



Propuesta de diseño de un dispositivo mecánico para la cosecha de cocos en palmeras de gran altura

Jhoan Sebastian Trejos Valdes

Universidad Del Valle
Facultad De Ingeniería
Escuela De Ingeniería Mecánica
Ingeniería Mecánica

2026



Propuesta de diseño de un dispositivo mecánico para la cosecha de
cocos en palmeras de gran altura

Jhoan Sebastian Trejos Valdes

Trabajo de grado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Sara Aida Rodríguez Pulecio PhD
Directora

Universidad Del Valle
Facultad De Ingeniería
Escuela De Ingeniería Mecánica
Ingeniería Mecánica
2026

AGRADECIMIENTOS

Dedico este trabajo a mi familia, especialmente a mis padres, Cristina y Jhon Jairo, por el apoyo incondicional que me han brindado durante toda mi vida. A mis hermanas, Mayra y Daniela, con quienes hemos superado diversos obstáculos y cuyo acompañamiento y motivación han sido fundamentales para alcanzar esta meta.

A mis sobrinos, Mariana y Juan Martín, quienes son una fuente constante de inspiración y motivación para ser cada día una mejor persona, un mejor tío y un mejor profesional.

También quiero expresar mi gratitud a los amigos que hice durante este proceso, una etapa que sin duda recordaré como una de las mejores de mi vida. En especial, a Alejandro y Juan Daniel, por los innumerables momentos que compartimos a lo largo de estos años.

RESUMEN

Este trabajo aborda la problemática de la recolección manual de cocos en palmeras de gran altura en el Pacífico colombiano, una actividad que presenta riesgos significativos para los recolectores debido a la posibilidad de caídas y lesiones graves. Con el fin de mejorar la seguridad de los trabajadores y aumentar la eficiencia del proceso, se desarrolló el diseño de un prototipo funcional para un dispositivo mecánico para la cosecha de cocos, orientado a ofrecer una alternativa accesible, liviana y adecuada a las condiciones de la región.

La metodología utilizada para el desarrollo del prototipo funcional se estructuró en cuatro fases. La primera fase consistió en seleccionar el concepto de diseño más adecuado, considerando las necesidades operativas, las limitaciones legales, así como la disponibilidad de tecnologías que pudieran cumplir estas exigencias y las características culturales del usuario objetivo. En la segunda fase se definió la forma final del prototipo, se eligieron materiales resistentes a condiciones ambientales adversas, como el PETG, y se elaboraron los planos constructivos necesarios. La tercera fase incluyó el diseño detallado y los análisis estructurales, tanto estáticos como mediante elementos finitos, para garantizar la estabilidad y seguridad del sistema. Finalmente, la cuarta fase consistió en la construcción y validación de un prototipo conceptual mediante manufactura aditiva, incorporando un sistema de control basado en Arduino con comunicación vía Bluetooth, lo que permite un control confiable en zonas remotas y compatibilidad con distintos sistemas electrónicos.

Los resultados obtenidos demostraron que el prototipo es estructuralmente estable, mecánicamente viable, ligero y funcional. Las pruebas experimentales realizadas sobre una palmera permitieron validar su desempeño, confirmando que todas las funciones del sistema operan correctamente. Este dispositivo no busca reemplazar a los recolectores manuales, sino asistir en la cosecha de palmeras de gran altura, aumentando la seguridad y la productividad.

Palabras claves: Cosecha de cocos, Seguridad de los trabajadores, Palmeras de gran altura, Diseño conceptual, Dispositivo mecánico, Prototipo funcional

TABLA DE CONTENIDO

1.INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Planteamiento del problema.....	9
1.2 Discusión sobre la importancia de resolver el problema	9
1.3 Árbol del problema	11
2. OBJETIVOS.....	12
2.1 Objetivo General.....	12
2.2 Objetivos específicos	12
3. ESTADO DEL ARTE	13
3.1 Síntesis y criterios de diseño derivados del estado del arte	18
4. MARCO TEÓRICO	20
4.1 Cocotero.....	20
4.2 Metodología de diseño.....	20
4.2.1 Metodología de Ulrich y Eppinger.....	21
4.3 Fundamento técnicos de los materiales y dispositivos utilizados en el dispositivo....	24
4.3.1 Ruedas Mecanum	24
4.3.2 Impresión 3D por Deposición de Material Fundido (FDM/FFF)	24
4.3.3 Material del filamento	25
4.3.4 Influencia de los parámetros de impresión en las propiedades mecánicas de piezas 3D.....	28
4.4 Niveles de maduración tecnológica (TRL)	29
5. METODOLOGÍA.....	30
6. RESULTADOS	33
6.1 Fase 1: Desarrollo del concepto.....	33
6.1.1 Identificación de las necesidades y definición de requisitos de diseño.	33
6.1.2 Definición del dispositivo macro	36
6.1.3 Desarrollo de conceptos	37
6.1.4 Concepto final a desarrollar	48
6.2 Fase 2: Diseño a nivel de sistema	49
6.2.1 Descripción del dispositivo	50
6.2.2 Funcionamiento general del dispositivo.....	50
6.2.3 Limitaciones del diseño.....	52

6.3 Fase 3: Diseño de detalle	53
6.3.1 Materiales y elementos a fabricar.....	53
6.3.2 Cálculo y selección de elementos a ser adquiridos	54
6.3.3 Análisis estático	59
6.3.4 Análisis de esfuerzos.....	65
6.3.5 Sistema de control	73
6.4 Fase 4: Pruebas y refinamiento	78
6.4.1 Parámetros de impresión	78
6.4.2 Fabricación del prototipo conceptual y pruebas.....	79
6.5 Presupuesto	81
6.6 Matriz de cumplimiento.....	83
7.CONCLUSIONES.....	85
REFERENCIAS	86
ANEXO 1: Planos de detalle	90
ANEXO 2: Código de Arduino	102
ANEXO 3: Pruebas de funcionamiento	105

LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Árbol del problema.	11
Figura 2: Representación gráfica de la Marota y su uso.....	13
Figura 3: Dispositivo trepador de palmeras ergonómico.	14
Figura 4: Dispositivo trepador de palmeras “sit and stand”.	14
Figura 5: Dispositivo trepador de palmeras comercial.	14
Figura 6: Dispositivo trepador de palmeras biela-manivela.	15
Figura 7: Dispositivo recolector de coco “End to End”.	15
Figura 8: Dispositivo trepador de palmeras autónomo de aluminio.....	15
Figura 9: Dispositivo trepador de palmeras autónomo.....	16
Figura 10: Brazo robótico de cuatro grados de libertad, para la cosecha de cocos.	16
Figura 11: Dispositivo trepador de palmeras autónomo de marco rectangular.....	16
Figura 12: Robot “AMARAN” para la cosecha de cocos.	17
Figura 13: Dispositivo “CATA COCO”.	17
Figura 14: Proceso de desarrollo del producto en espiral.	24
Figura 15: Palmera de referencia, campus de Meléndez- Universidad del Valle.....	35
Figura 16: Conceptos generados para la estructura principal.....	39
Figura 17: Conceptos generados para la elevación	41
Figura 18: Conceptos generados para el posicionamiento	43
Figura 19: Conceptos generados para el corte.....	44
Figura 20: Conceptos generados para el sistema de acople.....	46
Figura 21: Microcontroladores considerados para el sistema de control.	48
Figura 22: Boceto del concepto final a desarrollar.....	49
Figura 23: Dispositivo de cosecha.....	51
Figura 24: Fuerzas en el contacto entre la rueda y el tronco.	57
Figura 25: Plano de corte de la sierra.	60
Figura 26: Vista lateral del motor de corte.	61
Figura 27: Diagrama de cuerpo libre estructura de corte.	61
Figura 28: Subconjunto de arrastre.....	64
Figura 29: Diagrama de cuerpo libre soporte de ruedas.	64
Figura 30: Ubicación de las cargas y malla generada para el soporte de corte.	68
Figura 31: Desplazamientos en el soporte de corte, sin inclinación.....	68
Figura 32: Distribución de esfuerzos en el soporte de corte, sin inclinación.	68
Figura 33: Distribución de esfuerzos en la estructura en una inclinación de 45°.....	68
Figura 34: Reacciones y momentos calculados mediante la simulación.....	70
Figura 35: Distribución de esfuerzos de Von Mises en el soporte de ruedas.	70
Figura 36: Distribución de desplazamientos en el soporte de ruedas.	70
Figura 37: Condiciones de frontera de la estructura principal.....	71
Figura 38: Distribución de esfuerzos de Von Mises en la estructura principal.....	72
Figura 39: Distribución de esfuerzos en la junta.	72
Figura 40: Distribución de los desplazamientos en la estructura principal.	72
Figura 41: Distribución de Esfuerzos en la estructura principal ensamblada.....	73
Figura 42: Esquema de conexión del sistema de control.....	77

Figura 43: Ruedas Mecanum impresas en 3D.....	80
Figura 44: Ruedas Mecanum ensambladas por pares, motor JGB37-500.....	80
Figura 45: Prototipo fabricado y ensamblado.....	80
Figura 46: Pruebas de campo del prototipo	81

1.INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El problema que abordaremos en este trabajo de pregrado es la necesidad de diseñar un dispositivo destinado a la cosecha de coco en palmeras de gran altura en el Pacífico colombiano. Las palmeras de coco, ya sean del tipo "alto del Pacífico" o "malasino", alcanzan alturas superiores a los veinte metros en su etapa de madurez, lo que convierte la recolección manual en una tarea sumamente peligrosa y poco práctica [1]. En la actualidad, los trabajadores se ven en la obligación de escalar las palmeras para cosechar los cocos, enfrentando así un riesgo considerable para su seguridad y generando un obstáculo significativo para la productividad de las plantaciones.

La situación se agrava aún más debido a que, cuando las palmeras alcanzan alturas que complican la recolección manual, la única alternativa práctica parece ser la tala de las palmeras y la espera de nuevas plantaciones, un proceso que puede extenderse entre tres y seis años dependiendo del tipo de cocotero [2]. Esta práctica no solo impacta negativamente en la productividad de las plantaciones, sino que también conlleva un costo considerable en términos de tiempo y recursos invertidos en la siembra y el crecimiento de nuevas palmeras.

1.2 Discusión sobre la importancia de resolver el problema

La industria del coco constituye un pilar fundamental para la economía y el sustento de numerosas comunidades del Pacífico colombiano, especialmente en los departamentos de Nariño y Cauca. El cocotero es una planta de aprovechamiento integral, de la cual se obtienen alimentos, bebidas y diversos productos derivados destinados tanto al autoconsumo como a la comercialización. Además, la cáscara o estopa se emplea en la elaboración de artesanías y fibras, mientras que las hojas y el tronco son utilizados tradicionalmente como materiales de construcción y techos para viviendas. Esta diversidad de usos evidencia la estrecha relación entre el cultivo del coco y la vida económica y social de las comunidades productoras.[3]

No obstante, la recolección manual de cocos en palmeras de gran altura representa una actividad de alto riesgo para los trabajadores agrícolas. Las palmeras maduras pueden superar los 20 m de altura, lo que obliga a los recolectores a ascender directamente por el tronco, exponiéndose a caídas con consecuencias potencialmente graves o fatales. Adicionalmente, un coco con una masa aproximada entre 1.5 y 2.5 Kg [3], al caer desde estas alturas puede alcanzar energías de impacto superiores a 300J, lo que representa un peligro significativo tanto para el trabajador como para otras personas presentes en la plantación.

Aunque no existen estadísticas oficiales específicas sobre accidentes durante la recolección de coco en Colombia, el análisis del contexto general de seguridad laboral permite dimensionar el riesgo asociado a esta actividad. El sector agrícola presenta una tasa de accidentalidad superior al promedio nacional, con 7,64 accidentes por cada 100 trabajadores en 2024, triplicando la tasa general del país. A nivel internacional, la Organización Internacional del Trabajo (OIT) reporta que aproximadamente 230000 muertes laborales anuales están asociadas a caídas desde altura, lo que respalda la consideración de la recolección de cocos en palmeras altas como una labor intrínsecamente peligrosa. Ante la

ausencia de datos específicos, el uso de indicadores del sector agrícola y del trabajo en alturas resulta pertinente, dado que se trata de contextos directamente comparables.[4]

Desde una perspectiva de productividad, la opción de cortar palmeras de coco maduras para facilitar la recolección no se considera una solución sostenible. Esta medida interrumpe el ciclo natural de crecimiento y producción de los cocoteros, lo que inevitablemente resulta en una disminución de la productividad a largo plazo de las plantaciones y ocasiona pérdidas económicas para los productores. Además, el proceso de reemplazo de una palma cortada con una nueva plantación implica un período de espera considerable antes de que la nueva palma comience a dar frutos. Dependiendo del tipo de cocotero, este período puede oscilar entre tres y seis años, con el tipo alto del Pacífico comenzando a producir frutos a partir del sexto año y el malasino a partir del tercer año.[5]

El sector del coco tiene un gran potencial para impulsar el desarrollo económico en la región pacífica como a nivel nacional. Aumentar la producción de coco no solo generará empleo y oportunidades de negocio en las zonas rurales donde se cultivan los cocoteros, sino que también contribuirá al crecimiento económico del país en su conjunto.

Colombia se enfrenta a un desafío significativo en cuanto a la producción de coco, ya que importa una cantidad considerable para satisfacer su demanda interna [6]. Esta situación resalta la urgente necesidad de incrementar la producción nacional de coco. Resolver el problema de la recolección de cocos en palmas altas desempeñará un papel fundamental en este sentido, ya que contribuirá a aumentar la producción nacional.

Según datos de AGROSAVIA del 2021, Colombia exportó aproximadamente 250 toneladas de coco, mientras que importó alrededor de 3500 toneladas.[6]. Este desequilibrio entre la producción y el consumo evidencia la importancia de aumentar la producción nacional de coco. Incrementar el rendimiento por hectárea cosechada es fundamental para alcanzar este objetivo. Por lo tanto, cortar las palmeras de coco plantadas no es una opción viable, ya que interrumpe el ciclo de producción y dificulta el aumento de la producción nacional.

Desde el punto de vista socioeconómico, la cadena productiva del coco genera un impacto significativo en el empleo rural, creando aproximadamente 10 000 empleos directos y cerca de 15000 empleos transitorios, asociados a labores de cosecha, transporte, transformación y elaboración de productos derivados. Esta actividad productiva contribuye de manera directa a los ingresos familiares.[7]

En consecuencia, la problemática descrita evidencia la necesidad de desarrollar una solución mecánica que permita la recolección de cocos en palmeras de gran altura sin requerir el ascenso humano, reduciendo la exposición al riesgo, preservando la productividad de las plantaciones y fortaleciendo la sostenibilidad económica del sector. El diseño de dicho dispositivo debe considerar tanto los requerimientos técnicos de la tarea como las condiciones socioculturales y las limitaciones tecnológicas propias de la región, de modo que la solución propuesta sea funcional, accesible y viable para los productores locales.

1.3 Árbol del problema

Problema: Carencia de un dispositivo adecuado para la recolección de cocos en palmeras de gran altura.

Causas:

- Altura de las palmeras de coco: Las palmeras de coco en el pacífico colombiano alcanzan alturas superiores a los veinte metros en su etapa de madurez.
- Recolección manual peligrosa: La recolección manual de cocos en palmeras altas representa un peligro constante para los trabajadores agrícolas, quienes corren riesgos graves, como caídas desde alturas considerables, que pueden ocasionar lesiones severas.
- Tala prematura de palmeras: Actualmente, la única opción viable es cortar palmeras maduras para simplificar la recolección, pero esto perturba el ciclo natural de crecimiento y producción de los cocoteros. Además, el tiempo requerido para reemplazar estas palmeras y esperar que las nuevas den frutos afecta la productividad a largo plazo.

Consecuencias:

- Riesgos para la seguridad laboral: La recolección manual y la escalada de palmeras de gran altura representan un grave peligro para la seguridad y la salud de los trabajadores agrícolas.
- Pérdida de productividad: La recolección manual y la tala prematura de palmeras impactan negativamente en la productividad de las plantaciones de coco en el pacífico colombiano.
- Deterioro del ciclo de producción: la tala prematura de palmeras interrumpe el ciclo natural de crecimiento y producción de los cocoteros, lo que resulta en una disminución de la producción a largo plazo.
- Costos económicos: La tala prematura de palmeras y la espera para nuevas plantaciones conllevan costos económicos significativos en términos de tiempo y recursos invertidos en la siembra y el crecimiento de nuevas palmeras.

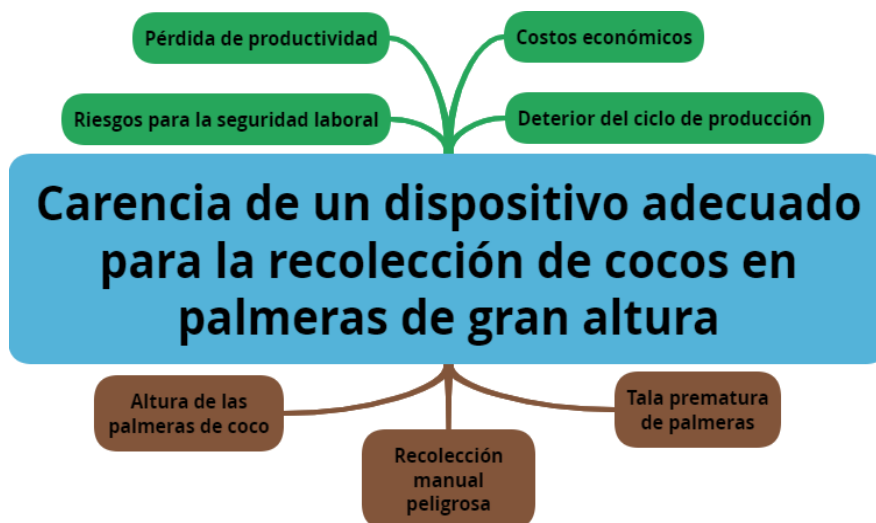


Figura 1: Árbol del problema.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Diseñar un dispositivo mecánico de cosecha de cocos en palmeras de gran altura.

2.2 Objetivos específicos

1. Analizar las características y requisitos del problema de recolección de cocos en las palmeras de gran altura en el Pacífico colombiano, incluyendo la morfología, resistencia y ubicación geográfica del cultivo, restricciones legales y restricciones culturales con el fin de establecer los parámetros clave para el diseño del dispositivo.
2. Investigar y evaluar las tecnologías disponibles actualmente para la cosecha de cocos en palmeras de altura, identificando sus fortalezas, debilidades y aplicabilidad potencial en el contexto local.
3. Documentar y presentar el diseño conceptual y de detalle del dispositivo mecánico de cosecha de cocos, junto con análisis de viabilidad técnica y económica, para su consideración en futuros proyectos de desarrollo y eventual implementación en la región.
4. Construcción y evaluación de un prototipo funcional a escala que permita validar la propuesta en una prueba funcional controlada.

3. ESTADO DEL ARTE

En Colombia, la recolección tradicional de frutos de palmeras como el coco o el chontaduro se realiza manualmente. Para palmeras de menor altura, los trabajadores trepan sin utilizar ningún tipo de equipo especial. Sin embargo, en el caso de palmeras más altas, se recurre a un dispositivo conocido como "Marota". Esta especie de andamio se construye utilizando palos de Pichindé amarrados con alambre, conformando dos estructuras en forma de triángulo: una para sostener los pies y otra para el cuerpo superior. El propósito de la Marota es facilitar el ascenso en la palmera y proteger a los recolectores de astillarse con las espinas que se forman en la palmera a medida que crece y pierde sus palmas[8]. La Figura 2 muestra una representación de la Marota.

No obstante, la Marota tiene limitaciones significativas. Por un lado, no es adecuada para palmeras de gran altura, ya que carece de elementos de seguridad adicionales. En caso de que un operario pierda el control de alguna de las dos estructuras de la Marota, quedará atrapado a la altura en que se encuentre, pues no hay una forma segura de descender utilizando solo una de las estructuras. Además, el hecho de que el cuerpo se encuentre fuera del eje de la palmera a alturas considerables provoca que el peso corporal haga oscilar peligrosamente la palmera durante el ascenso.

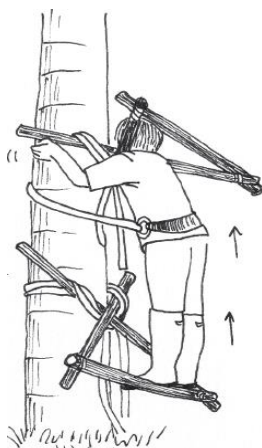


Figura 2: Representación gráfica de la Marota y su uso. Tomado de [8]

A continuación, se proporciona un análisis del estado actual de las investigaciones relacionadas con dispositivos manuales utilizados en el cultivo del coco.

En el ámbito de los dispositivos manuales para la recolección de cocos, su desarrollo se ha centrado en mejorar aspectos fundamentales como la seguridad, la ergonomía y la eficiencia durante la escalada y recolección. Estos dispositivos se diseñan para ser accesibles, adaptándose a cualquier operario y a la variedad de formas que presentan las palmeras. En [9], se presenta un nuevo dispositivo que mejora significativamente las condiciones laborales del operario, dispositivo mostrado en la Figura 3.

En países con una alta producción de coco como la India e Indonesia, se comercializan dispositivos que representan una mejora en eficiencia y seguridad con respecto a los métodos tradicionales como el trepado manual de la palmera, o con dispositivos artesanales (similares

a la Marota). El análisis de estos dispositivos se ha enfocado en determinar su factor de seguridad. En [10], se presenta un análisis estático mediante elementos finitos de uno de estos dispositivos mejorados. En la Figura 4 se presenta el dispositivo analizado. El estudio consistió en aplicar diferentes cargas a los dos marcos por separado, interpretando los resultados mediante el esfuerzo equivalente de von Mises, la deformación elástica equivalente y la deformación total. Los resultados del análisis muestran que el dispositivo es seguro estructuralmente para cargas inclusive de 1000 Newton lo que equivale a una persona de 102 Kg, ya ambos marcos presentan factores de seguridad superiores a 1.5. Aunque este análisis proporciona información sobre la seguridad estructural del dispositivo, no considera factores relacionados con la palmera, como la fuerza de los anclajes, la resistencia de la palmera o su elasticidad según la altura a la que se utiliza el dispositivo.

En [11], se presenta una comparación detallada entre un dispositivo comercial de recolección de cocos y el método tradicional de escalada. La evaluación incluyó el análisis de la postura y los movimientos durante la escalada, utilizando tanto medidas subjetivas como objetivas. Las pruebas subjetivas se centraron en las quejas percibidas por el operario, mientras que las pruebas objetivas se basaron en criterios ergonómicos. Además, se realizó una comparación del nivel de comodidad entre el uso del escalador portátil y la escalada tradicional, mostrando una clara ventaja en términos de reducción de incomodidades y riesgos ergonómicos con el uso del dispositivo portátil. El dispositivo portátil usado en la comparación se muestra en la Figura 5.



Figura 3: Dispositivo trepador de palmeras ergonómico. Tomado de [9]



Figura 4: Dispositivo trepador de palmeras "sit and stand". Tomado de [10]



Figura 5: Dispositivo trepador de palmeras comercial. Tomado de [11]

Los resultados de estos análisis muestran que la escalada tradicional conlleva un mayor riesgo de movimiento y malestar para el operario en comparación con el uso del dispositivo portátil. Se destaca la necesidad de implementar intervenciones ergonómicas para mejorar la seguridad y la comodidad durante la recolección de cocos.

Los dispositivos autónomos con diferentes grados de automatización para trepar palmeras, se evidencia una evolución en sus capacidades como recolectores a lo largo del tiempo.

Inicialmente, los desarrollos se centraron en la creación de un robot operado a distancia para escalar las palmeras de manera eficiente. En un dispositivo presentado en [12], se emplea un mecanismo de biela-manivela para propulsarse y reducir el uso de motores. Este dispositivo tiene como objetivo identificar los cocos listos para la cosecha y cuenta con un brazo robótico de cuatro grados de libertad y un sistema de procesamiento de imágenes para esta tarea. Sin embargo, el tamaño considerable del robot debido al sistema de biela-manivela y la necesidad de un motor de alto torque representan desafíos. La Figura 6 ilustra el dispositivo y su montaje.

Con el tiempo, los desarrollos han avanzado hacia dispositivos más compactos y eficientes, como el presentado en [13], que consta de dos marcos unidos por varillas roscadas acopladas a motores para sujetarse a las palmeras. La estructura del dispositivo se presenta en la Figura 8. Este dispositivo incluye un brazo robótico manejado manualmente a distancia para el corte de los frutos. La reducción de peso es un aspecto clave abordado en [14], donde se diseñó un dispositivo principalmente de aluminio que utiliza prensas en lugar de resortes para sujetarse al tronco de la palmera, con amortiguación proporcionada por los rodillos. Además, cuenta con un gancho para un ensamblaje rápido al tronco y un brazo robótico de un grado de libertad para ajustar la longitud. El dispositivo es mostrado en la Figura 7.



Figura 6: Dispositivo trepador de palmeras biela-manivela. Tomado de [12]



Figura 7: Dispositivo recolector de coco "End to End". Tomado de [14]



Figura 8: Dispositivo trepador de palmeras autónomo de aluminio. Tomado de [13]

Se han presentado diferentes formas de los dispositivos con el fin de disminuir su peso y aumentar la velocidad de escalada, se han empleado dispositivos con marcos circulares que pueden adaptarse mejor a las variaciones en el diámetro de las palmeras y moverse en todas direcciones para aumentar la velocidad de escalada se ha optado por usar motores individuales en cada una de las ruedas del dispositivo, como el presentado en [15], que cuenta con cuatro ruedas y motores individuales de alta torsión. Los cuatro motores se controlan en dirección bidireccional, este dispositivo cuenta con un brazo robótico para cortar los racimos de cocos. El dispositivo y su montaje se muestran en la Figura 9.

Estos avances también implican el desarrollo de brazos robóticos para realizar el proceso de corte, como el presentado en [16], con cuatro grados de libertad y cálculos de cinemática inversa para una estructura articulada que se asemeja al brazo humano. El brazo robótico se

puede visualizar en la Figura 10. Sin embargo, el peso del brazo, especialmente al acoplarse a la estructura de escalada, sigue siendo un desafío significativo.

En [17] se diseñó y construyó un robot para la recolección de cocos. Como novedad, este robot cuenta con un sistema de procesamiento de imágenes para determinar el estado de maduración del coco y un sistema anticaida en caso de que el dispositivo pierda la fuente de energía. Como característica distintiva, este dispositivo tiene un cuerpo con marcos rectangulares en comparación con el diseño más comúnmente circular. La representación CAD de este dispositivo se exhibe en la Figura 11. La metodología implica el desarrollo y la prueba de una máquina escaladora de árboles de coco utilizando un mecanismo impulsado por ruedas, que incluye modelado 3D, análisis estático y dinámico, pruebas de campo, pruebas de maniobrabilidad del escalador e identificación de madurez de los cocos utilizando técnicas de *deep learning*.



Figura 9: Dispositivo trepador de palmeras autónomo. Tomado de [15]



Figura 10: Brazo robótico de cuatro grados de libertad, para la cosecha de cocos. Tomado de [16]

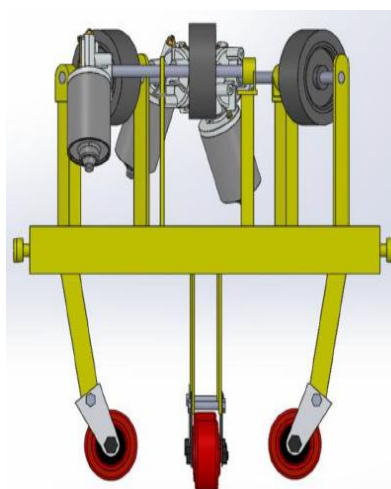


Figura 11: Dispositivo trepador de palmeras autónomo de marco rectangular. Tomado de [17]

La información detallada sobre el diseño y los resultados de las pruebas en tiempo real es limitada en el contexto de los robots escaladores de palmeras. Un desafío significativo es la incapacidad de estos robots para rotar alrededor del tronco, lo que dificulta la recolección de racimos de cocos en posiciones opuestas al brazo del robot. Para abordar estos problemas, en [18] se presenta el robot Amaran. Amaran se compone de una cosechadora con un brazo robótico y un cortador, ambos montados en un marco en forma de anillo que puede sujetarse al tronco de un cocotero. El control de Amaran se realiza a través de una interfaz inalámbrica, permitiendo la operación por parte de un operador en tierra o mediante una aplicación de teléfono inteligente. Una vez posicionado cerca del racimo de cocos, se ordena al cortador que realice la cosecha cortando los cocos de su tallo.

La viabilidad de Amaran (nombre dado al robot presentado en [18]) se confirmó mediante pruebas realizadas en un cocotero de laboratorio, seguidas de pruebas de campo en una plantación de cocos. Este artículo también presenta un análisis detallado, tanto dinámico como estático, del funcionamiento del dispositivo de subida en palmeras rectas de diámetro

constante, palmeras rectas con diámetro variable y palmeras inclinadas con diámetros variables.

Un aspecto innovador importante de este dispositivo es su capacidad para rotar alrededor del tronco de la palmera. El cuerpo del escalador se compone de dos mitades, cada una con un anillo semicircular que forma un anillo completo. Equipado con ocho ruedas Mecanum y motores de accionamiento, este dispositivo puede moverse hacia arriba o hacia abajo cuando todas las ruedas giran en la misma dirección. Cuando las ruedas superiores y las inferiores giran en direcciones opuestas, el escalador puede rotar a la derecha o a la izquierda sobre el tronco del árbol. Los enlaces del motor del cuerpo están unidos mediante un mecanismo de resorte, proporcionando una mejor tracción en el tronco de la palmera de coco. Amaran puede trepar con éxito árboles que están inclinados hasta 30° respecto al eje vertical. En la Figura 12 se muestra el esquema de este dispositivo.

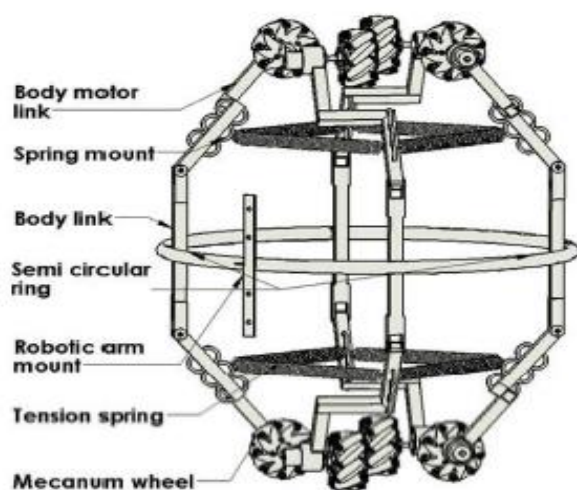


Figura 12: Robot "AMARAN" para la cosecha de cocos. Tomado de [18]

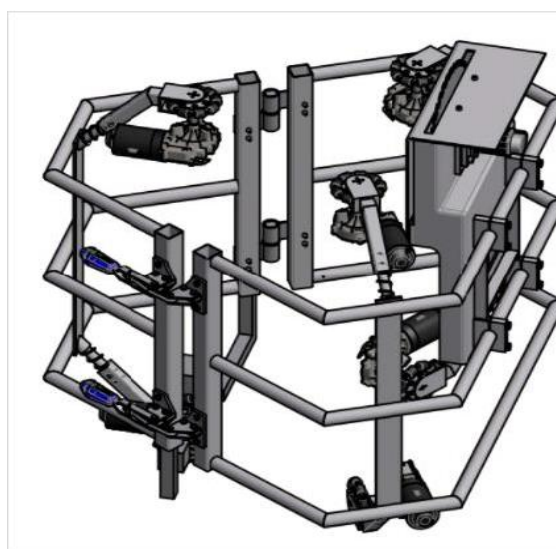


Figura 13: Dispositivo "CATA COCO". Tomado de [19]

El brazo robótico o herramienta de corte es una parte crucial de los robots recolectores de coco, encargados de cortar el racimo. Por lo tanto, la selección adecuada de la herramienta de corte es de vital importancia. En el estudio [20], se presenta una comparación entre sierras de hoja circular y motosierras. La metodología involucró la selección de hojas de corte, la determinación de parámetros como la velocidad de corte, el ángulo de inclinación, el tipo de hojas y el grosor del tallo, y la optimización de estas variables para lograr el mejor rendimiento. Se observó que las hojas de sierra circular con paso de diente irregular mostraron una mayor eficiencia de corte, mientras que las motosierras ofrecieron una mejor calidad de corte y un menor tiempo de corte. La selección de una motosierra es la más indicada.

En Brasil se han desarrollado dos trabajos de grado relacionados con la recolección de frutos de palmeras (Arecaceae: coco, asaí, *buriti*, carnaúba y *babaçu*). En [21] se discute la importancia de la mecanización en la cosecha de frutas de árboles pertenecientes a la familia Arecaceae, como parte de un creciente interés en mejorar la eficiencia y la estandarización

en la producción. Se destaca el caso de la palma de asaí, una fruta significativa en la región amazónica, donde se observa un mercado en crecimiento y un aumento de las inversiones en su cultivo en lugar de la extracción.

En ese trabajo se buscó desarrollar dispositivos que permitan una cosecha más segura y eficiente, así como explorar el potencial de implementación de tecnologías de bajo costo para responder a las tendencias del mercado. En este contexto, se destacó la necesidad de realizar más investigaciones para comprender mejor las propiedades mecánicas de las maderas de palma y su impacto en el diseño de equipos de cosecha mecanizada.

Como resultado en [21], se determinó el concepto de un equipo para realizar la cosecha de frutos de palmeras, además de definir algunos parámetros límites del mecanismo utilizado en el cultivo de coco y en el cultivo de asaí, como la velocidad mínima, el área de contacto entre la máquina y el árbol, la energía mínima disipada de los frutos y la masa máxima del equipo. En este trabajo se desarrolló un equipo robusto para el cultivo. Sin embargo, se destacó la complejidad de crear un solo dispositivo para la cosecha de frutas en palmeras de la familia Arecaceae. Es factible desarrollar equipos específicos para cada una de estas palmeras mencionadas, manteniendo el mismo concepto entre ellos y variando únicamente las dimensiones de sus componentes.

En Brasil, se llevó a cabo un proyecto de grado dedicado al diseño y construcción de un equipo específico para la cosecha de cocos [19]. El proyecto, conocido como “Cata Coco”, tiene como objetivo abordar los desafíos relacionados con la cosecha de cocos mediante el desarrollo de un dispositivo rentable para mecanizar esta tarea, lo que a su vez mejora la productividad y la seguridad para los agricultores.

La metodología empleada se centra en el desarrollo y prueba de un dispositivo controlado para la cosecha de cocos, prestando especial atención a su adaptabilidad a las variaciones de los árboles de coco, así como al estudio de diversas herramientas de cosecha.

El dispositivo desarrollado consta de un sistema compuesto por tres ruedas inferiores omnidireccionales dispuestas paralelamente al tronco del cocotero, y tres ruedas superiores omnidireccionales dispuestas perpendicularmente. Este sistema incluye muelles que proporcionan presión de contacto y permiten la adaptación a las variaciones del tronco. Mientras que las ruedas inferiores elevan el dispositivo, las ruedas superiores son responsables de la rotación y posicionamiento del brazo de corte alrededor del tronco. La fijación al tronco se logra mediante grapas de presión y un conjunto de bisagras que facilitan su ajuste. La representación CAD del dispositivo desarrollado se visualiza en la Figura 13.

3.1 Síntesis y criterios de diseño derivados del estado del arte

El análisis crítico de las soluciones reportadas en el estado del arte permitió evaluar los distintos enfoques adoptados para la recolección de cocos en palmeras de gran altura y determinar su pertinencia frente a los objetivos del presente proyecto. A partir de esta evaluación, se descartaron aquellas propuestas que requieren la interacción directa del trabajador con el dispositivo durante el ascenso, debido al alto riesgo que representa para la

seguridad del operario. En consecuencia, se estableció como principio fundamental de la solución la eliminación del ascenso humano a la palmera, limitando la intervención del operador exclusivamente a tareas de control desde el suelo.

Asimismo, el estudio de los dispositivos existentes evidenció que las soluciones más viables desde el punto de vista mecánico son aquellas cuya estructura se adapta y se sujeta directamente al tronco de la palmera, permitiendo el desplazamiento vertical mediante elementos rodantes. En este contexto, se identificó el uso de ruedas como un mecanismo adecuado para generar el movimiento de ascenso, descenso y posicionamiento del dispositivo, siempre que se garantice un contacto estable con la superficie del tronco.

Por otro lado, el análisis permitió reconocer que el peso del sistema constituye un factor crítico en el diseño, al estar directamente relacionado con la selección de materiales, el dimensionamiento de los actuadores y la estabilidad del dispositivo durante la operación. Dado que la mayoría de las propuestas analizadas emplean estructuras metálicas (principalmente acero o aluminio), se evidenció la dificultad asociada al conformado de estos materiales para adaptarse a geometrías variables, lo que refuerza la necesidad de una arquitectura estructural simple y ligera.

Asimismo, se identificó que varias de las soluciones propuestas incorporan tecnologías de alto costo y elevada complejidad, las cuales, si bien resultan técnicamente viables, pueden dificultar su implementación en contextos rurales con limitaciones económicas y tecnológicas. Esta condición es particularmente relevante en el contexto del Pacífico colombiano, donde la disponibilidad de infraestructura, repuestos y personal técnico especializado es limitada. En consecuencia, se priorizó el desarrollo de una solución basada en tecnologías simples, componentes de fácil acceso comercial y una arquitectura mecánica robusta, orientada a facilitar su adopción, operación y mantenimiento en condiciones reales de uso.

Finalmente, a partir del estudio detallado de uno de los dispositivos reportados en la literatura [18], se identificó el uso de ruedas Mecanum como una solución efectiva para permitir el desplazamiento vertical y la rotación del sistema alrededor del tronco de la palmera. Este principio de funcionamiento fue adoptado como una referencia directa para el desarrollo del concepto propuesto, al ofrecer una alternativa mecánica capaz de combinar estabilidad, versatilidad de movimiento y simplicidad constructiva.

En conjunto, los hallazgos del estado del arte permitieron descartar enfoques incompatibles con los criterios de seguridad y viabilidad del proyecto, así como adoptar principios de solución que influyeron directamente en la definición de los requisitos de diseño y en la configuración mecánica del dispositivo desarrollado en las etapas posteriores.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Cocotero

La palmera de coco, científicamente conocida como *Cocos nucifera*, es una de las plantas más emblemáticas y versátiles que se encuentran en las regiones tropicales y subtropicales de todo el mundo. Con su majestuosa presencia y sus diversos usos, esta especie ha desempeñado un papel fundamental en la vida y la cultura de las comunidades costeras durante siglos.

La palmera de coco es una planta perenne de gran altura que puede alcanzar alturas impresionantes, superando fácilmente los 20 metros en su etapa de madurez. Su tronco es recto y cilíndrico, con un diámetro que varía según la variedad y las condiciones de crecimiento. Las hojas son grandes y plumosas, formando una corona en la parte superior del árbol, ofreciendo sombra y protección contra los elementos.

Esta palma es de gran importancia por tener un fruto que puede ser aprovechado en múltiples aplicaciones. Presenta un buen desarrollo en regiones cuya altitud está por debajo de los 250 msnm, en un rango de temperatura promedio entre 28 y 35 °C. El suelo apropiado debe ser arenoso o fango-arenoso, que permita un buen drenaje del agua. Por lo cual, se cultiva sobre todo en las costas.

4.2 Metodología de diseño

El diseño de productos puede abordarse a través de diversas metodologías que buscan estructurar de manera sistemática el proceso creativo y técnico, desde la identificación de una necesidad hasta la materialización de una solución funcional. Entre las más reconocidas se destacan la metodología de Pahl y Beitz [22], que propone un proceso sistemático de diseño de ingeniería basado en la descomposición funcional y la síntesis de soluciones; la metodología de Ulrich y Eppinger [23], que integra los aspectos técnicos, de mercado y de gestión dentro de un enfoque interdisciplinario; la metodología de Nigel Cross [24], que resalta el papel del diseñador y los procesos cognitivos en la generación creativa de conceptos; y la metodología de Dieter y Schmidt [25], orientada al diseño concurrente y la optimización del desempeño, los costos y la manufacturabilidad. Cada una de estas metodologías ofrece fortalezas específicas según el grado de definición del producto y la etapa del proceso de desarrollo.

En la Tabla 1 se presenta una comparación entre las diferentes metodologías de diseño mencionadas, destacando su enfoque principal, las etapas clave del proceso de desarrollo y las ventajas y desventajas que caracterizan a cada una.

En el contexto del diseño de un prototipo inicial para un sistema de corte de cocos en palmeras de gran altura, la metodología de Ulrich y Eppinger resulta especialmente ventajosa. Su estructura iterativa facilita la exploración y evaluación de múltiples soluciones técnicas (como los mecanismos de ascenso, corte y seguridad), mientras permite la validación continua de los requerimientos del usuario, tales como la seguridad, la portabilidad y la facilidad de operación. Asimismo, su enfoque interdisciplinario favorece la integración de

conocimientos en mecánica, electrónica y diseño industrial, aspectos fundamentales en el desarrollo de un sistema mecatrónico. En conjunto, esta metodología orienta el proceso hacia la construcción de un prototipo funcional validado técnica y experimentalmente, incrementando la probabilidad de éxito en las etapas posteriores de manufactura y comercialización.

Metodología	Enfoque principal	Etapas clave	Ventajas	Limitaciones
Pahl y Beitz	Rigor ingenieril y estructura funcional del producto.	• Especificación • Función • Principio • Diseño • Detalle	Sistemática, ideal para productos mecánicos complejos.	Menor atención al usuario o al mercado.
Ulrich y Eppinger	Integración técnica, de mercado y gestión.	• Identificación • Concepto • Sistema • Detalle • Pruebas	Multidisciplinaria, iterativa, adaptable a prototipos rápidos.	Requiere coordinación y trabajo en equipo constante.
Nigel Cross	Procesos cognitivos y creatividad del diseñador.	• Exploración • Ideación • Evaluación • Desarrollo	Fomenta la innovación y el pensamiento lateral.	Menos rigurosa para ingeniería aplicada.
Dieter y Schmidt	Diseño concurrente y optimización de manufactura.	• Planificación • Diseño conceptual • Detalle • Validación	Promueve la eficiencia y reducción de costos de producción.	Menos enfoque en aspectos estéticos o de usuario.

Tabla 1: Comparativa entre las diferentes metodologías de diseño.

4.2.1 Metodología de Ulrich y Eppinger

La metodología de diseño y desarrollo de productos, presentada por Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger en [23], ofrece una estructura sistemática para asegurar que todos los aspectos importantes del diseño sean considerados y abordados adecuadamente. Esta metodología consta de seis fases:

Fase 0. Planeación: se realiza antes de la aprobación y lanzamiento oficial del proyecto. Esta etapa incluye la identificación de oportunidades conforme a la estrategia corporativa, la evaluación de avances tecnológicos y objetivos del mercado. El resultado es la declaración de misión del proyecto, que detalla el objetivo comercial del producto, metas, suposiciones y limitaciones.

Las actividades a realizar durante esta fase son:

- **Identificación del Problema:** Realizar un análisis detallado de la problemática de la recolección manual de cocos en palmeras de gran altura.
- **Evaluación de Tecnología:** Analizar el estado actual de la tecnología y sus posibles evoluciones mediante una revisión bibliográfica. Realizar un análisis de mercado de tecnologías de cosecha de cocos mediante bases de datos científicas, informes técnicos y catálogos de fabricantes.

- Establecimiento de Objetivos y Limitaciones: Definir los objetivos del proyecto, considerando las limitaciones de presupuesto y tiempo de desarrollo.
- Entregable: Presentar el anteproyecto para su aprobación.

Fase 1. Desarrollo del concepto: En esta fase se identifican las necesidades del mercado objetivo y se generan varios conceptos del producto. Se evalúan y seleccionan uno o más conceptos para su desarrollo y pruebas adicionales. Un concepto incluye la descripción de la forma, función y características del producto, acompañado de especificaciones, análisis de la competencia y justificación económica.

Para el filtrado de conceptos se utiliza el método de Pugh. Este método se emplea para reducir rápidamente el número de conceptos y mejorarlos. El proceso consta de los siguientes pasos:

- Elaboración de la matriz de selección: Los criterios de selección se enumeran en el lado izquierdo de la matriz de filtrado. Estos criterios se determinan en función de las necesidades del cliente y de la empresa previamente identificadas.
- Evaluación de los conceptos: Cada concepto se evalúa en comparación con un concepto de referencia utilizando una evaluación relativa: “mejor que” (+), “igual a” (0) o “peor que” (-). Estos valores se colocan en las celdas correspondientes de la matriz.
- Ordenamiento de los conceptos: Tras evaluar todos los conceptos, se suma el número de evaluaciones “mejor que” (+), “igual a” (0) y “peor que” (-) y se coloca el total en las filas inferiores de la matriz. Luego, los conceptos se ordenan, clasificando más alto aquellos con más signos “+” que signos “-”. En este punto, a menudo se identifican uno o dos criterios que diferencian significativamente los conceptos.
- Combinación y mejora de los conceptos: Después de evaluar y ordenar los conceptos, se revisan los resultados para asegurar su lógica y se considera si hay formas de combinar y mejorar ciertos conceptos.
- Selección de uno o más conceptos: Una vez comprendida la calidad relativa de cada concepto, se seleccionan los conceptos para un mayor refinamiento y análisis. Se decide si es necesaria otra ronda de filtrado o si se procede a la evaluación detallada de los conceptos, aplicando criterios de selección ponderada.
- Reflexión sobre los resultados y el proceso: Finalmente, se reflexiona sobre los resultados obtenidos y el proceso seguido para asegurar la mejor elección de conceptos y mejorar futuros procesos de selección.

Fase 2. Diseño a nivel sistema: La fase de diseño a nivel sistema incluye la definición de la arquitectura del producto y la descomposición del producto en subsistemas y componentes. Los planes iniciales para el sistema de producción y el esquema de ensamble final para el sistema de producción suelen definirse también durante esta fase. La salida de esta fase por lo general comprende un diseño geométrico del producto, una especificación funcional de cada uno de los subsistemas del producto y un diagrama de flujo preliminar del proceso para el ensamble final.

Las actividades de esta fase del diseño son:

- Definición de la Arquitectura del Producto: Establecer la estructura general del dispositivo, incluyendo los principales componentes y su interacción.

- Descomposición en Subsistemas: Desglosar el dispositivo en subsistemas y componentes específicos, definiendo sus funciones.
- Esquema Final de Ensamblaje: Definir el esquema final de ensamblaje del dispositivo.
- Entregable: Presentar la arquitectura del producto y las especificaciones funcionales.

Fase 3. Diseño de detalle Esta fase implica definir la arquitectura del producto y descomponerlo en subsistemas y componentes. También se establecen los planes iniciales para el sistema de producción y el esquema de ensamblaje final.

La salida de esta fase es la documentación de control del producto, la cual incluye dibujos y archivos digitales que detallan la geometría de cada pieza y su herramental de producción, especificaciones de las piezas compradas y los planes de proceso para la fabricación y ensamblaje del producto. Tres aspectos cruciales que se abordan durante todo el proceso de desarrollo del producto, pero que se finalizan en la fase de diseño de detalle, son: la selección de materiales, el costo de producción y el desempeño robusto del producto.

En resumen, las actividades a desarrollar durante esta fase son:

- Especificación de Partes y Materiales: Especificar completamente la geometría, materiales y tolerancias de todas las partes del producto, e identificar todas las partes estándar a ser adquiridas de proveedores.
- Documentación de Control del Producto: Crear los dibujos y archivos necesarios que describan la geometría de cada pieza y su herramental de producción.
- Entregable: Presentar la documentación detallada del diseño.

Fase 4. Pruebas y refinamiento: Esta fase comprende la construcción y evaluación de múltiples versiones de preproducción del producto. Los prototipos se construyen con piezas de producción y se prueban para asegurar que el diseño cumple con los requisitos. Los prototipos se construyen con piezas obtenidas de los procesos de producción y se prueban en condiciones reales para identificar cambios necesarios antes de la producción final.

Las actividades específicas de esta etapa son:

- Construcción de Prototipos: Desarrollar prototipos y probarlos para asegurar que el dispositivo funciona como se diseñó.
- Evaluación y Mejora: Probar los prototipos en condiciones reales y realizar los ajustes necesarios basados en el *feedback* recibido.
- Entregable: Presentar el prototipo funcional y la documentación de refinamiento.

Fase 5. Inicio de producción: En esta fase, el producto se fabrica utilizando el sistema de producción planeado. Se capacita al personal y se resuelven problemas de producción. Los productos iniciales se evalúan cuidadosamente para detectar fallos. La transición a la producción completa es gradual, y el producto se lanza al mercado cuando está listo para su distribución. Posteriormente, se realiza una revisión del proyecto para mejorar futuros procesos de desarrollo. En la Figura 14 se muestra un resumen esquemático del proceso de diseño presentado.

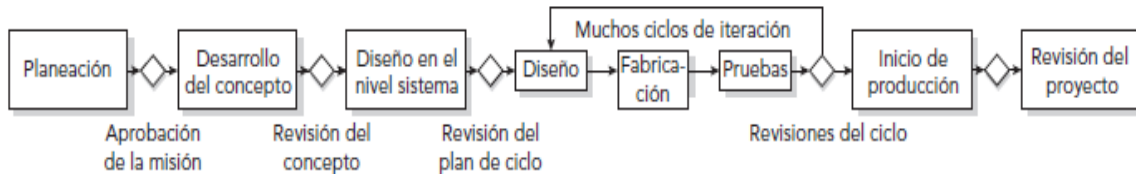


Figura 14: Proceso de desarrollo del producto en espiral. Tomado de [23]

Dado que la finalidad de este proyecto es presentar un prototipo, esta fase se modifica para incluir la elaboración del informe final, que será el entregable completo del proyecto. Las actividades a realizar en esta fase son:

- Evaluación Técnica y Económica: Análisis de la viabilidad técnica y económica del prototipo, destacando los costos de fabricación y el rendimiento esperado.
- Conclusiones y Recomendaciones: Reflexiones sobre el proceso de diseño y desarrollo, incluyendo recomendaciones para futuros trabajos y posibles mejoras del dispositivo.
- Documento del trabajo de grado
- Presentación final del proyecto

4.3 Fundamento técnicos de los materiales y dispositivos utilizados en el dispositivo.

4.3.1 Ruedas Mecanum

La rueda Mecanum es un tipo de rueda omnidireccional diseñada para vehículos terrestres, permitiéndoles moverse en cualquier dirección sin necesidad de girar sobre su propio eje. Su estructura se compone de rodillos de goma inclinados a 45° respecto al disco principal, lo que permite generar fuerzas de propulsión en distintas direcciones.

Cada rueda Mecanum funciona de manera independiente y no requiere un mecanismo de dirección tradicional. Su movimiento se basa en la combinación de las fuerzas generadas por cada rueda, dependiendo de su sentido de giro. Al girar, produce una fuerza de propulsión perpendicular al eje de los rodillos, la cual puede descomponerse en componentes longitudinales y transversales con respecto al vehículo. Si las ruedas de un lado giran en una dirección y las del otro lado en la opuesta, el vehículo experimenta una rotación estacionaria. Esto ocurre porque los vectores transversales se anulan, mientras que los vectores longitudinales se combinan para generar un torque alrededor del eje vertical central del vehículo.

El concepto original de las ruedas Mecanum fue desarrollado y patentado por Bengt Ilon en 1972 (Patente US3876255A). Actualmente, dicha patente se encuentra expirada, por lo que el principio de funcionamiento es de dominio público, permitiendo su libre implementación en aplicaciones de desarrollo tecnológico.

4.3.2 Impresión 3D por Deposición de Material Fundido (FDM/FFF)

El método más accesible de impresión 3D en la actualidad es el conocido como FDM (Modelado por Deposición Fundida) o FFF (Fabricación por Filamento Fundido). Este proceso consiste en la extrusión de un filamento termoplástico, el cual es alimentado desde

un carrete hacia un extrusor que lo calienta, funde y deposita capa por capa a través de una boquilla de pequeño diámetro.

La tecnología FDM presenta diversas ventajas. Entre ellas, destaca la asequibilidad tanto de las impresoras como de los materiales y del software requerido. Estas características han contribuido a su amplia adopción en ámbitos como la creación rápida de prototipos y la fabricación de piezas en bajo volumen. Adicionalmente, la naturaleza aditiva del proceso, junto con el uso de materiales de soporte solubles, permite la fabricación de piezas con geometrías complejas y cavidades internas.

No obstante, esta tecnología también presenta ciertas limitaciones. Las piezas fabricadas mediante FDM son anisotrópicas, es decir, presentan propiedades mecánicas desiguales según la dirección del esfuerzo aplicado. Además, las capas del material son generalmente visibles, lo que da lugar a superficies con acabados rugosos que pueden requerir procesos adicionales de posproducción.

Las impresoras 3D de tipo FDM son compatibles con una amplia gama de termoplásticos [26]. Los materiales más comúnmente utilizados son:

- PLA (Ácido Poliláctico): un polímero biodegradable, de bajo costo y fácil impresión, aunque con limitada resistencia mecánica y durabilidad.
- ABS (Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno): un material más resistente y duradero, aunque su impresión resulta más compleja debido a su mayor sensibilidad a la contracción y deformación térmica.
- PETG (Polietileno Tereftalato Glicol): un termoplástico versátil que combina buena resistencia mecánica, facilidad de impresión y buena adherencia entre capas.

4.3.3 Material del filamento

Los principales materiales utilizados en filamentos para impresión 3D por tecnología FDM son el PLA, el PETG y el ABS. A continuación, se describen cada uno de ellos, sus propiedades mecánicas y las recomendaciones para una impresión óptima.

PTEG (Polietileno Tereftalato Glicol)

El PETG es un copolímero termoplástico derivado del PET (polietileno tereftalato), modificado mediante la adición de glicol. Esta modificación mejora significativamente su resistencia al impacto y reduce la fragilidad del material, lo que lo convierte en una opción intermedia entre el PLA y el ABS en cuanto a desempeño y facilidad de impresión. Presenta una excelente adhesión a la cama. Además, admite altas velocidades de impresión sin comprometer significativamente la calidad ni la resolución, y no requiere temperaturas de impresión muy altas.

En términos de parámetros de impresión, el PETG se extruye generalmente a temperaturas comprendidas entre 220 °C y 260 °C. Se recomienda utilizar una cama calefactada con una temperatura de entre 75 °C y 90 °C para asegurar una correcta adhesión de la primera capa y minimizar el riesgo de deformaciones.

Aunque el PETG es ligeramente más exigente que el PLA en cuanto a configuración y control del proceso, sigue siendo considerado un material relativamente fácil de imprimir, PETG ofrece mayor resistencia, resistencia al impacto y resistencia térmica en comparación con el PLA, todo a un precio comparable. Ofrece una excelente combinación de resistencia mecánica, durabilidad, estabilidad térmica y resistencia química, lo que lo hace adecuado para piezas funcionales, prototipos y componentes sometidos a esfuerzos moderados en aplicaciones tanto interiores como exteriores[27][28].

El filamento PETG se caracteriza por su alta durabilidad y resistencia al impacto, lo que lo convierte en una opción adecuada para aplicaciones en exteriores expuestas a golpes o tensiones mecánicas. Además, presenta una notable flexibilidad, lo que le permite soportar variaciones térmicas sin deformarse ni agrietarse, manteniendo su integridad estructural en condiciones exigentes[29]. Otro aspecto favorable del PETG es su accesibilidad. Se trata de un material relativamente económico y fácil de adquirir, lo cual permite su uso en una amplia gama de proyectos sin incurrir en altos costos, especialmente en comparación con otros termoplásticos técnicos.

<i>Densidad</i>	1.27 g/cm ³
<i>Módulo elástico</i>	2 – 3 GPa
<i>Alargamiento a la rotura</i>	15%
<i>Límite elástico</i>	45-60 MPa
<i>Resistencia a la flexión</i>	80-100 MPa
<i>Resistencia a la tracción</i>	50 MPa
<i>Temperatura de transición vítrea</i>	77-85 °C
<i>Temperatura de fusión</i>	220-260 °C

Tabla 2: Propiedades mecánicas PETG.

Donde el PETG realmente destaca, especialmente en comparación con el PLA, es en cuanto a resistencia al calor. Este termoplástico tiene una temperatura de deflexión térmica (HDT) de hasta 70 °C, lo que lo hace resistente a temperaturas hasta 10 °C superiores a las del PLA. El PETG también tiene una temperatura de transición vítrea más alta (85 °C frente a 60 °C), lo que significa que puede soportar una mayor exposición al calor sin ablandarse ni fundirse. Por lo tanto, en cuanto a sus aplicaciones, el PETG es más adecuado para su uso en exteriores.

En cuanto a su resistencia a la radiación ultravioleta (UV), el PETG ofrece un desempeño aceptable. Aunque no es completamente inmune a la degradación por exposición solar prolongada, su resistencia a los rayos UV supera la del PLA y del ABS. No obstante, materiales como el ASA o el policarbonato presentan una resistencia UV superior; sin embargo, estos no son tan comunes en la impresión 3D por FDM debido a su mayor complejidad de impresión y requerimientos técnicos más exigentes.

Se recomienda que para imprimir PETG se tenga una temperatura en la boquilla entre 200-250 °C, calentar la cama a una temperatura mayor de 60°C y tener una velocidad de ventilador no mayor al 50%.

Por lo tanto, en condiciones normales y sin la aplicación de aditivos o recubrimientos especiales, el PETG representa la mejor opción entre los tres materiales analizados (PLA,

ABS y PETG) para aplicaciones en exteriores, gracias a su balance entre resistencia mecánica, durabilidad, comportamiento frente a los rayos UV y facilidad de impresión [30].

PLA (Ácido Poliláctico)

El PLA es un biopolímero termoplástico biodegradable que se obtiene a partir de materias primas renovables como el almidón de maíz, la caña de azúcar o la yuca. Gracias a sus propiedades, que en muchos casos igualan o superan a las de plásticos convencionales derivados del petróleo, el PLA se ha consolidado como uno de los materiales más empleados en impresión 3D, tanto en el ámbito doméstico como en aplicaciones industriales de pequeña y mediana escala. Con baja absorción de humedad y mínima contracción, presenta una deformación mínima y resultados fiables.

Una de sus principales ventajas radica en la facilidad de procesamiento. A diferencia de otros filamentos más exigentes, el PLA no requiere hardware especializado y puede imprimirse con boquillas estándar y a temperaturas relativamente bajas, generalmente entre 190 °C y 220 °C. Además, no necesita cama calefactada, lo cual lo convierte en una opción accesible para usuarios con diferentes niveles de experiencia. Presenta una baja contracción durante el enfriamiento y una mínima absorción de humedad, lo que contribuye a obtener impresiones dimensionalmente estables y con buena calidad superficial[31][32]. El PLA presenta una densidad aproximada de 1.24 g/cm³, un módulo elástico entre 3 y 4 GPa y un alargamiento a la rotura que oscila entre el 2 % y el 5 %. Su límite elástico se sitúa entre 45 y 65 MPa, con resistencias a la flexión de 80 a 100 MPa y a la tracción de 27 a 41 MPa. Además, su temperatura de transición vítrea se encuentra entre 60 y 70 °C, mientras que la de fusión varía entre 165 y 180 °C.

Desde el punto de vista mecánico, el PLA ofrece una resistencia a la tracción aproximada de 60 MPa y un módulo elástico de 3500 MPa, superando considerablemente al ABS en estos parámetros (30 MPa y 1400 MPa, respectivamente). Sin embargo, presenta una menor resistencia al impacto (2 kJ/m² frente a 35 kJ/m² del ABS), lo que lo hace más frágil ante esfuerzos dinámicos o repentinos.

En aplicaciones exteriores, el PLA muestra una limitada resistencia a la radiación ultravioleta (UV), lo que puede provocar degradación estructural con el tiempo. Para mitigar este efecto y extender su vida útil en ambientes al aire libre, se recomienda el uso de recubrimientos protectores o pinturas con filtro UV que ayuden a conservar sus propiedades mecánicas y prevenir el agrietamiento o deformación del material[33].

ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)

El ABS es un termoplástico de origen petroquímico, compuesto por tres monómeros: acrilonitrilo, butadieno y estireno. Esta combinación le otorga una serie de propiedades de interés ingenieril, que lo convierten en un material ampliamente utilizado en aplicaciones técnicas y estructurales. Las características del ABS varían en función de la proporción de sus componentes. El acrilonitrilo contribuye con rigidez, dureza, resistencia química y estabilidad térmica. El butadieno proporciona una alta resistencia al impacto y mejora la

tenacidad del material. Por su parte, el estireno aporta resistencia mecánica, brillo superficial y facilidad de procesamiento.

Gracias a esta sinergia entre componentes, el ABS destaca por ofrecer una buena resistencia mecánica, una notable capacidad de absorción de impactos, y una densidad relativamente baja, lo que lo convierte en un material liviano y eficiente para diversas aplicaciones, incluyendo la impresión 3D, la fabricación de componentes automotrices, carcasas de productos electrónicos y piezas funcionales que requieren durabilidad y precisión dimensional. En cuanto a sus propiedades físicas, el ABS presenta una densidad cercana a 1.24 g/cm^3 , un módulo elástico que varía entre 1.1 y 2.9 GPa y un alargamiento a la rotura de aproximadamente 2 % a 5 %. Su límite elástico se sitúa entre 30 y 45 MPa, con resistencias a la flexión de 47 a 76 MPa y a la tracción de 27 a 55 MPa. Además, posee una temperatura de transición vítrea entre 88°C y 118°C y una temperatura de fusión que oscila entre 200°C y 245°C .

En impresión 3D, el ABS requiere condiciones específicas de trabajo para garantizar una buena adhesión entre capas y evitar deformaciones. Se imprime generalmente a temperaturas que oscilan entre 220°C y 260°C , y necesita una cama calefactada con temperaturas entre 100°C y 110°C . Además, durante el proceso de extrusión, el ABS emite vapores potencialmente tóxicos, por lo que se recomienda trabajar en espacios bien ventilados o emplear sistemas de extracción de gases para garantizar la seguridad del usuario[34].

4.3.4 Influencia de los parámetros de impresión en las propiedades mecánicas de piezas 3D

Las piezas obtenidas mediante impresión 3D presentan un comportamiento anisotrópico, es decir, sus propiedades mecánicas varían según la orientación de las capas y del patrón de impresión. Esta característica implica que la resistencia de la pieza no es uniforme en todas las direcciones, lo cual debe ser considerado en el diseño y análisis estructural de componentes fabricados. Entre los factores de impresión que más influyen en el desempeño mecánico se encuentran el espesor de capa, la porosidad interna y el patrón de deposición del filamento. Estudios realizados en [35] evidencian que la porosidad tiene un efecto significativo sobre el módulo de elasticidad, mientras que el espesor de capa influye directamente en el esfuerzo último a la tracción en estructuras porosas. En general, una menor porosidad y un mayor espesor de capa mejoran la resistencia del material impreso.

En la obtención de mejores propiedades mecánicas en piezas impresas en 3D, el espesor de capa es uno de los parámetros más relevantes. Se recomienda trabajar con espesores entre 0.1 y 0.2 mm, ya que un espesor mayor puede aumentar la resistencia a la tracción, aunque también reduce la velocidad de impresión [36].

Para obtener mejores propiedades mecánicas se recomiendan espesores de capa entre 0.1 y 0.2 mm, además de porcentajes de relleno elevados. La temperatura de extrusión también es determinante: valores bajos reducen la adherencia entre capas e incrementan la porosidad, mientras que temperaturas más altas favorecen la fusión del material y aumentan la resistencia [37]. La velocidad de impresión depende del material; para PLA velocidades más

altas pueden mejorar la resistencia, mientras que en PETG velocidades menores favorecen una mejor unión entre capas. El patrón de relleno también influye, destacándose para PETG el patrón tipo *honeycomb* con un 75% de *infill* como una de las configuraciones más resistentes [38].

4.4 Niveles de maduración tecnológica (TRL)

El sistema Technology Readiness Levels (TRL), desarrollado por la NASA en los años setenta, surgió como una herramienta para evaluar el grado de madurez de una tecnología y reducir riesgos antes de su implementación operativa. Con el tiempo, fue adoptado por múltiples sectores hasta convertirse en un estándar internacional para la gestión de la innovación.

El TRL clasifica la madurez tecnológica en nueve niveles que van desde la identificación de principios científicos (TRL 1), la validación inicial del concepto (TRL 2–3) y las pruebas en laboratorio o entornos controlados (TRL 4–5), hasta el desarrollo de prototipos funcionales (TRL 6) y la demostración, calificación y operación en condiciones reales (TRL 7–9) [39]. Esta clasificación permite a los equipos de desarrollo establecer de manera clara en qué etapa se encuentra su tecnología, planificar las acciones necesarias para su maduración y comunicar de forma estandarizada el nivel de avance alcanzado.

5. METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos planteados, se siguió la metodología descrita en el libro "Diseño y desarrollo de producto" de Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger [23]. Esta metodología proporciona una estructura sistemática para asegurar que todos los aspectos importantes del diseño sean considerados y abordados adecuadamente.

La aplicación de esta metodología permitió articular de manera progresiva el análisis del problema, la definición de los requerimientos, el desarrollo del diseño y la validación del prototipo, asegurando la coherencia entre las actividades realizadas y los objetivos específicos del proyecto.

Fase 1: Desarrollo del Concepto

Durante la fase de desarrollo del concepto se realizaron las siguientes actividades:

- **Identificación de necesidades del cliente:** Se identificaron las necesidades del mercado objetivo mediante una revisión bibliográfica sobre las características morfológicas de las palmeras (altura, diámetro del tronco y distribución geográfica). Además, se recopilaban datos morfológicos y geográficos mediante visitas de campo en localidades cercanas a Cali, documentando los accesos a las plantaciones, los métodos de cosecha y los riesgos asociados. A partir de esta información se identificaron los parámetros clave que influirían en el diseño del dispositivo de cosecha de cocos. Idealmente, esta etapa habría debido realizarse dentro de las comunidades productoras de coco; sin embargo, no fue posible debido a limitaciones en la disponibilidad de recursos para desplazamientos y a restricciones de orden público.
- **Generación y evaluación de conceptos:** Se elaboraron múltiples conceptos de diseño que describieron la forma, la función y las características del dispositivo. Estos conceptos se evaluaron en términos de viabilidad técnica y eficiencia mediante el método de filtrado de conceptos de Pugh.
- **Selección del concepto:** Se seleccionó el concepto más prometedor con base en criterios de viabilidad técnica.

Entregable: Conceptualización del diseño. Como producto de esta fase se elaboró la documentación que presenta el concepto de diseño seleccionado y su justificación económica, junto con un informe exhaustivo que incluye el diseño conceptual definitivo del dispositivo mecánico, un análisis de su viabilidad técnica y una descripción detallada del proceso de diseño.

Relación con los objetivos: Esta fase contribuye principalmente al análisis del problema de cosecha y a la identificación de parámetros clave de diseño, en correspondencia con los Objetivos Específicos 1 y 2.

Fase 2: Diseño a Nivel de Sistema

Durante la fase 2 del diseño se realizó una descripción del dispositivo y su funcionamiento, así como un análisis de su viabilidad técnica en cuanto a los materiales, tecnología y espacios disponibles para el diseño y fabricación de un prototipo. Se desarrolló la estructura general del dispositivo, estableciendo la arquitectura del sistema y su descomposición en

subconjuntos funcionales. Para cada subconjunto se definieron su función específica, su principio de funcionamiento y su interacción con los demás componentes, garantizando la coherencia operativa del sistema completo.

Mediante el uso de software CAD, se elaboró el modelo tridimensional del dispositivo, definiendo el ensamblaje final y la configuración estructural de cada subconjunto. Este proceso permitió verificar la compatibilidad geométrica, las condiciones de acople y la factibilidad constructiva del diseño.

Entregable: Arquitectura del producto, descomposición en subsistemas, especificaciones de funcionamiento y modelo CAD.

Relación con los objetivos: Esta fase aporta al desarrollo del diseño conceptual y a la definición funcional del dispositivo, en concordancia con el Objetivo Específico 3.

Fase 3: Diseño de Detalle

En esta fase del diseño se especificaron los materiales empleados en cada uno de los componentes del sistema. Asimismo, se definió cuáles partes serían adquiridas a proveedores y cuáles serían fabricadas, teniendo en cuenta criterios de costo, disponibilidad y compatibilidad técnica. Finalmente, se elaboraron los planos de diseño detallados de todas las piezas a fabricar, con sus respectivas dimensiones. Durante esta etapa también se realizaron los cálculos correspondientes a la potencia requerida y a las fuerzas internas y externas que actúan en las distintas fases de operación del prototipo. Se desarrolló el diseño de detalle de componentes críticos, como los resortes, los elementos estructurales y los mecanismos de transmisión.

Una vez identificadas todas las fuerzas y reacciones en el análisis estático, se realizó una simulación estructural mediante elementos finitos en el software Autodesk Inventor, con el objetivo de determinar los esfuerzos y deformaciones en los principales subsistemas: la estructura de corte, el soporte de las ruedas y la estructura principal del dispositivo. Las reacciones obtenidas del análisis estático se utilizaron directamente como condiciones de carga en el modelo numérico, garantizando la coherencia entre ambos estudios y permitiendo validar la resistencia mecánica y la estabilidad estructural del diseño.

Entregable: Documentación detallada del diseño. Planos, selección de materiales, cálculos estructurales y simulaciones.

Relación con los objetivos: Esta fase profundiza el desarrollo técnico del dispositivo y su viabilidad mecánica, apoyando directamente el cumplimiento del Objetivo Específico 3.

Fase 4: Pruebas y Refinamiento

En la última fase del diseño se procedió a la fabricación y ensamblaje del prototipo, siguiendo los planos y especificaciones técnicas definidas en las etapas anteriores. Una vez construido, se realizaron las pruebas experimentales necesarias para verificar el funcionamiento del dispositivo conforme a los criterios establecidos durante el proceso de diseño y simulación. El prototipo fue evaluado en condiciones de operación simuladas, replicando los escenarios

previstos de trabajo para analizar su desempeño mecánico, eficiencia de corte, estabilidad y facilidad de uso.

De acuerdo con la clasificación establecida para los Niveles de Madurez Tecnológica (TRL), el prototipo fabricado corresponde a un prototipo conceptual TRL 3, ya que se ha validado el principio de funcionamiento del sistema mediante modelado, simulación y pruebas experimentales básicas. Sin embargo, todo el proceso de diseño estuvo orientado hacia la concepción de un prototipo funcional TRL 5, que integra de manera coherente todos los subsistemas del dispositivo y cuya validación en un entorno relevante permitiría avanzar hacia la implementación práctica del sistema. La metodología de diseño aplicada durante el desarrollo del proyecto tiene un enfoque iterativo, en el cual las fases de diseño, fabricación y prueba de prototipos se desarrollaron de manera complementaria y retroalimentada, en lugar de seguir una secuencia lineal. Esta dinámica permitió refinar progresivamente el dispositivo, ajustando sus aspectos estructurales, funcionales y de manufactura con base en los resultados obtenidos en cada ciclo.

Gracias a este enfoque, se logró una evolución controlada y fundamentada del prototipo, pasando de configuraciones iniciales de validación conceptual a un modelo funcional validado técnica y experimentalmente. Por lo tanto, los resultados presentados en este documento corresponden a los productos finales de las distintas fases de iteración.

Entregable: Prototipo conceptual fabricado y resultados de pruebas experimentales.

Relación con los objetivos: Esta fase permite validar el funcionamiento del dispositivo mediante pruebas controladas, en cumplimiento del Objetivo Específico 4.

6. RESULTADOS

En esta sección se presentan los pasos seguidos y los resultados obtenidos en cada una de las fases del proceso de diseño descritas en la metodología, desde la generación y selección de conceptos hasta la obtención del concepto final desarrollado. Se incluye la descripción de la arquitectura y el funcionamiento del dispositivo, así como las verificaciones teóricas y experimentales realizadas para evaluar su funcionalidad y resistencia estructural. Estas comprobaciones se llevaron a cabo mediante análisis estáticos y elementos finitos, así como la fabricación de un prototipo conceptual, lo que permitió validar el cumplimiento de los objetivos.

6.1 Fase 1: Desarrollo del concepto

Durante esta fase se establecieron las bases del diseño del dispositivo, iniciando con la identificación de las necesidades funcionales que debía satisfacer. A partir de estas necesidades se generaron diversas alternativas conceptuales, las cuales fueron evaluadas y seleccionadas según su grado de cumplimiento frente a los requerimientos definidos. Los conceptos seleccionados se desarrollaron en mayor profundidad en las fases posteriores de la metodología de diseño.

Además de las consideraciones técnicas, se tuvieron en cuenta factores legales y socioculturales que condicionan el desarrollo del dispositivo. En el contexto colombiano, no existen restricciones legales que limiten su implementación, dado que no se infringen derechos de propiedad intelectual ni normativas relacionadas con seguridad o medio ambiente. Sin embargo, desde el punto de vista cultural, se reconoció la importancia de preservar las prácticas tradicionales de recolección de coco, en particular el uso de la “marota”, herramienta empleada por comunidades locales desde hace generaciones.

Por tal motivo, el diseño del dispositivo no busca sustituir por completo la recolección manual, sino complementarla, ofreciendo una solución técnica dirigida específicamente a las palmeras de gran altura, donde la labor manual representa riesgos de seguridad y baja eficiencia operativa. De este modo, el desarrollo del prototipo responde no solo a una necesidad técnica, sino también a un compromiso con la seguridad, la productividad y el respeto por las prácticas culturales locales.

6.1.1 Identificación de las necesidades y definición de requisitos de diseño.

Para establecer los requisitos del dispositivo de recolección de cocos en palmeras de gran altura, se identificaron las características funcionales y de desempeño más relevantes con base en las condiciones del entorno, las necesidades del usuario final y los hallazgos obtenidos en el análisis del estado del arte.

En el presente proyecto, dichas necesidades se formulan directamente como requerimientos de diseño, entendidos como condiciones técnicas, funcionales y operativas que el equipo debe cumplir para responder de manera efectiva al problema planteado y que pueden ser evaluadas de forma objetiva. Estos requerimientos se derivan principalmente del Objetivo Específico 1, el cual plantea la identificación y análisis de los parámetros clave del problema

de cosecha en palmeras de gran altura, mientras que su verificación y validación se abordan a través del desarrollo del diseño y la evaluación del prototipo funcional, en concordancia con los Objetivos Específicos 3 y 4.

Los requisitos se agrupan en cinco categorías principales: estructurales y geométricos, movimiento y operación, energía, control y usabilidad, y mantenimiento y fabricación. La Tabla 3 presenta la matriz de requisitos de diseño, donde cada requisito se define mediante un identificador, un parámetro medible y un valor objetivo. Esta matriz constituye la base para el desarrollo del diseño conceptual y de detalle, así como para la posterior matriz de cumplimiento presentada en la sección correspondiente.

ID	Categoría	Requisito	Parámetro medible	Valor objetivo
R-01	Estructural y geométrico	Peso	Masa total del equipo	≤ 12 kg
R-02		Adaptabilidad geométrica	Diámetro del tronco	10 – 40 cm
R-03		Altura operativa	Altura máxima de trabajo	≥ 17 m
R-04		Resistencia ambiental	Operación sin falla visible	Exposición a humedad y radiación
R-05	Movimiento y operación	Movimiento (Subir, bajar, rotar, parar)	Funciones ascenso, descenso, rotación	Operación estable y controlada
R-06		Operación remota	Distancia mínima de control	≥ 3 m desde la base
R-07		Precisión de corte	Orientación y estabilidad del sistema de corte	Ángulo ajustable respecto al eje del tronco
R-08		Seguridad de operación	Comportamiento ante fallas	Detención segura del sistema
R-09		Seguridad del operador	Posición del operador durante la operación	Operación completa desde el suelo
R-10	Energía	Autonomía energética	Tiempo de operación continua	Operación continua durante al menos un ciclo completo de cosecha
R-11		Tipo de alimentación	Disponibilidad comercial	Baterías portátiles recargables e intercambiables, disponibles comercialmente
R-12	Control y usabilidad	Sistema de control centralizado	Gestión integrada de funciones	Control del sistema mediante un único microcontrolador
R-13		Facilidad de uso	Números de acciones de control	≤ 5 acciones principales
R-14	Mantenimiento y fabricación	Mantenimiento	Tiempo de reemplazo de componentes críticos	≤ 15 min
R-15		Componentes comerciales	Disponibilidad de repuestos	Componentes estándar de mercado
R-16		Costo de fabricación	Costo estimado del prototipo	≤ 2 SMMLV

Tabla 3: Matriz de requerimientos.

Si bien todos los requisitos definidos son verificables de manera objetiva, algunos de ellos implican decisiones de diseño que afectan directamente la viabilidad técnica y económica del sistema, por lo que se presentan a continuación sus criterios de justificación.

En particular, el peso máximo del dispositivo se estableció de 12 kg, permitiendo su transporte, instalación y operación por un solo trabajador sin necesidad de equipos auxiliares. Este límite se establece considerando que un incremento en el peso implicaría el uso de motores de mayor potencia, lo cual aumentaría el consumo energético, el tamaño de los componentes y la complejidad del sistema, además de dificultar su desplazamiento y manipulación en el campo. De manera complementaria, el costo estimado de fabricación del dispositivo no deberá superar el equivalente a dos salarios mínimos legales mensuales vigentes (SMMLV) en Colombia, considerando materiales y componentes principales. Este límite se establece de modo que el costo del sistema sea comparable al ingreso mensual promedio del trabajador agrícola dedicado a la cosecha de coco, garantizando que la inversión no represente una barrera significativa para su adopción.

Definición de una palmera matriz

Con el propósito de establecer un modelo de referencia para el dimensionamiento, análisis y validación del dispositivo de recolección de cocos, se definió una palmera matriz que representa las condiciones típicas de palmeras de coco en etapa productiva madura dentro de plantaciones del Pacífico colombiano. Esta palmera matriz no corresponde a un individuo específico, sino a un modelo teórico de diseño, construido a partir de rangos dimensionales reportados en la literatura técnica y agronómica sobre el cultivo del coco.

De acuerdo con dichas fuentes, las palmeras de coco tipo alto cultivadas en regiones tropicales pueden alcanzar alturas comprendidas entre 10 y 25 m, con diámetros de tronco del orden de 20 a 40 cm. Con base en estos rangos, y con el fin de definir un escenario conservador para el diseño, se adoptó una palmera matriz con una altura total de 20 m, ubicación del fruto a 17 m, diámetro promedio del tronco de 30 cm y una conicidad aproximada de 5 mm/m. Estas dimensiones fueron empleadas como referencia para el análisis estructural y el dimensionamiento de mecanismos[3] [1] [40].



Figura 15: Palmera de referencia, campus de Meléndez- Universidad del Valle.

Ante la imposibilidad de contar con acceso permanente a una plantación productiva para la realización de ensayos experimentales, se recurrió al uso de palmeras de coco ubicadas en el campus de la Universidad del Valle como entorno de pruebas preliminares. En este entorno se identificaron varias palmeras con diferentes alturas, diámetros e inclinaciones, las cuales fueron utilizadas como referencias geométricas complementarias durante las fases iniciales del desarrollo del dispositivo.

La palmera principal utilizada en el campus presenta una altura aproximada de 10 m y un diámetro de tronco de 22 cm, con un fuste mayormente cilíndrico y una curvatura más pronunciada en la zona cercana al fruto. Esta palmera permitió realizar pruebas iniciales de funcionamiento, ajuste de mecanismos y validación funcional del prototipo, especialmente en lo relacionado con la capacidad del dispositivo para adaptarse a variaciones de diámetro e inclinación del tronco, contribuyendo al refinamiento del diseño.

6.1.2 Definición del dispositivo macro

Como siguiente paso dentro de la fase de desarrollo del concepto, y con base en los requerimientos de diseño definidos en la sección anterior, se procedió a la definición del tipo de dispositivo a nivel macro. Esta etapa tuvo como objetivo establecer la arquitectura general del sistema, identificando el enfoque técnico que permitiera cumplir de manera integral con los requisitos estructurales, operativos, energéticos y de seguridad previamente establecidos.

La selección del concepto macro resulta determinante, ya que condiciona las funcionalidades principales del dispositivo, el tipo de tecnologías a emplear y el desarrollo posterior del proyecto. En este sentido, se evaluaron distintas alternativas de dispositivo mediante el análisis comparativo de sus ventajas y desventajas, considerando su grado de cumplimiento frente a los requerimientos de diseño y a los objetivos del proyecto.

Como resultado de este análisis, se seleccionó un dispositivo trepador acoplado al tronco de la palmera, capaz de ascender de forma controlada hasta la zona de los frutos. Este dispositivo se fija al tronco generando la fricción necesaria para soportar su propio peso y los esfuerzos asociados al proceso de corte. Una vez posicionado frente al racimo, acciona un mecanismo de corte que separa los cocos del tallo, mientras todo el proceso es controlado de forma remota desde el suelo, garantizando la seguridad del operario.

La elección de este tipo de dispositivo se justifica por su capacidad para integrar herramientas de corte de mayor potencia y baterías de alta capacidad, así como por la estabilidad que ofrece al mantenerse sujeto al tronco durante la operación. Adicionalmente, su configuración permite adaptarse a diferentes diámetros e inclinaciones del tronco, en concordancia con los requerimientos geométricos y operativos definidos. No obstante, este enfoque implica desafíos asociados a la calibración del sistema de sujeción para evitar daños en la corteza de la palmera y al posible incremento del peso total del dispositivo, lo cual demanda una adecuada selección de los sistemas de tracción y potencia.

6.1.3 Desarrollo de conceptos

Una vez definido el concepto del dispositivo a nivel macro, se procedió al desarrollo de los conceptos funcionales, con el objetivo de traducir los requerimientos de diseño y la arquitectura general del sistema en soluciones técnicas concretas. Para ello, se identificaron y definieron las funciones principales que el dispositivo debe cumplir durante su operación, las cuales constituyen la base para la estructuración del proceso de diseño conceptual.

Estas funciones se derivan directamente de los requerimientos de movimiento, operación, seguridad y desempeño establecidos previamente, y permiten descomponer el sistema en subsistemas funcionales independientes. Esta descomposición facilita la exploración sistemática de distintos principios de solución y la comparación objetiva de alternativas técnicas.

- Elevación: permite el ascenso estable y controlado del dispositivo a lo largo del tronco de la palmera, garantizando adherencia, equilibrio y adaptación a variaciones de diámetro e inclinación.
- Posicionamiento: corresponde a la capacidad del dispositivo para orientarse y ajustarse con precisión en la zona del fruto, asegurando una ubicación adecuada del mecanismo de corte y minimizando movimientos no deseados durante la operación.
- Corte: consiste en un proceso mecánico confiable y repetible, capaz de separar el fruto o el racimo, considerando las propiedades mecánicas del pedúnculo y las limitaciones energéticas del sistema.

Cada una de estas funciones fue abordada como un subsistema independiente, para el cual se generaron distintos principios de solución. Estos principios orientaron de manera sistemática el proceso de generación, evaluación y selección de los conceptos más viables para el desarrollo del dispositivo.

A continuación, se presentan los conceptos desarrollados para cada una de las funciones principales, así como la selección de las alternativas más adecuadas. La evaluación de los conceptos se realizó mediante una matriz de selección, considerando criterios como facilidad de implementación, facilidad de instalación y uso, mantenimiento, costos asociados y eficiencia energética, además de criterios específicos definidos para cada funcionalidad.

1. Generación de conceptos para la estructura principal

En la generación de conceptos para la estructura principal del dispositivo se establecieron criterios estructurales y funcionales derivados directamente de los requerimientos de diseño y de las funciones principales definidas en la fase conceptual. La estructura constituye el elemento base del sistema, ya que debe garantizar la integridad mecánica del dispositivo y permitir la incorporación de los diferentes subsistemas funcionales necesarios para la operación, tales como los sistemas de desplazamiento, posicionamiento y corte.

Desde el punto de vista funcional, la estructura debe asegurar una correcta interacción con el tronco de la palmera, permitiendo el ajuste adecuado de los elementos de contacto encargados de la tracción y la estabilidad. Esto resulta fundamental para garantizar un desplazamiento

vertical controlado y un posicionamiento preciso durante la operación, en concordancia con los requerimientos de seguridad y operación definidos previamente. En términos estructurales, uno de los criterios principales fue la minimización del peso del marco, sin comprometer la resistencia mecánica. Adicionalmente, la estructura debía facilitar el montaje y desmontaje del dispositivo, con el fin de mejorar la transportabilidad, el mantenimiento y la adaptación a diferentes condiciones de operación en campo.

Con base en estos criterios, se plantearon distintos conceptos de estructura principal, los cuales se describen a continuación.

- Forma cilíndrica

En este concepto, la estructura presenta una geometría cilíndrica, la cual permite una distribución simétrica de los puntos de contacto con el tronco de la palmera. Esta configuración favorece una interacción uniforme con la superficie del tronco, contribuyendo a la estabilidad del dispositivo durante el desplazamiento vertical y el posicionamiento angular.

La estructura se plantea en un material polimérico, con la posibilidad de fabricación mediante impresión 3D. Esta alternativa ofrece ventajas como un bajo peso, lo que contribuye al cumplimiento del requerimiento de masa total del dispositivo, así como una reducción de costos y una alta resistencia a la corrosión, característica favorable para ambientes tropicales con alta humedad y exposición solar. No obstante, este tipo de materiales presenta limitaciones en términos de resistencia mecánica en comparación con estructuras metálicas. La posibilidad de deformaciones bajo cargas elevadas, una menor rigidez estructural y una durabilidad reducida frente a impactos representan desventajas que deben ser consideradas en la evaluación del concepto.

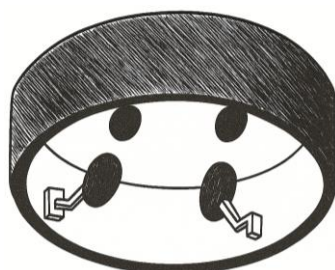
- Forma Poligonal (varias formas posibles) (Barras)

Este concepto propone una estructura de geometría poligonal, conformada por un conjunto de barras, empleando un material metálico de baja densidad, como el aluminio. Esta configuración permite obtener una estructura rígida y resistente, con una buena relación entre peso y capacidad de carga, adecuada para soportar los esfuerzos mecánicos generados durante la operación del dispositivo. El uso de aluminio contribuye a mantener un peso relativamente bajo, facilitando el desplazamiento del sistema y reduciendo la demanda energética asociada al movimiento. Sin embargo, esta alternativa presenta desventajas relacionadas con un mayor costo del material y una mayor complejidad en los procesos de fabricación, en comparación con soluciones basadas en materiales poliméricos y técnicas de manufactura aditiva.

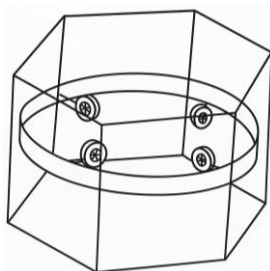
• Matriz de selección

Para la selección del concepto de estructura principal se empleó una matriz de selección tipo Pugh, la cual permite comparar alternativas de diseño de manera cualitativa y sistemática frente a un conjunto de criterios previamente definidos. En este método, uno de los conceptos se establece como referencia, y los demás conceptos se evalúan comparativamente frente a este, criterio por criterio.

La evaluación se realiza asignando un valor positivo (+) cuando el concepto evaluado presenta un mejor desempeño que el concepto de referencia para un criterio determinado, un valor negativo (−) cuando su desempeño es inferior, y un valor neutro (0) cuando ambos conceptos presentan un desempeño equivalente. Este procedimiento permite identificar de forma estructurada las fortalezas y debilidades relativas de cada alternativa de diseño.



a). Forma cilíndrica



b). Forma poligonal

Figura 16: Conceptos generados para la estructura principal.

Criterios de selección	Conceptos	
	A Forma cilíndrica (Referencia)	B Forma poligonal
Peso	0	-
Facilidad de fabricación	0	-
Resistencia estructural	0	+
Costo	0	-
Facilidad de montaje	0	0
Mantenimiento	0	+
Suma +	0	2
Suma 0	6	1
Suma -	0	3
Evaluación neta	0	-1
Lugar	1	2
¿Continuar?	si	No

Tabla 4: Matriz de selección de Pugh para la estructura principal.

Los conceptos estructurales propuestos fueron evaluados mediante una matriz de selección, considerando criterios directamente asociados a los requerimientos del sistema, tales como: peso total, resistencia estructural, facilidad de fabricación, costos de materiales y procesos, y requerimientos de mantenimiento. A partir del análisis de la matriz de selección presentada en la Tabla 4, se concluye que la estructura de forma cilíndrica es la opción más adecuada para la estructura principal del dispositivo. Según los resultados, este concepto presenta un mejor desempeño en criterios clave como peso, facilidad de fabricación y costo, los cuales son determinantes para el cumplimiento de los objetivos del proyecto. Aunque la estructura poligonal muestra ventajas en términos de resistencia estructural y mantenimiento, estas no compensan las desventajas asociadas a un mayor peso y complejidad constructiva. En consecuencia, la estructura cilíndrica se selecciona por ofrecer el mejor balance global entre desempeño y viabilidad del diseño. Para permitir el montaje y desmontaje de la estructura en el tronco de la palmera, la forma cilíndrica debe dividirse en dos partes. En consecuencia, es necesario implementar un sistema de acople que asegure el cierre de la estructura alrededor del tronco.

2. Conceptos para la elevación (tracción) (independientemente de la forma de la estructura)

El objetivo del dispositivo es ascender por el tronco de la palmera, garantizando la capacidad suficiente para elevar la estructura que integra todos los componentes necesarios en el proceso de recolección del fruto.

- Elevación por ruedas

El funcionamiento de este concepto se basa en un conjunto de ruedas accionadas por motores, cuyo propósito es ascender por el tronco de la palmera una estructura que incorpora todos los elementos necesarios para llevar a cabo la recolección del fruto. Como se muestra en la Figura 17a. Las ruedas normales presentan ventajas como su simplicidad de instalación y mantenimiento, la capacidad de ofrecer un movimiento suave y rápido en superficies regulares, un menor daño al tronco al no incrustarse en la corteza y la posibilidad de permitir tanto el desplazamiento vertical como la rotación alrededor de la palmera. Sin embargo, también tienen desventajas: su bajo agarre en superficies irregulares como el tronco de una palmera puede generar deslizamientos y pérdida de tracción, y en palmeras muy altas pueden comprometer la estabilidad del dispositivo al no proporcionar un soporte suficiente.

- Elevación por ruedas con picos

El principio de funcionamiento de este concepto es similar al anterior; sin embargo, en este caso las ruedas incorporan picos que se incrustan en el tronco (Figura 17b), lo que permite incrementar la fricción y mejorar la sujeción durante el movimiento de ascenso. Las ruedas con picos ofrecen un mejor agarre sobre la superficie irregular de la palmera, evitando resbalones y proporcionando una tracción más firme que mejora la estabilidad durante el ascenso. No obstante, presentan desventajas importantes: al clavarse en la corteza pueden causar daños que afecten la salud de la palmera y, además, los picos tienden a desgastarse con el uso, por lo que requieren un mantenimiento más frecuente.

- Garfios con barras telescópicas

El funcionamiento de este concepto se basa en la integración de garfios pivotados a la estructura del dispositivo, diseñados para clavarse de forma alternada en el tronco de la palmera. Estos garfios serían retráctiles, operando de manera que, al extenderse al máximo, se fijan al tronco, y al contraerse, generan un movimiento ascendente que permite que la estructura se desplace hacia arriba. Este mecanismo asegura una tracción eficiente y un avance progresivo, aprovechando la alternancia en la acción de los garfios para mantener la estabilidad durante el proceso de elevación. El uso de garfios y un sistema de barras telescópicas ofrece ventajas como un agarre fuerte y seguro al clavarse en la corteza, una elevación por etapas que proporciona un ascenso estable y controlado, y una buena adaptabilidad a distintos diámetros de tronco. Sin embargo, este mecanismo presenta desventajas: su mayor complejidad mecánica exige precisión en el diseño, los garfios pueden desgastarse con el uso, y el constante clavado en la corteza puede dañar la palmera con el tiempo. El esquema de este concepto se presenta en Figura 17c.

- Orugas

El uso de orugas busca un funcionamiento similar al de las ruedas como se muestra en la Figura 17d, pero incorporando las ventajas que esta tecnología ofrece en términos de tracción y estabilidad. Las orugas ofrecen una mayor superficie de contacto que distribuye mejor el peso del dispositivo y, junto con sus relieves, generan una tracción superior que proporciona un agarre más firme, además de adaptarse con facilidad a distintos diámetros de tronco. Sin embargo, este sistema implica una mayor complejidad y costo de diseño, y sus bandas pueden

desgastarse con rapidez por el contacto continuo con superficies rugosas, incrementando las necesidades de mantenimiento.

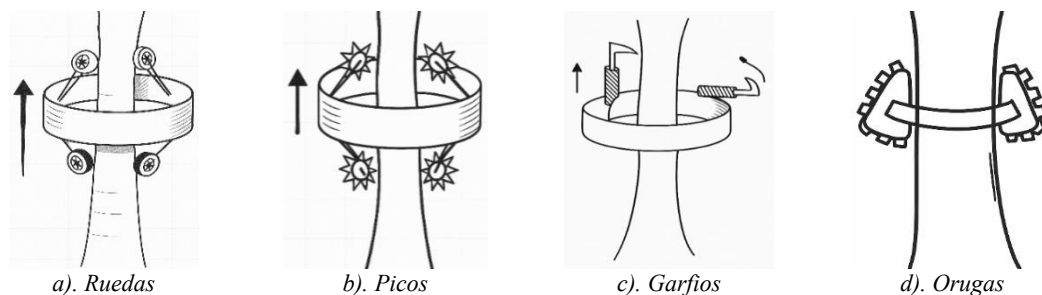


Figura 17: Conceptos generados para la elevación .

- Matriz de selección

Para el método de elevación, los criterios de evaluación considerados fueron: la facilidad de diseño e instalación, los requerimientos de mantenimiento, el nivel de agarre (fricción) generado por el sistema sobre el tronco (criterio fundamental, dado que el objetivo es elevar la estructura a lo largo de la palmera), la durabilidad de los componentes del sistema y el grado de impacto que el funcionamiento del dispositivo pueda ocasionar en la palmera.

Criterios de selección	Conceptos			
	A	B	C	D
	Ruedas	Ruedas con picos	Garfios (Referencia)	Oruga
Diseño	+	+	0	+
Facilidad de instalación	+	+	0	-
Mantenimiento	+	+	0	0
Agarre	-	0	0	+
Durabilidad	+	-	0	-
Afectación a la palmera	+	0	0	+
Suma +	5	3	0	3
Suma 0	0	2	6	1
Suma -	1	1	0	2
Evaluación neta	4	2	0	1
Lugar	1	2	4	3
¿Continuar?	Si	No	No	No

Tabla 5: Matriz de selección de Pugh para el sistema de tracción.

Una vez evaluados los conceptos mediante la matriz de selección de Pugh presentada en l Tabla 5 se concluye que el sistema de elevación por ruedas es la alternativa más adecuada para el desplazamiento vertical del dispositivo. Este concepto presenta el mejor desempeño global, destacándose en criterios como facilidad de diseño, facilidad de instalación, mantenimiento y durabilidad, los cuales resultan prioritarios para garantizar la viabilidad y simplicidad del sistema.

3. Conceptos para el posicionamiento (independientemente de la forma de la estructura)

Los conceptos desarrollados a continuación deben asegurar que el dispositivo se mantenga en una posición óptima sobre el tronco de la palmera, permitiendo realizar el proceso de recolección de manera eficiente y segura.

- Ruedas Mecanum (movimiento vertical y rotación alrededor del tronco)

Este concepto propone que, mediante un conjunto de ruedas, el dispositivo no solo pueda ascender por el tronco de la palmera, sino también rotar alrededor de él, con el fin de alcanzar la posición óptima para llevar a cabo la recolección. Este sistema permite combinar el desplazamiento vertical con la rotación alrededor del tronco, ofreciendo una gran flexibilidad para posicionar el dispositivo y acceder rápidamente a diferentes áreas sin necesidad de bajarlo o realizar ajustes complejos. Esto mejora la eficiencia al facilitar el alcance de los cocos distribuidos alrededor de la palmera. Sin embargo, integrar ambos movimientos aumenta la complejidad mecánica, el costo y las necesidades de mantenimiento debido al mayor número de componentes, y la rotación puede comprometer la estabilidad en troncos con diámetros irregulares.

Se identificó inicialmente la necesidad de usar dos hileras de ruedas para lograr tanto la elevación como el posicionamiento del dispositivo; sin embargo, para obtener una solución más compacta y eficiente se optó por emplear ruedas Mecanum, capaces de integrar ambas funciones en un solo sistema. Estas ruedas permiten movimiento omnidireccional gracias a sus rodillos inclinados a 45°, lo que posibilita combinar desplazamientos longitudinales y transversales mediante el control independiente de cada rueda. En el dispositivo trepador, esta característica facilita el ascenso y descenso por el tronco, así como la rotación alrededor de la palma para orientar el mecanismo de corte sin reposicionar toda la estructura. Además, su diseño compacto mejora la integración con la estructura y reduce la complejidad del sistema.

- Brazo robótico

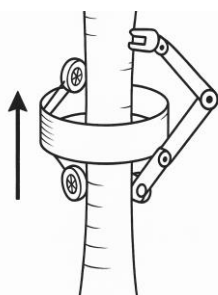
Mediante un brazo robótico con al menos tres grados de libertad, el dispositivo puede realizar las maniobras necesarias para recolectar el fruto deseado. Este sistema se caracteriza por su simplicidad mecánica, ya que solo requiere el movimiento vertical del dispositivo y delega la maniobrabilidad en un brazo robótico, el cual ofrece mayor precisión al alcanzar los cocos gracias a sus múltiples grados de libertad. No obstante, la falta de rotación limita su alcance, obliga a reposicionar el dispositivo para acceder a distintas zonas del tronco y reduce la velocidad de recolección. Además, aunque simplifica el sistema de tracción, el brazo robótico introduce su propia complejidad y demanda un control más sofisticado, aumentando los costos y los retos de diseño y programación.

• Matriz de selección

Para el posicionamiento, los criterios de selección considerados son: la facilidad y factibilidad del diseño e instalación, los requerimientos de mantenimiento, la facilidad de uso en función del público objetivo del dispositivo, la eficiencia tanto energética como en el tiempo de posicionamiento, y el costo de implementación.



a). Ruedas Mecanum



b). Brazo robótico

Figura 18: Conceptos generados para el posicionamiento.

Criterios de selección	Conceptos	
	A Ruedas Mecanum	B Brazo Robótico (Referencia)
Diseño	+	0
Facilidad de instalación	+	0
Mantenimiento	+	0
Facilidad de uso	+	0
Eficiencia	+	0
Costo	0	0
Suma +	5	0
Suma 0	1	6
Suma -	0	0
Evaluación neta	4	0
Lugar	1	2
¿Continuar?	si	No

Tabla 6: Matriz de selección de Pugh para el sistema de posicionamiento.

De acuerdo con la matriz de selección de Pugh presentada en la Tabla 6, el sistema de posicionamiento mediante ruedas Mecanum presenta el mejor desempeño global frente a la alternativa del brazo robótico. Este concepto se destaca en criterios como diseño, facilidad de instalación, mantenimiento, facilidad de uso y eficiencia, manteniendo un costo comparable. Adicionalmente, el uso de ruedas Mecanum permite integrar en un mismo sistema las funciones de elevación y posicionamiento, lo que contribuye a reducir la complejidad y el tamaño general del dispositivo. Por estas razones, se selecciona esta alternativa para continuar con el desarrollo del diseño.

4. Conceptos para el corte

En este apartado se busca identificar el concepto más adecuado para realizar el corte de las ramas, priorizando que dicho corte sea preciso, eficiente y con el menor consumo de energía posible.

- Tijera de corte

La tijera constituye el mecanismo más sencillo, ya que mediante un accionamiento mecánico permite efectuar el corte de la rama. Las tijeras ofrecen cortes precisos y controlados, lo que reduce el riesgo de dañar tanto el tronco como la rama. Sin embargo, requieren mayor fuerza o un mecanismo de palanca más robusto para cortar ramas gruesas, lo que complica el diseño, y pueden resultar más lentas que otros métodos al necesitar realizar cada corte de forma individual.

- Sierra

Mediante una sierra acoplada a un motor es posible realizar un corte rápido y preciso de las ramas. La sierra, especialmente en su versión eléctrica, permite cortar con rapidez y eficiencia ramas gruesas sin gran esfuerzo, además de ofrecer versatilidad al adaptarse tanto

a ramas finas como robustas. Sin embargo, su uso implica un mayor riesgo de dañar el tronco si no se controla adecuadamente, y requiere un mantenimiento constante, incluido el afilado periódico, para mantener su buen desempeño.

- Guadaña

La guadaña representa un método tradicional de corte, el cual, al ser integrado al dispositivo, elimina la necesidad de accionamiento humano. La guadaña permite realizar cortes rápidos mediante un movimiento balanceado y destaca por su simplicidad, ya que no requiere mecanismos complejos, lo que puede reducir costos y facilitar el diseño del dispositivo. Sin embargo, ofrece menor precisión, aumentando el riesgo de dañar el tronco o no cortar por completo la rama; además, requiere suficiente espacio y fuerza para maniobrarla, y necesita un afilado constante para mantener su efectividad.

-Cuchilla

La cuchilla es un mecanismo similar a la guadaña, diferenciándose principalmente en la dirección del corte y en el mayor nivel de precisión que puede alcanzar durante el proceso de corte. La cuchilla cercana al tronco permite realizar cortes precisos y limpios, reduciendo irregularidades. Sin embargo, su uso implica un alto riesgo de dañar la corteza si se acerca demasiado, exige un control muy preciso para evitar cortes profundos y suele ser menos rápida que herramientas como la sierra o la guadaña, especialmente cuando la rama está en una posición difícil.

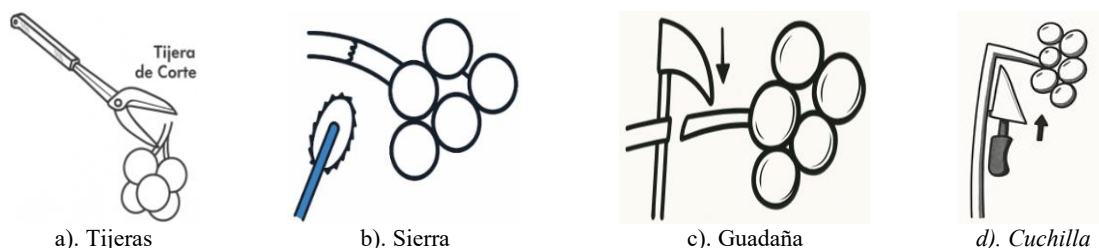


Figura 19: Conceptos generados para el corte.

• Matriz de selección

Para la selección del concepto de corte se consideran, además de los criterios mencionados en apartados anteriores (facilidad de diseño, instalación y mantenimiento), aspectos como la precisión del corte, de manera que la sierra actúe exactamente sobre la rama y en la ubicación deseada. Asimismo, se prioriza que el sistema de corte requiera el menor número posible de recambios, que su consumo energético sea mínimo y que su operación afecte en la menor medida posible la salud de la palmera.

De acuerdo con la matriz de selección de Pugh presentada en la Tabla 7, el uso de una sierra se identifica como la alternativa más adecuada para el sistema de corte. Este concepto presenta el mejor desempeño global, destacándose en criterios clave como facilidad de diseño e instalación, estabilidad durante la operación y eficiencia del proceso de corte, sin penalizaciones significativas en los demás criterios evaluados. En comparación con los demás conceptos, la sierra permite un corte continuo y controlado, reduciendo la necesidad de aplicar fuerzas elevadas sobre la estructura del dispositivo y, en consecuencia,

disminuyendo los requerimientos de potencia y las exigencias estructurales del sistema. Por estas razones, se selecciona este concepto para continuar con el desarrollo del diseño.

Criterios de selección	Conceptos			
	A	B	C	D
	Tijeras	Sierra (Referencia)	Guadaña	Cuchilla
Diseño	-	0	0	0
Facilidad de instalación	-	0	0	0
Mantenimiento	-	0	-	-
Precisión	+	0	0	+
Durabilidad	-	0	-	-
Energía requerida	-	0	+	0
Eficiencia	-	0	-	0
Afectación a la palmera	0	0	0	0
Suma +	1	0	1	1
Suma 0	1	8	4	5
Suma -	6	0	3	2
Evaluación neta	-5	0	-2	-1
Lugar	4	1	3	2
¿Continuar?	No	Si	No	No

Tabla 7: Matriz de selección de Pugh para el corte.

5. Selección del sistema de acople

Para la selección del sistema de acople se definieron criterios funcionales y estructurales orientados a garantizar una interacción segura y eficiente entre el dispositivo y el tronco de la palmera. Dichos criterios incluyen la posibilidad de instalar y retirar el dispositivo de manera sencilla y segura, así como la capacidad del sistema de acople para soportar y transmitir las cargas mecánicas generadas durante el ascenso, la rotación alrededor del tronco y la operación de corte, así como la simplicidad operativa.

Con base en estos criterios, se analizaron distintos tipos de acoples comerciales, evaluando sus ventajas y desventajas en términos de facilidad de operación, robustez estructural, requerimientos de mantenimiento y compatibilidad con el diseño propuesto. A continuación, se presentan las alternativas consideradas.

- Acople tipo gancho de liberación rápida

Este tipo de acople permite que el montaje y desmontaje del dispositivo en la palmera se realice de manera rápida, al tiempo que garantiza la presión necesaria para sujeción y evita que la estructura se “abra” durante el funcionamiento. Los acoples rápidos permiten un montaje y desmontaje extremadamente rápido sin necesidad de herramientas adicionales, facilitando la manipulación del dispositivo. Sin embargo, pueden ser menos resistentes que

los acoples tradicionales con pernos, lo que podría limitar su capacidad para soportar cargas elevadas o esfuerzos prolongados.

- Acople tipo bisagra con pasador extraíble

Este acople comparte el mismo principio de funcionamiento del anterior, pero sustituye el accionamiento mediante palanca por un sistema de pasador. El acople tipo bisagra ofrece un diseño simple y robusto que no requiere herramientas adicionales para su operación. No obstante, la bisagra puede desgastarse si se somete a esfuerzos elevados, y es necesario un mantenimiento regular para evitar que el pasador se atasque y comprometa su funcionamiento.

- Acople por pernos

Mediante el uso de pernos se busca garantizar una sujeción firme entre las dos partes de la estructura alrededor del tronco. Los acoples con tornillería ofrecen una unión fuerte y resistente, capaz de soportar vibraciones y movimientos sin aflojarse fácilmente, y se pueden instalar o desinstalar con herramientas comunes. Sin embargo, requieren el uso de herramientas manuales para su montaje y desmontaje, lo que hace que el proceso sea más lento en comparación con otras opciones de acople rápido.

• Matriz de selección

Criterios de selección	Conceptos		
	A	B	C
	Gancho	Bisagra	Pernos (Referencia)
Diseño	0	0	0
Facilidad de instalación	0	0	0
Mantenimiento	+	-	0
Durabilidad	-	-	0
Facilidad de uso	+	+	0
Velocidad de montaje/desmontaje	+	+	0
Suma +	3	2	0
Suma 0	0	2	6
Suma -	1	2	0
Evaluación neta	2	0	0
Lugar	1	2	2
¿Continuar?	Si	No	No

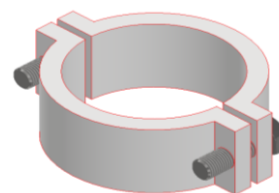
Tabla 8: Matriz de selección de Pugh para el sistema de acople.



a). Gancho



b). Bisagra



c). Pernos

Figura 20: Conceptos generados para el sistema de acople.

Para la selección de este sistema de acople, los criterios clave son la durabilidad y la rapidez en el montaje y desmontaje. Además, se consideran los criterios fundamentales establecidos

para todos los conceptos previamente presentados, tales como la facilidad de diseño e instalación, así como los requerimientos de mantenimiento.

A través de la aplicación de la matriz de selección de Pugh mostrada en la Tabla 8, se determinó que la alternativa más adecuada para el acople de la estructura es el uso de un sistema de gancho de liberación rápida.

6. Conceptos para el sistema de control

En este apartado se generan y evalúan distintos conceptos para el sistema de control del dispositivo, cuyo objetivo es gestionar el accionamiento de los motores, permitir la comunicación inalámbrica con el operador y garantizar una operación confiable en tiempo real. El sistema de control debe integrar conectividad WiFi y Bluetooth, contar con suficientes entradas y salidas, y ser compatible con controladores de motores disponibles comercialmente.

-Arduino Uno R4 (WiFi)

Placa de desarrollo orientada al control de sistemas embebidos, que integra conectividad WiFi y Bluetooth de forma nativa. Dispone de una cantidad adecuada de pines digitales y analógicos, es compatible con múltiples controladores de motores y cuenta con amplio soporte técnico y documentación.

-ESP32

Microcontrolador con conectividad WiFi y Bluetooth integrada, ampliamente utilizado en aplicaciones IoT. Presenta buen rendimiento y bajo consumo energético; sin embargo, su número de pines disponibles se reduce considerablemente al habilitar funciones de comunicación y PWM, lo que limita su uso en sistemas con múltiples actuadores.

-Raspberry Pi

Computadora de placa reducida con alta capacidad de procesamiento. Aunque ofrece múltiples interfaces de comunicación, no está optimizada para control en tiempo real, presenta mayor consumo energético y requiere sistemas operativos que aumentan la complejidad del control de motores.

-Arduino Mega 2560 + módulos externos

Plataforma con gran cantidad de pines de entrada y salida, adecuada para sistemas con múltiples actuadores. No obstante, requiere módulos adicionales para WiFi y Bluetooth, lo que incrementa el número de componentes, el consumo energético y la complejidad del sistema.

- Matriz de selección

Para la selección del sistema de control se definieron criterios enfocados en la funcionalidad y viabilidad del dispositivo. La cantidad de pines de entrada y salida es fundamental para el control simultáneo de seis motores y sensores adicionales. La conectividad inalámbrica (WiFi y Bluetooth) es indispensable para la comunicación remota del sistema. La facilidad de diseño e implementación permite reducir tiempos de desarrollo y errores de integración.

La capacidad de control en tiempo real garantiza respuestas precisas y estables durante la operación. El consumo energético influye directamente en la autonomía del dispositivo, mientras que la disponibilidad de controladores y soporte facilita la integración y el mantenimiento. Finalmente, el costo se considera para asegurar una solución económicamente accesible y acorde a los objetivos del proyecto.



Figura 21: Microcontroladores considerados para el sistema de control.

Criterios de selección	Conceptos			
	A Arduino Uno R4	B ESP32 (Referencia)	C Raspberry Pi	D Arduino Mega
Pines disponibles	+	0	-	+
Wifi y Bluetooth integrados	+	0	-	-
Facilidad de implementación	+	0	-	+
Control en tiempo real	+	0	-	0
Consumo energético	0	0	-	-
Soporte y documentación	+	0	0	+
Costos	-	0	-	-
Suma +	5	0	0	3
Suma 0	1	7	1	1
Suma -	1	0	6	3
Evaluación neta	4	0	-6	0
Lugar	1	2	3	2
¿Continuar?	Si	No	No	No

Tabla 9: Matriz de selección de Pugh para el sistema de control.

A partir del análisis presentado en la matriz de selección, se concluye que el Arduino Uno R4 es la opción más adecuada para el sistema de control del dispositivo. Esta alternativa se destaca principalmente por integrar WiFi y Bluetooth sin necesidad de módulos externos, por ofrecer una cantidad suficiente de pines para el control de seis motores y por su buen desempeño en aplicaciones de control en tiempo real. Asimismo, su facilidad de implementación y el amplio soporte disponible permiten reducir la complejidad del sistema y los tiempos de desarrollo, alineándose con los objetivos del proyecto.

6.1.4 Concepto final a desarrollar

El concepto consiste en una estructura principal de forma cilíndrica, dividida en dos mitades articuladas mediante una bisagra, lo que permite abrirla para envolver el tronco de la palmera y luego cerrarla mediante un sistema de acople con gancho de liberación rápida. Esta

configuración facilita tanto el montaje como el desmontaje del dispositivo en campo, asegurando una sujeción firme y segura alrededor del tronco.

Sobre esta estructura se integran dos pares de ruedas Mecanum, dispuestas de manera que permiten que la estructura pueda ascender y descender por el tronco, así como rotar alrededor de su eje, lo que proporciona un posicionamiento preciso frente a los racimos de coco durante la operación. Para asegurar un contacto constante entre las ruedas y el tronco, independientemente de variaciones de diámetro o inclinación, cada rueda incorpora un resorte de acción pasiva, cuya fuerza de presión se encuentra definida por el diseño del resorte, en función de su constante elástica y del rango de deformación previsto. De este modo, la presión ejercida sobre la superficie se ajusta automáticamente mediante la compresión o extensión del resorte, garantizando la adherencia y estabilidad del conjunto durante el ascenso y la rotación, sin requerir un control activo de la fuerza.

Durante el proceso de selección se determinó que el método de corte más eficiente y preciso es el uso de una sierra circular accionada por un motor eléctrico. Este sistema se integra al dispositivo mediante una base móvil pivotante acoplada a la estructura principal, la cual se dispone de forma paralela al eje del tronco de la palmera.

En su configuración inicial, el disco de la sierra se encuentra orientado en un plano paralelo al eje del tronco. Mediante un motor adicional, la base permite variar el ángulo del disco con respecto a dicho eje, habilitando diferentes ángulos de ataque para el corte. Este ajuste se realiza mediante una rotación alrededor de un eje perpendicular al eje longitudinal del tronco, permitiendo adaptar la orientación del corte a la posición y geometría de los racimos sin necesidad de reposicionar la estructura completa. Este concepto integrado combina todos los subconjuntos y mecanismos evaluados, cada uno diseñado para cumplir funciones clave del dispositivo. Este diseño consolidado constituye la base de desarrollo para las fases dos y tres de la metodología, asegurando una solución técnicamente coherente, funcional y viable.

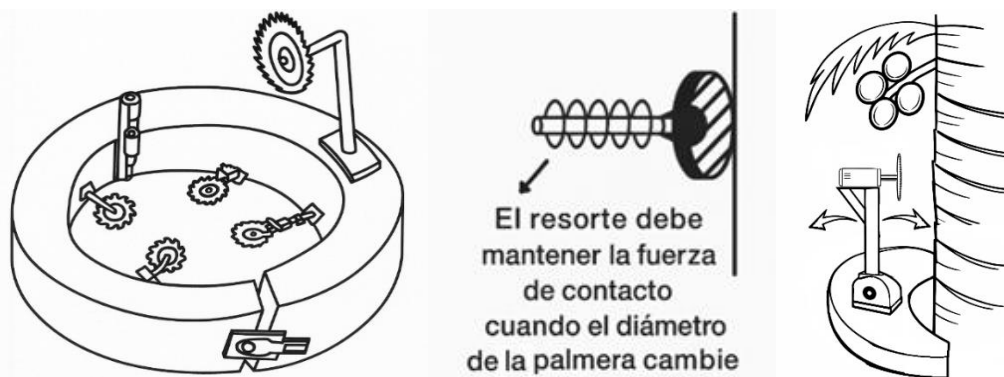


Figura 22: Boceto del concepto final a desarrollar.

6.2 Fase 2: Diseño a nivel de sistema

En la fase de diseño a nivel de sistema se definió la arquitectura general del dispositivo, estableciendo la configuración, interacción y disposición de los diferentes subsistemas que lo componen. A partir de los conceptos seleccionados en la fase anterior, se desarrolló la

forma global del dispositivo, su principio de funcionamiento y la manera en que cada subsistema se integra para cumplir los requerimientos funcionales definidos. Esta fase se desarrolló de manera iterativa junto con el diseño de detalle (Fase 3), de modo que los resultados obtenidos en el análisis funcional, estructural y de fabricación permitieron realizar ajustes en la configuración general del dispositivo, garantizando su correcta operación, viabilidad constructiva y cumplimiento de los objetivos del proyecto.

6.2.1 Descripción del dispositivo

A partir de los conceptos previamente seleccionados, el dispositivo se estructuró en cuatro subconjuntos principales: estructura, arrastre, corte, alimentación y control, lo que permite una organización clara de sus funciones y una integración coherente de los distintos componentes. Los subconjuntos de estructura, arrastre y corte fueron desarrollados y descritos en detalle durante la fase de generación y selección de conceptos, por lo que en esta sección se profundiza únicamente en los aspectos necesarios para su integración a nivel de sistema.

El subconjunto de arrastre es accionado mediante motores DC de 12V con caja reductora, seleccionados por su capacidad para suministrar el torque y la velocidad necesarios para garantizar un ascenso controlado del dispositivo a lo largo del tronco. Estos motores presentan un efecto de bloqueo en el eje de salida, de manera que el movimiento únicamente se produce cuando el eje de entrada es accionado. Esta característica, en conjunto con la fuerza normal ejercida por los resortes del sistema de contacto, contribuye a evitar un descenso libre o descontrolado del dispositivo ante una eventual falla eléctrica, incrementando así la seguridad operativa del sistema.

El subconjunto de corte está conformado por un brazo mecánico que sostiene un motor DC de 12V acoplado a una sierra circular, la cual es responsable de realizar el corte de los racimos de coco de manera controlada y precisa. Por su parte, el subconjunto de alimentación y control está compuesto por baterías recargables de 12V y 1500 mAh, encargadas de suministrar energía a todos los motores del dispositivo. El control del sistema se realiza mediante una plataforma Arduino, que permite la operación de los motores de forma individual o sincronizada, según el tipo de movimiento requerido. La comunicación con el sistema de control se lleva a cabo de manera remota a través de una conexión Bluetooth, ya sea desde un computador o un dispositivo móvil.

Teniendo todo lo anterior en cuenta usando el software Inventor, se realizó un modelo CAD de cada una de las partes del dispositivo y su ensamblaje final. En la Figura 23, se presenta el esquema de ensamblaje final del dispositivo. Los planos que detallan la geometría y dimensiones de las piezas que serán fabricadas se presentarán en el ANEXO 1: Planos de detalle.

6.2.2 Funcionamiento general del dispositivo

El funcionamiento del dispositivo se desarrolla de manera secuencial y controlada, permitiendo su operación segura y precisa durante el ascenso, posicionamiento y corte de los racimos de coco.

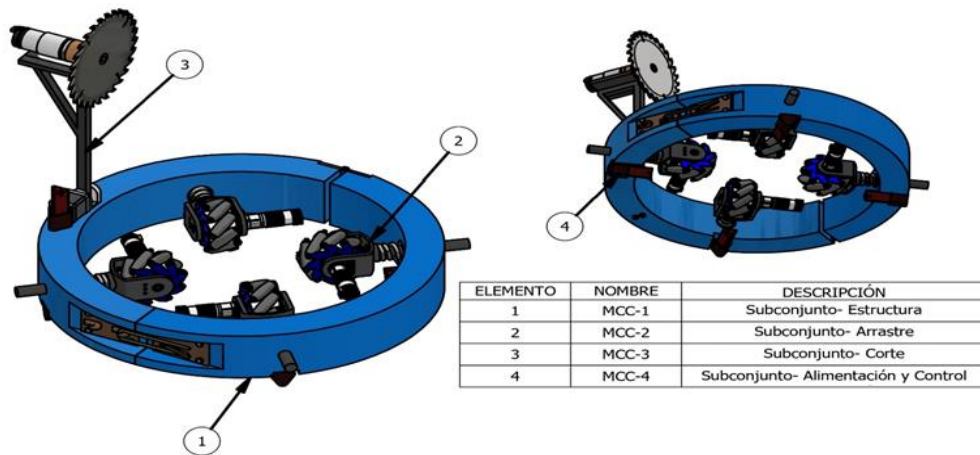


Figura 23: Dispositivo de cosecha.

En primer lugar, el dispositivo se acopla manualmente alrededor del tronco de la palmera. Para ello, la estructura cilíndrica se abre mediante la bisagra y se cierra posteriormente utilizando el sistema de broche de liberación rápida. En este momento, los resortes integrados en los soportes de las ruedas comienzan a ejercer una fuerza normal sobre el tronco, garantizando el contacto permanente entre las ruedas y la superficie de la palmera.

Una vez asegurado el dispositivo, se activan los motores a través del sistema de control remoto. La primera orden de operación corresponde al ascenso del equipo. Los motores de arrastre accionan las ruedas Mecanum, permitiendo que el dispositivo trepe verticalmente por el tronco hasta alcanzar una altura cercana al racimo de coco que se desea cortar.

Al aproximarse a la zona de trabajo, el dispositivo puede ser posicionado con mayor precisión mediante dos movimientos independientes. En primer lugar, se permite la rotación de toda la estructura alrededor del eje longitudinal del tronco, ya sea en sentido horario o antihorario, facilitando el alineamiento con el racimo. En segundo lugar, se puede ajustar el ángulo de incidencia del disco de corte mediante la rotación del brazo que sostiene el motor de la sierra, accionado por un motor paso a paso. Este ajuste permite adaptar el ángulo de ataque del disco según la geometría y orientación del racimo.

Una vez alcanzada la posición adecuada, se enciende el motor de corte, haciendo girar el disco de la sierra. Es importante destacar que la fuerza necesaria para realizar el corte no es generada por el motor de la sierra, sino por los motores de arrastre del dispositivo. En consecuencia, el corte se efectúa cuando el dispositivo avanza controladamente, ya sea en dirección vertical o mediante rotación alrededor del tronco, mientras el disco se encuentra en operación.

Durante la etapa de corte pueden presentarse dos escenarios. En el primero, el disco ataca la rama desde una posición inferior, avanzando el dispositivo hacia arriba hasta completar el corte. En el segundo, el dispositivo se posiciona de manera que el disco ataque lateralmente la rama, en cuyo caso el avance necesario para el corte se logra mediante la rotación del dispositivo alrededor del tronco.

Una vez finalizado el corte del racimo, el brazo que sostiene el sistema de corte se reubica en una posición que no interfiera con el desplazamiento del dispositivo. Posteriormente, se da la orden de descenso, permitiendo que el equipo descienda de forma controlada hasta una altura conveniente para su apagado y desacople manual del tronco.

6.2.3 Limitaciones del diseño

En esta sección se presentan las principales limitaciones del diseño propuesto, derivadas de los supuestos adoptados, las condiciones de operación consideradas y el alcance definido para el desarrollo del dispositivo.

El sistema de arrastre del dispositivo se basa en la generación de fuerza normal mediante elementos elásticos pasivos, cuyo objetivo es garantizar el contacto permanente entre las ruedas y la superficie del tronco. En consecuencia, el desempeño del ascenso y la estabilidad del sistema dependen directamente del coeficiente de fricción estática entre las ruedas y el tronco de la palmera. Para el desarrollo del diseño se adoptaron valores representativos de fricción correspondientes a condiciones normales de operación; sin embargo, variaciones en la rugosidad superficial o presencia de contaminantes podrían influir en el comportamiento del sistema durante su operación.

La operación del dispositivo se lleva a cabo desde el suelo, lo que puede limitar la visibilidad del punto de corte a grandes alturas. Esta condición puede incidir en el tiempo requerido para el posicionamiento y en la precisión de la maniobra, y se considera una limitación inherente al enfoque de operación remota adoptado en este trabajo.

Durante la etapa de corte, una vez separado el racimo de coco del tronco, este cae por gravedad, el diseño no contempla un sistema activo para la retención, sujeción o guiado del fruto una vez separado del tronco. El dispositivo se posiciona a una altura cercana al punto de corte, lo que implica que la distancia relativa de caída del fruto respecto a la estructura del equipo es reducida. En coherencia con lo anterior, el diseño no incorpora protecciones específicas frente a impactos externos, como la posible interacción con cocos u otros elementos vegetales durante la operación.

Las limitaciones anteriormente descritas no invalidan la funcionalidad del dispositivo, sino que delimitan su campo de aplicación y definen una base clara para futuras mejoras.

Viabilidad técnica

El análisis de viabilidad técnica demostró que el departamento de ingeniería mecánica de la universidad del valle dispone de los recursos, herramientas y equipos necesarios para la fabricación del prototipo conceptual. Las impresoras 3D del departamento permiten producir piezas de gran volumen, esenciales para la estructura del dispositivo. Además, las ruedas Mecanum, fundamentales para la movilidad y rotación sobre el tronco de la palmera, se encuentran disponibles en diferentes tamaños en tiendas en línea como Amazon, o pueden fabricarse mediante impresión 3D, garantizando su disponibilidad. Para el mecanismo de corte, se proyectó una adaptación que combina varias tecnologías, aprovechando las

capacidades del taller de máquinas y herramientas, el cual está bien equipado para la fabricación y ensamblaje de las piezas necesarias.

Como parte del proceso de desarrollo, se construyó un modelo 3D del dispositivo con el fin de definir con precisión las dimensiones y tolerancias antes de la fabricación de un prototipo funcional. Para ello, se utilizó un software especializado, como Autodesk Inventor, para el cual el departamento tiene licencias, que permitió diseñar y evaluar el prototipo virtualmente antes de su construcción.

Los materiales necesarios, como los filamentos para impresión 3D, metales y otros accesorios como las ruedas, son de fácil acceso y disponibilidad en el mercado. Además, se realizaron simulaciones previas para evaluar la resistencia y durabilidad de las piezas impresas en 3D, especialmente aquellas expuestas a esfuerzos mecánicos, lo cual optimizó el diseño en puntos críticos y minimizó posibles fallos estructurales. El dispositivo, una vez desarrollado, requerirá mantenimiento regular, limitado principalmente al reemplazo de componentes como las ruedas y el disco de corte, piezas diseñadas para ser fácilmente sustituibles. Este enfoque de diseño reducirá los costos y el tiempo de mantenimiento a lo largo de su vida útil.

6.3 Fase 3: Diseño de detalle

Durante esta fase se determinó qué elementos del prototipo funcional serían fabricados mediante impresión 3D, el material más adecuado para cada uno, y cuáles componentes serían adquiridos en el mercado. Posteriormente, se realizaron los cálculos teóricos de las condiciones que debían cumplir los elementos comerciales, como los motores y resortes, con el fin de seleccionar las referencias más apropiadas disponibles en el mercado que garantizaran el correcto funcionamiento del prototipo.

Una vez definidos los materiales, geometrías y referencias comerciales de los componentes, se determinaron las cargas internas y externas involucradas en el prototipo funcional y se calcularon los esfuerzos y modos de falla, con el propósito de garantizar su seguridad estructural. Finalmente, se establecieron las funcionalidades que debía cumplir el sistema de control, seleccionando los elementos electrónicos que lo componen y definiendo su modo de implementación dentro del conjunto del dispositivo.

6.3.1 Materiales y elementos a fabricar

Los elementos se fabricaron mediante impresión 3D, utilizando PETG como material principal. Este material fue seleccionado por sus buenas propiedades mecánicas en comparación con el PLA, un polímero más común en impresión 3D. Además, el PETG ofrece una mejor resistencia térmica y a los rayos UV, manteniendo un costo competitivo.

La fabricación mediante impresión 3D presenta ventajas significativas, como la reducción del peso de las piezas. Esto se debe a que la densidad del PETG es menor que la de metales livianos como el aluminio. Asimismo, el proceso resulta más económico, ya que las piezas no son completamente sólidas, sino que se construyen con un patrón interno que incorpora espacios de aire. Esto permite utilizar menos material sin comprometer significativamente las propiedades mecánicas de los componentes. La masa total del dispositivo sería de 9.5 Kg

incluyendo las baterías. En la Tabla 10 se muestran los elementos del dispositivo que serán impresos.

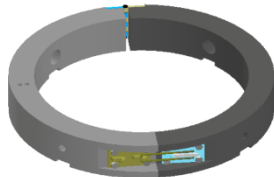
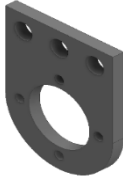
Elemento	Material	Método de fabricación	Masa (Kg)	Representación gráfica
Estructura	Filamento PETG	Impresión 3D FDM	3.500	
Acople: motor-soporte ruedas			0.003	
Acople: estructura corte-estructura principal			0.035	
Soporte de ruedas			0.160	
Soporte- corte			0.250	

Tabla 10: Elementos a fabricar.

6.3.2 Cálculo y selección de elementos a ser adquiridos

La selección de los motores que impulsarán las ruedas se basa fundamentalmente en el peso total del dispositivo. A partir de este valor y del diámetro de las ruedas, se calcula el par

requerido para el ascenso. En este caso, se utilizan ruedas Mecanum de 100 mm de diámetro. El par requerido por cada motor se determina de la siguiente manera:

$$F_{peso} = m * g = 10kg * 9.8m/s^2 = 98N$$

Cómo son cuatro conjuntos rueda-motor, la fuerza que debe proporcionar cada motor es:

$$F_{por\ motor} = \frac{98N}{4} = 24.5\ N$$

Ahora el par motor que debe entregar cada motor es:

$$T = F * r_{rueda} = 24.5N * 0.05m = 1.23\ Nm$$

Considerando un factor de seguridad entre 1.5 y 2 (principalmente para compensar el esfuerzo adicional durante el arranque), el par que debe generar cada motor se encuentra en el rango de *1.9 a 2.5 Nm*. Se requiere un motor de 12V capaz de proporcionar dicho par a una velocidad superior a 40 rpm, ya que las velocidades más bajas aumentarían considerablemente el tiempo necesario para ascender por la palmera.

Para estimar el tiempo de ascenso, se calculó el perímetro de la rueda:

$$P = \pi * \phi = 0.314m.$$

Si las ruedas giran a 40 rpm, el tiempo que tomaría al dispositivo elevarse a lo largo de una palmera de 15 metros de altura (valor promedio) la velocidad lineal es;

$$v = n * P = 40\ rpm * 0.314m/rev \approx 12\ m/min$$

De este modo, ascender una palmera promedio de 15m tomaría aproximadamente 1.3 minutos. Este tiempo se considera adecuado y razonable para el posicionamiento del dispositivo en condiciones operativas.

Por su parte, el motor de corte debe operar a una velocidad mínima de 1000 rpm y suministrar el torque necesario para generar una fuerza de corte de 15 N, esto basado en el estudio presentado en la referencia [41] mostrado en la revisión de la literatura. Utilizando un disco de sierra de 4.5 pulgadas. Además, debe funcionar con una alimentación de 12V. El torque mínimo requerido que debe entregar el motor es:

$$T = F * r_{disco} = 15N * 0.057m = 0.86\ Nm$$

La potencia mínima requerida del motor es:

$$P = \frac{T * 2\pi * n}{60} = \frac{0.86Nm * 2\pi * 1000rpm}{60} = 90\ W$$

En el mercado se encuentran disponibles kits comerciales para corte o taladrado que incluyen tanto el motor como la sierra, los cuales cumplen ampliamente con los requisitos mínimos establecidos para esta aplicación. Por tanto, la selección del equipo se simplifica y depende principalmente de criterios económicos.

Para complementar la función de corte, se empleará un motor paso a paso encargado de posicionar la sierra en diferentes ángulos. Este motor debe generar el torque suficiente para

desplazar el conjunto y, al mismo tiempo, resistir la fuerza de corte aplicada durante la operación. El análisis estático correspondiente, que se presentará más adelante en detalle, determinó que se requiere un torque mínimo de 1.2 Nm para mantener la estructura en las posiciones deseadas. El motor paso a paso NEMA 23 (modelo 23HS5628) cumple con este requisito, ya que ofrece un torque de 1.3 Nm y soporta cargas radiales de hasta 50 N en el extremo de su eje.[42]

En cuanto a la selección del resorte se llevó a cabo un cálculo estático, cuyos detalles se presentarán a continuación, mediante el cual se determinó la fuerza necesaria para garantizar tanto el contacto permanente entre la rueda y el tronco como la fricción suficiente para evitar el deslizamiento. Dicho cálculo arrojó que el resorte debía proporcionar una fuerza comprendida en el rango de 167–250 N.

Cálculo del resorte

La fuerza del resorte debe ser suficiente para equilibrar las fuerzas en la rueda, de modo que el contacto entre la rueda y el tronco se mantenga garantizado en todo momento. Dado que el resorte aplica su fuerza en la misma dirección de la normal de contacto, dicha normal corresponde directamente a la fuerza ejercida por el resorte; es decir, a la presión que la rueda transmite sobre el tronco.

No existe un estudio específico que reporte el coeficiente de fricción entre piezas impresas en PETG y madera (en este caso, un tronco de árbol). Por esta razón, el valor adoptado corresponde a una estimación. Se considera que el comportamiento del PETG es similar al de otros polímeros como el PLA, aunque la mayoría de las pruebas disponibles no se han realizado directamente frente a superficies de madera.

El coeficiente de fricción depende de múltiples variables. En el caso del PETG impreso en 3D, influyen factores como la orientación de las capas, el porcentaje y el patrón de relleno, así como las propiedades particulares del filamento utilizado. Por parte de la superficie de madera, características como la rugosidad y la humedad afectan significativamente el resultado. Adicionalmente, aspectos relacionados con la metodología de ensayo, como la magnitud de la fuerza normal aplicada, también modifican el valor medido.[43][44]

Un estudio de carácter cualitativo en el que se evaluó el desempeño de ruedas Mecanum impresas en PETG y otros polímeros sobre superficies de madera. En dicho caso se observó un buen comportamiento, aunque la condición de prueba correspondía a una superficie plana y horizontal, lo cual difiere de la situación particular analizada en este trabajo (madera curva de un tronco)[45].

De acuerdo con estudios previamente mencionados y bases de datos de materiales, un rango estimado para el coeficiente de fricción estático de polímeros frente a distintas superficies se encuentra entre 0,3 y 0,7. En consecuencia, la selección de un valor conservador ($\mu \approx 0,3$) se considera razonable dentro de este intervalo[46][47].

Para determinar la fuerza normal mínima que debe ejercer el sistema de resortes sobre cada rueda, se analiza la condición de no deslizamiento en el contacto rueda–tronco. Durante el

ascenso, el motor genera un torque que se traduce en una fuerza tangencial aplicada sobre la superficie del tronco. Para que esta fuerza se transmita de manera efectiva sin que ocurra deslizamiento, la fuerza de fricción disponible debe ser igual o mayor que la fuerza tangencial generada.

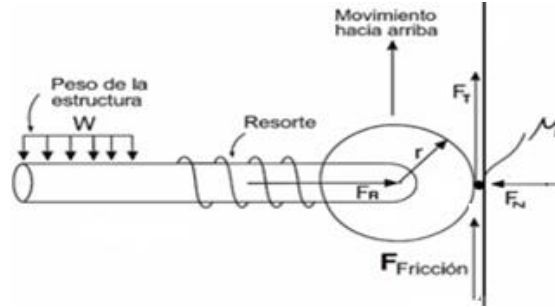


Figura 24: Fuerzas en el contacto entre la rueda y el tronco.

La fuerza tangencial F_T producida por el motor se expresa como:

$$F_T = \frac{T}{r}$$

$$T = 2.4 \text{ Nm} ; r = 0.05 \text{ m} ; \mu = 0.3 ; W = 98 \text{ N}$$

Donde T es el torque generado por el motor y r es el radio de la rueda. Por su parte, la fuerza de fricción máxima disponible en el contacto rueda-tronco está dado por:

$$F_f = \mu * N$$

Donde μ es el coeficiente de fricción estática entre la rueda y el tronco, y N es la fuerza normal ejercida por el resorte. Para evitar el deslizamiento, debe cumplirse la siguiente condición:

$$F_T \leq F_f \rightarrow \frac{T}{r} \leq \mu * N$$

$$F_T \geq W$$

$$F_R = N \geq \frac{T}{r * \mu} = \frac{2.5 \text{ Nm}}{0.05 \text{ m} * 0.3} = 167 \text{ N}$$

Esta condición garantiza no solo la correcta transmisión del torque del motor sin deslizamiento, sino también que la fricción disponible sea suficiente para soportar y elevar el peso total del dispositivo. Dado que el peso total de la estructura es de 98N y se distribuye aproximadamente de manera uniforme entre las cuatro ruedas, el peso soportado por cada rueda es cercano a 25N, valor que resulta inferior al límite impuesto por la condición de no deslizamiento previamente calculada.

La fuerza mínima del resorte obtenida a partir de la condición de no deslizamiento es de 167 N, la cual corresponde al criterio gobernado por el torque del motor, al ser el más exigente para el sistema. Con el fin de garantizar un funcionamiento seguro y confiable, se adopta un factor de seguridad de 1,5 que permite considerar incertidumbres asociadas al coeficiente de fricción estática, irregularidades de la superficie del tronco, variaciones geométricas y condiciones reales de operación. En consecuencia, la fuerza nominal de diseño del resorte se

establece en aproximadamente 250 N. De este modo, el resorte fue dimensionado para operar dentro de un rango de fuerzas comprendido entre 167 N y 250 N, asociado a las variaciones de deformación durante el contacto con el tronco en el ascenso, asegurando una presión suficiente entre las ruedas y la superficie sin exceder los límites estructurales del sistema y evitando el deslizamiento.

$$167N \leq F_R \leq 250N$$

En consecuencia, se empleó el módulo “Generador de componentes de muelles de compresión” de Autodesk Inventor, en el cual se definieron como parámetros de entrada el diámetro interno del resorte, las longitudes máxima y mínima requeridas y las fuerzas calculadas. El resorte empleado en el sistema cuenta con una longitud libre de 250 mm y una longitud al cierre de 200 mm, así como una constante elástica de 3.35 N/mm que determina su rigidez. Está fabricado en acero al carbono AISI 1070 y posee un diámetro de alambre de 3 mm, un diámetro interno de 20 mm y un total de 20 espiras activas que contribuyen a su capacidad de carga y comportamiento mecánico dentro del mecanismo.

El material seleccionado para la fabricación del resorte es acero al carbono AISI 1070, ampliamente utilizado en la industria debido a su alta resistencia y elasticidad. Este acero permite la aplicación de tratamientos térmicos como temple y revenido, que mejoran su dureza y comportamiento a la fatiga. Además, es un material económico y de fácil disponibilidad en el mercado. Gracias a estas propiedades, el resorte garantiza que las ruedas del dispositivo mantengan un contacto continuo con el tronco de la palmera, abarcando diámetros entre 180 y 280 mm, lo que cubre la mayoría de las palmas en estado de madurez.

En la Tabla 11 se muestran todos los elementos seleccionados para el prototipo funcional, una descripción y la referencia comercial del elemento.

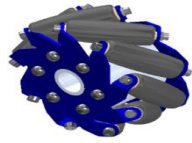
Elemento	Cantidad	Descripción/Referencia	Masa (Kg)	Representación gráfica
Bisagra	1	Bisagra cuadrada de acero inoxidable 4x4 pulgadas	0.400	
Abrazadera de palanca	1	Tipo pestillo Acero al carbono	0.500	
Ruedas Mecanum	4	100 mm de diámetro y chasis de aluminio.	1.000	

Tabla 11: Elementos seleccionados.

Elemento	Cantidad	Descripción/Referencia	Masa (Kg)	Representación gráfica
Disco de Corte	1	Disco de corte tipo sierra de 4.5 pulgadas.	0.050	
Baterías	4	Batería Ion Litio de 12V 1.5Ah	0.700	
Motor DC 12V – Ruedas	4	Motorreductor 12VDC Modelo: JGB37-545-CE Torque: 3 Nm y velocidad de 37 RPM	1.200	
Rodamiento	4	Rodamiento- 7 mm Diámetro interno, 15 mm Diámetro externo- Referencia: 628/7-2Z	0.012	
Muelle de compresión	4	Diámetro interior: 20mm Longitud mínima: 200mm Longitud máxima: 250mm K:3.35 N/mm	1.200	
Motor paso a paso	1	Nema 23 Referencia: 23HS5628	0.700	
Motor DC 12V- Corte	1	Motor 12VDC 775 4000-6000 RPM 80-150W	0.400	

Tabla 11: Elementos seleccionados (continuación).

6.3.3 Análisis estático

En el análisis estático se identificaron las cargas internas y externas que actúan sobre el prototipo funcional, así como las restricciones y reacciones generadas en los distintos componentes del sistema. Los elementos principales a analizar son la estructura de corte, el soporte de las ruedas y la estructura principal.

6.3.3.1 Subconjunto de corte

Las fuerzas que actúan sobre este elemento son la fuerza de corte y el peso combinado del motor y la sierra. La estructura está pivotada únicamente en un extremo, sobre el eje del motor paso a paso.

La fuerza de corte está influenciada por múltiples variables, como la velocidad de giro del disco, la velocidad de avance, el espesor de la rama, el ángulo de entrada del disco de corte y el contenido de humedad de la rama. Dado que estas variables, en especial las relacionadas con las características naturales de las ramas de palma, no son constantes, se adopta una fuerza de corte representativa. Esta se basa en el estudio realizado [41], en el cual se midió la fuerza de corte variando dichos parámetros. Como resultado, se estableció un valor representativo de 15 N.

En el presente análisis se adopta un modelo ideal de corte, en el cual se considera únicamente la componente tangencial de la fuerza de corte, por ser la única responsable de generar un par resistente respecto al eje de rotación del disco y, en consecuencia, del consumo de torque y potencia del motor.

La fuerza tangencial actúa en sentido opuesto al giro del disco, oponiéndose al movimiento impuesto por el motor, y es la que realiza el trabajo mecánico asociado al proceso de corte. En contraste, la componente radial de la fuerza de contacto, aunque presente en el proceso real, no produce momento respecto al eje de rotación del disco y, por tanto, no contribuye al cálculo del torque ni de la potencia requerida.

Asimismo, se asume que no existen fuerzas axiales, entendidas como fuerzas alineadas con el eje de rotación del disco. Esta hipótesis se sustenta en que el proceso de corte se realiza estrictamente en el plano del disco, sin inclinación del mismo, sin ataque oblicuo y sin avance axial. Bajo estas condiciones, no se genera empuje axial durante el corte.

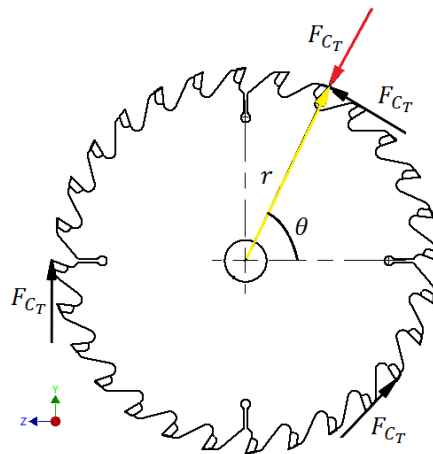


Figura 25: Plano de corte de la sierra.

Con el fin de comprobar que el motor seleccionado puede aportar esa fuerza de corte necesaria se analiza el torque máximo que puede generar el motor es de 1.5 Nm y el torque

requerido para realizar el corte, considerando una fuerza de corte de 15 N, se calculó de la siguiente manera:

$$T_{corte} = F_{c-Tangencial} * r_{disco} = 15N * 57mm = 855 Nmm \approx 0.86 Nm$$

Por lo tanto, el torque disponible del motor de 1.5 Nm es suficiente para cubrir la demanda generada durante el proceso de corte.

Una vez identificadas las cargas, se determinaron sus respectivos puntos de aplicación con respecto al pivote. Con esta información se realizó el análisis estático, a partir del cual se obtuvieron las fuerzas y los momentos de reacción en el pivote. El peso del motor considerado en el análisis es de 4.4N, mientras que el peso de la estructura de corte es de 2.45 N. Las posiciones de los puntos de aplicación de las fuerzas se expresan en milímetros.

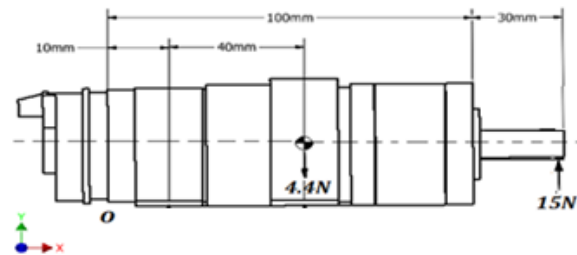


Figura 26: Vista lateral del motor de corte con la ubicación de la fuerza de corte y centro de gravedad.

En la estructura de corte se distinguieron dos condiciones de análisis: la primera corresponde a la posición completamente vertical, mientras que la segunda se presenta cuando el sistema adopta un ángulo de inclinación respecto a la vertical.

-Soporte vertical

En el pivote se generan reacciones en los ejes Y y Z, así como unos momentos en las tres direcciones que impiden que la estructura rote. El momento generado en la dirección Z corresponde al torque que debe suministrar el motor paso a paso para mantener la estructura en una posición establecida.

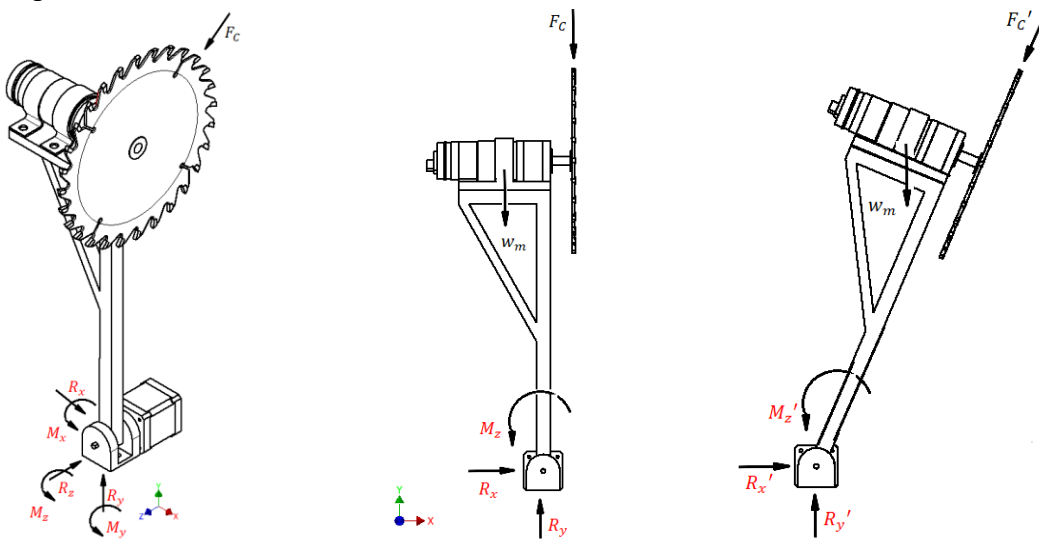


Figura 27: Diagrama de cuerpo libre estructura de corte.

Los vectores que representan las fuerzas y las ubicaciones con respecto al pivote donde actúan estas son:

$$\vec{F}_C = (F_{Cx}, F_{Cy}, F_{Cz}) = (0, -F_C \cos \theta, F_C \sin \theta) \quad \vec{R}_{F_C} = (37.5, 317, 0)$$

$$\vec{w}_m = (0, -4.4, 0) \quad \vec{R}_{w_m} = (-42.5, 317, 0)$$

$$\vec{w}_{Es} = (0, -2.45, 0) \quad \vec{R}_{w_{Es}} = (-28, 239, 0)$$

Donde $\vec{F}_C$ es el vector fuerza de corte, $\vec{R}_{F_C}$ es el vector del punto de aplicación de la fuerza de corte, $\vec{w}_m$ es el peso del motor, $\vec{R}_{w_m}$ la ubicación del centro de gravedad del motor de corte, $\vec{w}_{Es}$ el peso de la estructura y $\vec{R}_{w_{Es}}$ el centro de gravedad de la estructura.

Para el análisis se considera la condición más crítica de la fuerza de corte, ya que esta presenta componentes en los ejes Y y Z que dependen del ángulo θ . Con el fin de que ambas componentes alcancen simultáneamente su valor máximo, es necesario que las funciones seno y coseno se maximicen al mismo tiempo. Esta condición se cumple cuando el ángulo θ es de 45° , dado que en ese punto tanto el seno como el coseno toman el valor de $\frac{\sqrt{2}}{2}$. Por lo tanto la fuerza de corte en ambas direcciones tiene magnitud de 10.6N.

Ahora, las ecuaciones de equilibrio del sistema son:

$$\sum F_y = -F_C \cos \theta - w_m - w_{Es} + R_y = 0$$

$$R_y = 10.6N + 4.4N + 1.5N = 16.5N$$

$$\sum F_z = F_C \sin \theta + R_z = 0$$

$$R_z = -10.6N$$

$$\sum M_z = -(R_{F_C} \hat{i} * F_C \cos \theta \hat{j}) + (R_{w_m} \hat{i} * w_m \hat{j}) + (R_{w_{Es}} \hat{i} * w_{Es} \hat{j}) + M_z = 0$$

$$M_z = (10.6 * 37.5)Nmm - (4.4 * 42.5)Nmm - (2.45 * 28)Nmm = 142Nmm \hat{k}$$

$$\sum M_x = M_x + (R_{F_C} \hat{j} * F_C \sin \theta \hat{k}) = 0$$

$$M_x = -3360Nmm \hat{i}$$

$$\sum M_y = M_y - (R_{F_C} \hat{i} * F_C \sin \theta \hat{k}) = 0$$

$$M_y = 397.5 Nmm \hat{j}$$

-Soporte inclinado un ángulo teta

Cuando el soporte se encuentra inclinado, el plano de referencia de las reacciones en el soporte del motor rota en el ángulo correspondiente. En esta condición, las reacciones transmitidas por el motor en el eje Z permanecen inalteradas, mientras que las reacciones que inicialmente actuaban únicamente en el eje Y se descomponen en componentes sobre los ejes X y Y, de acuerdo con el nuevo plano de referencia del soporte. Como resultado, se generan reacciones en los tres ejes coordenados. Para determinar las componentes de la fuerza de corte en un plano rotado un ángulo α , se aplicó una matriz de rotación, obteniendo así las componentes del vector fuerza de corte ($\vec{F}_C'$) en este nuevo sistema de referencia.

$$\begin{bmatrix} F_{C_x}' \\ F_{C_y}' \\ F_{C_z}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -F_{C_y} \\ F_{C_z} \end{bmatrix}$$

Con el fin de analizar la condición más crítica, se considera un ángulo de rotación de la estructura $\alpha = 45^\circ$, valor que coincide con el ángulo θ que define la dirección de aplicación de la fuerza de corte en el plano YZ. En consecuencia, las componentes de la fuerza de corte en el sistema rotado son las siguientes:

$$F_{C_x}' = \frac{-F_C}{2} = -7.5N$$

$$F_{C_y}' = -F_C * \cos \theta \cos \alpha = \frac{-F_C}{2} = -7.5N$$

$$F_{C_z}' = F_{C_z} = F_C \sin \theta N = 10.6N$$

Las nuevas posiciones de aplicación de las fuerzas se muestran a continuación:

$$\vec{F}_C' = (-7.5, -7.5, 10.6) \quad \vec{R}_{F_C}' = (251, 198, 0)$$

$$\vec{w}_m = (0, -4.4, 0) \quad \vec{R}_{w_m}' = (194, 254, 0)$$

$$\vec{w}_{Es} = (0, -2.45, 0) \quad \vec{R}_{w_{Es}}' = (149, 189, 0)$$

Al rotar el brazo, la fuerza de corte permanece contenida en el plano del disco y actúa de forma puramente tangencial. Al expresarse en el sistema de referencia global, esta fuerza presenta componentes en los ejes X, Y y Z, las cuales corresponden únicamente a proyecciones geométricas y no a la aparición de una fuerza axial real. En el sistema de referencia solidario al disco, la fuerza de corte no posee componente axial.

Las ecuaciones de equilibrio para este sistema son:

$$\sum F_x' = F_{C_x}' - R_x' = 0$$

$$R_x' = 7.5 N$$

$$R_y' = 13.4N$$

$$R_z' = -10.6N$$

$$\sum M_z = (R_{F_C}' \hat{i} * F_{C_y}' \hat{j}) - (R_{F_C}' \hat{j} * F_{C_x}' \hat{i}) + (R_{w_m}' \hat{i} * w_m \hat{j}) + (R_{w_{Es}}' \hat{i} * w_{Es} \hat{j}) + M_z' = 0$$

$$M_z' = -(251 * 7.5)Nmm + (198 * 7.5)Nmm - (194 * 4.4)Nmm - (149 * 2.45)Nmm$$

$$M_z' = 1617Nmm$$

$$\sum M_x' = M_x' + (R_{F_C}' \hat{j} * F_{C_z}' \hat{k}) = 0$$

$$M_x' = -2099Nmm$$

$$\sum M_y' = M_y' - (R_{F_C}' \hat{i} * F_{C_z}' \hat{k}) = 0$$

$$M_y' = 2661 Nmm$$

6.3.3.2 Subconjunto de arrastre

En el soporte del subconjunto de arrastre, las cargas actuantes sobre el acople están asociadas al peso del motor, el peso de la rueda y la fuerza de fricción generada durante el movimiento. Dicha fuerza de fricción, como se mostró previamente en el cálculo del resorte, depende tanto del peso total del dispositivo como del torque transmitido por el motor durante la rotación.

Adicionalmente, se presenta una fuerza normal producto del contacto entre la rueda y el tronco. No obstante, esta fuerza no genera torque y se encuentra equilibrada por la fuerza ejercida por el resorte, de igual magnitud y sentido opuesto, tal como se demostró en el análisis correspondiente.

Considerando que el peso total del equipo se distribuye en cuatro soportes, cada uno debe resistir aproximadamente 25 N. Esta carga se distribuye a lo largo de la zona de acoplamiento, cuya longitud es de 25 mm, a la que se suma el peso propio del soporte.

En la estructura principal, el soporte de las ruedas se encuentra unido mediante una junta prismática que permite únicamente el movimiento axial en la dirección del eje X, mientras que los demás grados de libertad permanecen restringidos. Estas restricciones se garantizan tanto por la geometría del conjunto como por la presencia de una estría en el eje del soporte de ruedas, la cual encaja en la estructura principal e impide posibles rotaciones.

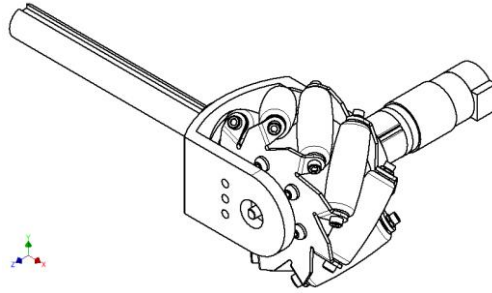


Figura 28: Subconjunto de arrastre.

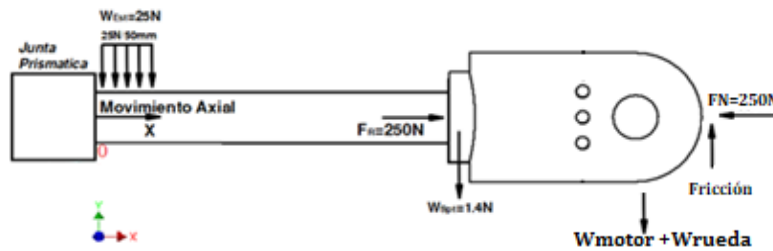


Figura 29: Diagrama de cuerpo libre soporte de ruedas.

Los vectores que representan las fuerzas que actúan sobre el soporte y las ubicaciones con respecto a la junta prismática son:

$$\begin{aligned}\vec{F}_f &= (0,75,0) & \vec{R}_{F_f} &= (265,0,0) \\ \vec{F}_R &= (250,0,0) & \vec{R}_{F_R} &= (143,0,0) \\ \vec{F}_N &= (-250,0,0) & \vec{R}_{F_N} &= (265,0,0)\end{aligned}$$

$$\vec{w}_m = (0, -4.9, 0) \quad \vec{R}_{w_m} = (213, 0, -39.5)$$

$$\vec{w}_R = (0, -2.45, 0) \quad \vec{R}_{w_R} = (213, 0, -39.5)$$

$$\vec{w}_{Es} = (0, -25, 0) \quad \vec{R}_{w_{Es}} = (25, 0, 0)$$

$$\vec{w}_{Sp} = (0, -1.5, 0) \quad \vec{R}_{w_{Sp}} = (143, 0, 0)$$

Donde $\vec{F}_f$ es el vector fuerza de fricción, $\vec{R}_{F_f}$ es el vector del punto de aplicación de la fuerza de fricción, $\vec{w}_m$ es el peso del motor, $\vec{R}_{w_m}$ la ubicación del acople del motor con el soporte, $\vec{w}_{Es}$ el peso de la estructura principal y $\vec{R}_{w_{Es}}$ el punto donde actúa el peso del equipo como una fuerza puntual, $\vec{F}_R$ es la fuerza del resorte y su correspondiente punto de aplicación $\vec{R}_{F_R}$, $\vec{F}_N$ es la fuerza normal de contacto y $\vec{R}_{F_N}$ el punto de contacto, $\vec{w}_R$ es el peso de la rueda y $\vec{R}_{w_{Es}}$ es el punto de acople del motor (que soporta la rueda) con el soporte y por último, $\vec{w}_{Sp}$ y $\vec{R}_{w_{Sp}}$ son el peso del soporte y el centro de gravedad del soporte respectivamente.

Las ecuaciones de equilibrio para el sistema son la siguientes:

$$\sum F_y = -w_m + F_f - w_R - w_{Es} - w_{Sp} + R_y = 0$$

$$\sum F_y = -4.9N + 75N - 2.45N - 25N - 1.5N + R_y = 0$$

$$R_y = -41.2N$$

$$\sum F_x = R_x + F_R + F_N = 250N - 250N + R_x = 0$$

$$R_x = 0$$

$$R_z = 0$$

$$\sum M_x = -(R_{w_m} \hat{k} * (w_m + w_R) \hat{j}) = -(-39.5 * -7.4)Nmm + M_x = 0$$

$$M_x = 293 Nmm$$

$$M_y = 0$$

$$\sum M_z = (R_{w_m} \hat{i} * (w_m + w_R) \hat{j}) + (R_{F_f} \hat{i} * F_f \hat{j}) + (R_{w_{Es}} \hat{i} * w_{Es} \hat{j}) + (R_{w_{Sp}} \hat{i} * w_{Sp} \hat{j}) + M_z = 0$$

$$\sum M_z = -(213 * 7.4)Nmm + (265 * 75)Nmm - (25 * 25)Nmm - (143 * 1.5) + M_z = 0$$

$$M_z = -17459Nmm$$

6.3.4 Análisis de esfuerzos

Una vez identificadas todas las fuerzas externas, reacciones y condiciones de borde en el análisis estático, se procedió a realizar una simulación mediante elementos finitos en Autodesk Inventor, con el fin de determinar los esfuerzos en la estructura de corte, el soporte de las ruedas y la estructura principal del dispositivo. En este proceso se compararon las reacciones y momentos encontrados en las restricciones del modelo analítico con el modelo de la simulación para garantizar la coherencia entre ambos estudios.

Autodesk Inventor permite realizar análisis por elementos finitos de tipo estático lineal, los cuales posibilitan la evaluación de esfuerzos equivalentes de Von Mises, desplazamientos y reacciones en los apoyos. Este tipo de análisis se basa en las siguientes suposiciones: comportamiento elástico lineal del material, pequeñas deformaciones y una relación esfuerzo-deformación lineal conforme a la ley de Hooke. La convergencia del modelo se evalúa principalmente a partir de los esfuerzos de Von Mises y/o los desplazamientos obtenidos.

Si bien los materiales poliméricos empleados en impresión 3D, como el PETG, presentan un comportamiento anisotrópico asociado a la orientación de las capas y a los parámetros de manufactura, el análisis mediante elementos finitos constituye una herramienta adecuada para una primera evaluación estructural. En este contexto, el criterio de Von Mises se utiliza como una simplificación que permite identificar regiones críticas de concentración de esfuerzos y evaluar la distribución de cargas en la pieza, sin pretender reproducir con exactitud absoluta el comportamiento real del material impreso.

Para el mallado, Inventor utiliza una estrategia automática basada en la geometría del modelo, conocida como malla no estructurada, empleando principalmente elementos tetraédricos de diez nodos (TET10) en el caso de modelos sólidos [48].

Los parámetros de mallado en la simulación definen la calidad y precisión de la malla generada. Los parámetros que se pueden modificar son:

- Tamaño medio del elemento: determina la dimensión promedio de los elementos en relación con el tamaño general del modelo. En esta simulación, se ha fijado un valor de 0,01.
- Tamaño mínimo del elemento: permite un refinamiento automático de la malla en zonas pequeñas o con detalles finos. Este valor se establece como una fracción del tamaño medio, siendo en este caso 0.02.
- Factor de modificación: regula la transición de la malla entre zonas de elementos finos y gruesos. Específicamente, define la relación máxima entre las longitudes de arista de elementos adyacentes. Un valor de 1 implica que una arista puede ser, como máximo, 1 vez más larga que la de un elemento vecino, lo que mejora la uniformidad de la malla.
- Ángulo máximo de giro: influye en la densidad de la malla sobre superficies curvas. Cuanto menor sea este ángulo, mayor será el número de elementos utilizados para representar la curvatura con precisión. En esta simulación, se ha empleado un ángulo de 15°.

Con base en estas consideraciones, a continuación se define el escenario de carga empleado en los análisis y las condiciones de frontera específicas aplicadas a cada una de las piezas evaluadas.

6.3.4.1 Escenario del análisis

Todos los análisis por elementos finitos realizados sobre las distintas piezas corresponden al caso más crítico de operación del dispositivo, el cual ocurre durante la ejecución del proceso

de corte. En esta condición, el sistema se encuentra sometido a la fuerza máxima de corte, mientras el dispositivo genera el avance necesario para completar la separación del racimo.

Para efectos del análisis estructural, se considera un estado cuasi estático, en el cual el dispositivo se modela en un instante representativo sin desplazamiento ni aceleración, pero sometido a las cargas externas máximas asociadas al proceso de corte. Esta simplificación permite evaluar los esfuerzos y deformaciones más desfavorables que experimentan los componentes. Las condiciones de apoyo y las cargas aplicadas en cada modelo se definieron de acuerdo con la configuración real del dispositivo

6.3.4.2 Soporte de corte

Condiciones de frontera en el pivote.

$$\begin{aligned} U_x &= 0 & U_y &= 0 & U_z &= 0 \\ \theta_x &= 0 & \theta_y &= 0 & \theta_z &= 0 \end{aligned}$$

Esto implica que en el pivote no se permiten giros ni desplazamientos en ninguna dirección, por lo que su comportamiento es equivalente al de un empotramiento. Si bien en un pivote convencional se permiten los giros alrededor del eje del orificio, en este caso dicha rotación está restringida debido a que el motor paso a paso se encuentra fijado a la estructura principal y acoplado rígidamente al soporte. En consecuencia, cualquier intento de giro del soporte obligaría al eje del motor a rotar de manera solidaria, lo cual define una unión de tipo rígida o “soldada”.

Fuerzas externas

- $\vec{F}_c = (0, -10.6, 10.6)$ Cuando la estructura está en 0° con respecto al pivote
- $\vec{F}_c = (-7.5, -7.5, 10.6)$ Cuando la estructura está en 45° con respecto al pivote

El torque que genera el motor del corte no se pone explícitamente como un momento externo ya que la función de este es acelerar y mantener la velocidad del disco y se equilibra en el mismo motor mediante esfuerzos interno, pero sí tiene influencia en la estructura de corte representado por la fuerza de corte.

Modelo de elementos finitos

Una vez identificadas las fuerzas externas y las condiciones de borde, para el análisis de esfuerzos en el soporte se generó una malla, como se muestra en la Figura 30. La malla presenta un mayor refinamiento en la zona del orificio donde la estructura se articula con el motor paso a paso, dado que allí se esperaba una mayor concentración de esfuerzos.

En primer lugar, se comparan las fuerzas y los momentos de reacción generados en el pivote a partir de la simulación, verificando que los resultados obtenidos analíticamente son coherentes con los de la simulación. Esta coherencia se evidencia en que las reacciones presentan las mismas direcciones y órdenes de magnitud. Lo anterior puede comprobarse mediante las reacciones mostradas en la Figura 32 y los cálculos analíticos presentados previamente.



Figura 30: Ubicación de las cargas y malla generada para el soporte de corte.

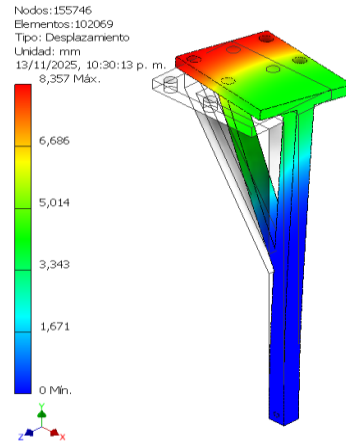


Figura 31: Desplazamientos en el soporte de corte, sin inclinación.

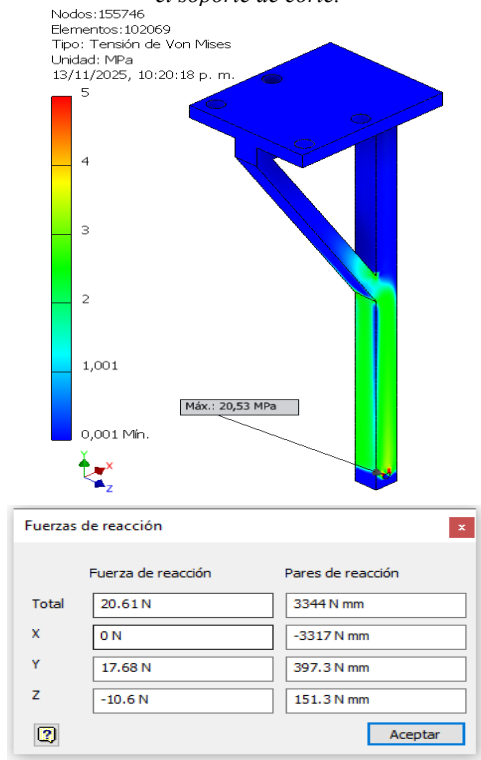


Figura 32: Distribución de esfuerzos en el soporte de corte, sin inclinación.

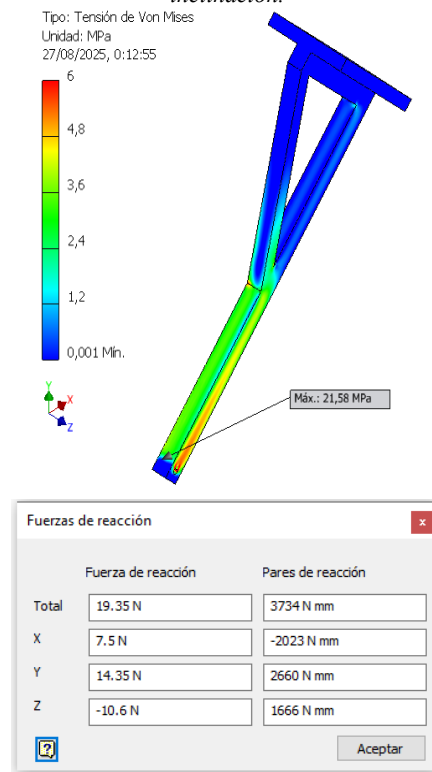


Figura 33: Distribución de esfuerzos en la estructura en una inclinación de 45°.

Resultados para el soporte sin inclinación

Cuando el soporte se encuentra sin inclinación respecto al pivote, la distribución de esfuerzos de Von Mises muestra un valor máximo de 20.53 MPa en el orificio, tal como era previsible debido a la concentración de esfuerzos generada por la geometría. Fuera de esta zona crítica, las tensiones se mantienen en valores bajos en comparación con el límite de fluencia del material PETG (50 MPa). La distribución de esfuerzos de Von Mises y desplazamientos en el soporte se presentan en la Figura 31 y Figura 32 respectivamente.

En este estado de carga, el soporte tiende a deformarse principalmente en la dirección Z, que corresponde a la dirección de aplicación de la fuerza de corte. Debido a la rigidez del soporte,

la zona de acople del motor induce un efecto de “torsión” en el tronco de la pieza, produciendo un desplazamiento de hasta 8 mm en dirección Z. Este valor corresponde al 10% del ancho de la plataforma (80 mm). Aunque este valor es relativamente elevado, es importante señalar que la fuerza que lo produce únicamente actúa durante el proceso de corte y por un periodo de tiempo limitado. Como consecuencia, el corte realizado por la sierra puede presentar una ligera inclinación u oblicuidad sobre la rama; sin embargo, al tratarse de un fenómeno transitorio asociado únicamente al instante del corte, dicho desplazamiento no compromete de manera significativa la funcionalidad ni la integridad estructural del dispositivo.

Resultado para el soporte inclinado

Con una inclinación del soporte respecto al plano del pivote, al igual que en el caso anterior, el modelo analítico y simulado es coherente en las direcciones y magnitudes de las reacciones en el pivote, la distribución de esfuerzos de Von Mises se reparte de manera más uniforme a lo largo de la estructura, como se observa en la Figura 33. Sin embargo, aún persiste un pico elevado de esfuerzos en la zona crítica del orificio del motor paso a paso. Este caso corresponde a una inclinación de 45° , la cual constituye una situación límite, pues en la práctica el soporte no alcanzaría dicha inclinación al entrar en contacto con el tronco de la palmera.

Teniendo lo anterior en cuenta, el análisis de tensiones de Von Mises evidencia que el soporte no fallaría por fluencia. En la condición más crítica, con una tensión máxima de 21.58 MPa, el diseño mantiene un factor de seguridad de 2.3 respecto al límite de fluencia del material (50 MPa).

6.3.4.3 Soporte Ruedas

Para el soporte de las ruedas se emplearon los mismos parámetros de generación de malla que en el caso del soporte de corte, aplicando las fuerzas y momentos determinados previamente en el análisis estático.

Condiciones de frontera en la junta.

$$\begin{aligned} U_x &\neq 0 & U_y &= 0 & U_z &= 0 \\ \theta_x &= 0 & \theta_y &= 0 & \theta_z &= 0 \end{aligned}$$

La junta prismática permite que el soporte se desplace libremente en la dirección axial de su eje, restringiendo tanto los desplazamientos como las rotaciones en las demás direcciones.

Fuerzas externas

-Fuerza de fricción F_f	-Fuerza normal de contacto F_N	-Peso de la estructura principal w_{ES}
-Fuerza del resorte F_R	-Peso del motor y las ruedas $w_m + w_R$	-Peso del soporte w_{sp}

Las direcciones de los momentos generados en la junta prismática del soporte de las ruedas coinciden con las obtenidas en el modelo analítico y sus magnitudes son similares, lo que

garantiza la coherencia entre ambos análisis. Las reacciones obtenidas mediante el modelo de elementos finitos se presentan en la **Error! Reference source not found.**

En la *Figura 35* se presenta la distribución de esfuerzos de Von Mises en el soporte de las ruedas. Se observa que los esfuerzos se concentran principalmente en la zona de la horquilla donde se acopla el motor, así como en los cambios de sección, lo cual es coherente con su condición de concentradores de esfuerzos. Adicionalmente, se aprecia una concentración en la unión prismática entre el soporte de las ruedas y la estructura principal, en la cual solo se permiten desplazamientos axiales en el eje. El esfuerzo máximo se localiza en la transición entre la horquilla y el eje del soporte, alcanzando una magnitud de 12,3 MPa.

Dado que esta magnitud es significativamente inferior al límite elástico del material, se concluye que el soporte no presenta riesgo de falla por fluencia bajo las condiciones de carga evaluadas, teniendo un factor de seguridad mínimo de 4.

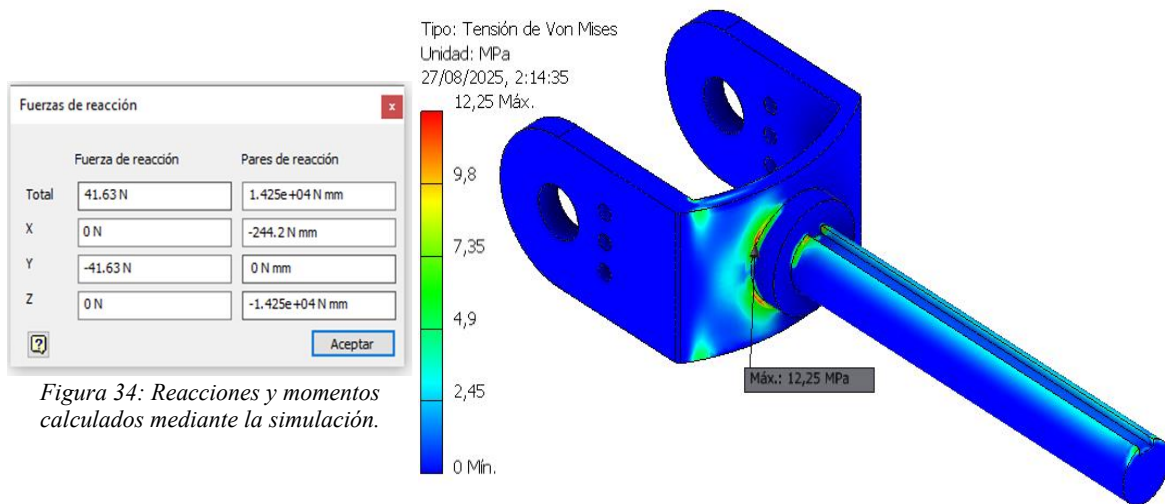


Figura 34: Reacciones y momentos calculados mediante la simulación.

Figura 35: Distribución de esfuerzos de Von Mises en el soporte de ruedas.

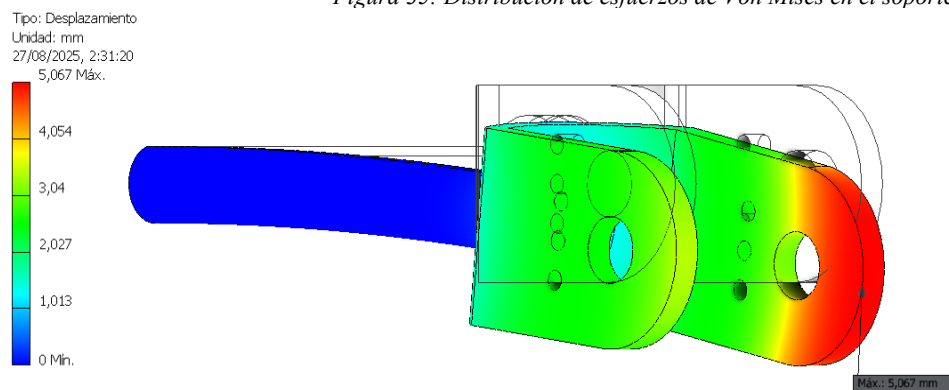


Figura 36: Distribución de desplazamientos en el soporte de ruedas.

En cuanto a los desplazamientos, la zona de la horquilla experimenta deformaciones principalmente asociadas al peso del motor y las ruedas. Como se ilustra en la *Figura 36*, los desplazamientos máximos se presentan en la dirección Y, con una magnitud aproximada de

5 mm. Este valor corresponde a una deformación aceptable dentro del comportamiento estructural, ya que no compromete la estabilidad del soporte ni la funcionalidad del sistema.

6.3.4.4 Estructura principal

Para el análisis estructural de la estructura principal, se emplearon como cargas externas equivalentes las reacciones obtenidas previamente en los análisis estáticos de los subconjuntos acoplados, correspondientes a la estructura de corte y al soporte de ruedas. Dichas reacciones representan las fuerzas y momentos que la estructura principal ejerce sobre cada subconjunto; por lo tanto, al ser aplicadas sobre la estructura principal, se introdujeron con signo opuesto, de acuerdo con el principio de acción-reacción. Este procedimiento permite transferir de forma consistente los efectos mecánicos de los subsistemas hacia la estructura principal, evitando la duplicación de cargas y garantizando la coherencia entre el análisis estático y el análisis por elementos finitos.

Condiciones de frontera en los extremos de la estructura principal.

En cuanto a las condiciones de frontera, los extremos de las estructuras izquierda y derecha se encuentran fijados mediante una bisagra y una abrazadera de palanca, las cuales restringen completamente los grados de libertad de dichas zonas, garantizando el anclaje durante la operación.

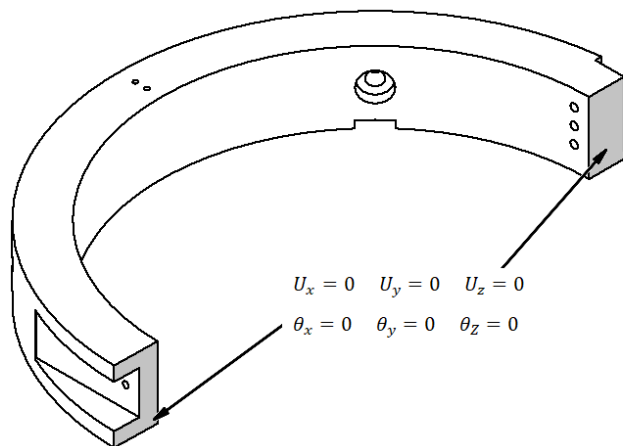


Figura 37: Condiciones de frontera de la estructura principal .

Los resultados del análisis por elementos finitos evidencian que los esfuerzos se concentran principalmente en la zona de la junta donde se acopla el soporte de las ruedas, como se observa en las Figuras 38 y 39. Este comportamiento es coherente con lo esperado, ya que se trata de un punto de aplicación de varias fuerzas y además presenta cambios geométricos que actúan como concentradores de esfuerzos. Sin embargo, la magnitud obtenida es reducida, alcanzando un máximo de 4 MPa en esta región.

Tanto los esfuerzos como los desplazamientos en la estructura resultan bajos debido a la robustez y de esta debido a su espesor, lo que garantiza un adecuado margen de seguridad estructural bajo las condiciones de carga analizadas.

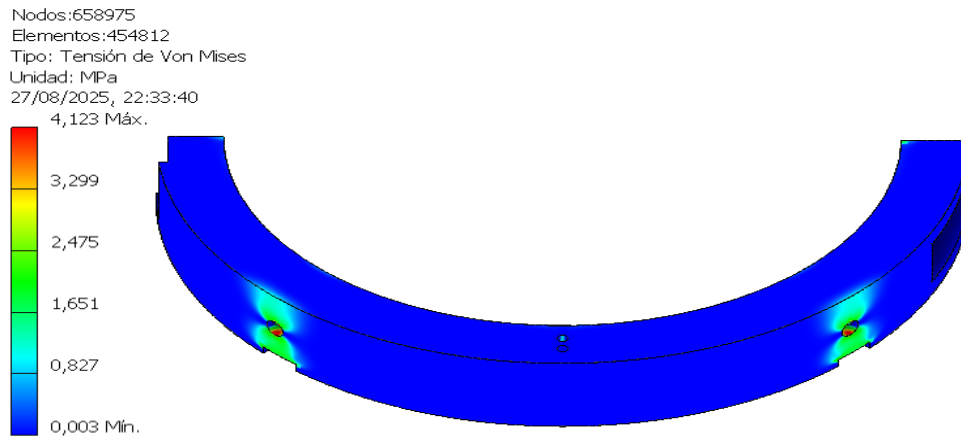


Figura 38: Distribución de esfuerzos de Von Mises en la estructura principal.

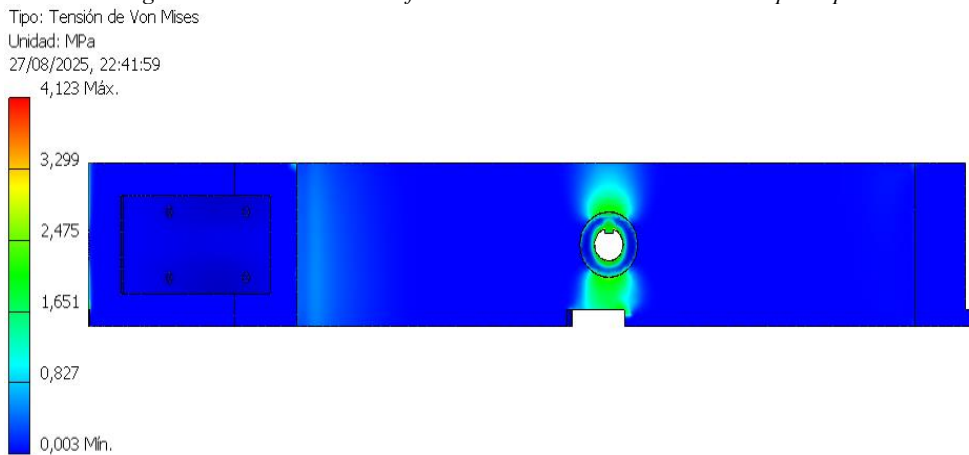


Figura 39: Distribución de esfuerzos en la junta.

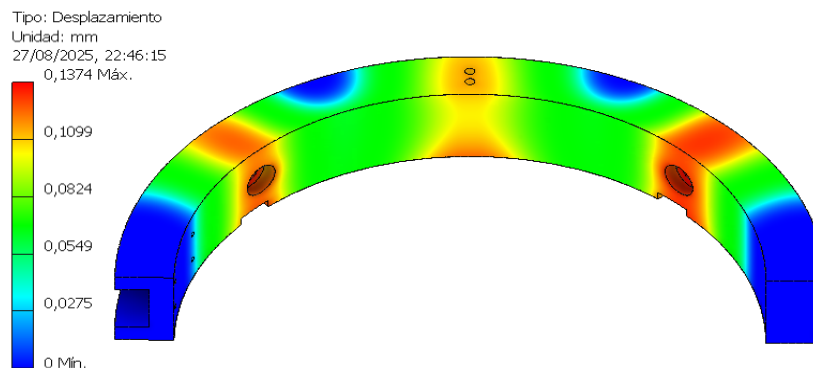


Figura 40: Distribución de los desplazamientos en la estructura principal.

En el modelo ensamblado, los esfuerzos se transmiten a los elementos de acople (la bisagra y la abrazadera de palanca), responsables de mantener fijados los extremos de la estructura. El análisis de tensiones mostró un esfuerzo máximo de Von Mises de 53 MPa localizado en la bisagra, presentado en la Figura 41. Considerando que esta pieza está fabricada en acero inoxidable, con un límite de fluencia promedio de 300 MPa, se concluye que el conjunto no

presenta riesgo de falla por fluencia bajo las cargas establecidas, manteniendo además un factor de seguridad adecuado.

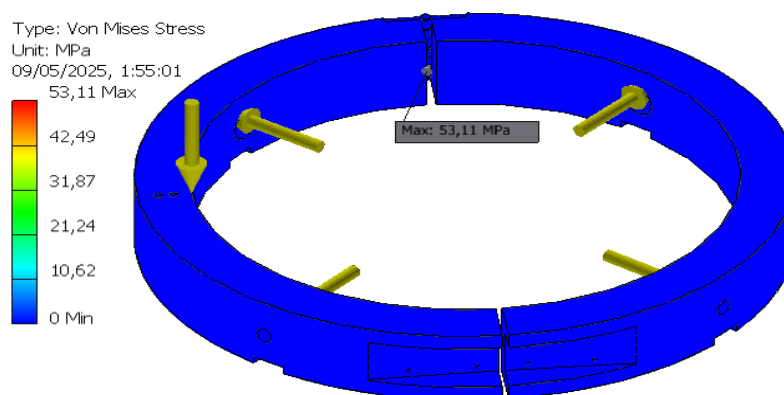


Figura 41: Distribución de Esfuerzos en la estructura principal ensamblada.

Mediante el análisis de esfuerzos de Von Mises, realizado a través de la metodología de elementos finitos, se comprobó que el dispositivo no se encuentra comprometido estructuralmente bajo las condiciones de carga evaluadas. Los resultados muestran que los esfuerzos máximos generados en la estructura se mantienen significativamente por debajo del límite elástico del material, lo que garantiza que no se producirán deformaciones plásticas durante su funcionamiento.

Este comportamiento evidencia que la estructura trabaja dentro de un rango seguro, incluso considerando los puntos críticos donde se concentran las cargas, como uniones y zonas de transición geométrica. Asimismo, la inclusión de un factor de seguridad implícito entre el esfuerzo máximo registrado y la resistencia del material confirma que el diseño posee una holgura adecuada frente a posibles variaciones de carga, condiciones imprevistas y a las propias incertidumbres inherentes a los procesos de manufactura aditiva (impresión 3D), donde las propiedades mecánicas pueden variar según parámetros de impresión, orientación de las capas y calidad del material. En conjunto, el análisis confirma la viabilidad mecánica del diseño y respalda su capacidad de funcionamiento confiable en las condiciones consideradas.

6.3.5 Sistema de control

El sistema de control constituye el eje central de la integración entre los distintos subsistemas mecánicos y eléctricos del dispositivo. Su función principal es coordinar de manera precisa y segura el funcionamiento de los mecanismos de tracción, posicionamiento y corte, asegurando una operación sincronizada y confiable durante las pruebas y validaciones del prototipo. En esta etapa se desarrolló la arquitectura electrónica y lógica de control, definiendo las funciones que debía cumplir cada motor, los componentes electrónicos necesarios para su implementación y la estructura de conexión que permite el manejo remoto del dispositivo mediante comunicación inalámbrica.

El componente principal del sistema de control es la placa Arduino UNO R4 WiFi, seleccionada por su versatilidad y capacidad de comunicación inalámbrica. Esta versión integra conectividad Bluetooth Low Energy (BLE) y WiFi. Además, la plataforma Arduino ofrece una amplia compatibilidad con librerías y módulos de control, lo que simplifica la programación y la integración de los drivers utilizados en el prototipo funcional, garantizando un desarrollo más ágil y modular.

6.3.5.1 Funciones requeridas del sistema de control

El sistema de control, basado en un Arduino, fue diseñado para gestionar tres tipos de motores que intervienen directamente en el funcionamiento del dispositivo: cuatro motores DC del sistema de arrastre (JGB-545-CE), un motor paso a paso (23HS5628) y un motor DC destinado al sistema de corte (accionado mediante relé).

El control de cada uno de estos elementos se estructuró de la siguiente manera:

1. Motores de arrastre (JGB-545-CE):

Estos motores permiten ejecutar las maniobras de desplazamiento y posicionamiento del dispositivo sobre el tronco de la palmera. El sistema de control posibilita:

- El funcionamiento simultáneo de los cuatro motores en una misma dirección (avance).
- El funcionamiento simultáneo en sentido contrario (retroceso).
- Control individual de cada motor, con capacidad de girar hacia adelante y hacia atrás.
- Control por pares de motores, con la posibilidad de girar hacia adelante y hacia atrás:
 - Motores 1 y 2.
 - Motores 1 y 3.
 - Motores 1 y 4.
 - Motores 2 y 3.
 - Motores 2 y 4.
 - Motores 3 y 4.
- Una función global para detener todos los motores al mismo tiempo.

2. Motor paso a paso (23HS5628):

Este motor controla el movimiento angular del sistema de corte. Su programación permite:

- Capacidad de girar en ambas direcciones.
- La configuración precisa del número de pasos, garantizando un posicionamiento controlado.
- Ajuste de la velocidad de avance y retroceso.

3. Motor DC de corte:

Este motor acciona directamente la sierra circular del sistema de corte. Su operación se controla mediante una función simple de encendido y apagado, sincronizada con las maniobras de posicionamiento del brazo.

4. Seguridad ante pérdidas de conexión

El sistema incorpora un mecanismo de seguridad que monitorea de forma continua el estado de la conexión Bluetooth. En caso de detectarse una desconexión del dispositivo de control, el Arduino ejecuta automáticamente una orden de movimiento en reversa para todos los motores, evitando que el sistema quede detenido de manera indefinida en una condición potencialmente insegura. Cuando la conexión Bluetooth se restablece, el sistema detiene inmediatamente todos los motores y permanece en estado de espera, reanudando el movimiento únicamente cuando se reciben nuevos comandos explícitos por parte del usuario.

La implementación de este sistema de control permite coordinar todas las acciones del dispositivo de manera segura, confiable y eficiente, asegurando la correcta interacción entre los subsistemas de tracción, corte y control, y garantizando la estabilidad operativa del prototipo durante las pruebas y validaciones.

6.3.5.2 Componentes del sistema de control

Para los motores JGB-545-CE, se seleccionaron los módulos puente H BTS7960, seleccionados porque cada motor trabaja a 3 A en carga máxima (y un poco más en condición de bloqueo), mientras que estos módulos pueden soportar corrientes de hasta 42 A, garantizando un margen de seguridad suficiente. Como limitante solo se puede controlar un motor por módulo.

Componente	Cantidad	Representación
Arduino Uno R4	1	
Modulo puente H BTS7960	4	
Driver TB6600	1	
Modulo Relé 12V	1	

Tabla 12: Componentes del sistema de control.

El motor paso a paso Nema 23 se controla mediante un driver TB6600, ya que este dispositivo soporta corrientes de hasta 4.5 A, cubriendo la demanda del motor (2.8 A por fase) y permitiendo aprovechar su torque nominal. Además, puede trabajar con la fuente disponible de 12VDC (y hasta 42VDC), ofrece control de microstepping para un movimiento más preciso, y cuenta con protecciones contra sobre corriente, sobrecalentamiento y cortocircuito entre fases, lo que le aporta robustez y fiabilidad. El TB6600 recibe las señales de control directamente desde el Arduino. Por último, el motor de corte solo requiere un módulo relé de 12V, ya que su operación se limita al encendido y apagado, trabajando siempre en un único sentido de giro. En la Tabla 12 se presentan los elementos de control del dispositivo.

6.3.5.3 Esquema de conexión

El Arduino Uno R4 dispone de 14 pines digitales y 6 pines analógicos, lo que suma un total de 20 pines de propósito general. Los pines digitales trabajan únicamente en dos estados: HIGH (1,5 V) o LOW (0 V), y se emplean para tareas como encender o apagar componentes, controlar motores o generar señales PWM (modulación por ancho de pulso) que permiten regular la velocidad de los motores, los pines analógicos, en cambio, pueden leer valores continuos en un rango de 0 a 5 V, por lo que se utilizan principalmente para la lectura de sensores. Sin embargo, en el caso del Arduino Uno R4, estos pines también pueden configurarse como salidas digitales adicionales cuando se requieren más líneas de control.

En este dispositivo para controlar los motores JGB-545-CE mediante los módulos BTS7960, se necesitan tres pines digitales por motor (IN1, IN2 y PWM), los pines IN1 e IN2 determinan la dirección de giro, mientras que el pin PWM regula la velocidad, en total, para los cuatro motores de arrastre se requieren 12 pines digitales. Para el motor paso a paso NEMA 23, controlado a través del TB6600, se emplean tres pines digitales, EN (Enable) que habilita o deshabilita el controlador, DIR (Direction) que establece el sentido de giro del motor y PUL (Pulse) donde cada pulso indica al motor cuántos pasos debe avanzar, y la frecuencia de estos pulsos que determina la velocidad. Finalmente, el motor de corte solo necesita un pin digital, encargado de accionar un relé de 12V que permite encender o apagar el motor, dado que este opera únicamente en un sentido.

Componente	Pines Arduino / Motor				Función	Color Cable
	1	2	3	4		
Motor JGB- Módulo BTS7960	D2	D5	D8	D11	PWM	
	D3	D6	D8	D12	IN1	
	D4	D7	D10	D13	IN2	
Motor NEMA 23- Controlador TB6600	A0				STEP	
	A1				DIR	
	A2				ENABLE	
Motor de corte- Relé	A3				ON/OFF	

Tabla 13: Distribución de los pines.

Una vez determinadas las funciones y en qué tipo de pines se van a conectar cada uno de los componentes del sistema de control, se presenta en la Tabla 13 resumen indicando que pines le corresponde a cada motor y el color del cable en el diagrama de conexión presentado en la

Figura 42, el código en Arduino con que funciona el sistema se presenta en el ANEXO 2: Código de Arduino.

Una vez desarrollado el código que permite controlar el sistema mediante las funciones establecidas, el siguiente paso fue adaptarlo para habilitar el control también a través de Bluetooth, manteniendo exactamente los mismos comandos utilizados en el puerto serial.

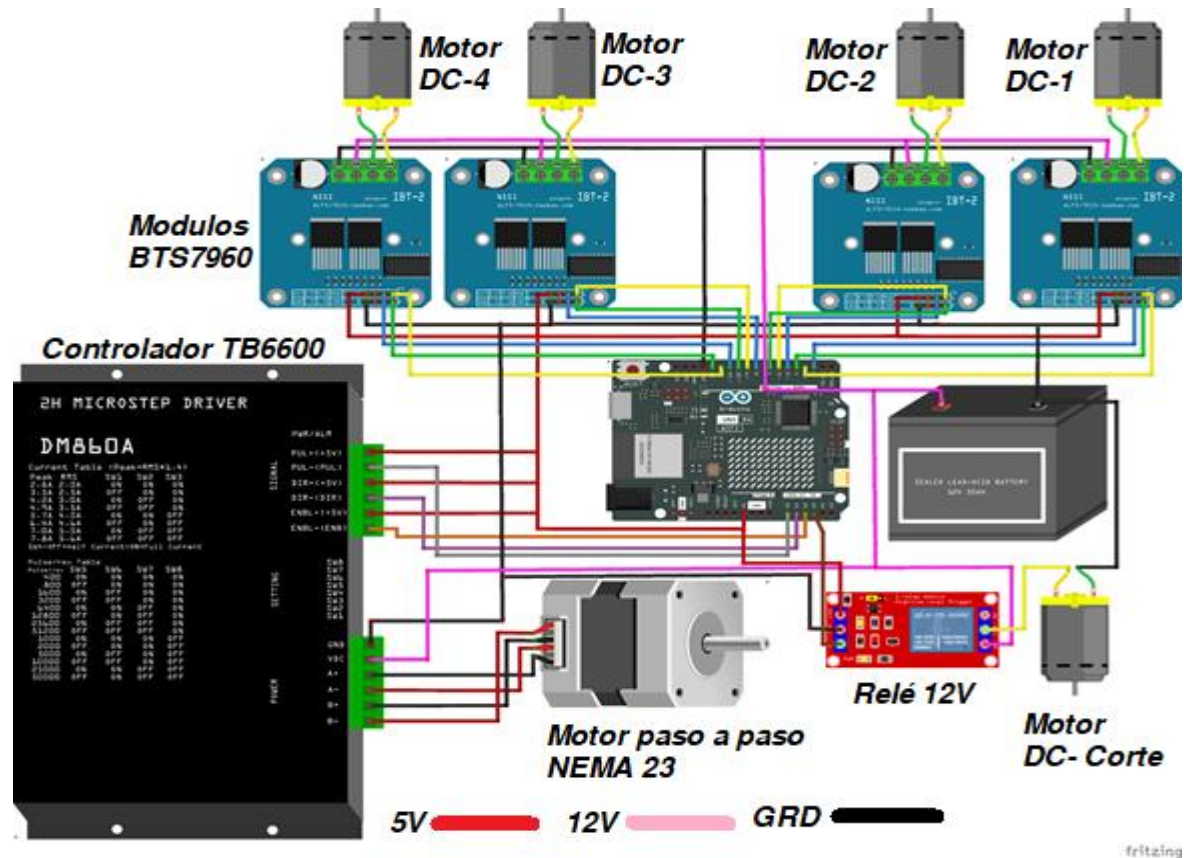


Figura 42: Esquema de conexión del sistema de control.

6.3.5.4 Conexión Bluetooth

La implementación de la conexión Bluetooth tuvo como objetivo permitir el control inalámbrico en tiempo real del dispositivo, eliminando la necesidad de conexiones físicas durante las pruebas y facilitando la operación remota por parte del usuario. Esta funcionalidad aprovecha las capacidades de “Bluetooth Low Energy” (BLE) integradas en la placa Arduino UNO R4 WiFi, lo que posibilita el intercambio de comandos y datos entre el prototipo y una aplicación móvil o un computador.

El Arduino UNO R4 WiFi incorpora un chip ESP32-S3-MINI, el cual soporta el protocolo Bluetooth Low Energy (BLE). A diferencia de los módulos clásicos como el HC-05 o el HC-06, que establecen una comunicación tipo puerto serie virtual (en la cual los datos enviados desde un celular o PC llegan al Arduino como si fueran escritos directamente en el monitor serial del IDE), el chip ESP32 no es compatible con ese perfil de comunicación tradicional.

En consecuencia, la transferencia de datos debe implementarse mediante la arquitectura propia de BLE, basada en servicios y características.

En este esquema, un servicio representa un conjunto de funcionalidades específicas (por ejemplo, el control de los motores), mientras que una característica actúa como un canal de datos dentro de ese servicio, a través del cual se envían o reciben mensajes. Aunque este enfoque requiere una configuración más detallada, ofrece ventajas significativas frente al Bluetooth clásico, como menor consumo energético, mayor velocidad de conexión y mejor compatibilidad con dispositivos móviles modernos.

Para implementar la conexión por Bluetooth en el código del Arduino se utilizó la librería ArduinoBLE, que permite definir y gestionar los servicios y características de manera sencilla. La comunicación se realizó mediante la aplicación para Android “*Serial Bluetooth Terminal*”, la cual permite enviar comandos al Arduino a través de BLE, funcionando de manera análoga al monitor serial del IDE y emulando así el comportamiento de una conexión clásica.

Además, esta aplicación ofrece la opción de programar atajos con comandos predefinidos, lo que facilita y agiliza el control del sistema sin necesidad de escribir cada instrucción manualmente. Gracias a esta integración, el Arduino puede controlarse tanto desde un PC mediante USB (serial cableado) como desde un dispositivo móvil mediante Bluetooth. En condiciones de uso típicas, el módulo BLE integrado en la placa Arduino UNO R4 WiFi ofrece un alcance efectivo de entre 15 y 25 metros, suficiente para el control remoto seguro del prototipo en campo o laboratorio. En entornos abiertos y con línea de vista directa, la conexión puede extenderse hasta 100 metros [49].

6.4 Fase 4: Pruebas y refinamiento

En esta fase se llevó a cabo la fabricación del prototipo y la verificación experimental de su funcionamiento, con el propósito de validar las funcionalidades definidas en el diseño. El proceso incluyó la impresión 3D de las piezas principales, el ensamblaje del dispositivo y la realización de pruebas controladas de movimiento y posicionamiento sobre un modelo representativo de tronco de palmera, orientadas a la validación de los requerimientos funcionales y operativos definidos en la matriz de requerimientos.

6.4.1 Parámetros de impresión

El material de impresión es el PETG con diámetro de filamento de 1.75mm, los parámetros de impresión para obtener mejores propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 14. La selección de estos parámetros se realizó con el objetivo de garantizar una adecuada resistencia mecánica y estabilidad dimensional de las piezas impresas, de modo que el prototipo pudiera ser sometido a las pruebas funcionales sin fallas estructurales prematuras.

La temperatura del extrusor debe mantenerse elevada para favorecer la fusión entre capas y reducir la porosidad del material. Asimismo, el uso de una cama caliente es fundamental, ya que previene deformaciones (*warping*) y mejora la adhesión de la primera capa al lecho de impresión. Como se mencionó anteriormente, el espesor de capa es uno de los parámetros

más relevantes para obtener buenas propiedades mecánicas. Un valor de 0.2 mm se considera óptimo para equilibrar resistencia estructural y tiempo de impresión.

En el caso del PETG, una velocidad de impresión baja mejora significativamente la unión entre capas, debido a su lenta disipación térmica. El patrón de relleno también influye de manera decisiva en el comportamiento mecánico de las piezas. El patrón "Honeycomb" (panal) resulta especialmente adecuado, ya que distribuye las cargas de forma eficiente y contribuye a una mayor rigidez estructural.

En términos de propiedades mecánicas, lo ideal es contar con un alto porcentaje de relleno, cercano al 75%. Sin embargo, en la práctica, un valor tan elevado no resulta conveniente, ya que equivale prácticamente a imprimir una pieza sólida. Esto contrarresta varias de las principales ventajas de la impresión 3D, como la reducción del tiempo de fabricación, el menor peso y el ahorro de material. Por esta razón, es preferible optar por un porcentaje de relleno más conservador, que logre un equilibrio adecuado entre resistencia, eficiencia y economía. Finalmente, es importante evitar una ventilación excesiva, ya que puede enfriar prematuramente el material, impidiendo una correcta adherencia entre capas.

Esta configuración permitió obtener piezas suficientemente resistentes para la validación funcional del prototipo, sin incurrir en sobrecostos ni tiempos excesivos de fabricación, coherentes con el carácter conceptual del modelo desarrollado.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Temperatura del extrusor</i>	<i>230-250°C</i>
<i>Temperatura de la cama</i>	<i>80°C</i>
<i>Espesor de capa</i>	<i>0.2mm</i>
<i>Velocidad de impresión</i>	<i>50 mm/s</i>
<i>Patrón de relleno</i>	<i>Panal (Honeycomb)</i>
<i>Porcentaje de relleno</i>	<i>35%</i>
<i>Velocidad del ventilador</i>	<i>30-50%</i>

Tabla 14: Parámetros de impresión.

6.4.2 Fabricación del prototipo conceptual y pruebas

La fabricación del prototipo conceptual (TRL 3) se realizó en una escala 1:2 en sus dimensiones, con el fin de validar el principio de funcionamiento del dispositivo y la interacción entre sus subsistemas. La impresión a escala permitió asegurar la disponibilidad de impresoras 3D capaces de producir las piezas, reducir la cantidad de filamento requerido y disminuir el tiempo de fabricación. Al ser un dispositivo más liviano, fue posible incorporar motores de menor tamaño y costo, lo que representó una ventaja económica durante la fase de pruebas. Además, el uso de un prototipo reducido facilitó su manipulación, transporte y ensamble, favoreciendo la validación del concepto en condiciones controladas, permitiendo evaluar el cumplimiento de los requerimientos funcionales y de operación definidos en la matriz de requerimientos.

El primer componente construido fueron las ruedas Mecanum, con un diámetro de 50 mm (en el diseño original, el diámetro es de 100 mm). Estas ruedas fueron impresas en 3D utilizando material PETG, siguiendo los parámetros de impresión detallados en la Tabla 14.

Las ruedas Mecanum se fabricaron en pares (dos ruedas derechas y dos izquierdas) y cada una incorpora ocho rodillos ensamblados al cuerpo principal y al eje mediante tornillos con tuerca, lo que garantiza una fijación firme y funcional, como se muestra en las Figuras 44 y 45.

El prototipo se encuentra impulsado por motores JGB37-500, los cuales entregan un torque de 1.2 Nm a 8 rpm. Estos motores, más económicos y compactos que los contemplados en el diseño real (JGB37-545-CE), presentan como principal limitante una baja velocidad de giro, aunque aportan un par elevado para el tamaño reducido del prototipo.

Una vez impresas las ruedas, se procedió al rediseño y fabricación del acople con los motores del prototipo, debido a que la geometría de los JGB37-500 difiere de la de los GB37-545-CE. El nuevo acople asegura una conexión precisa y robusta entre el eje del motor y las ruedas, garantizando la correcta transmisión del movimiento y el funcionamiento eficiente del sistema de tracción.

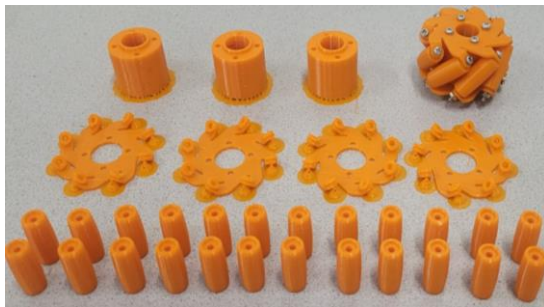


Figura 43: Ruedas Mecanum impresas en 3D.



Figura 44: Ruedas Mecanum ensambladas por pares, motor JGB37-500.

Una vez fabricadas todas las piezas, se procedió al ensamblaje del prototipo y la instalación del sistema de control, como se muestra en la Figura 45. El modelo a escala fue diseñado para operar sobre troncos de palmera de hasta 12 cm de diámetro, lo que permitió simular el comportamiento real del dispositivo bajo condiciones equivalentes.



Figura 45: Prototipo fabricado y ensamblado.

Con el prototipo completamente ensamblado, se iniciaron las pruebas experimentales, cuyo propósito fue verificar las funcionalidades principales del dispositivo (elevación, descenso y rotación alrededor del tronco) asociadas a los requerimientos de movimiento, operación y control del sistema. Los ensayos confirmaron la viabilidad técnica del principio de

funcionamiento, demostrando que el prototipo es capaz de ascender, posicionarse y orientarse de manera estable y controlada.

El desarrollo y validación de este modelo corresponde a un Nivel de Madurez Tecnológica TRL 3, de acuerdo con la escala propuesta por la NASA, ya que el dispositivo alcanzó la demostración experimental del concepto en un entorno controlado. Este avance representa un paso intermedio dentro del proceso de maduración tecnológica, sirviendo como base para el futuro desarrollo de un prototipo funcional a escala real (TRL 5), en el cual se evaluarán de forma completa los requerimientos de desempeño y operación en condiciones reales.

En el ANEXO 3: Pruebas de funcionamiento, se presentan los videos que evidencian la funcionalidad y operatividad del prototipo, mostrando su comportamiento bajo condiciones reales de prueba y validando el cumplimiento de las funcionalidades anteriormente mencionadas.



Figura 46: Pruebas de campo del prototipo.

Los resultados observados durante las pruebas experimentales realizadas con el prototipo conceptual constituyen la base para la validación de los requerimientos del sistema, cuyos valores obtenidos y nivel de cumplimiento se presentan de manera resumida en la matriz de cumplimiento de requerimientos.

6.5 Presupuesto

El presente apartado incluye únicamente los costos directos asociados a la adquisición de los componentes necesarios para la construcción del prototipo funcional (TRL 5). No se consideran los gastos correspondientes a la fase de prototipado (prototipo conceptual, TRL 3), manufactura ni mano de obra, por lo que este análisis constituye una estimación económica preliminar orientada al desarrollo académico del proyecto.

Uno de los elementos clave del sistema son las ruedas Mecanum, las cuales pueden ser adquiridas en el mercado o fabricadas mediante impresión 3D, como se hizo durante el prototipado. Cada alternativa presenta ventajas y desventajas que impactan tanto en el desempeño del dispositivo como en el presupuesto final. Las ruedas comerciales, con un costo aproximado de \$105.000 cada una, ofrecen beneficios importantes como una mayor durabilidad gracias a sus materiales de fabricación (por ejemplo, chasis de aluminio) y un mejor agarre en la superficie. Por el contrario, las ruedas Mecanum fabricadas mediante

impresión 3D tienen un costo más económico, alrededor de \$40.000 por pieza, aunque presentan desventajas como un desgaste más rápido de sus componentes y un agarre inferior. Para este presupuesto se considerarán las ruedas adquiridas en el mercado, con el fin de estimar los costos del dispositivo en condiciones de funcionamiento óptimas y con componentes de mejor calidad. En la Tabla 15 se presentan los costos asociados a cada uno de los componentes del dispositivo.

Elemento	Cantidad	Valor unitario (COP)	Total (COP)
<i>Motorreductor 12VDC Modelo: JGB37-545-CE</i>	4	140.000	560.000
<i>Motor 12V DC 775</i>	1	55.000	55.000
<i>Motor paso a paso Nema 23</i>	1	80.000	80.000
<i>Ruedas Mecanum 100 mm</i>	4	105.000	420.000
<i>Bisagra cuadrada de acero inoxidable</i>	1	6.000	6.000
<i>Abrazadera de palanca</i>	1	20.000	20.000
<i>Rodamiento Referencia: 628</i>	4	4.000	16.000
<i>Disco de corte tipo sierra de 4.5 pulgadas.</i>	1	20.000	20.000
<i>Baterías</i>	4	45.000	180.000
<i>Muelle de compresión</i>	4	33.000	132.000
<i>Filamento PETG</i>	1 kg	75.000	75.000
<i>Arduino Uno R4</i>	1	125.000	125.000
<i>Puente H- BTS7960</i>	4	26.000	104.000
<i>Driver TB6600</i>	1	55.000	55.000
<i>Módulo Relé 12V</i>	1	10.000	10.000
<i>Total</i>			1'858.000

Tabla 15: Costos de adquisición de los elementos del prototipo funcional.

El costo total estimado para la construcción del dispositivo asciende a \$1.858.000 COP, valor que se considera adecuado en función de la complejidad del sistema desarrollado y de los objetivos del proyecto. Este presupuesto permite integrar componentes de buena calidad, garantizando un desempeño confiable durante la fase experimental. Además, el diseño propuesto busca mejorar las condiciones de seguridad física de los recolectores y optimizar la eficiencia en el proceso de recolección.

Los costos del dispositivo podrían reducirse en aproximadamente un 15% si se utilizaran ruedas Mecanum fabricadas mediante impresión 3D, ya que estos componentes representan uno de los elementos más costosos después de los motores. No obstante, no es viable reducir los costos asociados a los motores, dado que la referencia seleccionada garantiza el correcto funcionamiento y desempeño del dispositivo.

Si bien en este presupuesto no se incluye la fase de prototipado conceptual, como se mencionó anteriormente, se estima que fabricar el prototipo conceptual tuvo un costo de aproximadamente 20% del costo que tendría la construcción del prototipo funcional (alrededor de \$450.000 COP). Cabe señalar que en estos costos no se contempla la impresión 3D, dado que se utilizaron los laboratorios y recursos proporcionados por la universidad. Dado que no existen dispositivos equivalentes disponibles en el mercado, el análisis costo-beneficio se fundamenta en la relación entre el costo de fabricación y las funcionalidades alcanzadas por el prototipo, constituyendo una referencia técnica y económica para futuros desarrollos o escalamientos del sistema.

6.6 Matriz de cumplimiento

Como resultado del proceso de definición de necesidades, formulación de requerimientos de diseño y desarrollo del sistema a nivel conceptual y de detalle, se elaboró la matriz de cumplimiento presentada en la Tabla 16. Esta matriz integra los resultados obtenidos en las etapas anteriores del diseño, incluyendo la selección de conceptos, el dimensionamiento de los componentes, los cálculos de desempeño y las pruebas funcionales realizadas sobre el prototipo.

ID	Requisito	Valor objetivo	Método de verificación	Valor obtenido/ Resultado
R-01	Peso	≤ 12 kg	Medición directa / estimación	9 kg
R-02	Adaptabilidad geométrica	10 – 40 cm	Diseño/ Prueba de ajuste	Validación parcial a escala; adaptación hasta 12 cm de diámetro.
R-03	Altura operativa	≥ 17 m	Validación de diseño	20 m
R-04	Resistencia ambiental	Exposición a humedad y radiación	Material de impresión	Validación basada en selección de material
R-05	Movimiento	Operación estable y controlada	Prueba funcional de movimiento	Movimientos logrados
R-06	Operación remota	≥ 3 m desde la base	Prueba funcional de la conexión Bluetooth	>10 m sin obstáculos
R-07	Precisión de corte	Ángulo ajustable respecto al eje del tronco	Análisis funcional	El mecanismo de corte permite el ajuste del ángulo respecto al eje del tronco.
R-08	Seguridad de operación	Detención segura del sistema	Análisis funcional del comportamiento ante fallas	Retroceso automático y parada segura ante pérdida/restablecimiento de conexión Bluetooth.
R-09	Seguridad del operador	Operación completa desde el suelo	Prueba funcional	Operación realizada completamente desde el suelo, sin exposición del operador
R-10	Autonomía energética	Operación continua durante al menos un ciclo completo de cosecha	Medición/ estimación del tiempo de operación continua	Entre 5 y 8 ciclos con carga completa
R-11	Tipo de alimentación	Baterías portátiles recargables e intercambiables, disponibles comercialmente	Revisión técnica y verificación comercial	Baterías recargables comerciales (12V)
R-12	Sistema de control centralizado	Control del sistema mediante un único microcontrolador	Verificación de la arquitectura de control	Control centralizado mediante Arduino
R-13	Facilidad de uso	≤ 5 acciones principales	Análisis funcional	5 acciones (subir, bajar, corte, girar y parar)
R-14	Mantenimiento	≤ 15 min	Prueba de desmontaje	10 min
R-15	Componentes comerciales	Componentes estándar de mercado	Lista de materiales	Cumple
R-16	Costo de fabricación	≤ 2 SMMLV	Estimación de costos	Aprox. 1SMMLV

Tabla 16: Matriz de cumplimiento.

La matriz de cumplimiento permite verificar de manera objetiva que el dispositivo desarrollado satisface los requerimientos establecidos inicialmente, mediante parámetros medibles y métodos de verificación coherentes con la metodología adoptada. De esta forma, se asegura la trazabilidad entre las decisiones de diseño, los análisis realizados y el desempeño final del sistema, consolidando la validación global del dispositivo antes de su evaluación final.

7.CONCLUSIONES

Se diseñó un dispositivo mecánico para la cosecha de cocos en palmeras de gran altura, cumpliendo con los criterios de funcionalidad, resistencia estructural y viabilidad técnica establecidos. Los resultados obtenidos muestran que el prototipo desarrollado es estructuralmente estable y mecánicamente viable bajo las condiciones de operación evaluadas.

La revisión y comparación de los sistemas de cosecha disponibles a nivel nacional e internacional permitió reconocer las limitaciones de las tecnologías actuales en términos de accesibilidad, costos y adaptabilidad a las condiciones del territorio. Este análisis sirvió como referencia para desarrollar un diseño propio, más liviano, económico y de fácil implementación.

Asimismo, se documentó y presentó el diseño conceptual y de detalle del prototipo funcional, integrando análisis de viabilidad técnica, económica y estructural. El análisis de esfuerzos mediante el criterio de von Mises, aplicado a través del método de elementos finitos, demostró que los componentes principales (estructura de corte, soporte de ruedas y estructura principal) trabajan dentro del rango elástico del material PETG, garantizando la integridad estructural del conjunto.

Se construyó un prototipo conceptual, a escala, utilizando manufactura aditiva, lo cual permitió validar de manera experimental el funcionamiento del sistema de desplazamiento sobre la palmera. El uso de impresión 3D permitió reducir peso, costos y complejidad de manufactura, demostrando su aplicabilidad en el desarrollo de equipos agroindustriales ligeros.

El prototipo no solo demuestra la viabilidad del concepto, sino que también establece una base sólida para futuras pruebas en campo con un dispositivo a escala real, orientadas a optimizar el diseño y promover su implementación como herramienta de apoyo para mejorar la seguridad y productividad en la recolección de cocos en la región.

REFERENCIAS

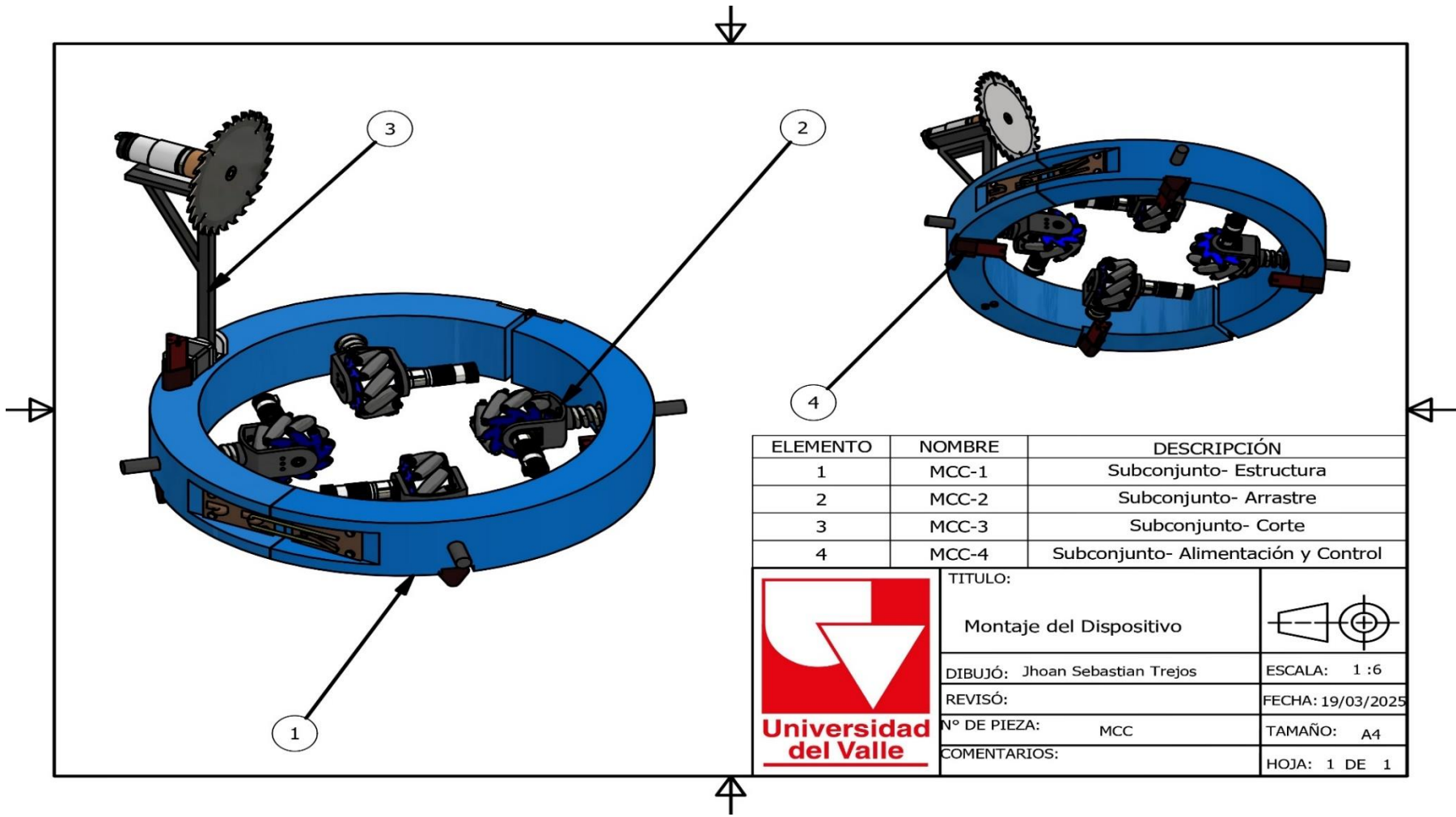
- [1] B. Milo, “Cocotero”, *Offarm: farmacia y sociedad*, vol. 20, núm. 4, pp. 195–196, may 2001.
- [2] L. Medardo, “Guía técnica del cultivo del coco”, *ICA: Instituto Colombiano Agropecuario*, p. 53, 2003, [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/19798>.
- [3] Proyecto pacífico biocultural, “Estopa de coco, oportunidad de la bioeconomía en el pacífico colombiano”, 2025.
- [4] Safety Work, “La cruda realidad de las caídas”, Safety Work.
- [5] D. J. V. Peña, “Contexto de cadena coco”, 2022. doi: 10.21930/agrosavia.fichascontexto.2022.2.
- [6] M. de Agricultura y Desarrollo Rural-MADR, “PECTIA :Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación del sector Agropecuario colombiano (2017-2027)”, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/12759>
- [7] A. M. Ochoa Castañeda y J. D. Cortés Bayona, “Protección fitosanitaria en palmas”, Instituto Colombiano Agropecuario - ICA.
- [8] C. Isaza y G. de Investigación en Palmas Silvestres Neotropicales, *Cartilla para la cosecha y el manejo de palmas productoras de frutos (asaí, canangucho y milpesos)*. Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [9] A. P. Mohankumar, D. A. Krishnan, y K. Kathirvel, “Development of ergo refined coconut tree climbing device ”, *African Journal of Agricultural*, vol. 8, núm. 44, pp. 5530–5537, may 2013.
- [10] V. Pooja, M. K. Shamin, y P. R. Jayan, “Static analysis of a ‘sit and stand’ type coconut tree climber V. Pooja,” *J. Trop. Agric.*, vol. 60, núm. 2, pp. 273–281, 2022.
- [11] M. Dhafir, M. Idkham, A. Lubis, y P. Azrial, “Work motion study on coconut tree climbing using a portable coconut climbing equipment”, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1290, núm. 1, p. 12006, may 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1290/1/012006.
- [12] R. Ramírez-Ramírez y F. F. Hahn-Schlam, “ROBOT TREPADOR DE PALMERAS Y SISTEMA ASOCIADO PARA LA DETECCIÓN DE COCOS (Cocos nucifera L.)”, *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, vol. 5, núm. 1, pp. 3–10, may 2013, doi: 10.5154/r.inagbi.2013.04.001.
- [13] A. P. Dubey, S. M. Pattnaik, A. Banerjee, R. Sarkar, y S. K. R., “Autonomous Control and Implementation of Coconut Tree Climbing and Harvesting Robot”, *Procedia Comput. Sci.*, vol. 85, pp. 755–766, 2016, doi: 10.1016/j.procs.2016.05.263.

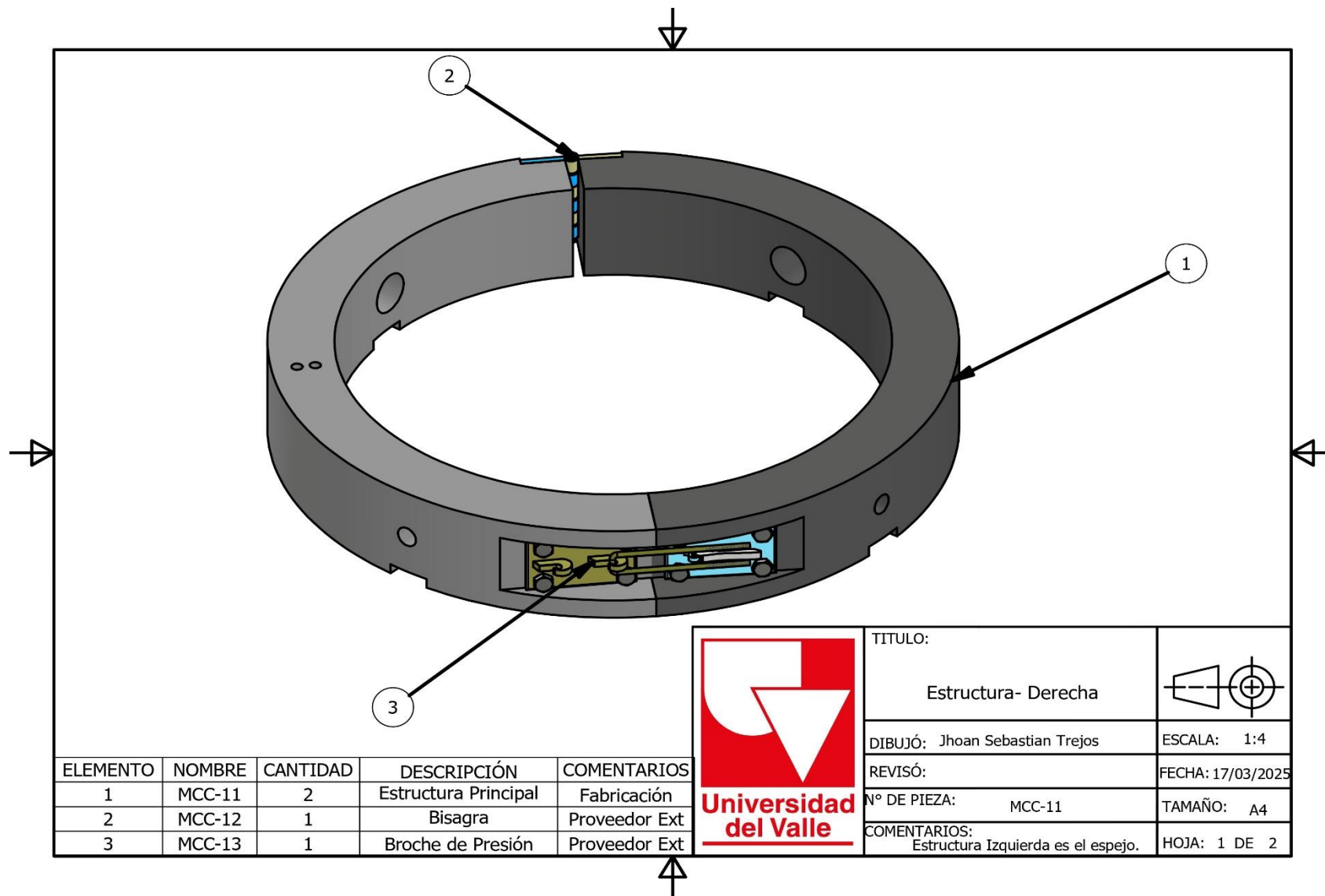
- [14] T. S. Wibowo, I. A. Sulistijono, y A. Risnumawan, “End-to-end coconut harvesting robot”, en *2016 International Electronics Symposium (IES)*, IEEE, may 2016, pp. 444–449. doi: 10.1109/ELECSYM.2016.7861047.
- [15] S. Maheswaran, S. Sathesh, G. Saran, y B. Vivek, “Automated coconut tree climber”, en *2017 International Conference on Intelligent Computing and Control (I2C2)*, IEEE, may 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/I2C2.2017.8321858.
- [16] S. Parvathi y S. T. Selvi, “Design and fabrication of a 4 Degree of Freedom (DOF) robot arm for coconut harvesting”, en *2017 International Conference on Intelligent Computing and Control (I2C2)*, IEEE, may 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/I2C2.2017.8321925.
- [17] P. Subramanian y T. S. Sankar, “Development of a novel coconut-tree-climbing machine for harvesting”, *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 51, núm. 5, pp. 2757–2775, may 2023, doi: 10.1080/15397734.2021.1907756.
- [18] R. K. Megalingam *et al.*, “Amaran: An Unmanned Robotic Coconut Tree Climber and Harvester”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 26, núm. 1, pp. 288–299, may 2020, doi: 10.1109/TMECH.2020.3014293.
- [19] A. L. de Souza *et al.*, “COLHEITADEIRA DE COCO”, Centro Universitário FEI, 2020.
- [20] B. Kailashkumar, S. S. Sivakumar, J. J. Gunasekar, P. K. Padmanathan, V. A. Albert, y R. Ravikumar, “Selection of a Cutting Mechanism and Optimization of Parameters for Coconut Harvesting Drone”, *Agricultural Science Digest - A Research Journal*, vol. 43, núm. 3, pp. 382–389, may 2023, doi: 10.18805/ag.D-5610.
- [21] R. P. Ferreira, “ESTUDO E CONCEITO DE UM SISTEMA DE COLHEITA DE FRUTOS DE ÁRVORES DA FAMÍLIA”, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.
- [22] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, y K.-H. Grote, *Engineering Design*. London: Springer London, 2007. doi: 10.1007/978-1-84628-319-2.
- [23] K. Ulrich, S. D. Eppinger, y M. C. Yang, *Product Design and Development*, Seventh Edition. 2020.
- [24] N. Cross, *Design thinking: Understanding How Designers Think and Work*, 2nd ed. Bloomsbury Publishing, 2023.
- [25] G. E. Dieter y L. C. Schmidt, *Engineering Design*, Fifth Edition. McGraw-Hill, 2013.
- [26] D. Systemes, “Discover Material extrusion, also known as 3D Printing FDM with 3DEXPERIENCE Make and Bombyx”, mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/make/service/3d-printing-service/fdm-fused-deposition-modeling>

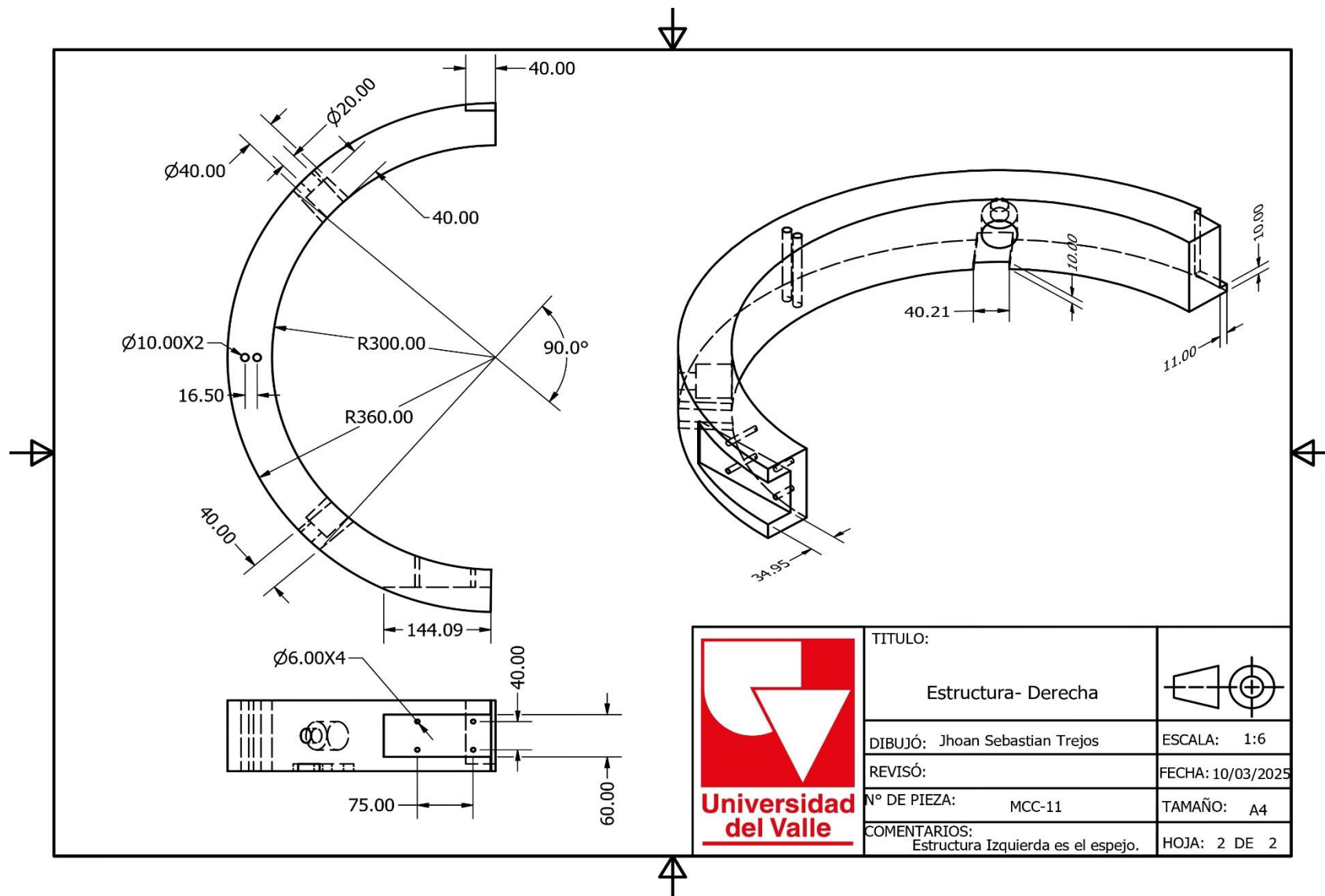
- [27] rigid.ink, “PETG DATA SHEET”.
- [28] IEMAI, “PETG Technical Data Sheet (TDS)”.
- [29] “PETG”, mayo de 2018. [En línea]. Disponible en: <https://bigrep.com/filaments/petg/>
- [30] MatterHackers, “The best 3D printing filament for outdoor use”. [En línea]. Disponible en: https://www.matterhackers.com/articles/the-best-3d-printing-filament-for-outdoor-use?_x_tr_hist=true
- [31] BigRep, “PLA Filament - affordable & versatile 3D Printing Material”, mayo de 2018. [En línea]. Disponible en: <https://bigrep.com/filaments/pla/>
- [32] R. A. Auras, L.-T. Lim, S. Selke, y H. Tsuji, *Poly(lactic acid): Synthesis, structures, properties, processing, applications, and end of life*, 2a ed. John Wiley & Sons, 2022.
- [33] C. Niedojadlo, “Is PLA Safe for Outdoor 3D Printing Applications? A Comprehensive Guide”, 3D Printing Canada. [En línea]. Disponible en: <https://3dprintingcanada.com/blogs/news/pla-safe-for-outdoor-3d-printing>
- [34] J. V. M. Osejos, “Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi-rigido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes”, Escuela Politécnica Nacional, 2016.
- [35] M. V. Peña, J. R. Suárez, y D. R. Ardila, “Caracterización de propiedades mecánicas de piezas en ABS en función de parámetros de proceso de manufactura aditiva FDM”, en *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Asociación Española de Ingeniería Mecánica, may 2016.
- [36] J. Giri, A. Chiwande, Y. Gupta, C. Mahatme, y P. Giri, “Effect of process parameters on mechanical properties of 3d printed samples using FDM process”, *Mater. Today Proc.*, vol. 47, pp. 5856–5861, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.283.
- [37] M.-H. Hsueh *et al.*, “Effect of Printing Parameters on the Thermal and Mechanical Properties of 3D-Printed PLA and PETG, Using Fused Deposition Modeling”, *Polymers (Basel)*., vol. 13, núm. 11, p. 1758, may 2021, doi: 10.3390/polym13111758.
- [38] R. Kumaresan, M. Samykano, K. Kadirgama, A. K. Pandey, y Md. M. Rahman, “Effects of printing parameters on the mechanical characteristics and mathematical modeling of FDM-printed PETG”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 128, núm. 7–8, pp. 3471–3489, oct. 2023, doi: 10.1007/s00170-023-12155-w.
- [39] C. G. Manning, “Technology Readiness Levels”, NASA. Consultado: el 11 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/>
- [40] W. Killmann y D. Fink, “Coconut palm stem processing. Technical handbook”, 1996.

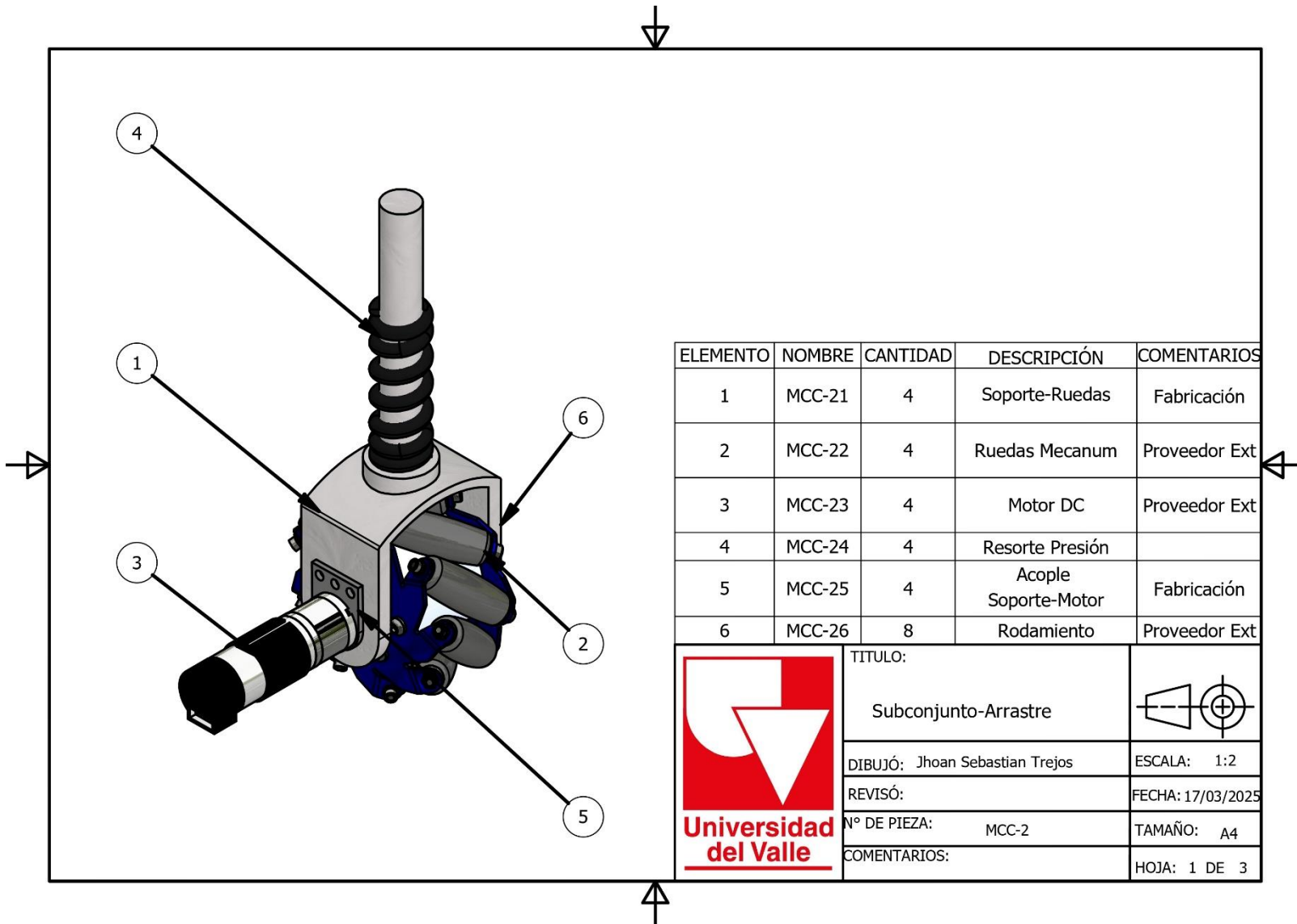
- [41] S. Qun y Z. M. Ripin, “MODELING OF CUTTING FORCE FOR PALM OIL FRONDS”, *Engenharia Agrícola*, vol. 43, núm. 4, 2023, doi: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v43n4e20230081/2023.
- [42] stepIM, “NEMA 17-23-34 DATASHEET”.
- [43] O. Mysiukiewicz, J. Sulej-Chojnacka, M. Kotkowiak, T. Wiśniewski, A. Piasecki, y M. Barczewski, “Evaluation of the Oil-Rich Waste Fillers’ Influence on the Tribological Properties of Polylactide-Based Composites”, *Materials*, vol. 15, núm. 3, p. 1237, feb. 2022, doi: 10.3390/ma15031237.
- [44] E. Aslan, G. Akıncıoğlu, y E. Şirin, “A Comparative Study on Friction Performance and Mechanical Properties of Printed <sc>PETG</sc> Materials With Different Patterns”, *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 142, núm. 27, jul. 2025, doi: 10.1002/app.57136.
- [45] K. Mateja, “Prototype of 3D printed mecanum wheel”, *Technical Sciences*, vol. 26, ene. 2023, doi: 10.31648/ts.8415.
- [46] G. Chisiu, N.-A. Stoica, y A.-M. Stoica, “Friction Behavior of 3D-printed Polymeric Materials Used in Sliding Systems”, *Materiale Plastice*, vol. 58, núm. 1, pp. 176–185, abr. 2021, doi: 10.37358/MP.21.1.5457.
- [47] F. Sojoodi Farimani, M. de Rooij, E. Hekman, y S. Misra, “Frictional characteristics of Fusion Deposition Modeling (FDM) manufactured surfaces”, *Rapid Prototyp. J.*, vol. 26, núm. 6, pp. 1095–1102, abr. 2020, doi: 10.1108/RPJ-06-2019-0171.
- [48] Autodesk, “Guía de usuario de Inventor 2025”. Consultado: el 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2025/ESP/?guid=GUID-B73B2C75-4AA4-4F9E-9BC4-4AB8D26C1765>
- [49] H. Siebeneicher, “Bluetooth® Low Energy”, ARDUINODOCS. Consultado: el 10 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://docs.arduino.cc/learn/communication/bluetooth/>

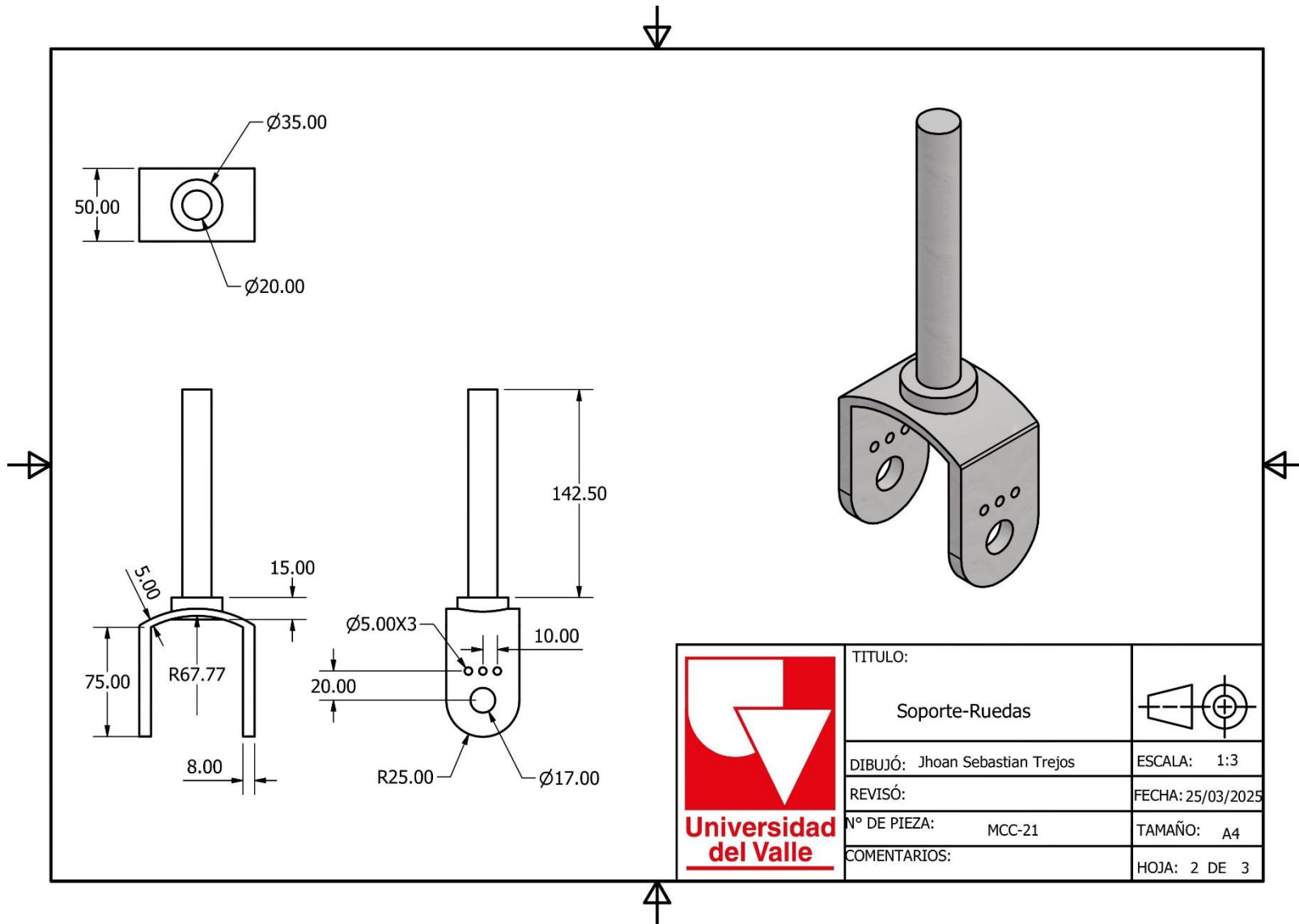
ANEXO 1: Planos de detalle

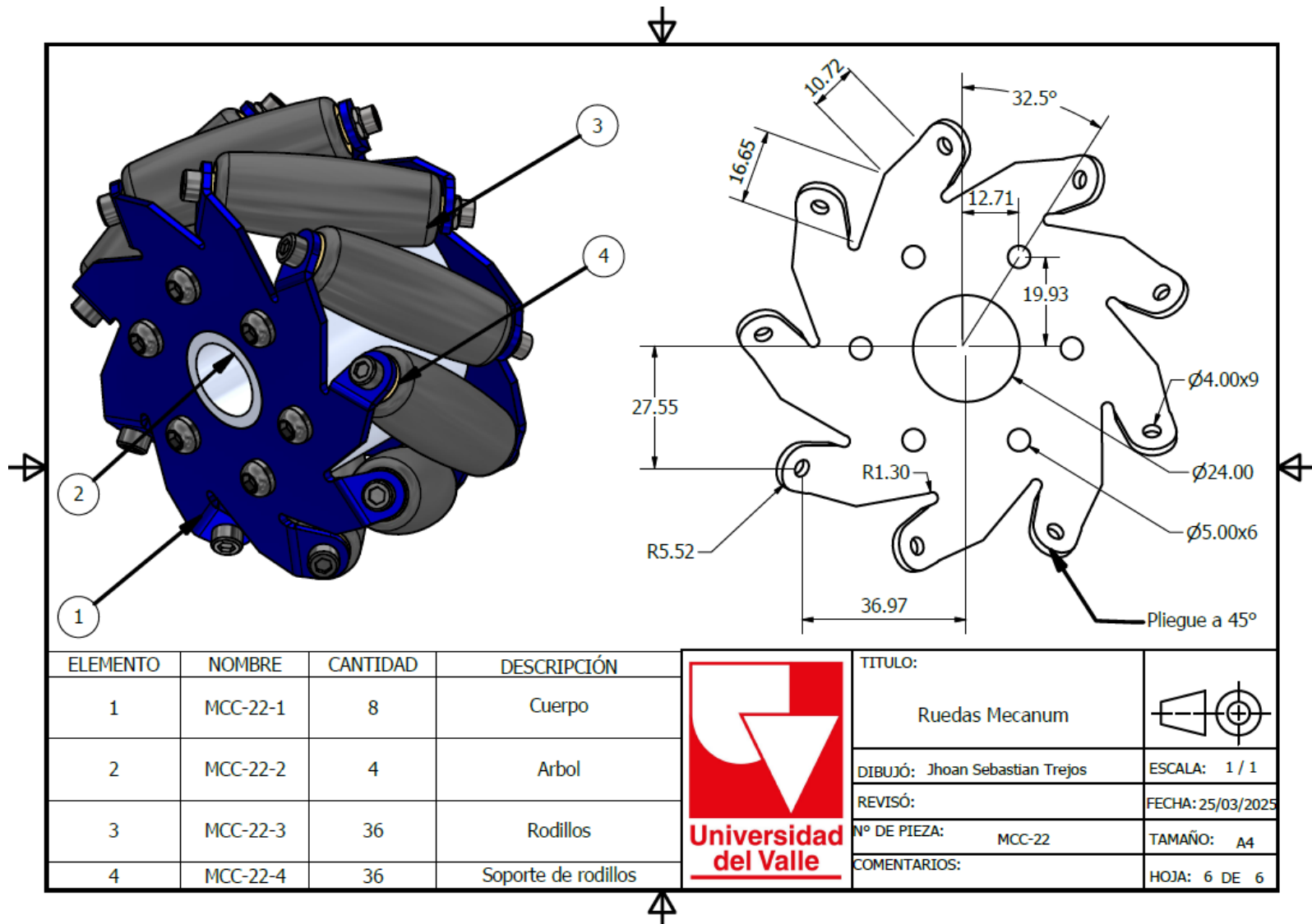


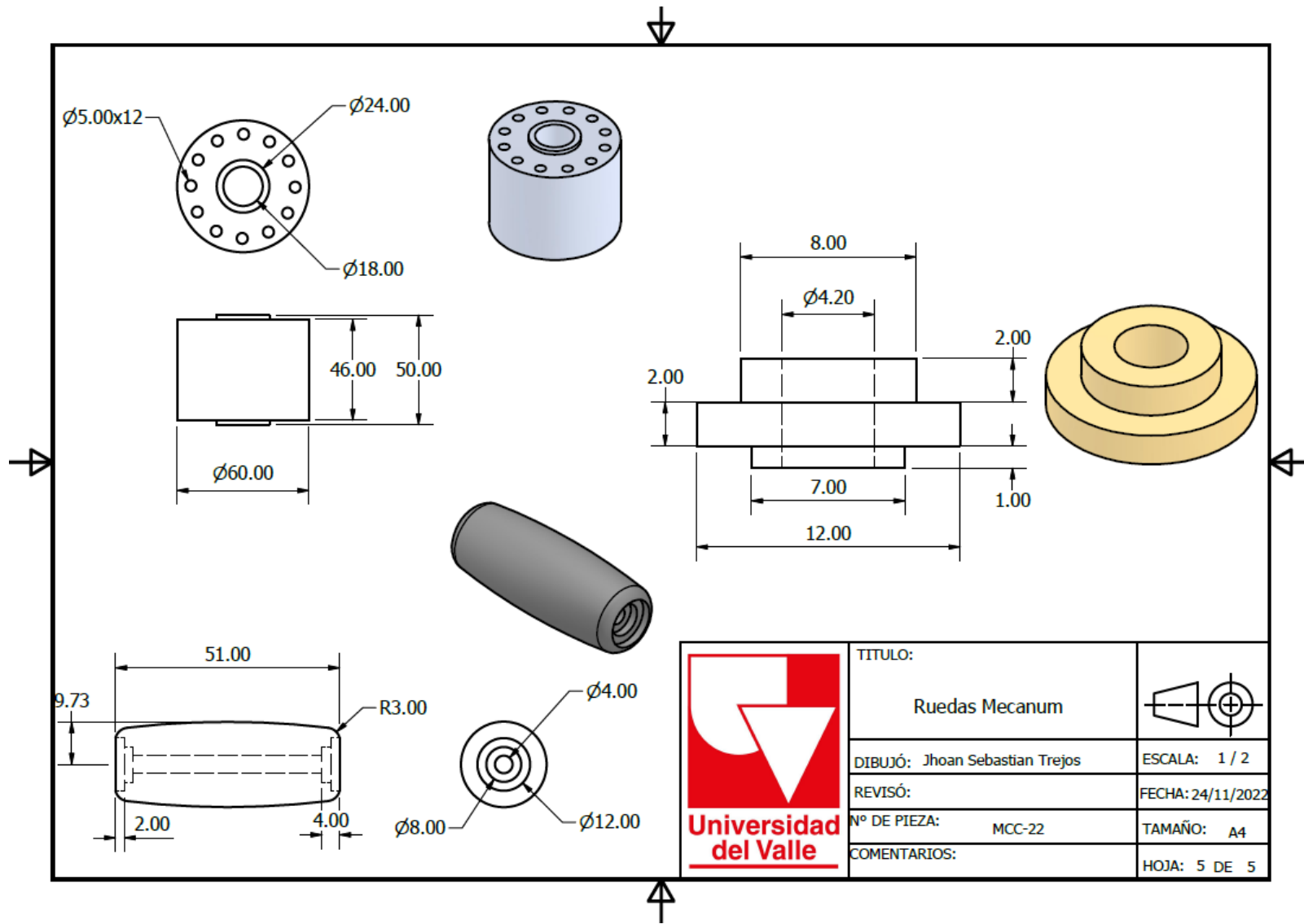


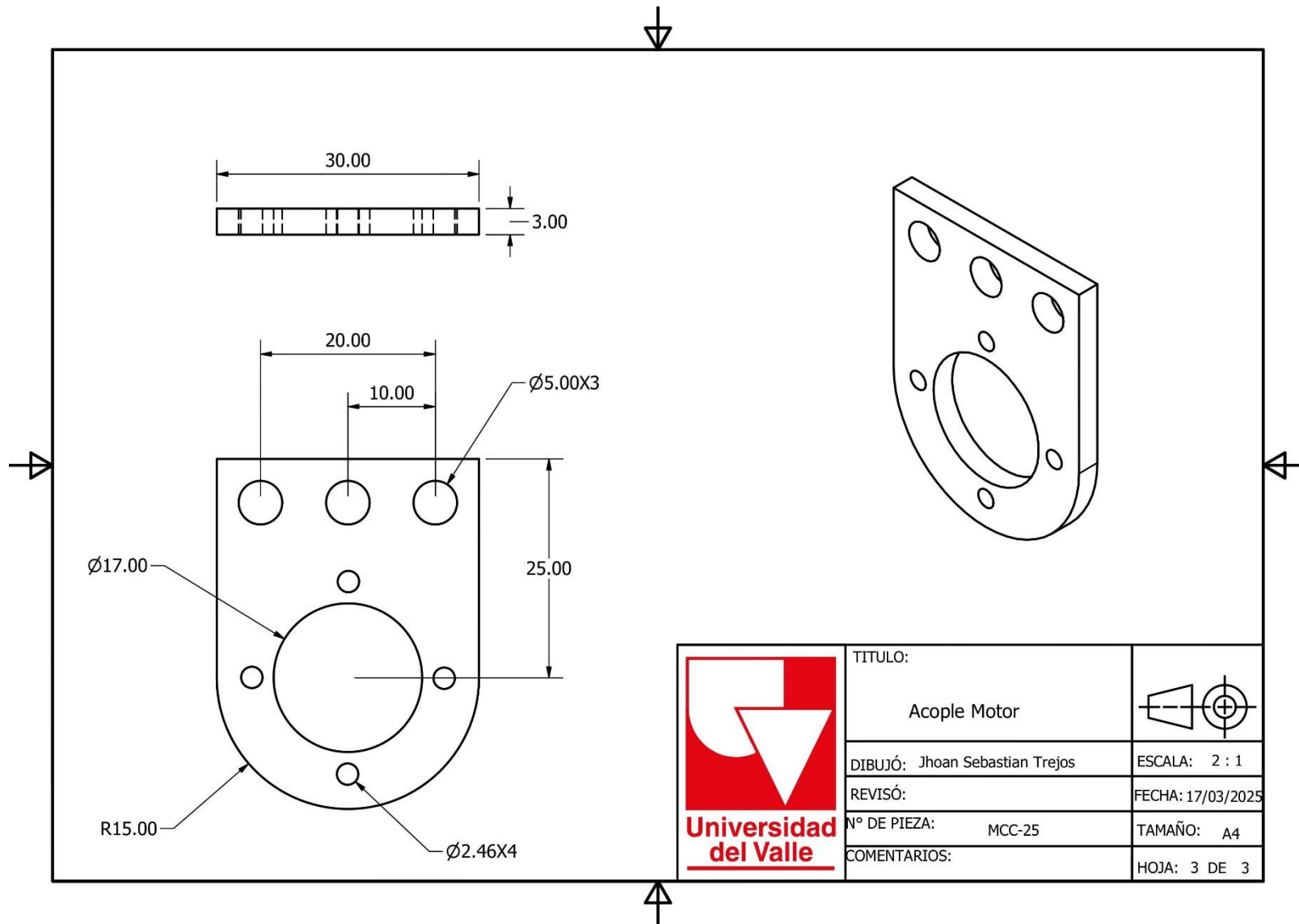


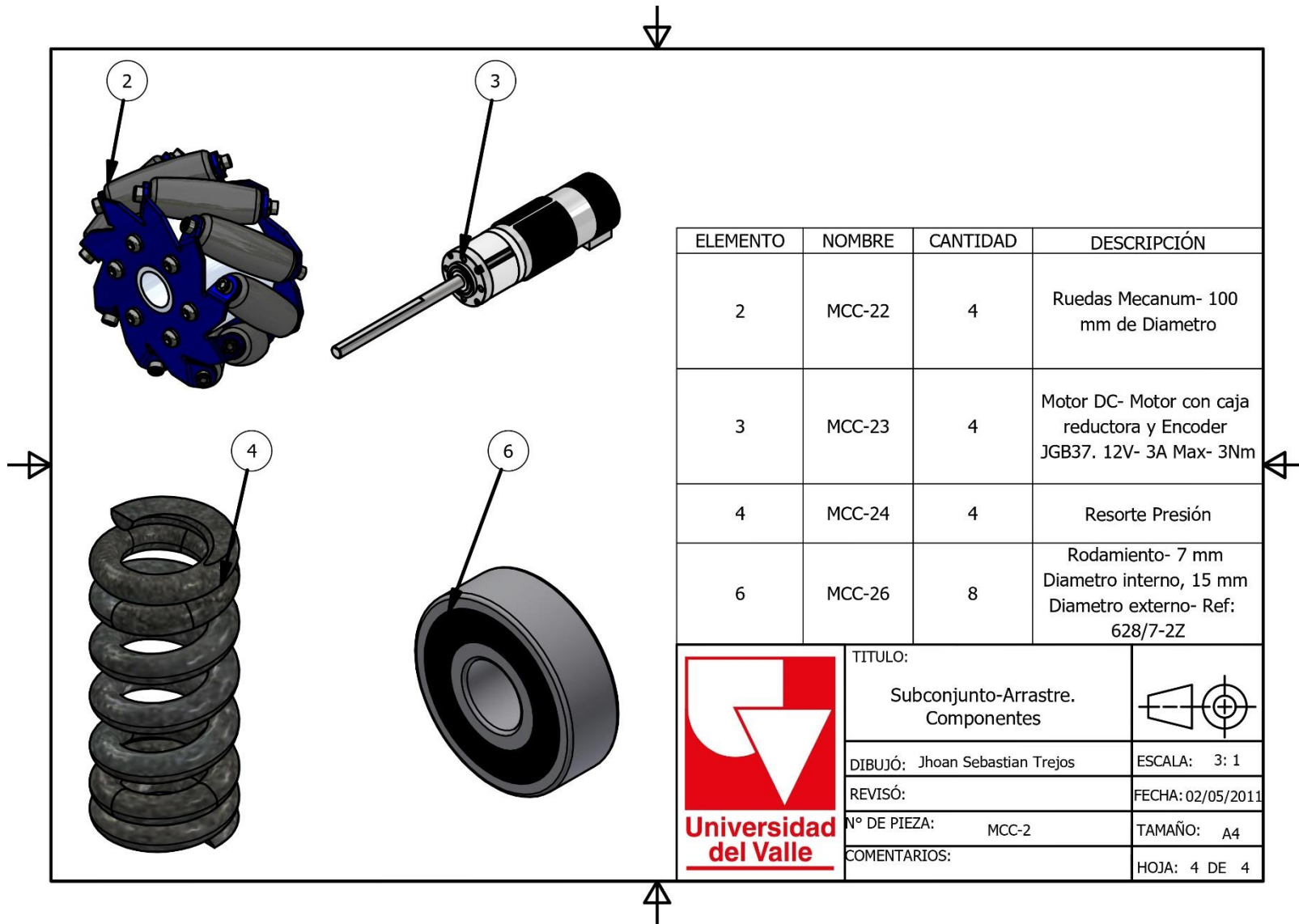


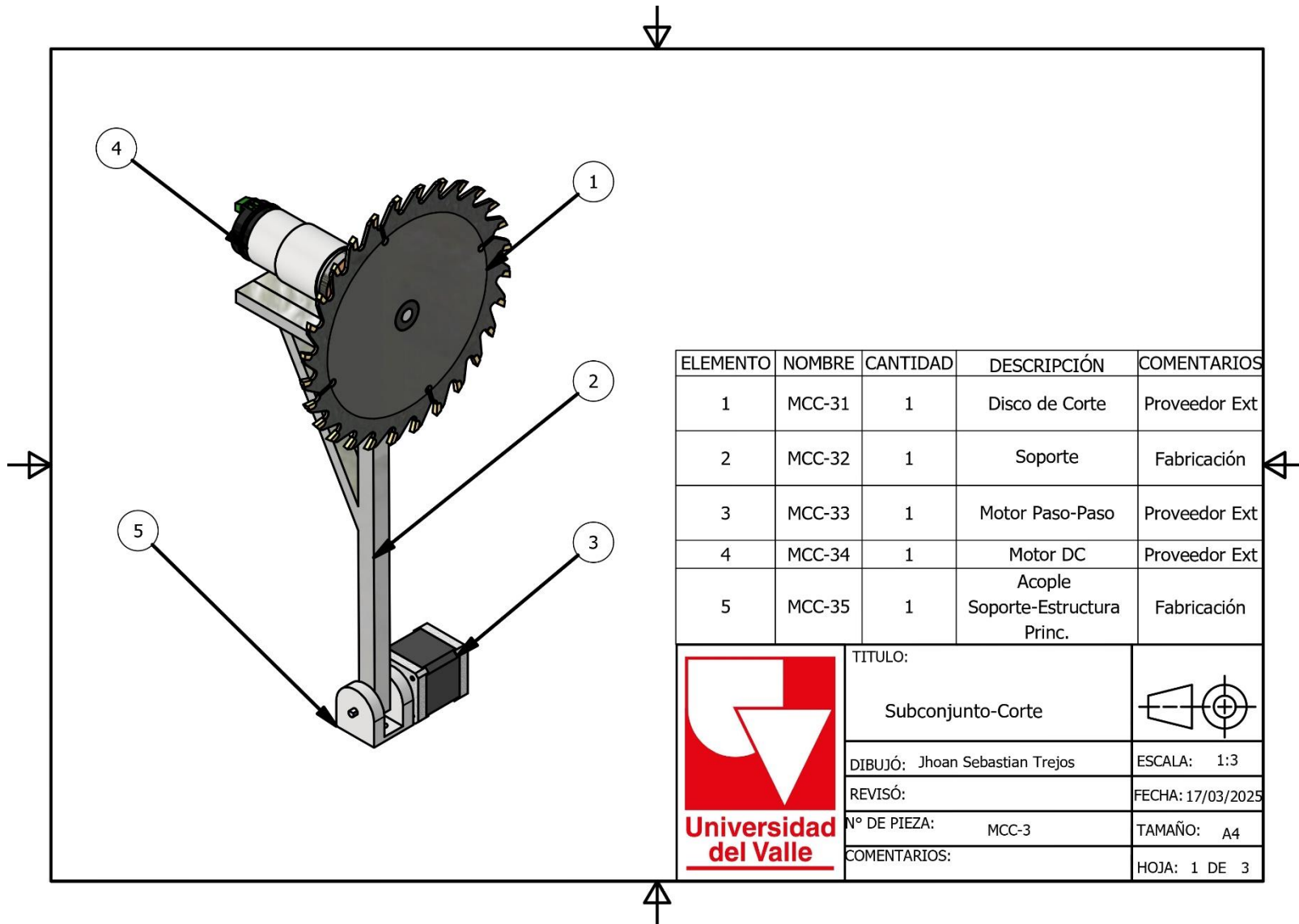


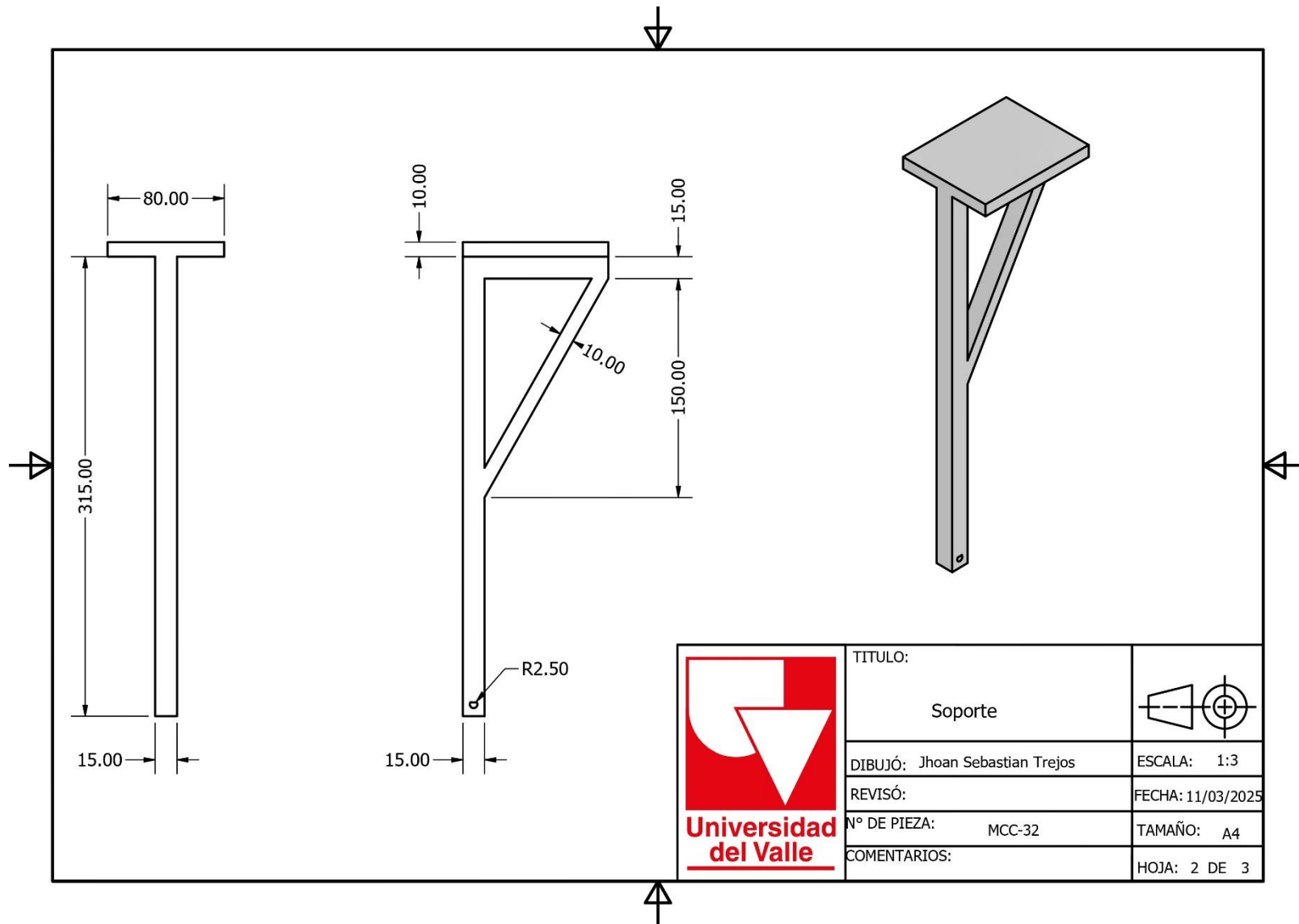


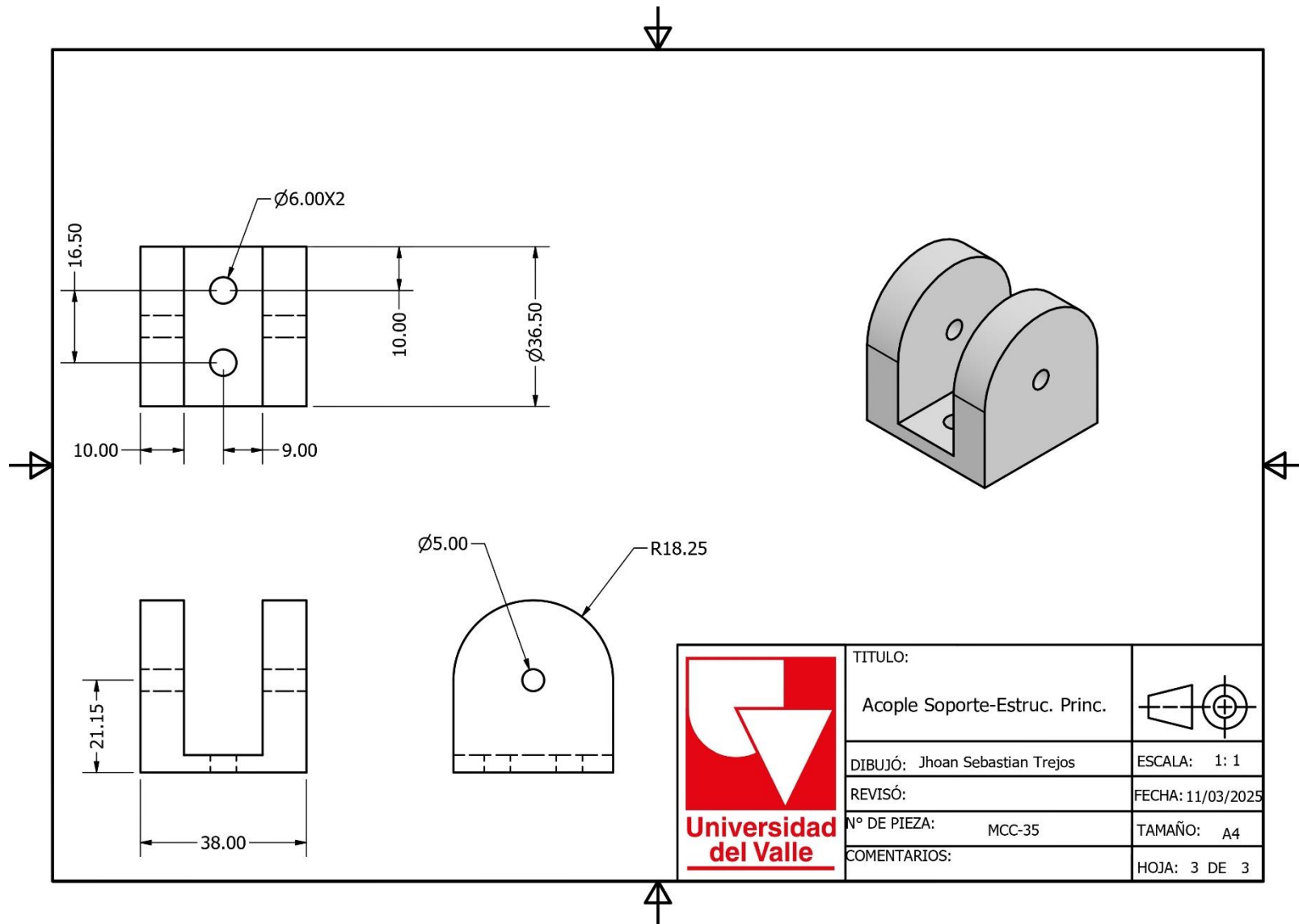












ANEXO 2: Código de Arduino

A continuación se presenta el código de Arduino para el prototipo funcional y la explicación de algunas funciones y líneas del código.

```
// Definición de pines para cada motor
// Motores JGB-545-CE (Modulo BTS7960 con 3 pines: PWM, IN1, IN2)
int pwmPins[4] = {2, 5, 8, 11}; // PWM de cada motor, Control
                                // de Velocidad
int in1Pins[4] = {3, 6, 9, 12}; // Dirección IN1, Control de
                                // dirección
int in2Pins[4] = {4, 7, 10, 13}; // Dirección IN2, Control de
                                // dirección
// Motor paso a paso NEMA 23 (Controlador TB6600)
#define STEP_PIN A0 //Control de los pasos
#define DIR_PIN A1 //Sentido de giro
#define ENABLE_PIN A2 //Habilita o deshabilita el controlador
// Motor DC de corte con relé
#define RELAY_PIN A3 //Controla el encendido o el apagado
// Una vez definidos los pines, se configuran con los pines del
// Arduino
const int numMotors = 4;
#define STEP_PIN A0
#define DIR_PIN A1
#define ENABLE_PIN A2
#define RELAY_PIN A3
int motorSpeed = 200; //Velocidad PWM (0-255) de los motores
                        JGB
// Inicialización de las librerías del Bluetooth
#include <ArduinoBLE.h>
BLEService motorService("180C");
BLEStringCharacteristic commandChar("2A56", BLEWrite, 32);

//En el setup se contabn todas las funciones que luego serán
//llamadas en el loop
void setup() {
    Serial.begin(115200); //Inicia la comunicación con el serial
                        port del pc o con el módulo Bluetooth

    //Motores JGB
    for (int i = 0; i < numMotors; i++) {
```

```
        pinMode(pwmPins[i], OUTPUT); //configura los pines del
                                    // Arduino como salida
        pinMode(in1Pins[i], OUTPUT);
        pinMode(in2Pins[i], OUTPUT);
        stopMotor(i); //Asegura que los motores arranque apagados
                        // al iniciar el código
    }
    //Motor Paso a paso
    pinMode(STEP_PIN, OUTPUT); //Configuración de los pines como
                                // salidas
    pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);
    pinMode(ENABLE_PIN, OUTPUT);
    digitalWrite(ENABLE_PIN, LOW); // Habilitar el driver

    //Motor de corte
    pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT); //Configura el pin como salida
    digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Motor apagado al inicio

    // Inicialización Bluetooth
    if (!BLE.begin()) { //Inicia el hardware de Bluetooth en el
                        // Arduino
        Serial.println("Error iniciando BLE");
        while (1);
    }
    BLE.setLocalName("MotoresUNO_R4"); //Definición del nombre
                                        // que tendrá el Blueto del Arduino
    BLE.setAdvertisedService(motorService); //Permite que otros
                                        // dispositivos encuentren el Arduino por Bluetooth
    motorService.addCharacteristic(commandChar);
    BLE.addService(motorService);
    commandChar.setEventHandler(BLEWritten, onCommandReceived);
    BLE.advertise();
    Serial.println("Bluetooth listo, esperando conexión...");
}
// Funciones de los motores JGB
//Función para controlar un solo motor
```

```

void forwardMotor(int motor) { //Función para que el motor gire
    hacia "adelante"
    digitalWrite(in1Pins[motor], HIGH); //La combinación de HIGH y
    LOW definen la dirección de giro
    digitalWrite(in2Pins[motor], LOW);
    analogWrite(pwmPins[motor], motorSpeed); //Controla la
    velocidad
}
void backwardMotor(int motor) { //Función para que el motor
    gire hacia "atrás"
    digitalWrite(in1Pins[motor], LOW);
    digitalWrite(in2Pins[motor], HIGH);
    analogWrite(pwmPins[motor], motorSpeed);
}
void stopMotor(int motor) { //Detiene el motor
    digitalWrite(in1Pins[motor], LOW);
    digitalWrite(in2Pins[motor], LOW);
    analogWrite(pwmPins[motor], 0);
}
// Control en grupo- Esta función permite controlar una combinación
de dos motores
void controlGroup(int m1, int m2, bool forward = true) {
    if (forward) {
        forwardMotor(m1); forwardMotor(m2);
    } else {
        backwardMotor(m1); backwardMotor(m2);
    }
}
// Control de todos los motores- Esta función hace que todos los
motores giren a la misma velocidad y dirección al tiempo
void allMotors(bool forward = true) {
    for (int i = 0; i < numMotors; i++) {
        if (forward) forwardMotor(i);
        else backwardMotor(i);
    }
}
void stopAll() { //Detiene todos los motores al mismo tiempo
    for (int i = 0; i < numMotors; i++) stopMotor(i);
}

```

```

// Motor paso a paso
void stepperMove(int steps, bool dir) { //Con esta función se
    controla cuantos pasos y en qué dirección los da el motor
    digitalWrite(DIR_PIN, dir);
    for (int i = 0; i < steps; i++) {
        digitalWrite(STEP_PIN, HIGH); //Con un HIGH o un LOW el motor
        gire en un sentido u otro
        delayMicroseconds(800); // ajustar velocidad
        digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
        delayMicroseconds(800);
    }
}

// MOTOR DC de corte (Relé)
void motorDC(bool state) { //Esta función recibe un true o un
    false que encienden o apaga el motor
    digitalWrite(RELAY_PIN, state ? HIGH : LOW);
}
// Función para procesar comandos
void ejecutarComando(String cmd) {
    cmd.trim();
    cmd.toUpperCase();
    if (cmd == "ALL_FWD") allMotors(true);
    else if (cmd == "ALL_BWD") allMotors(false);
    else if (cmd == "STOP") stopAll();
    else if (cmd.startsWith("M")) {
        int m = cmd.substring(1, 2).toInt() - 1;
        if (cmd.endsWith("F")) forwardMotor(m);
        else if (cmd.endsWith("B")) backwardMotor(m);
        else if (cmd.endsWith("S")) stopMotor(m);
    }
    else if (cmd == "M12F") controlGroup(0,1,true);
    else if (cmd == "M12B") controlGroup(0,1,false);
    else if (cmd == "M13F") controlGroup(0,2,true);
    else if (cmd == "M13B") controlGroup(0,2,false);
    else if (cmd == "M14F") controlGroup(0,3,true);
    else if (cmd == "M14B") controlGroup(0,3,false);
    else if (cmd == "M23F") controlGroup(1,2,true);
    else if (cmd == "M23B") controlGroup(1,2,false);
    else if (cmd == "M24F") controlGroup(1,3,true);
}

```

```

else if (cmd == "M24B") controlGroup(1,3,false);
else if (cmd == "M34F") controlGroup(2,3,true);
else if (cmd == "M34B") controlGroup(2,3,false);
else if (cmd.startsWith("STEP")) {
    int steps = cmd.substring(4).toInt();
    stepperMove(steps, true);
}
else if (cmd.startsWith("STPB")) {
    int steps = cmd.substring(4).toInt();
    stepperMove(steps, false);
}
else if (cmd == "DC_ON") motorDC(true);
else if (cmd == "DC_OFF") motorDC(false);

Serial.println("OK");
}
// En esta parte el Arduino recibe el comando enviado por Bluetooth
y lo imprime en el monitor serie para ejecutar la función
correspondiente
void onCommandReceived(BLEDevice central, BLECharacteristic
characteristic) {
    String cmd = (char*)commandChar.value();
    Serial.print("Comando recibido por BLE: ");
    Serial.println(cmd);
    ejecutarComando(cmd);
}
// Loop, aquí se ejecutan de manera continua las funciones de
control
void loop() {
    BLE.poll(); //Mantener conexión Bluetooth

    if (Serial.available()) { //En esta parte se reciben las
        instrucciones es dadas en el serial port

        String cmd = Serial.readStringUntil('\n');
        ejecutarComando(cmd);
    }
}

```

La siguiente tabla resume los comandos que deben ingresarse en el puerto serial para ejecutar cada una de las funciones del sistema de control.

Componente	Función	Comando
Motores JGB	Activar simultáneamente los 4 motores en sentido de avance	ALL_FWD
	Activar simultáneamente los 4 motores en sentido de retroceso	ALL_BWD
	Detener los 4 motores	STOP
	Control individual de cada motor (1, 2, 3 o 4) con tres opciones: avance, retroceso o detención	M1F, M1B, M1S
	Control combinado de dos motores (ej. motor 1 y 2, motor 1 y 3, etc.) con movimiento en avance o retroceso	M12F, M12B
Motor paso a paso	Desplazar el motor paso a paso un número definido de pasos en sentido de avance	STEP#
	Desplazar el motor paso a paso un número definido de pasos en sentido de retroceso	STPB#
Motor de corte	Encender el motor de corte	DC_ON
	Apagar el motor de corte	DC_OFF

ANEXO 3: Pruebas de funcionamiento

En el siguiente enlace se presentan los videos de las pruebas realizadas al prototipo conceptual, donde se evidencia su funcionamiento bajo diferentes condiciones de uso.

https://drive.google.com/drive/folders/17pXojieSX4whK73vvU9tdN3grrCT_c5i?usp=drive_link