

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de un sistema mecatrónico de limpieza de canaletas eléctricas a gran

altura

INGE-2785

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Mecatrónica

Presentado por:

Brank Jobeth Malatay Muñoz

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, Rómulo y Elena, quienes siempre anhelaron con verme terminar una carrera universitaria.

A mi hermana, Anggie, quien siempre estuvo pendiente de mi desempeño académico y supo darme apoyo cuando lo necesité.

A mi esposa, Roxana, que nunca dejó de creer en mí y de apoyarme en los días más difíciles.

A mí, que no dejé de perseguir lo que deseaba y me esforcé en llegar hasta este punto.

Esto es por y para nosotros.

Agradecimientos

 Mi más sincero agradecimiento a Dios, que me permitió llegar hasta donde estoy ahora. A mis padres, Rómulo y Elena, que hicieron todos los esfuerzos necesarios para brindarme una educación de calidad. A mi hermana, Anggie, que siempre me dio la motivación necesaria para seguir adelante.

 A mis amigas, Marisol y Karlita, que hicieron más llevaderos todos los días de mi vida estudiantil y me dieron soporte cuando más lo necesité. A mis mentores, Carlos Saldarriaga y Bryan Puruncajas, cuya guía y retroalimentación constantes fueron fundamentales para este trabajo.

 A Roxana, mi esposa, quien con su amor no solo me dio el apoyo y la motivación para no rendirme, sino que me brindó su mentoría y criterio técnico para sacar adelante este proyecto.

Declaración Expresa

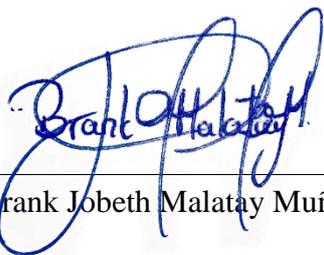
Yo, Brank Jobeth Malatay Muñoz, acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 7 de enero del 2025.



Brank Jobeth Malatay Muñoz

Evaluadores

Bryan Joao Puruncajas Maza, Ph.D.

Profesor de Materia

Carlos Xavier Saldarriaga Mero, Ph.D.

Tutor de proyecto

Resumen

La limpieza de estructuras en altura representa un desafío en términos de seguridad, eficiencia y cumplimiento de normas de higiene. Las canaletas eléctricas acumulan polvo y residuos orgánicos, lo que es especialmente crítico en la industria alimenticia debido al riesgo de contaminación del producto final. Este trabajo propone un sistema de limpieza controlado remotamente para canaletas eléctricas, reduciendo la intervención humana, el tiempo operativo y mejorando la seguridad. El dispositivo fue diseñado con un vehículo que se desplaza sobre la canaleta e incorpora un mecanismo de sujeción anticaídas. Su estructura y mecanismos fueron diseñados en plástico PLA realizables mediante impresión 3D, mientras que los ejes se diseñaron en acero para mayor resistencia. Se dimensionaron los actuadores y controladores según las cargas aplicadas y los requisitos operativos, y se desarrolló una aplicación móvil para su control remoto. Las simulaciones demostraron que el dispositivo responde eficientemente a las condiciones establecidas. Su diseño mecánico compacto y los componentes eléctricos seleccionados garantizaron un suministro y control de energía adecuados. La aplicación móvil facilitó la operación remota. El diseño cumple las especificaciones planteadas, ofreciendo una solución más rápida, segura y eficiente que los métodos manuales, reduciendo riesgos operativos y siendo económicamente viable.

Palabras clave: limpieza, canaletas eléctricas, control remoto, seguridad.

Abstract

The cleaning of high-altitude structures represents a challenge in terms of safety, efficiency, and compliance with hygiene standards. Electrical conduits accumulate dust and organic debris, which is particularly critical in the food industry due to the risk of product contamination. This work proposes a remotely controlled cleaning system for electrical conduits, reducing human intervention, operational time, and improving safety. The device was designed as a vehicle that moves along the conduit and incorporates an anti-fall attachment mechanism. Its structure and mechanisms were designed in PLA plastic, suitable for 3D printing, while the shafts were designed in steel for increased strength. Actuators and controllers were dimensioned based on applied loads and operational requirements, and a mobile application was developed for remote control. Simulations demonstrated that the device efficiently responds to the defined conditions. Its compact mechanical design and selected electrical components ensured adequate energy supply and control. The mobile application facilitated remote operation. The design meets the established specifications, offering a faster, safer, and more efficient solution than manual methods. Additionally, it significantly reduces operational risks and provides an economically viable alternative.

Keywords: cleaning, electrical conduits, remote control, safety.

Índice general

Resumen.....	I
<i>Abstract</i>	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología	VII
Índice de figuras.....	VIII
Índice de tablas	XI
Índice de planos	XIII
Capítulo 1.....	1
1. Introducción	2
1.1 Descripción del problema.....	3
1.2 Justificación del problema.....	5
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo general	6
1.3.2 Objetivos específicos	7
1.4 Marco teórico	7
1.4.1 Estado del arte	7
1.4.2 Aplicabilidad de criterios técnicos	9
Capítulo 2.....	10
2. Metodología	11
2.1 Descripción general de la metodología	11
2.2 Selección de alternativa de solución	11
2.3 Proceso de diseño	14
2.4 Diseño conceptual	14
2.5 Requerimientos de diseño	15

2.6	Diseño mecánico	16
2.6.1	Selección de materiales	16
2.6.2	Sujeción a canaleta	17
2.6.3	Cepillos rotatorios.....	22
2.6.4	Tracción de vehículo	26
2.7	Diseño de control	29
2.7.1	Modelado de motor DC	29
2.7.2	Diseño de controlador de velocidad	30
2.7.3	Discretización de controlador para implementación en microcontrolador.	31
2.7.4	Dispositivo de control.....	32
2.8	Diseño eléctrico y electrónico	33
2.8.1	Alimentación	33
2.8.2	Regulación de voltaje	34
2.8.3	Control de motores	35
2.9	Diseño informático	38
2.9.1	Código para microcontrolador	38
2.9.2	Aplicación de control remoto	40
Capítulo 3	41
3.	Resultados y análisis	42
3.1	Componentes mecánicos	42
3.1.1	Ensamblaje completo del sistema.....	42
3.1.2	Actuadores seleccionados.....	43
3.1.3	Análisis de esfuerzo y deformación.....	47
3.2	Componentes eléctricos y electrónicos	52
3.2.1	Fuente de voltaje.....	52
3.2.1	Circuito del sistema	54
3.3	Desempeño de controlador.....	55

3.3.1	Caso continuo	56
3.3.2	Caso discreto.....	58
3.4	Componentes informáticos.....	59
3.4.1	Acceso a la red.....	59
3.4.2	Aplicación de control remoto	60
3.4.3	Programación de microcontrolador	61
3.5	Análisis de costos	62
Capítulo 4.....		65
4.	Conclusiones y recomendaciones	66
4.1	Conclusiones	66
4.2	Recomendaciones.....	67
Referencias.....		68
Apéndices.....		73

Abreviaturas

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene (Acrilonitrilo butadieno estireno)
ASTM	American Society for Testing and Materials
DC	Direct Current (corriente directa)
EPP	Equipo de Protección Personal
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
EMT	Electrical Metallic Tube
IoT	Internet of Things (Internet de las cosas)
PCB	Printed Circuit Board (Placa de circuito impreso)
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PLA	Polylactic Acid (Ácido poliláctico)
PVC	PolyVinyl Chloride (cloruro de polivinilo)
WiFi	Wireless-Fidelity

Simbología

A	Amperio
kg cm	kilogramo fuerza por centímetro
m	Metro
mm	Milímetro
Nm	Newton metro
rad/s	Radianes por segundo
RPM	Revoluciones por minuto
USD	Dólares americanos
V	Voltio
W	Watt
Ω	Ohm

Índice de figuras

Figura 1.1: Limpieza de canaletas y tuberías eléctricas con aire comprimido	3
Figura 1.2: Limpieza de canaletas y tuberías eléctricas con paños y escobillas.....	4
Figura 1.3: Disposición de canaletas con estructuras de soporte.....	5
Figura 1.4: Bandeja portacables de tipo perforada (izquierda) y lisa (derecha)	8
Figura 2.1: Diagrama de metodología de diseño	14
Figura 2.2: Diseño conceptual de sistema de limpieza para canaletas.	15
Figura 2.3: Mecanismo de sujeción activado (izquierda) y desactivado (derecha)	18
Figura 2.4: Dimensiones de trayectoria grabada en platina guía	20
Figura 2.5: Medidas de engranajes para transmisión de potencia en mecanismo de sujeción	21
Figura 2.6: Diseño de cepillo rotatorio	23
Figura 2.7: Medidas de engranajes para transmisión de potencia en cepillos rotatorios.....	24
Figura 2.8: Medidas de engranajes para transmisión de potencia en ruedas	27
Figura 2.9: Respuesta de sistema a entrada escalón unitario en lazo abierto	30
Figura 2.10: Respuesta de sistema a entrada escalón unitario en lazo cerrado.....	30
Figura 2.11: Microcontrolador ESP32 de 30 pines.....	32
Figura 2.12: Circuito de control on/off de motor para cepillos rotatorios	36
Figura 2.13: Controlador de motor DRV8874.....	37
Figura 2.14: Diagrama de conexiones de controlador DRV8874.....	37
Figura 2.15: Diagrama de flujo para el control del sistema de limpieza de canaletas	39
Figura 2.16: Diagrama de flujo de acceso a red WiFi mediante librería WifiManager.....	39
Figura 2.17: Arquitectura de ESP32 trabajando como servidor web.....	40
Figura 3.1: Vista exterior del sistema de limpieza.....	42
Figura 3.2: Componentes internos de sistema de limpieza.....	42
Figura 3.3: Servomotor SG90 para mecanismo de fijación.....	43

Figura 3.4: Engranajes de sistema de sujeción	44
Figura 3.5: Motorreductor Pololu 1572 para cepillo rotatorio.....	44
Figura 3.6: Engranajes de cepillos rotatorios.....	45
Figura 3.7: Motorreductor Pololu 4825 para tracción del sistema.....	46
Figura 3.9: Engranajes de tracción del sistema.....	47
Figura 3.10: Deformación de engranajes en mecanismo de sujeción	48
Figura 3.11: Esfuerzos de Von Mises en mecanismo de sujeción.....	48
Figura 3.12: Coeficientes de seguridad en mecanismo de sujeción.....	48
Figura 3.13: Deformación de engranajes en mecanismo de cepillos rotatorios	49
Figura 3.14: Tensiones de Von Mises en mecanismo de cepillos rotatorios.....	49
Figura 3.15: Coeficientes de seguridad en mecanismo de cepillos rotatorios	49
Figura 3.16: Deformación en engranajes de mecanismo de tracción	50
Figura 3.17: Tensiones de Von Mises en mecanismo de tracción.....	50
Figura 3.18: Coeficientes de seguridad en mecanismo de tracción	51
Figura 3.19: Deformación en eje de ruedas de tracción.....	52
Figura 3.20: Tensiones de Von Mises en eje de ruedas de tracción	52
Figura 3.21: Coeficientes de seguridad en eje de ruedas de tracción	52
Figura 3.22: Batería Power-Sonic PS-650	53
Figura 3.23: Simulación de circuito de alimentación y regulación de voltaje.....	54
Figura 3.24: Circuito de control del sistema.....	54
Figura 3.25: Rutas y componentes de la PCB realizada en Proteus.	55
Figura 3.26: Modelo tridimensional de la PCB realizada en Proteus.	55
Figura 3.27: Diagrama de bloques del sistema	56
Figura 3.28: Respuestas a entrada escalón unitario en lazo cerrado sin controlador (caso continuo).....	56

Figura 3.29: Respuestas a entrada escalón unitario en lazo cerrado con controlador (caso continuo)	57
Figura 3.30: Respuestas a entrada escalón unitario en lazo cerrado con controlador (caso discreto).....	58
Figura 3.31: Interfaz de acceso a red WiFi mediante librería WifiManager	59
Figura 3.32: Interfaz de aplicación web para control remoto	60

Índice de tablas

Tabla 2.1: Criterios de selección de solución	12
Tabla 2.2: Resultados de evaluación de alternativas según criterios de selección	13
Tabla 2.3: Requerimientos de diseño del proyecto.....	15
Tabla 2.4: Cuadro comparativo de materiales para construcción del proyecto.	16
Tabla 2.5: Materiales seleccionados para el proyecto	17
Tabla 2.6: Vistas y disposiciones de mecanismo de sujeción.....	19
Tabla 2.7: Parámetros de servomotor para sujeción a canaleta	22
Tabla 2.8: Parámetros de motor para cepillos rotatorios	26
Tabla 2.9: Parámetros de motor para ruedas del vehículo	28
Tabla 2.10: Parámetros de modelo de motor DC.....	29
Tabla 2.11: Efecto de ganancias de PID sobre respuesta del sistema.....	31
Tabla 2.12: Características de diferentes controles de motor	35
Tabla 2.13: Valores de interés para transistor conmutador TIP35.....	36
Tabla 2.14: Especificaciones de controlador de motor DRV8874	37
Tabla 3.1: Especificaciones de servomotor SG90 para mecanismo de fijación	43
Tabla 3.2: Parámetros de engranajes de mecanismo de sujeción	44
Tabla 3.3: Especificaciones de motorreductor Polulu 1572 para cepillo rotatorio.....	45
Tabla 3.4: Parámetros de engranajes de cepillos rotatorios.....	45
Tabla 3.5: Especificaciones de motorreductor Polulu 4825 para tracción del sistema.....	46
Tabla 3.6: Parámetros de engranajes de tracción de sistema	47
Tabla 3.7: Especificaciones de batería Power-Sonic PS-650	53
Tabla 3.8: Índices de desempeño de sistema sin controlador	57
Tabla 3.9: Índices de desempeño de sistema con controlador	57
Tabla 3.10: Ganancias de controlador PI en caso continuo	58

Tabla 3.11: Ganancias de controlador PI en caso discreto	59
Tabla 3.12: Costo total del proyecto	62
Tabla 3.13: Costos actuales de limpieza manual	63
Tabla 3.14: Comparativa de gasto anual en ambos métodos de limpieza	64

Índice de planos

- Plano 1: Dispositivo de limpieza de canaletas
- Plano 2: Mecanismo de limpieza
- Plano 3: Engranaje conducido de cepillo rotatorio
- Plano 4: Engranaje motriz de cepillo rotatorio
- Plano 5: Mecanismo de sujeción
- Plano 6: Mecanismo de sujeción (vista explosionada)
- Plano 7: Engranaje conducido de mecanismo de sujeción
- Plano 8: Engranaje motriz de mecanismo de sujeción
- Plano 9: Mecanismo de tracción
- Plano 10: Eje de ruedas de tracción
- Plano 11: Engranaje motriz de tracción de ruedas
- Plano 12: Engranaje conducido de tracción de ruedas
- Plano 13: Engranaje loco de tracción de ruedas
- Plano 14: Circuito de control

Capítulo 1

1. Introducción

La industria alimenticia debe cumplir estrictas normativas de seguridad e higiene para garantizar la calidad de los productos y la protección de los trabajadores. Uno de los principales desafíos en este sector es la limpieza y el mantenimiento de estructuras elevadas, como canaletas y vigas de soporte, donde la acumulación de polvo, residuos orgánicos y otros contaminantes compromete la calidad del producto final. Además, estas tareas implican riesgos significativos de caídas y accidentes laborales, ya que requieren trabajo en altura y manipulación de equipos en espacios de difícil acceso.

El mantenimiento de estas áreas suele realizarse de forma manual, lo que expone a los operarios a peligros como caídas, lesiones musculoesqueléticas y contacto con agentes contaminantes. A pesar del uso de equipos de protección personal (EPP) y la aplicación de protocolos de seguridad, la intervención humana en estas tareas sigue representando un riesgo considerable. Por ello, es fundamental desarrollar soluciones tecnológicas que minimicen la exposición de los trabajadores a estas condiciones peligrosas, garantizando una limpieza efectiva sin comprometer la seguridad ni la continuidad de la producción.

El presente proyecto propone el diseño de una solución mecatrónica para la limpieza remota de estructuras elevadas en plantas de procesamiento de alimentos. La propuesta combina sensores, actuadores y controladores programables para desarrollar un sistema que sea capaz de eliminar el polvo de manera segura. La implementación de esta solución no solo reduce el riesgo de accidentes laborales asociados al trabajo en altura, sino que también reduce los tiempos de limpieza y disminuye la necesidad de interrupciones en la producción, aumentando la productividad.

1.1 Descripción del problema

La limpieza de canaletas eléctricas conlleva riesgos y dificultades que afectan tanto la seguridad de los operarios como la eficiencia operativa. En este contexto, empresas dedicadas a la producción y comercialización de cereales, snacks y alimentos preparados se ven especialmente afectadas por esta problemática, como ocurre en el caso del beneficiario de este proyecto, el cual es una empresa líder en la producción de alimentos procesados.

La limpieza manual resulta inconsistente y no permite alcanzar ciertas zonas por limitaciones físicas, donde es más común la acumulación de partículas de polvo proveniente del ambiente y también originadas por la fabricación de alimentos basados en granos. Esto incrementa el riesgo de contaminación cruzada en áreas críticas, afectando la seguridad sanitaria.

Actualmente, este proceso requiere el uso de andamios, plataformas y escaleras, exponiendo a los trabajadores a posibles accidentes y demandando una inversión significativa en equipos de protección personal y capacitación especializada. Los procesos de limpieza más habituales se muestran en las figuras 1.1 y 1.2

Figura 1.1: Limpieza de canaletas y tuberías eléctricas con aire comprimido



Figura 1.2: Limpieza de canaletas y tuberías eléctricas con paños y escobillas.



Para la primera imagen, se utiliza un sistema de aire comprimido adaptado de manera rústica a una escoba extensible que alcanza 10 o 15 metros de altura, lo cual permite barrer el polvo de la superficie de las canaletas mientras va retirando el polvo mediante el aire presurizado, método que resulta ineficiente al requerir una gran destreza del operador para manejar una escoba de tal longitud, además de representar un riesgo para la operación en caso de colisionar con otras estructuras o equipos.

Por otra parte, la segunda figura muestra un método de limpieza que obliga a los operarios a utilizar escaleras para alcanzar las superficies de las canaletas en las alturas y utilizar paños y escobillas de mano para retirar el polvo. Este es el método que más riesgos implica, ya que los trabajadores deben permanecer por tiempos prolongados realizando la limpieza de las estructuras, donde se pueden presentar caídas con graves consecuencias, pese a la utilización de arneses y dispositivos retráctiles.

Un último punto que dificulta la actividad de limpieza es la presencia de soportería y estructuras que sostienen la canaleta desde el techo, que usualmente se ubican al costado de la canaleta como se observa en la figura 1.3, lo cual hace que la limpieza a distancia desde el suelo no se pueda realizar de manera continua, aumentando el tiempo dedicado a la operación.

Figura 1.3: Disposición de canaletas con estructuras de soporte



Actualmente, en cualquiera de los casos planteados, la limpieza se realiza entre dos operarios externos a la empresa. Se desea reducir el número de operarios necesarios para la limpieza a uno y reducir el tiempo de limpieza a la mitad. Una solución controlada remotamente permitiría limpiar de manera consistente y segura las canaletas ubicadas a gran altura, mejorando la higiene y salubridad de los procesos que se llevan a cabo en la planta y asegurando un producto libre de contaminación.

1.2 Justificación del problema

La industria alimentaria está sujeta a estrictos controles sanitarios y normativas de higiene para evitar la contaminación de los productos. En este sentido, la limpieza de las canaletas y estructuras elevadas constituye una prioridad debido a que, al ser áreas de difícil acceso, se convierten en focos potenciales de acumulación de partículas, bacterias y otros contaminantes que podrían comprometer la calidad del producto y la seguridad del consumidor, adicionalmente, normativas nacionales obligan a las empresas a diseñar sus construcciones considerando la protección y facilidades para la recolección y polvo y otro tipo de materias extrañas [1].

Las canaletas y estructuras elevadas suelen estar ubicadas en zonas de paso, encima de las líneas de producción o almacenamiento, además de estar interconectadas con otras estructuras, lo que añade complejidad a las tareas de limpieza y aumenta el riesgo de accidentes

laborales, ya que los empleados deben realizar maniobras en alturas o utilizar andamios y escaleras.

Existen estudios que evidencian que la limpieza en altura sigue siendo una de las actividades con mayor índice de siniestralidad en la industria, ubicando a las actividades de mantenimiento eléctrico en segunda posición para este tipo de incidentes [2]. Además, en el caso analizado en este trabajo, esta actividad implica el uso de recursos que podrían destinarse a aumentar la productividad de la planta. Esto se debe a que se requiere contratar un servicio externo para llevar a cabo la limpieza, lo que genera un gasto recurrente para la empresa, además de ocasionar paros en ciertos equipos durante el proceso de limpieza para evitar interferencias con otros sistemas operativos.

Ante esta situación, se busca optimizar la productividad reduciendo los tiempos de inactividad y minimizando los riesgos laborales. El sistema propuesto no solo responde a estas demandas de seguridad y eficiencia, sino que también integra un enfoque de sostenibilidad al minimizar el tiempo de limpieza y evitar el uso de insumos desechables, se reduce el consumo de recursos y se optimiza el uso de energías.

Por último, la posibilidad de realizar esta tarea remotamente se alinea con las tendencias actuales de la industria hacia la transformación digital y la adopción de tecnologías 4.0, las cuales están revolucionando el sector industrial en busca de mayor eficiencia y productividad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un sistema mecatrónico para la limpieza de canaletas mediante la integración de sensores y actuadores en un dispositivo que permita realizar la operación remotamente con el fin de reducir el riesgo operativo.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Diseñar un módulo móvil controlable a distancia que sea capaz de desplazarse por el área de trabajo y soportar la carga de los elementos del sistema.
2. Diseñar una herramienta de limpieza que permita limpiar canaletas eléctricas a gran altura retirando el polvo fuera de estas.
3. Desarrollar una aplicación móvil que permita controlar el desplazamiento del módulo y la operación de limpieza.

1.4 Marco teórico

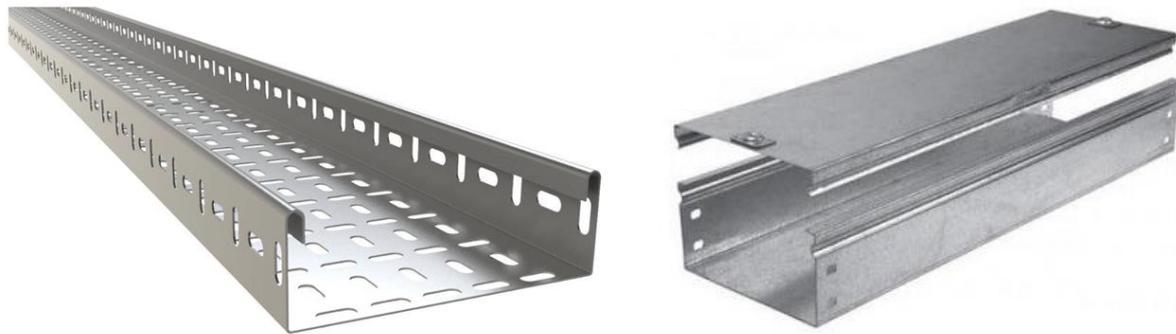
1.4.1 Estado del arte

La automatización de procesos de limpieza ha sido ampliamente investigada en el ámbito de la robótica aplicada a entornos difíciles y de acceso limitado desde hace varios años. Dispositivos como los robots limpiadores de ventanas, como el SIRIUSc desarrollado por la empresa Fraunhofer [3], u otros diseños propuestos a nivel académico [4] son prueba del creciente interés en esta área. Los paneles solares representan otro nicho que ha cobrado relevancia en los últimos tiempos como parte de un esfuerzo global por reducir la dependencia de los combustibles fósiles [5], donde existe un gran mercado con empresas consolidadas como HyCleaner o Kärcher, las cuales cuentan con diversos modelos de robots y dispositivos controlados remotamente enfocados en la limpieza de paneles fotovoltaicos.

Este desarrollo no se ha visto replicado en el área industrial, específicamente en las instalaciones y canalizaciones eléctricas, donde el polvo conforma un agente contaminante que puede causar fallas en el contacto entre conductores, al punto de haberse realizado estudios para caracterizar los efectos de diferentes tipos de partículas [6]. Existen diversos tipos de canalizaciones que son usadas en la industria, desde caños metálicos (EMT) o de PVC de sección redonda hasta bandejas portacables con sección rectangular, las cuales son ideales para

distribuir potencia a baja tensión y red de datos, siendo la de tipo perforada la más utilizada, sin embargo, también existen del tipo lisa, de alambre, y escalera, contando con mayor robustez mecánica esta última [7].

Figura 1.4: Bandeja portacables de tipo perforada (izquierda) y lisa (derecha)



Nota: Figuras obtenidas de la web de los fabricantes Vichnet [8] y Coper Electric [9].

En el caso de la limpieza de canaletas y estructuras de soporte para conductores eléctricos a gran altura, no se ha encontrado registros de desarrollos enfocados en esta problemática. No obstante, se han diseñado e implementado soluciones para canales y bajantes de aguas lluvias, como un robot desarrollado en Polonia que, mediante un movimiento impulsado por un mecanismo tipo oruga, es capaz de remover y romper bloqueos de hojas y otro tipo de suciedad con la ayuda de cepillos rotativos y palas [10], o un dispositivo enfocado en canaletas de agua ubicadas al nivel del suelo que mediante una banda transportadora va recolectando y depositando los residuos que encuentra a su paso a medida que se desplaza [11].

Los diseños mencionados presentan mecanismos y tecnologías que resultan viables para sistemas móviles, sin embargo, la aplicabilidad de estas soluciones se ve limitada al centrarse en recorrer el interior de la superficie a limpiar, lo cual no suele ser factible en canalizaciones eléctricas.

1.4.2 Aplicabilidad de criterios técnicos

La mayor parte de los sistemas descritos anteriormente presentan la limitación de requerir una superficie regular para trasladarse, lo cual no sucede en el interior de canaletas eléctricas o en la superficie de tubos circulares; no obstante, en este contexto, se ha estudiado la viabilidad de diversos sistemas de locomoción, donde autores recomiendan sistemas de orugas para superficies irregulares a costa de ser poco eficientes, mientras que mecanismos basados en ruedas suelen tener un control sencillo con bajo consumo energético, pero suelen ser poco versátiles al adaptarse a terrenos irregulares [12]. Dado esto, resulta factible el determinar que el movimiento no se realice al interior de la canaleta, sino en la superficie de esta, ya que el terreno será regular y uniforme en la mayoría de los casos.

En lo que concierne al control remoto del dispositivo, se han utilizado distintas tecnologías a lo largo de los años. Existen sistemas basados en protocolos como Zigbee, enfocado en el IoT y el bajo consumo que permite crear redes inalámbricas de corto alcance cubriendo distancias de hasta 150 metros, usado especialmente en transmisión de datos de sensores [13], así como combinaciones de esta tecnología con el protocolo Wi-Fi posibilitando el control remoto desde teléfonos móviles o computadoras [14], pero estas tecnologías dependen del acceso a internet del dispositivo; por esta razón también son utilizadas soluciones de RF que trabajan una frecuencia de 434 MHz, alcanzando distancias de hasta 100 metros aplicables al control de casas inteligentes [15].

Capítulo 2

2. Metodología

2.1 Descripción general de la metodología

En este capítulo se describe el proceso llevado a cabo para desarrollar la solución a la problemática planteada en la sección anterior cumpliendo los objetivos propuestos. Se definen las alternativas de solución, se evalúa cada una de ellas en base a criterios determinados hasta elegir aquella más factible y que se ajusta a la necesidad. Luego, se detalla el proceso de diseño a seguir, el diseño conceptual y los diferentes parámetros de los componentes del sistema, determinándose así las especificaciones que tendrá la solución al ser desarrollada.

2.2 Selección de alternativa de solución

De acuerdo con la problemática descrita en el capítulo anterior, se definieron tres alternativas de solución para el sistema de limpieza de canaletas a gran altura:

- **Alternativa 1**

Diseño de un sistema de limpieza en alturas basado en un módulo móvil controlado remotamente que se desplace en el suelo y que cuente con un brazo extensible para alcanzar la superficie de las canaletas en alturas y retirar el polvo con cepillos rotatorios y aireación.

- **Alternativa 2**

Diseño de un sistema de limpieza en alturas basado en un vehículo controlado remotamente que se desplaza por encima de la superficie de las canaletas, retira el polvo con cepillos rotatorios, y contiene un sistema de fijación a la canaleta para evitar caídas.

- **Alternativa 3**

Diseño de un sistema de limpieza en alturas basado en un vehículo controlado remotamente que se desplaza por encima de la superficie de las canaletas, recolecta el polvo mediante un sistema neumático de succión y contiene un sistema de fijación a la canaleta para evitar caídas.

Para la selección de la alternativa se establecieron criterios de selección y su respectiva prioridad, como se muestra en la tabla 2.1, los cuales son detallados a continuación.

Facilidad de uso: Facilidad del sistema para su configuración y puesta en marcha por parte del personal operativo.

Bajo costo: Inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto.

Bajo consumo energético: Potencia eléctrica consumida por los sensores y actuadores, lo cual repercute en el tiempo que puede ser usado el dispositivo antes de necesitar recargarse.

Control de polución: Capacidad del sistema para evitar que se disperse polvo al ambiente mientras se realiza la limpieza.

Seguridad: Evaluación del nivel de riesgo asociado a la operación del sistema, considerando tanto la protección del operador como la del entorno.

Efectividad de limpieza: Habilidad del sistema para retirar correctamente el polvo del área de trabajo.

Tabla 2.1: Criterios de selección de solución

Criterio	Importancia	Peso	Ponderación
Seguridad	1	3.0	27.2 %
Efectividad de limpieza	2	2.0	18.2 %
Bajo costo	3	2.0	18.2 %
Bajo consumo energético	4	2.0	18.2 %
Control de polución	5	1.0	9.1 %
Facilidad de uso	6	1.0	9.1 %
	Total	11.0	100,0 %

Se realizó la evaluación de las propuestas mencionadas en base a los criterios descritos previamente. La calificación dada a cada criterio va en la escala de 1 a 3, y luego es multiplicada por el peso de dicho criterio, Luego del análisis, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Resultados de evaluación de alternativas según criterios de selección

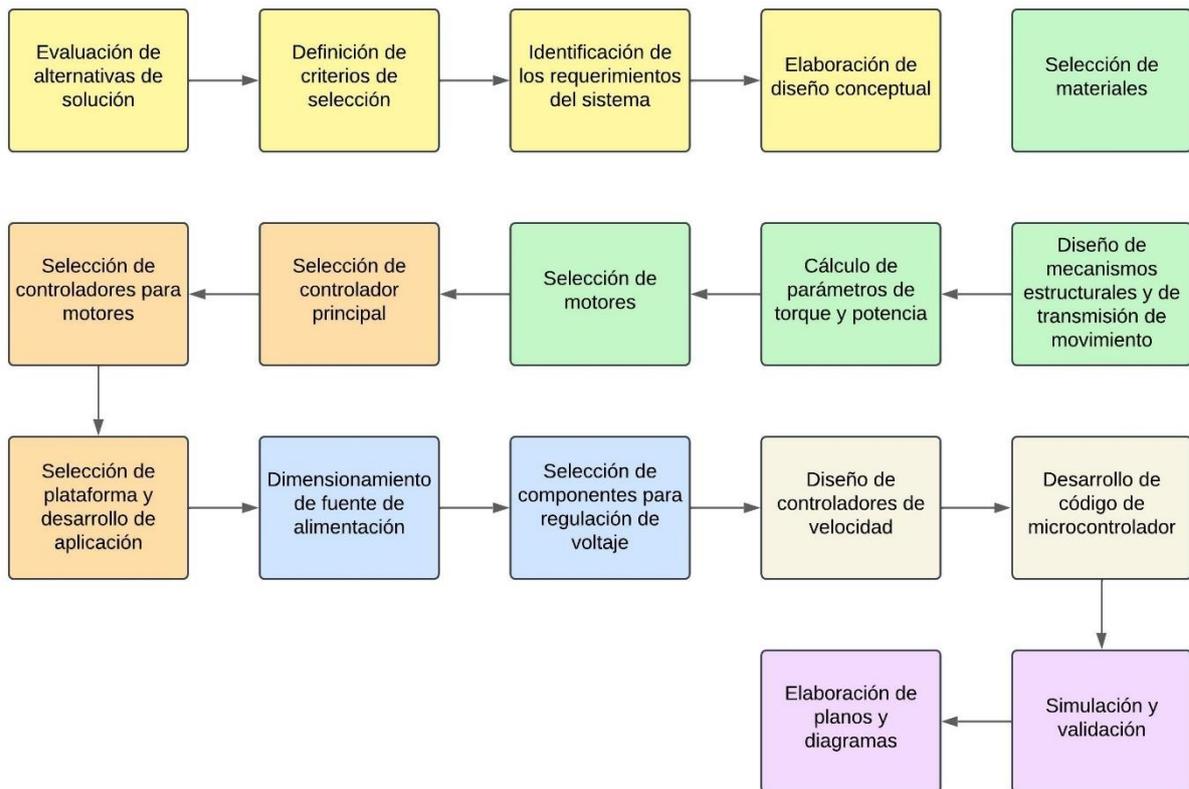
Criterios		Alternativas		
Peso	Descripción	Alternativa 1 Brazo extensible	Alternativa 2 Barrido sin recolección	Alternativa 3 Barrido con recolección
3,0	Seguridad	2,0	3,0	3,0
2,0	Efectividad de limpieza	2,0	3,0	3,0
2,0	Bajo costo	1,0	3,0	2,0
2,0	Bajo consumo energético	1,0	3,0	2,0
1,0	Control de polución	1,0	3,0	3,0
1,0	Facilidad de uso	2,0	2,0	2,0
	Puntaje sin peso	9,0	17,0	15,0
	Puntaje con peso	17,0	32,0	28,0
	Prioridad	3	1	2

Se obtiene como alternativa ganadora el sistema de limpieza basado en un vehículo controlado remotamente que se desplaza por encima de la superficie de las canaletas, ya que no representa un riesgo con un brazo extensible que podría chocar con obstáculos como la primera alternativa, y representa un ahorro de energía y costo al contar únicamente con actuadores de baja potencia como motores de corriente continua, sin utilizar un sistema neumático como en la tercera alternativa que requiere de mayores especificaciones. Por otro lado, la efectividad de la limpieza es alta al entrar directamente en contacto con la superficie de la canaleta, mientras que su único punto a mejorar es el control de polución, ya que expulsa las partículas fuera de la canaleta y eso puede causar una nube de polvo, sin embargo, las ventajas son significativas.

2.3 Proceso de diseño

El procedimiento por seguir para realizar el diseño final de la solución planteada se desglosa en varias etapas mostradas en la figura 2.1.

Figura 2.1: Diagrama de metodología de diseño

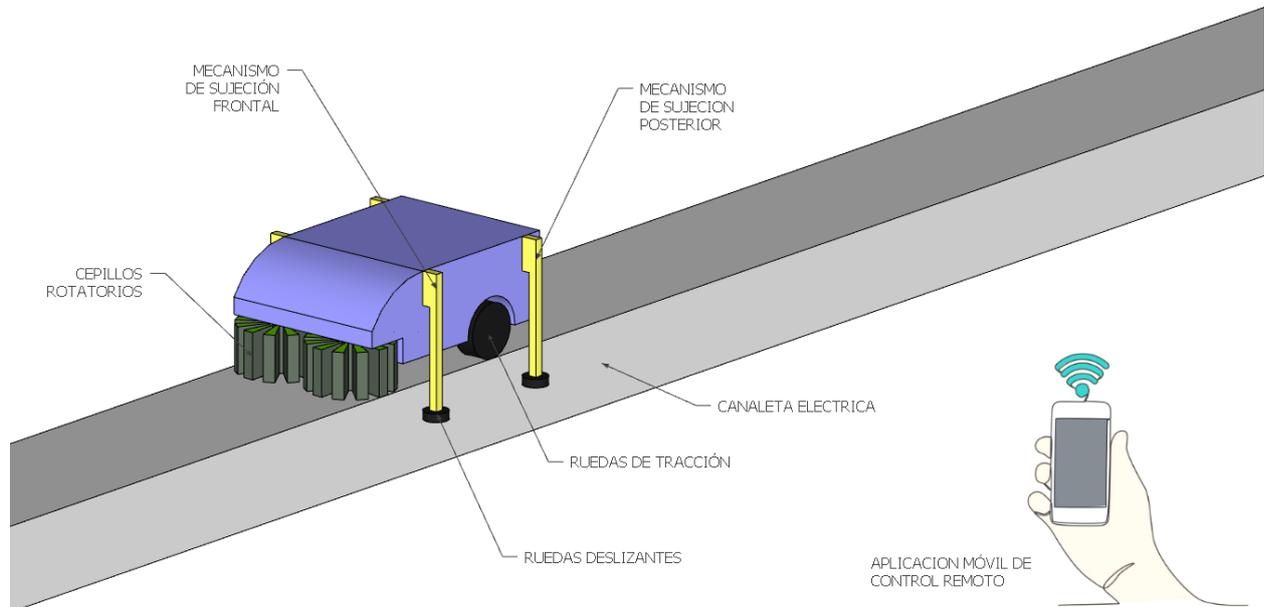


2.4 Diseño conceptual

El diseño de la solución incluye múltiples componentes. Se utiliza un sistema de dos ruedas con tracción única que permite el movimiento del dispositivo. Además, cuenta con un sistema de limpieza compuesto por dos cepillos cilíndricos giratorios con sus ejes perpendiculares al suelo. Finalmente, incorpora dos mecanismos de sujeción compuesto por brazos que rodean los laterales de la canaleta, impulsados por un servomotor cada uno. Esto asegura el anclaje del dispositivo evitando que se desplace o se caiga y pudiéndose alternar el uso de uno u otro en función de la necesidad.

Esto puede observarse en la figura 2.2, donde se muestra un bosquejo de los elementos que componen el proyecto. El sistema será gobernado por un microcontrolador con conexión *WiFi*, lo cual permite el manejo del dispositivo desde una aplicación móvil.

Figura 2.2: Diseño conceptual de sistema de limpieza para canaletas.



2.5 Requerimientos de diseño

Los requerimientos y limitaciones definidos por el cliente se presentan en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Requerimientos de diseño del proyecto.

Requerimiento	Descripción
Área de trabajo	Canaletas eléctricas de sección rectangular en la superficie superior.
Dimensiones	Canaletas de 20 centímetros de ancho, 10 centímetros de alto, 15 metros de longitud.
Recolección de polvo	Opcional, se puede operar únicamente retirando el polvo sin recogerlo.
Duración	Operación continua de aproximadamente 1 hora.
Velocidad	Recorrer 1 metro de canaleta en aproximadamente 30 segundos
Operadores	Máximo un operador para puesta en marcha y control del sistema.

2.6 Diseño mecánico

Los factores de seguridad usados para el dimensionamiento de componentes son de 1.2, debido a que se cuentan con cargas que varían muy poco a lo largo del tiempo y se tiene un alto nivel de confiabilidad, según la recomendación de Mott [16].

2.6.1 Selección de materiales

Se evaluaron diferentes materiales que comúnmente son utilizados en desarrollos de dispositivos móviles pequeños sometidos a baja carga como el que se planteó en este proyecto. Se consideran el acero 304 [17], el plástico ABS [18] y el plástico PLA [19]. Un cuadro comparativo con sus características es mostrado en la tabla 2.4.

Tabla 2.4: Cuadro comparativo de materiales para construcción del proyecto.

Características	Acero 304	Plástico PLA	Plástico ABS
Densidad	7.9 g/cm ³	1.24 g/cm ³	1.06 g/cm ³
Límite elástico	193 MPa	49.5 MPa	46 MPa
Resistencia al impacto	Alta	Alta	Media (frágil)
Procesabilidad	Fundición, mecanizado	Inyección, impresión 3D	Inyección, impresión 3D

Se observa que el acero es el que mejores propiedades mecánicas tiene, sin embargo, cuenta con una densidad alta que generaría componentes más pesados, además de requerirse un proceso de mecanizado para dar forma a los elementos requeridos. Por otra parte, el plástico PLA permite la impresión 3D además de ser muy ligero, sin embargo, no tiene mucha resistencia mecánica como el acero.

Para la herramienta de limpieza, por otro lado, la decisión reside en el tipo de cerdas que se va a utilizar. Las opciones se reducen a nylon y fibras animales. Según las investigaciones realizadas, las fibras animales no se encuentran disponibles tan fácilmente como el nylon, por lo cual se opta por este último material. Los materiales seleccionados se muestran en la tabla 2.5.

Tabla 2.5: *Materiales seleccionados para el proyecto*

Especificación	Valor
Chasis y estructuras	Plástico ABS
Engranajes	Plástico ABS
Ejes	Acero
Cerdas de cepillos	Nylon

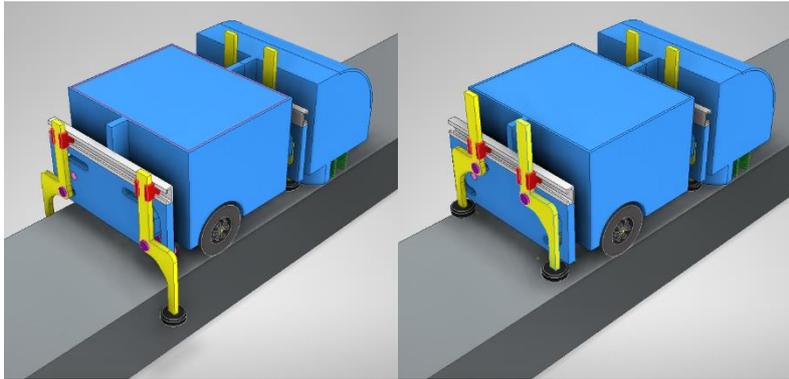
Se seleccionó el plástico ABS tanto para la estructura como para los engranajes, ya que permite la impresión 3D lo cual es ideal para geometrías complejas, además en el caso de los engranajes resulta difícil conseguir medidas estandarizadas en tamaños tan pequeños, y al no trabajar con cargas grandes, las propiedades mecánicas resultan aceptables. Los ejes elegidos son de acero 304, ya que es un material disponible localmente además de que una opción de plástico podría sufrir flexión. Por último, las cerdas seleccionadas fueron de nylon ya que según investigaciones en sitio se encontraron proveedores que localmente ofrecen el servicio de fabricación artesanal a medida.

2.6.2 Sujeción a canaleta

2.6.2.1 Diseño de mecanismo

Para evitar caídas y descarrilamientos del dispositivo, se propuso un sistema de sujeción mediante brazos que puedan deslizarse en los laterales de la canaleta con la ayuda de ruedas, como se observa en la figura 2.3. El mecanismo activado abraza la canaleta, mientras que cuando este se encuentra desactivado, las ruedas se encuentran sobre la canaleta y debajo del vehículo.

Figura 2.3: Mecanismo de sujeción activado (izquierda) y desactivado (derecha)

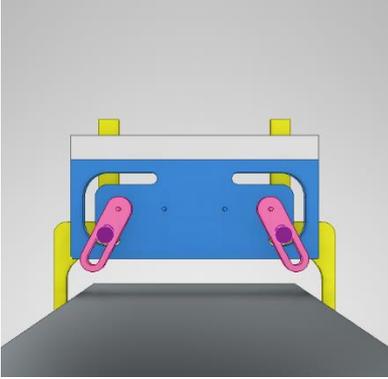
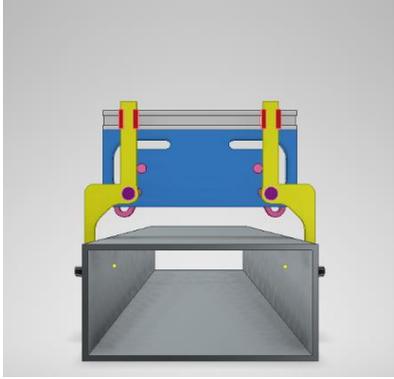
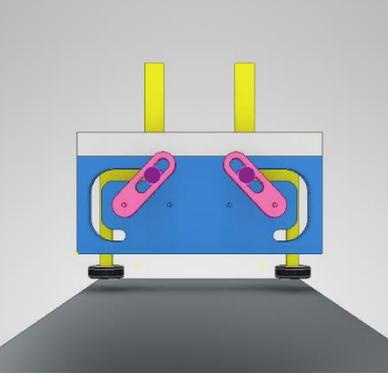
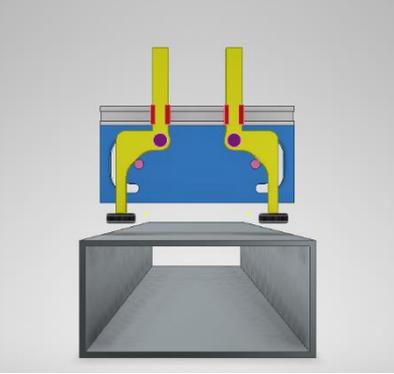


Para obtener el movimiento mostrado, requiere una trayectoria similar a una media circunferencia, pero con ciertos tramos rectos. Se define que un mecanismo que parta de un movimiento circular es adecuado, pero este debe ser guiado en una ruta definida mediante un pasador y eslabones adaptados para permitir el deslizamiento. De esta manera, se obtiene las diferentes disposiciones y vistas del mecanismo mostradas en la tabla 2.6.

El mecanismo cuenta con los siguientes movimientos:

- Una manivela gira desde el punto de rotación.
- La manivela cuenta con una ranura que permite a un pasador deslizarse en línea recta, permitiendo aumentar o disminuir la distancia de este respecto al eje de rotación.
- El pasador también se desliza en la guía grabada en la placa, la cual contiene la trayectoria que debe seguir la rueda.
- El pasador tiene una junta de rotación con el brazo que está conectado a la rueda.
- Para limitar el movimiento a dos grados de libertad: vertical y horizontal, impidiendo la rotación, se incorporan guías lineales que en la parte superior de la placa.

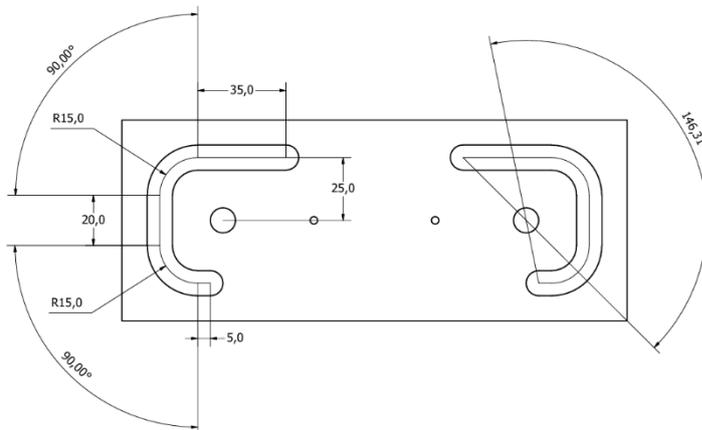
Tabla 2.6: *Vistas y disposiciones de mecanismo de sujeción*

Especificación	Vista frontal	Vista posterior
Mecanismo activado		
Mecanismo desactivado		

Para la entrada del sistema se seleccionó un servomotor dado que los movimientos a realizar son repetitivos, se tienen únicamente dos posiciones a las cuales se puede acceder estableciendo un ángulo y no se necesitaría una retroalimentación para controlar este movimiento. Este servomotor está conectado a una de las dos manivelas, las cuales están acopladas desde sus ejes para que ambas roten a la misma velocidad, pero en sentido opuesto, obteniendo un movimiento simétrico.

La trayectoria del mecanismo con sus dimensiones se muestra en la figura 2.4. Se obtiene que el total de la distancia que debe recorrer el pasador para completar la trayectoria es de 107 milímetros en un ángulo de 146 grados. Dado que se requiere transmitir el movimiento en sentido opuesto hacia el otro brazo, se diseñó un mecanismo de transmisión detallado en la siguiente sección.

Figura 2.4: Dimensiones de trayectoria grabada en platina guía



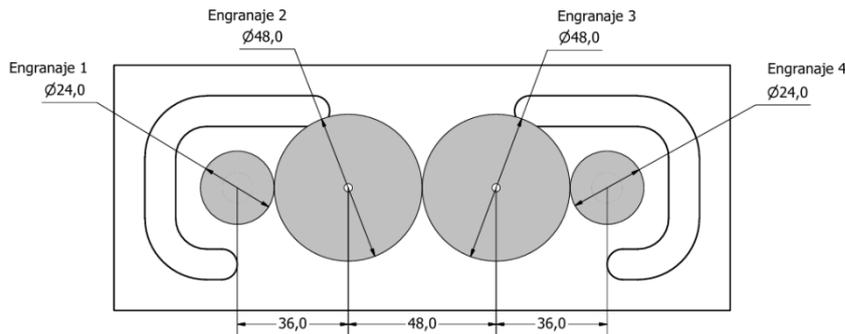
2.6.2.2 Transmisión de potencia

Dado que se tienen dos manivelas que siguen trayectorias simétricas, las cuales pueden ser obtenidas con el giro de dos ejes sincronizados en posición, pero con sus sentidos de giro opuestos, se realiza una selección de métodos para transmitir la potencia, cuya matriz de decisión se encuentra en el apéndice A.

Se seleccionan engranajes, dado que permiten adaptarse a las limitaciones de espacio, se utilizan menos componentes para transmitir el movimiento y se puede invertir el sentido de giro sin complicaciones, a diferencia de las transmisiones con poleas, que obligan a cruzar las bandas lo cual genera un desgaste prematuro o se requiere un mayor número de poleas con el requerimiento de espacio que esto conlleva.

Se diseñan las medidas de engranajes mostradas en la figura 2.5, en función del requerimiento de la distancia entre ejes disponible.

Figura 2.5: Medidas de engranajes para transmisión de potencia en mecanismo de sujeción



Los engranajes fueron seleccionados en base a un proceso iterativo verificando que exista la mínima interferencia entre dientes. La entrada de potencia se realizará en el engranaje 2, de manera que el engranaje 1 cuente con un recorrido mayor, de manera análoga sucede con los engranajes 3 y 4.

Según las medidas de los engranajes, los piñones acoplados a los brazos deben dar un giro de 146° , lo que implica que el engrane más grande que está acoplado al servomotor debe realizar una rotación de 73° .

2.6.2.3 Requerimiento de potencia

Se calculó el torque requerido para mover el mecanismo. En este caso, se considera el peso de los brazos y la distancia desde el eje de la manivela hasta el pasador que atraviesa el brazo y lo desplaza siguiendo la trayectoria de la guía. De acuerdo con el cálculo de Inventor, se tiene que el peso del brazo es de 0.040 kg. La distancia más lejana a la que llega el pasador desde el eje es de 0.028 m. El torque requerido para mover el mecanismo está dado por el doble del torque requerido para mover uno de los brazos de sujeción, según la ecuación 2.1.

$$\tau_{SERVOMOTOR} = 2 * (W_{SISTEMA SUJECION} * r_{MANIVELA}) \quad (2.1)$$

$$\tau_{SERVOMOTOR} = 2 * 0.040 \text{ kg} * 9.810 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.028 \text{ m}$$

$$\tau_{SERVOMOTOR} = 0.022 \text{ Nm} = 0.224 \text{ kg cm}$$

El tiempo máximo que deberá tomarse el sistema para desplazar el brazo en cualquier dirección será de 2 segundos. El rango de movimiento del brazo requiere que el servo se traslade 146 grados en total. Dado que la mayoría de los servomotores tienen un rango menor de desplazamiento, se usó un sistema de engranajes que permitió alcanzar dicho ángulo. En ese caso, los grados que debe desplazarse el servomotor son 73, con lo cual se obtiene que el actuador deberá cumplir con una velocidad de 0.637 rad/seg (6.083 RPM).

Finalmente, se calculó la potencia requerida, en función de la velocidad a la que se mueve el mecanismo y el torque total, de acuerdo con la ecuación 2.2.

$$P_{SERVOMOTOR} = \omega_{MECANISMO} * \tau_{MECANISMO} \quad (2.2)$$

$$P_{SERVOMOTOR} = 0.637 \frac{rad}{s} * 0.022 Nm$$

$$P_{SERVOMOTOR} = 0.014 W$$

Con los datos obtenidos y considerando el factor de seguridad de 1.2, se obtienen los valores mostrados en la tabla 2.7.

Tabla 2.7: *Parámetros de servomotor para sujeción a canaleta*

Especificación	Valor
Torque	0.224 kg cm
Potencia	0.017 W
Velocidad	0.637 rad/s

2.6.3 Cepillos rotatorios

2.6.3.1 Diseño de mecanismo

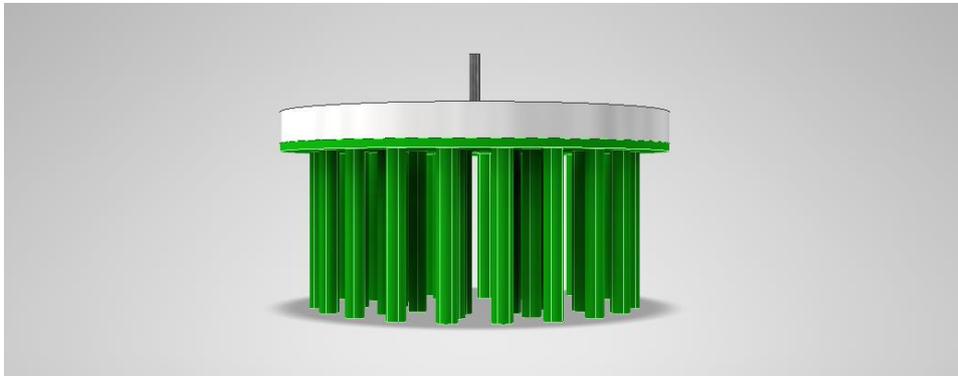
Se dimensionaron dos cepillos rotatorios cilíndricos de 100 milímetros de diámetro y 50 milímetros de alto, de manera que cada uno sea capaz de barrer el polvo hacia un lateral de la canaleta, por lo cual se encuentran rotando en sentidos opuestos.

Este diseño se selecciona en función de las limitaciones de espacio, ya que ambos cepillos cubren todo el ancho de la canaleta.

El eje del cepillo, con una disposición perpendicular al suelo, cuenta con diámetro de 3 mm. fabricado en acero 304 con una longitud 25 mm.

En último lugar, las cerdas de nylon están dispuestas de manera perpendicular al eje y ocupando toda la altura del cepillo. Las cerdas son de 40 milímetros de largo, incrustadas en un cuerpo de plástico de 10 milímetros de alto. El diseño propuesto se muestra en la figura 2.6.

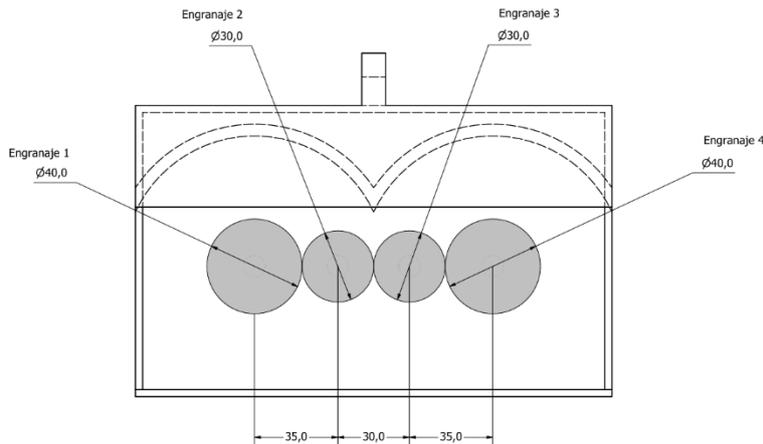
Figura 2.6: Diseño de cepillo rotatorio



2.6.3.2 Transmisión de potencia

La velocidad de rotación del cepillo se establece en 300 RPM, según lo visto en dispositivos similares con cepillos cilíndricos [20]. Los cepillos deben girar a la misma velocidad, pero en sentido opuesto, por lo que en este caso aplica el mismo análisis que se realizó para el mecanismo de sujeción, obteniendo un sistema de engranajes para transmitir el movimiento de acuerdo con las distancias entre ejes. Las medidas de los engranajes se muestran en la figura 2.7.

Figura 2.7: Medidas de engranajes para transmisión de potencia en cepillos rotatorios



Se observa que se tiene una reducción de velocidad con relación 1.5:1, lo cual debe ser considerado al momento de seleccionar el actuador que impulsará el movimiento. Adicionalmente, el engranaje donde se tendrá la entrada de potencia es el número 2.

2.6.3.3 Requerimiento de potencia

Se procedió a calcular la fuerza de fricción ejercida entre las cerdas y la superficie de la canaleta, la cual está dada por la ecuación 2.3, considerando un coeficiente de fricción de 0.4 correspondiente al nylon con el acero [21], y calculando el peso del cepillo a partir de la masa total obtenida de Autodesk Inventor, siendo esta de 0.117 kg. Al calcular su peso según la gravedad, se obtiene el peso de 1.148 N.

$$F_{f \text{ CEPILLO}} = \mu_{\text{ACERO-NYLON}} * W_{\text{CEPILLO}} \quad (2.3)$$

$$F_{f \text{ CEPILLO}} = 0.400 * 1.148 \text{ N}$$

$$F_{f \text{ CEPILLO}} = 0.459 \text{ N}$$

La otra fuerza que actúa sobre el cepillo corresponde al desplazamiento del polvo alojado sobre la canaleta. Para esto, se asume que la altura de la capa de polvo de la canaleta es la máxima permitida por la normativa OSHA 1910.272, siendo de 0.032 m. [22]. El área de polvo que deberá arrastrar el cepillo es área del círculo que forma el cepillo, siendo esta de 0.008 m² considerando el diámetro de 0.1 m. Se obtiene un volumen de 2.560 * 10⁻⁴ m³. Por

último, se toma el dato de la densidad del polvo producido en actividades de molienda y almacenaje de granos, siendo este de 362 kg/m^3 [23]. Se calcula la masa y el peso de la capa de polvo.

$$m_{POLVO} = 362 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{2.560 \text{ m}^3}{10^4} = 0.093 \text{ kg}$$

$$W_{POLVO} = 0.093 \text{ kg} * 9.810 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0.909 \text{ N}$$

Se calcula el torque por la fricción de las cerdas y por la capa de polvo que se requiere desplazar, de acuerdo con el radio del cepillo, lo cual se describe en la ecuación 2.4. En esta ocasión no se produce torque por acción del peso ya que el centro de gravedad y el eje del cepillo se encuentran alineados.

$$\tau_{CEPILLO} = (F_f \text{ CEPILLO} + W_{POLVO}) * r_{cepillo} \quad (2.4)$$

$$\tau_{CEPILLO} = (0.459 \text{ N} + 0.909 \text{ N}) * 0.033 \text{ m}$$

$$\tau_{CEPILLO} = 0.045 \text{ Nm} = 0.454 \text{ kg cm}$$

Considerando dos cepillos iguales, el torque será exactamente el mismo para ambos. Se calcula el torque total de los cepillos como el doble del torque requerido para mover cada cepillo.

$$\tau_{TOTAL \text{ CEPILLOS}} = 0.090 \text{ Nm} = 0.908 \text{ kg cm}$$

Finalmente, se calcula la potencia requerida para mover ambos cepillos, en función de la velocidad calculada anteriormente (considerando la relación de velocidad entre engranajes) y el torque total, de acuerdo con la ecuación 2.5.

$$P_{MOTOR \text{ CEPILLOS}} = \omega_{CEPILLO} * \tau_{CEPILLOS} \quad (2.5)$$

$$P_{MOTOR \text{ CEPILLOS}} = 47.124 \frac{\text{rad}}{\text{s}} * 0.090 \text{ Nm}$$

$$P_{MOTOR \text{ CEPILLOS}} = 4.241 \text{ W}$$

Con los datos obtenidos y considerando el factor de seguridad de 1.2, se obtienen los valores mostrados en la tabla 2.8.

Tabla 2.8: *Parámetros de motor para cepillos rotatorios*

Especificación	Valor
Torque	1.089 kg cm
Potencia	5.089 W
Velocidad	450 RPM

2.6.4 Tracción de vehículo

2.6.4.1 Diseño de mecanismo

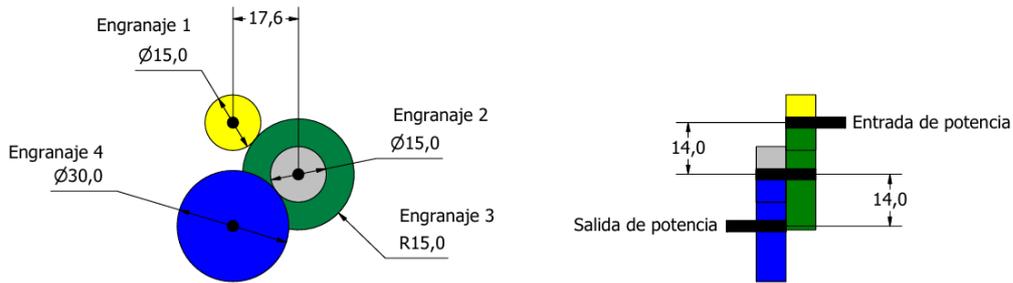
La estructura cuenta con dos ruedas para desplazar el sistema, las cuales empujan el carro hacia adelante o atrás, y son capaces de mover el peso de todos los componentes. Se eligen ruedas de 65 milímetros de diámetro y 26 milímetros de ancho, medidas disponibles comercialmente y elegidas por su compatibilidad con las restricciones de espacio y su capacidad de soportar las condiciones de operación requeridas.

El dispositivo debe trasladarse al menos 1 metro de canaleta en 30 segundos, lo que da una velocidad de 0.033 m/s. Esto equivale a la velocidad tangencial de las llantas, por lo que al dividir este valor para el radio de cada rueda se obtiene la velocidad angular, la cual resultó de 1.016 rad/s o 9.702 RPM. Por esta razón, se diseñó un sistema de transmisión de potencia. Esto debió ser considerado para las especificaciones del motor seleccionado.

2.6.4.2 Transmisión de potencia

La relación elegida para la reducción de velocidad es de 4 a 1, ya que mediante un análisis preliminar se determinó que las velocidades más bajas en motores comerciales suelen rondar entre 30 y 50 RPM, pese a ello, se realizará un control preciso de la velocidad mediante el microcontrolador. El diseño se realizó en función de las limitaciones de espacio al interior del dispositivo, obteniéndose una transmisión como aquella mostrada en el esquema de la figura 2.8.

Figura 2.8: Medidas de engranajes para transmisión de potencia en ruedas



Nota: La imagen izquierda muestra una vista lateral con las medidas de los engranajes. La imagen derecha muestra la vista frontal del sistema, especificando la entrada de potencia acoplada al motor (engrane amarillo) y la salida de potencia acoplada al eje de las ruedas (engrane azul).

2.6.4.3 Requerimiento de potencia

De acuerdo con los modelos realizados en Inventor, se obtiene que el sistema tiene una masa de aproximadamente 4 kg, tomando en cuenta elementos electrónicos adicionales como placas de circuito impreso, cables y baterías, además de la estructura y la parte mecánica. Dado esto, se considera el torque producido por la resistencia a la rodadura, a partir del coeficiente de resistencia de rodadura típico para neumáticos de caucho, siendo este de 0.015 [24].

$$\tau_{RODADURA} = m_{SISTEMA} * g * \mu_{RODADURA} * R_{RUEDA} \quad (2.6)$$

$$\tau_{RODADURA} = 4 \text{ kg} * 9.810 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.015 * 0.033 \text{ m}$$

$$\tau_{RODADURA} = 0.019 \text{ Nm} = 0.198 \text{ kg cm}$$

Otra fuerza que se debe vencer es la inercia. Se considera el requerimiento que indica que debe cambiar su estado de reposo o de movimiento en 0.1 segundos. La aceleración estará dada por el doble de la velocidad establecida en los requerimientos (para dar la posibilidad de aumentar la velocidad por encima de lo requerido) dividido entre el tiempo requerido para vencer la inercia. El torque debido a esta fuerza está dado por la ecuación 2.7.

$$\tau_{INERCIA} = m_{SISTEMA} * a_{SISTEMA} * R_{RUEDA} \quad (2.7)$$

$$\tau_{INERCIA} = 4 \text{ kg} * \frac{0.066 \text{ m}}{0.1 \text{ s}^2} * 0.033 \text{ m}$$

$$\tau_{INERCIA} = 0.087 \text{ Nm} = 0.888 \text{ kg cm}$$

El torque total será la suma del torque de rodadura y el torque requerido para vencer la inercia.

$$\tau_{RUEDAS} = 0.106 \text{ Nm} = 1.086 \text{ kg cm}$$

Finalmente, se calcula la potencia del motor en función del torque total y la velocidad angular a la que giran las ruedas considerando la relación de transmisión, según la ecuación 2.8.

$$P_{RUEDAS} = \omega_{RUEDAS} * \tau_{RUEDAS} \quad (2.8)$$

$$P_{RUEDAS} = 2.031 \frac{\text{rad}}{\text{s}} * 4 * 0.106 \text{ Nm}$$

$$P_{RUEDAS} = 0.861 \text{ W}$$

Con los datos obtenidos y considerando el factor de seguridad de 1.2, se obtienen los valores mostrados en la tabla 2.9.

Tabla 2.9: Parámetros de motor para ruedas del vehículo

Especificación	Valor
Torque	1.303 kg cm
Potencia	1.033 W
Velocidad	40 RPM

2.6.4.4 Dimensionamiento de eje

Se calculó el diámetro mínimo que se requiere para el eje de las ruedas con el fin de evitar deformaciones. Según la fórmula para el diámetro mínimo de Mott [16], este diámetro está dado por la ecuación 2.9, a partir de la potencia del motor y la velocidad de rotación del eje. Este resultado será verificado en la sección de resultados.

$$d = \sqrt[3]{\frac{1.33 * 10^6 * P}{N}} \quad (2.9)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{1.33 * 10^6 * 0.348 * 10^{-3}}{40 \text{ RPM}}} = 2.262 \text{ mm}$$

2.7 Diseño de control

2.7.1 Modelado de motor DC

Para un control preciso de la velocidad del dispositivo independiente de las condiciones de carga a las que sea sometido se implementó un controlador PID. En primer lugar, se obtuvo el modelo del motor DC haciendo algunas simplificaciones para obtener un modelo de primer orden a partir de sus datos técnicos [25]. El desarrollo completo para la obtención de la función de transferencia se encuentra en el apéndice C.

Los parámetros utilizados en la función de transferencia se muestran en la tabla 2.10.

Tabla 2.10: Parámetros de modelo de motor DC

Parámetro	Valor
Resistencia del motor R	3 Ω
Constante de velocidad K_e	0.441 V s/rad
Constante de torque K_t	0.441 Nm/A
Amortiguamiento B	0.004 kg m ²
Inercia J	1.360 10 ⁻³ kg m ²

Finalmente, la función de transferencia obtenida se muestra en la ecuación 2.10, mientras que las respuestas a una entrada del tipo escalón unitario se muestran en las figuras 2.9 y 2.10.

$$G(s) = \frac{0.441}{0.004 + 0.207s} \quad (2.10)$$

Figura 2.9: Respuesta de sistema a entrada escalón unitario en lazo abierto

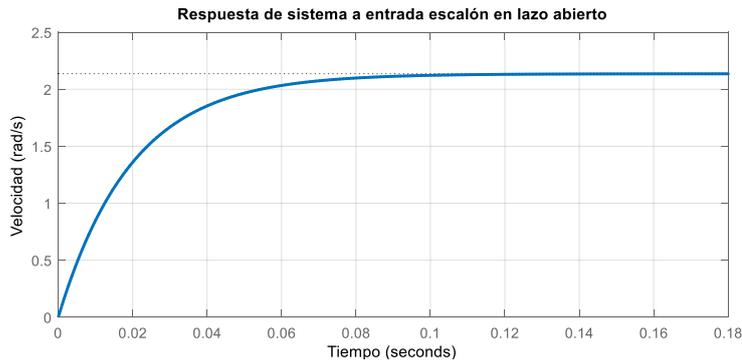


Figura 2.10: Respuesta de sistema a entrada escalón unitario en lazo cerrado



2.7.2 Diseño de controlador de velocidad

Pese a no tener cargas variables en el sistema, resulta necesario diseñar un controlador que tome los datos de la retroalimentación y sea capaz de mantener la velocidad deseada en caso de existir alguna perturbación o condición no planificada. El controlador seleccionado es el PID ya que resulta ideal para sistemas de primer orden y permite ser implementado de manera sencilla en microcontroladores.

El controlador PID, que cuenta con la ganancia proporcional, integral y derivativa, se ve influenciado por los valores que se asignen a dichas variables. A rasgos generales, se puede resumir el efecto de cada ganancia según lo mostrado en la tabla 2.11.

Tabla 2.11: Efecto de ganancias de PID sobre respuesta del sistema

Parámetro	Efecto en respuesta del sistema
Ganancia proporcional K_p	Disminuye el tiempo de respuesta (tiempo de asentamiento y tiempo de subida)
Ganancia integral K_i	Disminuye el error en estado estable
Ganancia derivativa K_d	Disminuye el sobresalto (<i>overshoot</i>)

Para este modelo, se admitió un tiempo de establecimiento de 0.1 segundos. Como se observó en las respuestas mostradas, el sistema responde en un tiempo que se encuentra dentro de la restricción dada, sin embargo, se tiene un error considerable respecto al setpoint establecido.

Considerando la información de la tabla 2.11, se eligió un controlador PI, ya que permite modificar el tiempo de respuesta a conveniencia y disminuir el error del valor final; para este caso no es necesaria una ganancia derivativa, ya que no se tiene un sobresalto.

Se utilizó la herramienta de Matlab *PID Tuner*, la cual permite sintonizar los valores de ganancia mediante una interfaz gráfica, y los resultados de dicha sintonización se muestran en la sección 3.3.

2.7.3 Discretización de controlador para implementación en microcontrolador

Se implementó un controlador PID discreto a partir de la fórmula obtenida desde el texto de Control Digital de L. Garcia, la cual es hallada desde la discretización de la ecuación para un controlador PID continuo y reemplazando la parte derivativa por una diferencia y la parte integral por una suma a partir del método trapezoidal de integración [26]. La fórmula para el controlador PID discreto se muestra en la ecuación 2.11.

$$u(k) = u(k - 1) + \left(K_p + \frac{K_d}{T_s}\right)e(k) + \left(-K_p + K_i T_s - 2 \frac{K_d}{T_s}\right)e(k - 1) + \left(\frac{K_d}{T_s}\right)e(k - 2) \quad (2.11)$$

Dado que no se tiene ganancia derivativa, la ecuación se simplifica.

$$u(k) = u(k - 1) + (K_p)e(k) + (-K_p + K_i T_s)e(k - 1)$$

Del mismo texto mencionado se obtiene el procedimiento para encontrar el tiempo de muestreo a partir del tiempo de establecimiento del sistema con el controlador PID continuo, el cual se calcula con la ecuación 2.12.

$$0.05T_s \leq T_s \leq 0.15T_s \quad (2.12)$$

Siendo el tiempo de establecimiento de 0.025 segundos, se establece el tiempo de muestreo como:

$$T_s = 0.003$$

Con esto, se ajustaron las ganancias halladas para el controlador PID continuo mediante la herramienta *PID Tuner* con lo cual se pudo implementar el código respectivo en el microcontrolador

2.7.4 Dispositivo de control

Dada la necesidad de que el sistema se pueda controlar remotamente, se elige un controlador que cuente con conectividad WiFi, ya que es un servicio con el que se cuenta en toda la planta y permite controlar el sistema de manera sencilla con una aplicación. Dado que no hay muchas opciones en el mercado con esta característica y ofrezca facilidad a la hora de programar, se eligió el controlador ESP32 de 30 pines, el cual cuenta con suficientes salidas y entradas para el proyecto además de conectividad WiFi y Bluetooth. La especificación de cada una de sus entradas y salidas está detallada en el anexo A.

Figura 2.11: Microcontrolador ESP32 de 30 pines



2.8 Diseño eléctrico y electrónico

2.8.1 Alimentación

2.8.1.1 Consumo del sistema

Dada la necesidad de que el sistema opere de manera inalámbrica, se opta por una alimentación eléctrica a baterías para el controlador y actuadores del dispositivo. Se elige esta opción dado que es la única que se ajusta al requerimiento.

Para esto, se calcula el consumo de cada uno de los elementos. Se toma como referencia la corriente nominal de los servomotores y el controlador, y la corriente en función del torque calculado previamente para los motores de las ruedas y los cepillos.

Para los servomotores de los dos mecanismos de sujeción, según la tabla 3.1:

$$I_{SUJECION} = 2 * 0.200 = 0.400 A$$

Para el motor de los cepillos rotatorios, según la curva torque-corriente del motor [27]:

$$I_{cepillo} = 0.900 A$$

Para el motor de las ruedas, según la curva torque-corriente del motor [27]:

$$I_{ruedas} = 0.700 A$$

Para el microcontrolador, el fabricante recomienda un suministro de 0.5 amperios [28].

$$I_{\mu C} = 0.500 A$$

Sumando todas las corrientes calculadas, se obtiene el consumo total del sistema de acuerdo con la ecuación 2.13

$$I_{TOTAL} = I_{SUJECION} + I_{CEPILLO} + I_{RUEDAS} + I_{\mu C} \quad (2.13)$$

$$I_{TOTAL} = 2.500 A$$

Teniendo en cuenta el requerimiento de autonomía del sistema acerca de funcionar por aproximadamente una hora continua, se establece que la batería debe entregar una corriente de al menos 2.5 amperios y tener una capacidad de al menos 2500 mAh para poder operar durante una hora de manera continua.

2.8.1.2 Selección de sistema de alimentación

Existen diversas alternativas para alimentar proyectos basados en microcontroladores. Las opciones más populares son las baterías de litio, alcalinas y de plomo. El sistema elegido es la batería de plomo, debido a que puede suministrar altas corrientes, lo cual es requerido cuando se trabaja con diversos motores a la vez. En el caso de las baterías de litio o alcalinas, la corriente que entregan no suele estar por encima de 1 amperio, además de que las pilas alcalinas tienen una capacidad muy baja de amperios hora, por lo que se descargarían en pocos minutos.

2.8.2 Regulación de voltaje

Se tendrán dos salidas de voltaje en el sistema. Por una parte, un voltaje de 3.3 VDC para alimentar el microcontrolador, el *encoder* y la parte lógica del controlador del motor de las ruedas, mientras que se utilizarán 6 VDC para alimentar los motores.

Para regular el voltaje de alimentación de componentes lógicos y de control se utilizó un regulador lineal variable, el cual mediante un arreglo de resistencias permite obtener un voltaje de salida a partir de un voltaje de entrada más alto. El integrado seleccionado es el LM338T que entrega 5 amperios y hasta 32 voltios en su salida.

Es necesario hacer un cálculo de resistencias que permita obtener el valor deseado, el cual está dado por la ecuación 2.14.

$$V_{out} = 1.25 * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.14)$$

$$R_1 = 100 \, \Omega ; V_{out} = 6V$$

$$R_2 = 100 * \left(\frac{6}{1.25} - 1\right) = 380 \, \Omega$$

2.8.3 Control de motores

El control de los servomotores está dado por una librería disponible para el microcontrolador donde únicamente se especifica el ángulo al que se quiere llevar el servomotor. Por otra parte, para los motores de escobillas, se requiere un control específico para sus aplicaciones. Las diferentes alternativas se muestran en la tabla 2.12.

Tabla 2.12: Características de diferentes controles de motor

Características	Puente H BJT	Puente H MOSFET	Interruptor BJT	Interruptor MOSFET
Control de giro	Bidireccional	Bidireccional	Unidireccional	Unidireccional
Método de control	Corriente de base	Voltaje de compuerta	Corriente de base	Voltaje de compuerta
Implementación	Mediante arreglo de transistores, diodos y resistencias o mediante drivers	Mediante arreglo de transistores, diodos y resistencias o mediante drivers	Transistor y resistencias	Transistor y resistencias
Eficiencia energética	Baja, pérdidas por conducción y caída de voltaje	Alta, baja pérdida por conducción o conmutación	Baja, pérdidas por conducción y caída de voltaje	Alta, baja pérdida por conducción o conmutación
Rapidez de conmutación	Baja	Alta	Baja	Alta

Se consideró que los cepillos giren a una sola velocidad y en el mismo sentido, por lo cual se considera un control de encendido-apagado mediante un transistor BJT que actúe como conmutador, controlando su estado mediante una señal del microcontrolador. Por otra parte, para el motor de las ruedas, sí se requiere un control de la velocidad y del sentido de giro, en donde se vuelve más factible un controlador dedicado para este fin.

Los componentes requeridos para controlar el motor de los cepillos se muestran en la figura 2.12. Se selecciona un transistor TIP35 al ser un modelo fácil de encontrar y que satisface las especificaciones requeridas de corriente de colector y voltaje colector emisor, que

representan el voltaje y la corriente requerida por el motor. Las especificaciones relevantes para el cálculo obtenidas a partir de la ficha técnica [29] se muestran en la tabla 2.13.

Figura 2.12: Circuito de control on/off de motor para cepillos rotatorios

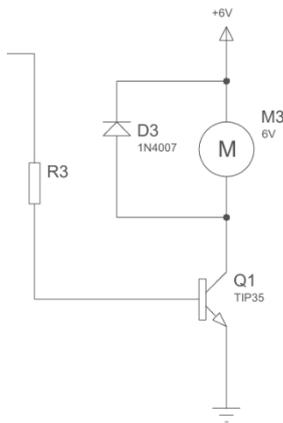


Tabla 2.13: Valores de interés para transistor conmutador TIP35

Especificación	Valor
Máximo voltaje colector-emisor	100 V
Máxima corriente de colector	25 A
Máxima corriente de base	5 A
Ganancia de corriente	50

Se calculó el valor de la resistencia de base según la ecuación 2.15.

$$R_{BASE} = h_{fe} * \frac{V_{BASE} - 0.7}{I_{COLECTOR}} \quad (2.15)$$

$$R_{BASE} = 50 * \frac{3.3 - 0.7}{1.2} = 108 \Omega$$

Para el control de velocidad y dirección del motor que controla las ruedas, se elige el controlador DRV8874, el cual es un controlador basado en un puente H MOSFET que cuenta con alta eficiencia, lo cual es vital para un sistema alimentado por baterías, y permite controlar el motor mediante una señal PWM generada por el microcontrolador.

Las especificaciones de este controlador se muestran en la tabla 2.14, y las conexiones requeridas para ponerlo a funcionar se detallan en la figura 2.14. Esta información es provista por el fabricante [30].

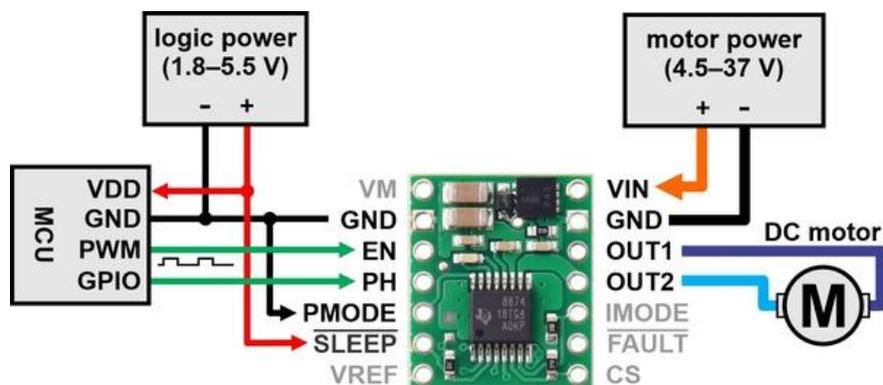
Figura 2.13: Controlador de motor DRV8874



Tabla 2.14: Especificaciones de controlador de motor DRV8874

Especificación	Valor
Voltaje de operación de motor	4.5 – 37 V
Voltaje de componente lógico	1.8 – 5.5 V
Máxima corriente de salida	2.1 A
Máxima frecuencia PWM	100 kHz

Figura 2.14: Diagrama de conexiones de controlador DRV8874



2.9 Diseño informático

2.9.1 Código para microcontrolador

El sistema debe seguir una serie de pasos para controlar el sistema. El diagrama de flujo de las acciones se muestra en la figura 2.15. El microcontrolador debe ser capaz de realizar el encendido y apagado de los actuadores y controladores mediante señales que debe ser capaz de leer y recibir. Estas son:

- Señal de salida digital para controlar encendido y apagado de motor de cepillos.
- Señal de salida digital para controlar dirección de giro de motor de ruedas.
- Señal de salida digital PWM para controlar velocidad de giro de motor de ruedas.
- Señal de salida digital PWM para controlar ángulo de posición de servomotores en mecanismos de sujeción.
- Señal de entrada analógica para conocer posición velocidad de motor de ruedas mediante *encoder*.

Adicionalmente, se tiene un método alternativo para conectar el dispositivo a la red Wifi mediante la librería WifiManager. Esta permite configurar el microcontrolador como un punto de acceso al cual se puede acceder desde cualquier dispositivo con Wifi, únicamente para enviar las credenciales de la red hacia el microcontrolador y que luego pueda conectarse a internet para ejecutar la lógica cargada en el programa [31]. Un diagrama de flujo con el proceso para acceder a la red mediante este método se muestra en la figura 2.16.

Figura 2.15: Diagrama de flujo para el control del sistema de limpieza de canaletas

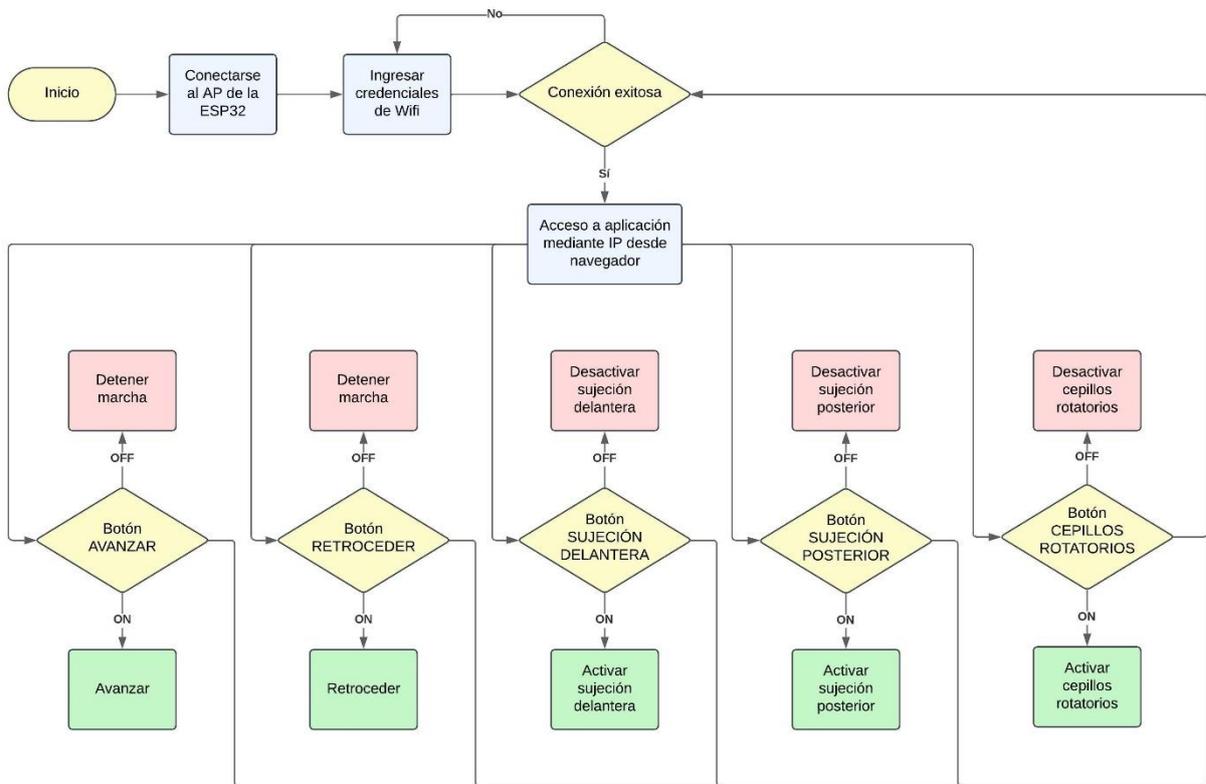
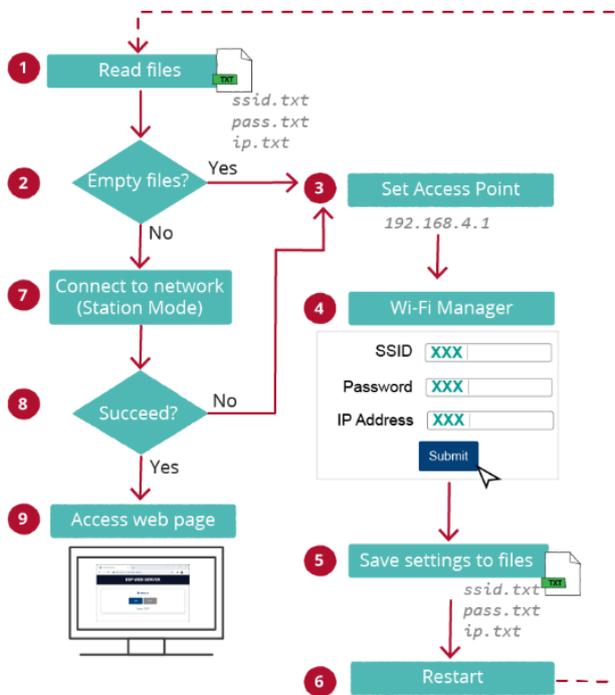


Figura 2.16: Diagrama de flujo de acceso a red WiFi mediante librería WifiManager

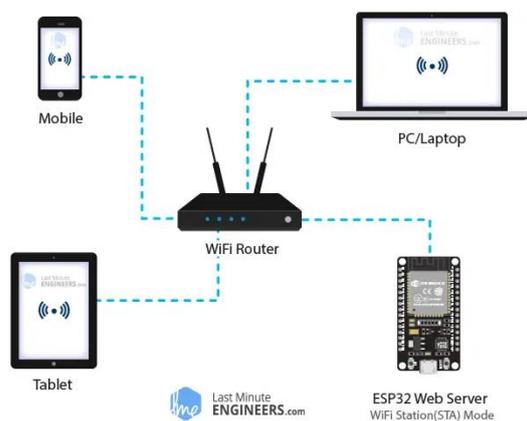


Nota: Esquema obtenido del blog HueCat [32]

2.9.2 Aplicación de control remoto

Se determina que la mejor forma de controlar remotamente el dispositivo es mediante una aplicación móvil ya que se aprovecha la infraestructura establecida en el área de trabajo. Se optó por desarrollar una aplicación web basada en HTML que estará alojada en el microcontrolador, y a la cual se puede acceder mediante cualquier dispositivo conectado a la misma red *WiFi*, de esta manera, se elimina la necesidad de realizar una instalación de un ejecutable para cada dispositivo desde donde se quiera controlar el sistema de limpieza. La arquitectura de la red con la ESP32 trabajando como servidor web se muestra en la figura 2.17.

Figura 2.17: Arquitectura de ESP32 trabajando como servidor web



Nota: Esquema obtenido del blog LastMinuteEngineers [33].

Se observa que al estar conectada la ESP32 a una red Wifi, se puede acceder al dispositivo desde cualquier otro dispositivo conectado a la red mediante su IP, permitiendo así hacer la petición al microcontrolador para que retorne la página web configurada previamente y enviando comandos al microcontrolador mediante subdirectorios en el servidor.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

3.1 Componentes mecánicos

3.1.1 Ensamblaje completo del sistema

El ensamblaje completo se puede observar en la figura 3.1, mientras que los componentes internos se pueden visualizar en la figura 3.2.

Figura 3.1: Vista exterior del sistema de limpieza

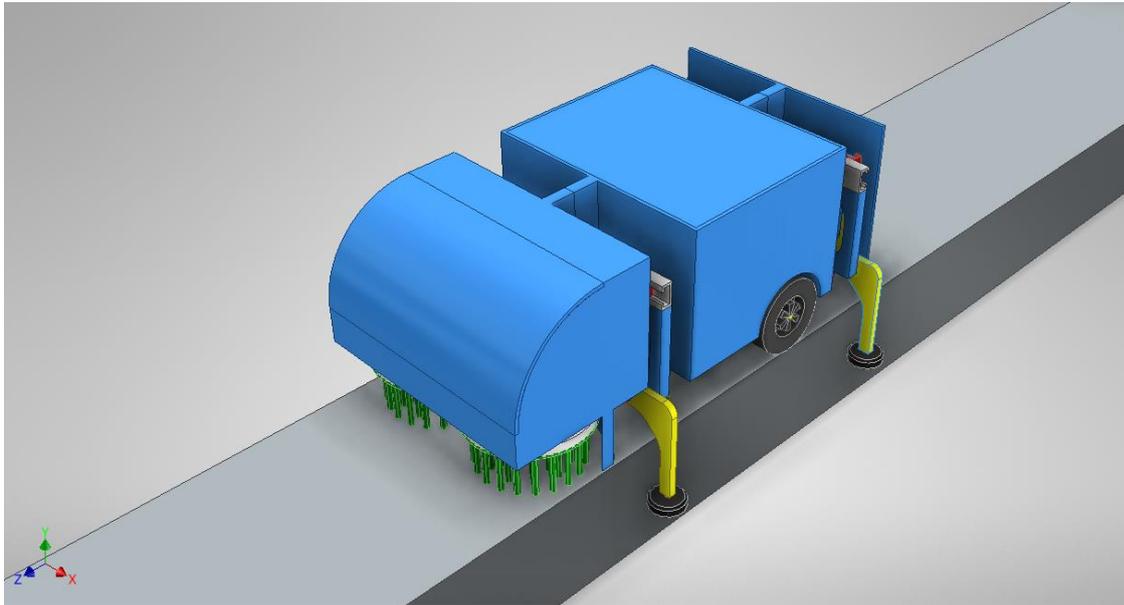
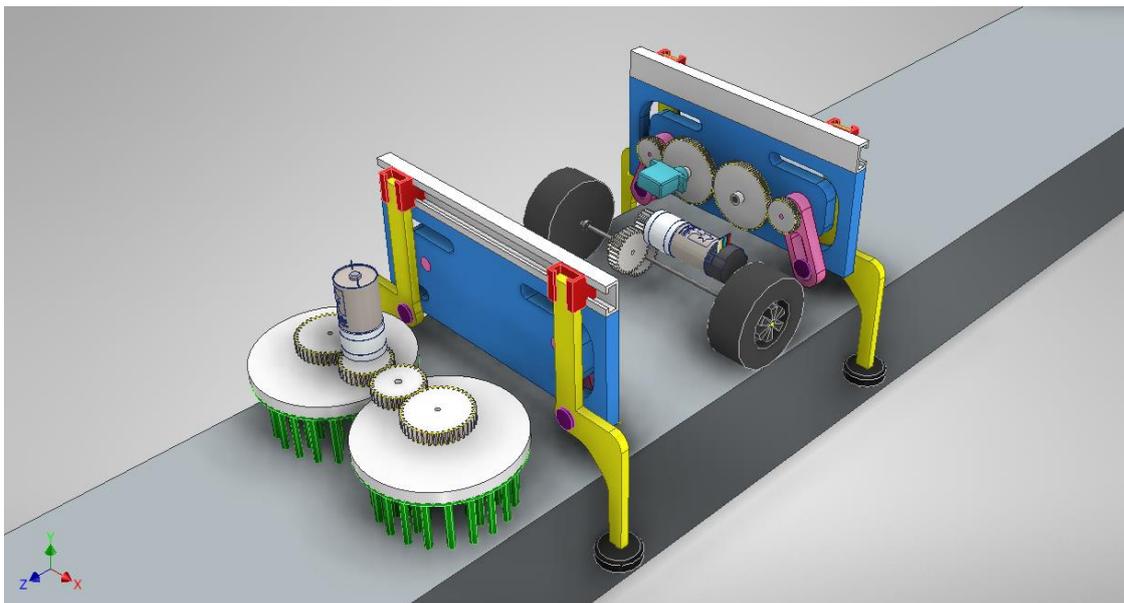


Figura 3.2: Componentes internos de sistema de limpieza



3.1.2 Actuadores seleccionados

3.1.2.1 Mecanismo de sujeción

Con los datos obtenidos en la sección 2 se selecciona un servomotor SG90, cuyas referencia y especificación obtenidas de la ficha técnica del equipo [34] se detallan en la figura 3.3 y tabla 3.1, respectivamente, y es utilizado en ambos mecanismos de sujeción, tanto el frontal como el posterior.

Figura 3.3: Servomotor SG90 para mecanismo de fijación



Tabla 3.1: Especificaciones de servomotor SG90 para mecanismo de fijación

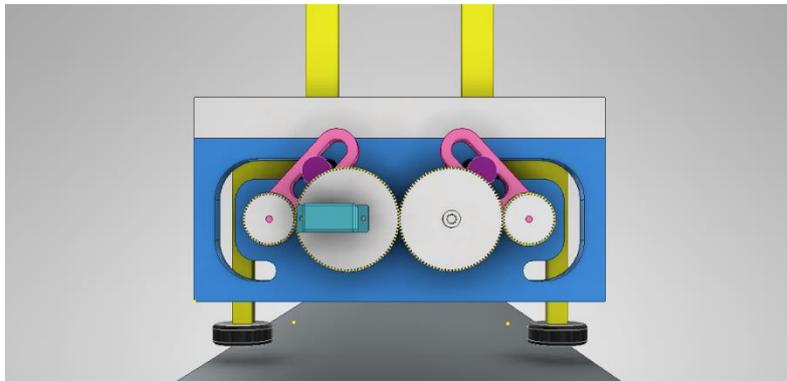
Especificación	Valor
Voltaje de operación	4.8 - 6 V
Corriente nominal	200 mA
Velocidad	0.1 seg/60° 10.472 rad/s
Torque	1.8 kg cm
Peso	10 g
Dimensiones	23 x 12 x 32 mm

Dado que se requirió ampliar el rango de movimiento del servomotor, se realizó una transmisión mediante engranajes, con la cual se permitió duplicar el ángulo máximo que se puede alcanzar con el servomotor.

Finalmente, los parámetros de la transmisión seleccionada se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: *Parámetros de engranajes de mecanismo de sujeción*

Engranaje	Diámetro primitivo	Módulo	Número de dientes	Ancho de cara
Engranaje 1	24 mm	0.5 mm	48	5 mm
Engranaje 2	48 mm	0.5 mm	96	5 mm
Engranaje 3	48 mm	0.5 mm	96	5 mm
Engranaje 4	24 mm	0.5 mm	48	5 mm

Figura 3.4: *Engranajes de sistema de sujeción*

3.1.2.2 Cepillos rotatorios

Según la información hallada en la sección de metodología, se selecciona un motor de la marca Pololu, modelo 1572, el cual cumple con los requerimientos de potencia y torque, considerando la reducción de velocidad. Su imagen y especificaciones obtenidas de la *web* del fabricante [35] se muestran en la figura 3.5 y tabla 3.3.

Figura 3.5: *Motorreductor Pololu 1572 para cepillo rotatorio*

www.pololu.com

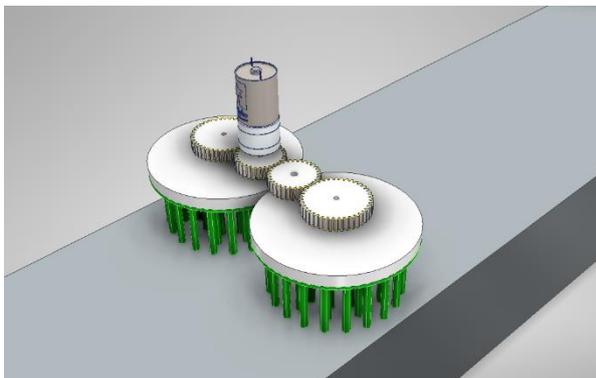
Tabla 3.3: Especificaciones de motorreductor Polulu 1572 para cepillo rotatorio

Especificación	Valor
Voltaje de operación	6 V
Velocidad sin carga	480 RPM
Corriente sin carga	0.42 A
Torque de parada	4.8 kg cm
Corriente de parada	6 A
Relación de transmisión	20.4:1
Potencia máxima de salida	5.9 W
Peso	85 g
Dimensiones	25D x 50L mm

Para transmitir el movimiento, se tiene un sistema de engranajes que permiten obtener una reducción de la velocidad de los cepillos en una relación de 1.5:1. Los parámetros de los engranajes se muestran en la tabla 3.4 y el sistema completo puede observarse en la figura 3.6.

Tabla 3.4: Parámetros de engranajes de cepillos rotatorios

Engranaje	Diámetro primitivo	Módulo	Número de dientes	Ancho de cara
Engranaje 1	40 mm	0.5 mm	80	8 mm
Engranaje 2	30 mm	0.5 mm	60	8 mm
Engranaje 3	30 mm	0.5 mm	60	8 mm
Engranaje 4	40 mm	0.5 mm	80	8 mm

Figura 3.6: Engranajes de cepillos rotatorios

3.1.2.3 Tracción de vehículo

De acuerdo con los parámetros hallados en la sección de metodología, se elige un motorreductor de la marca Pololu, modelo 4825, cuyas referencia y especificación se detallan en la figura 3.7 y tabla 3.5, respectivamente, obtenidas de la *web* del fabricante [25]. El modelo incluye un encoder que permite controlar la velocidad mediante un sistema de control realimentado.

Figura 3.7: Motorreductor Pololu 4825 para tracción del sistema



Tabla 3.5: Especificaciones de motorreductor Pololu 4825 para tracción del sistema

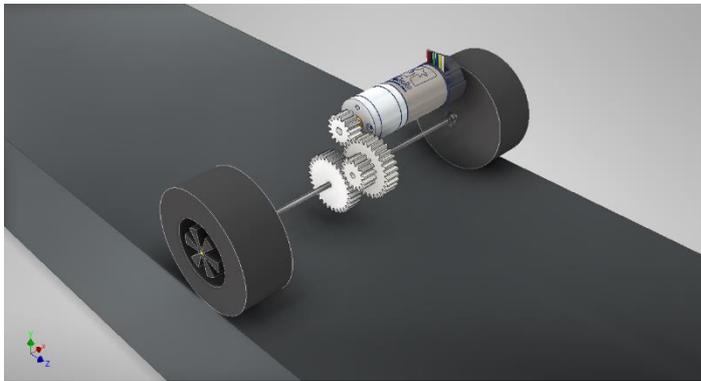
Especificación	Valor
Voltaje de operación	6 V
Velocidad sin carga	130 RPM
Corriente sin carga	0.12 A
Torque de parada	4.8 kg cm
Corriente de parada	2 A
Relación de transmisión	46.85:1
Potencia máxima de salida	1.5 W
Peso	101 g
Dimensiones	25D x 67L mm

Para la reducción de velocidad, se diseñó una transmisión por engranajes detallada en la tabla 3.6 y figura 3.8.

Tabla 3.6: *Parámetros de engranajes de tracción de sistema*

Engranaje	Diámetro primitivo	Módulo	Número de dientes	Ancho de cara
Engranaje 1	15 mm	1 mm	15	8 mm
Engranaje 2	30 mm	1 mm	30	8 mm
Engranaje 3	15 mm	1 mm <td 15	8 mm	
Engranaje 4	30 mm	1 mm	30	8 mm

Figura 3.8: *Engranajes de tracción del sistema*



3.1.3 Análisis de esfuerzo y deformación

Con la ayuda del software Autodesk Inventor se obtuvieron las gráficas de esfuerzo y deformación de los diferentes engranajes y el eje de las ruedas, que resultan ser los puntos de mayor interés y que soportan toda la carga del sistema.

En el mecanismo de sujeción, la carga es relativamente baja y constante, lo que genera esfuerzos mínimos, concentrados principalmente en los puntos de contacto entre los engranajes, como se observa en las figuras 3.9 y 3.10. De manera similar, la deformación se localiza mayormente en los dientes de los engranajes, siendo el engranaje conectado a la entrada de potencia el que experimenta los mayores esfuerzos. Pese a ello, la deformación es despreciable, en el orden de los nanómetros. Por último, la figura 3.11 muestra los coeficientes

de seguridad de las distintas partes del mecanismo, y se observa que en todas las zonas se tiene un coeficiente por encima de 15, por lo cual el sistema no va a fallar.

Figura 3.9: Deformación de engranajes en mecanismo de sujeción

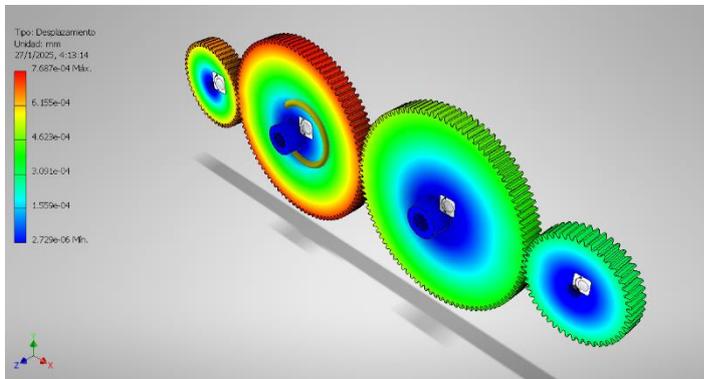


Figura 3.10: Esfuerzos de Von Mises en mecanismo de sujeción

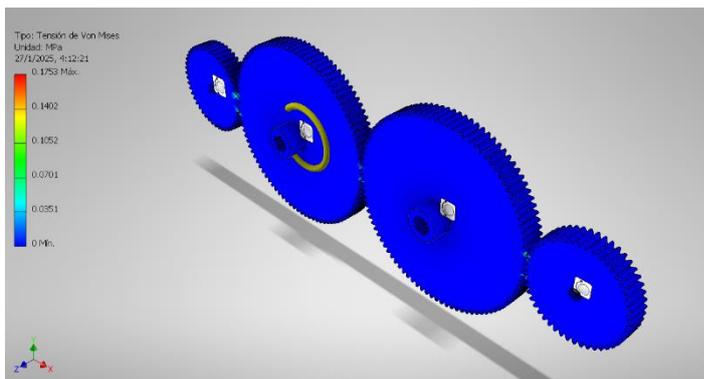
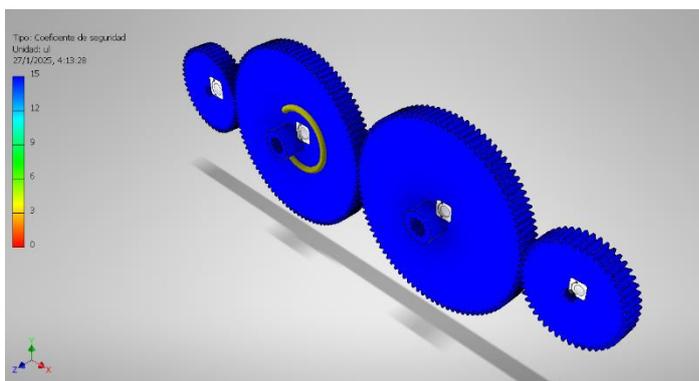


Figura 3.11: Coeficientes de seguridad en mecanismo de sujeción



Para los cepillos rotatorios, se tienen mayores esfuerzos ya que la potencia del motor es alta y gira a mayor velocidad respecto al resto del sistema. Como se observa en las figuras 3.12

y 3.13 y, al igual que en el caso anterior, el mayor esfuerzo y la deformación más significativa se concentra en los dientes de los engranajes

El engranaje que más sufre este efecto es el que cuenta con la entrada de potencia. La deformación está en el orden de los nanómetros, por lo que no es significativa, y el factor de seguridad se encuentra por encima de 15, según lo visto en la figura 3.14.

Figura 3.12: Deformación de engranajes en mecanismo de cepillos rotatorios

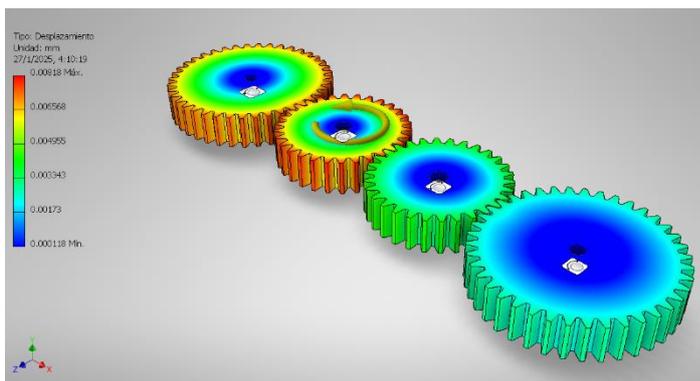


Figura 3.13: Tensiones de Von Mises en mecanismo de cepillos rotatorios

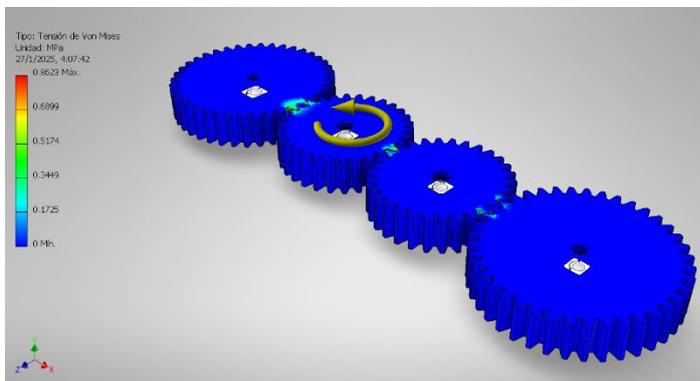
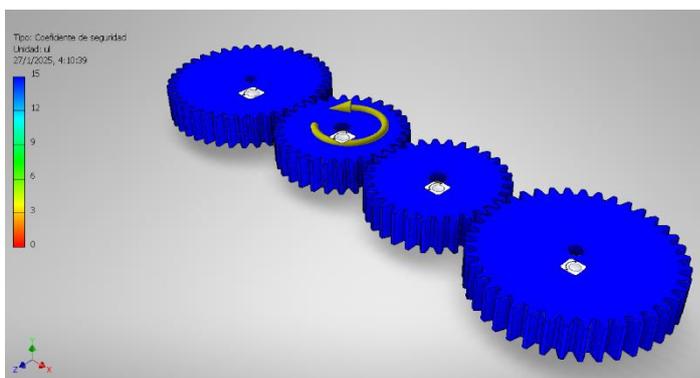


Figura 3.14: Coeficientes de seguridad en mecanismo de cepillos rotatorios



Como último sistema de engranajes, se analizó el esfuerzo al que se ven sometidos los engranajes del mecanismo de tracción.

Se observa que la mayor deformación ocurre en los dientes del piñón donde está acoplada la entrada de potencia como se observa en la figura 3.15 con un valor máximo de 0.03 milímetros, lo cual al igual que en casos anteriores no repercute en el rendimiento del sistema, pero cabe mencionar que es la deformación más alta presentada en el dispositivo. El área de contacto entre dientes es donde se tienen las tensiones más altas, especialmente en el contacto entre el piñón de entrada y el primer engrane, que es donde se tiene el factor de seguridad más bajo, sin embargo, se encuentra dentro de un rango aceptable, siendo mayor a 2.

Figura 3.15: Deformación en engranajes de mecanismo de tracción

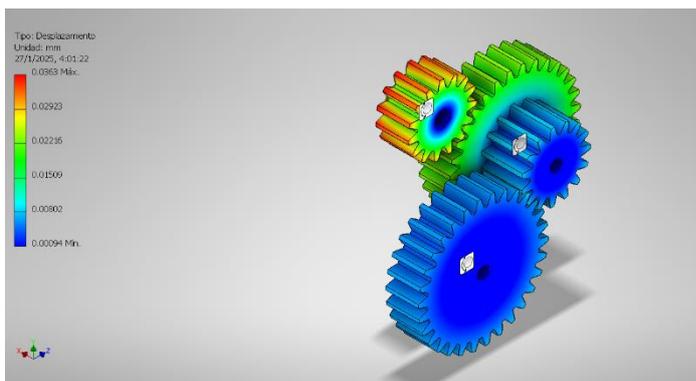


Figura 3.16: Tensiones de Von Mises en mecanismo de tracción

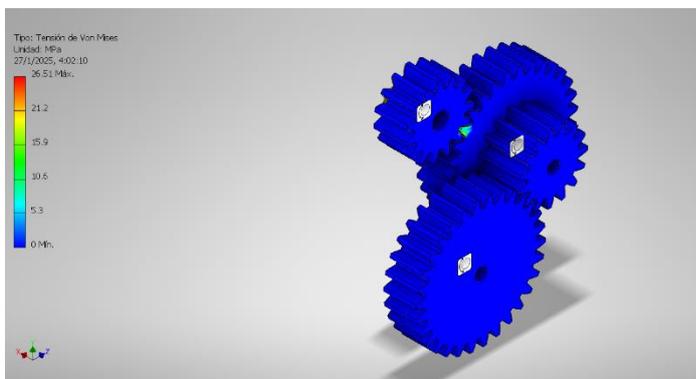
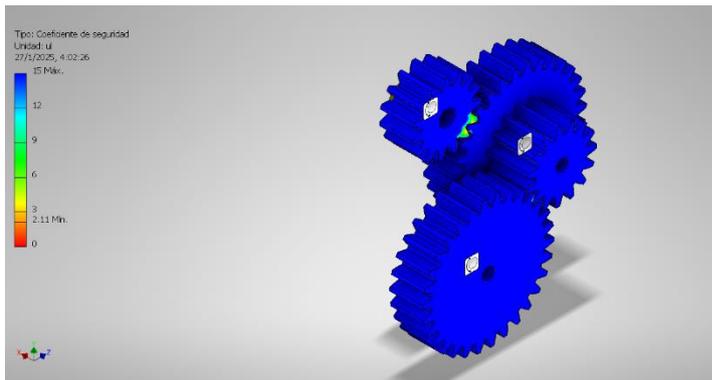


Figura 3.17: Coeficientes de seguridad en mecanismo de tracción



Además de los engranajes, otro punto de interés es el eje que conecta las ruedas del dispositivo, ya que es donde se reparte todo el peso del sistema. En los extremos actúan las reacciones de las ruedas, un poco más al centro, está el soporte fijo que corresponde al chasis del vehículo, y en la parte central se encuentra el torque aplicado por el actuador.

Se obtuvo que la mayor deformación ocurre en las ruedas, donde reposa todo el peso del vehículo, como se observa en la figura 3.18. En la parte central donde se aplica el torque del motor no se sufren mayores esfuerzos, ya que es un torque pequeño, mientras que en los soportes del eje también se observan esfuerzos considerables, según la figura 3.19.

Analizando los coeficientes de seguridad de la figura 3.20, se obtiene que el más bajo es de 2, con lo cual se concluye que el diseño satisface la necesidad, pese a ello, cabe recalcar que los coeficientes más bajos se dan por la presencia de pequeños cuellos donde el diámetro se reduce, artificio que se realizó únicamente para colocar las cargas en simulación ya que físicamente no se contaría con estas irregularidades, obteniendo un coeficiente de seguridad mayor.

Figura 3.18: Deformación en eje de ruedas de tracción

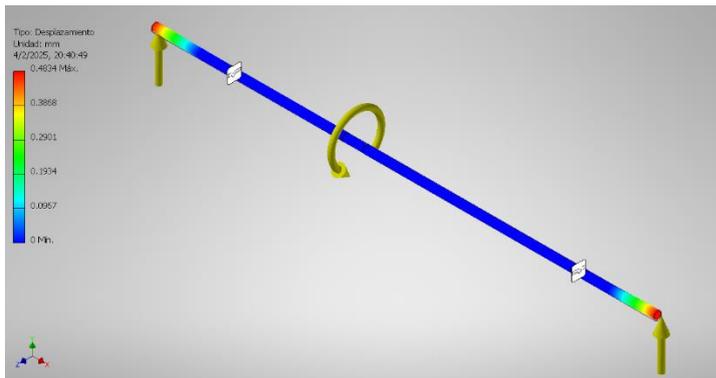


Figura 3.19: Tensiones de Von Mises en eje de ruedas de tracción

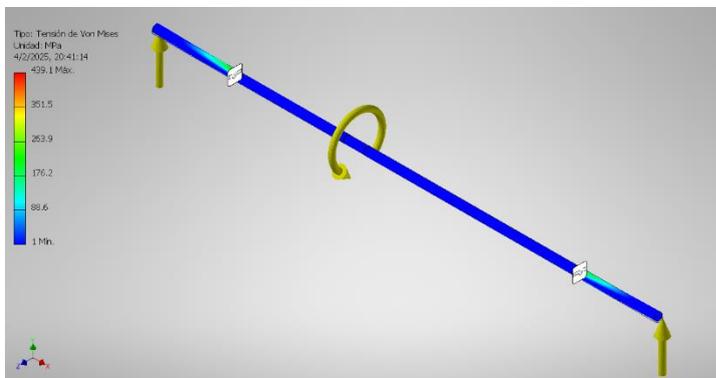
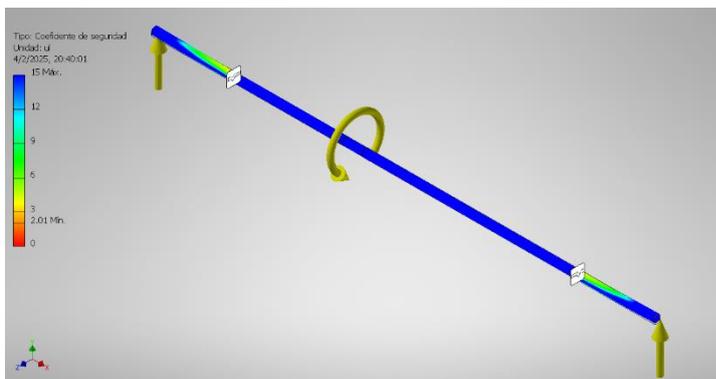


Figura 3.20: Coeficientes de seguridad en eje de ruedas de tracción



3.2 Componentes eléctricos y electrónicos

3.2.1 Fuente de voltaje

Según la demanda de energía calculada en la sección 2.8.1, se escoge una batería de plomo debido a que cuenta con la especificación necesaria para satisfacer el requerimiento de

corriente del sistema, mientras que opciones como baterías de litio fueron descartadas por su baja entrega de corriente, pese a tener un voltaje adecuado.

El modelo escogido es la batería de la marca Power-Sonic modelo PS-650, cuyas características se pueden observar en la tabla 3.7 a partir de su ficha técnica [36].

Figura 3.21: Batería Power-Sonic PS-650



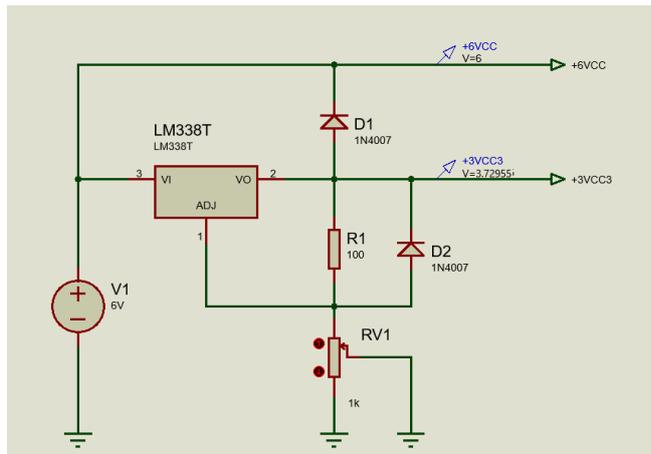
Tabla 3.7: Especificaciones de batería Power-Sonic PS-650

Especificación	Valor
Voltaje nominal	6 V
Capacidad nominal (consumo entre 3 y 4.5 A)	3 Ah
Peso	0.820 kg
Temperatura de operación en carga	-20 °C a 50 °C
Temperatura de operación en descarga	-40 °C a 60 °C

Se realizó un circuito que regula el voltaje para poder alimentar el controlador y el encoder, los cuales tienen un consumo bajo de corriente y además funcionan a un voltaje 3.3 voltios.

La figura 3.22 muestra una simulación de los voltajes obtenidos mediante regulación, mientras que los motores serán alimentados directamente desde la batería.

Figura 3.22: Simulación de circuito de alimentación y regulación de voltaje



3.2.1 Circuito del sistema

Con los componentes seleccionados en la sección anterior, se obtiene el plano eléctrico con todas las conexiones de los actuadores y controladores que conforman el sistema.

Figura 3.23: Circuito de control del sistema

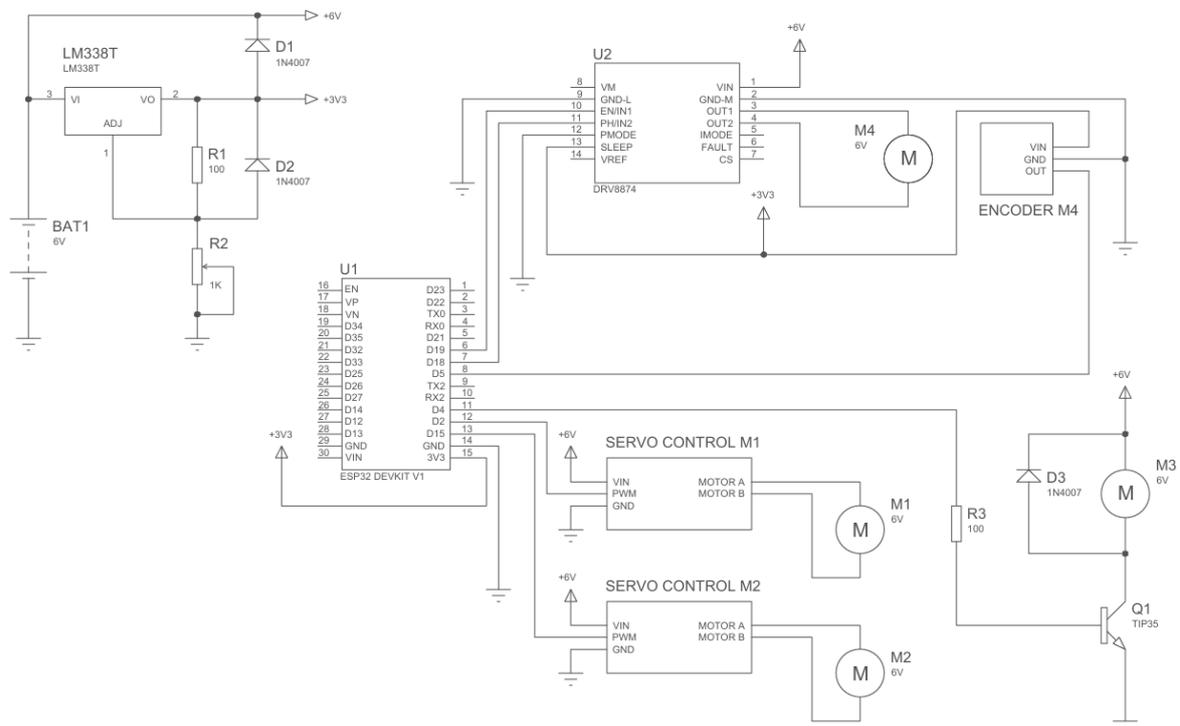
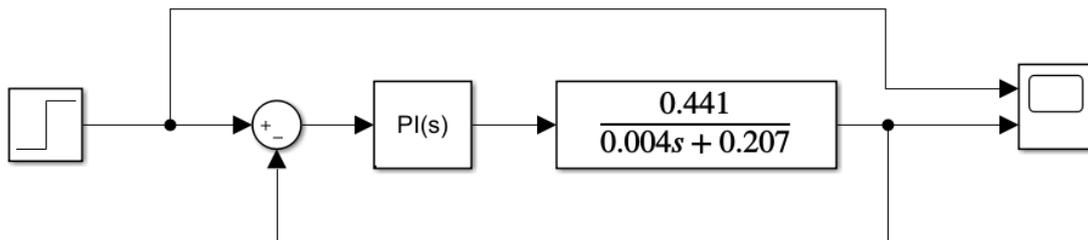


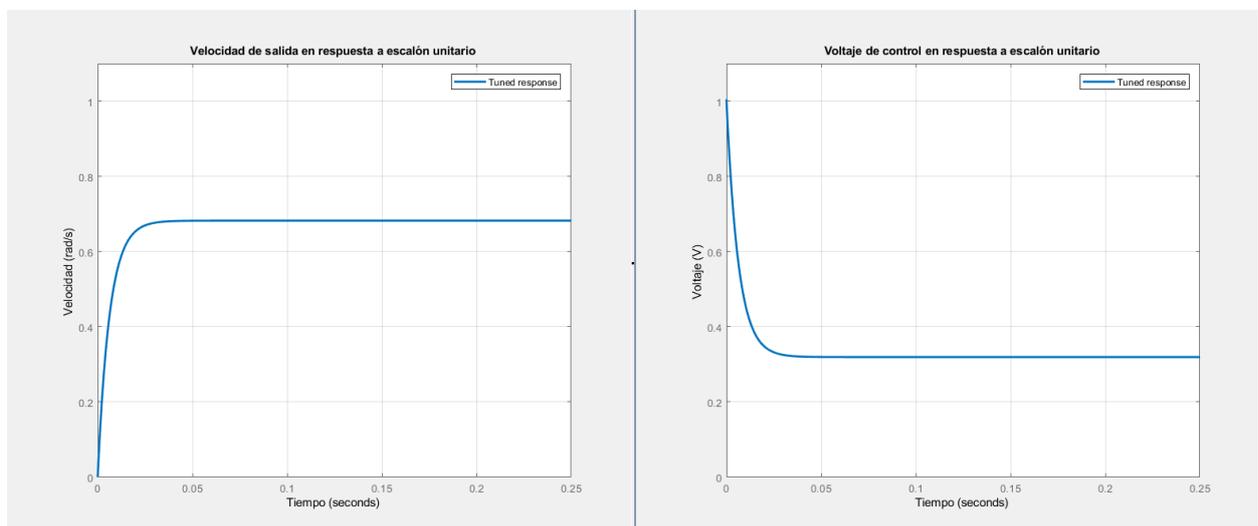
Figura 3.26: Diagrama de bloques del sistema



3.3.1 Caso continuo

Inicialmente, la planta modelada sin un controlador configurado en lazo cerrado (lo cual es equivalente a un controlador P con una ganancia de 1) mostraba la respuesta que se observa en la figura 3.27 al aplicar una entrada escalón unitaria, además se muestra la señal de control que envía el controlador a la planta. Los índices de desempeño para este caso se muestran en la tabla 3.8.

Figura 3.27: Respuestas a entrada escalón unitario en lazo cerrado sin controlador (caso continuo)



Se observa que la respuesta del sistema a la entrada escalón tiene un buen tiempo de respuesta, mucho menor al solicitado de 0.1, sin embargo, tiene un error considerable. Por otra parte, la señal de control parte de un voltaje alto igual al *setpoint* para vencer la inercia del

sistema hasta alcanzar el valor estable, sin ningún pico o cambio brusco, pese a no alcanzar la velocidad deseada.

Tabla 3.8: Índices de desempeño de sistema sin controlador

Parámetro	Valor
Tiempo de subida	0.014 s
Tiempo de estabilización	0.025 s
Valor estable	0.681 rad/s
Valor pico	0.681 rad/s

Posteriormente, al incluir el controlador PI cuyos valores se sintonizaron mediante la herramienta *PID Tuner*, se obtuvo la respuesta mostrada en la figura 3.28. Los índices de desempeño para este caso se muestran en la tabla 3.9.

Figura 3.28: Respuestas a entrada escalón unitario en lazo cerrado con controlador (caso continuo)

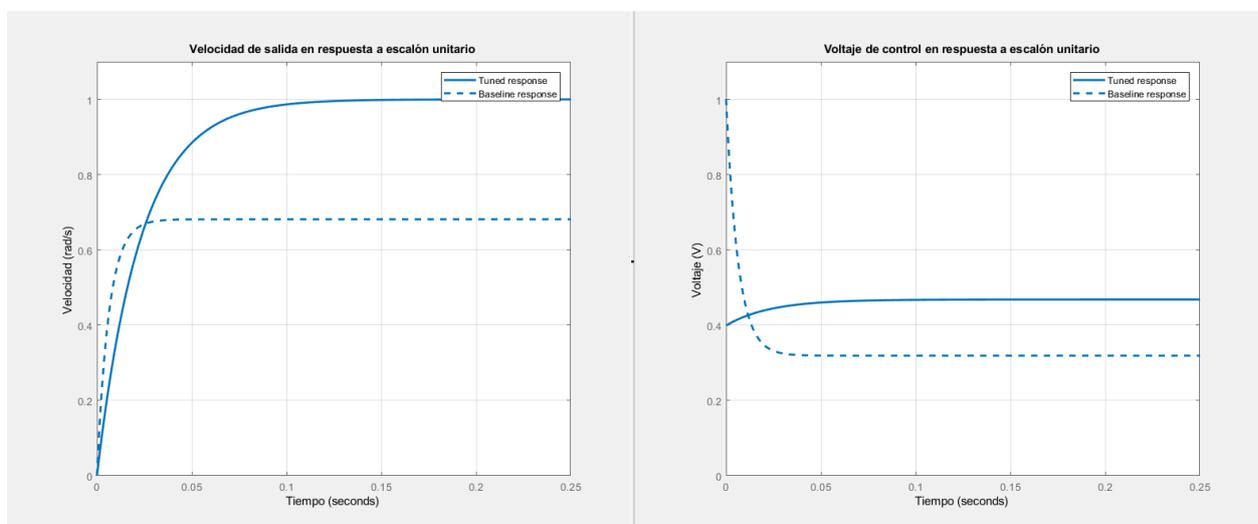


Tabla 3.9: Índices de desempeño de sistema con controlador

Parámetro	Valor
Tiempo de subida	0.091 s
Tiempo de estabilización	0.051 s
Valor estable	1 rad/s
Valor pico	1 rad/s

Con el controlador PI sintonizado, se obtuvo una respuesta más lenta del sistema, pero igualmente aceptable según los criterios definidos, mientras que se eliminó por completo el error en estado estable alcanzando el *setpoint* deseado. Por otra parte, respecto al voltaje que recibe el motor, se observa que tiene una variación mucho menor respecto al primer caso, la cual es suficiente para alcanzar la velocidad deseada gracias a la realimentación y a la correcta sintonización de los valores del controlador, los cuales se detallan en la tabla 3.10.

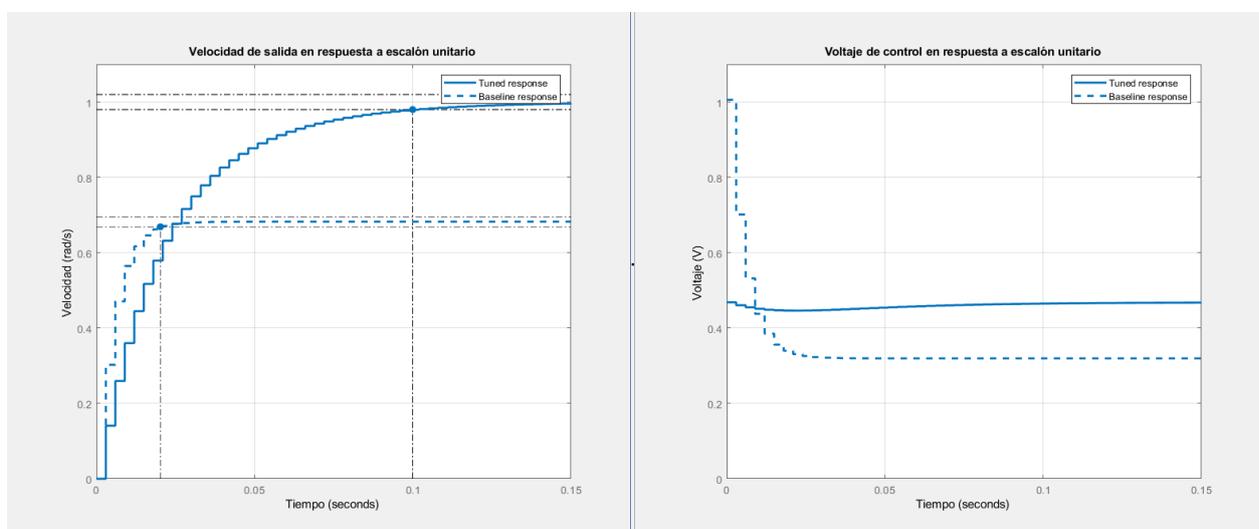
Tabla 3.10: Ganancias de controlador PI en caso continuo

Parámetro	Valor
Ganancia proporcional Kp	0.400
Ganancia integral Ki	20

3.3.2 Caso discreto

Al discretizar la función de transferencia y seguir la misma metodología que con el caso continuo, partiendo de las ganancias halladas anteriormente como referencia, se obtuvo que varían ligeramente. El resultado obtenido se muestra en la figura 3.29, donde se visualiza la señal inicial (con realimentación, pero sin controlador) y la señal correctamente configurada para el caso discreto.

Figura 3.29: Respuestas a entrada escalón unitario en lazo cerrado con controlador (caso discreto)



Fue necesario aumentar tanto la ganancia proporcional como la ganancia derivativa, ya que el sistema responde ligeramente más lento que en el caso continuo. Pese a ello, se obtuvo un comportamiento adecuado satisfaciendo los requerimientos de llegar al valor estable en 0.1 segundos y eliminar el error. Las ganancias encontradas para este caso se muestran en la tabla 3.11, que serán utilizadas en el microcontrolador.

Tabla 3.11: *Ganancias de controlador PI en caso discreto*

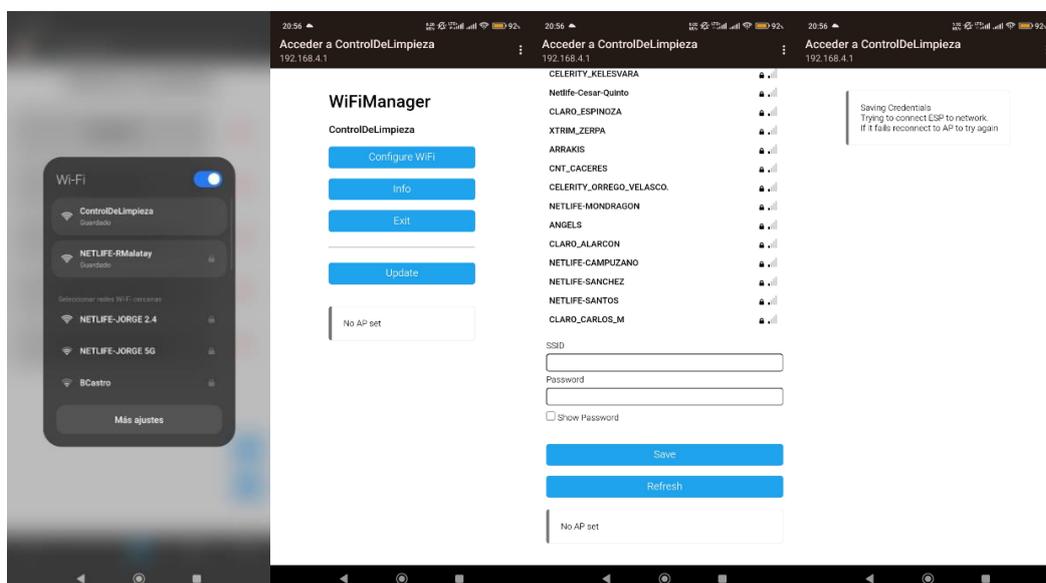
Parámetro	Valor
Ganancia proporcional Kp	0.500
Ganancia integral Ki	21

3.4 Componentes informáticos

3.4.1 Acceso a la red

Mediante la implementación de la librería *WifiManager* realizando el proceso explicado en la sección 2.9, se obtiene una interfaz que permite conectar el microcontrolador a la red Wifi, además de que esta se almacena y se mantiene registrada luego de reiniciar el dispositivo. La interfaz es mostrada en la figura 3.30.

Figura 3.30: *Interfaz de acceso a red WiFi mediante librería WifiManager*

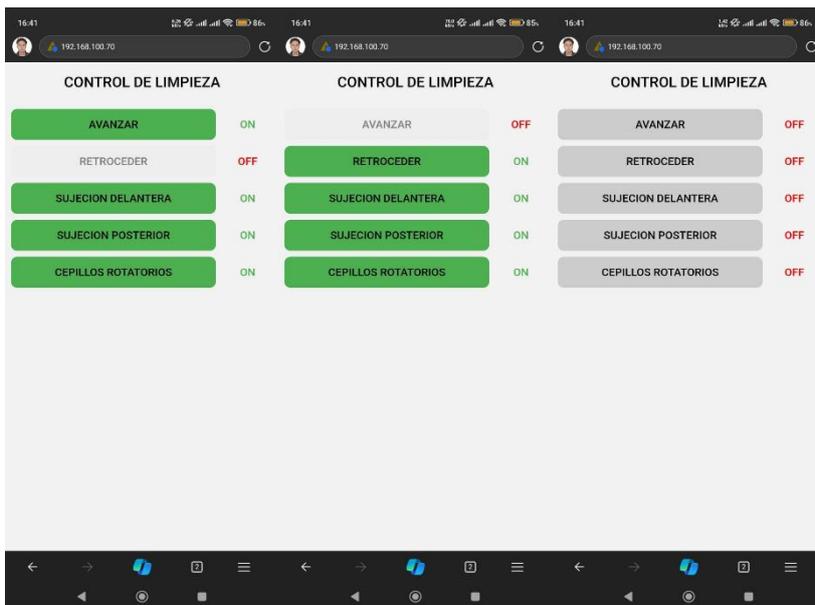


En la primera imagen se observa la conexión al punto de acceso desde un dispositivo móvil con Android. Posteriormente, se abre la interfaz para acceder a la red, se muestra la lista de las redes disponibles y luego de ingresar la contraseña se muestra la pantalla de confirmación.

3.4.2 Aplicación de control remoto

Se llevó a cabo el desarrollo de una aplicación web escrita en lenguaje HTML y CSS. Esta página se encuentra alojada en el microcontrolador, el cual está configurado como servidor mediante el uso de la librería WebServer, como se detalló en la sección 2.9. La interfaz se muestra en la figura 3.31.

Figura 3.31: Interfaz de aplicación web para control remoto



Nota: Se muestran 3 estados para la misma aplicación: Movimiento hacia adelante, movimiento hacia atrás, detenido.

La aplicación permite activar y desactivar todos los actuadores del sistema a conveniencia mediante botones, los cuales se resaltan en color verde cuando están habilitados. Además, junto al botón, se muestra una leyenda que indica el estado activado (*ON*) o desactivado (*OFF*) de cada opción.

Para proteger la integridad del dispositivo, la aplicación no permite cambiar el sentido del movimiento sin antes haber detenido el dispositivo, por esta razón, cuando el vehículo avanza hacia adelante no se puede activar el movimiento hacia atrás y viceversa.

3.4.3 Programación de microcontrolador

Se implementó la lógica para controlar los actuadores del sistema en función de las peticiones enviadas por la aplicación. Destacando sus principales características, se tiene:

- El botón *avanzar* activa el pin ENABLE del controlador de las ruedas, enviando una señal PWM que es regulada en función de la realimentación enviada por el encoder, activa el pin PHASE indicando el giro hacia adelante.
- El botón *retroceder* activa el pin ENABLE del controlador de las ruedas, enviando una señal PWM analógica mediante un valor de 0 a 255, que es regulada en función de la realimentación enviada por el encoder. Además, se desactiva el pin PHASE indicando el giro hacia atrás.
- Los botones *sujeción delantera* y *sujeción trasera* envían el ángulo en el cual se quiere colocar el servomotor de cada mecanismo. Si se activa la sujeción, el ángulo es 90, si se desactiva la sujeción, el ángulo enviado es 0.
- El botón *cepillos rotatorios* envía una señal digital de voltaje de 3.3 voltios, la cual hace que circule una corriente por la base del transistor permitiendo el paso de la corriente que alimenta el motor de los cepillos. Cuando desactiva esta señal, no hay corriente por la base del transistor y entra en estado de corte, deteniendo el motor.

El código implementado se muestra en el apéndice B.

3.5 Análisis de costos

Se realizó una comparación de costos entre la opción actualmente implementada y la solución propuesta en este trabajo. El objetivo es evaluar los costos de ambas opciones y demostrar cómo la solución propuesta puede generar ahorros y mejorar la eficiencia operativa a largo plazo.

- Opción A (propuesta): Módulo mecatrónico de limpieza a control remoto.
- Opción B (método actual): Contratación de un servicio externo de limpieza industrial.

Tabla 3.12: Costo total del proyecto

Opción A (propuesta) - Módulo mecatrónico de limpieza a control remoto					
	Descripción	Cantidad	Unidad	Costo unitario	Costo total
<i>Mecánico</i>	Motor Pololu 1572	1	un	28,95	28,95
	Motor Pololu 4825	1	un	48,95	48,95
	Servomotor SG90	2	un	3,75	7,5
	Eje de acero 304 3 mm x 200 mm	3	mm	5,08	15,24
	Llantas Pololu Tamiya 70194	1	par	11,5	11,5
	Rodamiento 603 plástico	6	un	1,74	10,44
	Impresión de piezas en PLA	2	kg	22	44
<i>Subtotal: Costo mecánico</i>					166,58
<i>Electrónico</i>	Regulador LM338T	1	un	2,90	2,90
	Resistencias	2	un	0,15	0,30
	Potenciómetro trimmer 1k	1	un	0,45	0,45
	Diodos 1N4007	4	un	0,12	0,48
	Transistor TIP35C	1	un	1,85	1,85
	Cables 16 AWG	10	m	1,99	19,90
	Batería Power-Sonic PS-650	1	un	38,42	38,42
	Microcontrolador ESP32 30 Pines	1	un	9,95	9,95
	PCB	1	un	10,00	10,00
<i>Subtotal: Costo electrónico</i>					84,25
<i>Servicio</i>	Programación y armado	24	hr	10,00	240,00
	Configuración y puesta en marcha	24	hr	6,00	144,00
<i>Subtotal: Costo de servicio</i>					384,00
<i>Costo total opción A</i>					634,83

El mantenimiento preventivo correspondiente a la opción A, así como la limpieza del material que barre el módulo mecatrónico son actividades que entran dentro de las responsabilidades del personal de soporte propio de la empresa, por lo que esto no representa un costo extra.

El desglose mostrado en la tabla 3.13 representa un estimado detallado de cómo una empresa externa de limpieza industrial justifica el costo de su servicio por persona. Los valores considerados se detallan de la siguiente manera:

- El costo diario de transporte se basa en una tarifa promedio de 10 dólares por hora de recorrido.
- El costo diario de licencias de competencias laborales se basa en el proporcional diario del valor anual invertido en este rubro, el cual es de 365,00 USD.
- El costo diario de uniformes y EPP se basa en el proporcional diario del valor anual invertido en este rubro, el cual es de 730,00 USD.
- El costo diario de alimentación corresponde al precio promedio de un almuerzo.
- El costo diario de mano de obra se basa en el salario del operador más sus beneficios, siendo este valor de 750,00 USD.

El costo total por persona para realizar el servicio de limpieza se estima en 42,00 USD por día.

Tabla 3.13: Costos actuales de limpieza manual

Opción B (método actual) - Contratación de un servicio externo de limpieza industrial		
Concepto	Costo por Persona (USD)	Explicación
Transporte	10,00	Desplazamiento diario del trabajador (ida y vuelta)
Licencias de competencias laborales (altura, bloqueo, etc.)	1,00	Licencia o certificación requerida para trabajos en altura
Uniformas y EPP	2,00	Costo de uniforme y equipo necesario para trabajar de forma segura en altura

Alimentación	4,00	Costo de alimentación diaria del trabajador
Mano de obra por día	25,00	Costo adicional por la operación del servicio (administración, soporte, otros costos operativos)
Costo total por persona	42,00	Total, por persona para realizar la limpieza industrial
<i>Costo total opción B</i>	84,00	Considerando que la limpieza debe realizarse entre 2 personas para cubrir las áreas requeridas por el cliente

Se analiza y se compara las 2 opciones frente a la problemática presentada en la tabla 3.14. Se considera que la limpieza es realizada 2 veces al mes, por lo que se requiere contratar al personal externo 24 días por año; y el fondo de repuestos se considera como el 20% del costo total del proyecto correspondiente a los componentes mecánicos y electrónicos que pueden fallar e imposibilitarían el funcionamiento del dispositivo en caso de no contar con stock de seguridad.

Tabla 3.14: Comparativa de gasto anual en ambos métodos de limpieza

Concepto	Opción A (USD)	Opción B (USD)
Inversión inicial	634,83	0,00
Fondo de repuestos anual	126,96	0,00
Costo diario	0,00	84,00
Costo total anual	126,96	2016,00

La opción A implica una inversión inicial de 634,83 USD y un costo anual de 126,96 USD dado por el fondo de repuestos. Por otra parte, la opción B no requiere inversión inicial, pero tiene un costo diario de 84,00 USD, lo que lleva a un costo total anual de 2016,00 USD. El ahorro anual de la opción A frente a la opción B es de 1889,04 USD.

La opción A representa una inversión más baja a largo plazo en comparación con el alto costo continuo de la opción B. Este ahorro mensual se traduce en aproximadamente 145,10 USD, lo que permite recuperar la inversión inicial en un periodo de 5 meses.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Se logró desarrollar un módulo móvil que se desplaza sobre la superficie de la canaleta de manera segura al contar con un mecanismo de sujeción que evita su descarrilamiento o caída y cumpliendo con los requerimientos de estabilidad y capacidad de carga para los elementos del sistema
- La herramienta de limpieza diseñada conformada por dos cepillos rotatorios demostró desempeñar un funcionamiento adecuado para la limpieza gracias a su movimiento simétrico que empuja el polvo hacia los laterales de la canaleta, permitiendo que posteriormente sea recogido desde el suelo.
- La aplicación móvil desarrollada permitió controlar de manera remota tanto el desplazamiento del módulo como la operación de limpieza, evitando así el uso de soluciones rústicas que no son eficientes y representan un peligro al momento de utilizarlas.
- Se logró que la aplicación sea accesible desde cualquier dispositivo conectado a la red gracias a que no se requiere de un proceso de instalación para utilizar la aplicación, únicamente un navegador de internet.
- Se disminuyó el riesgo operativo al reducir drásticamente el tiempo que los operadores deben permanecer realizando trabajos en altura, ya que este sistema requiere únicamente ser colocado en posición de inicio y el resto de la operación es controlada desde la aplicación.
- Se demostró que el sistema es económicamente viable respecto al método actual y que el costo anual de la limpieza se reduce casi a la décima parte, pudiéndose recuperar la inversión en tan solo 5 meses de operación.

4.2 Recomendaciones

- Es importante optimizar la autonomía del módulo, ya sea mediante componentes electrónicos aún más eficientes o con baterías de mayor capacidad que no repercutan en el peso total del sistema, de esta manera se posibilita limpiar áreas más grandes de manera continua sin necesidad de recargar.
- Una oportunidad de mejora es la inclusión de sensores para la detección de obstáculos, lo cual permitiría al operario ser alertado de posibles riesgos de colisión e incluso abre la posibilidad a una operación automática del sistema.
- Se requiere realizar pruebas en campo con prototipos de alta resolución que validen el diseño realizado en este trabajo y permitan realizar ajustes que desemboquen en un dispositivo más versátil adaptable a distintos entornos.

Referencias

- [1] C. y Vi. S. Agencia Nacional de Regulación, *REGLAMENTO DE BUENAS PRACTICAS PARA ALIMENTOS PROCESADOS*. Ecuador, 2002. [Online]. Available: www.lexis.com.ec
- [2] E. E. Damian-Aguilar and G. E. Campoverde-Jimenez, “Análisis de la Siniestralidad Laboral en trabajos por encima de 1,8m de altura en los distintos sectores de la producción del Ecuador,” *MQR Investigar*, vol. 8, no. 2, pp. 1381–1405, Apr. 2024, doi: 10.56048/mqr20225.8.2.2024.1381-1405.
- [3] N. Elkmann *et al.*, “SIRIUSc-Facade Cleaning Robot for a High-Rise Building in Munich, Germany.”
- [4] S. Rubio, “Diseño conceptual de un sistema automático para limpieza de ventanas en edificios de altura,” Lima, Aug. 2020.
- [5] M. Rudnicka and E. Klugmann-Radziemska, “CLEANING METHODS FOR DUST DEPOSITED ON THE FRONT COVER OF PHOTOVOLTAIC MODULE,” *Ecological Chemistry and Engineering S*, vol. 30, no. 4, pp. 505–516, Dec. 2023, doi: 10.2478/eces-2023-0045.
- [6] J. G. Zhang, “Effect of Dust Contamination on Electrical Contact Failure,” 2007.
- [7] escuela universitaria de oficios, “Canalizaciones eléctricas.” Accessed: Jan. 27, 2025. [Online]. Available: <https://unlp.edu.ar/wp-content/uploads/57/29557/9822eaec17bfc985b1a018231b4e0a3f.pdf>
- [8] Vichnet Cable Tray, “Maximización de la eficiencia con bandejas portacables perforadas de aluminio - Conocimiento.” Accessed: Jan. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.vichnetcabletray.com/info/maximizing-efficiency-with-aluminum-perforated-102498866.html>

- [9] coper electric, “BANDEJA PORTA CABLE TIPO LISA 100X100MM 2.4MT CON TAPA F.G - Productos - COPER ELECTRIC - Soluciones Eléctricas Industrial.” Accessed: Jan. 27, 2025. [Online]. Available: https://coperelectric.com/mpwt/producto.php?i=213&n=bandeja_porta_cable_tipo_lisa_100x100mm_2.4mt_con_tapa_f.g&r=cHJvZHVjdG9zLnBocD9pYz0zMyZjPTMzJm49YmFuZGVqYV90aXBvX2xpc2E=
- [10] W. Hudy, U. Marikutsa, K. Pytel, S. Gumula, H. Noga, and M. Niedbalec, “Design and Construction of a Gutter-Cleaning Robot as an Example of Engineering Education,” in *International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., May 2021, pp. 38–41. doi: 10.1109/MEMSTECH53091.2021.9468040.
- [11] Tu. Mahesh *et al.*, “FABRICATION OF IOT BASED AUTOMATED DRAIN GUTTER CLEANER,” 2019. [Online]. Available: <http://indusedu.org>
- [12] L. Bruzzone and G. Quaglia, “Review article: Locomotion systems for ground mobile robots in unstructured environments,” 2012, *Copernicus GmbH*. doi: 10.5194/ms-3-49-2012.
- [13] A. Kumar and S. Gupta, “Impact Factor: 1.852 Study on ZIGBEE Technology,” *C) International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, vol. 2, no. 10, pp. 2733–2738, 2013, [Online]. Available: <http://www.ijesrt.com>
- [14] C. Li, K. Dong, F. Jin, J. Song, and W. Mo, “Design of Smart Home Monitoring and Control System Based on Zigbee and WIFI.”
- [15] S. Sabat, “Remote Control of Electrical Home Appliances Using RF Module based Remote.” [Online]. Available: www.ijfmr.com
- [16] R. L. Mott, *Diseño de elementos de máquinas*, 4ta ed. México D.F.: Prentice Hall Hispanoamericana, 1992.

- [17] Carbone Stainless Steel, “Ficha técnica del acero.” Accessed: Jan. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.carbone-data.com/pdf/shopify/ficha-tecnica-acero-inoxidable.pdf>
- [18] Appa3d, “HOJA TÉCNICA ABS (TDS).” Accessed: Jan. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.appa3d.com/wp-content/uploads/2022/08/HOJA-TECNICA-ABS-.pdf>
- [19] Ultimaker, “Ficha de datos técnicos PLA,” May 2017. Accessed: Jan. 24, 2025. [Online]. Available: <https://docs.rs-online.com/7ade/0900766b81698006.pdf>
- [20] Tennant Company, “Cepillos de disco frente a cepillos cilíndricos 101 | Blog de Tennant.” Accessed: Jan. 04, 2025. [Online]. Available: https://www.tennantco.com/es_es/blog/comparaci%C3%B3n-disco-cepillos-cil%C3%ADndricos-101.html
- [21] Schneider Company, “Coefficient of Friction Reference Chart.” Accessed: Jan. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.schneider-company.com/coefficient-of-friction-reference-chart/>
- [22] Occupational Safety and Health Standards, “1910.272 - Grain Handling Facilities | Occupational Safety and Health Administration.” Accessed: Jan. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.272>
- [23] M. Al-Mahasneh, M. Al-Widyan, H. Ababneh, T. Rababah, and K. Ereifej, “Grain dust as an energy and food resource,” *Natural Resources Research*, vol. 17, no. 1, pp. 13–20, Mar. 2008, doi: 10.1007/S11053-008-9060-2.
- [24] K. Nice, “Winter Tires Really Do Make a Difference in the White Stuff | HowStuffWorks.” Accessed: Jan. 13, 2025. [Online]. Available: <https://auto.howstuffworks.com/winter-tires-make-a-difference-in-snow.htm>

- [25] Pololu, “Pololu - 99:1 Metal Gearmotor 25Dx69L mm HP 6V with 48 CPR Encoder.” Accessed: Jan. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/4807/specs>
- [26] Luis Eduardo Garcia Jaimes, *Control Digital: Teoría y Práctica*, 2da ed. Medellín: Politécnico Colombiano JIC, 2009.
- [27] Pololu, “25D Metal Gearmotors,” Las Vegas, Aug. 2021. [Online]. Available: www.pololu.com
- [28] Espressif, “ESP32 Series Datasheet Version 4.7 2.4 GHz Wi-Fi + Bluetooth ® + Bluetooth LE SoC Including.” Accessed: Jan. 13, 2025. [Online]. Available: www.espressif.com
- [29] STMicroelectronic, “TIP35C,” 1999.
- [30] Pololu, “Pololu - DRV8874 Single Brushed DC Motor Driver Carrier.” Accessed: Jan. 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/4035>
- [31] tzapu, “WiFiManager - Repositorio en GitHub.” Accessed: Jan. 21, 2025. [Online]. Available: <https://github.com/tzapu/WiFiManager>
- [32] HUECAT, “¿Cómo funciona el wifiManager? para ESP32/ESP8266 • HUE CAT INGENIERÍA ESPAÑA.” Accessed: Jan. 27, 2025. [Online]. Available: <https://huecat.es/como-funciona-el-wifimanager-para-esp32-esp8266/>
- [33] Last Minute ENGINEERS, “In-depth: Create A Simple ESP32 Web Server In Arduino IDE.” Accessed: Jan. 27, 2025. [Online]. Available: <https://lastminuteengineers.com/creating-esp32-web-server-arduino-ide/>
- [34] AUS Electronics Direct, “SG90 Servo,” Sydney. Accessed: Jan. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.auselectronicsdirect.com.au/>
- [35] Pololu, “Pololu - 20.4:1 Metal Gearmotor 25Dx50L mm HP 6V.” Accessed: Jan. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/1572/specs>

- [36] Power Sonic, “PS-650LS & LF 6 Volt 5.0 AH,” 2011. [Online]. Available: www.power-sonic.com
- [37] N. Nise, *Sistemas De Control Para Ingeniería*, 3ra ed. México D.F., 2006.
- [38] F. Monasterio-Huelin, A. Gutierrez, and B. Larraga, “Modelado de un motor DC,” Madrid, Jan. 2024.

Apéndices

Apéndice A: *Matriz de decisión de métodos de transmisión de potencia*

Para la selección del método de transmisión de potencia, se tomaron los siguientes criterios:

Facilidad de implementación: Qué tan compleja resulta su instalación y diseño para el mecanismo.

Capacidad de inversión de giro: Dado que se requiere movimientos simétricos, es decir, misma rotación, pero diferente sentido, se necesita que el sistema motriz pueda invertir el giro en el lado conducido.

Durabilidad: Vida útil del mecanismo hasta que necesite ser reemplazado.

Eficiencia en transmisión de potencia: Cantidad de pérdidas de potencia que pueden producirse por diversos factores.

Mantenimiento mínimo: Qué tan frecuente es el mantenimiento requerido para mantener operando el sistema.

La tabla A.1 ordena los diferentes criterios y le asigna un peso a cada uno.

Tabla A.1: *Criterios de selección de transmisión de potencia*

Criterio	Importancia	Peso	Ponderación
Facilidad de implementación	1	3.0	23.1 %
Capacidad de inversión de giro	2	3.0	23.1 %
Durabilidad	3	3.0	23.1 %
Eficiencia	4	2.0	15.4 %
Mantenimiento mínimo	5	2.0	15.4 %
	Total	13.0	100,0 %

Se realizó la evaluación de dos alternativas aplicables al sistema propuesta: mecanismos banda polea y engranajes, ya que son los más comunes en este tipo de proyectos. La calificación dada va en la escala de 1 a 3, y luego es multiplicada por el peso correspondiente.

El resultado de esta selección se muestra en la tabla A.2.

Tabla A.2: *Matriz de decisión de métodos de transmisión de potencia*

Criterios		Alternativas	
Peso	Descripción	Alternativa 1 Banda-polea	Alternativa 2 Engranajes
3,0	Facilidad de implementación	3,0	2,0
3,0	Capacidad de inversión de giro	1,0	3,0
3,0	Durabilidad	1,0	3,0
2,0	Eficiencia	2,0	3,0
2,0	Mantenimiento mínimo	3,0	2,0
	Puntaje sin peso	10,0	13,0
	Puntaje con peso	25,0	34,0
	Prioridad	2	1

Se obtiene que la opción ganadora es el sistema de engranajes, ya que, si bien requiere un proceso de diseño previo y algo de lubricación en vistas de alargar su vida útil, presenta una gran ventaja al poder invertir el sentido de giro, ser mucho más durable que un sistema de poleas, y además transmitir la potencia de manera más eficiente ya que no existen pérdidas por deslizamiento.

Apéndice B: Código de microcontrolador ESP32

```

#include <WiFiManager.h>
#include <WebServer.h>
#include <Servo.h>

// Configuración de pines
#define SERVO_FRONTAL_PIN 15
#define SERVO_POSTERIOR_PIN 2
#define CEPILLOS_PIN 4
#define ENCODER_PIN 5
#define RUEDAS_PHASE_PIN 18
#define RUEDAS_PWM_PIN 19

// Configuración del servidor
WebServer server(80);

// Variables para los estados de los botones
bool avanzarState = false;
bool retrocederState = false;
bool sujecionDelanteraState = false;
bool sujecionPosteriorState = false;
bool cepillosRotatoriosState = false;

// Objetos Servo
Servo servoFron;
Servo servoPos;

// Angulo maximo de servo
max_angle = 73

// Variables para encoder
volatile int PULSOS = 0; // contador de pulsos
unsigned long previousMillis = 0;
long interval = 100; // frecuencia de medida
float SETPOINT = 10; // setpoint de velocidad (RPM)
float MAX_RPM = 40; // maxima velocidad (RPM)
float RED_RATIO = 46.85; // relacion de reduccion
float IMP = 12; // pulsos por vuelta
float RPM_ENCODER = 0; // lectura de encoder

// Variables controlador PI
float CV;
float CV1;
float ERR;
float ERR1;
float KP = 0.5;
float KI = 21;
float TM = 0.003;

// Página web
const char index_html[] PROGMEM = R"rawliteral(
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
  <style>
    body {
      font-family: Arial, sans-serif;
      margin: 0;
      background-color: #f2f2f2;
    }
    h1 {
      text-align: center;
      margin: 20px 0;
      font-size: 24px;
    }
    .container {
      display: grid;

```

```

    grid-template-columns: 4fr 1fr;
    grid-gap: 10px;
    padding: 10px;
  }
  button {
    width: 100%;
    padding: 30px;
    font-size: 18px;
    font-weight: bold;
    color: black;
    border: none;
    border-radius: 10px;
    cursor: pointer;
  }
  button.on {
    background-color: #4CAF50;
  }
  button.off {
    background-color: #ccc;
  }
  button.disabled {
    background-color: #eee;
    color: gray;
    cursor: not-allowed;
  }
  .status {
    display: flex;
    align-items: center;
    justify-content: center;
    font-size: 18px;
    font-weight: bold;
  }
  .status.on {
    color: #4CAF50;
  }
  .status.off {
    color: red;
  }
</style>
</head>
<body>
  <h1>CONTROL DE LIMPIEZA</h1>
  <div class="container">
    <button id="avanzar" class="off" onclick="toggle('avanzar')">AVANZAR</button>
    <div id="avanzar-status" class="status off">OFF</div>

    <button id="retroceder" class="off" onclick="toggle('retroceder')">RETROCEDER</button>
    <div id="retroceder-status" class="status off">OFF</div>

    <button id="sujecionDelantera" class="off" onclick="toggle('sujecionDelantera')">SUJECION
    DELANTERA</button>
    <div id="sujecionDelantera-status" class="status off">OFF</div>

    <button id="sujecionPosterior" class="off" onclick="toggle('sujecionPosterior')">SUJECION
    POSTERIOR</button>
    <div id="sujecionPosterior-status" class="status off">OFF</div>

    <button id="cepillosRotatorios" class="off" onclick="toggle('cepillosRotatorios')">CEPILLOS
    ROTATORIOS</button>
    <div id="cepillosRotatorios-status" class="status off">OFF</div>
  </div>
  <script>
    function toggle(action) {
      const button = document.getElementById(action);
      const status = document.getElementById(`${action}-status`);
      const isOn = button.classList.contains('on');

      if ((action === 'avanzar' && retrocederState()) || (action === 'retroceder' && avanzarState()))
      {
        return;
      }

      const url = `/${action}-${isOn ? 'off' : 'on'}`;

```

```

    fetch(url)
      .then(response => {
        if (response.ok) {
          button.classList.toggle('on');
          button.classList.toggle('off');
          status.classList.toggle('on');
          status.classList.toggle('off');
          status.textContent = isOn ? 'OFF' : 'ON';

          // Control de estados
          if (action === 'avanzar') {
            document.getElementById('retroceder').classList.toggle('disabled', !isOn);
          } else if (action === 'retroceder') {
            document.getElementById('avanzar').classList.toggle('disabled', !isOn);
          }
        }
      })
      .catch(error => console.error('Error:', error));
  }

  function avanzarState() {
    return document.getElementById('avanzar').classList.contains('on');
  }

  function retrocederState() {
    return document.getElementById('retroceder').classList.contains('on');
  }
</script>
</body>
</html>
)rawliteral";

```

```

// Función para manejar las peticiones de los botones
void handleButton(String button, bool state) {
  if (button == "avanzar") {
    avanzarState = state;
    digitalWrite(RUEDAS_PHASE_PIN, state ? HIGH : LOW);
    analogWrite(RUEDAS_PWM_PIN, state ? (CV/MAX_RPM)*1023 : 0);
  } else if (button == "retroceder") {
    retrocederState = state;
    digitalWrite(RUEDAS_PHASE_PIN, state ? LOW : LOW);
    analogWrite(RUEDAS_PWM_PIN, state ? (CV/MAX_RPM)*1023 : 0);
  } else if (button == "sujecionDelantera") {
    sujecionDelanteraState = state;
    servoFron.write(state ? max_angle : 0);
  } else if (button == "sujecionPosterior") {
    sujecionPosteriorState = state;
    servoPos.write(state ? max_angle : 0);
  } else if (button == "cepillosRotatorios") {
    cepillosRotatoriosState = state;
    digitalWrite(CEPILLOS_PIN, state ? HIGH : LOW);
  }
  Serial.print(button);
  Serial.println(state ? " activado" : " desactivado");
}

// Configuración inicial del servidor
void setup() {
  Serial.begin(115200);

  // Interrupcion para flancos de subida de pin de encoder
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ENCODER_PIN), interrupcion, RISING)

  // Inicialización de WiFiManager
  WiFiManager wifiManager;
  wifiManager.setSaveConfigCallback([]() {
    Serial.println("Configuración de WiFi guardada");
  });
  if (!wifiManager.autoConnect("ControlDeLimpieza")) {
    Serial.println("Error al conectar o tiempo de espera agotado");
    ESP.restart();
  }
  Serial.println("Conectado a WiFi");
}

```

```

Serial.println(WiFi.localIP());

server.on("/", []() {
  server.send(200, "text/html", index_html);
});

String actions[] = {"avanzar", "retroceder", "sujecionDelantera", "sujecionPosterior",
"cepillosRotatorios"};
for (String action : actions) {
  server.on("/" + action + "-on").c_str(), [action]() {
    handleButton(action, true);
    server.send(200, "text/plain", action + " activado");
  });
  server.on("/" + action + "-off").c_str(), [action]() {
    handleButton(action, false);
    server.send(200, "text/plain", action + " desactivado");
  });
}

server.begin();
Serial.println("Servidor iniciado");
}

void loop() {
  server.handleClient();
  unsigned long currentMillis = millis();

  if ((currentMillis - previousMillis) >= interval) {
    previousMillis = currentMillis;
    RPM_ENCODER = (10*contador*60)/(IMP*RED_RATIO);
    PULSOS = 0;
  }

  ERR = SETPOINT - RPM_ENCODER;
  CV = CV1 + (KP)*ERR + (-KP + KI*TM)*ERR1;
  CV1 = CV;
  ERR1 = ERR;

  if (CV > 40) {
    CV = 40;
  }
}

void interrupcion() {
  PULSOS++;
}

```

Apéndice C: Obtención de la función de transferencia del motor DC de las ruedas

Para obtener la función de transferencia del motor DC se siguió el procedimiento mostrado en el libro de Sistemas de Control para Ingeniería de Nise [37].

A partir de las ecuaciones C.1 y C.2 que corresponden a las ecuaciones eléctrica y mecánica del motor DC se obtiene la función de transferencia del sistema.

$$V(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + K_E \omega(t) \quad (\text{C.1})$$

Donde:

V: voltaje, L: inductancia, R: resistencia, $i(t)$: corriente del motor, K_E : constante de fuerza contra electromotriz, $\omega(t)$: velocidad angular.

$$K_T i(t) = \left(J_M + \frac{J_C}{N^2} \right) \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad (\text{C.2})$$

Donde:

K_T : constante de torque del motor, $i(t)$ corriente del motor, J_M : inercia del motor, J_C : inercia de la carga mecánica, B: amortiguamiento.

Dado que se cuenta con una reducción de velocidad n de 4 a 1, la inercia y el amortiguamiento de la carga aumentan como se observa en las ecuaciones C.3 y C.4. La inercia equivalente y la fricción viscosa equivalente son reemplazadas en la ecuación C.2.

$$n = 4$$

$$J = J_M + J_C * n^2 \quad (\text{C.3})$$

$$B = B_M + B_C * n^2 \quad (\text{C.4})$$

Por otra parte, la velocidad de salida no se verá afectada en este modelo por la reducción de velocidad, ya que el control se realizará con el encoder acoplado al eje del motor, sin la reducción.

La última consideración que se realizará previo a la obtención de la función es que la inductancia es despreciable, por lo cual se eliminan los términos que la contengan.

Sustituyendo los valores en la ecuación mecánica, incluyendo la sustitución de la corriente, se obtiene la ecuación mostrada en C.5.

$$K_T \frac{V(t) - K_E \omega(t)}{R} = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad (C.5)$$

Utilizando la transformada de Laplace a la ecuación C.5, se obtiene la función mostrada en C.6.

$$\omega(s) \left(Js + B + \frac{K_T K_E}{R} \right) = \frac{K_T}{R} * V(s) \quad (C.6)$$

De aquí se hace el despeje necesario para obtener la función de transferencia de la velocidad del motor de acuerdo con el voltaje aplicado, como se observa en la ecuación C.7.

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K_T}{JRs + BR + K_T K_E} \quad (C.7)$$

Según las especificaciones del motor mostradas en la tabla 3.5, y las curvas de características del motor obtenidas de la ficha técnica [27], se obtienen los parámetros que serán reemplazados en la función de transferencia.

Para las inercias y fricciones viscosas del motor y la carga, se hacen las siguientes suposiciones:

- La inercia del motor será calculada a partir de las dimensiones del motor.
- La inercia de la carga está dada por la inercia de las ruedas.
- El amortiguamiento del motor está dado por su constante de torque, corriente sin carga y su velocidad sin carga, según una aproximación [38].
- El amortiguamiento de la carga se desprecia al trabajar a bajas velocidades.

$$R = \frac{V}{I_{BLOQUEO}} = \frac{6}{2} = 3 \Omega \quad (C.8)$$

$$K_E = \frac{V}{\omega_{SIN CARGA}} = \frac{6}{13.613} = 0.441 \frac{V * s}{rad} \quad (C.9)$$

$$K_T = \frac{\tau_{BLOQUEO} * R}{V} = \frac{1.471 * 1}{6} = 0.441 \frac{N * m}{A} \quad (C.10)$$

$$J_M = \frac{1}{2} M_M R_M^2 = \frac{1}{2} (0.101) (0.013)^2 = 8.046 * 10^{-6} kg m^2$$

$$J_C = 2 * \frac{1}{2} M_R R_R^2 = (0.080) (0.0325)^2 = 8.450 * 10^{-5} kg m^2$$

$$J = J_M + J_C * n^2 = 1.360 * 10^{-3} kg m^2 \quad (C.11)$$

$$B = B_M = \frac{K_T * I_{SIN CARGA}}{\omega_{SIN CARGA}} = \frac{0.441 * 0.12}{13.613} = 0.004 \quad (C.12)$$

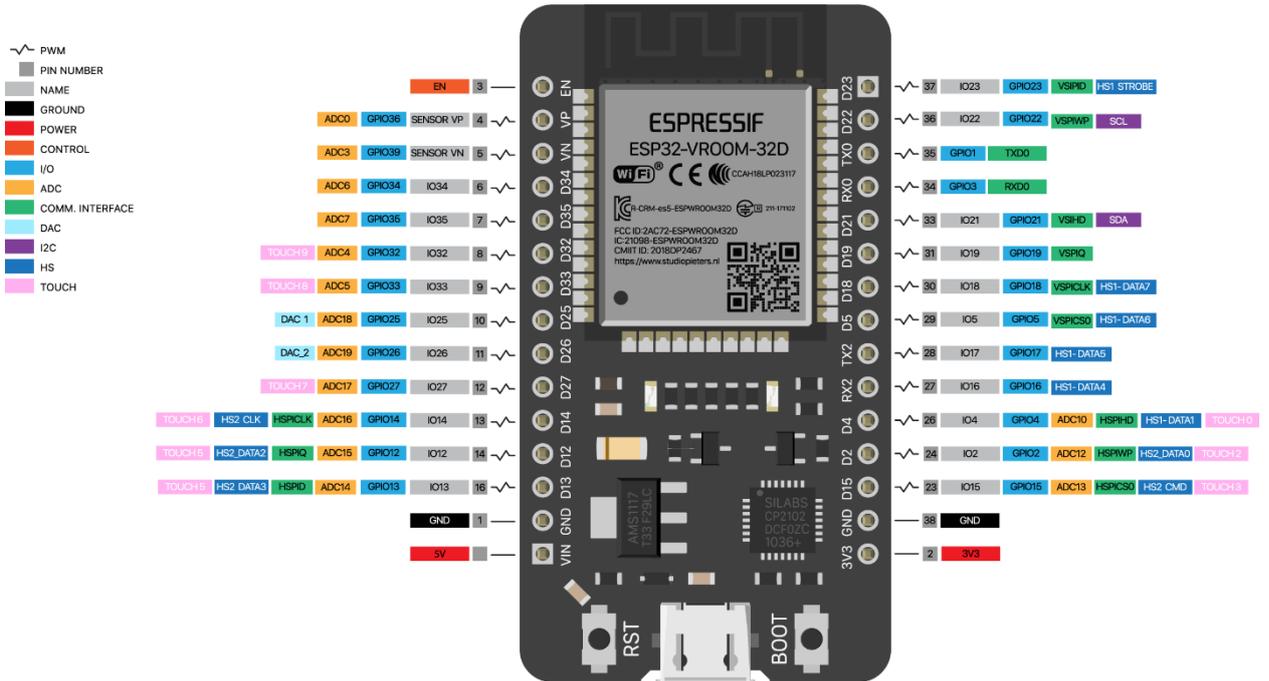
$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K_T}{JRs + BR + K_T K_E} \quad (C.13)$$

Con el modelo teniendo la forma mostrada en la ecuación C.13, se obtiene la función de transferencia de primer orden para el motor DC.

$$G(s) = \frac{K_t}{JRs + (BR + K_v K_t)} \quad (C.14)$$

$$G(s) = \frac{0.441}{0.004 + 0.207}$$

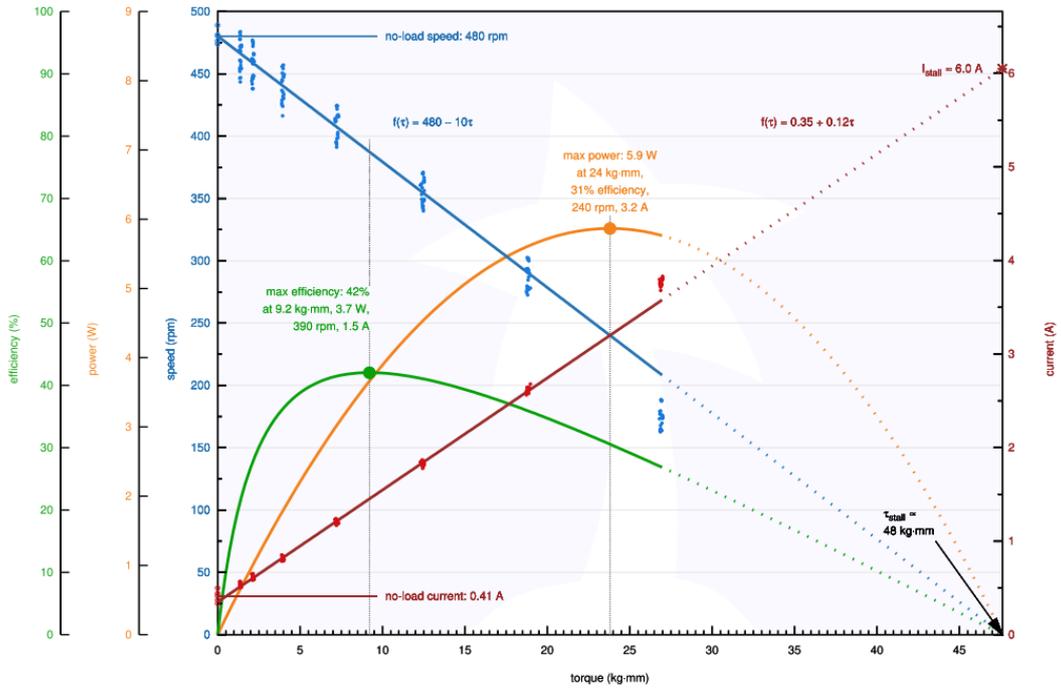
Anexo A: Asignación de pines de ESP32 30 pines



Anexo B: Curvas de motores cepillados utilizados en el proyecto

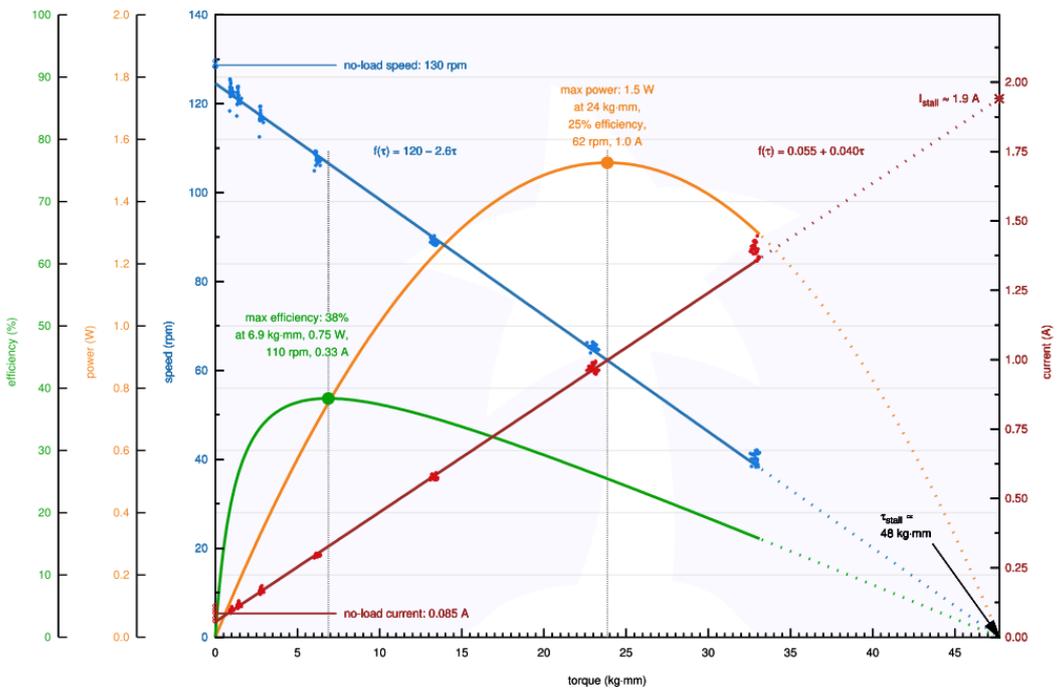
Motor Pololu 1572

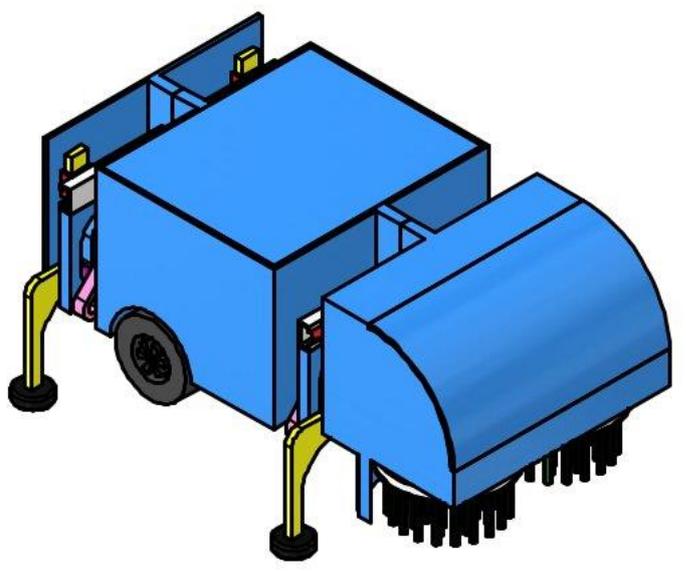
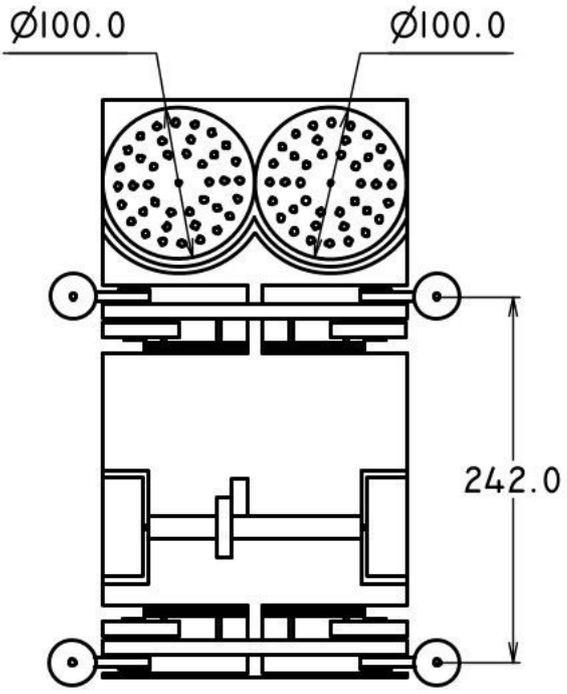
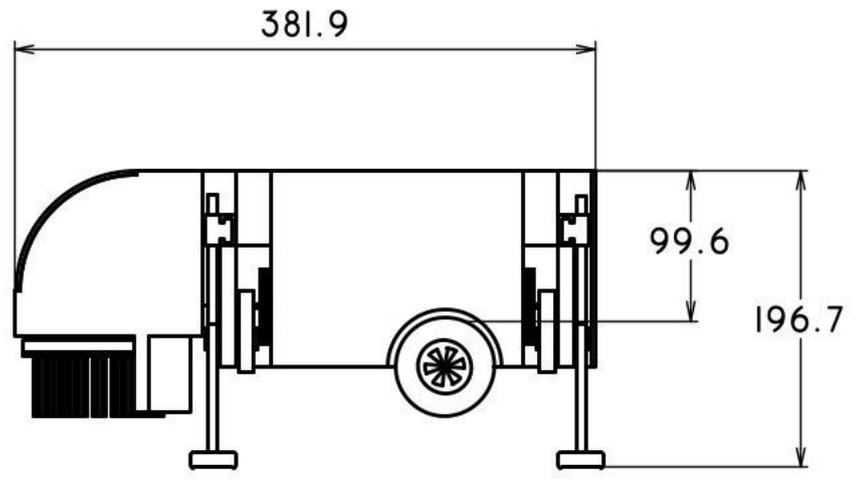
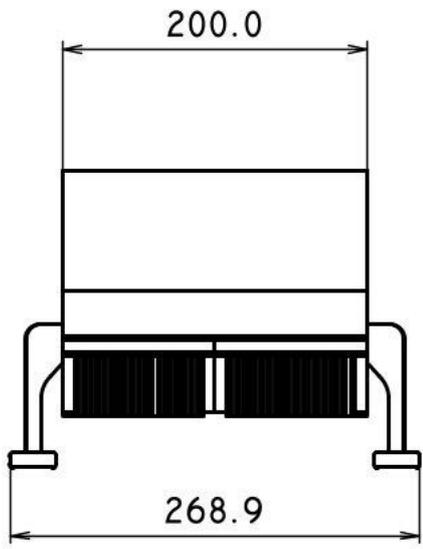
Pololu Items #1572, #4803 (20.4:1 Metal Gearmotor 25D HP 6V) Performance at 6 V



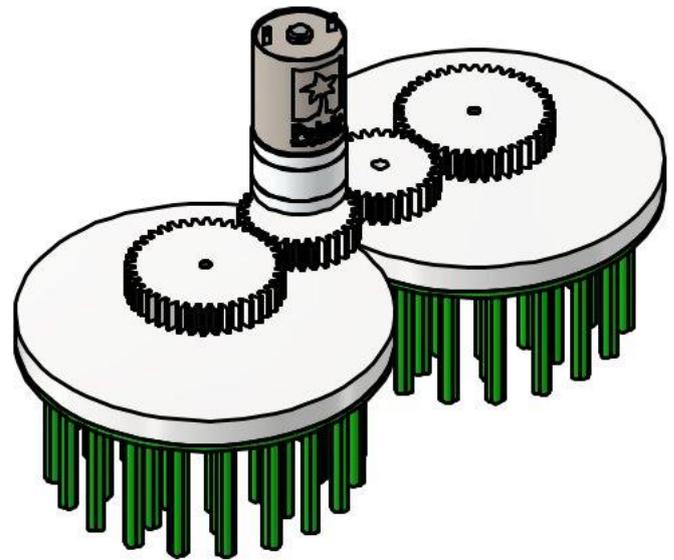
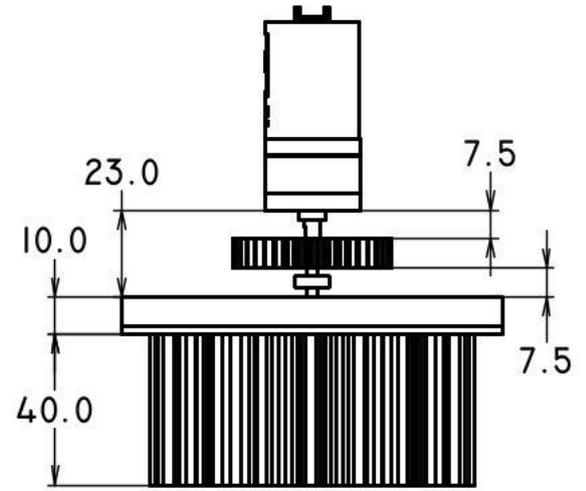
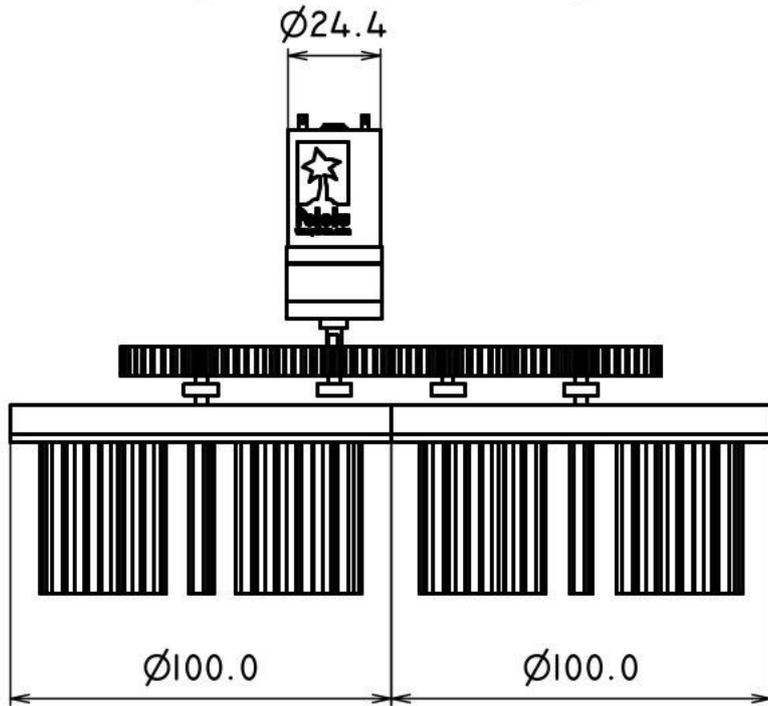
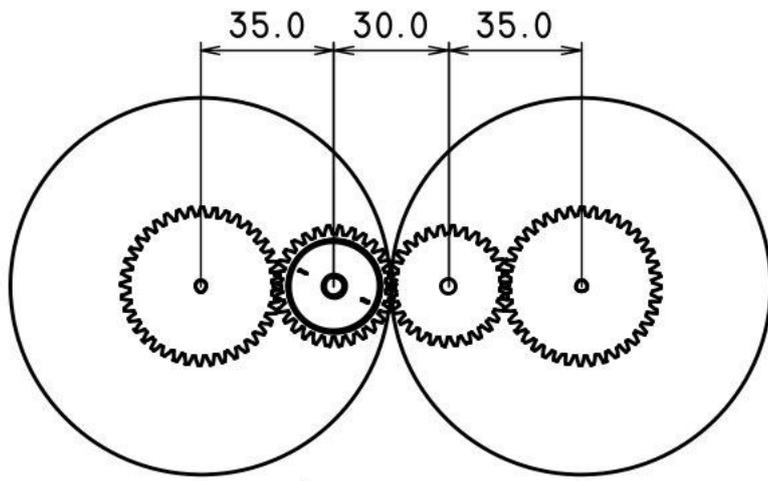
Motor Pololu 4825

Pololu Items #1585, #4825 (47:1 Metal Gearmotor 25D LP 6V) Performance at 6 V

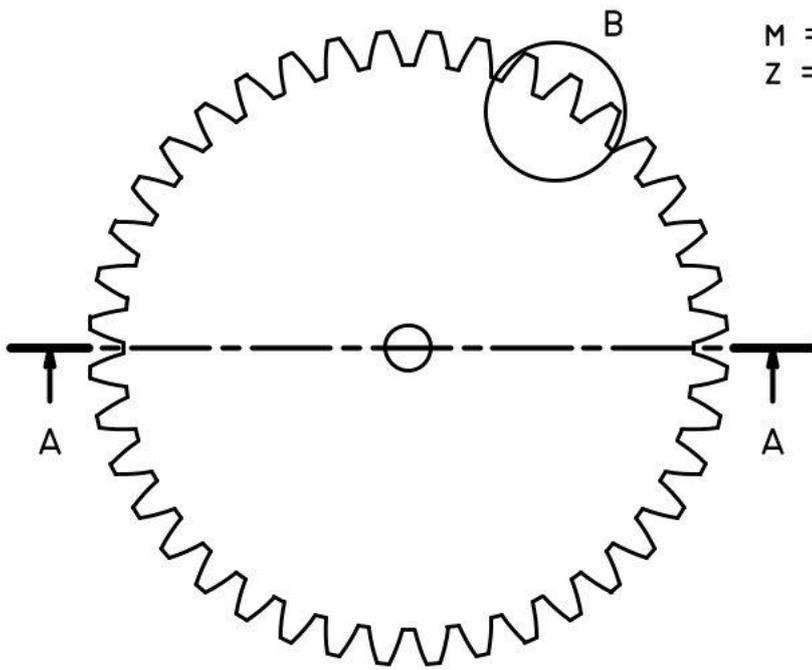




				PESO:	3,302 KG	TOLERANCIAS:	N/A	MATERIALES:	
				NOMBRE:		FECHA:		DENOMINACIÓN:	DISPOSITIVO DE LIMPIEZA DE CANALETAS
				DIBUJADO:	B. MALATAY	2/2/2025			
				REVISADO:	B. MALATAY	2/2/2025			
				APROBADO:	B. MALATAY	2/2/2025			
				CONJUNTO/SISTEMA:	ENSAMBLAJE COMPLETO			1 / 1	
01	VERSIÓN INICIAL	2/2/2025	B. MALATAY					ESCALA:	1 : 5
EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE					SUSTITUYE A:	

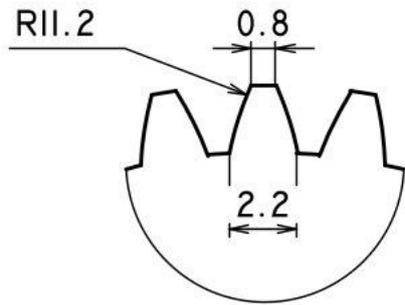


				PESO:	TOLERANCIAS:	MATERIALES:
				0,932 KG	N/A	
				NOMBRE:	FECHA:	DENOMINACIÓN:
				DIBUJADO B. MALATAY	2/2/2025	MECANISMO DE LIMPIEZA
				REVISADO B. MALATAY	2/2/2025	
				APROBADO B. MALATAY	2/2/2025	
				CONJUNTO/SISTEMA:		1 / 1
				MECANISMO DE LIMPIEZA		ESCALA:
				SUSTITUYE A:		1 : 2
01	VERSIÓN INICIAL	2/2/2025	B. MALATAY			
	EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE		

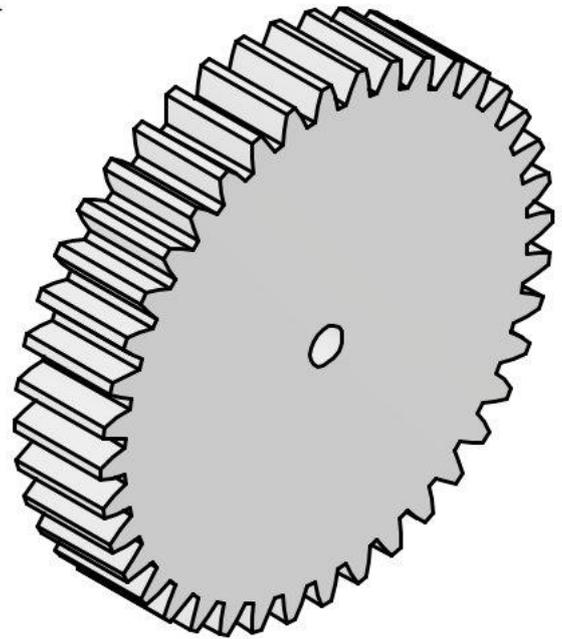
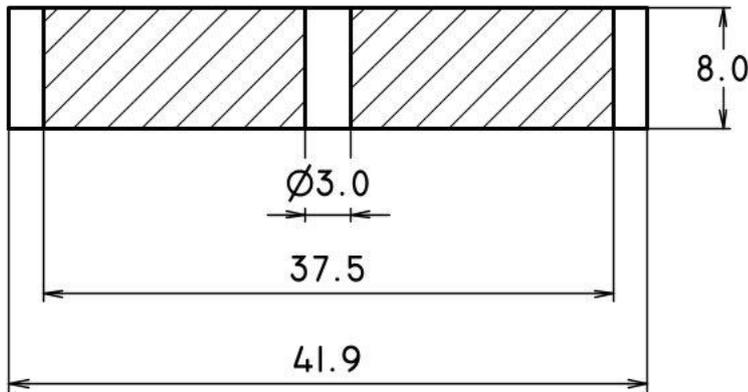


M = 0.5 MM
Z = 40

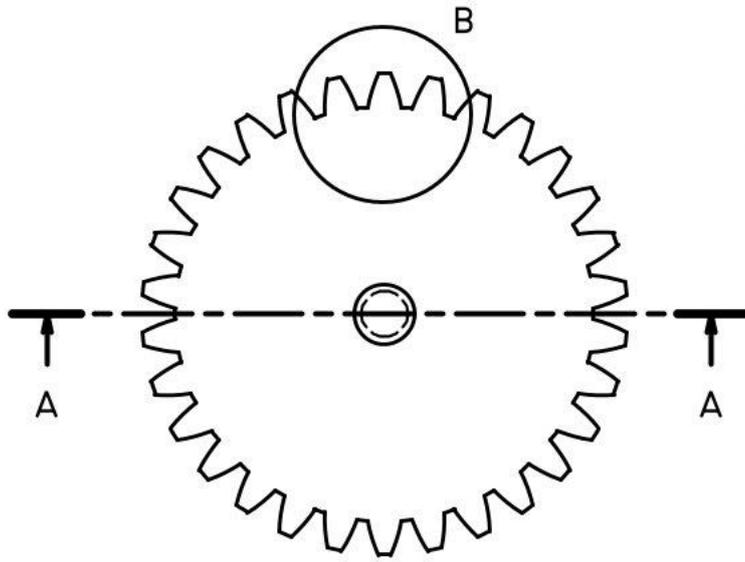
B (4 : 1)



A-A (2 : 1)

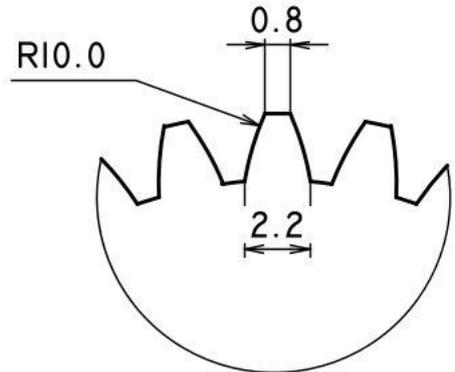
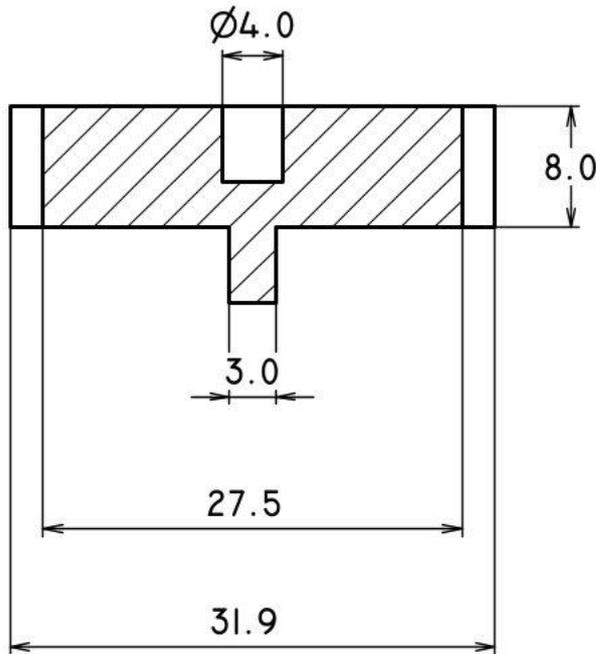


				PESO:	TOLERANCIAS:	MATERIALES:
				0,011 KG	N/A	PLÁSTICO ABS
				NOMBRE:	FECHA:	DENOMINACIÓN:
				DIBUJADO B. MALATAY	2/2/2025	ENGRANAJE CONDUcido DE CEPILLO ROTATORIO
				REVISADO B. MALATAY	2/2/2025	
				APROBADO B. MALATAY	2/2/2025	
				CONJUNTO/SISTEMA:		1 / 1
				MECANISMO DE LIMPIEZA		
01	VERSIÓN INICIAL	2/2/2025	B. MALATAY			ESCALA:
EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE			2 : 1

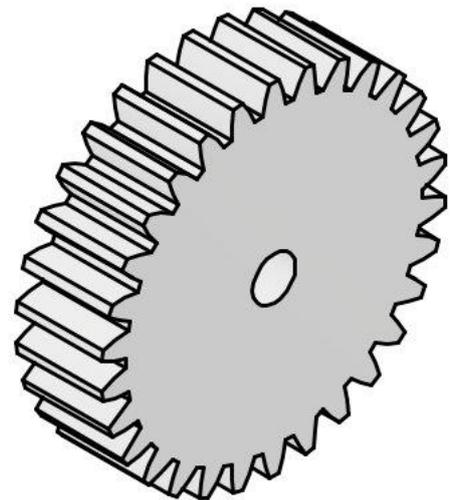


M = 0.5 MM
Z = 30

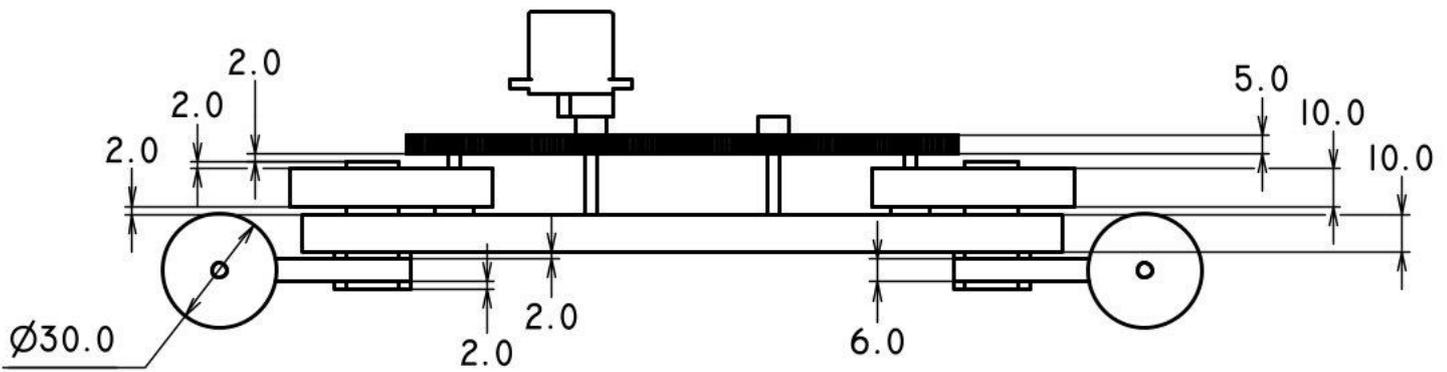
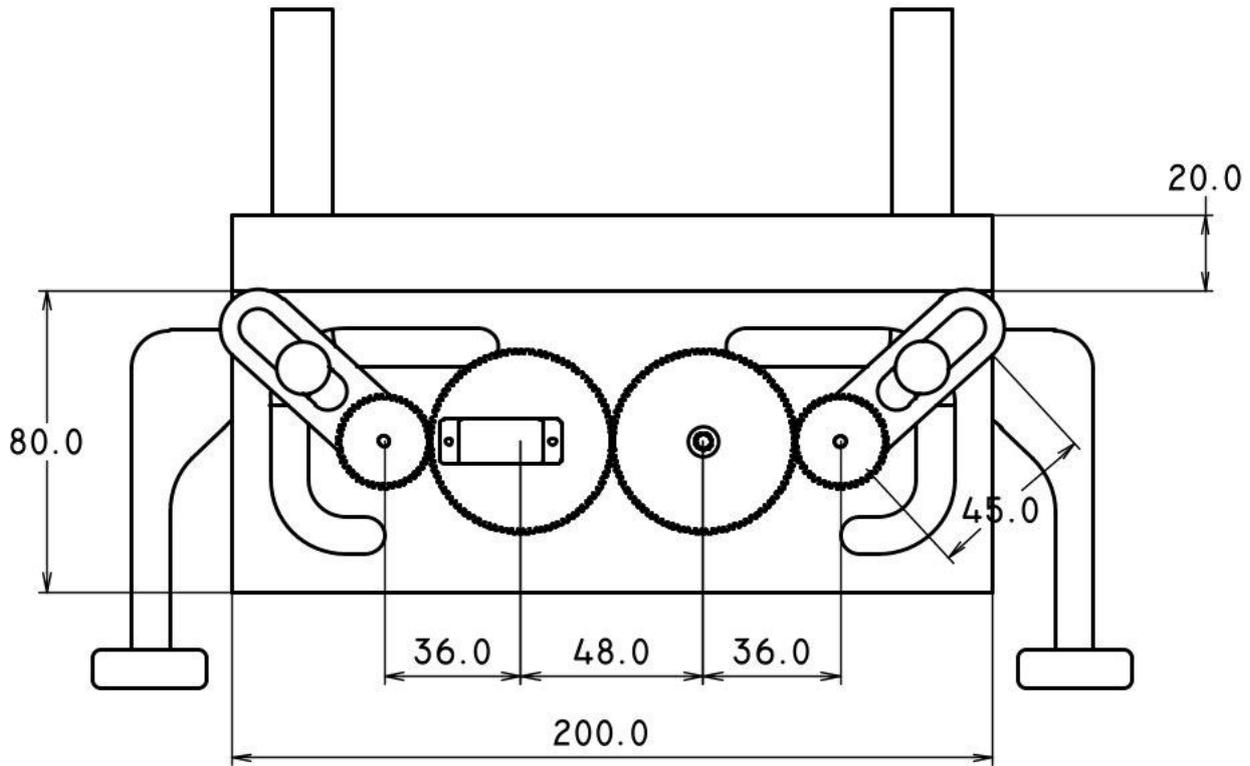
A-A (2 : 1)



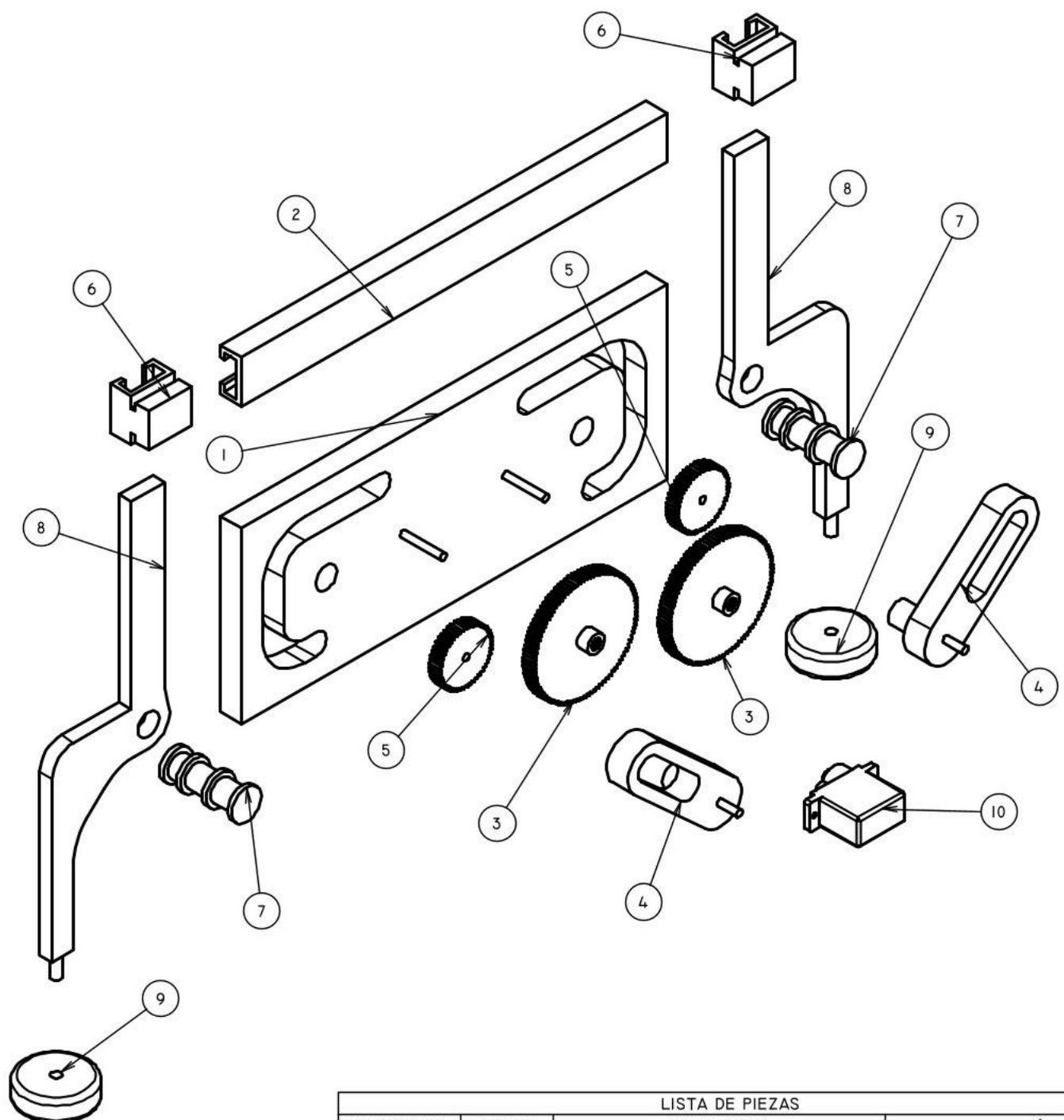
B (4 : 1)



				PESO:	TOLERANCIAS:	MATERIALES:
				0,006 KG	N/A	PLÁSTICO ABS
				NOMBRE	FECHA	DENOMINACIÓN:
				DIBUJADO B. MALATAY	2/2/2025	ENGRANAJE MOTRIZ DE CEPILLO ROTATORIO
				REVISADO B. MALATAY	2/2/2025	
				APROBADO B. MALATAY	2/2/2025	
				CONJUNTO/SISTEMA:		MECANISMO DE LIMPIEZA
01	VERSIÓN INICIAL	2/2/2025	B. MALATAY			1 / 1
EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE			ESCALA: 2 : 1

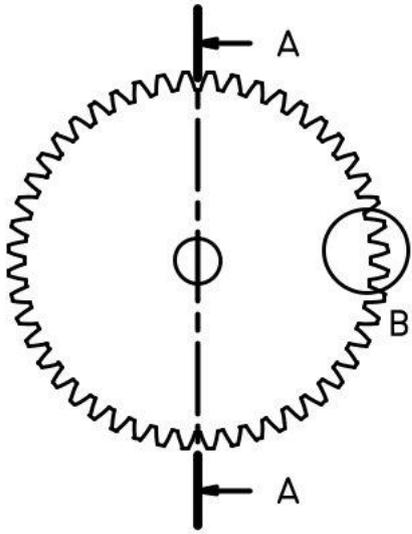


				PESO:	TOLERANCIAS:	MATERIALES:
				0,287 KG	N/A	
				NOMBRE	FECHA	DENOMINACIÓN:
				DIBUJADO B. MALATAY	2/2/2025	MECANISMO DE SUJECIÓN
				REVISADO B. MALATAY	2/2/2025	
				APROBADO B. MALATAY	2/2/2025	
				CONJUNTO/SISTEMA:		
				MECANISMO DE SUJECIÓN		1 / 1
01	VERSIÓN INICIAL	2/2/2025	B. MALATAY			ESCALA:
EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE			1 : 2



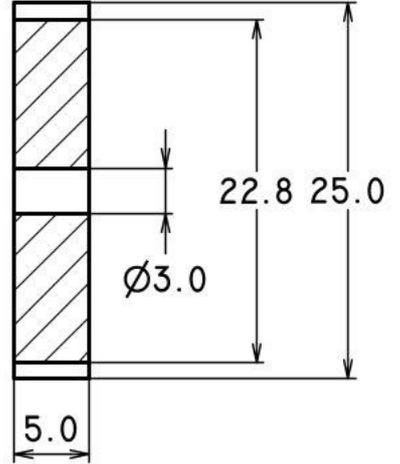
LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	PLATINA GUÍA	
2	1	RIEL GUÍA	
3	2	ENGRANAJE MOTRIZ	
4	2	MANIVELA	
5	2	ENGRANAJE CONDUCTIDO	
6	2	GUÍA DESLIZANTE	
7	2	PASADPR	
8	2	BRAZO DE SUJECIÓN	
9	2	RUEDA DESLIZANTE	
10	1	SG90	

PESO:		TOLERANCIAS:		MATERIALES:	
0,287 KG		N/A			
DIBUJADO:		FECHA:		DENOMINACIÓN:	
B. MALATAY		2/2/2025		MECANISMO DE SUJECIÓN (VISTA EXPLOSIONADA)	
REVISADO:		FECHA:			
B. MALATAY		2/2/2025			
APROBADO:		FECHA:		CONJUNTO/SISTEMA:	
B. MALATAY		2/2/2025		MECANISMO DE SUJECIÓN	
EDICIÓN:		FECHA:		SUSTITUYE A:	
B. MALATAY		2/2/2025			

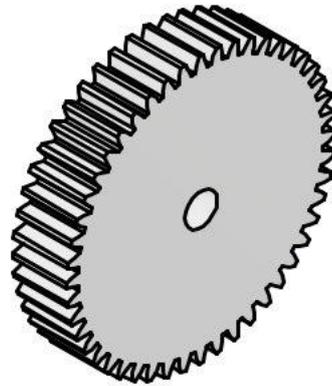
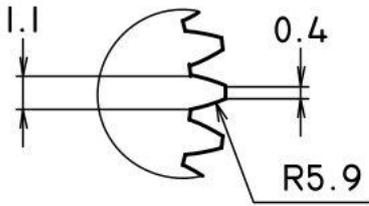


M = 0.5 MM
Z = 48

A-A (2 : 1)

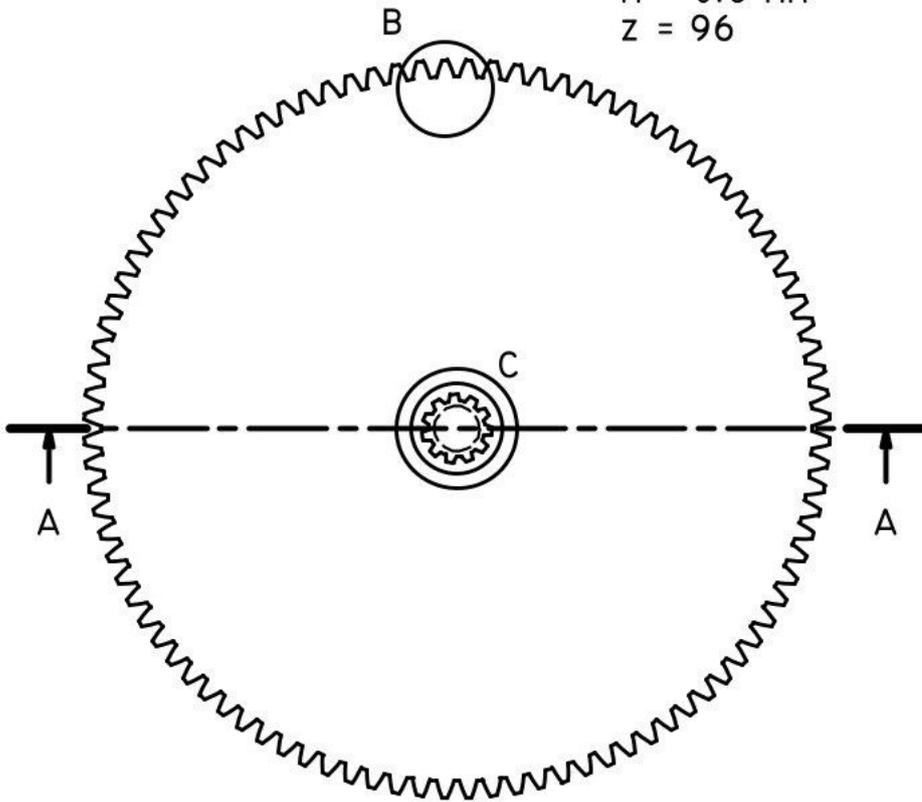


B (4 : 1)

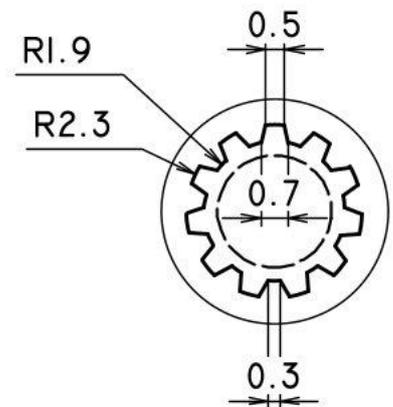


				PESO:	TOLERANCIAS:	MATERIALES:
				0,002 KG	N/A	PLÁSTICO ABS
				NOMBRE:	FECHA:	DENOMINACIÓN:
				DIBUJADO B. MALATAY	2/2/2025	ENGRANAJE CONDUcido DE MECANISMO DE SUJECIÓN
				REVISADO B. MALATAY	2/2/2025	
				APROBADO B. MALATAY	2/2/2025	
				CONJUNTO/SISTEMA:		1 / 1
				MECANISMO DE SUJECIÓN		ESCALA:
				SUSTITUYE A:		2 : 1
01	VERSIÓN INICIAL	2/2/2025	B. MALATAY			
	EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE		

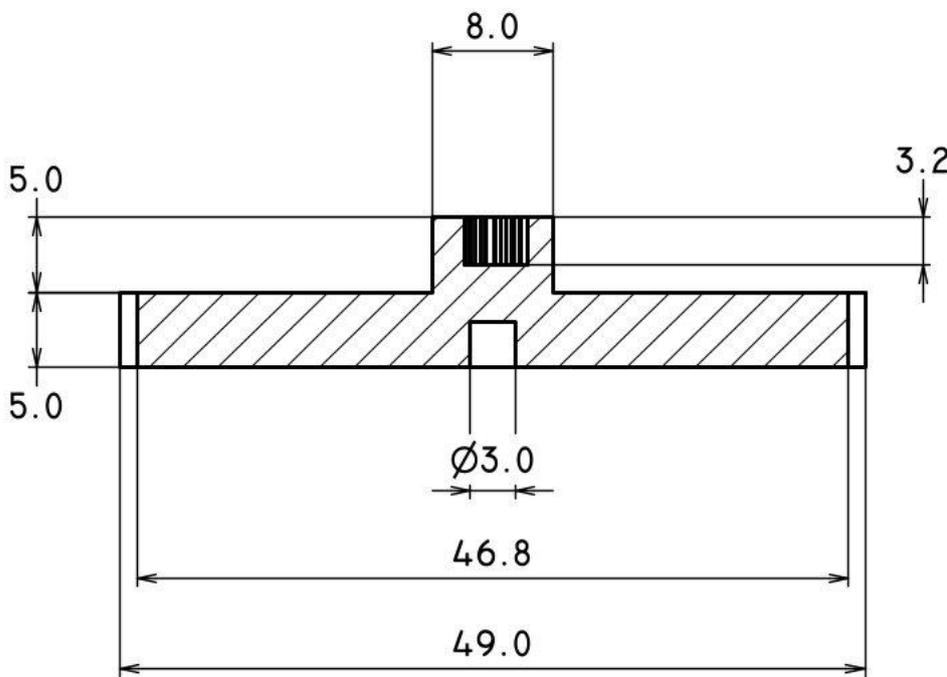
M = 0.5 MM
Z = 96



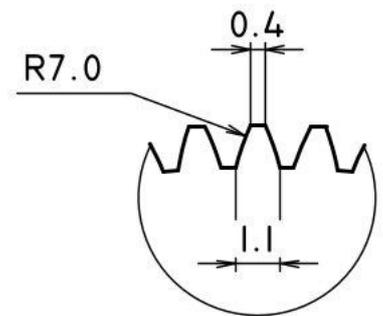
C (5 : 1)



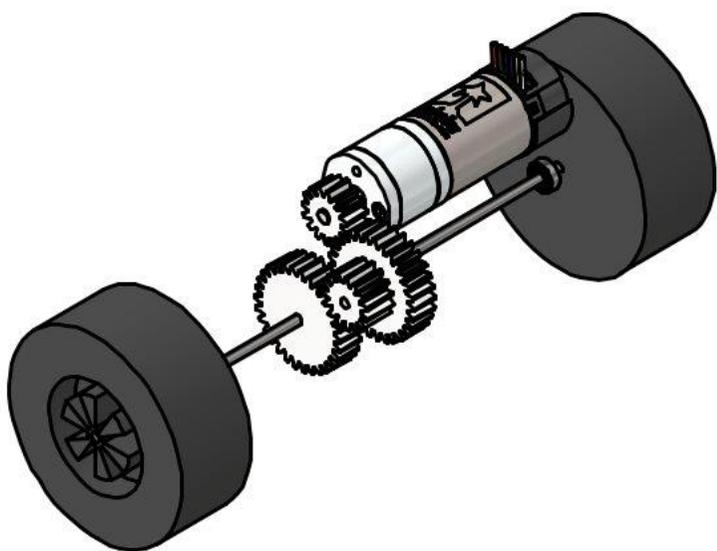
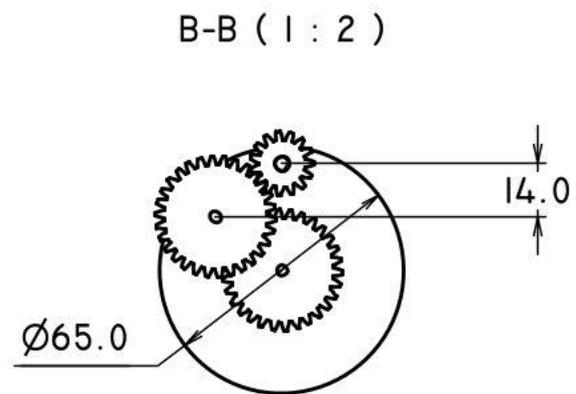
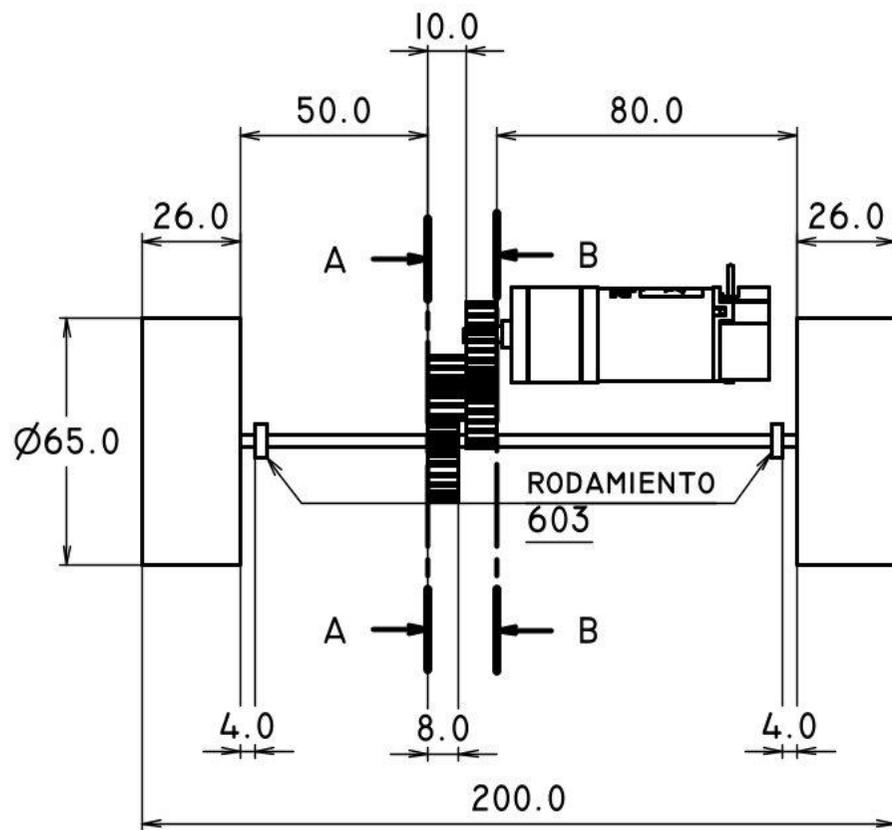
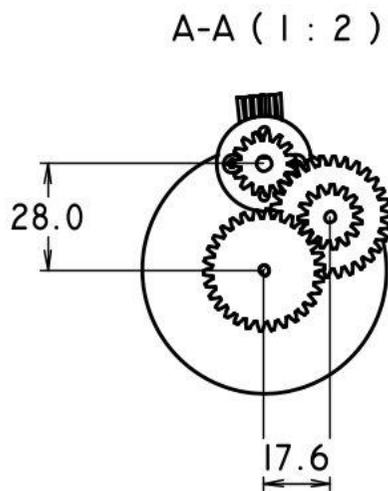
A-A (2 : 1)



B (5 : 1)



				PESO:	TOLERANCIAS:	MATERIALES:
				0,010 KG	N/A	PLÁSTICO ABS
				NOMBRE:	FECHA:	DENOMINACIÓN:
				DIBUJADO B. MALATAY	2/2/2025	ENGRANAJE MOTRIZ DE MECANISMO DE SUJECIÓN
				REVISADO B. MALATAY	2/2/2025	
				APROBADO B. MALATAY	2/2/2025	
				CONJUNTO/SISTEMA:		1 / 1
				MECANISMO DE SUJECIÓN		ESCALA:
				SUSTITUYE A:		2 : 1
01	VERSIÓN INICIAL	2/2/2025	B. MALATAY			
	EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE		



		PESO:	0,682 KG	TOLERANCIAS:	N/A	MATERIALES:	
			NOMBRE	FECHA	DENOMINACIÓN:		
			DIBUJADO B. MALATAY	2/2/2025	MECANISMO DE TRACCIÓN		
			REVISADO B. MALATAY	2/2/2025			
			APROBADO B. MALATAY	2/2/2025			
				CONJUNTO/SISTEMA:			
				MECANISMO DE TRACCIÓN		1 / 1	
01	VERSIÓN INICIAL	2/2/2025	B. MALATAY				
EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE				
				SUSTITUYE A:			

1 2 3 4 5 6

A

B

C

D

E

F

G

H

A

B

C

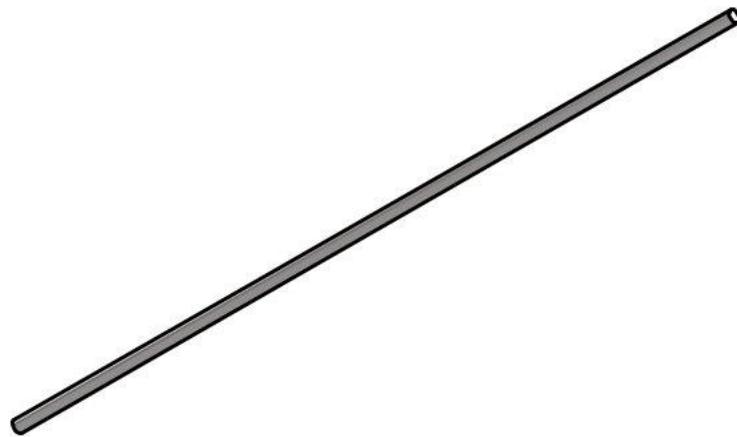
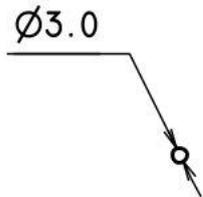
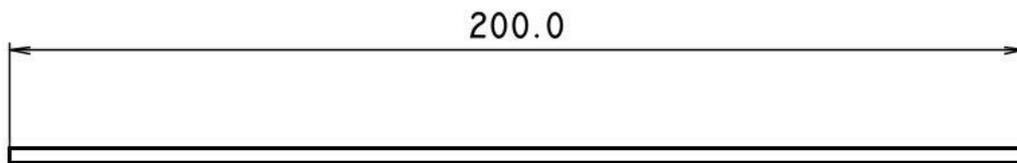
D

E

F

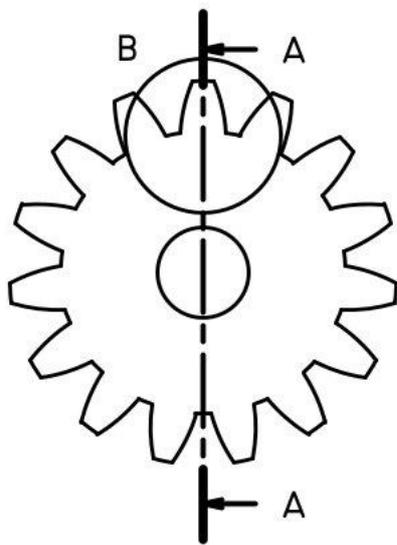
G

H



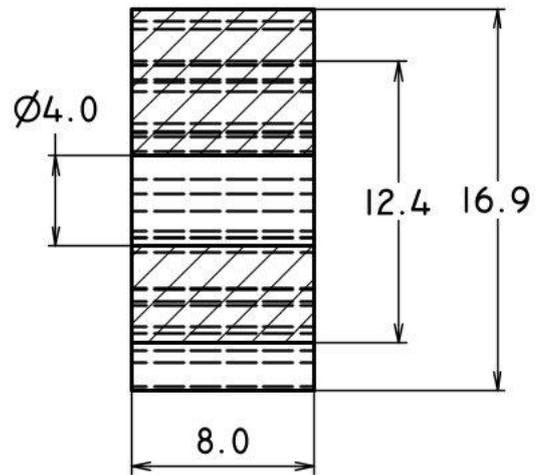
				PESO:	0,011 KG	TOLERANCIAS:	N/A	MATERIALES:	ACERO INOXIDABLE AISI 304
					NOMBRE	FECHA	DENOMINACIÓN:		
				DIBUJADO	B. MALATAY	2/2/2025	EJE DE RUEDAS DE TRACCIÓN		
				REVISADO	B. MALATAY	2/2/2025			
				APROBADO	B. MALATAY	2/2/2025			
								CONJUNTO/SISTEMA:	1 / 1
								MECANISMO DE TRACCIÓN	ESCALA:
01	VERSIÓN INICIAL	2/2/2025	B. MALATAY					1 : 1,5	
EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE					SUSTITUYE A:	

1 2 3 4 5 6

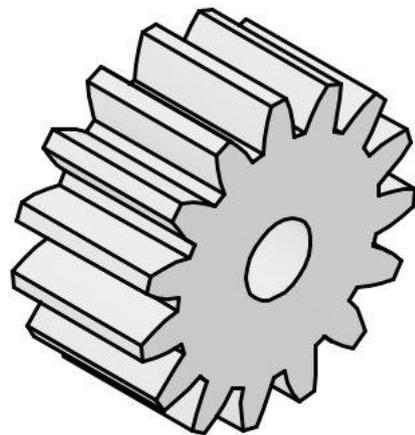
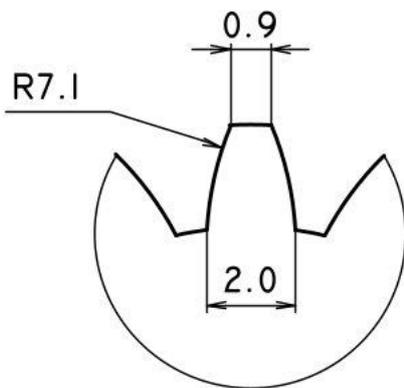


M = 1 MM
Z = 15

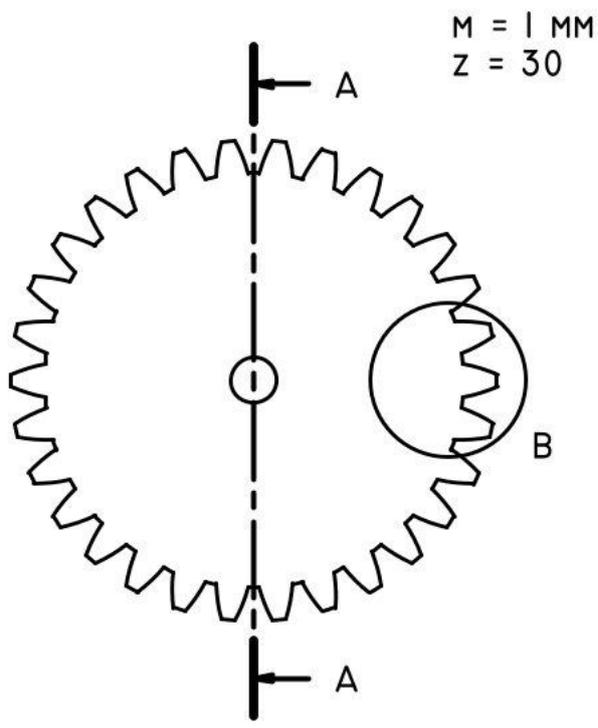
A-A (3 : 1)



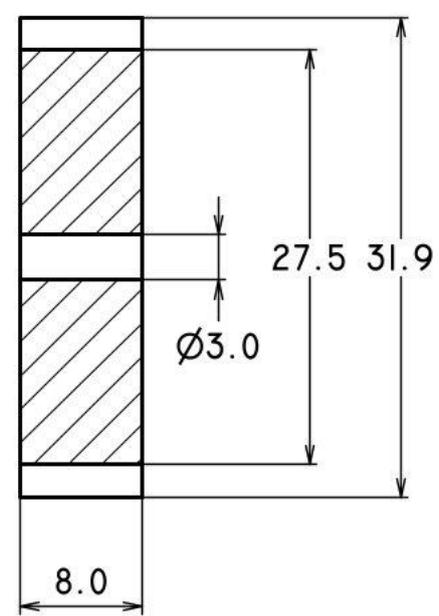
B (6 : 1)



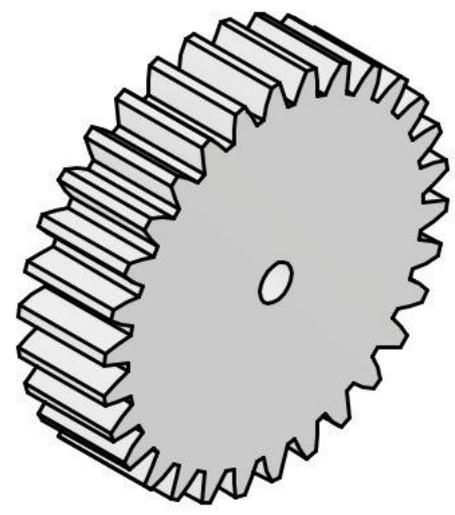
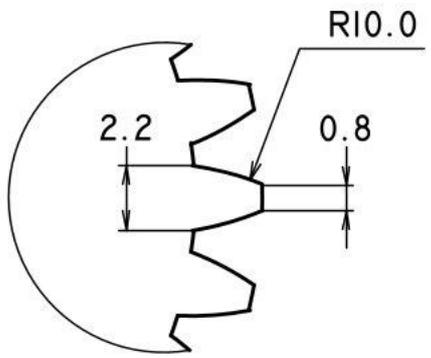
				PESO:	TOLERANCIAS:	MATERIALES:
				0,001 KG	N/A	PLÁSTICO ABS
				NOMBRE:	FECHA:	DENOMINACIÓN:
				DIBUJADO B. MALATAY	2/2/2025	ENGRANAJE MOTRIZ DE TRACCIÓN DE RUEDAS
				REVISADO B. MALATAY	2/2/2025	
				APROBADO B. MALATAY	2/2/2025	
				CONJUNTO/SISTEMA:		1 / 1
				MECANISMO DE TRACCIÓN		ESCALA:
				SUSTITUYE A:		3 : 1
01	VERSIÓN INICIAL	2/2/2025	B. MALATAY			
	EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE		



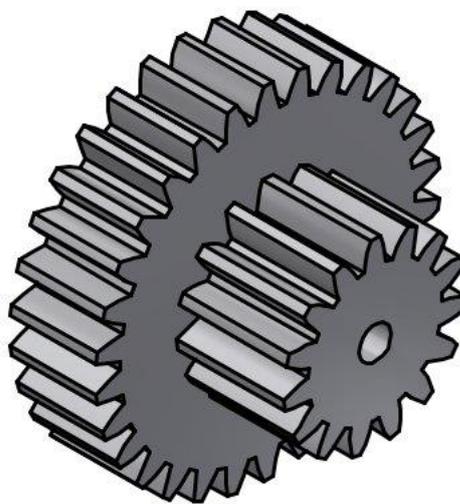
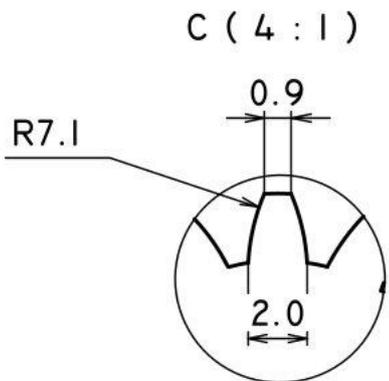
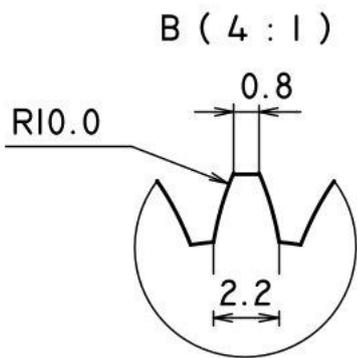
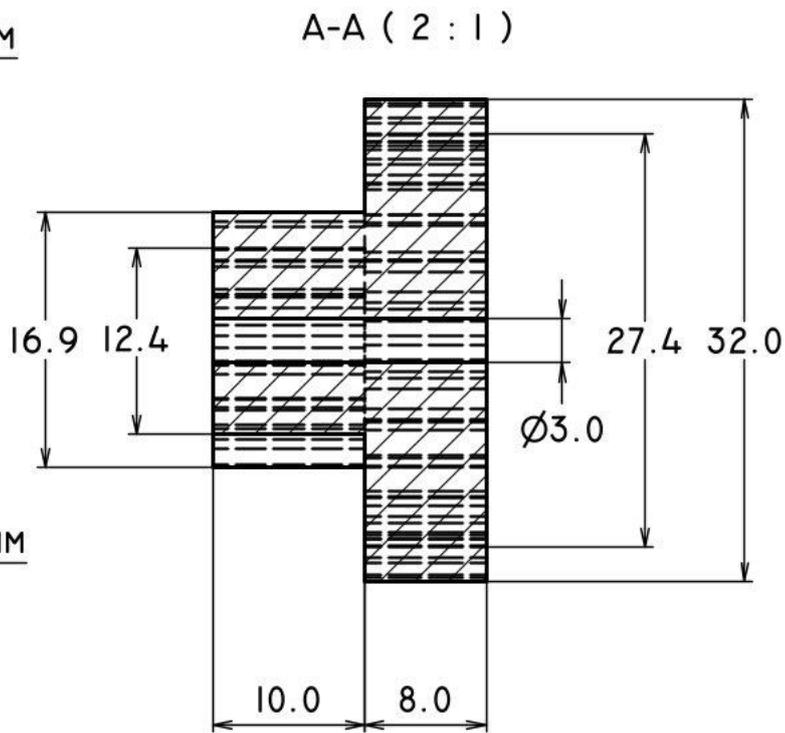
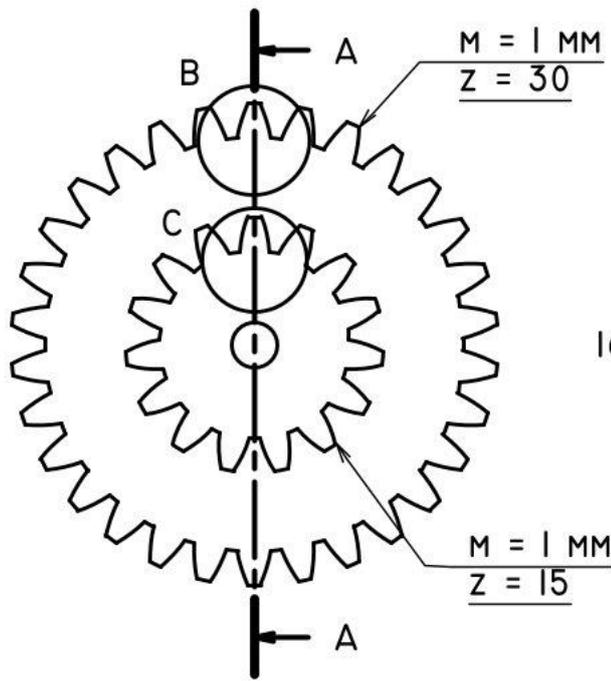
A-A (2 : 1)



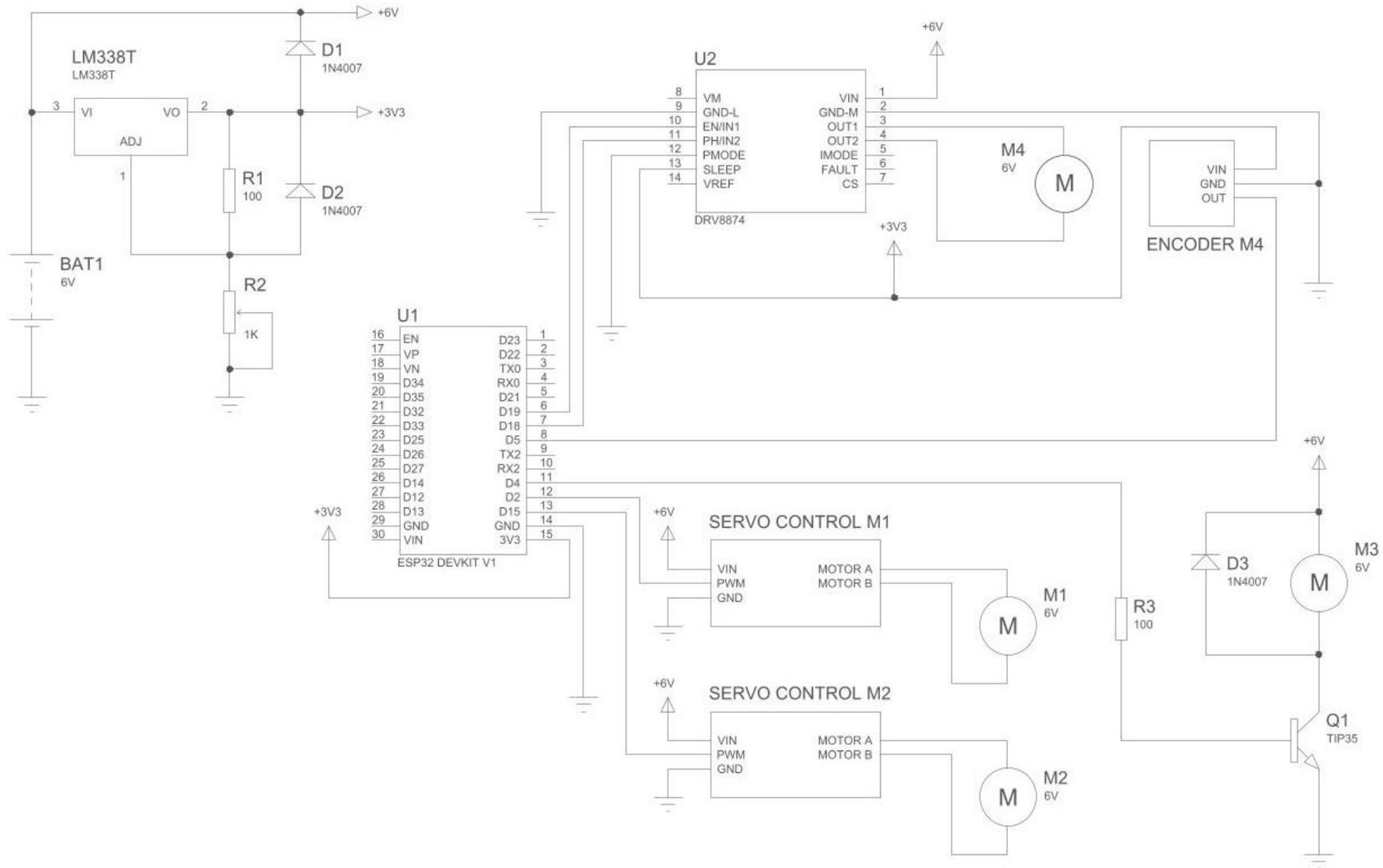
B (4 : 1)



				PESO:	TOLERANCIAS:	MATERIALES:
				N/D	N/A	PLÁSTICO ABS
				NOMBRE:	FECHA:	DENOMINACIÓN:
				DIBUJADO B. MALATAY	2/2/2025	ENGRANAJE CONDUcido DE TRACCIÓN DE RUEDAS
				REVISADO B. MALATAY	2/2/2025	
				APROBADO B. MALATAY	2/2/2025	
						CONJUNTO/SISTEMA:
						MECANISMO DE TRACCIÓN
						1 / 1
01	VERSIÓN INICIAL	2/2/2025	B. MALATAY			ESCALA:
EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE			2 : 1



		PESO:	TOLERANCIAS:	MATERIALES:
		0,008 KG	N/A	PLÁSTICO ABS
		NOMBRE	FECHA	DENOMINACIÓN:
		DIBUJADO B. MALATAY	2/2/2025	ENGRANAJE LOCO DE TRACCIÓN DE RUEDAS
		REVISADO B. MALATAY	2/2/2025	
		APROBADO B. MALATAY	2/2/2025	
				CONJUNTO/SISTEMA:
				MECANISMO DE TRACCIÓN
01	VERSIÓN INICIAL	2/2/2025	B. MALATAY	1 / 1
EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE	ESCALA: 2 : 1



	FECHA	NOMBRE	FIRMA:	
DIBUJADO:	07 - 01 - 2025	B. MALATAY		
COMPROBADO:	17 - 01 - 2025	B. MALATAY		
ESCALA 1:1	CIRCUITO DE CONTROL			PROYECTO INGE-2785
				INGENIERÍAS