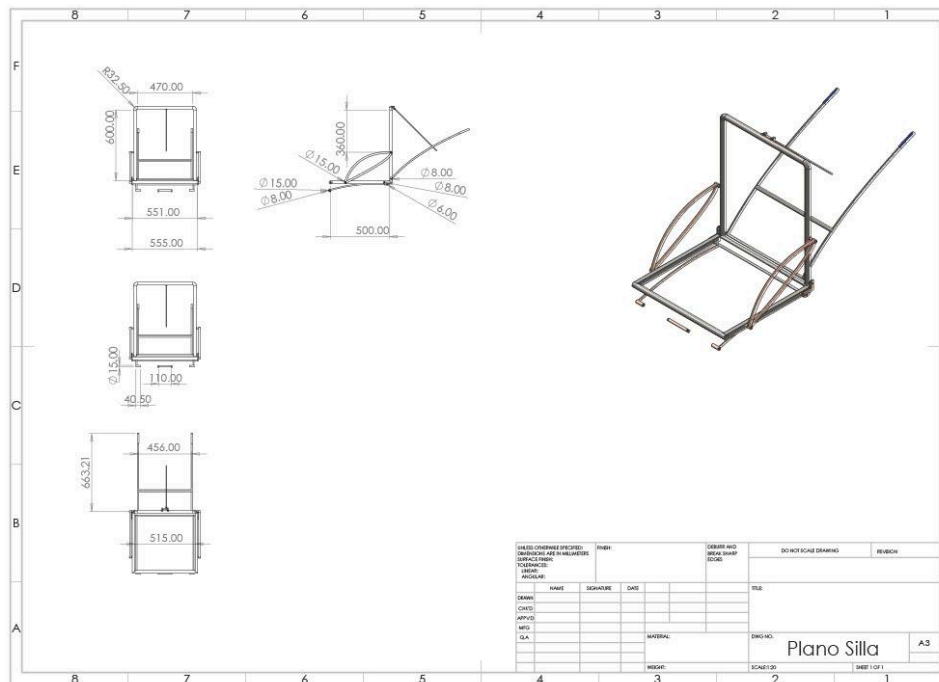


Figura 16: Vista superior del asiento.



Figura 17: Vista lateral de la silla asentada sobre su caballete.

***A continuación se presenta el plano con diferentes vistas tenido en cuenta para el armado del prototipo junto al diseño 3D***



Plano obtenido mediante software CAD SolidWorks.

## 2.6. Verificación Analítica de Esfuerzos

En esta sección se presentan las verificaciones analíticas de los elementos principales de la estructura, considerando solicitaciones típicas de **tracción, compresión, flexión y cortante**, así como la evaluación de esfuerzos combinados mediante el **criterio de Von Mises**.

### Alcance del análisis estructural.

En las verificaciones analíticas y numéricas de este capítulo se tomó como referencia el **asiento y la horquilla** de la silla monorrueda, ya que concentran las mayores solicitaciones (flexión por el peso del usuario, combinaciones axiales y cortantes en los puntos de apoyo). El **respaldo** fue considerado como elemento de apoyo con solicitaciones reducidas (presión de la espalda), por lo que no se incluyeron cálculos estructurales detallados para dicho componente. Esta decisión se fundamenta en el carácter estático y de bajo momento de las cargas sobre el respaldo, que no superan las solicitaciones analizadas en el asiento; en caso de requerirse en etapas posteriores, puede verificarse con la misma metodología aplicada aquí.

El propósito de este desarrollo es comprobar, mediante cálculos manuales y con hipótesis conservadoras, que los tubos reciclados seleccionados para la construcción del

bastidor son capaces de soportar las cargas previstas sin superar los límites admisibles del material ni comprometer la seguridad del usuario.

Para ello, se toman como base:

- Un usuario adulto promedio de **80 kg**.
- La estructura de la silla con un peso aproximado de **30 kg**.
- Un **factor dinámico** de seguridad para contemplar los efectos de impactos y terrenos irregulares.
- Propiedades típicas de aceros de bajo carbono reciclados (SAE 1010 / 1020):
  - Módulo de elasticidad:  $E \approx 210 \text{ GPa}$ .
  - Límite de fluencia:  $390 \text{ MPa}$

Los cálculos se realizan considerando configuraciones de carga simples y representativas, de manera de obtener valores de esfuerzo que permitan establecer un **factor de seguridad mínimo** para el diseño.

### 2.6.1. Verificación a Tracción: Estructura del Asiento

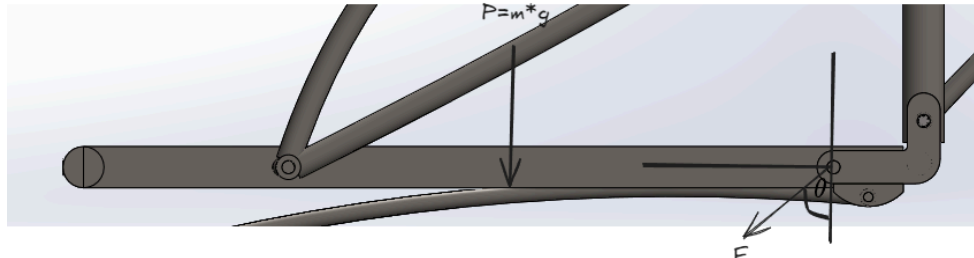


Figura 18: Verificación Asiento con sus Solicitaciones.

La tracción simple es uno de los estados de carga más elementales y constituye el punto de partida para evaluar la resistencia de un elemento estructural. En este caso, los tubos que conforman el bastidor de la silla —especialmente aquellos que transmiten directamente la carga del asiento hacia la rueda principal— pueden modelarse como barras sometidas a un esfuerzo de tracción axial.

El esfuerzo normal debido a la tracción se define como:

$$\sigma_t = \frac{F}{A}$$

Donde:

- F es la fuerza axial aplicada,
- A es el área resistente de la sección transversal del tubo.

La condición de resistencia se verifica cuando:

$$\sigma_t \leq \sigma_{adm}$$

Con  $\sigma_{adm}$  como el límite admisible del material. Para garantizar seguridad estructural se introduce un **factor de seguridad (FS)**:

$$FS = 2$$

Un factor de seguridad **FS = 2** suele considerarse aceptable en estructuras livianas sometidas a cargas estáticas, en este trabajo se plantea este valor debido al uso de materiales reciclados y a la presencia de sollicitaciones dinámicas.

### Planteo del equilibrio

El peso total del sistema (P) se transmite al nudo del asiento, el cual se sostiene mediante dos tubos simétricos inclinados un ángulo  $\theta$  respecto de la vertical.

Por equilibrio vertical en el nudo:

$$2 \times F \cos(\theta) = P$$

La simetría asegura que las componentes horizontales ( $F \times \sin\theta$ ) se anulan entre sí, quedando únicamente la componente vertical en el balance de cargas

### Hipótesis adoptadas:

- Usuario adulto promedio: 80 kg.
- Peso propio de la silla: 30 kg.
- Peso total: 110 kg
- Carga equivalente:
- $\sigma_{flu}$  del material  $\approx 390 \text{ MPa}$
- Factor de Seguridad (FS) = 2

$$P = m \times g = 110 \text{ Kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 1080 \text{ N}$$

- Ángulo =  $30^\circ$
- La carga se distribuye en **dos tubos principales** que sostienen el asiento.

**Cálculo:**

$$F = \frac{P}{2 \cdot \cos(30^\circ)} \approx 623 \text{ N}$$

Para un tubo reciclado típico de bicicleta con  $D=25 \text{ mm}$  y espesor  $e=2 \text{ mm}$ :

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - (D - 2e)^2) \approx 144 \text{ mm}^2 = 1,44 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\sigma_t = \frac{623 \text{ N}}{1,44 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 4,3 \text{ MPa}$$

Límite Admisible del Material:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{flue}}{FS} = \frac{390 \text{ MPa}}{2} = 195 \text{ MPa}$$

Verificación del Material:

$$\sigma_t < \sigma_{adm}$$

$$4,3 \text{ MPa} < 195 \text{ MPa} \text{ (Verifica)}$$

**Conclusión:** la tensión de tracción en los tubos del asiento es muy inferior al límite admisible del acero. Incluso con un factor de seguridad elevado, la estructura resiste adecuadamente las sollicitaciones de tracción.

## 2.6.2. Verificación a Compresión: Estructura de Asiento

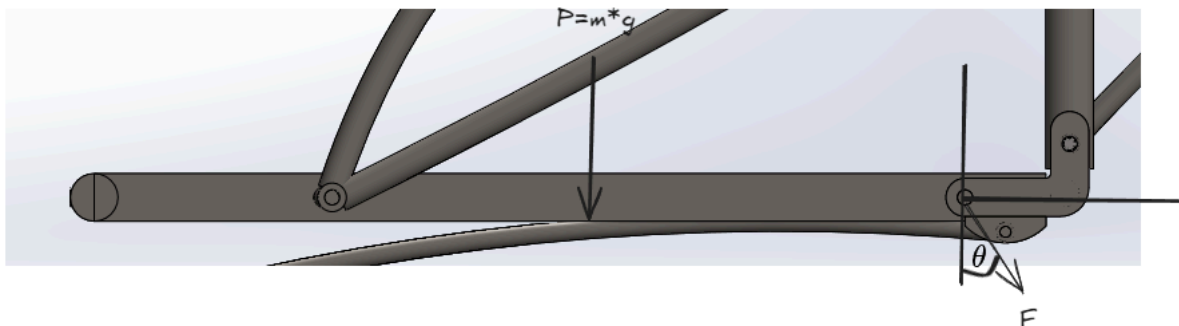


Figura 19: Verificación Asiento con sus Solicitaciones.

La compresión axial es el estado de carga en el que una barra o tubo está sometido a una fuerza que tiende a acortarlo. La comprobación básica por fluencia evalúa la tensión

media en la sección y la compara con el límite de fluencia del material. La tensión de compresión (si la carga es concéntrica) se calcula como:

$$\sigma_c = \frac{N}{A}$$

Donde:

- N es la fuerza axial de compresión (N),
- A es el área resistente de la sección transversal (m<sup>2</sup> o mm<sup>2</sup>).

Para garantizar seguridad se define un factor de seguridad:

$$FS = 2$$

con  $\sigma_{flue}$  el límite de fluencia del material. Cabe aclarar que para miembros esbeltos la verificación por **pandeo** (Euler/Johnson) suele gobernar.

### Planteo del equilibrio

En el nudo del asiento, el peso total P se transmite a través de dos miembros: uno diagonal en tracción (analizado en 4.6.1) y otro corto en compresión.

Si es el ángulo de este miembro respecto de la vertical, la componente vertical de la fuerza debe equilibrar la mitad del peso:

$$2 \times F \cos(\theta) = P$$

### Hipótesis adoptadas:

- Peso: 1080 N.
- Tubo representativo (reciclado): diámetro exterior D=25 mm, espesor e=2 mm. Diámetro Interior (Di) = D - 2e = 21mm
- Área de Sección:

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - D_i^2) = \frac{\pi}{4}(25 \text{ mm}^2 - 21 \text{ mm}^2)$$

- Material: acero al carbono reciclado (referencia SAE 1010/1020).  
Límite de fluencia adoptado:  $\sigma_{flue} = 390 \text{ MPa}$
- Ángulo = 30°
- FS = 2

**Cálculo:**

Área de la Sección:

$$A = \frac{\pi}{4}(625 - 441) \text{ mm}^2 = \frac{\pi}{4}(25 \text{ mm}^2 - 21 \text{ mm}^2)$$

En unidades del SI:

$$A \approx 144.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 1.445 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Tensión de compresión:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} = \frac{623 \text{ N}}{1.445 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \approx 4.3 \text{ MPa}$$

Límite Admisible del Material

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{flue}}{FS} = \frac{390 \text{ MPa}}{2} = 195 \text{ MPa}$$

Verificación del Material:

$$\sigma_t < \sigma_{adm}$$

$$4.3 \text{ MPa} < 195 \text{ MPa} \text{ (Verifica)}$$

**Conclusión:** El miembro corto que trabaja en compresión verifica ampliamente: el esfuerzo calculado es muy inferior al límite admisible del acero y por lo tanto, el asiento resiste adecuadamente las sollicitaciones de compresión estática.

### 2.6.3. Verificación a Flexión: Estructura de Asiento

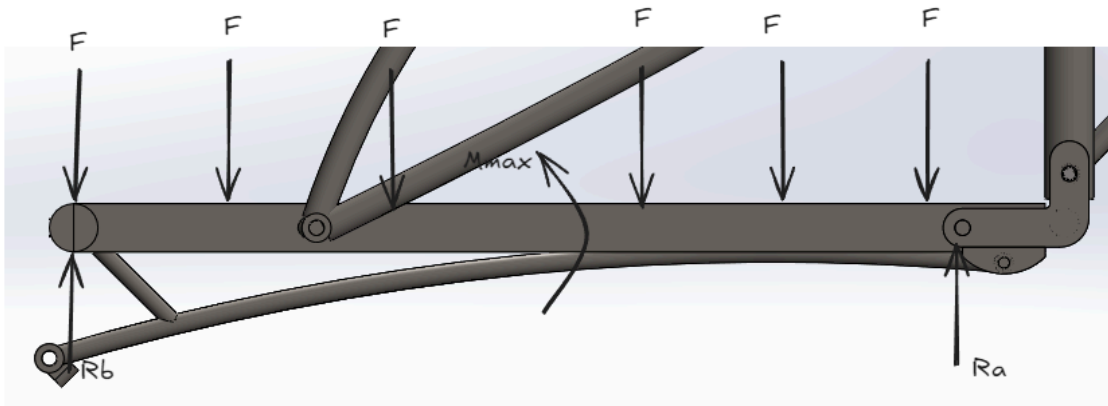


Fig 20: Verificación Asiento con sus Solicitaciones.

La flexión produce tensiones normales que varían linealmente en la sección. Para una viga **simplemente apoyada** con **carga distribuida uniforme**  $\omega$  sobre la luz  $L$ , el **momento flector máximo** se ubica en el centro del tramo y vale:

$$M_{max} = \frac{\omega L^2}{8} = \frac{FL}{8}$$

Donde  $F = \omega L$  Es la carga total aplicada. La tensión en la fibra extrema es:

$$\sigma_{flex} = \frac{M_{max}}{Z}, Z = \frac{I}{c}$$

Para una sección tubular circular (tubo hueco) se emplean las expresiones:

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - D_i^4) \text{ Módulo de Inercia } mm^4$$

$$Z = \frac{I}{c} = \frac{I}{D/2} \text{ Módulo Resistente } mm^3$$

La verificación de resistencia por flexión compara  $\sigma_{flex}$  con el límite de fluencia  $\sigma_{flex}/FS$  del material, normalmente introduciendo un factor de seguridad FS.

$$FS = 2$$

En la práctica, la flexión casi siempre aparece combinada con esfuerzos axiales y cortantes; por eso la comprobación final deberá considerar la combinación de esfuerzos (criterio de Von Mises), aunque aquí se calcula primero la componente flectora aislada para entender la contribución del momento.

### Hipótesis Adoptada:

- Material: acero al carbono reciclado (referencia SAE 1010/1020).  
 $\sigma_{flue} = 390 \text{ MPa}$
- Sección tubular representativa: diámetro exterior  $D=25 \text{ mm}$ , espesor  $e=2 \text{ mm}$ . Diámetro interior ( $D_i$ ) =  $D - 2e = 21 \text{ mm}$
- Carga total (usuario + estructura):  $P=1080 \text{ N}$ .
- Longitud del tramo  $L=500 \text{ mm}$
- Reacciones:  $R_a = R_b = F/2 = 540 \text{ N}$
- $FS = 2$
- Modelo de carga: **carga uniformemente distribuida** sobre  $L$ .

### Cálculos:

Intensidad lineal de carga (Carga Distribuida):

$$\omega = \frac{F}{L} = \frac{1080 \text{ N}}{500 \text{ mm}} = 2.16 \text{ N/mm}$$

Momento máximo (viga simplemente apoyada, carga distribuida):

$$M_{max} = \frac{\omega L^2}{8} = \frac{FL}{8} = \frac{1080 \times 500}{8} = 67500 \text{ Nmm}$$

Momento de inercia  $I$  ( $\text{mm}^4$ )

$$I = \frac{\pi}{64} (25^4 - 21^4) \approx 9.63 \times 10^3 \text{ mm}^4$$

Módulo Resistente  $Z$  ( $\text{mm}^3$ )

$$c = \frac{D}{2} = 12.5 \text{ mm} \rightarrow Z = \frac{I}{c} = 770 \text{ mm}^3$$

Tensión por Flexión (MPa)

$$\sigma_{flex} = \frac{M}{Z} = \frac{67500 \text{ N*mm}}{770 \text{ mm}^3} = 87.7 \text{ MPa}$$

Límite Admisible del Material

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{flue}}{FS} = \frac{390 \text{ MPa}}{FS} = 195 \text{ MPa}$$

## Verificación del Material

$$\sigma_{flex} < \sigma_{adm}$$

$$87.7 \text{ MPa} < 195 \text{ MPa} \text{ (Verifica)}$$

### Caso conservador (factor dinámico $\phi=1,5$ )

Si se considera un factor dinámico para cubrir impactos o asentamiento al sentarse ( $\phi=1,5$ ), la carga eficaz es  $F_d=\phi F=1620 \text{ N}$  y:

$$M_d = \frac{F_d * L}{8} = \frac{1620 \text{ N} \times 500 \text{ mm}}{8} = 101250 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_{flex} = \frac{101250 \text{ N*mm}}{770 \text{ mm}^3} = 131.6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{flex} < \sigma_{adm}$$

$$131.6 \text{ MPa} < 195 \text{ MPa} \text{ (Verifica Dinámicamente)}$$

### Conclusión:

- Modelando la carga como **distribuida** sobre el asiento (caso más realista), la sección tubular  $\varnothing 25 \times 2 \text{ mm}$  resulta segura con **FS = 2** en carga estática.
- Aplicando un criterio conservador ( $\phi=1,5$ ) la verificación da aún un rango aceptable para prototipos.
- En la práctica se recomienda garantizar que el asiento **reparta la carga** (plancha o travesaños) y evaluar la incorporación de **refuerzos** (aumento de espesor, segundo tubo en paralelo o triangulación) para aumentar la seguridad ante cargas dinámicas y variaciones de uso.

## 2.6.4. Verificación por Von Mises (Esfuerzos Combinados)

### Breve teoría

Cuando en una sección actúan simultáneamente tensiones normales (axial + flexión) y tensiones cortantes, la verificación adecuada para materiales dúctiles es el criterio de Von Mises. Este criterio, sustentado en la teoría de energía de distorsión, permite evaluar la combinación de esfuerzos mediante una tensión equivalente que se compara con el límite de fluencia del material (Beer & Johnston, 2015; Shigley et al., 2015).

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}$$

Se compara  $\sigma_{vm}$  con el límite admisible  $\sigma_{adm}$  del material y se obtiene la verificación del material en cuestión.

### Hipótesis adoptada (consistentes con 4.6)

- Carga total estática:  $P=1080 \text{ N}$
- Factor dinámico conservador:  $\phi=1.5 \Rightarrow F_d = \phi F=1620 \text{ N}$
- Luz del travesaño (asiento):  $L=500 \text{ mm}$ .
- Carga modelada como distribuida sobre  $L$  (caso realista).
- Momento dinámico máximo (viga simplemente apoyada, carga distribuida):

$$M_d = \frac{F_d * L}{8} = \frac{1620 \text{ N} \times 500 \text{ mm}}{8} = 101250 \text{ Nmm}$$

- Sección representativa:  $D = 25 \text{ mm}$ ,  $e = 2 \text{ mm}$ ,  $\Rightarrow D_i = 21 \text{ mm}$
- $Z$  (módulo resistente a flexión) =  $770 \text{ mm}^3$
- $A = 144.5 \text{ mm}^2 = 1.445 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
- $\sigma_{flue} = 390 \text{ MPa}$
- $FS = 2$
- Tensión Flectora dinámica:

$$\sigma_{flex,d} = \frac{M_d}{Z} = \frac{101250 \text{ Nmm}}{770 \text{ mm}^3} = 131.6 \text{ MPa}$$

- Cortante Máximo dinámico (Carga Distribuida):

$$V_{max} = \frac{F}{2} = 810 \text{ N}$$

Estimación conservadora de tensión cortante

$$\tau \approx \frac{V_{max}}{A} = \frac{810 \text{ N}}{1.445 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \approx 5.61 \text{ MPa}.$$

### Hipótesis A — Conservadora (toda la carga axial sobre un solo montante)

- Tensión axial dinámica (si un único montante tomara  $F_d$ ):

$$\sigma_{axial,d} = \frac{N_d}{A} = \frac{1620 N}{1.445 \times 10^{-4} m^2} \approx 11.2 MPa$$

- Tensión normal total en la fibra más cargada (flector + axial)

$$\sigma_{total} = \sigma_{flex} + \sigma_{axial} \approx 131.6 + 11.2 = 142.8 MPa.$$

- Obtención de esfuerzo combinado (Von Mises)

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = \sqrt{(142.8)^2 + 4 \times (5.61)^2} \approx 143.24 MPa.$$

- Obtención Sigma Admisible

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{flue}}{FS} = \frac{390 MPa}{2} \approx 195 MPa$$

- Verificación de Material

$$\sigma_{adm} > \sigma_{vm}$$

$$195 MPa > 143.24 MPa \text{ (Verifica)}$$

**Interpretación Hip. A:** Aceptable para prototipo; aconsejable reforzar o repartir carga para aumentar seguridad.

### Hipótesis B — Más realista (axial repartida en dos montantes)

- Axial dinámica por montante:

$$\sigma_{axia,d}^{(por\ montante)} \approx \frac{11.2 MPa}{2} = 5.61 MPa$$

- Cortante por momento (estimación)

$$\tau = \frac{5.61}{2} = 2.81 MPa$$

- Tensión normal total:

$$\sigma_{total} = 131.6 + 5.6 = 137.2 MPa$$

- Von Mises

$$\sigma_{vm} = \sqrt{137.2^2 + 4 \times 2.8^2} = 137.31 MPa$$

- Obtención Sigma Admisible

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{flue}}{FS} = \frac{390 MPa}{2} \approx 195 MPa$$

- Verificación de Material

$$\sigma_{adm} > \sigma_{vm}$$

$$195 MPa > 137.31 MPa \text{ (Verifica)}$$

**Interpretación Hip. B:** con reparto de carga entre dos montantes el resultado es coherente con las verificaciones previas (flexión + axial) y más cómodo desde el punto de vista práctico.

### Conclusión

Los cálculos analíticos muestran que los tubos reciclados seleccionados presentan un margen de seguridad adecuado frente a las solicitaciones consideradas. La sollicitación dominante es la flexión en el travesaño que soporta el asiento  $\varnothing 25 \times 2$  mm, presenta con un factor dinámico conservador ( $\phi=1.5$ ) un buen resultado. La verificación por Von Mises es aceptable para prototipo, se recomiendan medidas de refuerzo (distribución de carga, doble tubo, aumento de espesor o gussets) y la realización de ensayos físicos para garantizar la seguridad y durabilidad del sistema.

### 2.6.5. Verificación Unión Asiento-Respaldo con Planchuela en L, 1 Tornillo y 1 Pasador de Pivote

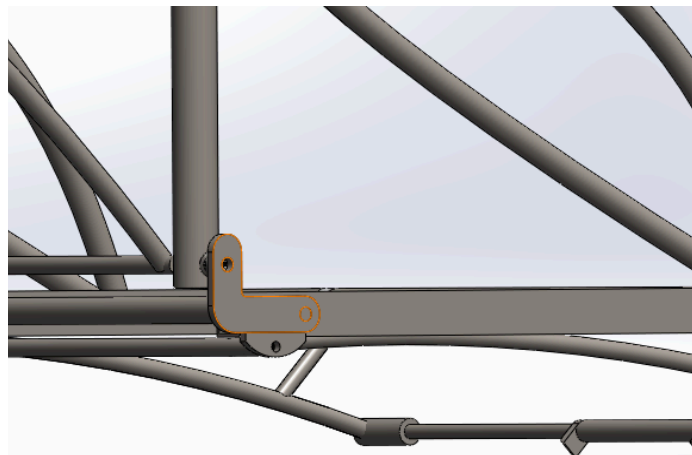


Figura 21: Verificación Planchuela "L" con Tornillo y Pasador.

### Fundamento teórico

La unión transmite una fuerza cortante  $V$  desde el asiento hacia el respaldo. Al existir **excentricidad**  $e$  (distancia entre la línea de acción de la carga y el eje del tornillo), aparece un **momento**  $M = Ve$  que tiende a **flexionar el ala** de la planchuela (comportamiento de **voladizo**) y a incrementar la demanda de **aplastamiento (bearing)** en el agujero.

El **pasador** funciona como **articulación de inclinación**; mecánicamente puede **no tomar carga** (caso conservador) o **compartir el cortante** con el tornillo (caso más realista).

### Fórmulas clave

- Momento por excentricidad:  $M = Ve$
- Flexión del ala (rectángulo  $b \times t$ , brazo  $a$ ):

$$Z = \frac{b \times t^2}{6}, \sigma_{ala} = \frac{(V_*)a}{Z}$$

Donde  $(V_*)$  es la fuerza que “ve” el ala:  $V/2$

- Aplastamiento (bearing) por elemento:  $\sigma_b = \frac{V}{td}$ , con  $V = V/2$
- Cortante en pasador (diámetro  $d_p$ ):  $\tau = \frac{V}{A} = \frac{V}{\pi \cdot d_p^2 / 4}$

### Geometría y Datos

- Planchuela acero bajo carbono:  $\sigma_{flue} = 390 \text{ MPa} \rightarrow$  admisible elástico  
 $\sigma_{adm} = 195 \text{ MPa}$
- FS = 2  
 $V_{RD} \approx 0.6 A_s f_u \approx 17.6 \text{ kN}$  (con  $f_u \approx 800 \text{ MPa}$ )
- Fuerza de cálculo en la unión (por lado, conservador):  $V=1000 \text{ N}$
- Separación entre centros: del pasador (en la ala horizontal que va al asiento) al tornillo M8 (en la ala vertical que va al respaldo):  
 $\Delta x=55 \text{ mm}$ ,  $\Delta y=28 \text{ mm}$ .
- **Planchuela**: espesor  $t=5 \text{ mm}$ , **ancho útil** en la base  $b=45 \text{ mm}$
- **Altura** desde la curvatura de la “L” hasta el borde superior:  $32,5 \text{ mm}$ .
- **Brazo del ala** (empotramiento/soldadura  $\rightarrow$  línea del tornillo): **adoptamos**  $a=25 \text{ mm}$ .

- Tornillo: **M8** clase **8.8** (orificio  $d=8$  mm;  $A_s \approx 36,6$  mm<sup>2</sup>)
- Pasador:  $\phi$ : 8 mm

### Cálculos:

Hipótesis de reparto

- **Tornillo** toma  $V/2=500$  N
- **Pasador** toma  $V/2=500$  N

Tornillo M8 en cortante

As (Área efectiva de rosca de un Tornillo M8) = 36.6 mm<sup>2</sup>

$\sigma_{flue} = 800$  MPa (tornillo M8)

$$\tau_{adm} = \frac{\sigma_{flue}}{2} = \frac{800 \text{ MPa}}{2} = 400 \text{ MPa}$$

$$\tau_{corte} = \frac{500 \text{ N}}{36.6 \text{ mm}^2} = 13.66 \text{ MPa}$$

Verifico Material:

$$\tau_{corte} < \tau_{adm}$$

$$13.66 \text{ MPa} < 400 \text{ MPa} \text{ (Verifica)}$$

Aplastamiento (Bearing) en la planchuela - Agujero Tornillo

$$\sigma_b = \frac{V/2}{t*d} = \frac{500}{5*8} = 12.5 \text{ MPa}$$

$$12.5 \text{ MPa} \ll 195 \text{ MPa} \text{ (Verifica)}$$

Pasador  $\phi$ 8 mm

$$\text{Cortante: } A = \frac{\pi*d^2}{4} = \frac{\pi*8^2}{4} = 50.27 \text{ mm}^2$$

$$\tau = \frac{500 \text{ N}}{50.27 \text{ mm}^2} \approx 10 \text{ MPa}$$

Verificación de Material

$$\tau_{adm} = \frac{\sigma_{flue}}{FS} = \frac{800 \text{ MPa}}{2} = 400 \text{ MPa}$$

$$\tau_{corte} < \tau_{adm}$$

$$10 \text{ MPa} < 400 \text{ MPa} \text{ (Verifica)}$$

- **Aplastamiento en su agujero** (mismo t y d)

$$\sigma_b = \frac{500 \text{ N}}{5\text{mm} \times 8\text{mm}} = 12.5 \text{ MPa}$$

Verificación de Material

$$\sigma_b < \sigma_{adm}$$

$$12.5 \text{ MPa} < 400 \text{ MPa} \text{ (Verifica)}$$

### Flexión del “Ala” de la L (Voladizo)

- **Módulo resistente de la sección rectangular b×t:**

$$Z = \frac{b \cdot t^2}{6} = \frac{45 \text{ mm} \times (5 \text{ mm})^2}{6} = 187.5 \text{ mm}^3$$

Donde:

- b=45 mm (ancho de la planchuela)
- t=5 mm (espesor de la planchuela)

Momento en la raíz del ala

$$M_{ala} = \left(\frac{V}{2}\right) \times a$$

Donde:

- V/2 = 500 N (mitad de la carga)
- a = 25 mm (brazo de palanca entre la reacción y la línea del tornillo)

$$M_{ala} = 500 \text{ N} \times 25 \text{ mm} = 12500 \text{ Nmm}$$

Tensión de flexión en la fibra más solicitada

$$\sigma_{ala} = \frac{M_{ala}}{Z} = \frac{12500 \text{ Nmm}}{187.5 \text{ mm}^3} = 66.7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Recordando que:

$$1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ala} = 66.7 \text{ MPa}$$

Comparación con el límite del material:

$$\sigma_{ala} = 66.7 \text{ MPa} < \sigma_{adm} = 195 \text{ MPa}$$

La sección cumple en flexión.

## 2.6.6. Caño Pivote Inferior (Despliegue hacia la horquilla)

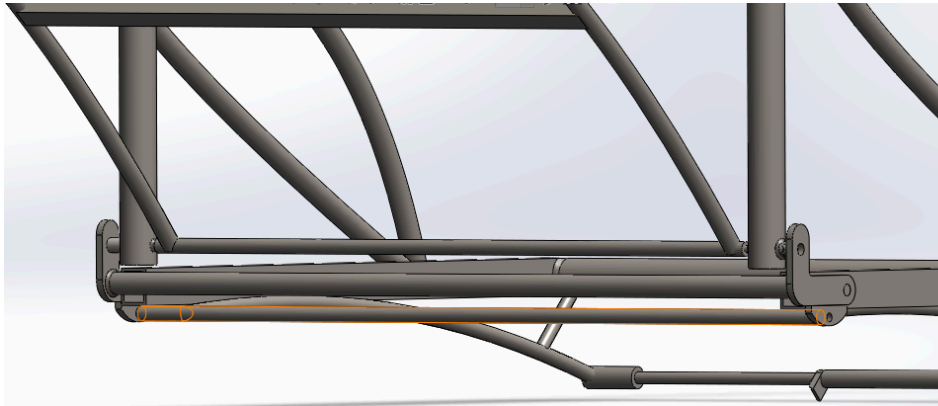


Figura 22: Verificación caño pivote de horquilla.

**Modelo:** viga simplemente apoyada con **carga puntual centrada** (representa el esfuerzo cuando el conjunto apoya/pivotea).

### Datos adoptados:

- Diámetro exterior  $D = 30 \text{ mm}$ , espesor  $e = 3 \text{ mm} \rightarrow D_i = 24 \text{ mm}$
- Luz entre apoyos  $L_p = 500 \text{ mm}$ .
- Carga representativa en el centro  $F = 350 \text{ N}$  (maniobra/apoyo)
- Material: acero bajo carbono ( $\sigma_{flue} = 390 \text{ MPa}$ )
- FS = 2

### Propiedades de sección

Área

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - D_i^2) = \frac{\pi}{4}(30 \text{ mm}^2 - 24 \text{ mm}^2) = 254.5 \text{ mm}^2$$

Inercia

$$I = \frac{\pi}{64}(D^4 - D_i^4) \approx 2.35 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

Módulo Resistente

$$Z = \frac{I}{D/2} = \frac{2.35 \times 10^4}{15} = 1.56 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

**Esfuerzos**

### Momento Máximo

$$M_{max} = \frac{F \times L_p}{4} = \frac{350 \text{ N} \times 500 \text{ mm}}{4} = 43750 \text{ Nmm}$$

### Cortante Máximo

$$V_{max} = \frac{F}{2} = 175 \text{ N}$$

### Tensión de Flexión

$$\sigma_{flex} = \frac{M_{max}}{Z} = \frac{43750 \text{ Nmm}}{1560 \text{ mm}^3} = 28 \text{ MPa}$$

### Tensión Cortante

$$\tau \approx \frac{V_{max}}{A} = \frac{175 \text{ N}}{254.5 \text{ m}^2} \approx 0.69 \text{ MPa.}$$

### Límites Admisible de Material

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{flue}}{FS} = \frac{390 \text{ MPa}}{2} = 195 \text{ MPa}$$

$$\tau_{adm} \approx \frac{\sigma_{flue}}{2} = \frac{395}{2} \approx 195 \text{ MPa.}$$

### Verificación de Material

$$\sigma_{flex} < \sigma_{adm}$$

$$28 \text{ MPa} < 195 \text{ MPa (Verifica)}$$

$$\tau_{corte} < \tau_{adm}$$

$$0.69 \text{ MPa} < 195 \text{ MPa (Verifica)}$$

### Conclusión

El caño pivote inferior Ø30×3 mm sometido a flexión y cortante presenta tensiones muy reducidas en comparación con la tensión admisible del material  $\sigma_{ad} = 195 \text{ MPa}$ . El cálculo arroja valores que se encuentran muy por debajo del límite. Por lo tanto, la sección

verifica ampliamente tanto frente a flexión como a corte, garantizando un desempeño seguro en las maniobras de apoyo y pivoteo.

### 2.6.7. Manillar trasero pivot

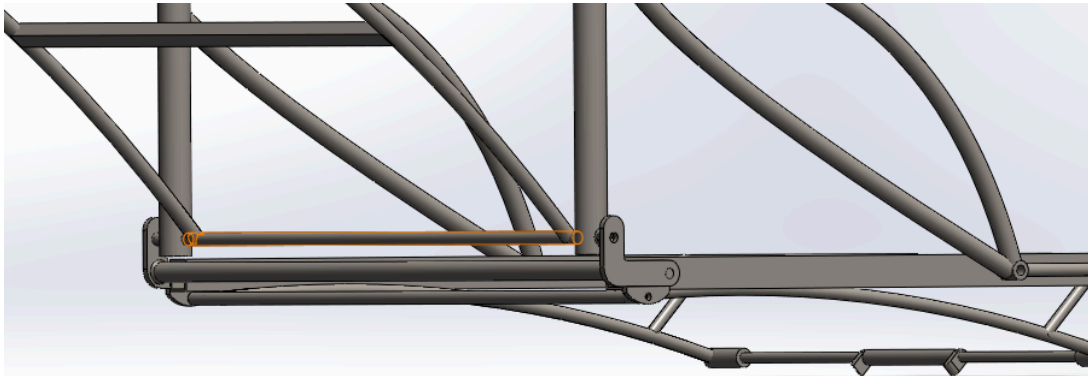


Figura 23: Verificación caño pivote de manillar.

**Modelo:** voladizo empotrado al bastidor con **fuerza horizontal** en el extremo (pechar/maniobrar).

#### Datos adoptados:

- Sección  $\text{Ø}25 \times 2 \text{ mm} \Rightarrow D = 25 \text{ mm}, D_i = 21 \text{ mm}$ .
- Longitud del voladizo  $L = 460 \text{ mm}$ .
- Empuje representativo  $P = 200 \text{ N}$ .
- $FS = 2$
- Material: acero bajo carbono,  $E$  (Módulo de Elasticidad) =  $210 \text{ GPa}$ ,  
 $\sigma_{flue} = 390 \text{ MPa}$

#### Propiedades $\text{Ø}25 \times 2$

Área

$$A = 144.5 \text{ mm}^2, I \approx 9.628 \text{ mm}^4, Z \approx 770 \text{ mm}^3$$

#### Esfuerzos y Flechas

Momento Máximo

$$M_{max} = PL = 200 \times 460 = 92000 \text{ Nmm}$$

Tensión de Flexión

$$\sigma_{flex} = \frac{M_{max}}{Z} = \frac{92000}{770} \approx 119.5 \text{ MPa}$$

Tensión Cortante

$$\tau \approx \frac{P}{A} = \frac{200}{144.5} \approx 1.38 \text{ MPa}$$

Von Mises

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = \sqrt{119.5^2 + 4 \times 1.38^2} \approx 119.53 \text{ MPa}$$

Límite Admisible del Material

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{flue}}{FS} = \frac{390 \text{ MPa}}{2} = 195 \text{ MPa}$$

Verificación del Material

$$\sigma_{vm} < \sigma_{adm}$$

$$119.53 \text{ MPa} < 195 \text{ MPa} \text{ (Verifica)}$$

**Conclusión:** Apto para prototipo, se puede reforzar de todas formas para mayor seguridad.

## 2.6.8. Barras de Agarre del Manillar

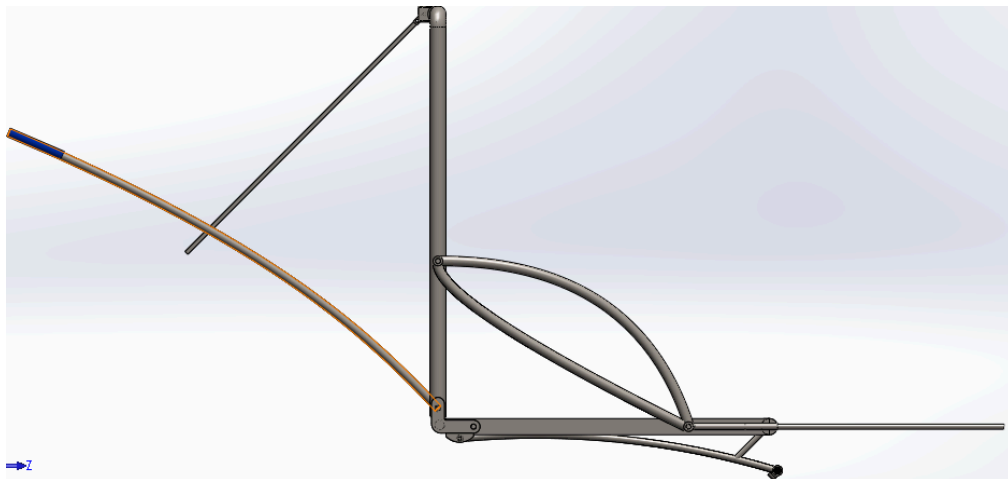


Figura 24: Verificación Agarre de manillar.

Las barras de agarre corresponden al manillar trasero de la silla, utilizado por el acompañante para empujar y guiar el desplazamiento. Estas barras funcionan

estructuralmente como **voladizos**, transmitiendo la fuerza de empuje aplicada por el operador hacia el bastidor.

La sollicitación principal proviene de un **esfuerzo horizontal** en el extremo libre, el cual genera un **momento flector** en la zona de unión con el chasis. Por esta razón, se analizan considerando su comportamiento como vigas en voladizo bajo carga puntual, con el objetivo de verificar que las tensiones generadas se mantengan dentro de los límites admisibles del material y garantizar así la seguridad y durabilidad del conjunto.

**Modelo:** cada barra como voladizo; se evalúa además **torsión en travesaño**.

**Datos Adoptados:**

- Sección  $\text{Ø}25 \times 2$  mm.
- Longitud  $L=660$  mm.
- Distancia entre barras  $b=456$  mm.
- Fuerza total  $P_{tot} = 200$  N.

Donde

- Caso Reparto (100 N en cada barra)  
 $M = 100 \times 660 = 66000$  Nmm,  $\sigma = 85.7$  MPa,  $FS = 2$
- Caso Unilateral (200 N en una barra)  
 $M = 200 \times 660 = 132000$  Nmm,  $\sigma = 171$  MPa,  $FS = 2$

Se consideró una sección tubular circular  $\text{Ø}25 \times 2$  mm con  $Z \approx 770$  mm<sup>3</sup> (Módulo resistente de Flexión) y un límite de fluencia del material de 390 MPa, es decir un límite admisible de 195 MPa.

**Conclusión**

Las barras de agarre traseras cumplen satisfactoriamente en las condiciones planteadas de uso.

Se recomienda:

- Incentivar el uso de ambas manos en la operación para repartir esfuerzos.
- Considerar un refuerzo local o el aumento del espesor de los tubos en futuras versiones, con el fin de garantizar mayor seguridad estructural bajo condiciones de carga asimétrica o dinámica.

## 2.6.9. Verificación de la Horquilla



Figura 25: Vista de ubicación de la horquilla.

### Introducción

La horquilla es un punto crítico porque recibe simultáneamente: (i) la reacción vertical del suelo (peso del sistema), (ii) el **par de frenado** transmitido caliper-disco, y (iii) el **par del motor** (en tracción o retención). Dado que se utiliza una horquilla **reciclada y modificada** (soldada/adaptada al bastidor), se adoptó una estrategia mixta: **refuerzo local + validación experimental**, priorizando la seguridad del usuario y la simplicidad constructiva propia del prototipo

### Cargas consideradas (marco cualitativo)

- **Carga vertical:**  $N \approx mg$  transferida en el eje de rueda.
- **Par de frenado:**  $M_f$  en el soporte del caliper  $\rightarrow$  momento flector y cortante en las “orejas”/chapas de anclaje y en los cordones de soldadura de la horquilla.
- **Par de tracción/retención** del hub motor: mismo camino de cargas que el frenado, con sentido opuesto.

### Criterio adoptado de diseño/seguridad

- **Refuerzo local** en la zona de anclaje del caliper y en la unión horquilla–bastidor (chapas/gussets y cordones continuos).

- **Geometría:** mantener alineación y rigidez del plano del disco para evitar flexiones fuera de plano.
- **Soldadura:** cordones con longitud efectiva suficiente, sin socavados, con repaso y control visual.

### **Validación experimental (ensayo de prototipo)**

Se reemplaza una verificación analítica exhaustiva por un protocolo práctico y reproducible:

1. **Inspección estática:** carga equivalente al peso de diseño (usuario + silla) sobre la rueda, controlando deformaciones visibles en la horquilla y en el soporte del caliper.
2. **Ensayo de frenado controlado** en llano: aplicar frenadas progresivas hasta bloqueo incipiente; verificar que no haya giros/aflojamientos del soporte ni fisuras en soldaduras.
3. **Pendiente moderada ( $\approx 5\%$ ):** mantener velocidad baja con frenadas repetidas de 3–5 s; revisar temperatura del rotor y estabilidad del soporte.
4. **Reinspección:** control visual de cordones y orejas de caliper (fisuras, deformaciones permanentes, aflojamiento de tornillería).
5. **Criterio de aceptación:** sin fisuras ni deformaciones residuales apreciables; tornillería y alineación intactas.

### **Conclusión**

La horquilla reciclada, **reforzada** en las zonas de mayor sollicitación y verificada mediante **pruebas funcionales preliminares**, cumple con el objetivo del prototipo: operación segura en llano y pendientes moderadas, manteniendo la alineación y sin evidencias de daño estructural durante las pruebas realizadas.

Para futuras iteraciones se recomienda: (i) utilizar una horquilla de especificación conocida o nueva, (ii) complementar la verificación con un análisis analítico de las orejas del caliper y cordones de soldadura (modelo de ménsula/soldadura), y (iii) considerar un aumento de espesor o diámetro en los refuerzos si se prevé un uso intensivo en descensos prolongados.

## **2.7. Resumen Capítulo 2: Estructura y Bastidor**

El análisis desarrollado en este primer capítulo permitió validar la estructura principal de la silla monorrueda, considerando los esfuerzos más representativos a los que se verá

sometida durante su uso. A través de las verificaciones analíticas de tracción, compresión y flexión, complementadas con la evaluación mediante el criterio de Von Mises, se comprobó que los tubos reciclados empleados en el bastidor presentan un comportamiento seguro frente a las solicitaciones previstas.

Es importante remarcar que el análisis se concentró en el asiento y horquilla (Verificaciones experimentales), al ser las zonas que reciben la mayor carga y constituyen los puntos más críticos de la estructura. El respaldo, en cambio, cumple una función principalmente ergonómica y de apoyo, por lo que las solicitaciones en esa zona son considerablemente menores y no requieren un estudio tan exhaustivo.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten afirmar que la estructura del bastidor responde de manera adecuada a las condiciones de uso previstas, siempre que la carga se distribuya correctamente y se incorporen los refuerzos recomendados en las zonas de mayor solicitación. Estos cálculos, junto con las evidencias gráficas, constituyen un respaldo sólido para la viabilidad del diseño y establecen la base sobre la cual se desarrollarán los siguientes sistemas de la silla (tracción, suspensión, frenado y dirección).

## Capítulo 3: Sistema de Tracción

El sistema de tracción constituye uno de los aspectos más relevantes en el diseño de la silla monorrueda, ya que determina la capacidad de desplazamiento del conjunto en distintos terrenos y condiciones de uso. A diferencia de los vehículos convencionales, en este prototipo la tracción no depende exclusivamente de un motor, sino que combina de manera sinérgica la fuerza humana de los acompañantes con la asistencia eléctrica de un motor integrado en la rueda principal.

Este enfoque responde a un criterio de simplicidad y accesibilidad: la fuerza manual de los operadores continúa siendo el elemento central de propulsión, mientras que el motor eléctrico cumple el rol de apoyo, reduciendo el esfuerzo físico requerido en pendientes, terrenos irregulares o recorridos prolongados. De esta manera, se logra un sistema híbrido que garantiza control, seguridad y eficiencia, manteniendo al mismo tiempo la robustez mecánica propia de un diseño pensado para entornos exigentes.

El presente capítulo desarrolla en detalle los fundamentos de este sistema, abordando tanto el análisis de los esfuerzos humanos aplicados como la integración del motor eléctrico, la transmisión de potencia a la rueda y la evaluación de las resistencias al avance. Asimismo, se incluyen verificaciones preliminares y recomendaciones de mejora que aseguren un desempeño confiable y seguro para el usuario y los operadores.

### 3.1. Concepto General de la Tracción

La tracción de la silla monorrueda se concibe como un sistema **híbrido**, donde la fuerza principal es generada por el **acompañante trasero**, mientras que el **motor eléctrico incorporado en la rueda** funciona como un **asistente** que reduce la exigencia física en condiciones críticas. Este enfoque permite mantener la esencia de la Joëlette tradicional —que depende de la fuerza humana—, pero sumando un componente tecnológico que mejora el rendimiento en terrenos irregulares o con pendientes.

Desde el punto de vista mecánico, la tracción humana se realiza mediante el empuje aplicado en el manillar trasero, lo que genera una fuerza de avance transmitida al bastidor y, en última instancia, a la rueda principal. Este empuje se ve complementado por la acción del motor, el cual entrega un torque adicional directamente en el eje de la rueda.

El sistema, por lo tanto, no sustituye al operador humano, sino que **lo acompaña**, permitiendo superar con mayor facilidad situaciones como:

- Ascensos prolongados en terrenos de pendiente.
- Superficies de alta resistencia al rodado (arena, barro, piedras sueltas).
- Trayectos largos donde el esfuerzo constante podría generar fatiga.

A nivel de diseño, esta concepción **mixta** aporta dos beneficios clave:

1. **Seguridad y confiabilidad**, ya que aun en ausencia de asistencia eléctrica la silla sigue siendo plenamente funcional mediante tracción humana.
2. **Accesibilidad**, pues al no depender exclusivamente del motor se simplifica la transmisión, el mantenimiento y los costos del sistema.

De esta manera, el sistema de tracción combina lo mejor de ambos mundos: la confiabilidad mecánica de un diseño probado y la ayuda tecnológica que brinda el motor, garantizando un desplazamiento más fluido, seguro y menos exigente para el acompañante



Figura 26: Vista del Manillar (Empuje Trasero).

## 3.2. Esfuerzo Humano de Empuje y Cargas Típicas

### Introducción teórica

El desplazamiento de un vehículo de asistencia como la silla monorrueda requiere vencer distintas resistencias al movimiento. En condiciones reales, estas resistencias provienen de tres componentes principales:

#### Resistencia a la rodadura:

1. **Resistencia por pendiente:** asociada a la proyección del peso del sistema en la dirección del plano inclinado.
2. **Resistencia a la rodadura:** debido a la deformación del neumático y el suelo.
3. **Resistencia aerodinámica:** relevante a mayores velocidades, pero despreciable en caminatas de trekking ( $v < 2$  m/s).

El esfuerzo humano se transmite a través del manillar trasero en forma de **fuerza horizontal**, mientras que la rueda convierte esa fuerza en **par de avance**. La magnitud de la fuerza necesaria dependerá de la masa total, el tipo de terreno y la inclinación del mismo. Para formalizar:

$$F_{pend} = m \times g \times \sin\theta$$

$$F_{rod} = \mu \times m \times g \times \cos\theta$$

$$F_{total} = F_{pend} + F_{rod}$$

$$\tau = F_{total} \cdot r$$

$$P = F_{total} \cdot v$$

Donde:

- $m$  = masa total (usuario + silla).
- $g$  = aceleración de la gravedad ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).
- $\theta$  = ángulo de pendiente.
- $\mu$  = coeficiente de rodadura ( $\approx 0,03$  en caminos de tierra compacta).
- $r$  = radio de la rueda ( $\approx 0,33$  m para rodado 26").
- $v$  = velocidad de avance ( $\approx 1$  m/s, ritmo de caminata).
- $\tau$  = par (torque) en el eje de la rueda [Nm] Representa el momento necesario en la rueda para vencer  $F_{total}$

### Cálculo con parámetros de diseño

- Masa usuario: **75 kg**
- Masa silla: **30 kg**
- Masa total: **105 kg**
- Fuerza peso:  $P = m \cdot g = 105 \times 9,81 \approx 1030 \text{ N}$

## Resultados representativos

### Terreno Llano ( $\theta = 0$ )

- $F_{rod} \approx 30.9 \text{ N}$
- $\tau \approx 10.2 \text{ Nm}$
- $P \approx 31 \text{ W}$

### Pendiente moderada ( $\theta = 5^\circ$ ):

- $F_{pend} \approx 89.7 \text{ N}$
- $F_{total} \approx 120.6 \text{ N}$
- $\tau \approx 39.8 \text{ Nm}$
- $P \approx 121 \text{ W}$

### Pendiente moderada ( $\theta = 10^\circ$ ):

- $F_{pend} \approx 170.6 \text{ N}$
- $F_{total} \approx 209.3 \text{ N}$
- $\tau \approx 69.1 \text{ Nm}$
- $P \approx 209 \text{ W}$

## Conclusión

- En llano, el esfuerzo requerido es bajo y manejable incluso sin asistencia ( $\approx 30 \text{ N}$ , similar a empujar una bicicleta cargada).
- En pendientes moderadas ( $5^\circ$ ), el esfuerzo se multiplica por 4, situándose en  $\approx 120 \text{ N}$ : aún manejable, pero exigente para trayectos largos.
- En pendientes exigentes ( $10^\circ$ ), se alcanzan  $\approx 210 \text{ N}$ , lo que compromete la autonomía del operador humano y justifica la necesidad de un sistema de asistencia motorizada.

El motor eléctrico deberá cubrir, al menos parcialmente, estas solicitudes. Una potencia de **100 W en rueda** equivale a reducir  $\approx 100 \text{ N}$  de esfuerzo humano, lo que permite transformar pendientes exigentes en manejables. Así, la tracción resultante es una **combinación entre el esfuerzo humano y la asistencia eléctrica**, garantizando equilibrio entre simplicidad mecánica y alivio en la operación.

### 3.3.Integración del Motor de Asistencia en la Tracción

#### Introducción teórica

El motor eléctrico incorporado en la rueda principal cumple la función de asistir al acompañante trasero, reduciendo el esfuerzo humano necesario para mantener el avance, especialmente en pendientes o trayectos prolongados. A diferencia de un sistema de tracción puramente motorizado, aquí el aporte del motor no sustituye la fuerza manual, sino que se suma a ella, generando una **tracción híbrida**.

La integración puede representarse como:

$$F_{total} = F_{humano} + F_{motor}$$

Donde la  $F_{total}$  debe ser mayor o igual a la suma de las resistencias al avance previamente calculadas (Rodadura + Pendiente).

De forma equivalente, en términos de potencia:

$$P_{total} = P_{humano} + P_{motor} \geq P_{requerida}$$

Esto implica que el motor actúa como un “alivio” para el operador humano, disminuyendo la magnitud de la fuerza que este debe aplicar en el manillar.

#### Cálculo Representativo

Si se considera que el esfuerzo humano máximo sostenible se encuentra en el rango de **100–150 W** (aprox. 100–150 N aplicados a 1 m/s), entonces el motor debe suplir la diferencia cuando la resistencia supera dicho umbral.

El torque que aporta el motor se calcula como:

$$\tau = \frac{P_{motor}}{\omega}$$

Con:

$$\omega = \frac{v}{r} \rightarrow \text{Velocidad angular de la rueda.}$$

#### Hipótesis Adoptada

- Masa total (usuario + silla): 105 kg

- Pendiente:  $5^\circ$
- Resistencia total (de 5.2):  $F_{total} \approx 120.6 \text{ N}$
- Potencia requerida:  $P \approx 121 \text{ W}$

Si el acompañante trasero entrega un esfuerzo constante de  $P_{humano} = 80 \text{ W}$  (aprox. 80 N a 1 m/s), entonces:

$$P_{motor} = P_{total} - P_{humano} = 121 - 80 = 41 \text{ W}$$

Con una rueda de radio  $r = 0.33 \text{ m}$  y velocidad  $v = 1 \text{ m/s}$ :

$$\omega = \frac{v}{r} \approx \frac{1}{0.33} \approx 3.03 \text{ rad/s}$$

$$\tau = \frac{P_{motor}}{\omega} = \frac{41}{3.03} \approx 13.5 \text{ Nm}$$

Por lo tanto, un motor que aporte al menos 15 Nm de torque en rueda permite que el esfuerzo humano se mantenga dentro de un rango cómodo durante la marcha asistida, transformando pendientes exigentes en transitables (Cherry & Behrendt, 2019).

Cabe mencionar que la caracterización detallada del motor y su curva de par-velocidad se desarrollará en el Capítulo 4, donde se analizarán sus prestaciones específicas y criterios de selección.

### Conclusión

El motor de asistencia no sustituye la fuerza humana, sino que la complementa, generando un sistema de tracción compartida que mejora la autonomía del acompañante y la accesibilidad del usuario. En pendientes moderadas, una ayuda de apenas 40–50 W ya representa una diferencia significativa en la fatiga percibida, mientras que en pendientes más exigentes ( $10^\circ$  o superiores) el aporte del motor se vuelve indispensable para mantener el avance.

Este análisis confirma que la tracción híbrida es adecuada para el prototipo, ya que combina simplicidad mecánica con eficiencia energética, priorizando la seguridad y la sustentabilidad del diseño.

## 3.4. Transmisión y Acoplamiento

### Introducción teórica

La transmisión constituye el conjunto de elementos encargados de transferir la potencia generada por el motor eléctrico hacia la rueda principal de la silla monorrueda. En este prototipo, la configuración adoptada corresponde a un **motor integrado en el buje (hub motor)**, lo que implica una conexión directa entre el eje del motor y la rueda, sin necesidad de correas o engranajes intermedios.

Este tipo de acoplamiento presenta ventajas significativas:

- **Simplicidad mecánica:** elimina componentes intermedios que podrían incrementar pérdidas por fricción o requerir ajustes de alineación.
- **Mantenimiento reducido:** al carecer de transmisión secundaria (correa/cadena), se minimizan los desgastes y la necesidad de lubricación.
- **Respuesta inmediata:** el par del motor se aplica directamente a la rueda, mejorando la progresividad y la eficiencia.

Sin embargo, esta solución también exige que el motor tenga un **par nominal elevado**, ya que no cuenta con la multiplicación mecánica que proporcionaría un sistema de engranajes. Además, el montaje directo implica esfuerzos radiales y axiales sobre el eje que deben ser soportados tanto por los rodamientos como por la estructura del buje.

### Formulación general

En una transmisión directa:

$$\tau_{rueda} = \tau_{motor}$$

La velocidad angular de la rueda depende directamente de la velocidad angular del motor:

$$\omega_{rueda} = \omega_{motor}$$

La relación de transmisión es, por tanto,  **$i = 1$** .

$$i = \frac{Z_{conducida}}{Z_{conductora}}$$

Por ende:

$$\tau_{rueda} = i \times \tau_{motor} ; \omega_{rueda} = \frac{\omega_{rueda}}{i}$$

Pero en este caso no se aplica, al haber acoplamiento directo.

### **Análisis representativo**

Considerando los valores obtenidos en el apartado 5.3 (torque requerido en pendiente de  $5^\circ \approx 13,5 \text{ Nm}$ ), el hub motor debe entregar como mínimo este valor en su eje para garantizar que la rueda pueda superar las resistencias de rodadura y pendiente.

De este modo:

- En **terreno llano**, el esfuerzo es bajo y la transmisión directa aprovecha toda la potencia sin pérdidas significativas.
- En **pendientes moderadas o exigentes**, el motor debe cubrir la diferencia entre la potencia humana y la requerida, lo cual exige verificar que su par nominal y su corriente de trabajo sean compatibles con el diseño eléctrico del sistema.

### **Conclusión**

La transmisión directa mediante hub motor resulta adecuada para este prototipo al priorizar simplicidad, robustez y bajo mantenimiento. Si bien limita la posibilidad de multiplicar par mediante engranajes, esta condición se compensa con la asistencia humana que constituye el aporte principal de la tracción.

En versiones futuras, podría evaluarse la incorporación de un sistema de reducción externa (ej. engranajes planetarios o correa dentada), lo cual permitiría seleccionar motores de menor par nominal y optimizar la eficiencia en pendientes elevadas.

## **3.5. Resumen Capítulo 3: Sistema de Tracción**

El análisis realizado permitió establecer que la tracción en la silla monorrueda se fundamenta en la combinación entre el esfuerzo humano aplicado por el acompañante trasero y la asistencia de un motor eléctrico montado en la rueda principal. Esta configuración híbrida asegura un equilibrio entre simplicidad mecánica y eficiencia en el desplazamiento, adaptándose a distintas condiciones de terreno.

Los cálculos desarrollados muestran que, en superficies planas o con pendientes leves, el empuje humano resulta suficiente para mantener el movimiento del conjunto,

mientras que en pendientes moderadas o exigentes la contribución del motor se vuelve fundamental para garantizar la seguridad del usuario y la autonomía del operador. De esta manera, el sistema logra transformar situaciones que serían físicamente demandantes en trayectos accesibles.

Asimismo, la elección de una transmisión directa mediante hub motor favorece la robustez del diseño, al reducir la necesidad de mecanismos adicionales de engranajes o correas y, por lo tanto, minimizar el mantenimiento. Esta simplicidad estructural se alinea con los objetivos de accesibilidad, sostenibilidad y confiabilidad que guían todo el proyecto.

En conclusión, el sistema de tracción cumple con los criterios de funcionalidad y seguridad planteados, garantizando un desplazamiento continuo y estable. La continuidad del análisis se abordará en el capítulo siguiente, donde se profundizará en la selección del motor, su integración con el sistema eléctrico y la interacción con el usuario final.

## Capítulo 4: Motor de Asistencia

El motor eléctrico constituye el elemento clave de apoyo en la tracción híbrida de la silla monorrueda, ya que complementa la fuerza ejercida por el acompañante trasero y permite afrontar pendientes, trayectos prolongados o terrenos irregulares sin comprometer la seguridad ni aumentar la demanda física sobre el acompañante. A diferencia de un sistema de tracción exclusivamente motorizado, este motor no reemplaza el esfuerzo humano, sino que lo asiste, reduciendo la fatiga y posibilitando una movilidad más inclusiva y eficiente.

Desde el punto de vista ingenieril, la incorporación del motor responde a criterios de **ergonomía, seguridad y sostenibilidad**. Su capacidad de entregar par de manera instantánea, junto con la simplicidad de una transmisión directa en el buje de la rueda, garantiza una respuesta progresiva y confiable. Además, al tratarse de un sistema eléctrico, ofrece ventajas significativas frente a alternativas de combustión, como ausencia de emisiones locales, bajo nivel de ruido y mínimo mantenimiento.

Este capítulo se organiza en distintos apartados que abarcan la descripción del principio de funcionamiento de los motores eléctricos aplicados a movilidad asistida, la selección del tipo de motor más adecuado, la integración con la estructura de la silla y el dimensionamiento básico de potencia y par necesarios para garantizar un desempeño seguro en condiciones reales de uso.

### 4.1. Motor Disponible y Contexto de Integración

El motor eléctrico incorporado en el prototipo no fue seleccionado a partir de un estudio comparativo entre distintas alternativas, sino que corresponde a un componente previamente disponible, facilitado por el **Dr. Ing. Guillermo Catuogno**, director del presente trabajo final. Esta circunstancia condicionó parcialmente el diseño, ya que el motor no fue adquirido específicamente para esta aplicación, sino adaptado como recurso existente.

En términos de investigación aplicada, esta decisión presenta una doble ventaja: por un lado, posibilitó avanzar en la construcción del prototipo sin necesidad de realizar una inversión inicial significativa; por otro, permitió evaluar en condiciones reales la factibilidad de integrar un motor de características estándar en un sistema de movilidad asistida.

No obstante, cabe aclarar que este motor no necesariamente representa la opción óptima desde el punto de vista del dimensionamiento. Por ello, en el apartado de **mejoras y recomendaciones futuras** se propondrá la selección de un motor con potencia y par adecuados al nivel de esfuerzo identificado en los cálculos del capítulo anterior, priorizando el equilibrio entre **rendimiento, simplicidad y economía**.

De este modo, el presente capítulo se enfoca tanto en describir la integración del motor disponible como en establecer las bases teóricas que permitan, en un futuro, una elección más ajustada a los requerimientos de diseño.

## 4.2. Característica Generales del Motor Utilizado

El motor incorporado en el prototipo corresponde a un sistema tipo **hub motor** (motor integrado en el eje de la rueda), ampliamente utilizado en bicicletas y vehículos eléctricos ligeros. Este tipo de motorización ofrece ventajas importantes para el presente proyecto: simplicidad de montaje, bajo mantenimiento, funcionamiento silencioso y una transmisión directa del par al suelo sin necesidad de cadenas o correas.

Aunque el componente específico no fue seleccionado mediante un estudio comparativo, es posible establecer un rango de características técnicas representativas en función de motores equivalentes para ruedas de bicicleta de 26 pulgadas:

Tabla 1: Características Generales del Motor

Parámetro	Valor Típico (Estimado)	Observación
Tipo	Motor Eléctrico hub DC	Montado directamente en la rueda
Tensión nominal	24-36 V	Dependiendo del controlador disponible.
Potencia nominal	250-350 W	Equivalente a la asistencia estándar de bicicletas eléctricas.
Par máximo	12-18 Nm	Suficiente para pendientes moderadas ( $\approx 5-10^\circ$ ).
Velocidad de Rotación	200-300 rpm	Equivale a $\approx 20-25$ Km/h en bicicleta.
Rendimiento típico	75-85 %	Depende de la carga y de la electrónica de control.

Este rango de parámetros permite inferir que el motor disponible será capaz de **asistir significativamente el empuje manual**, especialmente en terrenos llanos y pendientes moderadas, aunque podría resultar limitado en condiciones extremas (pendientes superiores al 10 % o terrenos muy irregulares).

Desde el punto de vista ingenieril, la **integración del motor** en el sistema de tracción se centra en dos aspectos:

1. **Compatibilidad mecánica:** el motor se encuentra montado en el eje de la rueda, transmitiendo directamente el torque sin intermediarios. Esto reduce pérdidas por transmisión y simplifica el ensamblaje, pero requiere que el bastidor absorba los esfuerzos generados en los soportes laterales.
2. **Compatibilidad eléctrica:** al no haber sido elegido específicamente, el motor deberá adaptarse al sistema de alimentación y control disponible. Esto condiciona su desempeño real, ya que la tensión y corriente suministrada determinarán el par efectivo y la autonomía.

En conclusión, el motor utilizado constituye una **solución práctica y viable para un prototipo funcional**, al permitir evaluar la factibilidad de la asistencia eléctrica en condiciones reales. Sin embargo, en términos conceptuales, la comparación con motores de mayor par y potencia deja en claro que la elección de este componente responde principalmente a la disponibilidad y a la necesidad de avanzar en la construcción, más que a un dimensionamiento óptimo desde el diseño.

### 4.3. Tipo de Motor y Sistema de Conexión

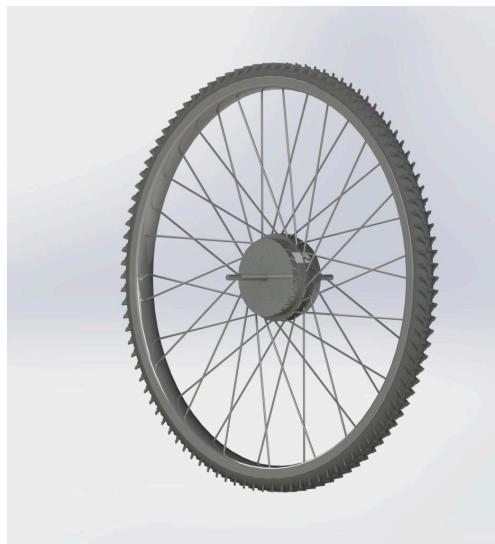


Figura 27: Motor incluido en la Rueda (motor hub)

#### **Motor Brushless (BLDC)**

El sistema de tracción de la silla monorrueda se basa en un **motor eléctrico tipo Brushless DC (BLDC)**, integrado en el buje de la rueda principal. Este tipo de motor, a diferencia de los motores de corriente continua con escobillas, **no posee contacto mecánico entre rotor y estator**, eliminando el desgaste por fricción y aumentando significativamente la **eficiencia, durabilidad y suavidad de funcionamiento**.

El motor **recibe alimentación de corriente continua (CC)**, pero su funcionamiento requiere una **conmutación electrónica trifásica**. Dicha conmutación se logra mediante un **controlador electrónico (driver)**, que genera las tres señales de corriente alterna desfasadas entre sí para crear el campo giratorio necesario.

En el caso del motor utilizado, el controlador trabaja con **tensión nominal de 36 V**, adecuada para motores de asistencia eléctrica en bicicletas y dispositivos de movilidad ligera.

### **Controlador y sistema de conexión**

El **kit de conexión** del motor está compuesto por:

- **Controlador electrónico BLDC (36 V)**

Encargado de transformar la corriente continua de la batería en un sistema trifásico controlado electrónicamente. Este componente también:

- **Limita la corriente de arranque**, evitando picos que podrían dañar el motor.
- **Proporciona un arranque progresivo**, que mejora el confort y la seguridad del usuario.
- **Actúa como limitador de velocidad y par**, protegiendo tanto al sistema eléctrico como al mecánico.
- **Incluye función de freno electrónico**, que interrumpe la entrega de potencia al accionar el freno mecánico.

- **Acelerador tipo gatillo (hall sensor)**

Permite regular la velocidad de avance, controlando el nivel de tensión de señal que interpreta el controlador (de aproximadamente 0.8 V a 4.2 V).

- **Batería de 36 V**

Fuente de energía principal, equipada con sistema BMS (Battery Management System) que supervisa el estado de carga y descarga.

El esquema general de conexión se muestra en la siguiente figura:

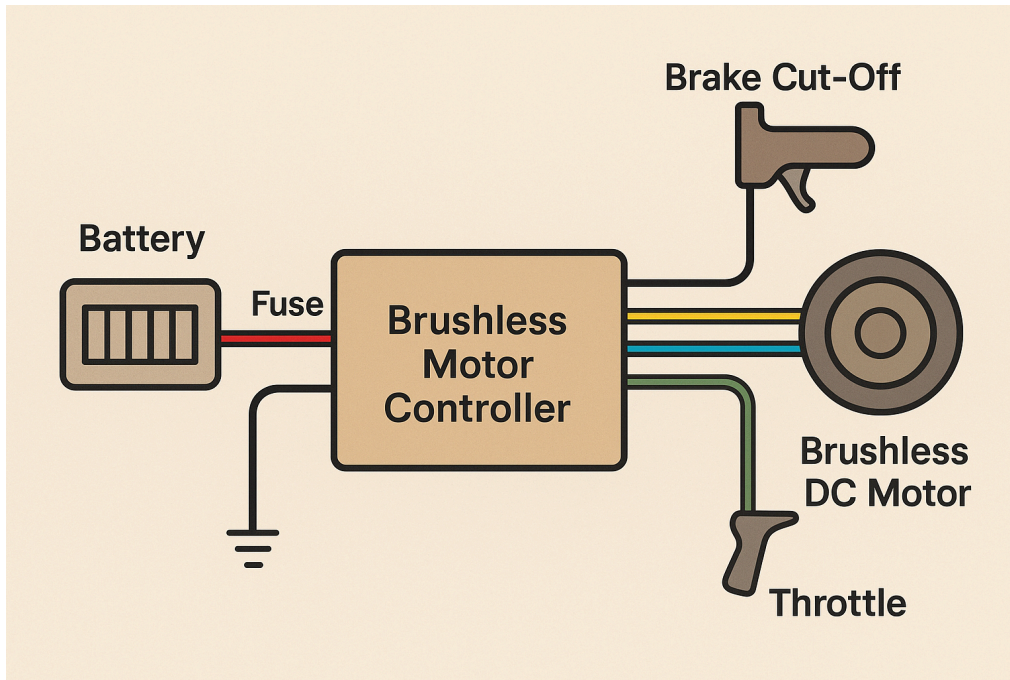


Figura 28: Diagrama de Conexión al Motor Brushless

Tabla 2: Descripción del Motor BLDC

Componente	Descripción	Función Principal
Motor BLDC	Integrado a la Rueda	Conversión Electromecánica del Movimiento
Controlador	Electrónico de 36 V	Conmutación Trifásica y Limitador de Corriente
Batería	36 V	Fuente de Alimentación
Acelerador	Gatillo con Sensor Hall	Control de Velocidad
Freno a Disco	Mecánico + Señal de Corte	Seguridad y Control de Detención

### Ventajas del sistema BLDC

- **Alta eficiencia energética** (superior al 85%).
- **Bajo mantenimiento** (sin escobillas ni conmutador).
- **Funcionamiento silencioso** y con **arranque suave**.

- Mayor **vida útil** del motor y los componentes eléctricos.
- Posibilidad de **recuperación de energía** (según el controlador, si tuviera esa función).

## 4.4. Desempeño del Motor

El desempeño del motor disponible puede evaluarse a partir de las solicitudes obtenidas en el capítulo anterior sobre el sistema de tracción. Recordemos que la fuerza total a vencer se compone de la resistencia a la rodadura y de la componente del peso proyectada sobre la pendiente, expresada como:

$$F_{total} = F_{rodadura} + F_{pendiente}$$

Y que el par en la rueda se calcula como:

$$\tau = F_{total} \times r$$

Donde  $r = 0.33 \text{ m}$  para ruedas rodado 26".

La potencia mecánica asociada al movimiento se obtiene mediante la expresión:

$$P = F_{total} \times v$$

Donde  $v$  es la velocidad de avance, adoptada en 1 m/s (equivalente a un ritmo de caminata normal).

### Hipótesis Adoptada

#### Terreno llano ( $\theta = 0^\circ$ ):

- Resistencia por rodadura:  $F_{rod} \approx 31 \text{ N}$
- Par requerido:  $\tau \approx 10.2 \text{ Nm}$
- $P \approx 31 \text{ W}$

#### Pendiente moderada ( $\theta = 5^\circ$ ):

- Resistencia por rodadura:  $F_{total} \approx 120.6 \text{ N}$
- Par requerido:  $\tau \approx 39.8 \text{ Nm}$
- $P \approx 121 \text{ W}$

#### Pendiente exigente ( $\theta = 10^\circ$ ):

- Resistencia por rodadura:  $F_{total} \approx 209.3 N$
- Par requerido:  $\tau \approx 69.1 Nm$
- $P \approx 209 W$

#### Comparación con el motor disponible

El motor disponible (estimado entre 250–350 W y 12–18 Nm) resulta sobredimensionado en potencia para trayectos llanos y pendientes suaves, donde el esfuerzo humano es reducido.

En pendientes del 5 %, el par requerido ( $\approx 40 Nm$ ) supera lo que el motor puede entregar de forma aislada; en este caso, la combinación con el empuje humano resulta indispensable.

En pendientes del 10 %, el par demandado ( $\approx 70 Nm$ ) excede ampliamente la capacidad del motor, por lo que este solo funcionará como un apoyo parcial, reduciendo el esfuerzo humano, pero sin garantizar un desplazamiento totalmente autónomo.

#### **Conclusión**

El motor disponible permite comprobar la viabilidad de la asistencia eléctrica en un prototipo funcional. Su aporte es suficiente para mejorar la maniobrabilidad en terrenos llanos y moderados, y aunque no alcanza para pendientes exigentes, representa un alivio considerable en el esfuerzo del operador.

Este análisis evidencia que el concepto de **tracción híbrida (humano + motor)** es adecuado para un prototipo sustentable, mientras que para versiones futuras deberá evaluarse un motor de mayor par ( $\geq 40 Nm$ ) que asegure un rendimiento óptimo en escenarios más desafiantes.

## **4.5. Integración Mecánica y Eléctrica del Motor en el Bastidor**

### **Introducción teórica**

La integración de un motor de asistencia en una estructura monorrueda plantea dos grandes desafíos: **la fijación mecánica** al bastidor y **la conexión eléctrica** al sistema de alimentación y control. Un motor tipo *hub*, al estar montado directamente en la rueda,

reduce la complejidad de transmisión (no requiere cadenas ni correas), pero transfiere directamente los esfuerzos mecánicos al eje y a las uniones con el chasis.

Desde el punto de vista eléctrico, es necesario un sistema de alimentación que provea tensión y corriente adecuadas, además de un controlador básico que permita gestionar funciones de encendido, apagado y aceleración progresiva. Aunque en este prototipo el control se limita a *marcha / parada*, la estabilidad y seguridad dependen de una correcta integración entre motor, controlador y banco de baterías.

### **Integración mecánica**

El motor se encuentra alojado en la **masa de la rueda principal**, funcionando como un conjunto solidario al eje. De esta manera:

- **Transmisión directa:** el torque generado por el motor se aplica directamente al contacto rueda–suelo, eliminando pérdidas por transmisión mecánica intermedia.
- **Soporte estructural:** el bastidor debe resistir los esfuerzos generados por el par motor (hasta  $\approx 18$  Nm), sumados a los provenientes del empuje humano y de las solicitaciones del terreno.
- **Fijación:** la sujeción se realiza mediante anclajes rígidos en las horquillas laterales, reforzadas para evitar deformaciones locales o giros indeseados del eje.

Este esquema simplifica la mecánica, pero concentra esfuerzos en las uniones soldadas y tornillos de sujeción, que deben verificarse para asegurar la durabilidad del sistema.

### **Integración eléctrica**

El motor requiere un sistema eléctrico mínimo compuesto por:

1. **Banco de baterías:**
  - Tensión nominal: 24–36 V.
  - Capacidad a definir en función de la autonomía deseada.

- Ubicación prevista: bajo el bastidor o en el respaldo tipo mochila anclada, protegida, para mantener bajo el centro de gravedad.

## 2. **Controlador:**

- Permite la conmutación segura de corriente hacia el motor.
- Regula el arranque suave y limita picos de corriente.
- En este prototipo se plantea un control tipo *on/off* con acelerador gatillo, comandado por un controlador o driver que limita la corriente para protección y un avance progresivo del motor, evitando un desgaste innecesario o falla del mismo, descartando estrategias avanzadas (PID, vectorial, etc.) para mantener simplicidad y accesibilidad.

En los motores eléctricos de tipo hub, el instante de arranque representa la condición más exigente desde el punto de vista eléctrico, ya que el motor requiere un pico de corriente elevado para vencer la inercia inicial. Si esta corriente no se limita, puede producir **sobrecalentamiento de los bobinados, daños en la electrónica interna o un envejecimiento prematuro del banco de baterías.**

Por esta razón, se adopta la incorporación de un **controlador**, que permite conmutar el motor de manera segura y limita automáticamente la corriente de arranque dentro de valores admisibles. Esta solución mantiene la simplicidad y el bajo costo del prototipo, al mismo tiempo que protege los componentes eléctricos y asegura un funcionamiento confiable durante las pruebas iniciales.

## 3. **Sistema de comando:**

- El operador acciona un interruptor o acelerador tipo gatillo, determinando cuándo entra en funcionamiento el motor.
- La lógica es de asistencia: el motor se enciende cuando el esfuerzo humano no es suficiente a través del gatillo (ej. pendientes o trayectos largos).

## **Limitaciones y consideraciones**

- El motor disponible no fue diseñado para este bastidor en particular, por lo que la fijación es una **adaptación artesanal**.
- El peso del banco de baterías puede modificar el centro de gravedad; su ubicación es crítica para no afectar la maniobrabilidad.
- Aunque el motor entrega suficiente potencia para pendientes moderadas, su **par máximo (12–18 Nm)** es inferior al requerido en pendientes exigentes, por lo que la **interacción humano + motor** es indispensable.

A continuación, se presenta un esquema o diagrama funcional:

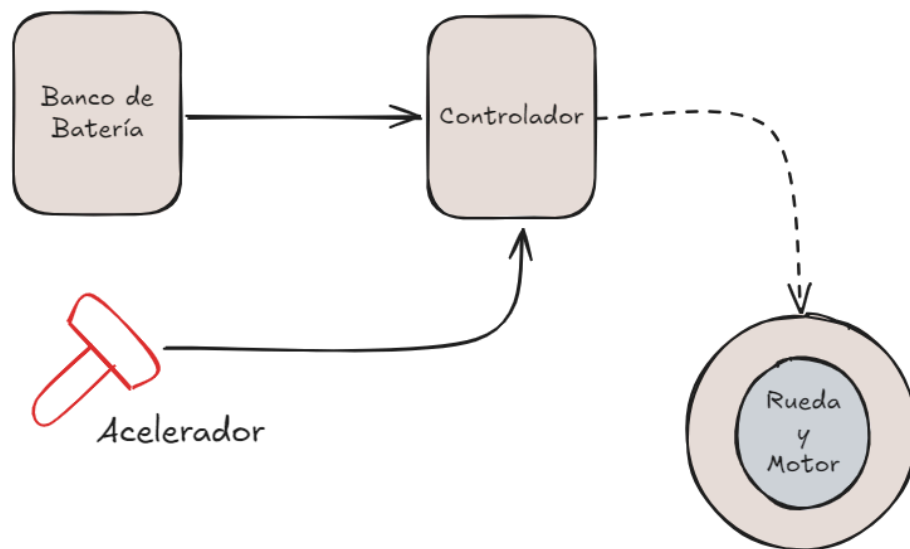


Figura 29: Diagrama de Funcionamiento.

## Conclusión

La integración mecánica y eléctrica del motor disponible en el bastidor confirma la viabilidad del concepto de asistencia híbrida: **simple, funcional y de bajo costo**. Si bien el prototipo presenta limitaciones en pendientes elevadas y autonomía, la solución adoptada es suficiente para validar el diseño y sentar bases sólidas para una futura optimización en versiones mejoradas.

## 4.6. Resumen Capítulo 4: Motor de Asistencia

El análisis desarrollado permitió comprender el rol del motor disponible dentro del sistema de tracción híbrida. A través de las estimaciones de par y potencia en distintos escenarios de uso, se verificó que el componente actual resulta adecuado para trayectos

llanos y pendientes moderadas, aunque insuficiente para pendientes exigentes, donde su función se limita a un apoyo parcial.

La integración mecánica y eléctrica, pese a ser de carácter adaptativo y no diseñada específicamente para esta aplicación, demostró ser viable en términos de funcionalidad, simplicidad y bajo costo. El esquema de tracción híbrida —basado en la cooperación entre el esfuerzo humano y la asistencia eléctrica— constituye una solución práctica y coherente con los objetivos del proyecto: ofrecer accesibilidad y autonomía en entornos de montaña con recursos limitados.

En síntesis, este capítulo confirma la pertinencia del motor como elemento de validación experimental en el prototipo, al mismo tiempo que señala las bases para futuras optimizaciones en materia de selección de motor, dimensionamiento del banco de baterías y estrategias de control.

# Capítulo 5: Sistema de Suspensión y Neumático

El sistema de suspensión y el neumático constituyen un subsistema clave dentro de la silla monorrueda motorizada, ya que determinan en gran medida la **comodidad, estabilidad y seguridad** durante el desplazamiento en terrenos irregulares. A diferencia de un vehículo convencional con múltiples ruedas, en la silla monorrueda todo el peso del usuario y de la estructura se transmite a un único punto de apoyo principal: la rueda central. Esto implica que tanto el neumático como la suspensión deben trabajar de manera conjunta para absorber impactos, mantener el contacto constante con el suelo y garantizar un desplazamiento controlado.

La suspensión actúa como un filtro dinámico entre el terreno y la estructura, disipando la energía producida por vibraciones y golpes que, de otro modo, serían transmitidos directamente al usuario. Su diseño debe encontrar un equilibrio entre **flexibilidad para la absorción de impactos y rigidez para la estabilidad**, evitando oscilaciones excesivas que comprometan el control del dispositivo.

Por su parte, el neumático cumple un doble rol: por un lado, asegura la adherencia y tracción necesarias para que las fuerzas de empuje humano y asistencia motorizada se transformen en movimiento efectivo; por otro, aporta una primera etapa de amortiguación gracias a la deformación controlada de la goma y la cámara de aire. La elección de sus dimensiones, el tipo de dibujo y la presión de inflado son variables críticas que impactan en la maniobrabilidad, el esfuerzo requerido y la seguridad en condiciones adversas como barro, piedras sueltas o pendientes.

En conjunto, suspensión y neumático conforman la **interfaz directa entre el vehículo y el entorno**, siendo responsables de que la silla pueda transitar caminos de montaña y senderos de trekking con un nivel adecuado de confort y seguridad para el usuario. Este capítulo aborda el diseño, selección y análisis preliminar de ambos elementos, integrando tanto fundamentos teóricos como consideraciones prácticas de fabricación y mantenimiento.

## 5.1. Suspensión

### Introducción teórica

La suspensión es el sistema encargado de absorber las irregularidades del terreno y garantizar la **estabilidad dinámica** de la silla monorrueda durante su desplazamiento. En un vehículo de una sola rueda central, su papel es aún más crítico que en sistemas multirrueda, ya que todo el peso del usuario y de la estructura se transmite a un único punto de contacto con el suelo.

En términos de ingeniería, la suspensión cumple tres funciones principales:

1. **Confort:** reducir las vibraciones y golpes que percibe el usuario al transitar terrenos irregulares.
2. **Seguridad:** mantener la rueda en contacto constante con el suelo, evitando pérdidas de adherencia que puedan comprometer la maniobrabilidad.
3. **Protección estructural:** disminuir los esfuerzos dinámicos transmitidos al bastidor y a las uniones soldadas, prolongando la vida útil del dispositivo.

El comportamiento dinámico de la suspensión puede modelarse con el sistema **masa-resorte-amortiguador**, cuya ecuación general es:

$$m \times x''(t) + c \times x'(t) + k \times x(t) = F(t)$$

Donde:

- $m$  = masa equivalente del sistema (usuario + silla),
- $c$  = coeficiente de amortiguamiento,
- $k$  = rigidez del resorte,
- $x(t)$  = desplazamiento relativo,
- $F(t)$  = fuerza externa (irregularidades del terreno).

El ajuste de  $k$  y  $c$  es fundamental: una suspensión demasiado rígida transmite vibraciones directamente al usuario, mientras que una muy blanda puede generar inestabilidad y oscilaciones peligrosas.

### **Consideraciones de diseño**

En el prototipo de la silla monorrueda, se prevé utilizar **amortiguadores reciclados de motocicleta**, seleccionados por:

- **Capacidad de carga:** diseñados originalmente para pesos y solicitaciones superiores, ofrecen un margen de seguridad adecuado.
- **Disponibilidad:** al provenir de vehículos en desuso, permiten reducir costos de fabricación.
- **Combinación resorte + amortiguador hidráulico:** lo que asegura un comportamiento equilibrado entre absorción de impactos y disipación de energía.

La ubicación se plantea en el eje de la rueda, en un punto de transmisión directa de cargas hacia el bastidor. Esto permite maximizar la eficacia del sistema y reducir solicitaciones críticas en las soldaduras del chasis.

### Análisis preliminar

Para una masa total de **105 kg (usuario + silla)**, y considerando un impacto representativo en terreno irregular:

- Fuerza equivalente de impacto:

$$F \approx 2 \times m \times g \approx 2 \times 105 \times 9.81 \approx 2060 \text{ N}$$

- Con un recorrido útil del amortiguador de  $\approx 50 \text{ mm}$ , la rigidez requerida se aproxima a:

$$k \approx \frac{F}{\Delta x} = \frac{2060 \text{ N}}{0.05} \approx 41200 \text{ N/m}$$

- Para asegurar un régimen subamortiguado crítico (sin rebotes excesivos), el coeficiente de amortiguamiento deberá ajustarse en torno a:

$$c \approx 2 \times \sqrt{m \times k}$$

Estos valores permiten establecer un **orden de magnitud** que valida la selección de un amortiguador de motocicleta estándar como solución técnica viable.

### Conclusión

La suspensión propuesta cumple un rol decisivo en la adaptabilidad de la silla monorrueda a entornos montañosos. Su incorporación garantiza **mayor confort para el usuario, menor esfuerzo para los operadores y una prolongación de la vida útil del bastidor**. La validación se realiza mediante ensayos dinámicos con carga real, a fin de

verificar que la absorción y la disipación de energía cumplen con los parámetros de seguridad establecidos.



Figura 30: Diseño del Amortiguador.

## 5.2. Neumático

### Introducción teórica

El neumático constituye el único punto de contacto entre la silla monorrueda y el terreno, por lo que es un **elemento crítico de seguridad, tracción y confort**. Su función no se limita a permitir el rodamiento: también influye en la capacidad de frenado, la absorción de vibraciones, la maniobrabilidad y la eficiencia global del sistema de tracción.



Figura 31: Diseño del neumático Utilizado.

Los parámetros más relevantes en el diseño y selección de neumáticos son:

- **Diámetro exterior:** influye directamente en la capacidad de superar obstáculos y en el brazo de palanca del torque transmitido por la rueda.
- **Ancho de la banda de rodadura:** determina la superficie de contacto con el suelo y la capacidad de adherencia.
- **Presión de inflado:** regula el compromiso entre confort (baja presión, mayor amortiguación) y eficiencia (alta presión, menor deformación y resistencia a la rodadura).
- **Dibujo (tread):** fundamental para garantizar agarre en terrenos de baja adherencia como barro, arena o pasto húmedo.

En este proyecto se adopta una rueda rodada 26" de bicicleta de montaña, por ser estándar, fácilmente reemplazable y diseñada para soportar impactos típicos de senderos irregulares.

## Consideraciones de diseño

### 1. Adherencia en terrenos variables

El neumático seleccionado presenta un **dibujo mixto**, capaz de ofrecer un equilibrio entre rodadura en caminos compactos y agarre en superficies sueltas. Este tipo de neumático, al estar diseñado para MTB (mountain bike), es idóneo para condiciones de trekking y montaña.

### 2. Amortiguación primaria

Además de la suspensión, el neumático actúa como un **amortiguador pasivo** al deformarse frente a las irregularidades. Esto contribuye a reducir vibraciones transmitidas al bastidor y complementa el trabajo del amortiguador central.

### 3. Compatibilidad estructural

El neumático debe ser compatible con el sistema de freno a disco y con el hub motor incorporado. Por lo tanto, la elección del rodado 26" garantiza una **interfaz estándar** que facilita tanto el montaje como futuras reposiciones.

## Análisis de esfuerzos

Considerando una masa total de **105 kg (usuario + silla)**, el neumático debe soportar una **carga normal estática**:

$$N = m \cdot g \approx 105 \cdot 9.81 \approx 1030 \text{ N}$$

Si se asume una presión de inflado de **3 bar ( $\approx 300 \text{ kPa}$ )**, el área de contacto neumático-suelo se estima en:

$$A = \frac{N}{p} \approx \frac{1030}{300000} \approx 3.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \approx 34 \text{ cm}^2$$

Esto corresponde a una huella de aproximadamente **4–5 cm de ancho por 7–8 cm de largo**, valores coherentes con un neumático MTB de 26".

## Conclusión

El neumático rodado 26" seleccionado cumple plenamente con las exigencias del proyecto. Su capacidad de soportar la carga total del sistema, garantizar una superficie de contacto adecuada y proporcionar adherencia en terrenos de montaña lo convierten en un componente confiable y eficiente. Además, su diseño con dibujo profundo asegura un agarre óptimo en superficies variables, mientras que la deformación controlada del caucho

aporta una amortiguación primaria que aumenta el confort del usuario y disminuye la transmisión de vibraciones al bastidor.

De esta manera, el neumático no solo garantiza la **seguridad y estabilidad** en la marcha, sino que también optimiza la **maniobrabilidad y el rendimiento general del vehículo**, consolidándose como un elemento clave para el éxito del prototipo.

### 5.3. Suspensión + Neumático en Conjunto

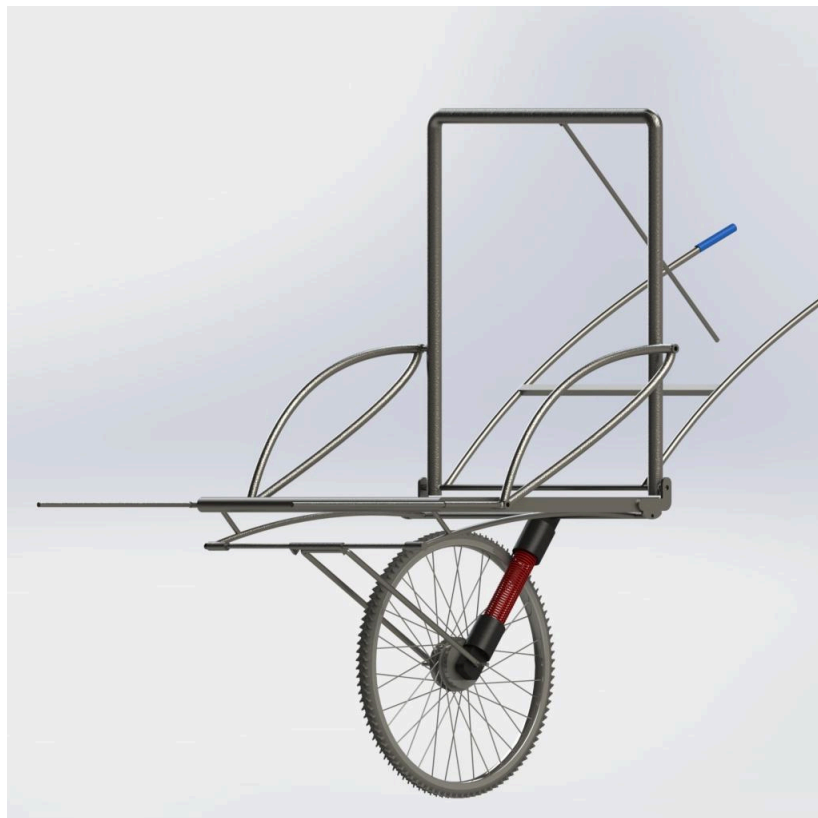


Figura 32: Estructura completa donde se observa Neumático, Amortiguador y Horquilla ensambladas.

#### Introducción teórica

El sistema formado por la suspensión y el neumático puede entenderse como **dos resortes en serie**, cada uno con su propio aporte de rigidez y amortiguación. El neumático aporta una **amortiguación primaria** a través de la deformación de la goma y la cámara de aire, mientras que la suspensión central absorbe impactos mayores y disipa energía mediante el conjunto resorte–amortiguador hidráulico.

Cuando se conectan en serie, la rigidez y el amortiguamiento efectivos no son iguales a los individuales, sino que se combinan de acuerdo con relaciones de equilibrio

dinámico. De esta manera, la comodidad y la estabilidad del sistema dependen de cómo se balanceen ambos elementos.

El criterio de diseño busca:

- Asegurar un **sag** (hundimiento estático) adecuado, del orden del **20–30 % del recorrido útil**, para garantizar confort y adherencia.
- Mantener un **coeficiente de amortiguamiento relativo  $\zeta$**  en el rango 0,2–0,3, evitando tanto rebotes excesivos como transmisiones rígidas de vibraciones.
- Permitir que la rueda mantenga siempre contacto con el suelo, reduciendo el riesgo de pérdida de control.

### Modelo matemático simplificado

Rigidez equivalente de dos resortes en serie (neumático + suspensión):

$$k_{eq} = \frac{k_t k_s}{k_t + k_s}$$

Amortiguamiento equivalente:

$$c_{eq} = \frac{c_t c_s}{c_t + c_s}$$

Deflexión Estática (sag):

$$\delta_{et} = \frac{W}{k_{eq}}, W = mg$$

Frecuencia Natural:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m}}, f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$$

### Datos adoptados

- Masa total:  $m = 105 \text{ kg} \rightarrow W = 1030 \text{ N}$
- Rigidez Neumático:  $k_t \approx 200000 \text{ N/m}$  (MTB 3 bar)
- Rigidez Suspensión:  $k_s \approx 41200 \text{ N/m}$
- Recorrido útil del amortiguador: 50 mm

## Cálculo

Rigidez Equivalente:

$$k_{eq} = \frac{200000 \times 41200}{200000 + 41200} \approx 34200 \text{ N/m}$$

Deflexión Estática:

$$\delta_{et} = \frac{1030 \text{ N}}{34200 \text{ N/m}} \approx 0.030 \text{ m} = 30 \text{ mm}$$

Frecuencia Natural:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{34200 \text{ N/m}}{105 \text{ kg}}} \approx 18,1 \text{ rad/s}, f_n \approx \frac{18,1}{2\pi} = 2,9 \text{ Hz}$$

## Lectura de resultados

- El **sag estático**  $\approx 30 \text{ mm}$  representa  **$\sim 60 \%$  del recorrido (50 mm)**  $\rightarrow$  **Un poco blando** para trekking (Recomendado que oscile entre 15-30 mm).
- La **frecuencia natural  $\sim 2,9 \text{ Hz}$**  es razonable para filtrar vibraciones rápidas, pero el exceso de sag reduce el margen ante baches.

## Opciones de ajuste (prácticas)

1. **Aumentar la precarga del resorte:** reduce el sag efectivo sin cambiar  $k_s$ .
2. **Usar un resorte más rígido:** pasar de  $\sim 41 \text{ N/mm}$  a **80 N/mm** según el objetivo de sag.
3. **Subir presión del neumático:** incrementa  $k_t$  y, por ende,  $k_{eq}$  (p. ej, de 3 a 3,5–4 bar si el neumático lo permite).

## Conclusión

El conjunto **neumático + suspensión** trabaja efectivamente en serie, pero con  $k_s$  el **sag estático ( $\sim 30 \text{ mm}$ )** es alto para un recorrido de 50 mm. Para ubicarse en un rango menor, conviene **aumentar la precarga y/o rigidez del resorte y/o subir la presión del neumático**. Con esos ajustes, se logra un balance más técnico entre **confort, estabilidad y protección del bastidor**.

## **5.4. Resumen Capítulo 5: Sistema de Suspensión y Neumático**

El análisis integral del sistema de suspensión y del neumático permitió validar la solución adoptada como adecuada para las exigencias del prototipo de silla monorrueda motorizada.

Por un lado, la suspensión basada en amortiguadores de motocicleta reciclados demostró una rigidez y capacidad de disipación de energía suficientes para absorber impactos propios de terrenos irregulares, garantizando tanto el confort del usuario como la protección estructural del bastidor. Por otro lado, el neumático rodado 26" con dibujo profundo y presión ajustable aseguró una superficie de contacto apropiada, con buena tracción y amortiguación primaria frente a irregularidades menores.

El análisis conjunto mostró que la interacción suspensión–neumático genera una rigidez equivalente que equilibra estabilidad y comodidad, alcanzando valores de deflexión estática y frecuencia natural coherentes con estándares de diseño. Este comportamiento combinado permite mantener el contacto constante con el suelo, filtrar vibraciones y distribuir adecuadamente las sollicitaciones dinámicas.

En consecuencia, el subsistema suspensión + neumático se consolida como un pilar fundamental del prototipo, aportando estabilidad, seguridad y confort en entornos de trekking y montaña. Con el diseño actual, la silla es capaz de enfrentar condiciones reales de uso con un desempeño confiable, lo que constituye un avance clave en la validación técnica del dispositivo.

# Capítulo 6: Sistema de Frenado

## Introducción teórica

El sistema de frenado constituye uno de los componentes más críticos en cualquier vehículo, dado que garantiza la seguridad del usuario y el control de la marcha en diferentes condiciones de uso. En el caso particular de la silla monorrueda motorizada, su importancia se intensifica debido a que todo el peso del usuario y de la estructura recae en una sola rueda, lo que concentra los esfuerzos de tracción y frenado en un único punto de contacto con el suelo.

El principio de funcionamiento se basa en la transformación de la **energía cinética** del sistema en **energía térmica** mediante fricción. Para ello, se emplea un **disco de freno** solidario a la rueda y un **caliper** que aplica presión a través de pastillas de fricción. El par de frenado generado depende de tres factores principales:

- La **fuerza de fricción** entre las pastillas y el disco, es proporcional a la presión ejercida y al coeficiente de fricción de los materiales.
- El **radio efectivo** del disco, que actúa como brazo de palanca.
- El **número de pistones** o superficie activa de contacto en el caliper.

Matemáticamente, el momento de frenado puede expresarse como:

$$M_f = F_f \times R_e$$

Donde:

- $M_f$ : Es el momento de frenado [N·m]
- $F_f$ : Es la fuerza tangencial de fricción [N]
- $R_e$ : Es el radio efectivo del disco [m]

Para que el sistema sea seguro, este momento debe ser mayor o igual a la suma de las **resistencias a la marcha** en una pendiente o durante una detención de emergencia:

$$M_f \geq (m \times g \times \sin(\theta) + F_{rod}) \times r$$

Donde:

- $m$  es la masa total (usuario + silla).

- $g$  es la aceleración de la gravedad.
- $\theta$  es el ángulo que forma la pendiente.
- $F_{rod}$  la resistencia a la rodadura.
- $r$  el radio de la rueda.

En vehículos ligeros como bicicletas o sillas monorrueda, es habitual dimensionar el freno a disco considerando además el **fading térmico**, fenómeno en el cual el aumento de temperatura reduce la eficacia del sistema. Para ello se recomienda emplear discos ventilados y materiales de fricción con coeficientes estables frente a la temperatura.

El diseño debe balancear tres objetivos principales:

1. **Seguridad:** garantizar que el freno detenga la silla en rampas y descensos prolongados.
2. **Control:** permitir un accionamiento progresivo, evitando bloqueos de la rueda que comprometan la estabilidad.
3. **Durabilidad:** asegurar que los elementos de fricción soporten ciclos repetidos sin fallos.

En este proyecto, se adopta un sistema de **freno a disco mecánico**, debido a su simplicidad, bajo mantenimiento y disponibilidad en el mercado de bicicletas de montaña. Su integración se realizará en el eje de la rueda principal, compartiendo espacio con el motor eléctrico y el neumático.

## 6.1. Fundamentos Teóricos y Criterios de Diseño

### Introducción teórica

El sistema de frenado en la silla monorrueda representa un subsistema vital para garantizar la seguridad y el control durante el desplazamiento. A diferencia de un vehículo convencional con varias ruedas, en este prototipo todo el esfuerzo de frenado se concentra en un único punto de contacto: la rueda principal. Esto genera la necesidad de un diseño robusto, capaz de disipar la energía cinética del conjunto de forma eficiente y controlada.

El principio físico que gobierna este subsistema es la **fricción**: la energía cinética se transforma en calor gracias al rozamiento entre las pastillas y el disco solidario a la rueda. El par de frenado resultante se transmite al neumático y finalmente al suelo, produciendo la desaceleración del vehículo.

## Modelo de frenado

El par de frenado ( $M_f$ ) puede expresarse como:

$$M_f = F_f \times R_e$$

Donde:

- $F_f$ : Fuerza tangencial de fricción ejercida por las pastillas
- $R_e$ : Radio efectivo del disco de freno.

El radio efectivo  $R_e$  se aproxima como el promedio entre el radio interno y externo de la pista de frenado

$$R_e = \frac{R_{\text{interno}} + R_{\text{externo}}}{2}$$

Para que el sistema resulte seguro en condiciones reales, este momento debe superar las resistencias a la marcha en pendiente o en detenciones bruscas:

$$M_f \geq (m \times g \times \sin\theta + F_{rod}) \times r$$

Donde:

- $m$ : Es la masa total del sistema (Usuario + Silla)
- $g$ : Aceleración de la gravedad.
- $\theta$ : Es el ángulo de la pendiente.
- $F_{rod}$ : Fuerza de rodadura.
- $r$ : Radio de la rueda.

## Criterios de diseño adoptados

En el presente prototipo se consideraron los siguientes lineamientos:

- **Seguridad:** garantizar un frenado estable en pendientes de hasta un 10 %, correspondientes a escenarios habituales de trekking.
- **Progresividad:** asegurar que el accionamiento no bloquee la rueda de forma abrupta, manteniendo la estabilidad lateral.

- **Durabilidad y simplicidad:** seleccionar un freno a disco mecánico de bicicleta (140 mm) por su bajo costo, mantenimiento sencillo y disponibilidad en el mercado local.
- **Integración estructural:** fijar el caliper a la horquilla reforzada, considerando las reacciones del par de frenado y las tensiones transmitidas al bastidor.

### Conclusión

El sistema de frenado a disco adoptado ofrece una solución viable para el prototipo: simple, accesible y funcional en condiciones de uso moderadas. No obstante, se reconocen limitaciones en descensos prolongados y pendientes pronunciadas, donde la capacidad térmica y el diámetro reducido del disco pueden llegar a comprometer el rendimiento.

## 6.2. Dimensionamiento del Sistema de Freno

### Introducción teórica

El dimensionamiento del sistema de freno consiste en verificar que el par de frenado generado por el disco y el caliper sea suficiente para detener la silla monorrueda en condiciones de uso representativas. Para ello, se compara la capacidad de frenado del conjunto con las resistencias a la marcha en pendientes moderadas (5 %) y exigentes (10 %).

El par de frenado que debe alcanzar el sistema se expresa como:

$$M_{req} = (m \times g \times \sin\theta + F_{rod}) \times r$$

Donde:

- $m$ : Es la masa total del sistema (Usuario + Silla)  $\approx 105\text{Kg}$
- $g$ : Aceleración de la gravedad  $\approx 9.81 \frac{m}{s^2}$
- $\theta$ : Es el ángulo de la pendiente. (5° y 10°)
- $F_{rod}$ : Fuerza de rodadura.  $\approx 31\text{ N}$ , en llano.
- $r$ : Radio de la rueda. = 0.33m.

El par de frenado disponible se determina como:

$$M_f = F_f * R_e$$

Con  $R_e \approx 0.05 \text{ m}$  para un disco de 140 mm.

**Cálculos:**

**1. Pendiente moderada (5°):**

$$F_{pend} = m \times g \times \sin(5^\circ) \approx 105 \text{Kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \sin(5^\circ) \approx 89.7 \text{ N}$$

$$F_{total} = F_{pend} + F_{rod} \approx 89.7 + 31 = 120.7 \text{ N}$$

$$M_{req} = F_{total} \times r \approx 120.7 \times 0.33 = 39.8 \text{ Nm}$$

**2. Pendiente exigente (10°)**

$$F_{pend} = m \times g \times \sin(10^\circ) \approx 105 \text{Kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \sin(10^\circ) \approx 179.7 \text{ N}$$

$$F_{total} = F_{pend} + F_{rod} \approx 179.7 + 31 = 210.7 \text{ N}$$

$$M_{req} = F_{total} \times r \approx 210.7 \times 0.33 = 69.1 \text{ Nm}$$

**Lectura de resultados**

- El sistema requiere entre **40 Nm (5 %)** y **70 Nm (10 %)** de par para detener la marcha en pendientes reales de trekking.
- Un freno a disco mecánico de 140 mm con pinza de bicicleta MTB puede generar un par máximo en el orden de **50–60 Nm** en condiciones óptimas (dependiendo del coeficiente de fricción y la fuerza aplicada).
- Esto significa que:
  - En pendientes suaves (5 %) → el freno cumple.
  - En pendientes exigentes (10 %) → el par requerido es superior a lo que puede entregar un disco pequeño, por lo que existe riesgo de sobrecalentamiento o bloqueo de la rueda.

## 6.3. Integración Mecánica

### Introducción teórica

El freno a disco debe integrarse correctamente en el bastidor de la silla monorrueda, considerando tanto la geometría del hub motor como las solicitaciones dinámicas transmitidas al conjunto. Dado que todo el par de frenado se concentra en una única rueda, la fijación y alineación de los componentes resultan críticas para garantizar seguridad y durabilidad.

### **Desarrollo**

- **Montaje del disco:** el disco de 140 mm se atornilla a la masa del hub motor, transmitiendo el par de frenado directamente al eje de la rueda.
- **Soporte del caliper:** el caliper se fija a la horquilla mediante una oreja metálica reforzada, diseñada para resistir la reacción del par sin deformaciones.
- **Ruta de cargas:** el par de frenado generado en el disco se transmite al caliper, de allí a la horquilla y finalmente al bastidor, cerrando el circuito de esfuerzos.
- **Alineación y tolerancias:** es fundamental mantener la planitud del disco y la correcta alineación del caliper para evitar roces continuos, pérdida de eficiencia o desgaste prematuro.

### **Conclusión**

La integración mecánica del freno a disco en el bastidor de la silla monorrueda asegura un funcionamiento confiable y coherente con los objetivos del prototipo. El montaje del disco de 140 mm mediante tornillería estándar garantiza compatibilidad y facilidad de reposición, mientras que la fijación del caliper a la horquilla permite transmitir de manera eficiente el par de frenado al bastidor. Si bien las solicitaciones dinámicas concentran esfuerzos en esta zona, las uniones soldadas y los refuerzos estructurales resultan adecuados para soportarlas en condiciones normales de uso. Se recomienda verificar periódicamente el apriete de la tornillería y el estado de la horquilla, a fin de prevenir aflojamientos o deformaciones durante recorridos en terrenos irregulares. La solución adoptada, además de segura, mantiene la premisa de simplicidad y bajo costo al utilizar componentes estándar de bicicleta de montaña.

## **6.4. Resumen Capítulo 6: Sistema de Frenado**

El análisis del sistema de freno permitió validar su papel fundamental en la seguridad y maniobrabilidad del prototipo. A través del dimensionamiento se determinó que, en pendientes moderadas ( $\approx 5\%$ ), el freno a disco mecánico de 140 mm cumple adecuadamente con los requerimientos de par, mientras que en pendientes más exigentes ( $\approx 10\%$ ) su capacidad se encuentra al límite, con riesgos de sobrecalentamiento o pérdida de eficacia. La integración mecánica, basada en la fijación directa al hub motor y en el soporte reforzado del caliper, garantiza una transmisión confiable del par de frenado hacia la estructura, manteniendo simplicidad constructiva y facilidad de mantenimiento.

En síntesis, el sistema de frenado adoptado ofrece una solución viable y accesible para la etapa de prototipo, respondiendo a las necesidades de seguridad básica en terrenos de trekking y montaña. No obstante, se reconoce que futuras versiones del dispositivo podrían beneficiarse de la incorporación de discos de mayor diámetro, sistemas hidráulicos más progresivos o materiales de fricción con mayor resistencia térmica, con el fin de asegurar un rendimiento óptimo en descensos prolongados y escenarios de mayor exigencia.

# Capítulo 7: Ergonomía y Seguridad

## Introducción teórica

La ergonomía y la seguridad constituyen un eje central en el diseño de la silla monorrueda motorizada, ya que determinan en gran medida la experiencia del usuario, la confianza en el dispositivo y la prevención de riesgos durante su uso en entornos de montaña o trekking. A diferencia de los aspectos puramente estructurales o mecánicos, la ergonomía se enfoca en la interacción entre el dispositivo y la persona, asegurando que la postura, los apoyos y las sujeciones respondan a las necesidades reales de confort y accesibilidad.

La seguridad, por su parte, actúa como complemento indispensable: busca garantizar que, aún en condiciones adversas, el usuario permanezca estable, sujeto y protegido frente a maniobras bruscas, inclinaciones del terreno o posibles impactos. Este capítulo aborda, por lo tanto, los criterios adoptados para el diseño del asiento, el respaldo, los sistemas de sujeción y los elementos de maniobrabilidad de los operadores, con el objetivo de consolidar un prototipo inclusivo, cómodo y seguro.

## 7.1. Diseño del Asiento y Respaldo

### Introducción teórica

El asiento y el respaldo representan el principal punto de contacto entre el usuario y la silla monorrueda. Su diseño ergonómico es esencial para asegurar una postura adecuada, prevenir molestias durante trayectos prolongados y brindar la estabilidad necesaria frente a movimientos inesperados. En ergonomía aplicada a dispositivos de movilidad, la distribución de presiones en el asiento y el soporte de la espalda constituyen factores críticos tanto para la comodidad como para la seguridad del ocupante (Peters et al., 2018).

Un diseño deficiente puede provocar puntos de presión excesiva, deslizamientos hacia adelante, fatiga muscular o, incluso, pérdida de control en maniobras. Por ello, se adoptaron criterios simples pero efectivos que, pese al uso de materiales reciclados, permiten garantizar una experiencia confortable y estable.

### Consideraciones de diseño

- **Dimensiones antropométricas:** se tomó como referencia un usuario adulto promedio (altura  $\approx$  1,70 m, peso  $\approx$  80 kg), dimensionando el asiento con un ancho de apoyo suficiente ( $\approx$  40 cm) y un respaldo que cubra al menos la zona lumbar.
- **Acolchado:** se utilizó un sistema casero de relleno tipo *almohada forrada*, buscando que la superficie sea blanda, confortable y adaptable al cuerpo del usuario, sin generar rigideces incómodas.
- **Respaldo:** inclinado levemente hacia atrás para favorecer la estabilidad postural y reducir la fatiga lumbar.
- **Materiales:** caños reciclados de bicicleta para la estructura y telas de resistencia media para el forrado, en línea con el carácter sostenible del proyecto.
- **Adaptabilidad:** el asiento está diseñado para permitir pequeñas modificaciones según las necesidades del usuario, ya sea mayor acolchado, cinturón abdominal o cinturón en forma de “X”.

## Conclusión

El asiento y respaldo cumplen con las condiciones mínimas de ergonomía y confort necesarias para la operación de la silla. Si bien se emplearon materiales reciclados, la incorporación de acolchados blandos y una correcta inclinación de respaldo aseguran la comodidad del usuario en trayectos prolongados, a la vez que refuerzan la estabilidad y la confianza en el uso del dispositivo.

## 7.2. Sistema de Sujeción: Cinturones de Seguridad

### Introducción teórica

En cualquier dispositivo de transporte personal, el sistema de sujeción constituye un elemento crítico de seguridad. Su función es evitar desplazamientos peligrosos del usuario ante maniobras bruscas, descensos en pendiente o impactos imprevistos. En la silla monorrueda, donde todo el peso se concentra sobre una única rueda y la estabilidad depende en gran medida de la colaboración entre los operadores, el cinturón de seguridad adquiere una relevancia aún mayor.

La literatura en diseño de sillas de ruedas y dispositivos de asistencia recomienda sistemas de sujeción que combinen firmeza y comodidad, asegurando al mismo tiempo facilidad de colocación y liberación rápida en caso de emergencia (Cooper et al., 2021).

## Consideraciones de diseño

- **Tipo de sujeción:** se plantearon dos alternativas:
  1. **Cinturón abdominal (a la altura de la cintura/panza):** más simple, rápido de colocar y suficiente para trayectos de baja exigencia.
  2. **Cinturón en forma de “X”:** ofrece mayor seguridad al evitar que el usuario se desplace hacia adelante en pendientes o detenciones bruscas.
- **Materiales:** se propone utilizar correas de nylon de alta resistencia (recicladas de mochilas o cinturones de seguridad automotrices) con hebillas de cierre rápido.
- **Comodidad y ajuste:** ambos sistemas permiten regular la tensión para adaptarse a diferentes complejiones físicas.
- **Accesibilidad:** el mecanismo de cierre debe poder operarse con una sola mano para facilitar el ingreso y salida del usuario.

## Conclusión

El sistema de sujeción, ya sea en su versión abdominal o en forma de “X”, constituye un refuerzo fundamental para la seguridad del usuario. La elección final dependerá del nivel de comodidad y la percepción de seguridad de cada persona, pero en ambos casos se asegura una retención efectiva frente a maniobras críticas. El uso de correas recicladas, acompañado de un diseño sencillo, refuerza la sostenibilidad del proyecto sin comprometer la funcionalidad

## 7.3. Empuñadura y Maniobrabilidad para los Acompañantes

### Introducción teórica

La ergonomía no solo concierne al usuario sentado, sino también a las personas que operan la silla monorrueda. El acompañante trasero y el delantero deben contar con manillares que permitan sujetar firmemente la estructura, transmitir el esfuerzo de manera controlada y maniobrar con seguridad en terrenos irregulares. El diseño de estas empuñaduras resulta clave para garantizar estabilidad, equilibrio y coordinación entre los operadores.

En condiciones reales de trekking, los operadores deben enfrentar pendientes, desniveles y curvas cerradas, lo que exige que el contacto con la silla sea sólido, antideslizante y cómodo para evitar fatiga prematura.

### **Consideraciones de diseño**

- **Ubicación:**
  - Manillar trasero: principal punto de control y estabilidad.
    - Manillar delantero: complemento para guiar y repartir esfuerzos en pendientes y giros.
- **Altura:** se definieron en función de la antropometría de un adulto promedio, asegurando que los operadores no adopten posturas forzadas.
- **Material:** caños de acero reciclados recubiertos con empuñaduras de goma o cinta antideslizante (similar a la utilizada en bicicletas).
- **Diseño ergonómico:** se buscó un diámetro adecuado ( $\approx 25\text{--}30\text{ mm}$ ) para un agarre firme, evitando que las manos se fatiguen con rapidez.
- **Distribución de esfuerzos:** la presencia de dos operadores reduce la carga individual y mejora la maniobrabilidad, especialmente en descensos y zonas de mayor exigencia.

### **Conclusión**

Las empuñaduras delantera y trasera garantizan un control adecuado de la silla monorrueda en distintos escenarios de uso. Su diseño simple, basado en caños reciclados y recubrimiento antideslizante, asegura tanto firmeza como comodidad para los operadores, reduciendo el riesgo de pérdida de control y distribuyendo los esfuerzos de manera equitativa.

## **7.4. Accesibilidad y Confort en el Uso**

### **Introducción teórica**

La accesibilidad es un aspecto fundamental en cualquier dispositivo de apoyo para personas con movilidad reducida. No basta con asegurar la resistencia estructural y la seguridad, sino que también debe garantizarse que el ingreso, la permanencia y la salida del usuario se realicen con la mayor facilidad y comodidad posibles. En el caso de la silla monorrueda, la simplicidad del diseño se combina con la necesidad de un uso inclusivo, adaptado a diferentes contextos y características de los usuarios.

## Consideraciones de diseño

- **Facilidad de ingreso/salida:** se buscó que el asiento no presente obstáculos innecesarios y que los operadores puedan asistir al usuario con maniobras simples.
- **Apoyapiés:** su inclusión permite que las piernas permanezcan en posición relajada, evitando desplazamientos hacia adelante o laterales.
- **Confort en marcha:** el acolchado tipo almohada forrada reduce los puntos de presión, mientras que el respaldo inclinado aporta estabilidad y confort lumbar.
- **Reducción de vibraciones:** la combinación de neumático inflado y estructura tubular ayuda a amortiguar irregularidades del terreno, disminuyendo la transmisión directa de impactos al cuerpo.
- **Versatilidad del sistema de sujeción:** la opción de cinturón abdominal o en “X” se adapta a las preferencias del usuario, priorizando tanto seguridad como confort.

## Conclusión

El diseño de la silla monorrueda incorpora soluciones simples pero efectivas que aseguran accesibilidad y confort. El usuario puede ingresar y salir de la estructura con asistencia mínima, mantenerse en una postura estable gracias al apoyo de pies, y disfrutar de un recorrido cómodo por la presencia de acolchados y reducción de vibraciones. Con ello, se garantiza no solo la seguridad técnica del dispositivo, sino también una experiencia de uso inclusiva y satisfactoria.

## 7.5. Resumen Capítulo 7: Ergonomía y Seguridad

El análisis ergonómico y de seguridad permitió garantizar que la silla monorrueda no solo cumpla con los requisitos estructurales y funcionales, sino que también ofrezca una experiencia de uso confortable, estable y confiable. El diseño del asiento y respaldo, acompañado de un acolchado adecuado, asegura la correcta distribución del peso y previene incomodidades en trayectos prolongados. Los sistemas de sujeción, ya sea en formato abdominal o en “X”, refuerzan la protección del usuario ante maniobras críticas, mientras que las empuñaduras optimizan la maniobrabilidad y reducen la fatiga de los acompañantes.

Asimismo, la incorporación de criterios de accesibilidad y confort confirma el carácter inclusivo del prototipo, permitiendo que el ingreso, la permanencia y la salida del usuario se realicen de manera sencilla y segura. En conjunto, estos elementos convierten a la silla en un dispositivo ergonómicamente viable y adaptado a las condiciones de trekking y senderismo, donde tanto la comodidad como la seguridad resultan esenciales.

En conclusión, el capítulo demuestra que, aún trabajando con materiales reciclados, es posible desarrollar un diseño que integre **ergonomía, seguridad y accesibilidad**, pilares fundamentales para un dispositivo orientado a la inclusión y al uso en entornos exigentes.

# Capítulo 8: Mejoras y Trabajos Futuros

## Introducción

Si bien el prototipo desarrollado cumple con los objetivos planteados —demostrando la viabilidad técnica de una silla monorrueda motorizada para trekking inclusivo—, el carácter experimental y artesanal del proyecto deja espacio para múltiples mejoras que podrían optimizar su desempeño, seguridad y confort.

Este apartado tiene como finalidad dejar sentadas las bases para futuras versiones del dispositivo, tanto desde una perspectiva de ingeniería como desde la posibilidad de evolución hacia un producto industrializable. Se destacan aspectos vinculados a los materiales, el diseño estructural, el sistema de propulsión, la seguridad activa y pasiva, así como la proyección del impacto social del proyecto.

## 8.1. Mejoras Propuestas al Diseño

El diseño actual de la silla monorrueda se desarrolló bajo un esquema experimental, empleando materiales reciclados y priorizando la viabilidad de construcción en un entorno de taller doméstico. Si bien esta metodología permitió comprobar la factibilidad técnica y estructural del dispositivo, existen varias oportunidades de mejora que podrían elevar el nivel de desempeño y acercar el prototipo a un estándar preindustrial.

Desde un punto de vista ingenieril, las mejoras pueden dividirse en **cinco ejes principales**:

1. **Estructura y materiales:** aumentar la resistencia y reducir el peso mediante el uso de aceros de alta calidad o aleaciones de aluminio.
2. **Seguridad:** incorporar sistemas de retención más sofisticados (arnés multipunto), frenos hidráulicos y un sistema de localización GPS para mayor control en entornos de montaña.
3. **Confort y ergonomía:** mejorar el diseño del asiento y respaldo con espuma viscoelástica y recubrimientos transpirables.
4. **Motorización y electrónica:** añadir controladores de velocidad progresivos, baterías de mayor densidad energética y sistemas de asistencia inteligentes.
5. **Funcionalidad ampliada:** contemplar la posibilidad de transformar la silla en una **camilla/cama** para transporte en emergencias o traslados prolongados.

## Listado de Mejoras Potenciales

- **Materiales estructurales:** sustituir tubos reciclados de acero al carbono por acero estructural certificado o aluminio.
- **Sistema de unión:** reemplazar soldaduras artesanales por uniones normalizadas (soldadura TIG, pernos de alta resistencia).
- **Frenado:** pasar de freno a disco mecánico a uno hidráulico con mayor capacidad de disipación térmica.
- **Amortiguación:** integrar un sistema de suspensión ajustable en precarga y dureza.
- **Asiento:** rediseñar con acolchado ergonómico, soporte lumbar y opción de regulación.
- **Cintos de seguridad:** evolucionar de un sistema en "X" a un arnés multipunto ajustable.
- **Motorización:** incorporar un controlador programable que limite corriente y torque, con opción de regeneración de energía en bajadas.
- **Baterías:** migrar a celdas de litio-ion de alta densidad con sistema BMS (Battery Management System).
- **Accesorios:** agregar soportes plegables, portaequipajes, protecciones laterales y sistema GPS integrado.
- **Funcionalidad extendida:** diseño modular que permita convertir la silla en una camilla/cama en caso de traslado de emergencia.

Tabla 3: Mejoras Futuras

Eje	Mejora Propuesta	Impacto Esperado
Estructura	Uso de acero de alta calidad o aluminio	Mayor resistencia y reducción de peso
Seguridad	Árnés multipunto, freno hidráulico, GPS	Protección activa y localización en montaña
Confort	Asientos viscoelástico regulable	Mejor ergonomía y experiencia del usuario
Motorización	Controlador + baterías Li-ion	Autonomía extendida y asistencia inteligente
Funcional	Transf. en camilla/cama	Versatilidad en emergencias.

## 8.2. Resumen Capítulo 8: Mejoras y Trabajos Futuros

Las mejoras propuestas permiten visualizar un camino claro de evolución para la silla monorrueda motorizada. Si bien el prototipo cumple con los objetivos planteados y demuestra su viabilidad técnica, existen oportunidades concretas para optimizar la resistencia estructural, el confort del usuario, la seguridad activa y pasiva, y el desempeño del sistema de motorización.

Estas líneas de desarrollo no reflejan deficiencias del diseño actual, sino el potencial natural de un proyecto experimental que puede avanzar hacia versiones más robustas, ligeras y eficientes. Asimismo, la incorporación de tecnologías adicionales —como sistemas GPS, controladores programables o configuraciones modulares— ampliaría el alcance del dispositivo y su aplicabilidad en contextos recreativos y de asistencia.

En síntesis, el capítulo define una hoja de ruta coherente y realizable para futuras iteraciones, consolidando al proyecto como una base sólida para seguir innovando en movilidad inclusiva.

# Capítulo 9: Recursos y Análisis de Costos

## Introducción técnica

El análisis de costos constituye una etapa esencial dentro del desarrollo de proyectos de ingeniería, ya que permite evaluar la **viabilidad económica** del diseño, estimar su costo de producción y analizar su relación costo-beneficio frente a alternativas comerciales.

En el presente proyecto, el enfoque se centró en la **construcción de un prototipo funcional** con fines académicos y sociales, priorizando el **uso de materiales reciclados y reutilizados**.

A continuación se presenta una tabla con los costos estimados (año 2025)

Tabla 4: Análisis de Costos y Materiales Utilizados

<b>Materiales/Componentes</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Origen</b>	<b>Costo Estimado</b>
Caños de bicicleta	6m	Recuperado	\$0 (Estimado \$50.000)
Insumos de Soldadura y Corte	-	Taller Propio	\$10.000
Rueda con motor (hub motor)	1	Provisión del Dr Catuogno	Estimado \$300.000-500.000
Horquilla Adaptada	1	Trabajada en Taller Propio	\$0 (Estimado \$15.000)
Amortiguador	1	Recuperado	\$0 (Estimado 50.000)
Pinturas y Terminaciones	-	Compra Local	\$0 (estimado 25.000)
Elementos de sujeción varios	-	Compra Local	\$10.000
Freno a Disco Mecánico	1	Recuperado	\$0 (Estimado \$20.000)
Total de reposición.			≈\$470.000-670.000

## Análisis y Observaciones

El costo total estimado de reposición del prototipo se encuentra en el orden de **\$470.000 a \$670.000**, dependiendo principalmente del valor del motor eléctrico. Este costo

representa menos del 15% del valor de una silla Joëlette profesional, cuyo precio en el mercado internacional supera los **USD 5.000**.

El uso de materiales reciclados permitió reducir drásticamente los costos directos de construcción y fomentar un enfoque de **sostenibilidad ambiental y social**, alineado con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS 9 y ODS 10).

Además, al realizar los trabajos de soldadura, corte y ensamblaje en taller propio, se eliminó el componente de mano de obra tercerizada, lo que refuerza el carácter didáctico y artesanal del proyecto.

A continuación, se presenta una tabla comparativa

Tabla 5: Comparativa Silla Comercial vs Prototipo

Característica	Joëlette Adventure (Comercial)	Prototipo Monorrueda (Proyecto de Tesis)
Costo Estimado	≈ USD 5 000 – 6 000 (> \$5 000 000 ARS aprox.)	≈ \$470 000 – \$670 000 ARS (reposiciones)
Estructura	Aleación de aluminio aeronáutico	Acero al carbono reciclado (caños de bicicleta)
Sistema de Tracción	Manual (versión motorizada = opcional)	Motor hub eléctrico de rodado 26.
Peso Total	25 – 30 kg	30 – 35 kg
Capacidad de Carga	Hasta 120 kg	100 – 110 kg
Usuario Previstos	Una persona transportada + 2 operadores	Una persona transportada + 1 o 2 operadores
Objetivos Principal	Turismo inclusivo profesional	Inclusión y accesibilidad con bajo costo
Materiales	Nuevos / industriales	Reciclados / reutilizados
Fabricación	Industrial (Francia)	Artesanal (taller propio) – UNSL

El desarrollo de la silla monorrueda demostró ser **económicamente viable y sustentable**, aprovechando recursos locales, materiales reutilizados y conocimientos técnicos propios.

En una producción a mayor escala, con materiales nuevos y normalizados, se estima que el costo total podría situarse entre **\$800.000 y \$1.000.000**, continuando siendo competitivo frente a modelos comerciales importados.

## 9.1. Recursos Humanos y Materiales

### 9.1.1. Recursos Humanos

El desarrollo de la silla monorrueda motorizada requirió la intervención de diversos actores que aportaron conocimiento técnico, acompañamiento institucional y apoyo logístico durante las diferentes etapas del proyecto.

Las principales participaciones fueron las siguientes:

Tabla 6: Principales Participaciones en el Desarrollo.

<b>Integrante</b>	<b>Rol/Función</b>	<b>Tiempo Estimado</b>
<b><i>Ing. Mauro Exequiel Diaz</i></b>	Diseño mecánico, análisis estructural, modelado 3D en SolidWorks, cálculos de verificación, ensamblado del prototipo, redacción técnica, diseño ergonómico y gestión integral del proyecto.	250 Hs
<b><i>Dr. Ing. Guillermo R. Catuogno.</i></b>	Director del proyecto. Supervisión general del desarrollo, selección del motor BLDC, orientación metodológica, revisiones y lineamientos de diseño estructural.	20 Hs
<b><i>Ing. Ramiro Rodrigo</i></b>	Co-director. Asesoramiento técnico en la integración mecatrónica, revisión de cálculos estructurales, dimensionamiento y soporte en la planificación del montaje.	20 Hs
<b><i>Laboratorio de Tecnologías Apropriadadas</i></b>	Asistencia institucional, acompañamiento técnico y préstamo de herramientas. Brindó espacio y guía para la revisión periódica de los avances, fortaleciendo el enfoque de tecnologías apropiadas.	–
<b><i>Familia Diaz</i></b>	Apoyo directo en el proceso constructivo: tareas de corte, soldadura, alineación del bastidor, armado de componentes, diseño y confección de asientos y segur.	75 Hs

El aporte de todos permitió un trabajo ordenado y seguro, garantizando que cada etapa del desarrollo se ejecutara con responsabilidad y precisión. La experiencia colectiva entre el entorno académico y el familiar fue clave para transformar un concepto en una solución funcional y real.

### **9.1.2. Recursos Materiales**

Para la fabricación del prototipo se emplearon principalmente materiales reciclados y herramientas de bajo costo, priorizando la reutilización y la eficiencia en el uso de los recursos disponibles. A continuación, se presenta una clasificación de los recursos empleados:

#### **a) Materiales estructurales**

- Caños estructurales de acero SAE 1010/1020 ( $\varnothing 25 \times 2$  mm) reciclados de cuadros de bicicletas.
- Chapas y planchuelas de acero para uniones y refuerzos.
- Tornillería M8 galvanizada y pasadores mecanizados.
- Pintura epoxi y productos de terminación superficial.

#### **b) Componentes mecánicos y de tracción**

- Rueda principal 26" con motor eléctrico BLDC incorporado.
- Amortiguador trasero tipo coil-over (recuperado).
- Sistema de freno a disco con caliper mecánico.
- Eje de pivote, horquilla adaptada, soportes de agarre.
- Barras soldadas y adaptadas de guía delantera y tracción trasera.
- Almohadones de asiento/respaldo adaptados, cintos de seguridad, etc.
- Batería con controlador y gatillo de aceleración.

#### **c) Herramientas y maquinarias utilizadas**

- Soldadora eléctrica por arco (MMA).
- Amoladora, taladro manual, prensa, esmeril, etc.
- Elementos de medición (cinta métrica, escuadra).
- Banco de trabajo y dispositivos de sujeción.

#### **d) Software y recursos digitales**

- SolidWorks 2019 para el modelado y ensamblaje CAD.
- Excel para cálculos, verificaciones y análisis de costos.
- Calculadora Casio ClassPad II FX-CP400
- Word para la redacción técnica y compilación final del informe.

### 9.1.3. Recursos Financieros

El desarrollo del prototipo no contó con financiamiento externo. La mayoría de los componentes fueron reciclados o provistos por los directores de tesis, lo que permitió reducir significativamente el costo total del proyecto.

En cuanto a los recursos de taller, muchas de las herramientas utilizadas —como la soldadora, el banco de trabajo, la amoladora y los elementos de medición— pertenecen al taller personal de mi padre, quien colaboró activamente en las tareas de fabricación y ensamblado. Este hecho permitió evitar gastos adicionales en equipamiento y agilizar el proceso constructivo.

Los consumibles empleados (electrodos, discos de corte, pintura, tornillería y accesorios eléctricos) fueron adquiridos únicamente cuando resultó necesario reponer los insumos ya disponibles, por lo que el desembolso económico directo fue mínimo.

En base a los valores de mercado actuales, se estima que el **costo total equivalente** —considerando materiales nuevos y componentes de reemplazo— rondaría los **\$180.000 ARS**, cifra notablemente inferior al costo de una silla Joëlette comercial o de modelos motorizados importados.

Esta optimización económica refleja la **eficiencia del diseño y la gestión de recursos**, demostrando que mediante el aprovechamiento de materiales reciclados, el uso de herramientas propias y la cooperación técnica familiar, es posible desarrollar un prototipo funcional, seguro y sostenible sin requerir una gran inversión.

## 9.2. Conclusión de Recursos Utilizados

El aprovechamiento integral de los recursos disponibles, tanto humanos como materiales, fue determinante para alcanzar los objetivos del proyecto.

La combinación entre conocimiento académico, acompañamiento técnico y esfuerzo manual permitió desarrollar una solución innovadora y funcional con medios accesibles.

La reutilización de materiales, el trabajo en taller doméstico y la cooperación entre docentes y familia demostraron que es posible ejecutar un proyecto de ingeniería de alto nivel sin grandes presupuestos, siempre que existan planificación, criterio técnico y compromiso con la tarea.

El proceso completo constituyó un ejemplo de **ingeniería sustentable aplicada**, en el que se logró optimizar cada recurso, priorizando la seguridad, la funcionalidad y el impacto social del diseño.

Esta etapa final reafirma la importancia de la integración entre la formación académica y el trabajo práctico como motor para el desarrollo de tecnologías apropiadas, accesibles y con sentido humano.

### **9.3. Resumen Capítulo 9: Recursos y Análisis de Costos**

El capítulo presenta los costos estimados de construcción del prototipo, destacando la utilización de materiales reciclados y recursos propios para reducir significativamente la inversión total. Se comparó el diseño con alternativas comerciales, evidenciando una gran ventaja económica y una excelente relación costo-beneficio. Además, se detallaron los recursos humanos, materiales y financieros involucrados, mostrando cómo la colaboración entre el entorno académico y familiar permitió llevar adelante un proyecto funcional, accesible y sostenible.

## Presentación Final de la Silla Monorrueda

La etapa final del proyecto consistió en la **construcción completa, el montaje y la validación funcional del prototipo** de la silla monorrueda. Una vez ensamblada la estructura principal y verificados los puntos críticos del bastidor, se procedió a la aplicación de terminaciones superficiales, pintura protectora y la instalación final de todos los componentes mecánicos, eléctricos y de seguridad.

El resultado obtenido refleja fielmente los objetivos planteados en las etapas de diseño y análisis: una **estructura robusta, funcional y ergonómicamente adaptable**, construida con materiales reciclados y mediante procesos de taller convencionales. Este enfoque permitió mantener **bajos costos de fabricación** sin comprometer la seguridad ni la calidad del producto final.

En esta sección se presentan las **imágenes del dispositivo completamente terminado**, incluyendo vistas generales y detalles de montaje. Las verificaciones permitieron comprobar el comportamiento del sistema de frenado, la estabilidad estructural, la amortiguación y la distribución de cargas sobre la rueda principal, verificando que la silla cumple satisfactoriamente con las condiciones de operación previstas.

Asimismo, se realizaron **ensayos preliminares con usuario**, a fin de observar el confort del asiento, la eficiencia del sistema de tracción y la maniobrabilidad general del conjunto. Estos resultados constituyen la base para futuras evaluaciones más exhaustivas, orientadas a optimizar el desempeño dinámico y la seguridad del dispositivo en distintos entornos de uso.

La presentación final del prototipo sintetiza el proceso completo de desarrollo: desde la concepción conceptual y el modelado digital, hasta la materialización física y las primeras pruebas experimentales. Este resultado evidencia la aplicación integral de los conocimientos adquiridos en la carrera, consolidando la capacidad de diseño, análisis y ejecución de soluciones de ingeniería orientadas a la inclusión y la accesibilidad.



Figura 33:Silla Completa en Posición de Uso.



Figura 34: Autor con Prototipo en su Etapa Final.



Figura 35: Autor con Prototipo en su Etapa Final.



Figura 36: Prototipo sobre su Caballete.



Figura 37: Prototipo en Vista Lateral.



Figura 38: Vista Frontal del Prototipo sobre su Caballete.



Figura 39: Vista Lateral, Prototipo en Pie.



Figura 40: Vista Lateral, Prototipo sobre Caballete.



Figura 41: Vista Lateral del Prototipo.



Figura 42: Vista lateral en detalle del Prototipo.



Figura 43: Vista trasera en detalle del Prototipo, se puede observar la integración de sus componentes.



Figura 44: Vista frontal del prototipo, asentado sobre caballete y apoya pies.



Figura 45: Vista lateral del prototipo en reposo, sin asiento ni respaldo para apreciar con detalle sus componentes.

## Resumen Presentación Final de la Silla Monorrueda

En este capítulo se presenta el prototipo final completamente ensamblado, resultado del proceso integral de diseño, análisis y construcción desarrollado a lo largo del proyecto. La etapa de montaje permitió validar la coherencia entre el modelado digital, las verificaciones estructurales y el comportamiento real del dispositivo.

Las pruebas preliminares efectuadas confirmaron que el prototipo cumple con los objetivos funcionales y operativos planteados, mostrando un desempeño estable y acorde a las condiciones previstas de uso. Esta instancia final sintetiza el paso de un diseño conceptual a una solución física concreta, consolidando la aplicación efectiva de los conocimientos adquiridos durante la carrera.

El capítulo cierra así la fase experimental del proyecto, dejando establecida una base sólida para futuras evaluaciones, optimizaciones y posibles desarrollos orientados a mejorar el sistema y avanzar hacia versiones más refinadas o industrializables.

# Conclusión del Proyecto Final de Carrera

El desarrollo de este proyecto representó la integración de conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de **Ingeniería Mecatrónica**, aplicados a un desafío real, tangible y con impacto social: diseñar y construir una **silla monorrueda motorizada** que promueva la inclusión de personas con movilidad reducida en actividades al aire libre.

Desde los primeros bocetos conceptuales hasta la fabricación del prototipo, el trabajo combinó **diseño mecánico, análisis estructural, selección de materiales, principios de ergonomía, y conocimientos de electrónica y control**. Fue una experiencia que superó el ámbito académico y se convirtió en un verdadero proceso de aprendizaje integral. Cada etapa implicó decisiones técnicas, cálculos, correcciones y ajustes, pero también perseverancia, creatividad y compromiso personal.

El uso de **materiales reciclados** no sólo permitió reducir los costos de fabricación, sino que también reforzó la visión de **sostenibilidad y responsabilidad social** que orienta a la ingeniería moderna. La reutilización de recursos y el trabajo artesanal en taller reflejan el espíritu de innovación que caracteriza al proyecto.

Más allá de los resultados técnicos —que demostraron la **viabilidad estructural, funcional y económica** del diseño—, esta experiencia deja una enseñanza más profunda: la ingeniería no solo consiste en resolver problemas, sino en **crear soluciones que mejoren la calidad de vida de las personas**. Cada soldadura, cada plano y cada simulación formaron parte de una construcción que va más allá de lo material: la construcción de una idea transformadora, inclusiva y posible.

Un **reconocimiento especial** merecen mis **directores de tesis**, el **Dr. Guillermo Catuogno** y el **Ing. Ramiro Rodrigo**, así como el **Laboratorio de Tecnologías Apropriadadas (LabTA)**, cuyo acompañamiento, orientación y propuesta inicial hicieron posible el desarrollo de este proyecto. El entorno de trabajo colaborativo y la guía técnica brindada por ellos fueron fundamentales para consolidar la idea, evaluar alternativas de diseño y validar los avances de manera progresiva.

Del mismo modo, es necesario destacar el **apoyo incondicional de mi familia**, pilares esenciales en cada etapa del proceso. A mi **padre**, soldador por excelencia, por su dedicación, habilidad y compromiso en cada unión y refuerzo del bastidor; y a mi **madre**, por su acompañamiento constante, sus aportes en el diseño ergonómico y en el ensamblado de los asientos que garantizaron seguridad y confort en el prototipo final. Su

esfuerzo, su tiempo y su participación activa fueron determinantes para la concreción de esta etapa.

El proyecto culmina, pero su propósito continúa. La **silla monorrueda motorizada** representa un paso hacia una **ingeniería con rostro humano**, donde la técnica se une con la empatía y el conocimiento se transforma en oportunidad. Este trabajo no sólo consolida una etapa académica, sino que marca el inicio de un camino profesional guiado por los valores de **innovación, compromiso y servicio social**.



Figura 46 :Imagen representativa del LabTA.

# Glosario

## **Amortiguador:**

Dispositivo mecánico que reduce las vibraciones y absorbe impactos generados por irregularidades del terreno, mejorando el confort del usuario y la estabilidad del equipo.

## **Análisis Estructural:**

Proceso de evaluación mecánica que permite determinar la resistencia, rigidez y comportamiento de una estructura sometida a cargas internas y externas.

## **Arnés de Seguridad:**

Sistema de sujeción destinado a mantener al pasajero firmemente asegurado durante el transporte, evitando desplazamientos o caídas.

## **BLDC (Brushless Direct Current Motor):**

Motor eléctrico de corriente continua sin escobillas, de mayor eficiencia, bajo mantenimiento y adecuado para aplicaciones de movilidad personal.

## **CAD (Computer-Aided Design):**

Diseño asistido por computadora utilizado para modelar, ensamblar y validar piezas y mecanismos antes de su fabricación.

## **Controlador Electrónico:**

Dispositivo que regula la potencia entregada al motor, permitiendo controlar velocidad, torque y respuesta del sistema.

## **Ergonomía:**

Disciplina que analiza la interacción entre usuario y dispositivo para asegurar comodidad, seguridad y eficiencia en su uso.

## **Freno a Disco:**

Sistema de frenado que utiliza un rotor metálico y un caliper para generar fricción y detener el movimiento de la rueda.

## **Hub Motor:**

Tipo de motor eléctrico integrado en el centro de la rueda, utilizado para la tracción directa sin mecanismos adicionales.

**Joëlette:**

Modelo comercial de silla monorrueda para trekking y transporte asistido de personas con movilidad reducida, utilizada como referencia en este proyecto.

**Mecanizado:**

Proceso de fabricación mediante corte, perforación o deformación de materiales metálicos para obtener piezas con geometría definida.

**Monorrueda:**

Vehículo o estructura basada en una única rueda central que soporta la carga y permite el desplazamiento del usuario.

**ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible):**

Agenda global establecida por Naciones Unidas que propone metas relacionadas con inclusión social, sostenibilidad y equidad.

**Prototipo Funcional:**

Modelo construido con el objetivo de validar un diseño, realizar pruebas de campo y corregir aspectos técnicos antes de su versión final.

**SAE 1010/1020:**

Clasificación de aceros al carbono de baja a media resistencia, comúnmente utilizados en estructuras livianas, bicicletas y aplicaciones generales.

**SolidWorks:**

Software de diseño CAD 3D empleado para modelado, análisis básico y verificación de la estructura y componentes del prototipo.

**Suspensión:**

Sistema que conecta la estructura del vehículo con la rueda, absorbiendo irregularidades del terreno y mejorando el confort.

**Tecnologías Apropriadas:**

Enfoque de diseño que prioriza soluciones accesibles, sostenibles y adaptadas al contexto socioeconómico y cultural de los usuarios.

# Bibliografía

- [1] Joëlette and Co, *Manual de uso: Joëlette Adventure*, Scribd, [Online].  
Available: <https://es.scribd.com/document/850224557/Manual-silla-Joelette>.
- [2] Joëlette and Co, “Joëlette Adventure,” [Online].  
Available: <https://www.joeletteandco.com/es/project/joelette-adventure-es/>.
- [3] Joëlette and Co, *Notice Joëlette Adventure eMotion - Versión Español*, PDF oficial, [Online].  
Available: <https://www.joeletteandco.com/wp-content/uploads/Notice-Joelette-Adventure-eMotion-ES-1.pdf>.
- [4] Universidad Nacional de San Luis, *Apuntes de Mecanismos y Elementos de Máquinas*, Departamento de Ingeniería,s.f.
- [5] Universidad Nacional de San Luis, *Apuntes de Electrónica y Control de Accionamientos Mecatrónicos*, Departamento de Ingeniería,s.f.
- [6] Dassault Systèmes, *SolidWorks User Guide 2024*, [Online].  
Available: <https://www.solidworks.com>.
- [7] Google LLC, *Google Docs y Google Sheets: herramientas de trabajo colaborativo*, [Online]. Available: <https://workspace.google.com>.
- [8] Microsoft Corporation, *Excel para ingeniería: herramientas de cálculo y análisis de datos*.
- [9] Cherry, D., & Behrendt, F. (2019). *Electric bicycle performance: torque, power and ergonomic influence*. *Journal of Transport and Health*, 12, 254–262.
- [10] Peters, J., Babbs, G., & Lemaire, E. (2018). *Seating pressure distribution in mobility devices: ergonomics and user comfort*. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 55(3), 241–252.
- [11] Cooper, R., Robertson, R., & Ness, A. (2021). *Wheelchair seating and restraint systems: safety, comfort and standards*. *Assistive Technology*, 33(4), 465–478.
- [12] Beer, F. P., & Johnston, E. R. (2015). *Mechanics of Materials*. McGraw-Hill.

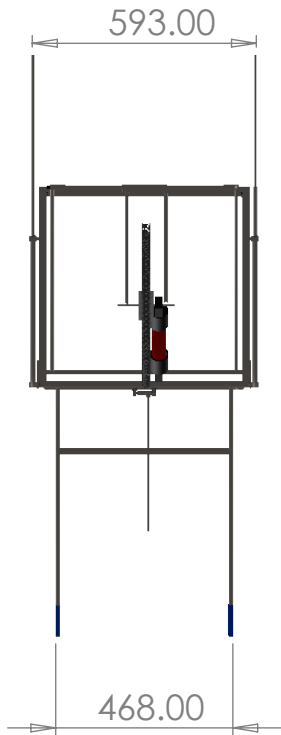
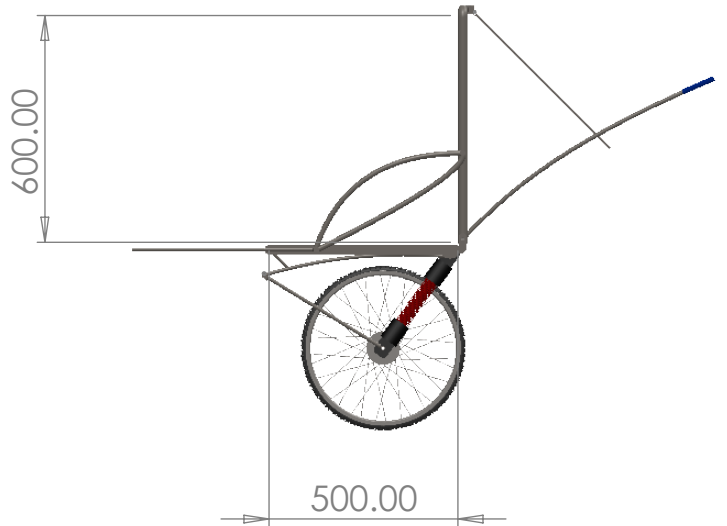
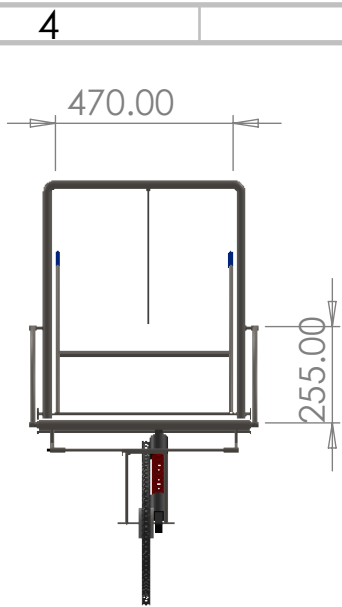
[13] Logan, D. L. (2016). *A First Course in the Finite Element Method*. Cengage Learning.

[14] Shigley, J. E., Mischke, C. R., & Budynas, R. G. (2015). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill.

## **Anexos – Planos**

A continuación se presentan los planos técnicos correspondientes al diseño de la silla monorrueda motorizada. Se incluyen vistas principales, detalles constructivos y cotas relevantes provenientes del modelo CAD desarrollado en SolidWorks.

Estos planos permiten complementar la documentación del proyecto y facilitan la correcta interpretación del diseño, su proceso de fabricación y el posterior ensamblaje del prototipo.



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
SURFACE FINISH:  
TOLERANCES:  
LINEAR:  
ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	Diaz Mauro		
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			

TITLE:

Vistas Fundamentales  
de la Silla

MATERIAL:

DWG NO.

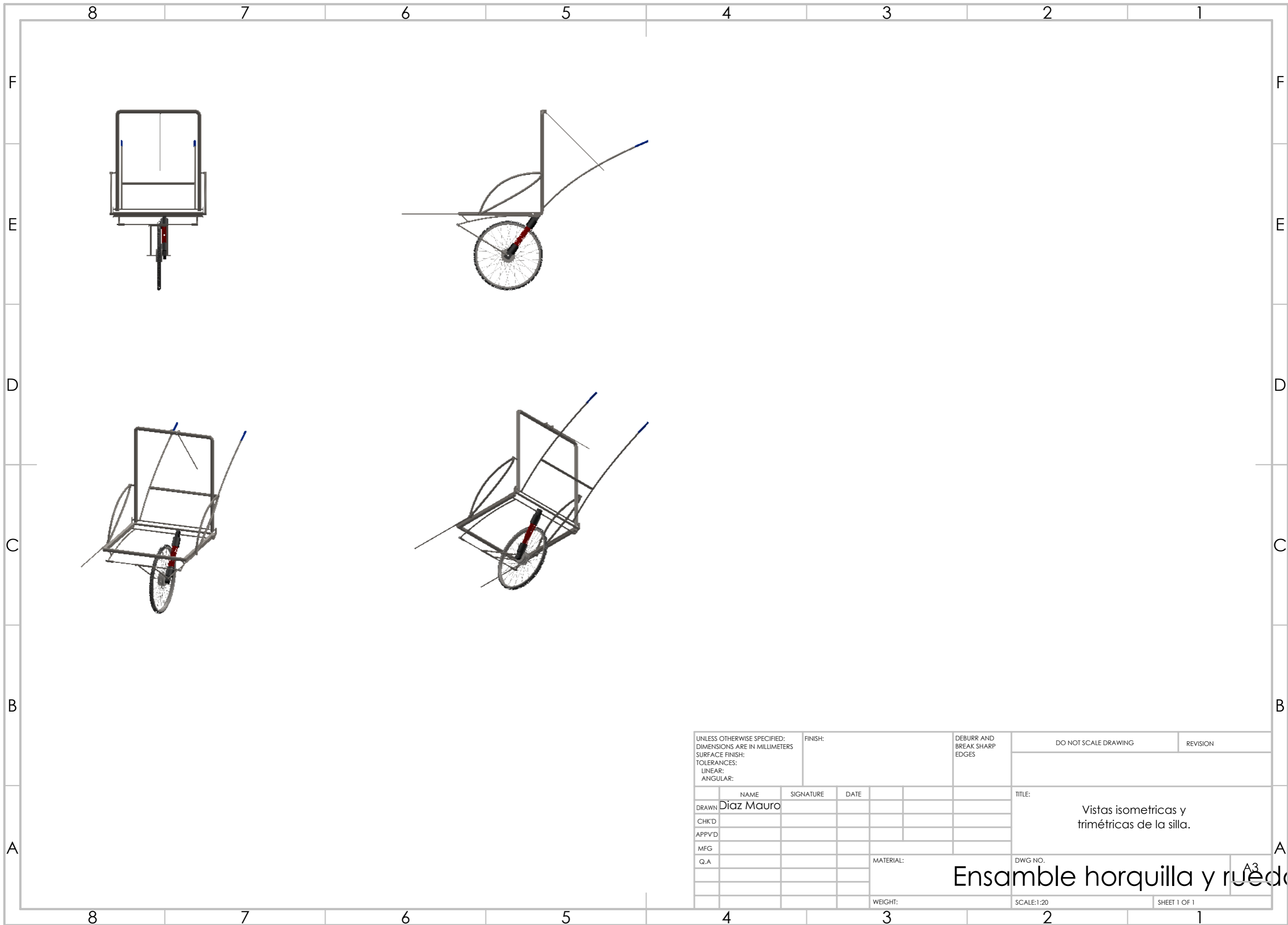
Ensamble horquilla y rueda

A4

WEIGHT:

SCALE:1:20

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN: Diaz Mauro				SIGNATURE		DATE		TITLE: Vistas isométricas y trimétricas de la silla.			
CHK'D								DWG NO. <b>Ensamble horquilla y rueda</b> A3			
APPV'D											
MFG											
Q.A											
						MATERIAL:		SCALE: 1:20			
						WEIGHT:		SHEET 1 OF 1			