



DISEÑO DE UN ACTUADOR ELECTROMECAÁNICO PARA UN SISTEMA AUTÓNOMO DE LIMPIEZA EN TECHOS PLANOS DE CONCRETO

Presentado por:

Autor: Hanner Danilo Burgos Diaz

Director: Jhon Fernando Pazos Ospina, M.Sc.

Un trabajo de grado para optar por el Título de
Ingeniero Mecánico

Escuela de Ingeniería Mecánica
Universidad del Valle
Octubre 2023

Resumen

La Universidad del Valle cuenta con edificaciones de terrazas planas que tienden a acumular residuos macroscópicos en sus techos. Esta situación es provocada por la cercana convivencia entre los edificios y la diversidad arbórea. La limpieza manual de estos residuos es riesgosa, requiere capacitación específica y debe realizarse con frecuencia, lo que aumenta los costos y la dificultad del mantenimiento. El avance tecnológico ha demostrado que la robótica autónoma es una solución efectiva para este tipo de operaciones de limpieza, debido a su precisión y a la eliminación de riesgos para la integridad humana. Desde la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica y la Escuela de Ingeniería Mecánica se está desarrollando un dispositivo que inspeccionará y limpiará estas edificaciones de forma autónoma [1].

Este trabajo de grado se centra en el diseño y desarrollo de un actuador electromecánico destinado a la recolección de hojas, fundamentado en principios de automatización y control. El dispositivo estará capacitado para iniciar de manera autónoma los procesos de recolección y disposición de los residuos, siguiendo las instrucciones de un microprocesador, además de registrar y proporcionar información relevante sobre su funcionamiento y sus parámetros operacionales.

Palabras clave: Actuador electromecánico, procesos de automatización y control, mecatrónica, procesos de limpieza, succión de hojas.

Contenidos

Resumen	2
Lista de figuras	5
Lista de tablas	7
1. Introducción	9
1.1. Marco contextual	9
1.1.1. Descripción del lugar	11
1.2. Identificación del problema	13
1.2.1. Árbol del problema	13
1.3. Antecedentes	14
1.3.1. Diseño e implementación de un robot succionador de limpieza de bajo costo [17]	16
1.3.2. Desarrollo de un robot soplador de hojas [9]	16
1.3.3. Diseño de un robot autónomo de recolección de basura para exteriores con YOLOv4-Tiny [18]	16
1.3.4. Aspiradora de hojas de bajo presupuesto y alta potencia [19]	17
1.3.5. Diseño e implementación de un novedoso robot de limpieza vial para exteriores [20]	17
1.3.6. Un robot soplador de hojas inteligente basado en un modelo de aprendizaje profundo [21]	17
1.3.7. Diseño de ventilador de motor para la ingestión de grandes residuos [22] . . .	17
1.3.8. Robot de limpieza de pisos automático usando arduino y sensores ultrasónicos [23]	17
1.3.9. Robot recolector de hojas totalmente automatizado con empaquetador [24] .	18
1.4. Justificación	18
1.5. Objetivos	18
1.5.1. Objetivo general	18
1.5.2. Objetivo específico	19
1.6. Metodología	19
2. Marco teórico	21
2.1. Cinemática plana de un cuerpo rígido	21
2.1.1. Movimiento relativo: ejes en traslación	21
2.2. Cinética plana de los cuerpos rígidos	22
2.2.1. Fuerza, masa y aceleración	22

2.3.	Mecanismo de tijera	23
2.4.	Sensores	24
2.4.1.	Características estáticas y dinámicas	26
2.4.2.	Selección de sensores	27
2.4.3.	Elemento con galga extensométrica	27
2.4.4.	Interruptores de proximidad	27
2.5.	Señales analógicas y digitales	28
2.6.	Protocolo I^2C	28
2.6.1.	Estructura de la comunicación	29
2.6.2.	Ventajas del I^2C	29
2.6.3.	Limitaciones del I^2C	29
2.6.4.	Aplicaciones comunes del I^2C	30
2.7.	Flujo sin fricción: ecuación de Bernoulli	30
2.7.1.	Pérdida de carga y el coeficiente de fricción	32
2.8.	Flujo en conductos no circulares	34
2.8.1.	Coeficiente de resistencia de difusores, secciones convergentes y otros tipos de sección	35
2.8.2.	Coeficiente de resistencia para entradas	38
2.9.	Resistencia de materiales	39
2.9.1.	Esfuerzos a los que falla un material	39
2.9.2.	Esfuerzo de fluencia	40
2.9.3.	Criterios de falla: Tresca y Von Mises	40
2.9.4.	Factor de seguridad	41
2.10.	Elementos mecánicos y electromecánicos	41
2.10.1.	Cojinetes y consideraciones para su elección	41
2.10.2.	Engranajes	41
2.10.3.	Ventiladores axiales	43
2.10.4.	Motor DC	44
2.10.5.	Servo motor	45
2.10.6.	Selección de un motor	45
2.10.7.	Par y velocidad	46
2.10.8.	Eficiencia y capacidad de control	46
2.10.9.	Consideraciones ambientales y constructivas	46
2.10.10.	Requerimientos de potencia	46
2.10.11.	Actuador lineal	47
3.	Diseño del actuador	48
3.1.	Requerimientos y selección del actuador electromecánico	48
3.2.	Diseño del actuador seleccionado	51
3.2.1.	Subsistema de recolección (ventilador, cepillo rotativo, motor DC, canal de succión, entrada del túnel y almacén)	52
3.2.2.	Diseño de la entrada del túnel	53
3.2.3.	Diseño del canal de succión	53
3.2.4.	Diseño del cepillo rotativo	55
3.2.5.	Diseño del almacén	55
3.3.	Subsistema de depósito (mecanismo de tijera y actuador lineal	56
3.3.1.	Análisis de posición	57

3.3.2. Análisis estático	58
3.4. Subsistema de control	61
3.4.1. Protocolo de comunicación	63
4. Construcción del prototipo	64
4.1. Subsistema de recolección	64
4.2. Subsistema de depósito	68
4.3. Ángulo de depósito	68
4.4. Parámetros generales del dispositivo	70
5. Conclusiones	72
6. Anexos	73
6.0.1. Planos de construcción	73
6.0.2. Código del sistema	75
7. Presupuesto	80
Referencias	81

Lista de figuras

1.1. Evidencia fotográfica 1. Propia autoría.	10
1.2. Evidencia fotográfica 2. Propia autoría.	10
1.3. Terraza de la Escuela de Ingeniería. Propia autoría.	11
1.4. Dimensiones del canal de desagüe. Propia autoría.	11
1.5. Datos de temperatura y humedad para el año 2024. Propia autoría basada en los datos aportados por el Centro Meteorológico de la Universidad del Valle.	12
1.6. Datos de temperatura y humedad para el día 8 de agosto de 2024. Propia autoría basada en los datos aportados por el Centro Meteorológico de la Universidad del Valle.	12
1.7. Árbol del problema.	14
1.8. Flujograma metodológico del desarrollo del proyecto. Propia autoría.	20
2.1. Movimiento de un cuerpo rígido. Tomado de [26].	21
2.2. Componentes de la velocidad y aceleración de un cuerpo rígido en rotación. Tomado de [26].	22
2.3. Diagrama de cuerpo libre para un cuerpo sometido a fuerzas. Tomado de [26]. . . .	23
2.4. Esquema del mecanismo de tijera. a): posición inicial, b): posición final.	24
2.5. Histéresis. Tomado de [25].	25
2.6. Respuesta a una entrada tipo escalón. Tomado de [25].	26
2.7. galgas extensométricas o extensómetros: a) de alambre metálico, b) de hoja de papel metálico, c) semiconductor. Tomado de [25].	27
2.8. Empleo de sensores fotoeléctricos para detectar objetos, a) el objeto se interpone con el haz luminoso y b) el objeto refleja la luz. Tomado de [25].	28
2.9. Conexión entre maestro y esclavos en el bus I^2C con solo dos líneas. Por SDA circulan los datos en serie y por SCL el maestro envía los impulsos de reloj que genera. Tomado de [27].	29
2.10. Ecuación de Bernoulli para flujos sin fricción a lo largo de una línea de corriente: (a) fuerzas y flujos; (b) resultante de las fuerzas de presión después de restar una presión p uniforme. Tomado de [28].	31
2.11. Diagrama de Moody para el coeficiente de fricción en conductos de paredes lisas y rugosas. Tomado de [28].	33
2.12. Valores recomendados de rugosidad para conductos comerciales. Tomado de [28]. . .	33
2.13. Patrones de flujo en difusores con distinta divergencia. Tomado de [29].	36
2.14. Factores para A , k_1 y $\Delta\zeta$, según las características del difusor. Tomado de [29]. . . .	37
2.15. Valores de ζ_d bajo las características del difusor. Tomado de [29].	38
2.16. Configuraciones para determinar el coeficiente de pérdida a la entrada. Tomado de [29].	38

2.17. Diagrama de coeficiente de pérdida para cada configuración del diagrama 2.16. Tomado de [29].	39
2.18. Nomenclatura de un diente de engrane. Tomado de [30].	42
2.19. Estandarización de medidas para engranajes. Tomado de [30].	43
2.20. Gráfica de un ventilador PFB0824UHE de 24V. Tomado de [31].	44
2.21. Motor DC. a) Básico. b) Con dos juegos de polos. tomado de [25].	45
3.1. A4WD3 Wheeled. Tomado de [34].	50
3.2. Arquitectura del sistema de limpieza. Propia autoría.	51
3.3. Dimensiones y curva característica del ventilador. Tomado de [31].	52
3.4. Diagrama conceptual del área proyectada en el plano de succión. Propia autoría. . .	53
3.5. Gráfico altura de canal vs ángulo Modelo teórico. Propia autoría.	53
3.6. Gráfica presión vs caudal del sistema y del ventilador DC. Propia autoría.	54
3.7. Engranajes usados en el sistema de cepillos rotativos. Propia autoría.	55
3.8. Celda y módulo HX711. Propia autoría.	56
3.9. Actuador lineal Shaoke IP60-YR. Tomado del vendedor.	57
3.10. a) medidas posición inicial, b) medidas posición final c) medidas eslabón. Propia autoría.	58
3.11. Mecanismo de tijera. a) posición inicial. b) posición final. Propia autoría.	58
3.12. DCL del sistema. Propia autoría.	59
3.13. a) DCL eslabón BDC. b) DCL eslabón ACE. c) DCL Plataforma. Propia autoría. .	59
3.14. Resultados analíticos. Propia autoría.	60
3.15. Eslabón con mayores cargas, orientadas en dirección Normal y tangencial al eslabón. a) Diagrama de fuerzas, posición inicial. b) Diagrama de fuerzas, posición fina. Propia autoría.	61
3.16. Flujo de acciones del sistema de limpieza. Propia autoría.	62
4.1. Registro gráfico de la disposición de las hojas. Propia autoría.	64
4.2. Registro gráfico del método de medición de ángulo. Propia autoría.	65
4.3. Prototipos para prueba de obstrucción. Propia autoría.	65
4.4. Construcción del sistema de succión. Propia autoría.	67
4.5. Rendija plástica para evitar atascos.	67
4.6. Fotografías del prototipo construido. Propia autoría.	68
4.7. Configuraciones del experimento con hojas. Propia autoría.	69
4.8. ángulo resultante luego de la construcción (33.8°). Propia autoría.	70
4.9. Evidencia del requerimiento 1.	71
6.1. Plano del canal de succión. Propia autoría.	73
6.2. Plano del eslabón. Propia autoría.	74
6.3. Plano del eslabón que permite angulo. Propia autoría.	74
6.4. Plano de la base del depósito. Propia autoría.	75
7.1. Presupuesto general del proyecto de grado.	80
7.2. Presupuesto para el personal.	80
7.3. Presupuesto para equipos.	80
7.4. Presupuesto para materiales.	81
7.5. Presupuesto dedicado al software.	81

Lista de tablas

1.1. Comparativo de sistemas robóticos que comparten características con la propuesta.	15
3.1. Matriz de Requerimientos generales del sistema.	48
3.2. Matriz de decisión para la selección del sistema de recolección de hojas.	49
3.3. Propiedades AISI 316. Tomado de [33].	50
4.1. Resultado del desempeño de cada prototipo frente a la presencia de obstrucción para una hoja en horizontal con variación de ángulo de succión.	66
4.2. Resultado del desempeño de cada prototipo frente a la presencia de obstrucción para varias hojas amontonadas con variación de ángulo de succión.	66
4.3. Resultado del desempeño de cada prototipo frente a la presencia de obstrucción para hojas en horizontal que superen el ancho del canal con variación de ángulo de succión.	66
4.4. Resultados del ángulo crítico de deslizamiento.	69
4.5. Matriz de cumplimiento del sistema.	71

1. Introducción

1.1. Marco contextual

Una buena parte de las edificaciones actuales cuentan con terrazas planas en lugar de techos inclinados, por lo que requieren drenaje de las aguas lluvias y mantenimiento periódico para remover los residuos macroscópicos que pudieran taponar los conductos de drenaje. En Colombia, de acuerdo con la normativa vigente del Código de Construcción, las constructoras suelen desarrollar proyectos habitacionales con edificaciones de cuatro o cinco pisos para evitar la instalación de elevadores. Además de las construcciones para vivienda, un gran número de edificaciones públicas como colegios, universidades, clínicas, centros comerciales y hoteles cuentan con menos de cinco pisos y terrazas planas. El rápido crecimiento de los árboles en la zona tropical y la alta diversidad de especies que superan los 15 m de altura hacen común que las ramas excedan la altura de edificaciones de cinco pisos o menos. Esta condición favorece la acumulación permanente de hojas, flores, semillas y fragmentos de madera de distintos tamaños sobre las terrazas, lo que genera la necesidad de labores de limpieza constantes. Cuando, por razones presupuestales, de seguridad o de dificultad de acceso, dichas labores no se realizan de manera oportuna, se produce el taponamiento de los ductos de drenaje y la consecuente acumulación de aguas lluvias, acelerando el deterioro de las estructuras.

La poda de árboles es una medida frecuentemente utilizada para mitigar este problema; sin embargo, presenta importantes limitaciones, ya que los árboles cumplen funciones ambientales esenciales como la reducción de la temperatura interior de las edificaciones, la disminución de la radiación solar sobre los sistemas de impermeabilización, la producción de oxígeno y el soporte de fauna urbana. Adicionalmente, la poda requiere personal especializado en trabajo en alturas, implica costos recurrentes y debe ejecutarse de manera periódica. En este contexto, se evidencia la necesidad de soluciones técnicas que permitan gestionar de manera automática la acumulación de residuos vegetales en las terrazas, reduciendo la dependencia de intervenciones manuales frecuentes y minimizando los riesgos operativos, económicos y ambientales asociados. Los edificios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle, en su campus de Meléndez, han sido afectados por esta situación, como puede verse en la figuras 1.1 y 1.2. La limpieza de las terrazas con personal de mantenimiento rara vez se realiza, al evidenciarse que el acceso es difícil, pues se requiere el desplazamiento de andamios o escaleras, es muy complicado llevar dispositivos de apoyo a la limpieza (sopladoras, hidrolavadoras, etc.) y se generan riesgos ante la ausencia de barandas en las terrazas.

La robótica se enfoca en el desarrollo de sistemas y dispositivos capaces de ejecutar tareas tradicionalmente realizadas por la mano de obra humana, especialmente aquellas de carácter repetitivo, tedioso o que implican condiciones de riesgo para las personas [2]. En este sentido, la aplicación de soluciones robóticas se presenta como una alternativa técnicamente viable para abordar el problema de la limpieza de terrazas. No obstante, este tipo de enfoque no ha sido abordado de manera sistemática en el ámbito académico de la Universidad del Valle, lo que motiva el desarrollo del presente trabajo.



Figura 1.1: Evidencia fotográfica 1. Propia autoría.



Figura 1.2: Evidencia fotográfica 2. Propia autoría.

1.1.1. Descripción del lugar

La biodiversidad que caracteriza a la Universidad del Valle coexiste con las edificaciones de la institución, como puede verse en la figura 1.3, generando un entorno agradable. Sin embargo, esta convivencia también conlleva la producción de residuos orgánicos en las terrazas, siendo el edificio de ingeniería uno de los espacios afectados por este problema. La terraza de la Escuela de Ingeniería está construida de concreto y cuenta con una superficie plana seccionada por canales transversales, diseñados para servir de desagüe y así evitar la acumulación de agua de lluvia en la superficie. Además, en la terraza se encuentran dispositivos de disipación térmica, los cuales son responsables de refrigerar el sistema de climatización de los salones.



Figura 1.3: Terraza de la Escuela de Ingeniería. Propia autoría.

Para ilustrar las dimensiones de los canales, se realizó un diagrama después, de tomar las medidas y promediar sus tamaños. Lo mencionado se expone en la figura 1.4.

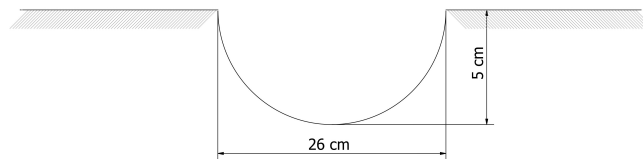


Figura 1.4: Dimensiones del canal de desagüe. Propia autoría.

Según un estudio fisiológico realizado por la Universidad del Valle, la especie de árbol con al que convive el edificio de ingenierías es la *Ceiba Pentandra* [3]. Esta especie presenta hojas con

dimensiones promedio de aproximadamente 14 cm de largo y 4 cm de ancho. El periodo de caída de las hojas se inicia, por lo general, a comienzos del año, comprendido entre los meses de enero y marzo.

Según los datos registrados por el Centro Meteorológico de la Universidad del Valle, las terrazas del campus están expuestas a un rango de temperaturas y niveles de humedad propios de una región tropical. A partir de la tabla de datos suministrada por dicho centro, se realizó el procesamiento de la información, obteniéndose las siguientes gráficas expuestas en las figuras 1.5 y 1.6.

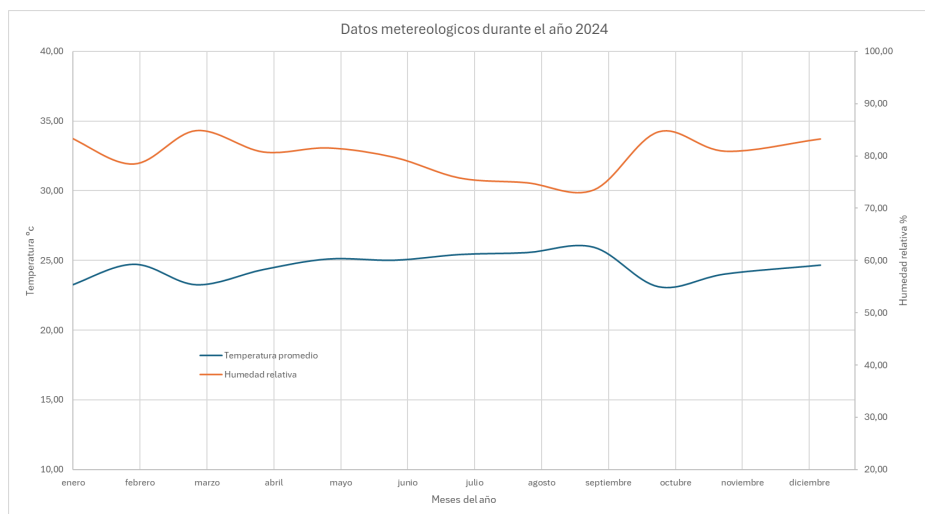


Figura 1.5: Datos de temperatura y humedad para el año 2024. Propia autoría basada en los datos aportados por el Centro Meteorológico de la Universidad del Valle.

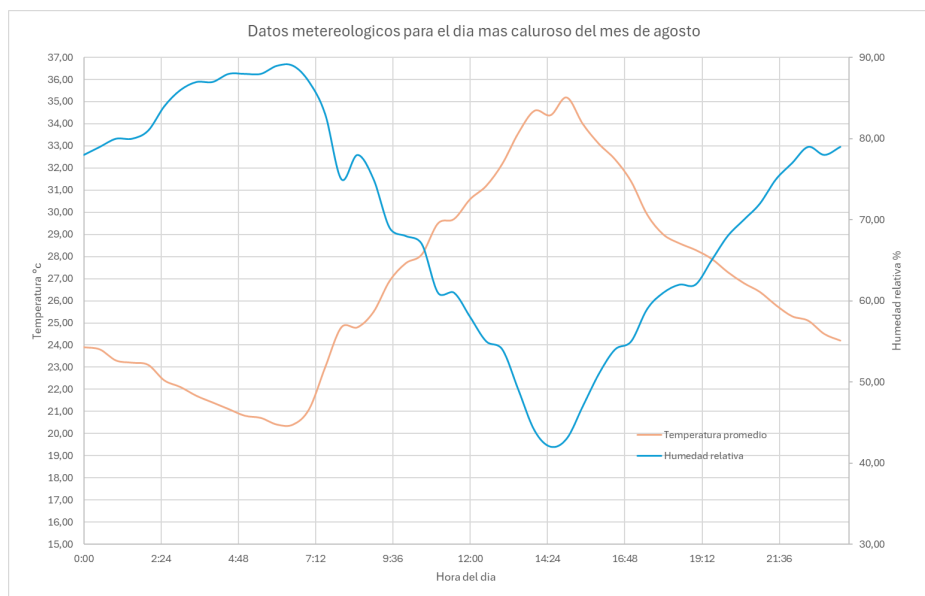


Figura 1.6: Datos de temperatura y humedad para el día 8 de agosto de 2024. Propia autoría basada en los datos aportados por el Centro Meteorológico de la Universidad del Valle.

En la figura 1.5 se observa que el periodo comprendido entre agosto y septiembre fue el más caluroso registrado. Este mes presentó, en promedio, los picos máximos, alcanzando los 26°C.

Tomando el día más caluroso del mes de agosto, observado en la figura 1.6, se observa que se alcanza una temperatura de 35,2°C a las 15:00 h. Por otro lado, podemos observar que el tiempo donde se presenta mayor humedad relativa, es desde septiembre hasta octubre, lo que muestra una mayor presencia de lluvia en la zona. Estos datos son relevantes a la hora de considerar horarios y tiempos de recolección del sistema de limpieza.

Es importante destacar que no toda el área de la terraza presenta una acumulación significativa de residuos orgánicos. Los residuos, como las hojas, frutos y ramas, tienden a concentrarse en zonas específicas donde el viento y la topografía de la terraza facilitan su acumulación. Por lo tanto, el proceso de limpieza se enfocará en un área efectiva de recolección que comprende aproximadamente el 40 % de la superficie total de la terraza. Esta área incluye los puntos críticos alrededor de los canales de desagüe y los dispositivos de disipación térmica, donde la acumulación de residuos puede obstruir el drenaje y afectar la eficiencia del sistema de climatización. La identificación precisa de esta área efectiva permitirá optimizar los recursos y la eficiencia del sistema autónomo de limpieza.

Por otro, lado una característica importante del diseño del sistema de limpieza es la medida del pretil ubicado en esta terraza. El pretil tiene una altura de 22 cm sobre la caída al pie del árbol conviviente en esta edificación.

La figura 3.1 muestra un resumen de los requerimientos y características del entorno.

1.2. Identificación del problema

El problema principal que se aborda en este trabajo es el desafío asociado a la limpieza de terrazas planas de concreto. Si bien existen numerosas publicaciones académicas que demuestran la utilidad de la robótica autónoma en labores de limpieza y supervisión de diversas infraestructuras, no se han identificado estudios que aborden de manera específica las particularidades de las terrazas planas de concreto, las cuales presentan condiciones operativas y ambientales propias.

La acumulación constante de residuos macroscópicos promueve la formación de agua estancada. Esta condición incrementa los niveles de humedad en la estructura, acelerando los procesos de deterioro y comprometiendo su integridad a mediano y largo plazo.

Las labores de limpieza manual asociadas a estos residuos son recurrentes, costosas y presentan riesgos operativos derivados del trabajo en alturas, lo que evidencia la necesidad de explorar alternativas tecnológicas que permitan una gestión más eficiente y segura del problema. En este contexto, surge la pertinencia de evaluar el uso de soluciones automatizadas que contribuyan a mitigar los efectos de la acumulación de residuos en terrazas planas de concreto.

En consecuencia, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo impacta la acumulación de residuos en terrazas planas de concreto en la integridad estructural y el desempeño de los sistemas de acondicionamiento, y de qué manera un actuador electromecánico autónomo puede contribuir a mitigar dichos efectos?

1.2.1. Árbol del problema

Considerando que el problema de la acumulación de residuos en terrazas planas de concreto responde a la interacción de diversos factores ambientales, constructivos y operativos, se empleó el árbol del problema como herramienta metodológica para identificar, organizar y analizar de forma causal los elementos que lo originan y sus principales consecuencias. La figura 1.7 muestra esta interacción.

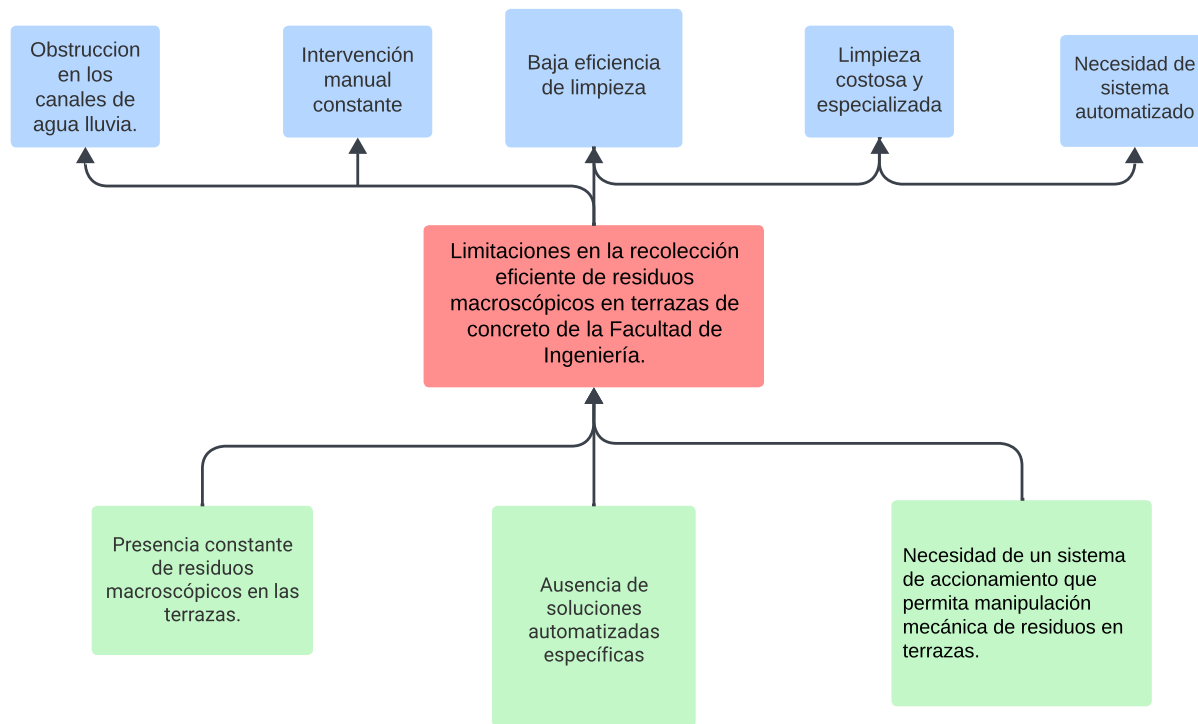


Figura 1.7: Árbol del problema.

1.3. Antecedentes

Varios investigadores han demostrado que es posible usar la robótica en labores de limpieza en espacios cerrados como el hogar y oficinas [4] [5]. El problema de la recolección de hojas y residuos en espacios abiertos también ha sido abordado usando, en algunos casos, técnicas de visión artificial para la navegación y para la detección y clasificación de los residuos recogidos [6] [7]. Algunas propuestas logran que el robot pueda realizar sus tareas aún en presencia de escalones [8]. De hecho, se pueden encontrar propuestas de robots para la recolección de hojas [9], pero requieren la intervención humana para desocupar los depósitos en los que se acumulan durante los recorridos. La Tabla 1.1 muestra una comparativa de varias soluciones a problemas similares, pero en contextos particulares.

Observando la Tabla 1.1, se destaca en primer lugar que específicamente la limpieza de techos de concreto plano no está explícitamente nombrada. Este hecho fue una constante en la búsqueda bibliográfica. Sin embargo, otras aplicaciones relacionadas pudieron ser encontradas como lo son la limpieza de ductos de aire acondicionado [10], limpieza de paneles solares [11], [12], [13] y [14], colector y detector de basura en exteriores [7], [6], aplicaciones para agricultura [8], [15], y detección de equipos en techos planos [16].

En la mayoría de estas aplicaciones, la autonomía no es una propiedad encontrada con facilidad. Se nota que aquellas aplicaciones que usan un framework de trabajo como ROS (Robotic Operating System) o TensorFlow [14],[7] o [8], sí poseen esta propiedad, la cual es deseable en sistemas de

Tabla 1.1: Comparativo de sistemas robóticos que comparten características con la propuesta.

Ref	Aplicación	Autónomo	Evasión de obstáculos	Plan. trayectoria	Movilidad	Actuador	Framework	Sensores
[10]	Inspección y limpieza de ductos de aire	No	Tele operado	Tele operado	Skid-street	No	No	RGB
[11]	Limpieza de paneles en desiertos	Si	No	Determinística	Orugas	Cepillo	No	sonares
[12]	limpieza paneles solares	No	No	No	4WD	Brazo	No	Sonares
[13]	Limpieza y Supervisión de paneles solares	No	No	No	Riles	Cepillo	No	Lidar, RGB
[14]	Inspección paneles solares	Semi	No	Si	Orugas	Cepillo	ROS	MU, GPS,3D lidar,RGBD
[7]	Colector de basura	Si	Si	Personalizado	Roker-bogie	Pala	YoloV3	RGB
[15]	Barrido de hojas	No	No	No	Diferencial	sopladora + recolector	No	LDR, sonares

robótica de servicio como la inspección y limpieza en estructuras civiles. Otras características relacionadas con la autonomía, pero que pueden manejarse independientemente, son la capacidad de evasión de obstáculos y la planificación de trayectorias. En este aspecto, el vehículo móvil y su actuador pueden ser teleoperados [10], [16], por humanos. En trabajos como [12], [13], [6] y [15] las aplicaciones de limpieza de paneles, detección de basuras y barrido de hojas se resuelven este tipo de funcionalidades realizando consideraciones de uso del sistema, asumiendo que no hay obstáculos, o que el sistema móvil se mueve en una estructura mecánica previamente instalada.

Las aplicaciones y sistemas descritos en la Tabla 1.1 se movilizan en exteriores, por lo tanto, son terrenos irregulares. Entonces, el tipo de movilidad que usa el vehículo es importante. Correlacionando la autonomía con la movilidad, se observa que el uso de orugas [11] [14], o mecanismos especiales de movilidad como las tijeras elevadoras [8], o sistemas tipo Roker-bogie [7] que permiten lidiar con este tipo de terrenos complejos, sorteando los obstáculos y distribuyendo su peso de mejor manera sobre el suelo. Dependiendo de la aplicación final, el actuador posee implementaciones particulares. para llevar a cabo las inspecciones, sólo se necesita la presencia remota del vehículo en zonas que difícilmente son alcanzables por los seres humanos ya sea por espacio, salud o seguridad [10], [6], [16]. Para el caso de la limpieza, las variaciones dependen de que se requiera la recolección de los desperdicios [7], [15] o simplemente apartarlos, debido a su reducido peso y tamaño [11], [12], [13], [14]. Finalmente, en el caso de la agricultura [8], es importante la dosificación de elementos como agua o fertilizantes y su ubicación relativa en el terreno.

Los sistemas y aplicaciones descritos en la Tabla 1.1 deben estar equipados con sensores para poder interactuar con el medio ambiente. Se puede observar que los sensores más usados son las cámaras RGB, los GPS, las IMU y los Lidar. Con sensores como estos se brinda una información completa del entorno, que puede ser usada con fines diversos como localización del vehículo, construcción de un mapa del ambiente, planificación de trayectorias, evasión de obstáculos y, en general, proveer la autonomía necesaria del vehículo.

Se exponen algunos los artículos y avances científicos relevantes relacionados con la limpieza robótica automatizada publicados en los últimos 4 años.

1.3.1. Diseño e implementación de un robot succionador de limpieza de bajo costo [17]

Esta investigación aborda el desarrollo de un robot aspirador de bajo costo y alto rendimiento que puede ser controlado a través de smartphones. Comienza discutiendo la prevalencia de las aspiradoras robotizadas en la vida diaria, señalando que su alto costo las hace inaccesibles para muchos. El objetivo del estudio es hacer que estos robots sean más accesibles y funcionales. Se detalla el diseño y la producción del robot, que se divide en tres partes principales: diseño mecánico, eléctrico y de software. En el diseño mecánico, se describe el chasis del robot y el sistema de limpieza diseñados y construidos. En el diseño eléctrico, se explican los componentes seleccionados como baterías, motores, controladores, sensores y microcontroladores, así como el diseño del sistema de alimentación. En cuanto al diseño de software, se detalla la creación de una aplicación Android para el control remoto del robot, así como algoritmos autónomos como caminata aleatoria y algoritmos serpiente para la navegación del robot. Se destaca la capacidad del robot para moverse alrededor de obstáculos, aspirar polvo del suelo y realizar navegación básica de manera autónoma, además de ser controlable manualmente. La conexión Bluetooth entre la Raspberry Pi y el teléfono inteligente Android permite el control remoto del robot, mejorando así su funcionalidad y accesibilidad para los usuarios. Este trabajo es relevante para nuestra investigación porque presenta una alternativa de limpieza mediante aspiración y un enfoque para el diseño de un sistema autónomo de recolección de residuos, además de describir el diseño de un actuador electromecánico.

1.3.2. Desarrollo de un robot soplador de hojas [9]

El artículo se centra en el desarrollo de un robot barrido de hojas diseñado para reemplazar las sopladoras de hojas, que son conocidas por su ruido alto y molesto en entornos urbanos. Utilizando un controlador compuesto por un Arduino MEGA 2560 y un módulo inalámbrico ESP-12E, el robot fue diseñado para barrer hojas mediante un soplador, un conducto de aire y un mecanismo de barrido.

En el artículo analizado se destaca la adecuada integración de microcontroladores, sistemas de potencia y la correcta conexión de actuadores electromecánicos, lo cual permite la conformación de un sistema de limpieza eficiente y apropiado para la aplicación específica.

1.3.3. Diseño de un robot autónomo de recolección de basura para exteriores con YOLOv4-Tiny [18]

El robot emplea un actuador electromecánico tipo flap-bucket, accionado mediante motores DC engranados, motores paso a paso y actuadores lineales, que permite el barrido y recolección simultánea de múltiples residuos sin necesidad de un manipulador serial. Este sistema, integrado a una plataforma rocker-bogie de seis ruedas, garantiza operación estable en terrenos irregulares. La detección de residuos se realiza mediante visión por computador basada en YOLOv4-tiny, seleccionada por su baja latencia y alto mAP, lo que posibilita detección en tiempo real y guiado autónomo del robot hacia los objetos detectados.

De este artículo se destaca el uso de un actuador electromecánico de movimiento oscilatorio de barrido llamado flap-bucket, el cual recolecta múltiples residuos. Tiene un sistema de depósito fácil de diseñar, pero necesita la ayuda manual para descargarlo.

1.3.4. Aspiradora de hojas de bajo presupuesto y alta potencia [19]

El artículo presenta el diseño y desarrollo de una máquina barredora–aspiradora de hojas de bajo costo y alta potencia, cuyo elemento central es el uso de un actuador electromecánico tipo motor DC shunt, seleccionado por su capacidad de mantener velocidad prácticamente constante, condición crítica para garantizar un flujo de aire estable a través del sistema de succión, cámaras y conductos. Este motor acciona directamente un impulsor (impeller) de aluminio que cumple una doble función: generar la depresión necesaria para la aspiración y triturar las hojas con una relación de reducción de 10:1, integrando así funciones de succión y mulching en un solo conjunto. Tiene un consumo de potencia de 2000 a 2600 W.

1.3.5. Diseño e implementación de un novedoso robot de limpieza vial para exteriores [20]

El artículo presenta el diseño e implementación de un robot móvil autónomo para limpieza de vías exteriores, destacando un sistema de accionamiento electromecánico basado en motores DC: un motor DC de 20 W acciona el mecanismo de tracción por orugas, elegido para garantizar adherencia y capacidad de avance en terrenos irregulares, mientras que otro motor DC dedicado impulsa el mecanismo de limpieza, compuesto por un rodillo principal motorizado de 17 cm con cepillos de doble material y dos cepillos secundarios, optimizado para remover suciedad persistente en exteriores. El diseño integra una arquitectura mecatrónica distribuida, donde un DSP con control PID gobierna los actuadores y una PC ejecuta visión y planeación.

1.3.6. Un robot soplador de hojas inteligente basado en un modelo de aprendizaje profundo [21]

Este artículo describe el diseño e implementación de un robot autónomo soplador de hojas que integra percepción basada en aprendizaje profundo con un sistema electromecánico de bajo consumo, destacando el uso de actuadores eléctricos DC de 12 V como elemento central: dos motores DC controlados por PWM accionan las ruedas motrices delanteras para la locomoción diferencial, permitiendo regular velocidad y dirección según la densidad de hojas detectadas, mientras que un actuador electromecánico independiente gobierna el sistema de limpieza.

1.3.7. Diseño de ventilador de motor para la ingestión de grandes residuos [22]

Esta patente describe un diseño electromecánico de un conjunto motor–ventilador centrífugo para aspiradoras, enfocado específicamente en la ingestión eficiente de residuos de gran tamaño sin atascos, donde el actuador electromecánico principal es un motor eléctrico rotativo de alta velocidad acoplado directamente a un ventilador centrífugo mediante un eje con tuerca empotrada en el cubo del ventilador, reduciendo turbulencia y puntos de atrapamiento de desechos.

1.3.8. Robot de limpieza de pisos automático usando arduino y sensores ultrasónicos [23]

En este artículo se implementa el uso de un microprocesador Arduino y sensores de ultra sonido para realizar procesos de limpieza y recolección de residuos. Los sensores son primordiales para la

evasión de obstáculos, garantizando un proceso ininterrumpido. aquí también se evidencia el uso de servomotores y motores DC. Los resultados muestran un diseño adecuado para el desarrollo de este sistema automatizado de limpieza. aquí se muestra una interesante implementación de sensores y muestra un camino para el diseño del sistema de limpieza usando Arduino.

Del artículo analizado se destaca la implementación de sensores, los cuales resultan fundamentales para garantizar el funcionamiento automático del sistema. Asimismo, se integra el uso de una plataforma de control basada en Arduino, acoplada a un sistema de potencia encargado de suministrar energía a cuatro motores. La totalidad del sistema se encuentra montada sobre una plataforma móvil, diseñada para proporcionar soporte estructural, así como protección y preservación de la integridad de los distintos componentes que lo conforman.

1.3.9. Robot recolector de hojas totalmente automatizado con empaquetador [24]

En la patente se muestran varios rodillos secuenciales (cepillos, rodillos de transferencia y rodillo colector), guían y canalizan el flujo de hojas desde el suelo hacia el sistema de transporte interno, donde un ventilador genera el vacío necesario para ayudar a mover el material y separarlo de partículas gruesas; posteriormente las hojas se conducen al módulo hidráulico que las comprime y empaqueta en bloques de alta densidad para facilitar su manejo y transporte. Se concluye que el empleo de distintos tipos de rodillos constituye una solución de uso común en este tipo de aplicaciones. Además, en la patente analizada se observa la incorporación de múltiples etapas de redireccionamiento del flujo, lo cual permite un mayor control sobre la separación del material durante el proceso.

1.4. Justificación

La importancia de esta investigación radica en la necesidad de encontrar soluciones efectivas y eficientes para la limpieza de techos planos de concreto. La creación de un sistema autónomo dedicado a esta tarea no solo reducirá los costos asociados para los administradores, sino que también mitigará los riesgos para los operarios y mantendrá la integridad estructural de los edificios. Por otro lado, la obstrucción de los sistemas de disipación térmica implica ineficiencias en su funcionamiento aumentando el consumo eléctrico y los costos asociados a estos. Este estudio, también, podría tener un impacto significativo en el campo de la robótica autónoma, al abordar un problema específico que ha sido pasado por alto en investigaciones anteriores. La colaboración entre la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica y la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle respalda el potencial innovador de este proyecto, el cual se desarrollará en un período de 8 meses, garantizando así la ejecución eficaz y oportuna de todas las actividades planteadas en el cronograma

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Desarrollar un actuador electromecánico para un sistema autónomo de limpieza de techos, que posibilite la recolección, almacenamiento y disposición de residuos, considerando las características

comunes de las terrazas de los edificios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle.

1.5.2. Objetivo específico

- 1. Evaluar y elegir el tipo de actuador más apropiado considerando las condiciones y características habituales en las terrazas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle.*
- 2. Elaborar un diseño detallado del actuador seleccionado, integrando aspectos geométricos y operativos específicos de las terrazas.*
- 3. Construir un prototipo funcional del actuador, implementando un protocolo de comunicación que posibilite, como mínimo, la ejecución de las instrucciones críticas de recolección, vaciado y autodiagnóstico.*

1.6. Metodología

El proyecto se desarrolló mediante una metodología de diseño mecatrónico estructurada basada en el libro [25], la cual plantea un proceso de diseño organizado e iterativo que integra sistemas mecánicos, electrónicos y de control hasta obtener un prototipo funcional validado experimentalmente. Esta metodología permite abordar el desarrollo del actuador de manera progresiva, desde la identificación de la necesidad hasta la verificación del funcionamiento del sistema.

- 1. Identificación de la necesidad y análisis del problema:** se definieron las condiciones de operación, el entorno de trabajo y los requerimientos técnicos del sistema. En el flujograma esto se refleja en la inspección del entorno, la revisión bibliográfica y la definición de los requerimientos del problema.
- 2. Generación y selección de soluciones:** se evaluaron alternativas tecnológicas y se seleccionó el actuador electromecánico más adecuado según criterios técnicos y operativos. Esta etapa se evidencia en la selección del actuador y en la documentación de dicha elección.
- 3. Diseño detallado del sistema:** se desarrollaron cálculos, modelado y selección de componentes necesarios para el funcionamiento del actuador. En el flujograma corresponde al diseño técnico del actuador, el diseño detallado y la definición de componentes mecánicos y electrónicos.
- 4. Construcción e integración:** se fabricó la estructura del sistema y se integraron los subsistemas mecánicos, electrónicos y de control. Esta fase incluye la fabricación, el desarrollo del protocolo de comunicación y la integración del sistema.
- 5. Pruebas y validación:** se realizaron pruebas de funcionamiento del prototipo para verificar el cumplimiento de los requerimientos. En caso de fallas, el proceso retorna a la etapa de diseño para realizar mejoras, manteniendo el carácter iterativo de la metodología.

Con el fin de estructurar de manera ordenada el desarrollo del proyecto y facilitar la comprensión de la relación entre los objetivos específicos, las actividades planteadas y los entregables asociados, la figura 1.8 se presenta un flujograma metodológico. Este diagrama permite visualizar de forma

secuencial y lógica las etapas que conforman el proceso de diseño, construcción y validación del actuador electromecánico.

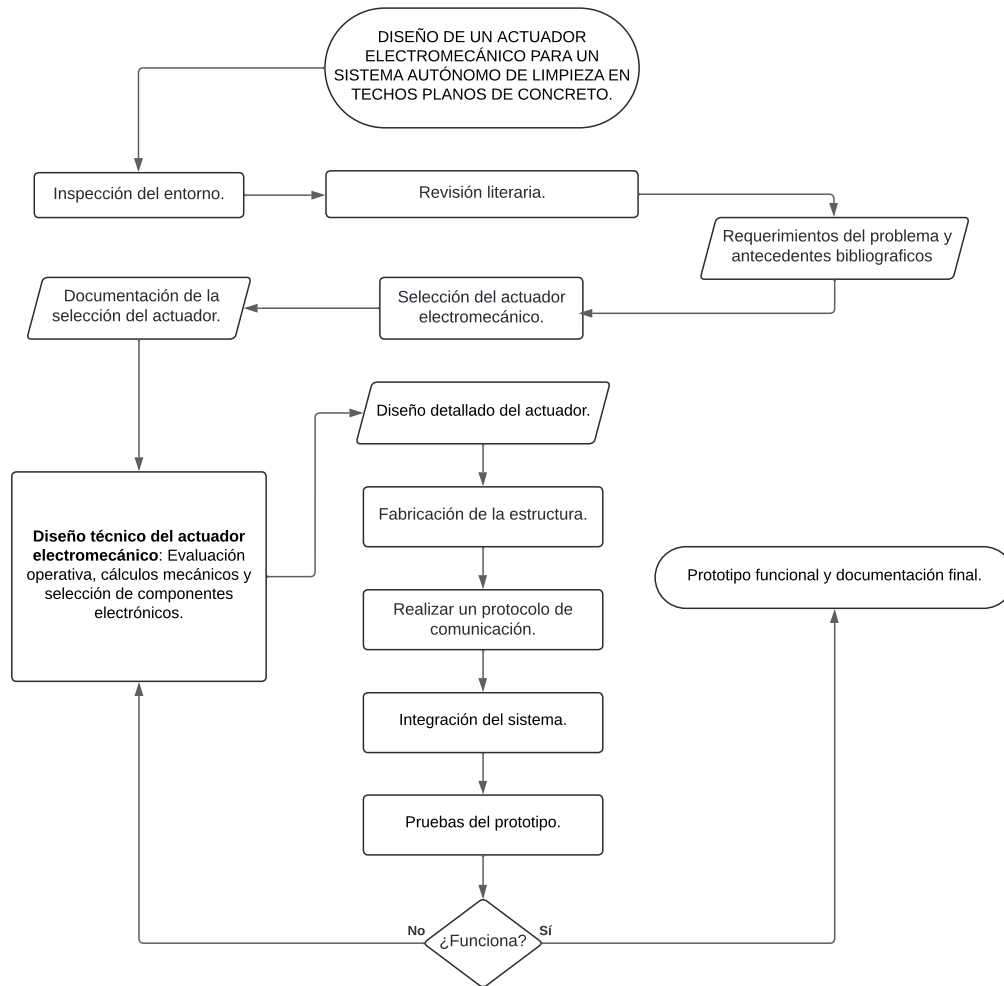


Figura 1.8: Flujograma metodológico del desarrollo del proyecto. Propia autoría.

El flujograma representa un proceso de diseño mecatrónico completo que inicia con el análisis del problema y la definición de requerimientos, continúa con la selección y el diseño del actuador, y avanza hacia la fabricación e integración del sistema. Posteriormente se realizan pruebas de funcionamiento que permiten validar el prototipo o retornar a etapas de diseño para su optimización. Finalmente, se obtiene un prototipo funcional acompañado de su documentación técnica final, garantizando la coherencia y viabilidad del sistema desarrollado.

2. Marco teórico

En esta sección se presentan los fundamentos teóricos y conceptuales mínimos que permiten el desarrollo del actuador mecánico.

2.1. Cinemática plana de un cuerpo rígido

La descripción del movimiento de los cuerpos rígidos es útil por muchos motivos importantes, uno de ellos es debido a que frecuentemente es necesario transmitir o gobernar ciertos movimientos empleando levas o transiciones de diversos tipos.

2.1.1. Movimiento relativo: ejes en traslación

Se considera dos puntos fijos en un cuerpo rígido en un mismo plano de movimiento, por lo que la distancia permanecerá constante. En consecuencia, el movimiento de un punto observado desde un sistema de coordenadas de traslación solidario al otro, aparecería como circular, como se muestra en la figura 2.1.

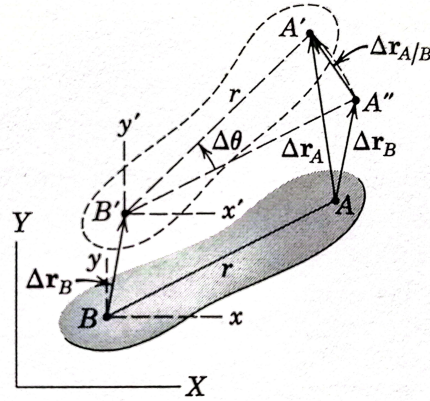


Figura 2.1: Movimiento de un cuerpo rígido. Tomado de [26].

De la figura, las siguientes relaciones son importantes:

$$\Delta \mathbf{r}_A = \Delta \mathbf{r}_B + \Delta \mathbf{r}_{A/B}, \quad (2.1)$$

si dividimos la ecuación 2.1 por Δt :

$$\mathbf{v}_A = \mathbf{v}_B + \mathbf{v}_{A/B}, \quad (2.2)$$

$$\mathbf{a}_A = \mathbf{a}_B + \mathbf{a}_{A/B}. \quad (2.3)$$

Las componentes se pueden observar en la figura 2.2 donde vemos, también, la suma vectorial de las velocidades y las aceleraciones. Recordar que: $\mathbf{v}_{A/B} = \omega \times \mathbf{r}$, entendiéndose que ω es la velocidad angular absoluta de AB. El término de la aceleración relativa es:

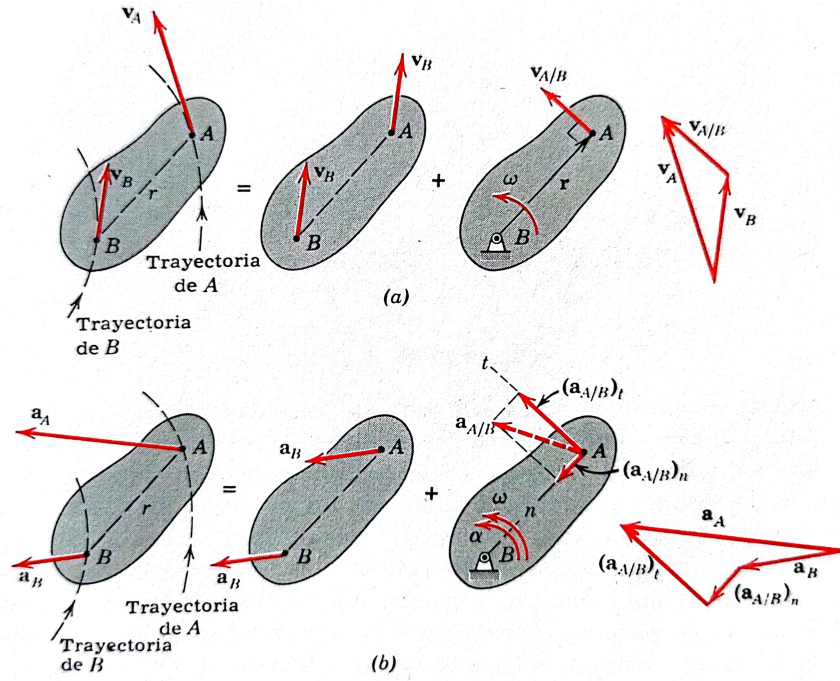


Figura 2.2: Componentes de la velocidad y aceleración de un cuerpo rígido en rotación. Tomado de [26].

$$\mathbf{a}_{A/B} = (\mathbf{a}_{A/B})_n + (\mathbf{a}_{A/B})_t, \quad (2.4)$$

Donde los vectores componentes son:

$$(\mathbf{a}_{A/B})_n = \omega \times (\omega \times \mathbf{r}), \quad (2.5)$$

$$(\mathbf{a}_{A/B})_t = \alpha \times \mathbf{r}, \quad (2.6)$$

siendo α la aceleración angular. Finalmente las ecuaciones 2.2 y 2.3 se pueden escribir como:

$$\mathbf{v}_A = \mathbf{v}_B + \omega \times \mathbf{r}, \quad (2.7)$$

$$\mathbf{a}_A = \mathbf{a}_B + \omega \times (\omega \times \mathbf{r}) + \alpha \times \mathbf{r}. \quad (2.8)$$

2.2. Cinética plana de los cuerpos rígidos

En esta sección se trata de las relaciones existentes entre las fuerzas que sobre ellos ejercen agentes exteriores y los movimientos de traslación y rotación de dichos cuerpos.

2.2.1. Fuerza, masa y aceleración

Es de conveniencia tener un plano coordenado con el fin de determinar la posición de cada punto del cuerpo. Por lo tanto, el movimiento plano exige para su descripción tres ecuaciones escalares independientes. Consideremos el cuerpo rígido representado en la figura 2.3 se le aplican fuerzas externas, la aceleración del centro de masa está representado por el vector $\bar{a}$. Un punto material del cuerpo tiene masa m_i y componentes de la aceleración iguales a $\bar{a}$ más los términos

relativos $\rho_i\omega^2$ y $\rho_i\alpha$, donde se toma el centro de masa G como punto de referencia. La suma de los momentos de estas componentes de fuerzas respecto a G en el sentido de α es:

$$\bar{M}_i = m_i\bar{a}\rho_i \cos \beta + m_i\rho_i^2\alpha. \quad (2.9)$$

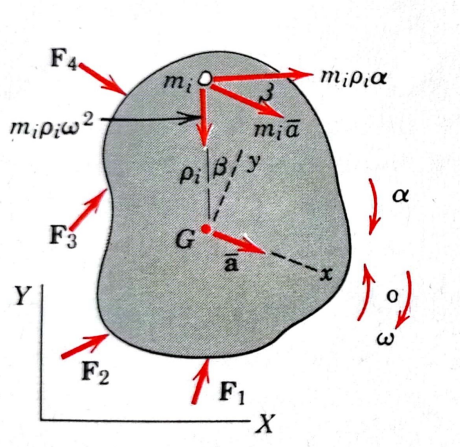


Figura 2.3: Diagrama de cuerpo libre para un cuerpo sometido a fuerzas. Tomado de [26].

Al hacer una sumatoria de cada masa i -ésima, y recordando que $\bar{I} = \sum m_i\rho_i^2$ obtenemos la siguiente relación, junto con las leyes de newton, las cuales son importantes para este estudio:

$$\sum \bar{M}_G = \bar{I}\alpha, \quad (2.10)$$

$$\sum F_x = m\bar{a}_x, \quad (2.11)$$

$$\sum F_y = m\bar{a}_y. \quad (2.12)$$

2.3. Mecanismo de tijera

En esta sección se expondrán los conceptos teóricos relacionados con un mecanismo de elevación de tipo tijera. Un sistema de tijera de elevación, en escénica, consta de tres eslabones; dos de ellos efectúan un movimiento angular relativo entre ellos, y un tercero que sirve de plataforma de elevación. Es de conocimiento que existen mecanismos de tijera con más eslabones, pero se basan en un mismo principio.

La figura 2.4 presenta el esquema del mecanismo, en su posición inicial y su posición final, definida por la ubicación de sus eslabones en un plano coordenado x, y . Los eslabones L_1 y L_2 tienen la misma longitud.

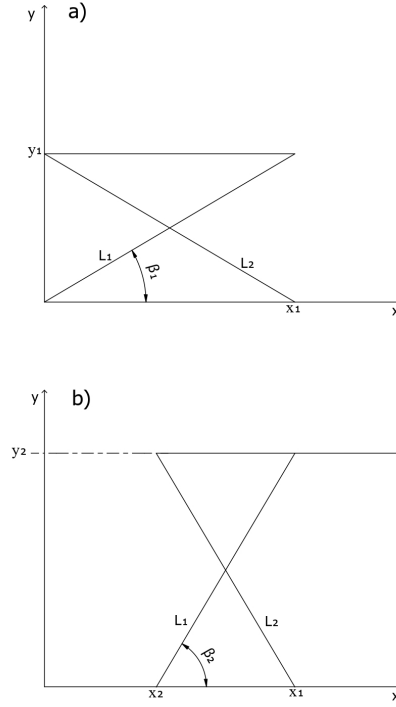


Figura 2.4: Esquema del mecanismo de tijera. a): posición inicial, b): posición final.

Observe que el saliente de la posición final del mecanismo (ver figura 2.4 b), debe ser igual al desplazamiento de x_2 . La ecuación que relaciona el desplazamiento x_2 con la altura y_1 y y_2 , se basan en relaciones trigonométricas: Como se mencionó $L_1 = L_2 = L$. Para la posición inicial:

$$L^2 = x_1^2 + y_1^2, \quad \text{sen } \beta_1 = \frac{y_1}{L}, \quad \cos \beta_1 = \frac{x_1}{L}. \quad (2.13)$$

Para la posición final:

$$L^2 = (x_1 - x_2)^2 + y_2^2, \quad \text{sen } \beta_2 = \frac{y_2}{L}, \quad \cos \beta_2 = \frac{x_1 - x_2}{L}. \quad (2.14)$$

Igualando L y despejando para x_2 (desplazamiento):

$$x_2 = \frac{y_1}{\tan(\arcsin(\frac{y_1}{L}))} - \frac{y_2}{\tan(\arcsin(\frac{y_2}{L}))}. \quad (2.15)$$

la ecuación 2.15 relaciona la longitud de los eslabones, la altura inicial y final con el desplazamiento.

2.4. Sensores

El término sensor se refiere a un elemento que produce una señal relacionada con la cantidad que se está midiendo y se define como el elemento que al someterlo a un cambio físico experimenta un cambio relacionado. Los siguientes términos se emplean para definir el funcionamiento de los sensores y, con frecuencia, el de los sistemas de medición como un todo.

- **Intervalo y extensión:** el intervalo de un sensor define los límites entre los cuales puede variar la entrada. La extensión es el valor máximo de la entrada menos el valor mínimo. Por ejemplo, una celda de carga utilizada para medir fuerzas, podría tener un intervalo de 0 a 50 kN y una extensión de 50 kN .
- **Error:** el error es la diferencia entre el resultado de una medición y el valor verdadero de la cantidad que se mide: $error = valormedido - valorreal$
- **Exactitud:** la exactitud es el grado hasta el cual un valor producido por un sistema de medición podría estar equivocado. Es, por lo tanto, igual a la suma de todos los errores posibles más el error en la exactitud de la calibración del sensor.
- **Sensibilidad:** la sensibilidad es la relación que indica cuánta salida se obtiene por unidad de entrada, es decir, salida/entrada.
- **Error por histéresis:** los sensores pueden producir distintas salidas de la misma cantidad medida según si el valor se obtuvo mediante un cambio por incremento continuo o por decremento continuo. Este efecto se conoce como histéresis. La Figura 2.5 muestra una salida de este tipo, donde el error por histéresis es la diferencia máxima en la salida obtenida a partir de valores de incremento y decremento.

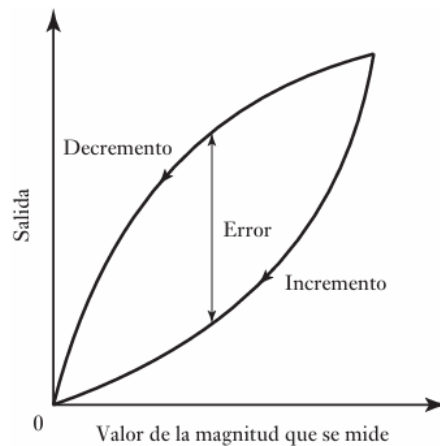


Figura 2.5: Histéresis. Tomado de [25].

- **Error por no linealidad:** para muchos sensores se supone que en su intervalo de funcionamiento la relación entre la entrada y la salida es lineal, es decir, la gráfica de la salida contra la entrada produce una línea recta. Sin embargo, son pocos los sensores en los que la relación anterior es realmente una línea recta; por ello, al suponer la existencia de esta linealidad se producen errores. Este error se define como la desviación máxima respecto a la línea recta.
- **repetibilidad:** los términos repetibilidad y reproducibilidad se utilizan para describir la capacidad del sensor para producir la misma salida después de aplicar varias veces el mismo valor de entrada. El error que resulta al no obtener la misma salida después de aplicar el valor de entrada se expresa como un porcentaje del intervalo total de salida:

$$repetibilidad = \frac{val.max - val.min}{intervalototal} * 100. \quad (2.16)$$

- **Estabilidad:** la estabilidad de un sensor es su capacidad para producir la misma salida cuando se usa para medir una entrada constante en un periodo.
- **Banda/tiempo muerto:** la banda muerta o espacio muerto de un sensor es el intervalo de valores de entrada para los cuales no hay salida.
- **Resolución:** cuando la entrada varía continuamente en todo el intervalo, las señales de salida de algunos sensores pueden cambiar en pequeños escalones.
- **impedancia de salida:** cuando un sensor que produce una salida eléctrica se enlaza o conecta con un circuito electrónico, es necesario conocer la impedancia de salida ya que ésta se va a conectar en serie o en paralelo con dicho circuito.

2.4.1. Características estáticas y dinámicas

Las características estáticas son los valores obtenidos cuando se presentan condiciones de estado estable, es decir, valores obtenidos una vez que el sensor se asienta después de recibir cierta entrada. Las características dinámicas se refieren al comportamiento entre el momento en que cambia el valor de entrada y el tiempo en que el valor dado por el sensor logra su valor de estado estable. Las características dinámicas se expresan en función de la respuesta del sensor a entradas con determinadas formas.

- **Tiempo de respuesta:** es el tiempo que transcurre después de aplicar una entrada constante, una entrada escalón, hasta que el sensor produce una salida correspondiente a un porcentaje especificado, como 95 % del valor de la entrada. Esto se muestra en la figura 2.6.

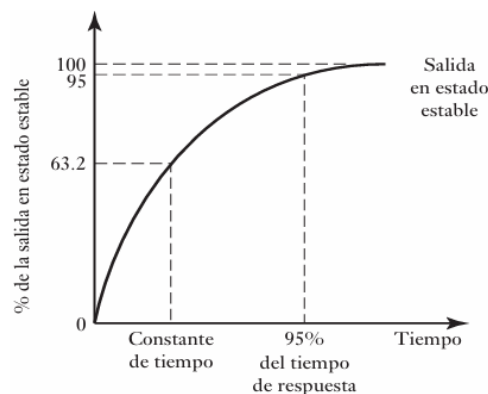


Figura 2.6: Respuesta a una entrada tipo escalón. Tomado de [25].

- **Constante del tiempo:** es una medida de la inercia del sensor y de qué tan pronto reaccionará a los cambios en su entrada; cuanto mayor sea la constante de tiempo más lenta será su reacción ante una señal de entrada variable.
- **Tiempo de levantamiento:** es el tiempo que requiere la salida para llegar a un porcentaje especificado de la salida en estado estable.
- **Tiempo de asentamiento:** es el tiempo que tarda la salida en alcanzar un porcentaje de un valor determinado, por ejemplo, 2 % del valor en estado estable.

2.4.2. Selección de sensores

Al seleccionar un sensor para una aplicación específica deben considerarse varios factores:

1. El tipo de medición que se requiere, por ejemplo, la variable que se va a medir, su valor nominal, el intervalo de valores, la exactitud, velocidad de medición y confiabilidad requeridas, las condiciones ambientales en las que se realizará la medición.
2. El tipo de salida que se requiere del sensor, lo cual determinará las necesidades de acondicionamiento de la señal a fin de contar con señales de salida idóneas a partir de la medición.
3. Se pueden identificar algunos sensores posibles, teniendo en cuenta intervalo, exactitud, linealidad, velocidad de respuesta, confiabilidad, facilidad de mantenimiento, duración, requerimientos de alimentación eléctrica, solidez, disponibilidad y costo.

2.4.3. Elemento con galga extensométrica

La galga extensométrica o extensómetro de resistencia eléctrica, como la que se muestra en la figura 2.7, es un alambre metálico, una cinta de papel metálico o una tira de material semiconductor en forma de oblea que se adhiere a la superficie como si fuese un timbre postal. Cuando se somete a un esfuerzo, la resistencia R cambia, y el cambio de resistencia $\Delta R/R$ es proporcional al esfuerzo ϵ , es decir:

$$\frac{\Delta R}{R} = \epsilon. \quad (2.17)$$

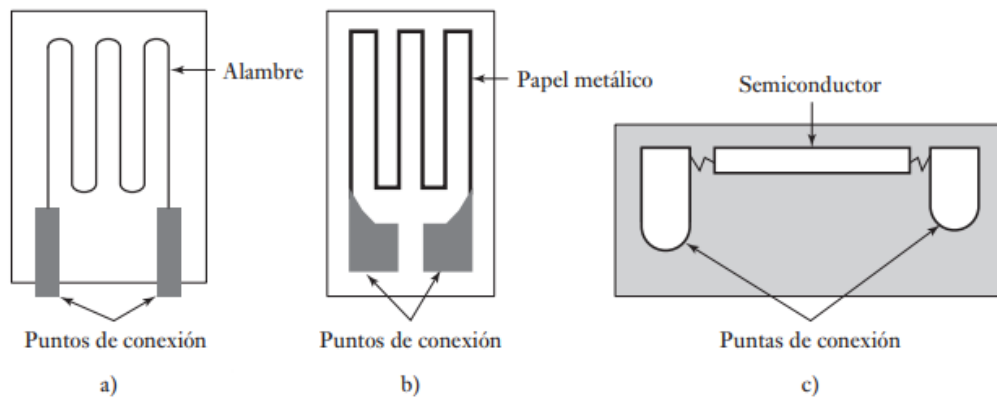


Figura 2.7: galgas extensométricas o extensómetros: a) de alambre metálico, b) de hoja de papel metálico, c) semiconductor. Tomado de [25].

2.4.4. Interruptores de proximidad

Los dispositivos fotosensibles, como los que se muestran en la figura 2.8, se usan para detectar la presencia de un objeto opaco al interponerse éste entre el haz luminoso o radiación infrarroja y el dispositivo, o al detectar la luz que refleja el objeto.

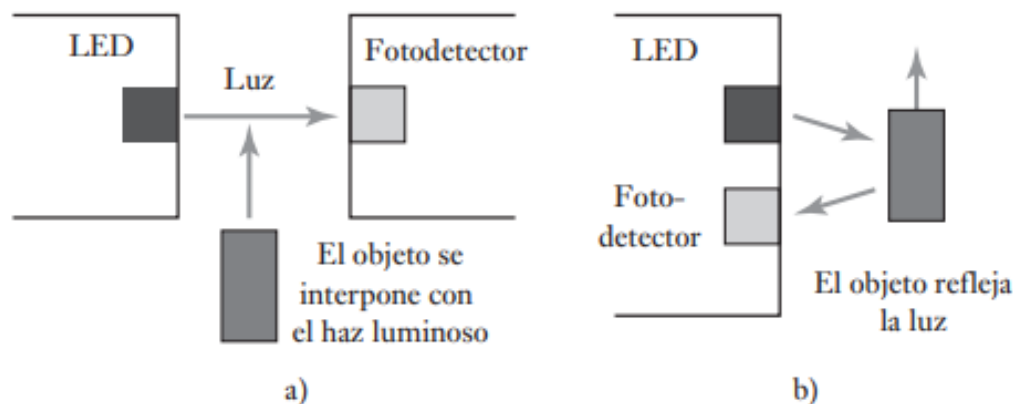


Figura 2.8: Empleo de sensores fotoeléctricos para detectar objetos, a) el objeto se interpone con el haz luminoso y b) el objeto refleja la luz. Tomado de [25].

2.5. Señales analógicas y digitales

La salida de la mayoría de los sensores tiende a tener una forma analógica, el tamaño de la salida se relaciona con el tamaño de la entrada. Donde un microprocesador se usa como parte de la medición o sistema de control, la salida analógica del sensor tiene que convertirse en una forma digital antes de que ésta se use como entrada para el microprocesador. Asimismo, la mayoría de los actuadores operan con entradas analógicas y de esta forma la salida digital desde un microprocesador se deberá convertir en una forma analógica antes de que ésta se utilice como una entrada por el actuador. Para la lectura de diferentes señales analógicas enviadas desde un sensor, son necesarios componentes como módulos de señal y microprocesadores, los cuales modifican la señal analógica a digital y son almacenadas para su lectura, respectivamente

2.6. Protocolo I^2C

El protocolo de comunicación I^2C (Inter-Integrated Circuit) es un estándar ampliamente utilizado en sistemas electrónicos, particularmente en aplicaciones de microcontroladores y sistemas embebidos. El protocolo I^2C utiliza únicamente dos líneas para la transferencia de datos entre los elementos que se acoplan al bus. Una de dichas líneas se dedica a soportar los datos, es bidireccional y se llama SDA; la otra lleva los impulsos de reloj para la sincronización, es unidireccional y recibe el nombre de SCL. Los impulsos de reloj siempre los genera el Maestro y tienen la función de sincronizar las transferencias con todos los esclavos colgados a las dos líneas. La figura 2.9 muestra el esquema de conexión de este protocolo de comunicación.

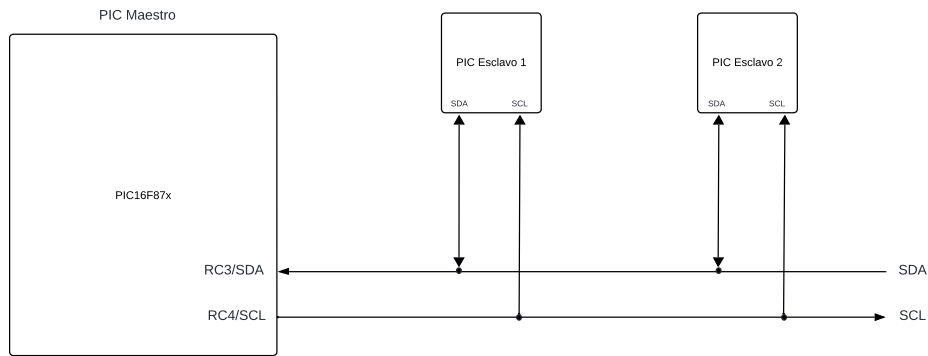


Figura 2.9: Conexión entre maestro y esclavos en el bus I^2C con solo dos líneas. Por SDA circulan los datos en serie y por SCL el maestro envía los impulsos de reloj que genera. Tomado de [27].

2.6.1. Estructura de la comunicación

El protocolo I^2C funciona bajo un esquema maestro-esclavo, donde el dispositivo maestro controla las comunicaciones, iniciando todas las transmisiones y especificando las operaciones a realizar. Cada dispositivo esclavo tiene una dirección única de 7 bits (aunque también puede emplearse una versión de 10 bits), lo que permite que el maestro se comunique de manera individual con cada uno.

El proceso de transmisión comienza con una condición de inicio (start condition) generada por el maestro, seguida de la dirección del esclavo y un bit que indica si se realizará una lectura o escritura. Una vez establecido el canal de comunicación, los datos son transmitidos o recibidos según lo indicado. Finalmente, la comunicación se cierra con una condición de parada (stop condition), también controlada por el maestro.

2.6.2. Ventajas del I^2C

El protocolo I^2C presenta varias ventajas, entre las cuales destacan:

- Simplicidad de Conexión: solo requiere dos líneas para la comunicación, lo que simplifica el cableado y hace que sea ideal para dispositivos con limitaciones de espacio.
- Multiplexación: permite conectar múltiples dispositivos esclavos en un solo bus, facilitando la integración de varios sensores, actuadores y periféricos con un único controlador maestro.
- Velocidad Configurable: funciona en diferentes modos de velocidad, adaptándose a los requerimientos de cada aplicación.

2.6.3. Limitaciones del I^2C

A pesar de sus numerosas ventajas, el protocolo I^2C también tiene algunas limitaciones que deben ser consideradas en su implementación:

- *Distancia limitada:* la longitud máxima de las líneas SDA y SCL en un bus I^2C depende de la capacitancia total del cableado y los dispositivos conectados. En aplicaciones estándar, la distancia se limita generalmente a entre 1 y 3 metros, aunque con resistencias de pull-up adecuadas y una tasa de transmisión más baja, puede alcanzar distancias de hasta 20 metros. A mayores distancias, la señal puede degradarse y generar errores de comunicación.
- *Velocidad limitada:* aunque el I^2C puede operar a velocidades de hasta 3.4 Mbps en modo de alta velocidad, otros protocolos como SPI (Serial Peripheral Interface) ofrecen mayores velocidades de transmisión, lo que lo hace menos adecuado para aplicaciones que requieren transferencias rápidas de grandes volúmenes de datos.

2.6.4. Aplicaciones comunes del I^2C

I^2C es ampliamente utilizado en sistemas embebidos y microcontroladores para la interconexión de periféricos como:

- Sensores (acelerómetros, giroscopios, etc.).
- Memorias EEPROM.
- Pantallas LCD.
- Convertidores analógico-digitales (ADC).

Gracias a su simplicidad y eficiencia, el protocolo es ideal para aplicaciones que requieren comunicación entre dispositivos a corto alcance y sin necesidad de velocidades extremadamente altas.

2.7. Flujo sin fricción: ecuación de Bernoulli

En la Figura 2.10 se representa un volumen de control que coincide con un tubo de corriente infinitesimal de área variable $A(s)$ y longitud ds , donde s representa la dirección de la línea de corriente. Las propiedades (ρ, V, p) pueden variar con s y con el tiempo pero se consideran uniformes sobre la sección transversal A , que consideraremos suficientemente pequeña. El tubo de corriente está inclinado un ángulo arbitrario θ , de forma que la variación de altura entre las secciones es $dz = ds \sin(\theta)$. Observe que en el límite cuando $dA \rightarrow 0$, el tubo de corriente coincide con la línea de corriente. Usualmente se dice que la ecuación de Bernoulli se aplica a lo largo de una línea de corriente en un flujo no viscoso.

La conservación de masa, para este volumen de control infinitesimal queda:

$$\frac{d}{dt} \left(\int_{V_c} \rho d^3v \right) + \dot{m}_{sal} - \dot{m}_{in} = 0 \approx \frac{\partial \rho}{\partial t} d^3V + d\dot{m}, \quad (2.18)$$

donde $\dot{m} = \rho AV$ y $dV \approx A ds$. Así, la forma deseada de la conservación de la masa es:

$$d\dot{m} = d(\rho AV) = -\frac{d\rho}{dt} A ds. \quad (2.19)$$

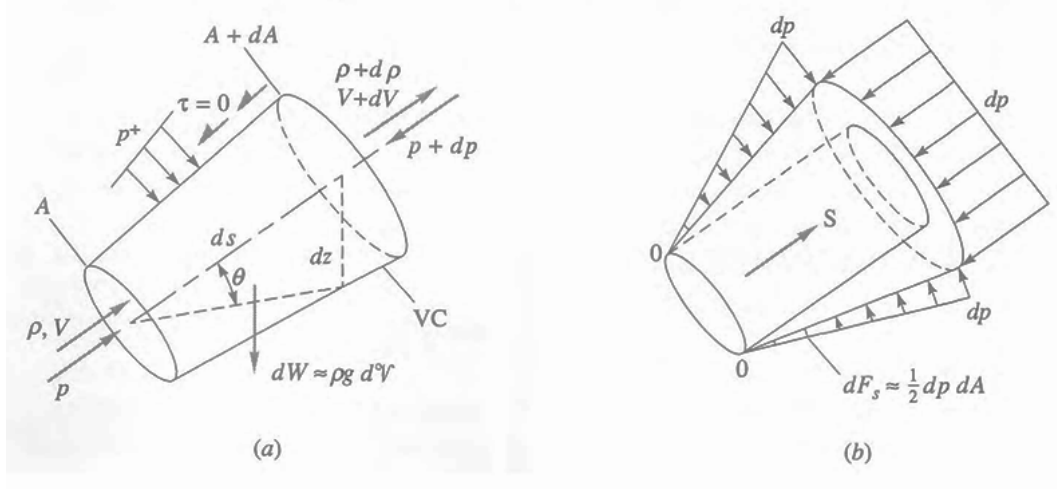


Figura 2.10: Ecuación de Bernoulli para flujos sin fricción a lo largo de una línea de corriente: (a) fuerzas y flujos; (b) resultante de las fuerzas de presión después de restar una presión p uniforme. Tomado de [28].

Si escribimos ahora la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento en la dirección de la corriente:

$$\sum dF_s = \frac{d}{dt} \left(\int_{V_c} V \rho d^3V \right) + (\dot{m}V)_{sal} - (\dot{m}V)_{in} \approx \frac{\partial}{\partial t} (\rho V) A ds + d(\dot{m}V), \quad (2.20)$$

donde $V_s = V$ idénticamente porque ses en la dirección de las líneas de corriente. Si despreciamos los esfuerzos tangenciales en las paredes (flujo sin fricción), los términos de fuerza se deben sólo a la presión y la gravedad. La fuerza de gravedad en la dirección de la corriente es la componente del peso del fluido contenido en el volumen de control:

$$dF_{s,grav} = -dW \sin \theta = -\gamma A ds \sin \theta = -\gamma A dz. \quad (2.21)$$

La fuerza resultante de la presión sobre las paredes cónicas del tubo de corriente tiene una componente en la dirección de la corriente que es idéntica a la que se obtendría si la presión actuase no sobre el área A , sino sobre la corona circular dA , que representa el aumento de área. La fuerza resultante de presión es, por tanto:

$$dF_{s,pres} = \frac{1}{2} dp dA - dp(A + dA) \approx -A dp, \quad (2.22)$$

sustituyendo estos dos términos de la fuerza en la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento:

$$\sum dF_s = -\gamma A dz - A dp = \frac{\partial}{\partial t} (\rho V) A ds + d(\dot{m}V) = \frac{\partial \rho}{\partial t} V A ds + \frac{\partial V}{\partial t} \rho A ds + \dot{m} dV + V d\dot{m}, \quad (2.23)$$

el primero y último términos del lado derecho se cancelan como consecuencia de la ecuación de la continuidad [Ecuación (2.19)]. Dividiendo el resto por ρA y reordenando, se obtiene la ecuación final:

$$\frac{\partial V}{\partial t} ds + \frac{dp}{\rho} + V dV + g dz = 0, \quad (2.24)$$

esta expresión es la ecuación de Bernoulli para flujo no estacionario sin fricción a lo largo de una línea de corriente. Es una ecuación diferencial que puede ser integrada entre dos puntos 1 y 2 a lo largo de la línea de corriente:

$$\int_1^2 \frac{\partial V}{\partial t} ds + \int_1^2 \frac{dp}{\rho} + \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) + g(z_2 - z_1). \quad (2.25)$$

Para el caso de flujo estacionario e incompresible la ecuación (2.25) queda:

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) + g(z_2 - z_1) = 0. \quad (2.26)$$

2.7.1. Pérdida de carga y el coeficiente de fricción

La ecuación de Bernoulli, la podemos manipular algebraicamente para obtener la ecuación de la energía para flujo estacionario, para un tubo de sección constante:

$$\left(\frac{P}{\rho g} + \alpha \frac{V^2}{2g} + z\right)_1 = \left(\frac{P}{\rho g} + \alpha \frac{V^2}{2g} + z\right)_2 + h_f. \quad (2.27)$$

El término α es el factor de corrección de la energía cinética, que tiene un valor de 2.0 aproximadamente, para el flujo laminar completamente desarrollado en un conducto, y de 1.04 a 1.11 para el flujo turbulento. El término h_f son las pérdidas de carga. Reorganizando los términos de la ecuación (2.27) y asumiendo que no hay trabajo de partes móviles (bombas o turbinas) ni transferencia de calor entre 1 y 2. Si el flujo está completamente desarrollado, el perfil de velocidades es el mismo en 1 y 2. En este caso, el factor de corrección de energía cinética $\alpha_1 = \alpha_2$, y como $V_1 = V_2$ queda:

$$h_f = \Delta z + \frac{\Delta p}{\rho g}. \quad (2.28)$$

Teniendo en cuenta como fuerzas aplicadas las de presión, gravedad y fricción en la pared y reordenando los términos de la ecuación encontramos una relación entre la pérdida de carga y el esfuerzo de cortadura en la pared. Finalmente obtenemos la relación de pérdida de carga:

$$h_f = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g}, \quad (2.29)$$

donde L : longitud de la tubería y d : diámetro de la tubería. El parámetro adimensional f se denomina coeficiente de fricción y se puede estimar a partir de la figura 2.11 la cual se conoce como del diagrama de Moody.

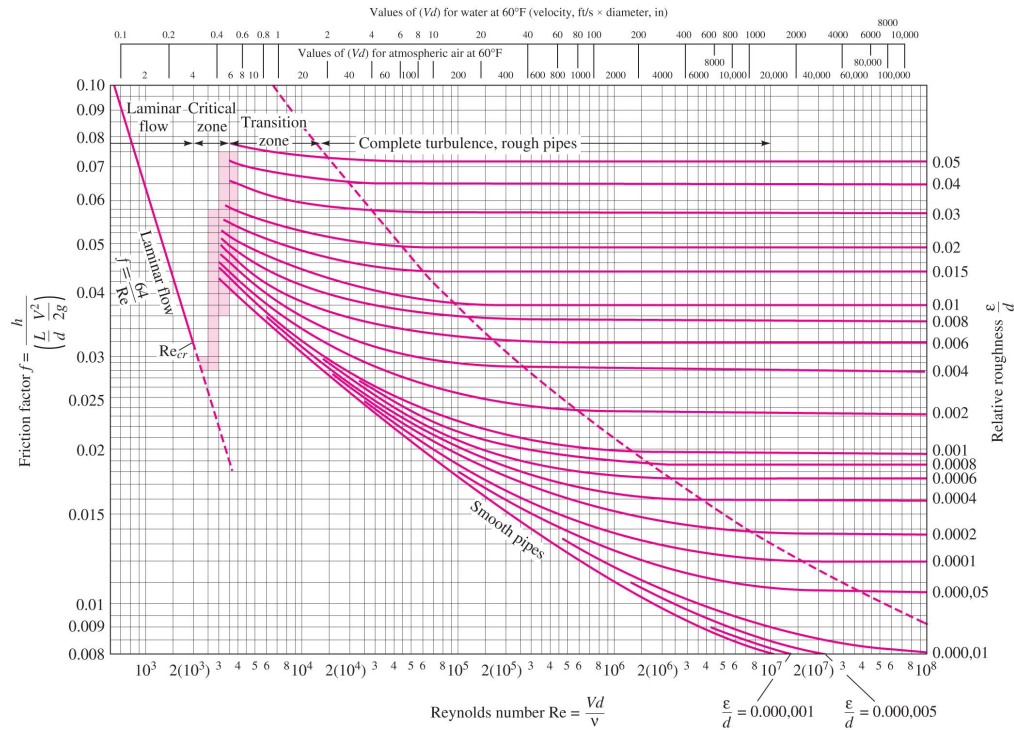


Figura 2.11: Diagrama de Moody para el coeficiente de fricción en conductos de paredes lisas y rugosas. Tomado de [28].

El termino ϵ de la figura 2.11 corresponde a la rugosidad. la tabla 2.12 tiene los valores recomendados para conductos comerciales.

ϵ				
Material	Condición	ft	mm	Incertidumbre, %
Acero	Lámina metálica, nueva	0.00016	0.05	± 60
	Inoxidable	0.000007	0.002	± 50
	Comercial, nuevo	0.00015	0.046	± 30
	Estriado	0.01	3.0	± 70
	Oxidado	0.007	2.0	± 50
Hierro	Fundido, nuevo	0.00085	0.26	± 50
	Forjado, nuevo	0.00015	0.046	± 20
	Galvanizado, nuevo	0.0005	0.15	± 40
	Fundición asfáltica	0.0004	0.12	± 50
Latón	Laminado, nuevo	0.000007	0.002	± 50
Plástico	Tubo laminado	0.000005	0.0015	± 60
Vidrio	—	Liso	Liso	
Hormigón	Liso	0.00013	0.04	± 60
	Rugoso	0.007	2.0	± 50
Caucho	Liso	0.000033	0.01	± 60
Madera	En duelas	0.0016	0.5	± 40

Figura 2.12: Valores recomendados de rugosidad para conductos comerciales. Tomado de [28].

También existe pérdidas debidas a los accesorios de las tuberías, por lo que deben considerarse dentro del termino h_{total} :

$$h_{total} = h_f + \sum h_m = \frac{V^2}{2g} \left(\frac{fL}{d} + \sum k \right), \quad (2.30)$$

donde el término k se conoce como coeficiente de pérdidas:

$$k = \frac{h_m}{V^2/2g}, \quad (2.31)$$

y $h_m = \delta P/(\rho g)$ es la pérdida de carga.

2.8. Flujo en conductos no circulares

Si el conducto no tiene sección circular, el análisis del flujo completamente desarrollado es análogo al de tubos circulares. En un conducto de sección no circular, es posible aplicar el análisis de volumen de control utilizado para tuberías circulares, de la figura 2.10, pero reemplazando el área transversal y el perímetro mojado por sus equivalentes geométricos reales. La ecuación de cantidad de movimiento permite obtener la pérdida de carga por fricción:

$$h_f = \frac{\Delta p}{\rho g} + \Delta z = \frac{\tau_p}{\rho g} \frac{\Delta L}{A/\wp}, \quad (2.32)$$

donde el esfuerzo cortante en la pared aparece integrado sobre el perímetro mojado $\wp$, lo que introduce la razón $A/\wp$. A partir de esto, se define el **radio hidráulico**:

$$R_h = \frac{A}{\wp}. \quad (2.33)$$

El coeficiente de fricción basado en el esfuerzo medio se expresa como:

$$f_{CNC} = \frac{8\tau_p}{\rho V^2}, \quad (2.34)$$

sustituyendo $V = Q/A$ en la ecuación de pérdida de carga se obtiene:

$$h_f = f \frac{L}{2g} \frac{V^2}{D_h}, \quad (2.35)$$

donde se introduce el **diámetro hidráulico**, definido por:

$$D_h = \frac{4A}{\wp} = 4R_h. \quad (2.36)$$

El perímetro mojado debe incluir todas las superficies sometidas a fricción. En tubos circulares, el uso de $D_h = 4R$ coincide con el diámetro real, por lo que no genera ambigüedad. A partir del análisis dimensional, se concluye que el coeficiente de fricción depende de:

$$f = F \left(\frac{VD_h}{\nu}, \frac{\varepsilon}{D_h} \right), \quad (2.37)$$

lo que permite usar, con buena aproximación, el diagrama de Moody sustituyendo el diámetro real por el diámetro hidráulico. Una expresión alternativa proporcionada es:

$$\frac{1}{f^{1/2}} \approx -1,8 \log \left[\frac{6,9}{Re_d} + \left(\frac{\epsilon/D_h}{3,7} \right)^{1,11} \right], \quad (2.38)$$

donde Reynolds es:

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu}. \quad (2.39)$$

- ρ : densidad del fluido (kg/m^3).
- V : velocidad de flujo (m/s).
- D_h : diámetro hidráulico (m).
- μ : viscosidad dinámica ($pa \cdot s$).

2.8.1. Coeficiente de resistencia de difusores, secciones convergentes y otros tipos de sección

Una sección tubular que se expande suavemente, un difusor, se utiliza para hacer la transición de un tubo (canal) de menor sección transversal a uno de mayor sección (para convertir la energía cinética del flujo en energía potencial del fluido o presión de velocidad en presión estática) con pérdidas de presión totales mínimas (Figura 2.13). Debido a que un aumento en el área de la sección transversal del difusor causa una disminución en la velocidad media del flujo con un incremento en el ángulo de divergencia α , el coeficiente total de resistencia del difusor, expresado en términos de la velocidad en la sección menor (inicial), se vuelve más pequeño hasta ciertos límites de α , en comparación con el segmento equivalente de un tubo de sección constante cuya área es igual a la del área inicial del difusor.

A partir de este ángulo límite de divergencia del difusor, un aumento adicional en dicho ángulo incrementa considerablemente el coeficiente de resistencia, de manera que se vuelve mucho mayor que el de un tubo recto de la misma longitud equivalente.

El aumento del coeficiente de resistencia de un difusor de una longitud dada con incrementos adicionales en el ángulo de divergencia se debe a la mayor turbulencia del flujo, la separación de la capa límite de la pared del difusor y la formación resultante de vórtices violentos.

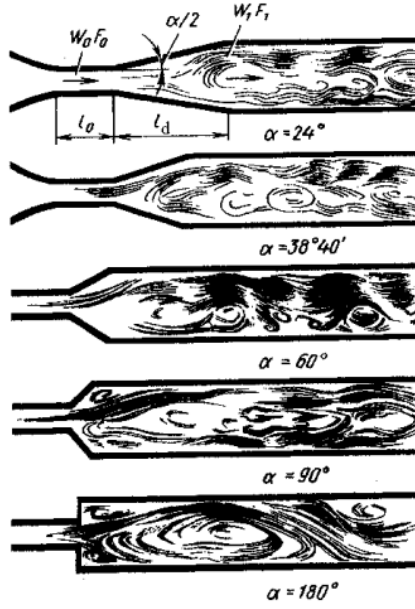


Figura 2.13: Patrones de flujo en difusores con distinta divergencia. Tomado de [29].

La figura 2.13, muestra el comportamiento en los patrones de flujo bajo distintos valores de α . Los subíndices 0 y 1 corresponden a la sección antes y después de la contracción respectivamente. Las variables importantes en esta teoría son:

- w : velocidad del flujo a la entrada.
- F : área de la sección.
- l_0 : longitud de la sección anterior al cambio de sección.
- l_d : longitud de la contracción.
- α : ángulo de contracción.
- p : presión.
- ρ : densidad del fluido.
- A : factor de corrección geométrica.
- ζ : coeficiente de pérdida local.
- D : diametro hidraulico.

El coeficiente de resistencia de las piezas de transición convergentes-divergentes de sección transversal anular, similar al de los difusores convencionales, depende de la longitud relativa de la sección recta intermedia l_0/D_0 y de la relación de áreas F_1/F_0 , y puede determinarse a partir de:

$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2} = A (k_1 k_2 \zeta_1 + \Delta \zeta), \quad (2.40)$$

$k_1 = \zeta_{1n}/\zeta_{1n \geq 4}$ es la razón del coeficiente ζ_1 en $n_1 = F_1/F_0 < 4$ respecto a su valor en $n_1 \geq 4$, véanse las curvas $k_1 = f_2(\alpha_d, F_1/F_0)$ de la figura 2.14, la cual muestra los valores para cada factor k_1 . k_2 es la corrección por el efecto de la longitud relativa l_0/D_0 ; dentro del intervalo $0,25 \leq l_0/D_0 \leq 5,0$:

$$k_2 \approx 0,66 + 0,35 \frac{l_0}{D_0}, \quad (5.18)$$

$\Delta\zeta$ es un término adicional que considera el efecto de l_0/D_0 ; Para piezas de transición con sección transversal rectangular (cuadrada) y piezas de transición planas (en las cuales tanto la contracción como la divergencia de la sección transversal ocurren en un solo plano), el coeficiente de resistencia puede determinarse aproximadamente a partir de las Ecuaciones 2.40 y 5.18, pero con ζ_1 reemplazado por ζ_d del difusor para $l_0/D_0 = 0$, según la figura 2.15.

Value	α_d, deg				
	5	7	10	12.5	15
ζ	0.10	0.10	0.11	0.13	0.16
A	1.08	1.09	1.13	1.16	1.15

Values of k_1

F_1/F_0	D_1/D_0	α_d, deg				
		5	7	10	12.5	15
1.5–1.6	≈ 1.25	0.59	0.55	0.48	0.40	0.33
2.2–2.3	≈ 1.50	0.81	0.81	0.78	0.77	0.66
3.0–3.2	≈ 1.75	0.90	0.89	0.85	0.81	0.77
≥ 4.0	≥ 2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Values of $\Delta\zeta$

F_1/F_0	D_1/D_0	l_0/D_0					
		0.25	0.50	0.75	1.00	12.5	1.50
1.5–1.6	≈ 1.25	–0.012	–0.08	–0.004	0	0.004	0.008
2.2–2.3	≈ 1.50	–0.020	–0.014	0	0	0	0.014
3.0–3.2	≈ 1.75	–0.022	–0.016	–0.010	0	0.010	0.014
≥ 4.0	≥ 2.0	–0.028	–0.020	–0.010	0	0.010	0.016
F_1/F_0	D_1/D_0	l_0/D_0					
		1.75	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
1.5–1.6	≈ 1.25	0.012	0.016	–	–	–	–
2.2–2.3	≈ 1.50	0.020	0.026	0.038	0.048	0.06	0.072
3.0–3.2	≈ 1.75	0.022	0.027	0.038	0.050	0.062	0.073
≥ 4.0	≥ 2.0	0.028	0.030	–	–	–	–

Figura 2.14: Factores para A , k_1 y $\Delta\zeta$, según las características del difusor. Tomado de [29].

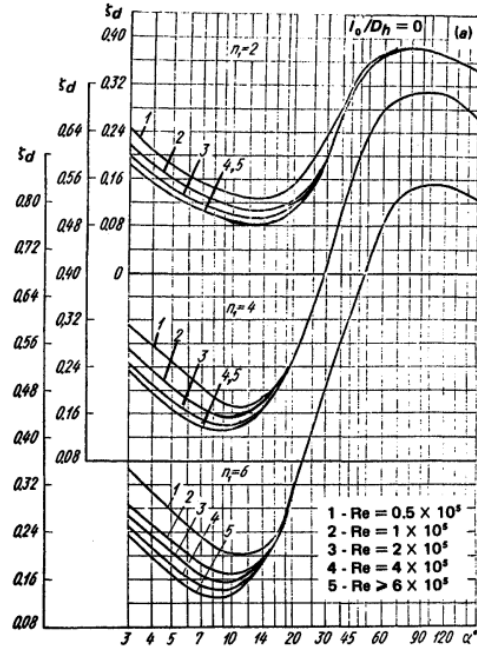


Figura 2.15: Valores de ζ_d bajo las características del difusor. Tomado de [29].

2.8.2. Coeficiente de resistencia para entradas

Se presentan los diagramas del libro manual de resistencia hidráulica [29] para el coeficiente de resistencia en la entrada. La figura 2.16 muestra diferentes configuraciones para entradas de flujo con sección rectangular.

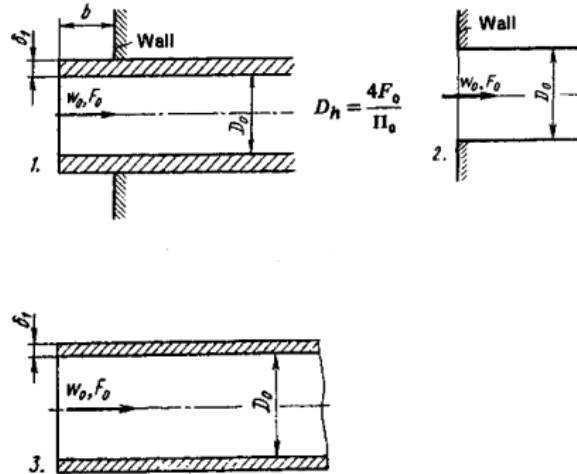
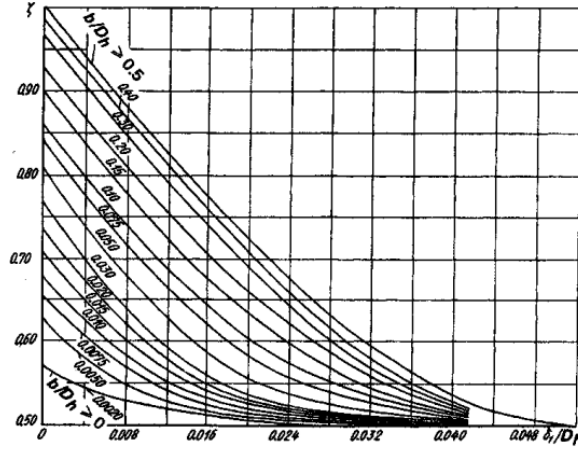


Figura 2.16: Configuraciones para determinar el coeficiente de pérdida a la entrada. Tomado de [29].

El coeficiente de pérdida se calcula con la siguiente ecuación:

$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2} \sum_{i=0}^3 \left[\sum_{j=0}^3 \left(a_{ij} \left(\frac{b}{D_h} \right)^j \right) \right] \left(\frac{\delta}{D_h} \right), \quad (2.41)$$

la figura 2.17 muestra el diagrama para determinar el coeficiente de pérdida. Esta es una forma alternativa a la ecuación 2.41.



donde V es la fuerza cortante aplicada y A es el área sobre la que actúa. Los esfuerzos cortantes son relevantes en las uniones y puntos de conexión, donde el deslizamiento entre componentes puede ser una fuente de fallo.

- **esfuerzo de flexión** (σ_f): es el esfuerzo que debidas a momentos flectores en el cuerpo:

$$\sigma_f = \frac{My}{I}, \quad (2.42)$$

donde M es el momento flector, y es la distancia desde el eje neutro a la fibra donde estamos calculando el esfuerzo e I es el momento de inercia de la sección.

2.9.2. Esfuerzo de fluencia

El **esfuerzo de fluencia** es el esfuerzo a partir del cual un material comienza a deformarse plásticamente, es decir, cuando la deformación ya no es recuperable. Es esencial evitar que las partes sometidas a carga alcancen este nivel de esfuerzo, ya que podría comprometer la funcionalidad del sistema. El esfuerzo de fluencia se denota generalmente como σ_y y varía dependiendo del tipo de material utilizado.

2.9.3. Criterios de falla: Tresca y Von Mises

Para evaluar cuándo un material fallará bajo un estado de esfuerzos combinados (esfuerzos normales y cortantes), se utilizan criterios de falla. Los dos criterios más comúnmente usados son el criterio de **Tresca** y el criterio de **Von Mises**, que proporcionan una evaluación precisa de la seguridad del diseño.

- **Criterio de Tresca (Teoría de la máxima tensión cortante)**: según este criterio, un material fallará si la tensión cortante máxima en el material excede el esfuerzo cortante máximo que el material puede soportar en un ensayo de tracción uniaxial. Se define como:

$$\tau_{mx} = \frac{\sigma_y}{2},$$

este criterio es conservador y asegura que las piezas mecánicas no experimenten fallos por deslizamientos internos debido a esfuerzos cortantes elevados.

- **Criterio de Von Mises (Teoría de la energía de distorsión)**: este criterio establece que un material falla cuando la energía de distorsión, que es el resultado de la deformación, supera un valor crítico determinado por el esfuerzo de fluencia del material en un ensayo de tracción. La expresión para el criterio de Von Mises es:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (2.43)$$

donde σ_1 , σ_2 , y σ_3 son los esfuerzos principales. Este criterio es menos conservador que Tresca, pero ofrece un mejor ajuste para materiales dúctiles.

2.9.4. Factor de seguridad

El **factor de seguridad** (FS) es un parámetro crítico en el diseño de componentes mecánicos. Se define como la relación entre el esfuerzo de fluencia σ_y del material y el esfuerzo máximo esperado durante la operación σ_{mx} :

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{mx}}. \quad (2.44)$$

Para garantizar un diseño seguro, se deben usar factores de seguridad adecuados. En general, los valores de FS dependen del material, las condiciones de carga, y las consecuencias de una posible falla. Se recomienda un factor de seguridad mayor en aplicaciones críticas, dado que una falla podría causar daños significativos.

2.10. Elementos mecánicos y electromecánicos

2.10.1. Cojinetes y consideraciones para su elección

Los cojinetes de elementos rodantes se agrupan en dos grandes categorías, cojinetes de bolas y cojinetes de rodillos; ambos con muchas variantes dentro de esas divisiones. Los cojinetes de bolas son más adecuados para aplicaciones pequeñas de alta rapidez. Para sistemas grandes, con cargas pesadas, son preferibles los cojinetes de rodillos. Si es posible que se presenten desalineaciones entre el eje y la carcasa, entonces se necesitan cojinetes de autoalineación. Los cojinetes de rodillos cónicos son capaces de manejar cargas pesadas, tanto en la dirección radial como en la dirección de empuje, a velocidades moderadas. En situaciones de cargas pesadas radiales y de empuje a grandes velocidades, lo mejor son los cojinetes de bolas con pista profunda.

- **Cojinete de bolas:** pueden soportar cargas radiales y de empuje combinadas, son más adecuados para tamaños pequeños, rapidezces altas y cargas más ligeras.
- **Cojinete de rodillos:** pueden soportar cargas estáticas y dinámicas (de choque) más grandes que los cojinetes de bolas, debido a su línea de contacto, a la vez que son menos costosos en tamaños mayores y cargas más pesadas.
- **Cojinete de empuje:** los cojinetes de empuje de rodillos cilíndricos tienen mayor fricción que los cojinetes de empuje de bolas debido al deslizamiento que ocurre entre el rodillo y las pistas
- **Cojinete lineal:** los rodamientos lineales son dispositivos mecánicos diseñados para permitir un movimiento rectilíneo suave, preciso y con mínima fricción entre dos superficies. A diferencia de los rodamientos rotativos, estos no giran, sino que guían un eje o carro a lo largo de una trayectoria lineal.

Los fabricantes de cojinetes presentan diferentes catálogos donde muestran sus dimensiones, además de recomendaciones y aplicaciones.

2.10.2. Engranajes

Los engranajes sirven para transmitir torque y velocidad angular en una variedad de aplicaciones. En la actualidad, los engranes están muy estandarizados por la forma y el tamaño del diente.

La ley fundamental del engranaje es la razón de la velocidad angular entre los engranes de un engranaje debe ser constante a lo largo del acoplamiento. La razón de velocidad angular m_V es igual a la razón entre el radio de paso del engrane de entrada y el del engrane de salida. como se muestra en la siguiente ecuación:

$$m_V = \frac{w_{sal}}{w_{ent}} = \pm \frac{r_{ent}}{r_{sal}}, \quad (2.45)$$

donde: w : velocidad angular y r : radio de paso del engranaje. La razón de torque o ventaja mecánica m_A es el recíproco de la razón de velocidad m_V :

$$m_a = \frac{1}{m_v}. \quad (2.46)$$

La figura 2.18 muestra la nomenclatura general para el diente de un engranaje.

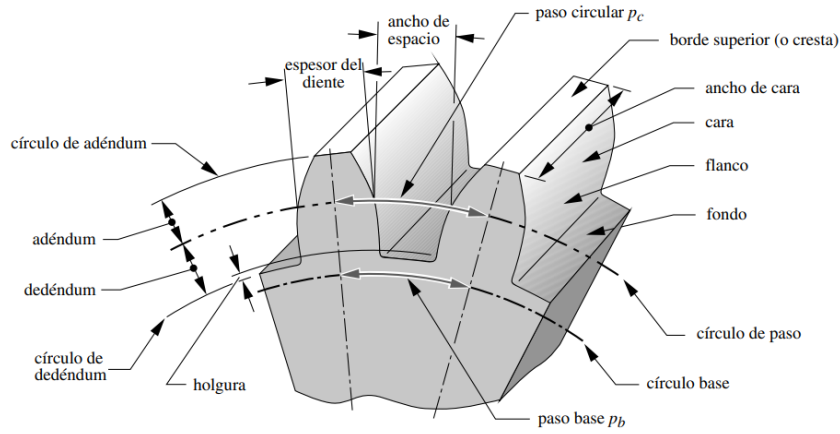


Figura 2.18: Nomenclatura de un diente de engrane. Tomado de [30].

La figura 2.18 muestra las características geométricas de un diente. estas están relacionadas con las siguientes ecuaciones:

$$P_c = \frac{\pi d}{N}, \quad (2.47)$$

donde d = diámetro de paso y N = número de dientes. El paso del diente también se mide a lo largo de la circunferencia del círculo base y se conoce como el *paso de base* p_b . se calcula usando la siguiente relación:

$$p_b = P_c \cos \phi. \quad (2.48)$$

Las unidades de P_c son pulgadas o milímetros. Una forma más conveniente para definir el tamaño del diente es relacionarlo directamente con el diámetro d del círculo de paso, en vez de su circunferencia. El *diámetro de paso* P_d es:

$$P_d = \frac{N}{d}, \quad (2.49)$$

Las unidades de P_d son pulgadas recíprocas, o número de dientes por pulgada. Dicha medida tan sólo se utiliza en Estados Unidos para la especificación de engranes. Combinando las ecuaciones 8.3a y 8.4a, se obtiene la razón entre el paso circular y el paso diametral:

$$P_d = \frac{\pi}{P_c}. \quad (2.50)$$

El sistema SI, usado para engranes métricos, define un parámetro llamado *módulo* (m), el cual es el *recíproco del paso diametral* con el diámetro de paso d medido en milímetros. La siguiente ecuación relaciona las dos variables:

$$m = \frac{d}{N}. \quad (2.51)$$

La razón de engrane, m_G , se expresa como el número de dientes del engrane N_g entre el número de dientes del piñón N_p . como se muestra en la siguiente ecuación:

$$m_G = \frac{N_g}{N_p}. \quad (2.52)$$

la figura 2.19 muestra las especificaciones de la AGMA para dientes de engranajes.

Tabla 8-1 Especificaciones de la AGMA para dientes de engrane de profundidad total		
Parámetro	Paso grueso ($p_d < 20$)	Paso fino ($p_d \geq 20$)
Ángulo de presión ϕ	20° o 25°	20°
Adendum a	1.000 / p_d	1.000 / p_d
Dedendum b	1.250 / p_d	1.250 / p_d
Profundidad de trabajo	2.000 / p_d	2.000 / p_d
Profundidad total	2.250 / p_d	2.200 / p_d + 0.002 in
Espesor circular del diente	1.571 / p_d	1.571 / p_d
Radio de filete: cremallera básica	0.300 / p_d	no estandarizado
Holgura básica mínima	0.250 / p_d	0.200 / p_d + 0.002 in
Ancho mínimo del borde superior	0.250 / p_d	no estandarizado
Holgura (dientes esmerilados o pulidos)	0.350 / p_d	0.350 / p_d + 0.002 in

Tabla 8-2 Pasos diametrales estándares	
Grueso ($p_d < 20$)	Fino ($p_d \geq 20$)
1	20
1.25	24
1.5	32
1.75	48
2	64
2.5	72
3	80
4	96
5	120
6	
8	
10	
12	
14	
16	
18	

Figura 2.19: Estandarización de medidas para engranajes. Tomado de [30].

2.10.3. Ventiladores axiales

Los ventiladores axiales son dispositivos rotodinámicos diseñados para mover aire en dirección predominantemente paralela al eje de giro. Su funcionamiento se basa en la acción combinada de las palas, las cuales transfieren cantidad de movimiento al fluido al generar una componente de presión y una componente de velocidad que induce el desplazamiento del aire. Debido a esta configuración, los ventiladores axiales son adecuados para aplicaciones que requieren caudales significativos con incrementos moderados de presión.

Desde el punto de vista aerodinámico, el comportamiento de un ventilador axial se describe a través de su **curva característica**, la cual relaciona la presión estática generada con el caudal volumétrico ($\Delta p_{\text{fan}} = f(Q)$). Esta curva es típicamente descendente: a medida que aumenta el caudal suministrado por el ventilador, la presión disponible disminuye. Este comportamiento es inherente al diseño geométrico del rotor, incluidas la forma de las palas, su ángulo de ataque y la velocidad de rotación del conjunto.

En condiciones reales de operación, el ventilador no entrega simultáneamente su presión máxima y su caudal máximo. En su lugar, el régimen efectivo de funcionamiento está determinado por

el **punto de operación**, definido como la intersección entre la curva del ventilador y las características del sistema en el cual se encuentra instalado. Dicho punto establece un caudal único Q y una presión efectiva Δp con los que el ventilador puede operar de manera estable. Estos valores dependen tanto de la capacidad del ventilador como del comportamiento externo del sistema.

En aplicaciones de succión, la presión generada por el ventilador se manifiesta como una disminución de la presión estática en la entrada del túnel, generando así un *efecto de aspiración*. Este efecto es esencial para captar materiales tales como hojas, partículas o residuos ligeros. El diseño del ventilador, junto con su correcta selección para el sistema, asegura que exista una presión de succión suficiente para garantizar la captura y el transporte adecuado de dichos materiales.

En resumen, los ventiladores axiales constituyen el componente encargado de proporcionar la energía necesaria para movilizar aire a través del túnel de succión. Su curva característica y el punto de operación asociado permiten predecir el caudal y la depresión disponibles en la entrada del sistema, elementos fundamentales para el diseño y funcionamiento de un túnel de succión eficiente. La figura 2.20 muestra la gráfica del ventilador PFB0824UHE de 24 voltios a 2 amperios.

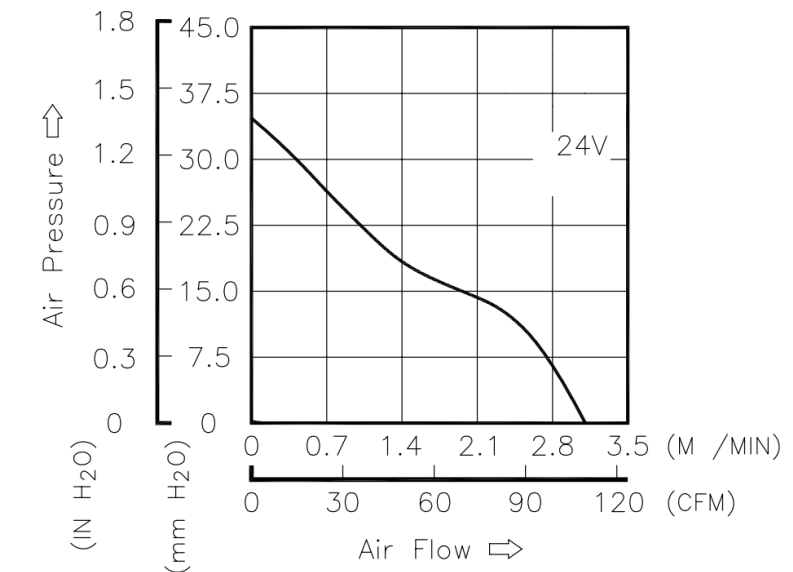


Figura 2.20: Gráfica de un ventilador PFB0824UHE de 24V. Tomado de [31].

2.10.4. Motor DC

Un motor DC es un dispositivo electromecánico encargado de transformar energía continua en energía mecánica, este consta de un estator, rotor y un anillo segmentado. con la variación en la dirección de la corriente debido al anillo segmentado, el rotor genera un campo magnético que al interactuar con los imanes del estator generan una rotación a un eje acoplado. (ver figura 2.21).

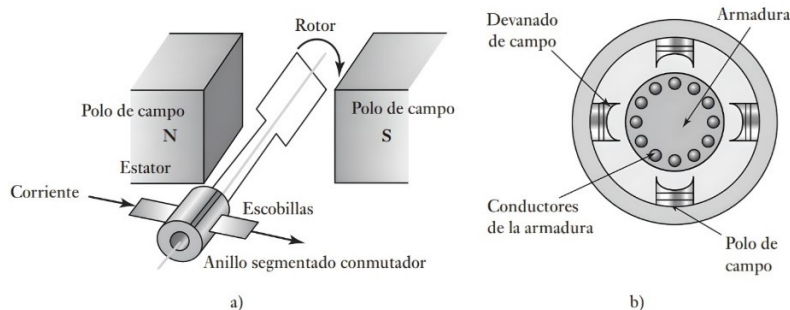


Figura 2.21: Motor DC. a) Básico. b) Con dos juegos de polos. tomado de [25].

2.10.5. Servo motor

El motor paso a paso es un dispositivo que produce una rotación en ángulos iguales, denominados pasos, por cada pulso digital que llega a su entrada. Por ejemplo, si en el caso de un motor un pulso produce un giro de 6° , entonces 60 pulsos producirán una rotación de 360° . Los siguientes son algunos de los términos más utilizados para especificar motores paso a paso:

1. **Fase:** este término se refiere a la cantidad de devanados independientes del estator; por ejemplo, un motor de cuatro fases. La corriente requerida para cada fase, así como su resistencia e inductancia, se especifican de manera que también se especifique la salida de conmutación del controlador.
2. **Ángulo de paso:** se trata del ángulo que gira el rotor durante un cambio de estado en los devanados del estator.
3. **Par de retención:** es el máximo par que se puede aplicar a un motor energizado sin modificar su posición de reposo y provocar la rotación del eje.
4. **Par máximo de enganche:** es el par máximo con el que puede arrancar un motor, dada una frecuencia de pulsos, y lograr la sincronización sin perder un paso.
5. **Par máximo de desenganche:** es el par máximo que es posible aplicar a un motor, trabajando a determinada frecuencia de pasos, sin perder su sincronización.
6. **Frecuencia de enganche:** es la frecuencia de conmutación máxima a la que un motor de cargado, puede arrancar sin perder un paso.
7. **Frecuencia de desenganche:** es la frecuencia de conmutación en la que un motor de cargado, puede mantener su sincronía conforme se reduce la frecuencia de conmutación.
8. **Velocidad de progresión:** es el rango de frecuencias de conmutación entre el enganche y el desenganche dentro del cual el motor funciona en sincronía, pero no puede ni arrancar ni invertir su giro.

2.10.6. Selección de un motor

La selección de un motor constituye un proceso fundamental en el diseño de sistemas electro-mecánicos, ya que de ello dependen el desempeño, la eficiencia y la fiabilidad de la aplicación. Este

proceso implica comparar las características del motor con las exigencias mecánicas, eléctricas y ambientales del sistema a implementar. Para ello, se deben considerar parámetros como velocidad nominal, par disponible, consumo de corriente, eficiencia, capacidad de control y condiciones de operación.

En primera instancia, se analiza el tipo de carga que será accionada por el motor, lo cual permite identificar los requerimientos dinámicos y estacionarios. Esta evaluación incluye aspectos como el tipo de movimiento requerido, la presencia de variaciones en el par resistente, la necesidad de control preciso de velocidad o posición, y las condiciones transitorias esperadas. Una vez establecida la naturaleza de la carga, se procede a determinar los parámetros fundamentales del motor, como par nominal, velocidad nominal y características de torque-velocidad.

2.10.7. Par y velocidad

El comportamiento de un motor se caracteriza por su relación inversa entre par y velocidad. Para asegurar que el motor pueda satisfacer las demandas de la aplicación, es esencial comparar su curva de operación con los requerimientos mecánicos de la carga. El par nominal debe ser mayor o igual que el par requerido bajo condiciones de operación continua, mientras que el par máximo debe ser suficiente para superar condiciones de arranque y transitorios.

La velocidad nominal del motor debe corresponder al régimen operativo deseado. De ser necesario, pueden emplearse sistemas de transmisión mecánica para adecuar la velocidad y aumentar el par disponible, siempre considerando la eficiencia del sistema.

2.10.8. Eficiencia y capacidad de control

La eficiencia es un parámetro relevante en aplicaciones donde el consumo energético o la disipación térmica son críticos. Un motor con alta eficiencia reduce pérdidas y mejora la vida útil del sistema. Dependiendo del nivel de precisión requerido, se selecciona el tipo de control más adecuado, el cual puede ser por modulación de ancho de pulso (PWM), control de lazo cerrado o sistemas avanzados de control electrónico.

2.10.9. Consideraciones ambientales y constructivas

Factores como temperatura de operación, humedad, vibración y exposición a agentes contaminantes también influyen en la selección del motor. Los materiales del rotor y estator, el tipo de escobillas y la protección del encapsulado deben adecuarse al entorno de trabajo para garantizar la fiabilidad del sistema.

2.10.10. Requerimientos de potencia

Los requerimientos de potencia constituyen uno de los aspectos más importantes para la selección final del motor. La potencia necesaria se determina a partir del par requerido y de la velocidad de operación, considerando las pérdidas mecánicas y eléctricas presentes en el sistema. De manera general, la potencia mecánica requerida en el eje está dada por:

$$P = T \cdot \omega, \quad (2.53)$$

donde P es la potencia mecánica, T es el par requerido y ω es la velocidad angular. Para obtener el valor de potencia eléctrica necesaria, se toma en cuenta la eficiencia del motor:

$$P_{\text{eléctrica}} = \frac{P_{\text{mecánica}}}{\eta}. \quad (2.54)$$

La correcta estimación de la potencia garantiza que el motor pueda operar dentro de su rango seguro sin sobrecalentamientos, evitando fallos prematuros y asegurando la estabilidad del sistema. Una vez determinados los requerimientos de potencia, el diseño del sistema de alimentación y control puede ser calibrado adecuadamente para mantener el desempeño esperado durante toda la vida útil de la aplicación.

2.10.11. Actuador lineal

Los actuadores lineales son dispositivos mecánicos que convierten la energía eléctrica en un movimiento rectilíneo, permitiendo desplazar una carga en línea recta. Muchos actuadores lineales de tipo eléctrico funcionan mediante un motor DC interno, por lo que basta con invertir la polaridad de la alimentación para cambiar la dirección del movimiento, extendiendo o retrayendo el mecanismo según la necesidad. Existen varios tipos de actuadores lineales. Los actuadores de tornillo utilizan un motor que hace girar un husillo, convirtiendo la rotación en desplazamiento lineal con gran precisión y fuerza. Los actuadores lineales de engranajes emplean un tren de engranajes para aumentar el torque y permitir el movimiento de cargas pesadas. También están los actuadores lineales de corredera o riel, que guían el movimiento utilizando sistemas de rodamiento para lograr un desplazamiento suave y estable. En aplicaciones más compactas se encuentran los micro motores lineales, que ofrecen movimientos cortos y rápidos en dispositivos pequeños.

3. Diseño del actuador

En este capítulo se muestra las dos primeras etapas del flujograma 1.8, el cual, muestra la metodología usada para el desarrollo de este proyecto.

3.1. Requerimientos y selección del actuador electromecánico

A partir de los resultados obtenidos durante la inspección del entorno y la zona de trabajo, en la Tabla 3.1 se consignan los requerimientos generales del sistema derivados de este análisis.

Tabla 3.1: Matriz de Requerimientos generales del sistema.

Requerimientos	Descripción	Valor
1. Tamaño de hojas	El dispositivo debe ser capaz de recoger las hojas basado en el tamaño de sus hojas.	Ancho: 4 cm. Largo: 14 cm
2. Peso del actuador.	El actuador debe tener un peso adecuado para su instalación en la zona de trabajo.	Peso <25 kg.
3. Capacidad de captura para hojas sobre el canal.	El actuador debe recoger las hojas que yacen en el canal.	Sistema de succión.
4. Volumen de recolección.	El sistema debe ser capaz de limpiar la zona efectiva en 3 ciclos de limpieza.	Volumen: 0,013 m ³ .
5. Bajo consumo eléctrico.	El sistema debe operar con un consumo eléctrico reducido que permita su funcionamiento	Consumo <120 W.
6. Autonomía energética.	El actuador debe poder ser alimentado por una fuente de alimentación portátil.	Batería DC.
7. Fácil mantenimiento.	El sistema debe ser de fácil mantenimiento según la información del sistema de control.	Uso de componentes electromecánicos comerciales y modulares, disponibles en el mercado para reemplazo directo.
8. Depositar las hojas fuera del edificio	El dispositivo debe ser capaz de depositar las hojas fuera del edificio, según las medidas del pretil.	Mecanismo que permita movimiento ascendente, longitudinal y angular.

A continuación, en la tabla 3.2, se presenta una matriz de decisiones, la cual evalúa el desempeño de cada actuador electromecánico, de 0 a 10, frente a cada requerimiento importante en el desarrollo del diseño del actuador del presente proyecto.

Tabla 3.2: Matriz de decisión para la selección del sistema de recolección de hojas.

Requerimientos Actuador	Volumen de re- colec- ción	Recolección en canales	Peso del ac- tuador	Consumo energético	Autonomía energética	Mantenimiento	Total	Ref
Soplador en conjunto con un transportador	1	1	8	7	9	9	35	[9]
Colector con movimiento oscilatorio de barrido	9	0	4	8	9	9	39	[18]
Succionador centrífugo de alta potencia	10	10	0	0	0	2	22	[19]
Colector con rodillo	7	0	7	8	8	8	38	[20]
soplador centrífugo de baja potencia	5	3	8	8	9	3	36	[21]
Succión axial con sección rectangular	5	4	8	8	9	5	39	[22]

La Tabla 3.2 evidencia que el uso de sistemas de succión resulta apropiado para este tipo de aplicaciones; sin embargo, el consumo eléctrico y los requerimientos de mantenimiento deben considerarse como criterios determinantes al momento de seleccionar el actuador. Con base en los requerimientos establecidos en el presente documento y en los resultados obtenidos a partir de la matriz de decisiones, se selecciona un ventilador axial como actuador de recolección. Debido a las dimensiones particulares de la hoja y a que no se espera su trituración —como se propone en otras investigaciones [19], donde este proceso implica un elevado consumo energético—, se opta por un canal de succión de sección rectangular. Adicionalmente, se incorpora un sistema de redirección de flujo, similar a los empleados en las patentes reportadas en [32] y [24].

Las investigaciones analizadas no presentan un diseño detallado de un sistema de depósito destinado al almacenamiento y disposición final de los residuos. Dado que uno de los requerimientos del presente proyecto consiste en depositar los residuos fuera del edificio, se selecciona un mecanismo de tijera. Este mecanismo permite la elevación necesaria para superar el pretil del edificio y, adicionalmente, facilita la inclinación de la plataforma de almacenamiento, generando un ángulo adecuado para el desecho de los residuos, además, es de fácil accionamiento mediante un actuador lineal.

Se propone un volumen de recolección de $0,013 \text{ m}^3$ basándonos en la zona efectiva de recolección. Los antecedentes muestran que el uso de un arduino es apropiado para estos sistemas, además, si consideramos un sistema automatizado, la correcta elección de los sensores es primordial. Un sensor de peso será indicado si se desea controlar la cantidad de volumen depositado fuera del edificio. Por otro lado, el sistema de succión debe tener un depósito aislado al ambiente, ya que esto evita pérdidas de energía, un sensor de nivel dentro de este depósito, será indicado para realizar descargas hacia el depósito de desecho.

Debido a las consideraciones expuestas en la sección 1.1. El material más apropiado, debe ser un material que tenga las siguientes propiedades:

- Resistente a la corrosión.

- Soportar altas cargas de radiación térmica.
- Impermeabilizar los elementos electrónicos del sistema.
- Resistente al desgaste.
- Accesible y de bajo presupuesto.

Los materiales más apropiados bajo esas características son: **aleaciones de acero inoxidable**, los cuales son aceros resistentes al desgaste. Por otro lado, el **Aluminio Anodizado** que también responde de forma efectiva a las características presentes en el ambiente del sistema. Se realizara un tratamiento analítico para el acero inoxidable Aisi 316. En la tabla 3.3 se presentan las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 316.

Tabla 3.3: Propiedades AISI 316. Tomado de [33].

ρ	8,00 [g/cm^3]
σ_{uts}	580 [Mpa]
σ_{yld}	290 [Mpa]
E	193 [Gpa]

Por otro lado, el sistema de recolección y depósito estará ensamblado sobre una plataforma móvil robótica, específicamente el modelo **A4WD3** (ver figura 3.1). Se usa este dispositivo ya que es de tipo comercial y nos ofrece una visión dimensional del sistema.

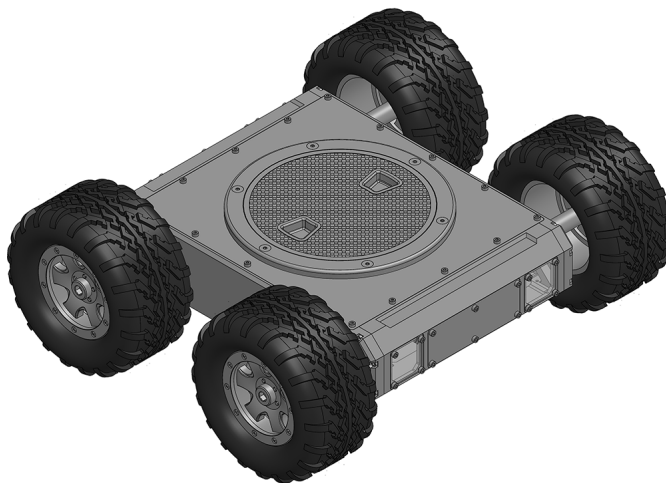


Figura 3.1: A4WD3 Wheeled. Tomado de [34].

Con base en los objetivos planteados en el proyecto, se evidencia el cumplimiento del primer objetivo, el cual consiste en presentar la documentación correspondiente al proceso de selección del actuador.

3.2. Diseño del actuador seleccionado

Luego de analizar y seleccionar los actuadores más apropiados, se consideró tres subsistemas que hacen parte del sistema de limpieza:

- **Subsistema de recolección:** el sistema deberá ser capaz de succionar y transportar los residuos hacia un contenedor. El proceso consiste en un canal de succión rectangular en cuya parte superior se encuentra un ventilador encargado de generar presión negativa. Esta succión produce un flujo de aire que arrastra las hojas hacia el interior del túnel. Un cepillo accionado por un motor DC, conectado mediante un conjunto de engranajes, se encarga de redirigir este flujo de hojas hacia un compartimento de almacenamiento.
- **Subsistema de almacenamiento:** el diseño del almacén contempla una única entrada, lo que permite minimizar pérdidas de flujo y mantener una descarga eficiente del material transportado. En su interior se ubica un sensor que detecta cuando el compartimento alcanza su capacidad máxima. Una vez lleno, el sistema detiene la succión y activa dos servomotores acoplados a la compuerta del almacén. Estos servos abren la compuerta, permitiendo que las hojas acumuladas caigan hacia el depósito final.
- **Subsistema de depósito:** el depósito se encarga de almacenar las hojas descargadas desde el sistema. Un sensor de peso monitorea continuamente la cantidad acumulada y, al detectar que se ha alcanzado el límite máximo, activa un actuador lineal. Este actuador acciona un mecanismo tipo tijera que permite elevar el depósito hasta la altura necesaria para proceder a la descarga final del material.

La figura 3.2 muestra, a modo de ilustración, el sistema de limpieza.

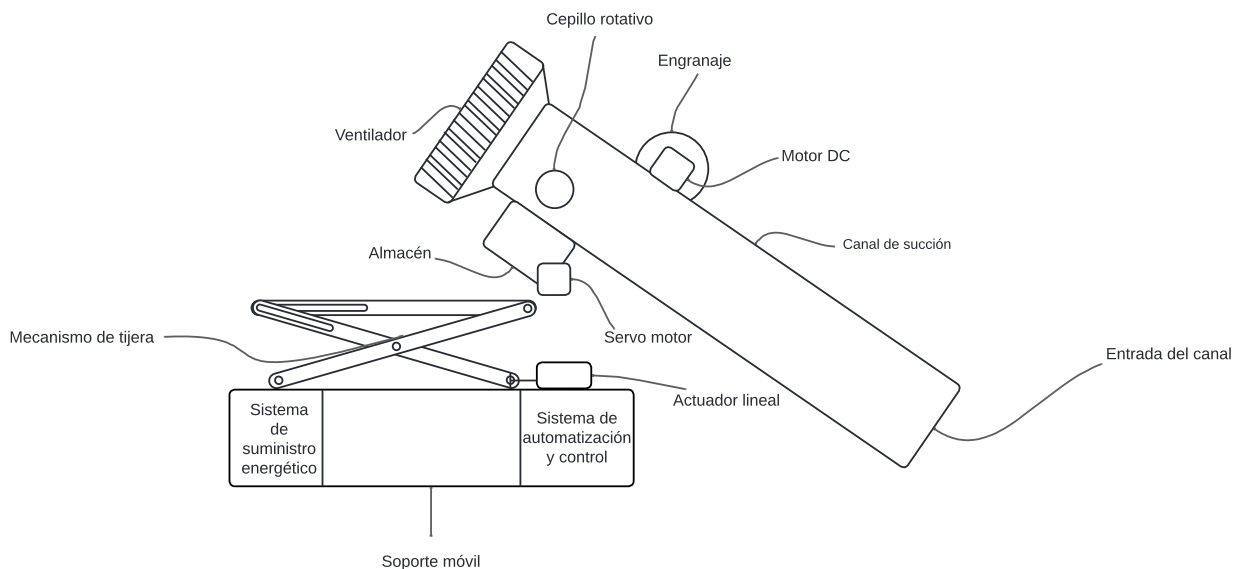


Figura 3.2: Arquitectura del sistema de limpieza. Propia autoría.

El dispositivo requerirá generar ciclos para la recolección y depósito de residuos. Además, debe ser de fácil mantenimiento y garantizar una eficiente operación. Estas consideraciones nos llevan a contemplar un proceso automatizado de limpieza y mantenimiento sencillo. Por lo tanto, es necesario contar con un microprocesador para gestionar los ciclos de limpieza, seleccionar cuidadosamente el actuador electromecánico e instalar sensores de manera estratégica para garantizar un proceso eficiente y con mínima intervención manual. Se presenta un diseño conceptual en 2D del dispositivo.

Se hará uso de un microprocesador Arduino UNO, ya que este permite una fácil comunicación entre sensor y microprocesador. además que permite la conexión de suministros de potencia para activar los dispositivos electromecánicos.

Se contará con un módulo de 6 relé, el cual, mediante instrucciones del microprocesador, activará cada dispositivo electromecánico.

3.2.1. Subsistema de recolección (ventilador, cepillo rotativo, motor DC, canal de succión, entrada del túnel y almacén)

El subsistema de recolección consta de: un túnel de viento o canal de succión, el cual debe ser diseñado para ser eficiente en términos de baja pérdida de carga y ahorro de material. Un sistema de cepillo rotativo que es accionado por un sistema de engranajes conectado a un motor DC. Por último un almacén, el cual estará instalado en la zona de descarga del canal de succión. Este último es importante que sea cerrado al ambiente durante la succión, ya que esto evitará fugas de caudal. En el se instala un sensor de proximidad, el cual dará información del nivel de hojas depositadas sobre el almacén. Dos servomotores abrirán la compuerta del almacén para que las hojas pasen a la zona de depósito.

Para el dispositivo encargado de generar succión, se seleccionó un ventilador DC de 24 V considerando un rango de caudal el cual genere movimiento de hojas. Las dimensiones, junto con su curva característica se exponen en la figura 3.3.

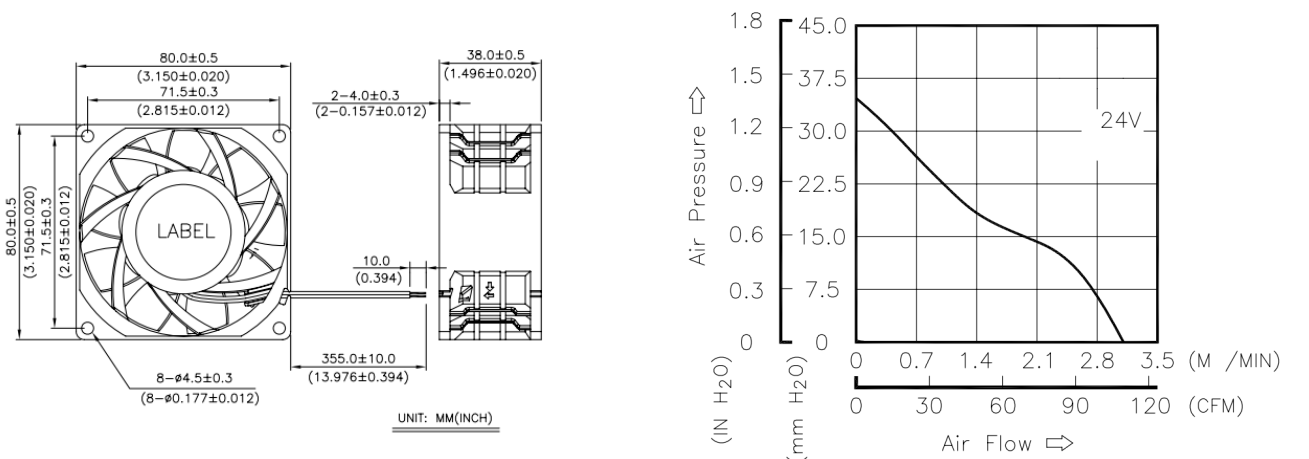


Figura 3.3: Dimensiones y curva característica del ventilador. Tomado de [31].

3.2.2. Diseño de la entrada del túnel

Para el análisis teórico se modela la hoja en el suelo como un rectángulo. Luego se observa su área proyectada al plano de succión (ver figura 3.4). se espera que las dimensiones de la entrada de succión no generen obstrucciones si cumplen con la geometría proyectada.

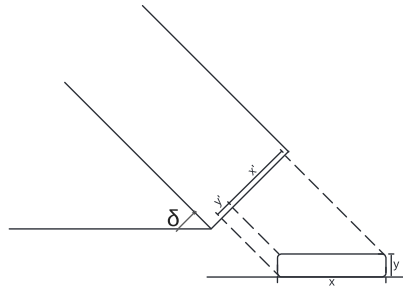


Figura 3.4: Diagrama conceptual del área proyectada en el plano de succión. Propia autoría.

La figura 3.4 muestra la idealización del sistema. para una hoja horizontal, ya que esta es la que tiende a girar y podría obstruir el canal. Con la ayuda de una hoja de calculo y con las dimensiones de la hoja, las cuales son ancho $x = 45$ mm y para y tomamos un valor de 3 cm, simulando hojas encima de otras. se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales pueden verse en la figura 3.5.

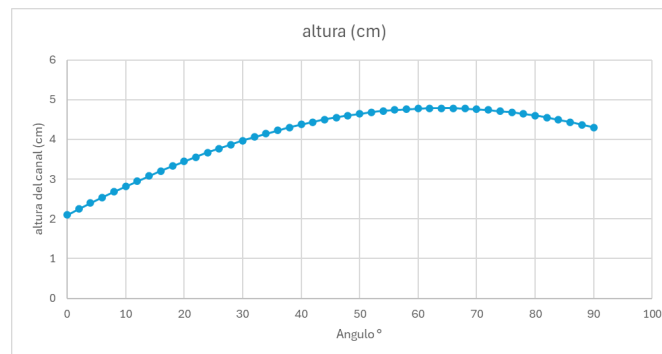


Figura 3.5: Gráfico altura de canal vs ángulo Modelo teórico. Propia autoría.

3.2.3. Diseño del canal de succión

Para el diseño del túnel de viento, hacemos uso de la teoría de flujo interno de la mecánica de fluidos de la referencia [28], diseño de difusores de la referencia [29] y coeficientes de resistencia para entrada de canales.

Se inició con el diseño del difusor, encontrando el ángulo óptimo de divergencia considerando menores pérdidas y ahorro de material. El diseño ya tiene parámetros establecidos como, dimensiones de entrada de succión y dimensión del ventilador, Las cuales son aportadas por el tamaño de las hojas y los parámetros de fabrica del ventilador, respectivamente. Por lo que, basándose

en las figuras 2.15 y 2.14, y la ecuación 5.18, podemos calcular el coeficiente total de resistencia con la ecuación 2.40. se eligió un ángulo de divergencia de $\alpha = 14$. Según la gráfica 2.15, tenemos $\zeta_d = 0,011$. La gráfica 2.14 nos muestra que para aproximadamente ese ángulo α , tenemos $k_1 = 0,33$, $\Delta\zeta = 0,016$ y $A = 1,15$. Usando la ecuación 5.18 tenemos un valor de $k_2 = 1,57$. Finalmente tenemos que el coeficiente $\zeta_{total} = 0,024$. Se calculó, usando la ecuación 2.38, el factor de fricción para un número de reynolds de $Re = 2,73 \cdot 10^4$, el cual, corresponde al régimen de caudal del ventilador que, según el área de entrada, corresponde a un flujo turbulento. se obtuvo un valor de $f = 0,023$ usando el valor de e para el acero plástico de la tabla 2.12. Para el coeficiente de resistencia a la entrada del canal, se consideró la figura 2.17. Basándose en las configuraciones de la figura 2.16. Tenemos que para un valor de $\delta \approx 0$, $\zeta_{in} \approx 0$. La ecuación 2.40 relaciona la velocidad del flujo y las pérdidas con la caída de presión Δp . Expandiendo esta ecuación para cada una de las regiones del túnel: entrada, tramo recto y contracción, construimos la siguiente ecuación, la cual corresponde a la ecuación 2.27 con pérdidas de energía. La ecuación queda:

$$\Delta P = \rho \left(\frac{\zeta_{in}}{2} \cdot \left(\frac{Q}{A_{in}} \right)^2 + \frac{fL}{2D_h} \cdot \left(\frac{Q}{A_{in}} \right)^2 + \frac{\zeta_{total}}{2} \cdot \left(\frac{Q}{A_{out}} \right)^2 \right). \quad (3.1)$$

Usando la densidad del aire a 15°C, podemos variar Q de $0 - 0,0527 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto nos permite graficar la curva de presión vs caudal del sistema. Dicha curva se muestra en la figura 3.6.

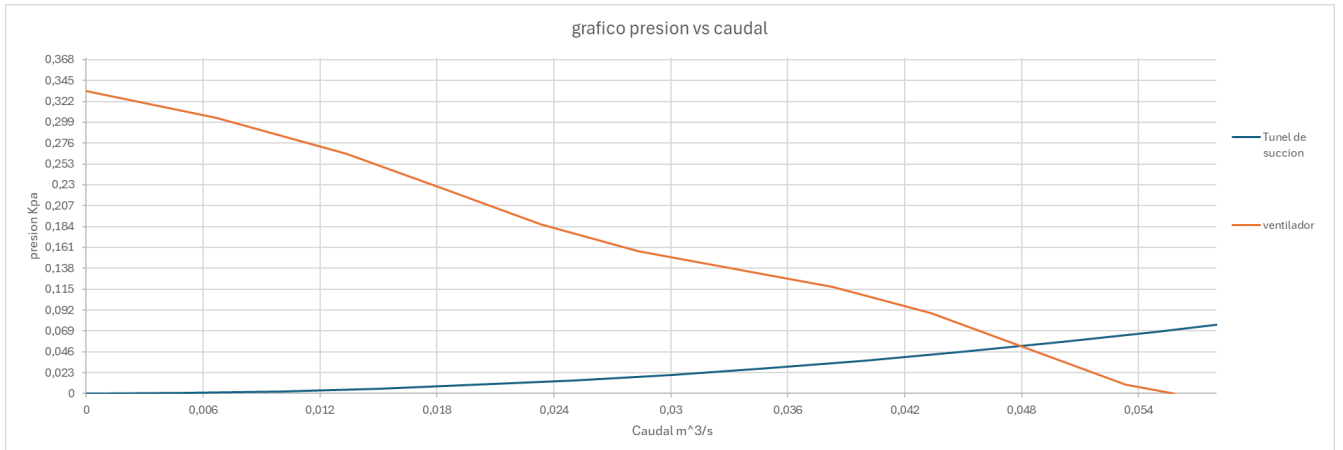


Figura 3.6: Gráfica presión vs caudal del sistema y del ventilador DC. Propia autoría.

La función que se muestra en la gráfica 3.6, que gobierna el sistema de succión es:

$$\Delta P = 1,2754 \cdot \left(\frac{0,01}{2} \cdot \left(\frac{Q}{0,0067} \right)^2 + \frac{0,067 \cdot 0,18}{2 \cdot 0,069} \cdot \left(\frac{Q}{0,0067} \right)^2 + \frac{0,024}{2} \cdot \left(\frac{Q}{0,0064} \right)^2 \right), \quad (3.2)$$

del gráfico 3.6 se observa el punto de operación del ventilador, que corresponde al punto donde las curvas se tocan. Este punto dice el caudal que está fluyendo sobre el túnel y la presión que debe vencer el ventilador para mover ese caudal de aire. El caudal de aire es de **0,048 $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$** , el cual da una velocidad del aire **$\mathbf{V} = 7,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$** . re calculando Reynold tenemos que $Re = 3,2 \cdot 10^4$ confirmando un flujo turbulento.

Para este modelo teórico se usaron las ecuaciones sin considerar que en el canal se encuentra un eje rotatorio con cepillos. Para un análisis más cercano a la realidad se debe realizar simulaciones de fluidos sobre el túnel de succión.

En la ecuación 3.2 se observa un $L = 0,18m$. esa es la distancia entre el piso y la plataforma del dispositivo de la figura 3.1. Esta distancia es considerada para un ángulo de succión entre 30° a 40° .

3.2.4. Diseño del cepillo rotativo

Un motor DC de 12V y es el encargado de generar la potencia para el giro del cepillo rotativo. Este flujo de potencia se hará por medio de engranes rectos. Se seleccionó un tren de engranajes de dos engranes rectos. Se denominan G_{in} y G_{out} para el engrane del motor y el engrane del cepillo respectivamente. Se denomina Engrane al engranaje conectado el motor y piñón al engranaje conectado al eje. Esto debido a que el cepillo rotativo necesitará más revoluciones que torque. Se seleccionaron dos engranajes con módulo 1 y una razón de engrane de 0,4. La figura 3.7 muestra el diseño en CAD del los engranajes.



Figura 3.7: Engranajes usados en el sistema de cepillos rotativos. Propia autoría.

3.2.5. Diseño del almacén

Para el diseño del sistema de almacenamiento se consideró que este debe estar sellado respecto al ambiente, ya que de este modo se evitan pérdidas de presión en el túnel de succión. El almacén retendrá las hojas que entren durante el proceso de succión. Este tiene un volumen efectivo de $0,0014036 m^3$. Dos servomotores SG90 fueron instalados en la base del depósito, permitiendo la apertura de este.

Las características del motor SG90 son:

- Peso: 9g.
- Dimensiones: 22.2 x 11.8 x 31 mm
- Torque de bloqueo: $1,8kgf \cdot cm$.
- Voltaje de operación: 5V.

Se seleccionó este dispositivo ya que permite la manipulación del giro de su eje mediante impulso PWM para orientarlo a cualquier ángulo deseado en un rango de 180° . Por otro lado, el torque de bloqueo es el adecuado para soportar la base y las hojas almacenadas, según los datos teóricos del dispositivo.

El sensor usado en el almacén es un TCRT5000 que hace parte de los dispositivos fotosensibles expuestos en el marco teórico. Se seleccionó esta referencia ya que el sistema no necesita una gran capacidad de precisión ni de frecuencia de muestreo. Este dispositivo enviará una señal, cuando

pase cierto umbral, a un Arduino, el cual, enviará una señal a los servo motores que abrirán la compuerta a 45°.

3.3. Subsistema de depósito (mecanismo de tijera y actuador lineal)

El sistema de depósito consta de un mecanismo de tijera accionado por un actuador lineal, el cual es controlado por un Arduino. Bajo el depósito se encuentra una celda de carga, que en otras palabras es un elemento con galga extensométrica. La galga manda una señal analógica a un módulo HX711, el cual es un convertidor de señales, para que sea manipulada por un Arduino. Se seleccionó esta celda de carga, ya que es precisa y puede medir pequeños cambios en el peso. además, el módulo HX711 es de 24 bits garantizando buena precisión en los datos. La figura 3.8 muestra una fotografía de los sensores usados.



Figura 3.8: Celda y módulo HX711. Propia autoría.

Un Arduino registra la lectura de la celda, y cuando esta llegue a un umbral, activará el actuador lineal que controla el mecanismo.

A continuación se muestran los conceptos teóricos que fundamentan el material y diseño del mecanismo de elevación. Vamos a realizar los siguientes análisis para ello:

1. Selección del actuador lineal.
2. Análisis de posición.
3. Análisis estático.
4. Análisis de esfuerzos.
5. Diseño de los eslabones considerando factores de seguridad.

Ya que el actuador lineal presenta muy bajas aceleraciones, se aborda solo un análisis estático en las posiciones más críticas, ya que las fuerzas inerciales son despreciables. Tras analizar diversas opciones para accionar este mecanismo, se optó por la selección de un actuador lineal Shaoke IP60-YR de 100 mm de carrera, 12 V de voltaje y 90 N de máxima carga, el cual se muestra en la figura 3.9.

La elección de este actuador lineal está basada en su simplicidad de integración y eficiencia. Al proporcionar un desplazamiento lineal controlado, se ajusta perfectamente a las necesidades de un mecanismo de tijera, permitiendo que la elevación se realice de manera precisa y sin requerir un diseño mecánico complejo.

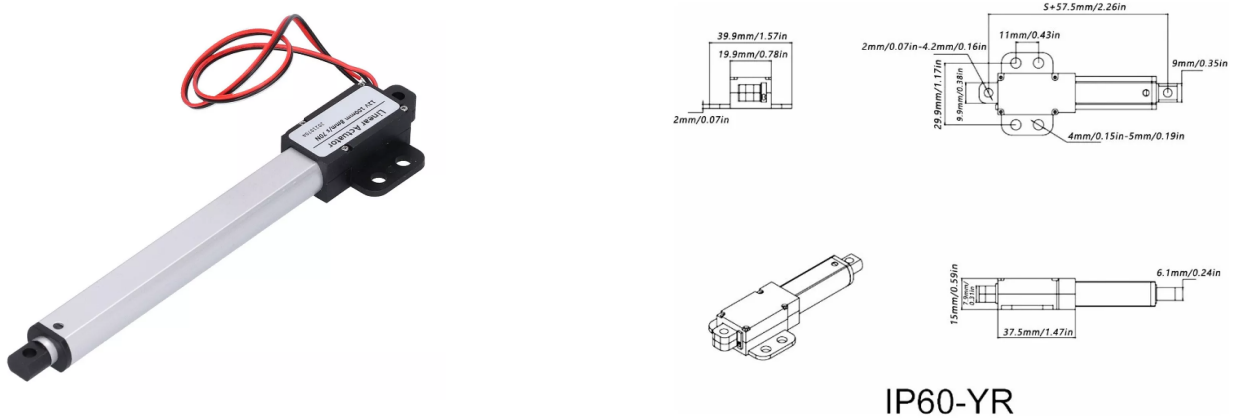


Figura 3.9: Actuador lineal Shaoke IP60-YR. Tomado del vendedor.

3.3.1. Análisis de posición

Para garantizar el correcto funcionamiento del mecanismo de elevación tipo tijera, se realizaron iteraciones utilizando la ecuación 2.15, con el objetivo de definir las dimensiones óptimas de los eslabones que permitan un desplazamiento adecuado. Este análisis tomó en cuenta las siguientes restricciones geométricas clave:

- La distancia x_2 máxima correspondiente al recorrido máximo del actuador lineal, fue establecida en 100 mm. Este valor representa el límite de extensión del actuador Shaoke seleccionado, el cual es responsable de accionar el mecanismo.
- La altura máxima y_2 se fijó en 22 cm, lo cual representa la altura del pretil del techo. El sistema deberá superar este obstáculo para arrojar los desechos hacia el exterior, permitiendo que estos caigan al pie del árbol ubicado en las inmediaciones del edificio.

Con estos valores de entrada, se realizaron las iteraciones correspondientes y se concluyó que la longitud óptima de los eslabones del mecanismo de tijera debe ser de **243.166 mm**. Esta medida asegura que el sistema podrá cumplir con los requisitos operacionales, superando las restricciones geométricas impuestas por el entorno y permitiendo un funcionamiento adecuado tanto en la recolección como en la expulsión de los residuos. La figura 3.10 muestra las posiciones del mecanismo de tijera, junto con sus medidas.

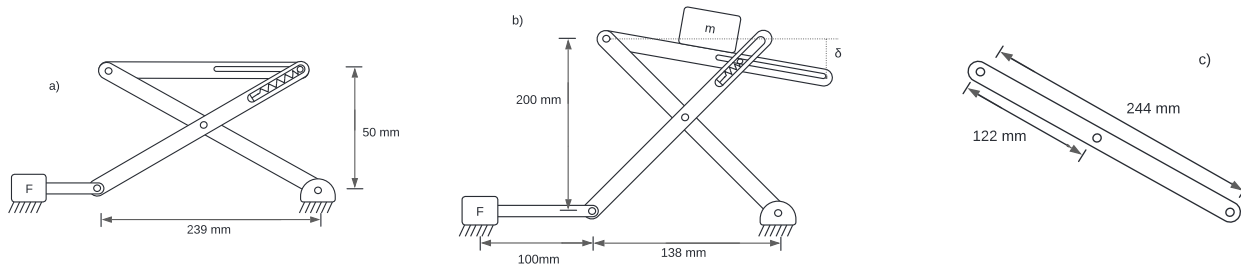


Figura 3.10: a) medidas posición inicial, b) medidas posición final c) medidas eslabón. Propia autoría.

El mecanismo, en la posición final, presenta un δ de desplazamiento debido a la contracción del resorte, esto cumple con el requisito de descarga sobre el pretel de la estructura. Posteriormente, al encontrar la fuerza normal sobre el resorte, se calculará cual debe ser el delta de desplazamiento para cumplir con el requisito de descarga.

3.3.2. Análisis estático

Un esquema que refleja el mecanismo es el expuesto en la figura 3.11. consideramos los siguientes parámetros:

- si la longitud del actuador lineal está totalmente contraída es L_1 y si está totalmente elongado será L_2

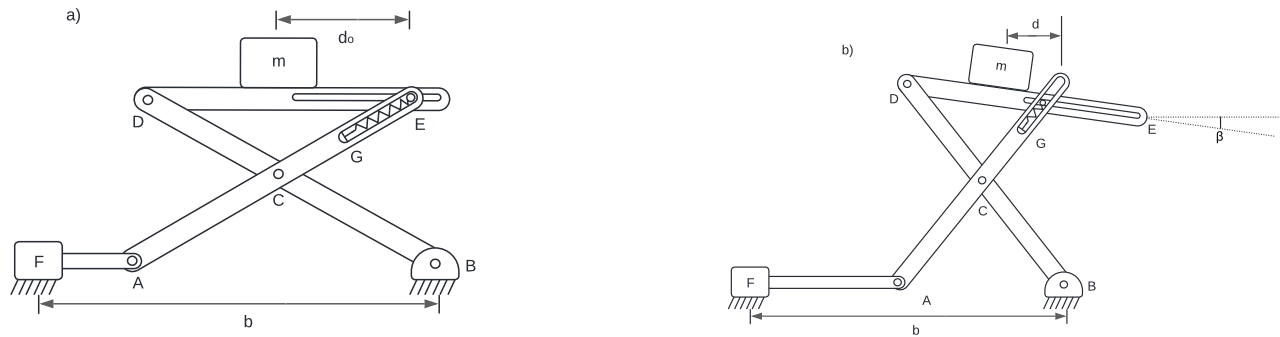


Figura 3.11: Mecanismo de tijera. a) posición inicial. b) posición final. Propia autoría.

Se realiza un análisis de fuerzas presentes en cada eslabón, por lo que realizaremos un diagrama de cuerpo libre para cada eslabón y del sistema. Las figuras 3.12 y 3.13 muestran el diagrama de cuerpo libre del sistema y de cada eslabón.

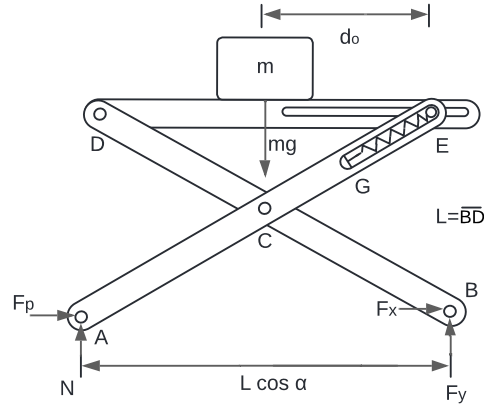


Figura 3.12: DCL del sistema. Propia autoría.

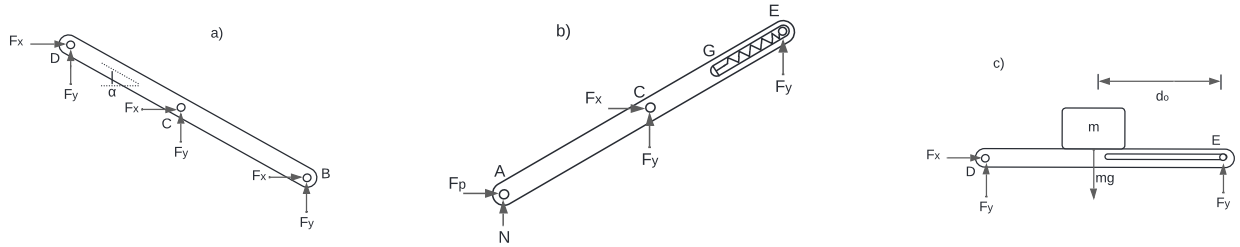


Figura 3.13: a) DCL eslabón BDC. b) DCL eslabón ACE. c) DCL Plataforma. Propia autoría.

De los gráficos podemos caracterizar F_p como la fuerza del actuador lineal y N una fuerza normal. Resolveremos el sistema de forma perimétrica, para luego obtener un gráfico de las fuerzas variando respecto al cambio del ángulo α . De la figura 3.12 realizamos una sumatoria de momentos respecto al punto B obtendremos lo siguiente, luego, realizar sumatoria de fuerzas verticales:

$$\sum M_B = 0 = mgd_0 - NL \cos \alpha \Rightarrow N = \frac{mgd_0}{L \cos \alpha}, \quad (3.3)$$

$$F_{By} = mg \left[1 - \frac{d_0}{L \cos \alpha} \right]. \quad (3.4)$$

Siguiendo un mismo análisis para las figuras 3.13 a,b,c. Obtenemos las siguientes expresiones:

$$F_{Dy} = \frac{mgd_0}{L \cos \alpha}, \quad F_{Ey} = mg \left[1 - \frac{d_0}{L \cos \alpha} \right], \quad F_{Dx} = 0, \quad F_{Bx} = -F_p. \quad (3.5)$$

$$F_p = mg \cot \alpha, \quad F_{Cy} = mg \left[1 - \frac{2d_0}{L \cos \alpha} \right], \quad F_{Cx} = -mg \cot \alpha. \quad (3.6)$$

Según el artículo[35], el coeficiente de fricción estático es considerable a altas cargas (de 30N hacia adelante), por lo que la fricción presente en el punto deslizante E es despreciable. Debido a que el actuador cambiara su longitud durante todo el recorrido, también α cambia, teniendo un valor inicial y final de:

$$\alpha_1 = \arccos \frac{b - L_1}{L}, \quad \alpha_2 = \arccos \frac{b - L_2}{L}. \quad (3.7)$$

Se graficaron los resultados del análisis para cada valor de α , usando un peso de 1 kg, que corresponde a todo el peso m . También se uso una matriz de rotación para encontrar las fuerzas normales y tangenciales de los eslabones. La matriz de rotación es:

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} = k.$$

Resultados: en la figura 3.14 se presentan los resultados en gráficos F vs α para cada punto de interés.

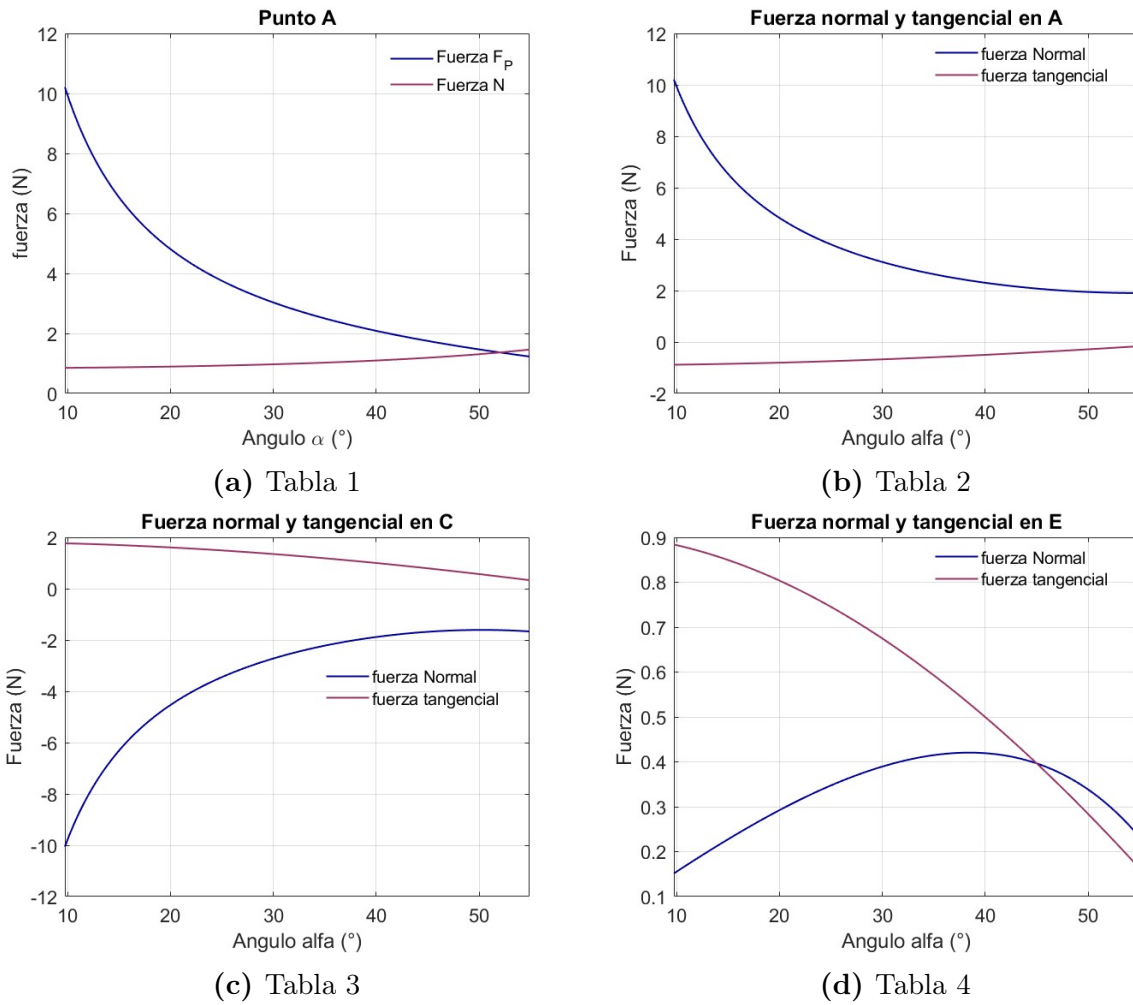


Figura 3.14: Resultados analíticos. Propia autoría.

Se observa la correcta selección del actuador IP60-YR, ya que, según el análisis, La fuerza requerida F_p inicial es superada por la fuerza máxima del actuador. $F_{p_{inicial}} < 90N$. Por ahora

se ignora la fuerza del resorte, ya que debemos seleccionar el indicado para cumplir con un δ de desplazamiento. La figura 3.15 muestra las fuerzas presentes en cada pin de giro.

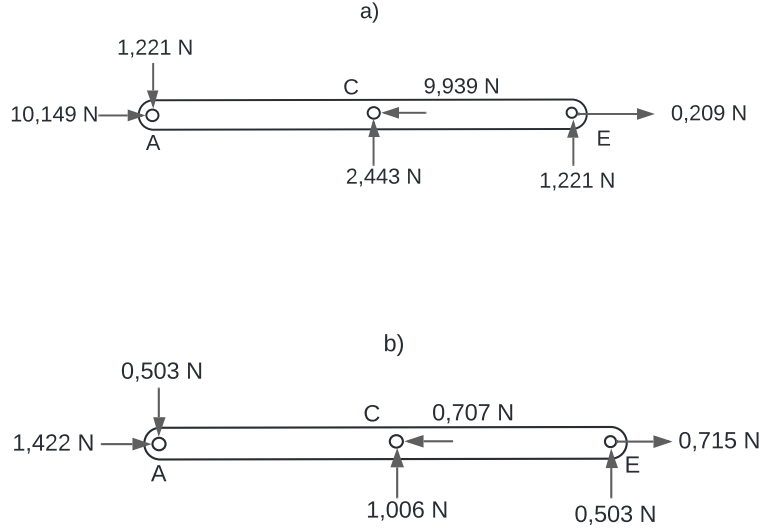


Figura 3.15: Eslabón con mayores cargas, orientadas en dirección Normal y tangencial al eslabón. a) Diagrama de fuerzas, posición inicial. b) Diagrama de fuerzas, posición fina. Propia autoría.

Usando la teoría de falla de la ecuación 2.43 donde $F_N = 10,149N$, $F_v = 1,221N$, $M_m = 0,148N \cdot m$ tomados de los diagramas de la figura 3.15. Ya que tomaremos una sección rectangular, $I = \frac{bh^3}{12}$, h = el ancho alto del eslabón y b = el ancho del eslabón. Resolvemos la ecuación 2.43 para encontrar al valor de L , tomando un factor de seguridad de 3. Obtenemos 6 resultados para L , 4 de ellos imaginarios y 2 reales. Tomamos el valor positivo de los reales el cual es $L = 6mm$. Es decir, el valor, del área transversal del eslabón, para un mecanismo de tipo tijera de elevación que cumpla con los requisitos de este sistema, debe ser como mínimo de $6mm$ para un área cuadrada. Aquí se ignoraron las cargas relacionadas con la fuerza del viento presente en el área de trabajo, por lo que se debe tener precaución a la hora de realizar su función.

3.4. Subsistema de control

Para ilustrar mejor el sistema de control y monitoreo se realizo un diagrama de flujo de actividades donde se puede observar el protocolo de acciones que toma el sistema. La figura 3.16 muestra el sistema de interacción.

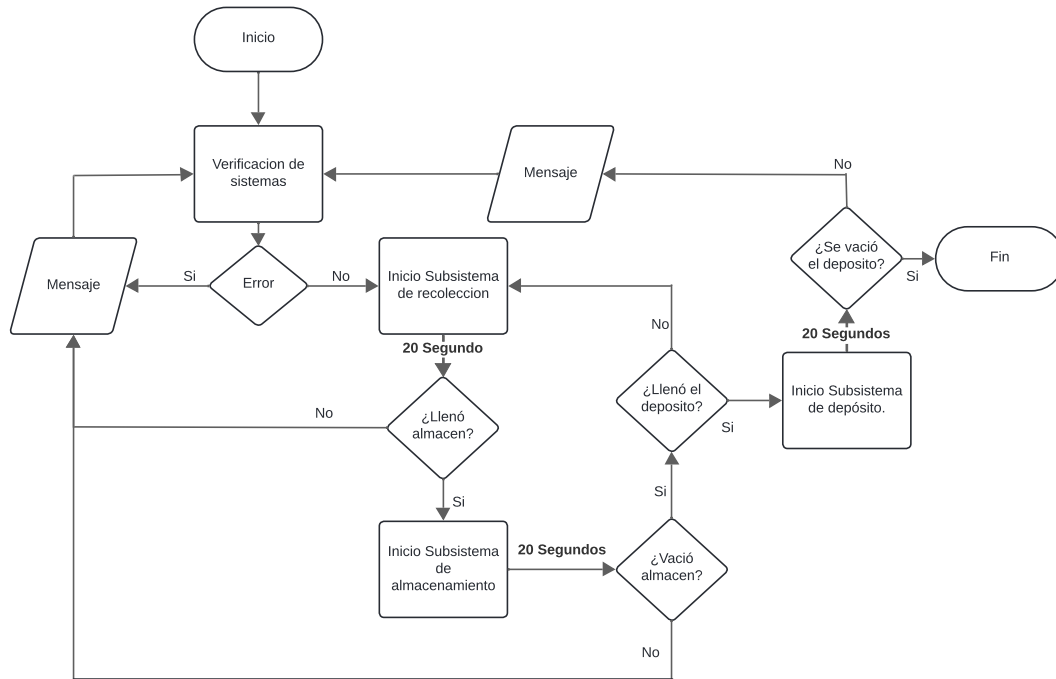


Figura 3.16: Flujo de acciones del sistema de limpieza. Propia autoría.

El sistema de limpieza inicia con la instrucción de un arduino maestro. Se da inicio al sistema de limpieza. El maestro debe verificar si hay antecedentes de anteriores mensajes de error, si no, inicia el subsistema de recolección, el cual enciende el ventilador y el motor DC. Se espera 20 segundo para que el almacenamiento comience a llenarse, el sensor de proximidad en instalado en el almacén brinda esa información. si no se cumple con ese requisito, el Arduino esclavo envía un mensaje al Arduino maestro informando que hay un error en el subsistema de recolección. En caso de que el almacén se llene en los 20 segundos inicia el subsistema de almacenamiento, el cual activa los servo motores a un ángulo de 45°, espera 20 segundos y el sensor de proximidad del almacén deberá detectar que no hay ningún objeto dentro de su campo de detección. De no ser así, se envía un mensaje al Arduino maestro informando un fallo en el subsistema de almacenamiento. Si el sistema detecta que el almacén está vacío, revisa el nivel del depósito con el sensor de carga. Si este aun no cumple un umbral, quiere decir que el depósito puede albergar más hojas, por lo que vuelve a iniciar el proceso de recolección. Si el depósito esta lleno, inicia el subsistema de depósito. Se activa el actuador lineal por 10 segundos en polaridad directa, lo que produce un despliegue de su brazo móvil accionando el mecanismo de tijera, luego se invierte la polaridad durante 10 segundos contrayendo su brazo y volviendo el mecanismo a su posición inicial completando el movimiento del mecanismo de tijera. Se revisa la lectura del sensor de carga, si no registra una lectura que confirme el vaciado del depósito, el Arduino esclavo envía un mensaje de error al maestro informando fallas en el subsistema de depósito. de lo contrario, se finaliza el proceso y queda a la espera de una nueva instrucción de inicio.

3.4.1. Protocolo de comunicación

El código define una dirección Hexadecimal $0x08$ la cual describe la dirección del arduino esclavo encargado del sistema de limpieza.

Se creó dos funciones llamadas **requestEvent()** y **receiveEvent()** las cuales son enviar datos al Arduino maestro y recibir información del Arduino maestro, respectivamente. El arduino esclavo envía información en una cadena de caracteres de 20 bytes. Estos llevan la información del valor de cada sensor, además informa sobre cual subsistema esta actuando. El arduino esclavo recibe información de un byte, tipo char, por ejemplo una letra, para iniciar el proceso de limpieza. El arduino esclavo enviará información al maestro, siempre y cuando el maestro lo solicite. Esto es propio de una comunicación I^2C . Se comprobó el funcionamiento del protocolo usando dos arduino, sensores y el los módulos relé. Siguiendo el flujo de acciones mostradas en el diagrama 3.16.

4. Construcción del prototipo

En este capítulo, luego de realizar los procedimientos teóricos y conceptuales, se muestra la construcción y experimentación de un prototipo en material de impresión PLA. Con el fin de observar su comportamiento y realizar pruebas experimentales, las cuales afinen más el diseño del sistema.

4.1. Subsistema de recolección

Se realizó inicialmente un análisis teórico como punto de partida. Posteriormente, se llevaron a cabo experimentos con diferentes áreas de entrada con el fin de evaluar su comportamiento y seleccionar las dimensiones más óptimas.

Asimismo, se efectuaron pruebas de succión utilizando hojas en distintas disposiciones (vertical, horizontal y con ángulo) para observar su comportamiento dinámico bajo diferentes ángulos de succión. La figura 4.1 muestra las distintas posiciones de orientación para una hoja, la cual, se observa el comportamiento de succión.

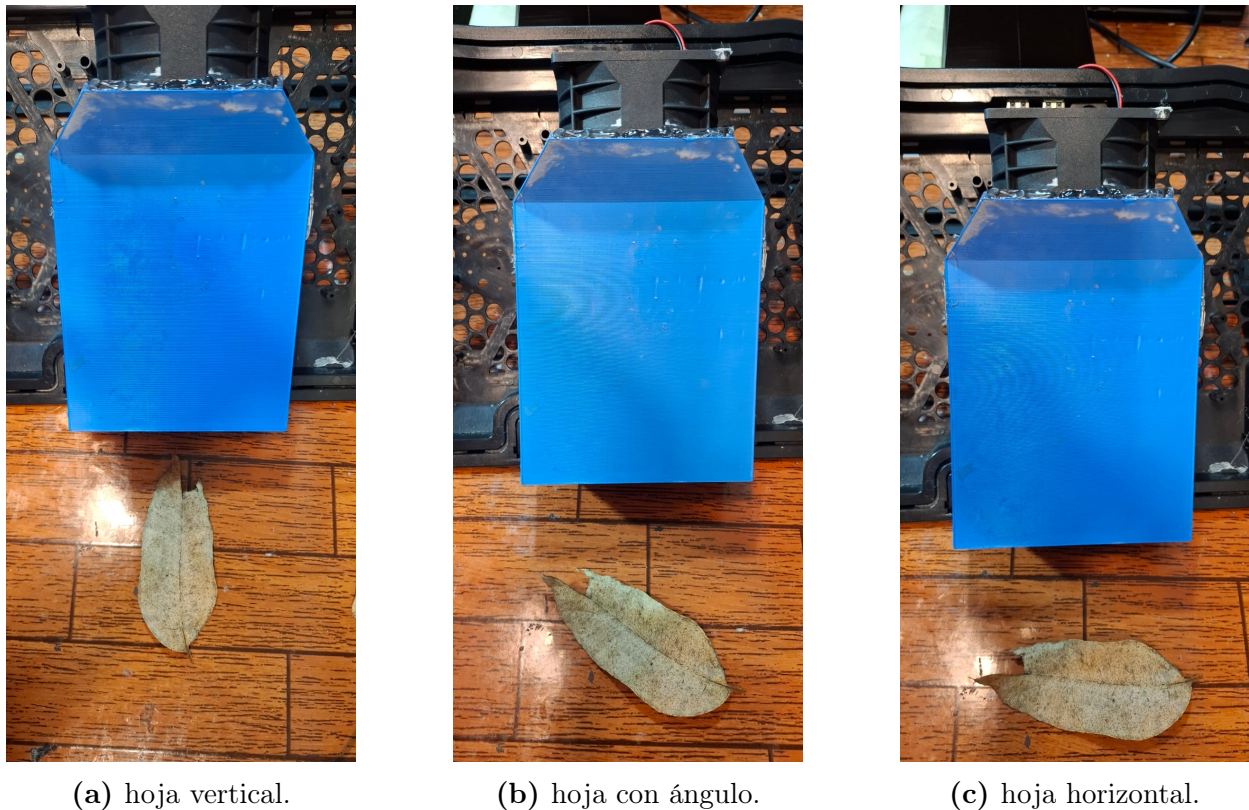


Figura 4.1: Registro gráfico de la disposición de las hojas. Propia autoría.

Así mismo, se experimentó variando el ángulo de succión usando una plataforma, como se muestra en la figura 4.2.

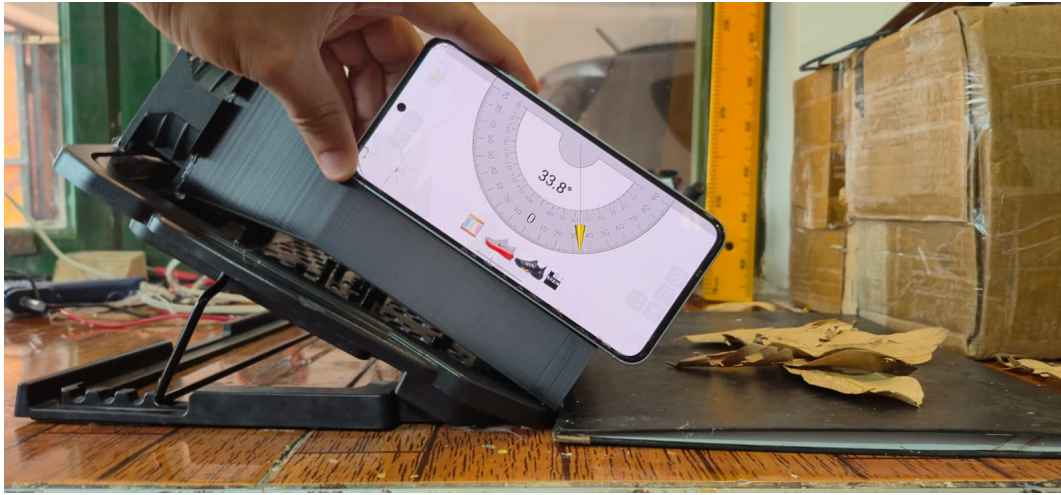


Figura 4.2: Registro gráfico del método de medición de ángulo. Propia autoría.

Se observa que cada hoja presenta un movimiento particular, debido a que su masa no se encuentra distribuida de manera homogénea a lo largo de su volumen. No obstante, existen comportamientos comunes entre ellas. Por ejemplo, una hoja dispuesta de forma horizontal tiende a girar sobre su propio eje, de modo que la zona de menor masa es la primera en iniciar el movimiento.

En el caso de una hoja ubicada en posición vertical, la parte más cercana al túnel es la que se eleva inicialmente. De manera similar, para una hoja colocada con cierto ángulo, la región más próxima al túnel es la que comienza a levantarse bajo la acción de la succión.

Se sometieron 5 diseños, basados en la figura 3.5, a experimentación para corroborar la proximidad del modelo teórico, al comportamiento real de la hoja. La figura 4.3 muestra los 5 prototipos usados para la experimentación.

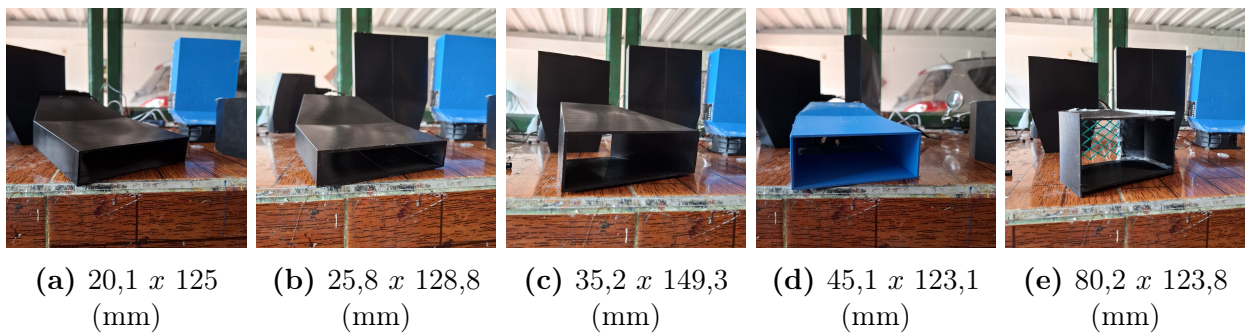


Figura 4.3: Prototipos para prueba de obstrucción. Propia autoría.

De la prueba experimental se concluyeron las siguientes tablas. Se varió el ángulo de succión y se observó si hubo obstrucción para cada configuración de hojas. Se tomaron 8 pruebas cambiando la ubicación de las hojas. Se marco con una x si la configuración generó obstrucción. Las tablas 4.1, 4.2 y 4.3, muestran los resultados experimentales.

Tabla 4.1: Resultado del desempeño de cada prototipo frente a la presencia de obstrucción para una hoja en horizontal con variación de ángulo de succión.

ángulo de succión	Hoja en horizontal				
	45,1×123,1 mm	35,2×149,3 mm	25,8×128,8 mm	80,2×123,8 mm	20,1×125 mm
15,4°					x
25,0°			x		x
35,4°		x	x		x
44,7°		x	x		x
90°	x	x	x		x

Tabla 4.2: Resultado del desempeño de cada prototipo frente a la presencia de obstrucción para varias hojas amontonadas con variación de ángulo de succión.

ángulo de succión	Hojas amontonadas				
	45,1×123,1 mm	35,2×149,3 mm	25,8×128,8 mm	80,2×123,8 mm	20,1×125 mm
15,4°					x
25,0°			x		x
35,4°		x	x		x
44,7°		x	x		x
90°	x	x	x		x

Tabla 4.3: Resultado del desempeño de cada prototipo frente a la presencia de obstrucción para hojas en horizontal que superen el ancho del canal con variación de ángulo de succión.

ángulo de succión	hojas en posición que supere el ancho del canal				
	45,1×123,1 mm	35,2×149,3 mm	25,8×128,8 mm	80,2×123,8 mm	20,1×125 mm
15,4°					x
25,0°			x		x
35,4°		x	x		x
44,7°		x	x		x
90°	x	x	x		x

Basándose en los resultados de las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 concluimos que una altura de **4.5 cm** para el canal, a un ángulo de succión de 30° a 40° es óptimo para la aplicación. La figura 4.4 muestra la construcción del sistema de succión.

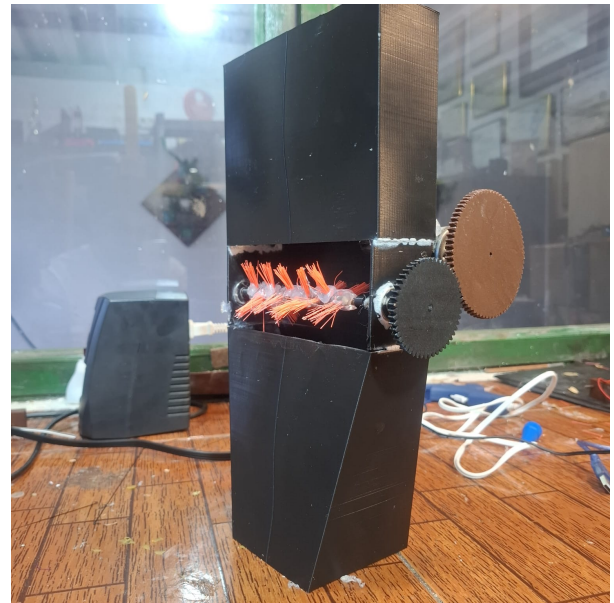


Figura 4.4: Construcción del sistema de succión. Propia autoría.

Se usaron cojinetes axiales G07RS ubicados entre la pared del canal de succión, estos permiten que el rodillo gire libremente, además de soportar la carga axial debida a la transmicion de potencia desde el motor hasta el rodillo.

Para evitar atascos entre el ventilador y las hojas, se instalo una rejilla plástica al interior del canal, como se muestra en la figura 4.5. Este esta ubicado justo después de los rodillos. Esto evita que si alguna hoja supera el obstáculo de los rodillos, los rodillos puedan redireccionarlo.



Figura 4.5: Rendija plástica para evitar atascos.

4.2. Subsistema de depósito

Para la construcción del Sistema de depósito, se usó material de impresión PLA. Se diseñó un sujetador que permite la transmisión de movimiento desde el actuador lineal hasta los eslabones.

Para permitir un suave movimiento giratorio, se instalaron rodamientos de bolas G07RS, los cuales según la bibliografía de [30] son ideales para soportar cargas axiales presentes en los puntos A, D, C y B. Para permitir un movimiento lineal del punto A, se instalaron rodamientos lineales. Estos permiten el desplazamiento lineal de A en dirección de B. Luego del análisis teórico, se procedió a la construcción del prototipo. La figura 4.6 muestra el mecanismo, junto con el actuador lineal.

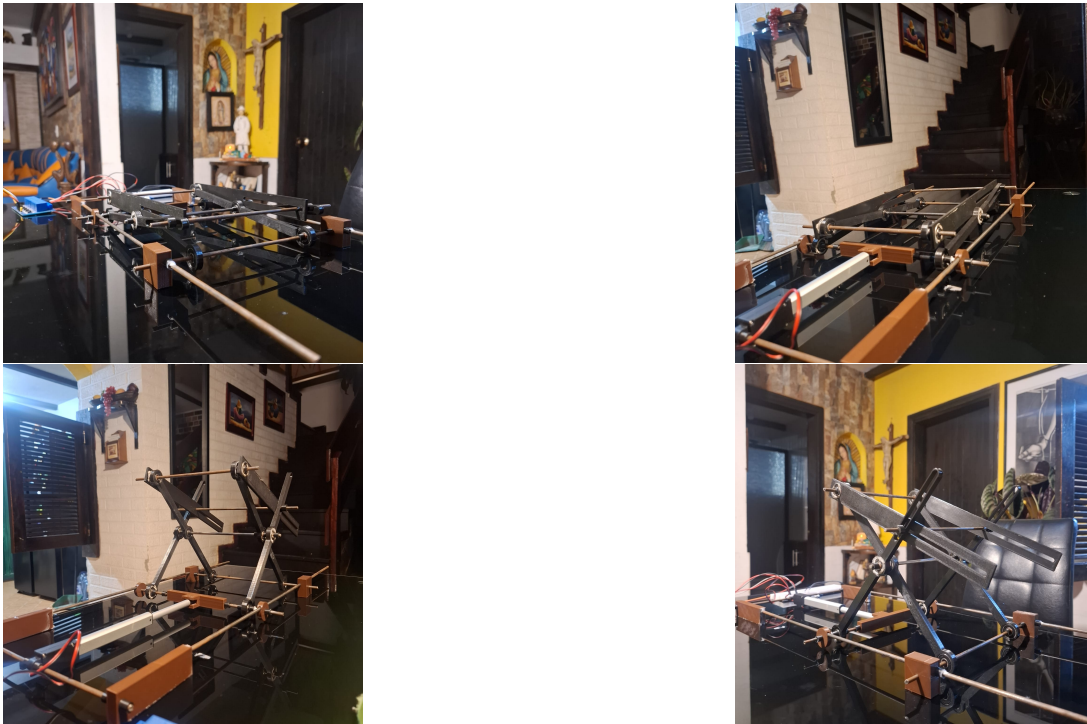


Figura 4.6: Fotografías del prototipo construido. Propia autoría.

4.3. Ángulo de depósito

El diseño de la base del depósito permite tanto el movimiento axial, como rotacional. El ángulo de rotación se debe estimar basándose en el coeficiente de fricción entre las hojas y el material donde va a estar soportado. se usó vidrio como material de base.

Se realizaron 9 pruebas para distintas configuraciones de hojas, como se muestra en la figura 4.7. El ángulo, con la ayuda de una plataforma, fue lentamente variando hasta encontrar el punto donde las hojas comienzan a deslizarse.

Los resultados se exponen a en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Resultados del ángulo crítico de deslizamiento.

hoja horizontal		hoja vertical		varias hojas	
n	ángulo (0.1°)	n	ángulo (0.1°)	n	ángulo (0.1°)
1	24,1	1	32,3	1	25,0
2	25,3	2	29,8	2	25,8
3	22,3	3	30,9	3	19,9
4	22,1	4	36,2	4	19,4
5	25,7	5	30,7	5	23,5
6	21,1	6	32,4	6	19,8
7	23,2	7	33,2	7	20,1
8	22,3	8	30,0	8	21,2
9	21,5	9	29,9	9	19,2



Figura 4.7: Configuraciones del experimento con hojas. Propia autoría.

Los resultados muestran que, en promedio, una hoja en posición horizontal comienza a deslizarse cuando el ángulo es de 23,4. Cuando la hoja se coloca en posición vertical, el deslizamiento se produce alrededor de 32,1. En el caso de varias hojas superpuestas, el ángulo crítico es aproximadamente 22,3.

usando la ecuación, que permite encontrar el coeficiente de fricción:

$$\mu_{fr} = \tan(\alpha_{cr}) \approx 0,43. \quad (4.1)$$

La figura 4.8 muestra el ángulo resultante luego de la construcción del subsistema de depósito.

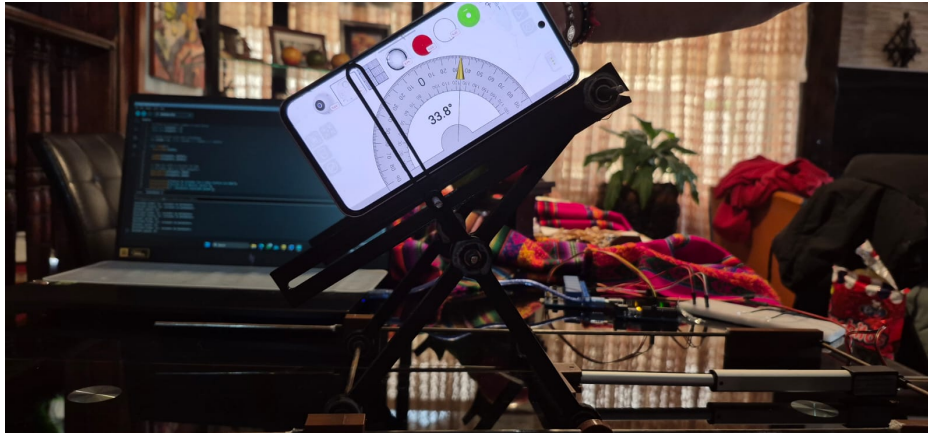


Figura 4.8: ángulo resultante luego de la construcción (33.8°). Propia autoría.

4.4. Parámetros generales del dispositivo

1. Para mejorar el mecanismo de succión, se recomienda que la limpieza se haga mientras el movimiento del dispositivo de movilidad este activo acercándose a las hojas.
2. No fue necesaria la adición de un resorte en el mecanismo de elevación de tipo tijera.
3. Los sensores usados en este proyecto no tienen una excelente repetibilidad en sus lecturas. Se recomienda usar el mismo tipo de sensor, pero de mejor calidad. Para el sensor de proximidad se recomienda un sensor LJ18A3. y para un sensor de carga HBK PW15AH C6, el cual podría permitir enviar al Arduino maestro el peso exacto, y número aproximado de hojas que hay en el depósito.
4. El consumo total de energía del sistema es de:
 - ventilador: $48W$
 - motor : $12W$
 - Actuador lineal: $12W$
 - Servo motor: $3W$
 - módulo relé: $2,5W$
 - Arduino: $0,4W$

El consumo total de del sistema es de $W_T \approx 77,9W$

5. Es posible mejorar el sistema cambiando a otro ventilador DC por otro con mayor capacidad de caudal y potencia. Se usa la misma ecuación 3.2 y se observa el cruce del la función del sistema de succión con la gráfica característica de un nuevo ventilador.
6. La construcción de este dispositivo debe tener tolerancias de $0,25mm$ ya que, para el sistema de succión, debe considerarse el almacén totalmente sellado y así evitar pérdidas de flujo.
7. El sistema construido en PLA, pesó 8 kg sin estación de suministro de energía.

Para finalizar, se expone una matriz de cumplimiento (ver tabla 4.5), la cual expresa, basándose en los requerimientos de la tabla 3.1, el cumplimiento de cada ítem expuesto.

Tabla 4.5: Matriz de cumplimiento del sistema.

Requerimientos	Descripción	Cumplimiento
1. Tamaño de hojas	El dispositivo debe ser capaz de recoger las hojas basado en el tamaño de sus hojas.	Figura 4.9
2. Peso del actuador.	El actuador debe tener un peso adecuado para su instalación en la zona de trabajo.	Sección 4.4, ítem 7.
3. Capacidad de captura para hojas sobre el canal.	El actuador debe recoger las hojas que yacen en el canal.	https://youtu.be/RrOUCzo1K1
4. Volumen de recolección.	El sistema debe ser capaz de limpiar la zona efectiva en 3 ciclos de limpieza.	Figura 6.4 y https://youtu.be/w3tTubbvz4
5. Bajo consumo eléctrico.	El sistema debe operar con un consumo eléctrico reducido que permita su funcionamiento.	Sección 4.4, ítem 4.
6. Autonomía energética.	El actuador debe poder ser alimentado por una fuente de alimentación portátil.	Estación de energía portátil Bluetti Ac2p. [36]
7. Fácil mantenimiento.	El sistema debe ser de fácil mantenimiento según la información del sistema de control.	Se usaron dispositivos fáciles de intercambiar.
8. Depositar las hojas fuera del edificio.	El dispositivo debe ser capaz de depositar las hojas fuera del edificio, según las medidas del pretil.	https://youtu.be/w3tTubbvz4

La figura 4.9 muestra las medidas del canal de entrada luego de la construcción del subsistema de succión.



Figura 4.9: Evidencia del requerimiento 1.

5. Conclusiones

- Se evaluó y seleccionó el tipo de actuador electromecánico más adecuado para cada subsistema, considerando las condiciones geométricas y físicas del espécimen a desechar. Asimismo, se analizaron las condiciones meteorológicas del entorno, lo que permitió escoger materiales apropiados. Se revisaron diversos estudios y patentes de sistemas de limpieza robótica, lo cual facilitó la selección de los actuadores más convenientes para la tarea de limpieza y proporcionó una visión clara sobre el diseño de la automatización y el manejo de sensores y señales.
- Se realizó el diseño de cada subsistema con base en fundamentos teóricos, que aportaron soporte científico al diseño conceptual elaborado en el primer objetivo. Debido a la particular geometría de las hojas, se llevaron a cabo pruebas experimentales con prototipos de succión, en las cuales se observaron fenómenos de obstrucción y caída de caudal. Estos resultados fueron clave para optimizar el diseño y evitar pérdidas de eficiencia. Para determinar un ángulo óptimo de expulsión, se efectuaron ensayos de fricción con hojas, cuyos resultados sirvieron de referencia para el diseño del sistema de depósito.
- Se logró construir un prototipo funcional para el subsistema de recolección y otro para el subsistema de depósito; sin embargo, la construcción de estos sistemas requiere gran destreza y precisión, ya que el prototipo mostró una alta sensibilidad a las tolerancias, principalmente en el sistema de succión. El uso de los sensores propuestos en este trabajo presentó una baja repetibilidad de los datos, generando errores en el funcionamiento. Se probó el protocolo de comunicación utilizando dos placas Arduino, evidenciando un correcto desempeño. No obstante, no se realizó una prueba del sistema completo debido a los problemas de repetibilidad asociados a los sensores.

6. Anexos

6.0.1. Planos de construcción

Luego de la construcción y pruebas del prototipo, se muestra los planos de construcción para cada subsistema, las cuales se muestran en las figuras 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4.

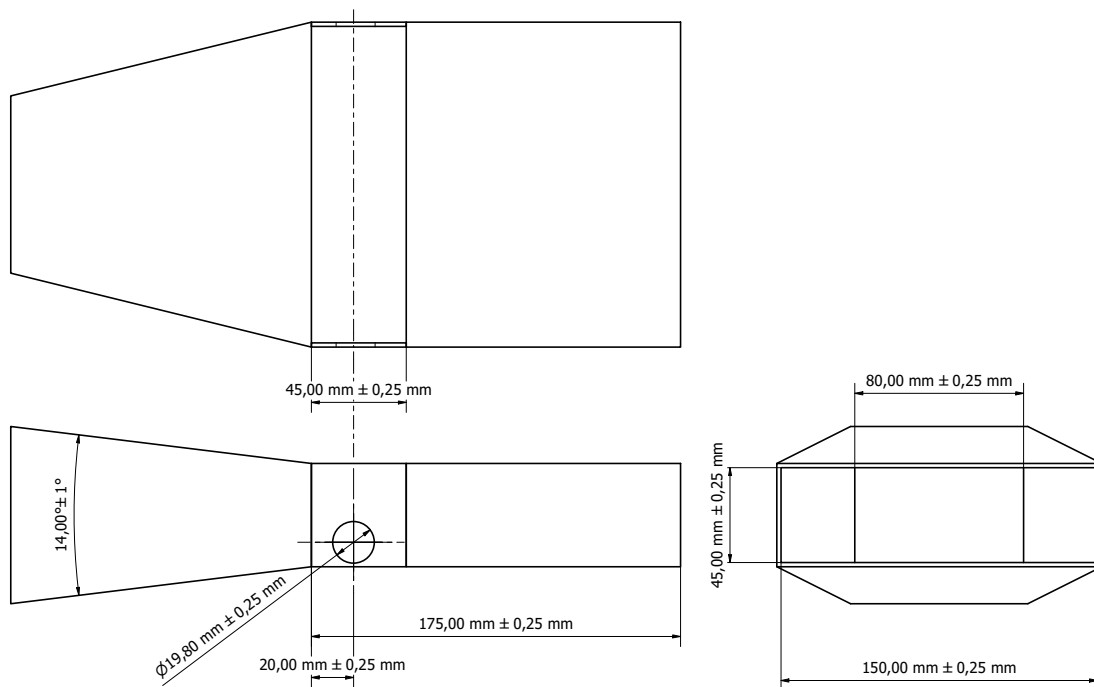


Figura 6.1: Plano del canal de succión. Propia autoría.

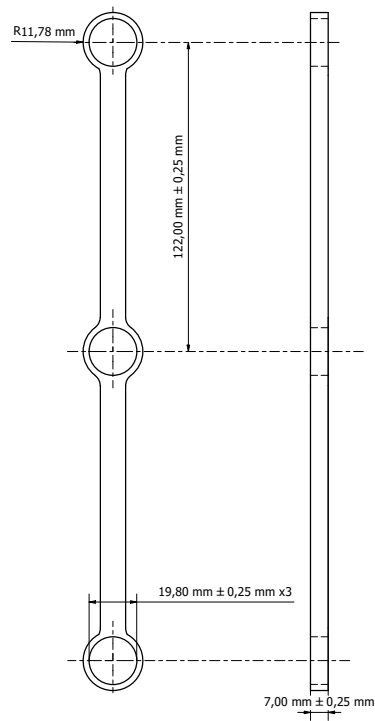


Figura 6.2: Plano del eslabón. Propia autoría.

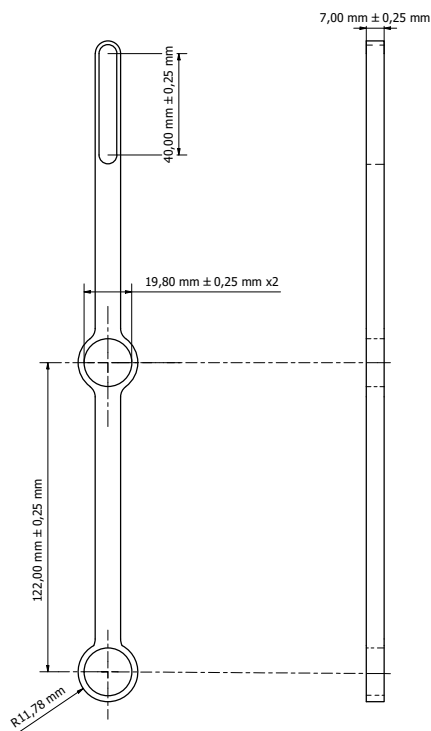


Figura 6.3: Plano del eslabón que permite angulo. Propia autoría.

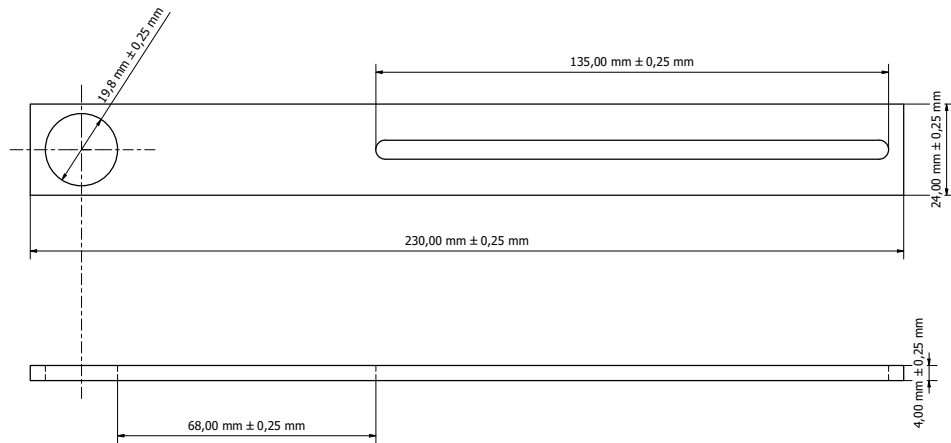


Figura 6.4: Plano de la base del depósito. Propia autoría.

6.0.2. Código del sistema

Se expone el código del sistema:

Listing 6.1: Código del sistema esclavo I^2C en Arduino

```

1 #include <Wire.h>
2
3 #include "HX711.h"
4
5 #define DOUT 5
6 #define CLK 6
7
8 HX711 balanza;
9
10 float factor_calibracion = 1023; //factor de escala del sensor de carga
11
12 // --- Direcci n $I^2C$ del esclavo ---
13 #define SLAVE_ADDRESS 0x08
14
15 #define SensorA A0
16 #define SensorD A1
17 #define Succ_P 2
18 #define Motor_P 11
19 #define Alm_P 3
20 #define Dep_P1 4
21 #define Dep_P2 1 //hay dos pines para el dep sito , ya que se debe invertir la
    polaridad del dispositivo lineal para que cambie de movimiento
22
23

```

```

24 enum SysState {
25     Succ_S,
26     Alm_S,
27     Dep_S,
28     Succ_F,
29     Alm_F,
30     Dep_F
31 };
32
33 SysState CurrentState = Succ_S;
34
35 int Sensor_val_A = 0;
36 int Sensor_val_D = 0;
37 unsigned long stateStartTime = 0;
38
39 // Umbrales
40 const int TH = 80; //valor medido desde lo experimental
41 const int PH = 1030; //cuanto pesa el segundo dep sito vac o
42 //tiempos
43 const unsigned long Time_s = 20000;
44 const unsigned long Time_Alm = 20000;
45 const unsigned long Time_Dep = 20000; //esto dura el proceso de dep sito
46
47 // Prototipos de funciones de $I^2C$
48 void requestEvent();
49 void receiveEvent(int numBytes);
50
51 void setup() {
52     pinMode(Succ_P, OUTPUT);
53     pinMode(Motor_P, OUTPUT);
54     pinMode(Alm_P, OUTPUT);
55     pinMode(Dep_P1, OUTPUT);
56     pinMode(Dep_P2, OUTPUT);
57
58     digitalWrite(Succ_P, HIGH);
59     digitalWrite(Motor_P, HIGH);
60     digitalWrite(Alm_P, HIGH);
61     digitalWrite(Dep_P1, HIGH);
62     digitalWrite(Dep_P2, HIGH);
63     Serial.begin(9600);
64     Serial.println("Sistema iniciado (ESCLAVO)");
65
66     // --- Inicializar $I^2C$ como esclavo ---
67     Wire.begin(SLAVE_ADDRESS);
68     Wire.onRequest(requestEvent);
69     Wire.onReceive(receiveEvent);
70
71     stateStartTime = millis();
72     // --- Parametros de la celda de carga ---
73     balanza.begin(DOUT, CLK);
74     balanza.set_scale(factor_calibracion);
75     balanza.tare(20); // calcula el cero promediando 20 lecturas
76
77
78 }
79

```

```

80 void loop() {
81
82   Sensor_val_A = analogRead(SensorA);
83   Sensor_val_A = map(Sensor_val_A, 0, 1023, 0, 100);
84   Sensor_val_D = balanza.get_units(10); // promedio de 10 lecturas
85   if (Sensor_val_D > -15 && Sensor_val_D < 15) { //esto evita lecturas falsas
86       que varian en -15 y 15. Depende mucho de la instalacion y de la celda.
87       Sensor_val_D = 0;
88   }
89   Serial.print("Nivel del almacen:");
90   Serial.println(Sensor_val_A);
91   Serial.println("");
92   Serial.println("Nivel del dep sito:");
93   Serial.println(Sensor_val_D);
94
95   unsigned long now = millis();
96
97   switch (CurrentState) {
98       //
99       case Succ_S:
100         digitalWrite(Succ_P, LOW); //inicia el ventilador
101         digitalWrite(Motor_P, LOW); //inicia el motor
102         digitalWrite(Alm_P, HIGH);
103         digitalWrite(Dep_P1, HIGH);
104         digitalWrite(Dep_P2, HIGH);
105
106         if (Sensor_val_A < TH) { //aqu espera hasta que el el nivel del sensor
107             llegue a un valor maximo
108
109             Serial.println("Succ n completada, pasando a Almacenamiento");
110             CurrentState = Alm_S;
111             stateStartTime = now;
112         } else if (now - stateStartTime > Time_s) {
113             CurrentState = Succ_F;
114         }
115         break;
116
117       // ===== ESTADO DE ALMACENAMIENTO =====
118       case Alm_S:
119         digitalWrite(Succ_P, HIGH);
120         digitalWrite(Motor_P, LOW); //queda encendido para redireccionar hojas si
121         quedaron atascadas en la rendija plastica
122         digitalWrite(Alm_P, LOW);
123         digitalWrite(Dep_P1, HIGH);
124         digitalWrite(Dep_P2, HIGH);
125
126         if (now - stateStartTime > Time_Alm) {
127             if (Sensor_val_A < TH) {
128                 CurrentState = Alm_F;
129             } else {
130                 Serial.println("Pasando a Dep sito");
131                 CurrentState = Dep_S;
132                 stateStartTime = now;
133             }
134         }
135     }
136 }

```

```

133         break;
134
135     // ===== ESTADO DE DEP SITO =====
136     case Dep_S:
137         digitalWrite(Succ_P, HIGH);
138         digitalWrite(Motor_P, HIGH);
139         digitalWrite(Alm_P, HIGH);
140         digitalWrite(Dep_P1, LOW);
141         delay(15000);
142         digitalWrite(Dep_P2, LOW);
143         delay(15000);
144
145         if (now - stateStartTime > Time_Dep) {
146
147             if (Sensor_val_D > PH ){
148                 CurrentState = Dep_F;
149             } else{
150                 Serial.println("Ciclo completado, reiniciando...");
151                 CurrentState = Succ_S;
152                 stateStartTime = now;
153             }
154         }
155         break;
156
157     case Succ_F:
158         digitalWrite(Succ_P, HIGH);
159         digitalWrite(Motor_P, HIGH);
160         digitalWrite(Alm_P, HIGH);
161         digitalWrite(Dep_P1, HIGH);
162         digitalWrite(Dep_P2, HIGH);
163         Serial.println("Error en succi n");
164         break;
165
166     case Alm_F:
167         digitalWrite(Succ_P, HIGH);
168         digitalWrite(Motor_P, HIGH);
169         digitalWrite(Alm_P, HIGH);
170         digitalWrite(Dep_P1, HIGH);
171         digitalWrite(Dep_P2, HIGH);
172         Serial.println("Error en almacen");
173         break;
174
175     case Dep_F:
176         digitalWrite(Succ_P, HIGH);
177         digitalWrite(Motor_P, HIGH);
178         digitalWrite(Alm_P, HIGH);
179         digitalWrite(Dep_P1, HIGH);
180         digitalWrite(Dep_P2, HIGH);
181         Serial.println("Error en dep sito");
182         break;
183
184 }
185
186
187 }
188

```



```

189
190 void requestEvent() {
191
192     char buffer[20];
193     int stateCode = (int)CurrentState;
194     int len = snprintf(buffer, sizeof(buffer), "%d,%d,%d", Sensor_val_A,
        Sensor_val_D, stateCode);
195     Wire.write((uint8_t*)buffer, len);
196 }
197
198
199 void receiveEvent(int numBytes) {
200     while (Wire.available()) {
201         char cmd = Wire.read();
202         if (cmd == 'S') {
203             Serial.println("Comando START recibido desde maestro");
204             CurrentState = Succ_S;
205             stateStartTime = millis();
206         }
207     }
208 }
209 }

```

7. Presupuesto

En esta sección se presenta el presupuesto esperado para la ejecución del proyecto. la figura 7.1 muestra el presupuesto general, mientras que 7.3, 7.2, 7.4, 7.5 muestran a detalle para cada rubro.

PRESUPUESTO GENERAL DEL PROYECTO.				
Rubro	RECURSOS			
	PROPIOS		UNIVERSIDAD	
	ESPECIE	EFFECTIVO	ESPECIE	EFFECTIVO
PERSONAL	\$ 8.800.000,00		\$ 8.800.000,00	
SOFTWARE			\$ 13.600.000,00	
EQUIPOS	\$ 3.200.000,00		\$ 5.060.000,00	
MATERIALES			\$ 6.795.000,00	
SUBTOTAL	\$ 12.000.000,00		\$ 34.255.000,00	
TOTAL	\$ 46.255.000,00			

Figura 7.1: Presupuesto general del proyecto de grado.

PERSONAL									
Nombre de los participantes	Formacion academica	Funcion del proyecto	Dedicacion de horas/mes	Total de horas 8 meses	Valor hora	Recursos			
						Propios		Universidad	
						Especie	Efectivo	Especie	Efectivo
Hanner Danilo Burgos Díaz	Estudiante de pregrado	investigador	110	880	\$ 10.000,00	\$ 8.800.000,00			
Jhon Fernando Pazos Ospina	M.sc.	director de tesis	11	88	\$ 100.000,00			\$ 8.800.000,00	
Sub total						\$ 8.800.000,00	\$ 0,00	\$ 8.800.000,00	\$ 0,00
Total						\$ 17.600.000,00			

Figura 7.2: Presupuesto para el personal.

COSTO EQUIPOS.				
Equipos	Recursos			
	Propios		Universidad	
	Especie	Efectivo	Especie	Efectivo
computadora personal	\$ 3.200.000,00			
computadora del laboratorio			\$ 3.000.000,00	
Impresora 3D Ender V2 Pro			\$ 1.300.000,00	
Micro-procesador			\$ 320.000,00	
Estacion de soldadura para componentes electronicos			\$ 320.000,00	
Multimetro			\$ 120.000,00	
Subtotal	\$ 3.200.000,00	\$ 0,00	\$ 5.060.000,00	\$ 0,00
Total	\$ 8.260.000,00			

Figura 7.3: Presupuesto para equipos.

COSTO DE MATERIALES				
Articulo	Recursos			
	Propios		Universidad	
	Especie	Efectivo	Especie	Efectivo
PLA de impresión 3D			\$ 400.000,00	
Cables de union			\$ 50.000,00	
Pasta de soldar			\$ 30.000,00	
Estaño			\$ 40.000,00	
Bibliografía			\$ 5.000.000,00	
Herramientas mecanicas			\$ 850.000,00	
Fuente de voltaje			\$ 350.000,00	
Puente H			\$ 40.000,00	
Fuente de poder			\$ 35.000,00	
Subtotal	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 6.795.000,00	\$ 0,00
Total	\$ 6.795.000,00			

Figura 7.4: Presupuesto para materiales.

COSTO DE SOFTWARE				
Software	Recursos			
	Propios		Universidad	
	Especie	Efectivo	Especie	Efectivo
Autodesk inventor 2023			\$ 5.000.000,00	
Matlab			\$ 8.300.000,00	
Office 365			\$ 300.000,00	
Tinkercad			\$ 0,00	
Subtotal	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 13.600.000,00	\$ 0,00
Total	\$ 13.600.000,00			

Figura 7.5: Presupuesto dedicado al software.

Referencias

- [1] Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica y Escuela de Ingeniería Mecánica. *Herramienta autónoma de inspección y limpieza de techos planos de concreto*. Anteproyecto de investigación. Cali, Colombia: Universidad del Valle, 2024.
- [2] Bruno Siciliano et al. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. London: Springer, 2009. ISBN: 978-1-84628-641-4.
- [3] Viviana Borrero Garzon y Freddy A. Martinez. *Árboles del campus de la Universidad del Valle*. <https://www.monografias.com/trabajos103/arboles-del-campus-universidad-del-valle/arboles-del-campus-universidad-del-valle>. Accedido el 24 de enero de 2026. Monografias.com, 2012.
- [4] T.B. Asafa et al. "Development of a vacuum cleaner robot". En: *Alexandria Engineering Journal* 57.4 (2018), págs. 2911-2920. ISSN: 1110-0168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.07.005>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016818300899>.
- [5] Anmol Taneja et al. "Moedor Cleaning Robot". En: *Electronics* (ago. de 2018), págs. 1-5. DOI: 10.1109/IC3.2018.8530503.
- [6] R. Miyagusuku Y. Arai y K. Ozaki. "Development and Testing of Garbage Detection for Autonomous Robots in Outdoor Environments". En: *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)* (2021).
- [7] Medhasvi Kulshreshtha et al. "OATCR: Outdoor Autonomous Trash-Collecting Robot Design Using YOLOv4-Tiny". En: *Electronics* 10 (sep. de 2021), pág. 2292. DOI: 10.3390/electronics10182292.
- [8] V. Mohta et al. "Design of an All-Purpose Terrace Farming Robot". En: (2022).
- [9] Wei-chen Lee y Wei-hsun Chiang. "Development of a Leaf-Sweeping Robot". En: *2022 IEEE 5th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. 2022, págs. 1-5. DOI: 10.1109/ICPS51978.2022.9816868.
- [10] A. Bulgakov y D. Sayfeddine. "Air Conditioning Ducts Inspection and Cleaning Using Tele-robotics," en: *Procedia Eng.*, vol. 164, pp. 121–126 (2016).
- [11] Michele Gabrio Antonelli et al. "Autonomous robot for cleaning photovoltaic panels in desert zones". En: *Mechatronics* 68 (2020), pág. 102372. ISSN: 0957-4158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102372>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957415820300520>.
- [12] T. Li et al. "A Mobile Robot Design for Efficient and Large-Scale Solar Panel Cleaning". En: *2022 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (2022).
- [13] T. Kosum P. Nattharith y / Gmsarn. "Development of Mobile Robot System for Monitoring and Cleaning of Solar Panels". En: (2022).

- [14] Kokkas. “Towards the Next Generation of Multi-Robot Systems for Solar Power Plants Inspection and Maintenance”. En: (2022). URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:254450877>.
- [15] W. Lee y W. Chiang. “Development of a Leaf-Sweeping Robot”. En: *in 2022 IEEE 5th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)* (2022).
- [16] Lara Monalisa Alves dos Santos et al. “Deep learning applied to equipment detection on flat roofs in images captured by UAV”. En: *Case Studies in Construction Materials* 18 (2023), e01917. ISSN: 2214-5095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01917>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509523000967>.
- [17] Anil EREN y Hatice Doğan. “Design and Implementation of a Cost Effective Vacuum Cleaner Robot”. En: *Turkish Journal of Engineering* 6 (abr. de 2021). DOI: 10.31127/tuje.830282.
- [18] Medhasvi Kulshreshtha et al. “OATCR: Outdoor Autonomous Trash-Collecting Robot Design Using YOLOv4-Tiny”. En: *Electronics* 10.18 (2021), pág. 2292. DOI: 10.3390/electronics10182292.
- [19] Satyam Gupta, Abhishek Dohare y Vaibhav Shivhare. “LBHP (Low Budget High Power) Leaf Vacuum Machine”. En: (2020).
- [20] Ming-Shaung Chang, Jung-Hua Chou y Chun-Mu Wu. “Design and Implementation of a Novel Outdoor Road-Cleaning Robot”. En: *Advanced Robotics* 24.1–2 (2010), págs. 85-101. DOI: 10.1163/016918609X12586141083777.
- [21] Shih-Chang Hsia et al. “A Smart Leaf Blow Robot Based on Deep Learning Model”. En: *IEEE Access* (2023). DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3307136.
- [22] Charles Jeff Morgan, Owen T. Bourgeois y Dov Z. Glucksman. “Motor Fan Design for Large Debris Ingestion”. Patent Application US20040211318A1 (United States). 28 de oct. de 2004.
- [23] Yuda Irawan et al. “Automatic Floor Cleaning Robot Using Arduino and Ultrasonic Sensor”. En: *Journal of Robotics and Control (JRC)* 2 (jul. de 2021). DOI: 10.18196/jrc.2485.
- [24] Juliang Xiao et al. “Fully automated leaf collection robot with packer”. Chinese patent CN115522496A (CN). Tianjin University. 27 de dic. de 2022. URL: <https://patents.google.com/patent/CN115522496A/en>.
- [25] William Bolton. *Mecatrónica*. Alpha Editorial, 2017.
- [26] Meriam. *Engineering mechanics: dynamics*. John Wiley & Sons, 2020.
- [27] A.J. María, I.A. Martínez y A.E. Ruiz. *Microcontroladores PIC, 1a parte, 4a Ed.* Microcontroladores "PIC": diseño práctico de aplicaciones. McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2007. ISBN: 9788448156473. URL: <https://books.google.com.co/books?id=m7M1NAAACAAJ>.
- [28] McGraw-Hill. *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 2010. ISBN: 9780070648487. URL: <https://books.google.com.co/books?id=zxsGt20vTo0C>.
- [29] I.E. Idelchik y M.O. Steinberg. *Handbook of Hydraulic Resistance*. Begell House, 1996. ISBN: 9781567000740. URL: <https://books.google.com.co/books?id=Fvh6i4TipsgC>.
- [30] Robert L. Norton. *Design of Machinery*. 6.^a ed. New York: McGraw-Hill, 2020. ISBN: 9781260570535.
- [31] *Technical Specification: DC Brushless Fan Model PFB0824UHE*. Datasheet retrieved from the manufacturer. Delta Electronics, Inc. A00.

- [32] . “Fallen leaf sucking and sweeping robot”. Chinese. Chinese patent application CN110847101A. Ltd. Shaanxi Zhongjianle Intelligent Robot Co. Filing date: 2019-12-18; Application No. CN201911305266.6. 28 de feb. de 2020. URL: <https://patents.google.com/patent/CN110847101A/en>.
- [33] MatWeb, LLC. *316 Stainless Steel*. 2025. URL: <https://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=50f320bd1daf4fa7965448c30d3114ad&ckck=1> (visitado 08-12-2025).
- [34] Lynxmotion. *A4WD3 Wheeled Robot Kit*. Último acceso: 11 de febrero de 2025. 2025. URL: <https://wiki.lynxmotion.com/info/wiki/lynxmotion/view/rover-kits/a4wd3-wheeled/>.
- [35] Nikolay Stoimenov et al. “Static and Kinetic Friction of 3D Printed Polymers and Composites”. English. En: *Tribology in Industry* 46.1 (2024), págs. 97-106. URL: <https://bd.univalle.edu.co/scholarly-journals/static-kinetic-friction-3d-printed-polymers/docview/2993160551/se-2>.
- [36] Bluetti. *Estación de energía portátil Bluetti Premium 20AC2P 300W*. <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/3000492/bluetti-estacion-energia-portatil-premium-20ac2p-300w/3000492/>. Consultado: febrero 2026. 2026.