

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Diseño y control de un sistema limpiador de paneles solares de dos grados  
de libertad

INGE-2316

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Mecatrónica**

Presentado por:

Dareck Felipe Franco Espinoza

Angel Eloy Guzmán Vargas

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

# DEDICATORIA

---

Dedico este proyecto a Dios, cuya bondad ha iluminado mi camino y me ha llevado hasta este momento.

A mis padres, que me han brindado un apoyo incondicional; su amor y guía han sido mi mayor impulso. A mi hermana mayor, quien ha velado por mi bienestar con cariño y dedicación, y que me ha acompañado en reiteradas ocasiones.

A mi tía y madrina, siendo mi segunda madre, cuyo amor y apoyo constante han sido un faro en mi vida desde siempre. A mis abuelos, quienes fueron parte esencial de mi carrera, preocupándose y cuidándome con amor y generosidad.

**Angel Guzmán**

## DEDICATORIA

---

El presente proyecto lo dedico a mis padres, abuelos y hermanos por alentarme en esta trayectoria de mi vida con amor y respeto.

A mis profesores, por dedicar su tiempo en instruirnos a nivel personal y profesional de forma entusiasta y apasionada.

**Dareck Franco**

# AGRADECIMIENTOS

---

Expreso mi profundo agradecimiento a Dios y a la vida por cada experiencia que ha contribuido a forjar la persona que soy hoy. A mis padres, hermana y tía por su inquebrantable apoyo y por creer en mí a lo largo de los años.

A mi amigo Kleber Solís y su familia, quienes me han acogido como un miembro más de su hogar. Su apoyo y generosidad han marcado una diferencia significativa en mi vida.

A mis amistades, quienes han estado presentes brindándome ánimos, palabras de aliento y confianza.

A mi compañero Dareck Franco, con quien hemos logrado desarrollar este proyecto  
Al PhD. Wilton Agila y profesor MSc. Bryan Puruncajas por ser guías esenciales en este proyecto.

**Angel Guzmán**

## AGRADECIMIENTOS

---

Mi más sincero agradecimiento a mis padres, Renán Franco y Vanessa Espinoza, por ser el pilar más importante en mi vida, por brindarme su apoyo incondicional, por motivarme y perseverar en mis sueños.

A mis abuelos y familiares por su apoyo y consejos.

A mi pareja Shirley González por siempre darme palabras de aliento para seguir adelante.

A mis queridos amigos: Victoria, Bangner, Jonathan, Jefferson, Benjamín y Cristóbal por su compañerismo y amistad en toda la carrera.

A Angel Guzmán por su apoyo a lo largo de este proyecto.

Al MSc. Bryan Puruncajas y al PhD. Wilton Agila por su guía durante el desarrollo de este proyecto.

**Dareck Franco**

## Declaración Expresa

---

Nosotros Dareck Felipe Franco Espinoza y Angel Eloy Guzmán Vargas acordamos y reconocemos que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponde de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

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

Guayaquil, 1 de febrero del 2024.



Dareck Franco Espinoza



Angel Guzmán Vargas

# EVALUADORES

---

**Bryan Puruncajas, M.Sc.**

Profesor de Materia

---

**Wilton Agila, Ph.D.**

Tutor de proyecto

## RESUMEN

En respuesta a la creciente demanda global de fuentes de energía sostenibles, las plantas solares, aunque ambientalmente amigables, enfrentan desafíos significativos. Estas instalaciones suelen ubicarse en zonas abiertas y elevadas, lo que propicia la acumulación de polvo, afectando negativamente su rendimiento, bajándolo un 28%. Dado que las ubicaciones de paneles solares suelen ser de difícil acceso, el mantenimiento resulta costoso y riesgoso.

Para este problema, se propone el presente proyecto, centrado en el diseño de un sistema automatizado de limpieza para paneles solares. El mecanismo propuesto presenta una estructura ligera para no comprometer el panel solar, con un control manual y un sensor de luz para limpieza automática. Además, se incorpora un módulo Bluetooth para operación remota, facilitando su uso en ubicaciones de difícil acceso. El diseño final, elaborado en Autodesk Inventor, destaca por su ajustabilidad en longitud, permitiendo un fácil acoplamiento, desmontaje y transporte.

El mecanismo consta de ruedas para desplazamiento y apoyo, junto con un rodillo giratorio que elimina eficazmente el polvo. Finales de carrera en la placa inferior controlan el sentido de giro y detienen el sistema al completar la limpieza. Se integra una batería recargable para un funcionamiento eficiente y sostenible del sistema.

Este proyecto se presenta como una solución innovadora y práctica para mejorar la eficiencia y reducir los costos asociados con el mantenimiento de paneles solares. Este proyecto se postula como una solución innovadora y práctica para potenciar la eficiencia de los paneles solares, anticipando un significativo ahorro en costos de mantenimiento y mano de obra.

Se espera que este sistema contribuya a que los paneles solares operen consistentemente a su máxima capacidad.

**Palabras Clave:** Energía Solar, Limpieza Automatizada, Diseño, Mantenimiento.



## ***ABSTRACT***

In response to the growing global demand for sustainable energy sources, solar plants, although environmentally friendly, face significant challenges. These facilities are usually located in open and elevated areas, which encourages the accumulation of dust, negatively affecting their performance, dropping it by 28%. Since solar panel locations are often difficult to access, maintenance is costly and risky.

For this problem, the present project is proposed, focused on the design of an automated cleaning system for solar panels. The proposed mechanism has a light structure so as not to compromise the solar panel, with a manual control and a light sensor for automatic cleaning. In addition, a Bluetooth module is incorporated for remote operation, facilitating its use in hard-to-reach locations. The final design, prepared in Autodesk Inventor, stands out for its adjustability in length, allowing easy attachment, disassembly and transportation.

The mechanism consists of wheels for movement and support, along with a rotating roller that effectively removes dust. Limit switches on the bottom plate control the direction of rotation and stop the system when cleaning is complete. A rechargeable battery is integrated for efficient and sustainable operation of the system.

This project is presented as an innovative and practical solution to improve efficiency and reduce costs associated with the maintenance of solar panels. This project is proposed as an innovative and practical solution to enhance the efficiency of solar panels, anticipating significant savings in maintenance and labor costs.

This system is expected to help the solar panels operate consistently at their maximum capacity.

Keywords: Solar Energy, Automated Cleaning, Design, Maintenance.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
ÍNDICE DE PLANOS .....	XI
Capítulo 1 .....	1
1.    Introducción.....	2
1.1    Descripción del Problema.....	2
1.2    Justificación del Problema.....	3
1.3    Objetivos.....	4
1.3.1    Objetivo general.....	4
1.3.2    Objetivos específicos.....	4
1.4    Marco teórico .....	5
1.4.1    Paneles solares fotovoltaicos.....	5
1.4.2    Clasificación de los paneles solares .....	6
1.4.3    Efecto de polvo sobre los paneles solares .....	7
1.4.4    Sistemas de limpieza.....	9
1.5    Estado del arte .....	13

Capítulo 2 .....	14
2 Metodología .....	15
2.1 Selección de la alternativa de solución.....	15
2.2 Requerimientos de diseño.....	18
2.3 Proceso de diseño.....	20
2.4 Diseño conceptual.....	20
2.5 Diseño mecánico.....	21
2.5.1 Diseño de ruedas.....	21
2.5.2 Dimensionamiento del motor del cepillo.....	22
2.5.3 Dimensionamiento de los motores de desplazamiento .....	23
2.5.4 Selección de materiales y dimensiones de estructuras .....	25
2.6 Diseño eléctrico y de control .....	26
2.6.1 Selección de sensores y controlador .....	27
2.6.2 Selección de batería .....	29
Capítulo 3 .....	31
3 Resultados y Análisis .....	32
3.1 Diseño mecánico.....	32
3.2 Diseño electrónico.....	35
3.3 Diagrama de flujo para la programación.....	37
3.4 Diseño del panel de control compacto.....	38
3.5 Análisis de costos.....	39
Capítulo 4 .....	42
4 Conclusiones y recomendaciones .....	43

4.1	Conclusiones.....	43
4.2	Recomendaciones.....	44
	Referencias .....	45
	Apéndices .....	47

## ABREVIATURAS

CIDIS	Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Sistemas Computacionales
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
PLA	Ácido Poliláctico
LCD	Liquid-Crystal Display

## SIMBOLOGÍA

MW	Megavatio
N	Newton
m	Metros
mm	Milímetro
cm	Centímetro
kg	Kilogramo
MPa	Mega pascal
S	Segundo
rad	Radián
t	Tiempo
$\tau$	Torque
$\Omega$	Velocidad angular
$\alpha$	Aceleración angular
$I$	Momento de inercia
F	Fuerza
h	Hora
$\mu$	Coefficiente de fricción estática
rev	Revolución
Vcc	Voltaje
A	Amperio
rpm	Revoluciones por minuto

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. <i>Panel solar de 72 celdas conectados en serie</i> .....	6
Figura 1.2. <i>Celda monocristalina y policristalina</i> .....	7
Figura 1.3. <i>Causas de acumulación de polvo</i> .....	9
Figura 1.4. <i>Limpieza con pértigas de fibra de carbono</i> .....	10
Figura 1.5. <i>Vehículo para limpieza a presión</i> .....	11
Figura 1.6. <i>Limpieza sobre plataformas elevadoras</i> .....	11
Figura 1.7. <i>Limpieza con rodillo</i> .....	12
Figura 1.8. <i>Sistema de limpieza basado en robots para módulos fotovoltaicos</i> .....	12
Figura 1.9. <i>Prototipo de robot limpiador para panel solar</i> .....	13
Figura 2.1. <i>Proceso de diseño del limpiador de paneles solares</i> .....	20
Figura 2.2. <i>Vista superior del diseño conceptual</i> .....	21
Figura 2.3. <i>Vista lateral del sistema de limpieza</i> .....	21
Figura 2.4. <i>Diagrama de cuerpo libre del sistema de apoyo</i> .....	23
Figura 2.5. <i>Diseño 3D del sistema de limpieza para paneles solares</i> .....	26
Figura 2.6. <i>Sensor TSL2561</i> .....	27
Figura 2.7. <i>Arduino nano</i> .....	28
Figura 2.8. <i>Módulo puente H para motores DC</i> .....	28
Figura 2.9. <i>Diagrama de conexión del TSL256</i> .....	29
Figura 2.10. <i>Diagrama esquemático de ejemplo de conexión del puente H al Arduino</i> .....	29
Figura 2.11. <i>Batería de ácido-plomo</i> .....	30

Figura 3.1. <i>Diseño 3D del sistema limpiador de paneles solares: (1) Panel solar, (2) Rodillo del sistema limpiador, (3) Panel de control</i> .....	33
Figura 3.2. <i>Vista lateral del mecanismo</i> .....	33
Figura 3.3. <i>Mecanismo de ajuste con perfil “v”: (1) Perfil “v”, (2) Tuerca deslizante, (3) Sujetadores</i> .....	34
Figura 3.4. <i>Análisis de deformación lineal debido a su propio peso</i> .....	34
Figura 3.5. <i>Análisis de esfuerzo de Von Mises</i> .....	35
Figura 3.6. <i>Diagrama esquemático del Arduino Nano</i> .....	35
Figura 3.7. <i>Diagrama de conexiones de los sensores y luces indicadoras</i> .....	36
Figura 3.8. <i>Diagrama de conexiones de los puentes H</i> .....	36
Figura 3.9. <i>Diagrama de conexiones del LCD I2C</i> .....	37
Figura 3.10. <i>Diagrama de flujo de la codificación</i> .....	38
Figura 3.11. <i>Panel de control</i> .....	38



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 <i>Criterios de selección para las alternativas</i> .....	17
Tabla 2.2 <i>Puntuación de las alternativas según los criterios establecidos</i> .....	18
Tabla 2.3 <i>Detalles de los requerimientos</i> .....	19
Tabla 3.1 <i>Costos de diseño mecánico</i> .....	39
Tabla 3.2 <i>Costos de diseño electrónico</i> .....	40
Tabla 3.3 <i>Costos de mano de obra</i> .....	40
Tabla 3.4 <i>Análisis de costo total</i> .....	41

## ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1	Mecanismo
PLANO 2	Vista lateral izquierda
PLANO 3	Tablero de control
PLANO 4	Placa superior
PLANO 5	Placa inferior
PLANO 6	Perfil V
PLANO 7	Sujetador
PLANO 8	Tuerca deslizante
PLANO 9	Soporte
PLANO 10	Rueda de apoyo
PLANO 11	Aro
PLANO 12	Chumacera
PLANO 13	Rodamiento

## Capítulo 1

## **1. INTRODUCCIÓN**

En la búsqueda constante de soluciones sostenibles para satisfacer las crecientes demandas energéticas a nivel mundial, la energía solar se ha destacado como una fuente prometedora y respetuosa con el medio ambiente. Los paneles solares fotovoltaicos desempeñan un papel crucial en la captura de la energía solar y su conversión en electricidad, lo que contribuye significativamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y al impulso de sistemas energéticos limpios.

No obstante, a pesar de su eficacia, los paneles solares no están exentos de desafíos. La acumulación de suciedad y otros contaminantes en la superficie de los paneles puede disminuir su eficiencia al bloquear la radiación solar directa. Este fenómeno crea la necesidad de un mantenimiento regular para garantizar que los paneles solares funcionen de manera óptima y prolonguen su vida útil.

El diseño y control de un sistema automatizado de limpieza para paneles solares con dos grados de libertad es una respuesta a esta necesidad. Este proyecto de materia integradora se enfoca en el desarrollo de un dispositivo innovador que no solo mejora la eficiencia de los sistemas de energía solar, sino que también reduce la carga de trabajo manual asociada con el mantenimiento de paneles solares.

Este trabajo representa un paso adelante en el avance de uso de la tecnología de energía solar y busca contribuir al crecimiento de las aplicaciones de fuentes de energía limpia, ofreciendo una solución práctica y automatizada para el mantenimiento de paneles solares, lo que, en última instancia, impulsará la eficiencia y la confiabilidad de los sistemas de energía solar.

### **1.1 Descripción del Problema**

El Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Sistemas Computacionales (CIDIS) tiene un interés directo en el desarrollo de soluciones tecnológicas innovadoras que mejoren la eficiencia y el mantenimiento de sistemas de energía solar. La necesidad de una

solución para la limpieza automatizada de paneles solares se deriva de la creciente demanda del 43% a nivel mundial de fuentes de energía más limpias y sostenibles registrado en el año 2022 [1].

En la búsqueda del desarrollo de una fuente de energía limpia, las plantas solares son una gran solución a esta creciente demanda energética. Sin embargo, uno de los problemas que presentan estas plantas es la intermitencia en la generación de energía, la cual se puede dar debido a la obstrucción de la recepción de luz solar. Una de las obstrucciones más comunes que afectan la eficiencia de los paneles solares es la acumulación de suciedad y polvo en su superficie, reduciéndolo en un 27.8% [2].

En Ecuador, el impulso hacia la adopción de energía solar se evidencia con la implementación de sistemas fotovoltaicos en diversas ubicaciones. En la Isla San Cristóbal, desde el año 2018, se ha establecido un sistema fotovoltaico con una potencia instalada de 0.013 MW. Simultáneamente, en la ciudad de Ambato, la entidad Paneles Pastaza ha contribuido al panorama de energía solar con un sistema de 0.18 MW en el año 2018. Ambas iniciativas representan esfuerzos públicos del gobierno ecuatoriano en el año previamente mencionado para fomentar el uso de energía renovable en el país [3].

Ante esta creciente demanda de sistemas fotovoltaicos en el país, la falta de un sistema automatizado de limpieza de paneles solares que se adapte a las condiciones presentes en el lugar de instalación puede resultar en pérdidas de generación de energía y un aumento de costos por gastos de limpieza manual.

## **1.2 Justificación del Problema**

En el 2022 se evidenció que ha habido un aumento significativo del 20% en la adopción de sistemas de energía solar en entornos residenciales, comerciales e industriales [4]. Esta tendencia va en aumento debido a la creciente conciencia sobre la necesidad de obtener fuentes de energía limpias y al mismo tiempo, combatir el cambio climático que amenaza nuestro planeta.

Para garantizar que este sistema de energía solar mantenga su eficiencia y siga siendo una fuente sostenible y confiable de energía, es esencial que los paneles solares se mantengan

en condiciones óptimas y libres de suciedad. Esto se debe a que la acumulación de contaminantes, como polvo, suciedad, hollín y otros residuos, puede afectar de manera considerable su capacidad de generación de energía [2].

La limpieza periódica de paneles solares es esencial para garantizar una máxima eficiencia en la absorción de energía solar, ya que incluso una fina capa de polvo puede reducir a la mitad la conversión de energía [5].

Aunque existen sistemas de limpieza de paneles solares en el mercado que utilizan agua purificada a presión de forma manual, resultan poco factibles para este proyecto. La ubicación del sistema fotovoltaico plantea desafíos logísticos y no siempre se dispone de acceso a agua pura, lo que hace imperativa la necesidad de desarrollar un sistema automatizado de limpieza que sea efectivo y adaptable a estas condiciones únicas [5].

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Diseñar un dispositivo limpiador automatizado de paneles solares mediante un sistema de dos grados de libertad para el mejoramiento de la eficiencia y mantenimiento de sistemas de energía solar.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Diseñar un sistema de alimentación de energía para el limpiador de dos grados de libertad usando la electricidad que nos brinda los paneles solares.
- Diseñar los componentes mecánicos de cada limpiador para que se adapte a las dimensiones de los paneles solares.
- Desarrollar un control automático que limpie los paneles solares por periodos o por nivel de suciedad.

## **1.4 Marco teórico**

Según información del Ministerio de Energía, considerando la ubicación geográfica privilegiada de Ecuador, se ha identificado una alta radiación que puede ser aprovechada para la generación de energía eléctrica. La disponibilidad del recurso solar, medido como insolación media global, llega a los 4.575 kilovatios hora por metro cuadrado (Wh/m<sup>2</sup>/día). Ese nivel es 40% más alto que el promedio de la región [6].

Sin embargo, a pesar de la generosa radiación solar que Ecuador disfruta gracias a su ubicación geográfica privilegiada, la eficiencia de los paneles solares no solo depende de la abundancia de luz solar.

Diversos factores ambientales pueden influir en la capacidad de los paneles para convertir esta energía en electricidad utilizable, como lo son: la intensidad y la duración de la luz solar, la temperatura ambiente, la limpieza de los paneles por el polvo, suciedad y excrementos de aves, son aspectos críticos que deben ser considerados. Estos factores pueden variar considerablemente según la ubicación geográfica y las condiciones climáticas, lo que resalta la importancia de entender y mitigar sus efectos para optimizar la eficiencia de los sistemas de energía solar [7].

### **1.4.1 Paneles solares fotovoltaicos**

Los paneles fotovoltaicos son estructuras fabricadas con materiales especiales como puede ser el silicio policristalino, diseñados para aprovechar el efecto fotoeléctrico como se observa en la Figura 1.1 [8]. Este efecto se basa en la capacidad de ciertos materiales, generalmente el silicio dopado con sodio, potasio y otros componentes, para generar electricidad a partir de la radiación solar. Los paneles solares están compuestos por múltiples láminas, conocidas como celdas fotovoltaicas, que cada una de ellas produce una pequeña diferencia de potencial cuando se expone a la luz solar. La radiación solar libera electrones en estas celdas, lo que crea una corriente eléctrica que puede ser utilizada para generar energía eléctrica aprovechable [9].

En una planta de producción de energía fotovoltaica, se combinan numerosos paneles solares en configuraciones en serie y en paralelo para alcanzar el voltaje necesario y la potencia requerida para el sistema. En instalaciones más grandes, es común emplear estructuras de montaje con sistemas de seguimiento solar. Estos sistemas permiten que un panel solar pueda moverse en torno a uno o dos ejes, según lo necesario [9].

### **Figura 1.1**

*Panel solar de 72 celdas conectados en serie*



### **1.4.2 Clasificación de los paneles solares**

Existen varios tipos de paneles solares fotovoltaicos que se clasifican según la estructura atómica y los materiales que forman las células solares en su interior. Estas diferencias radican en su eficiencia de conversión eléctrica y el costo de fabricación. Entre estos tipos, las células solares de silicio son las más comunes debido a la abundancia de silicio en la Tierra y su relativo bajo costo de producción. Las células solares de silicio se dividen en tres categorías basadas en la estructura cristalina de la capa fotovoltaica: paneles monocristalinos, paneles policristalinos y paneles amorfos como se observa en la Figura 1.2 Existen otros tipos de células fotovoltaicas diseñadas para aplicaciones muy específicas que suelen ser costosas, como las células solares de Galio-Arsénico utilizadas en proyectos espaciales [9].



**Figura 1.2**

*Celda monocristalina y policristalina*



### 1.4.3 Efecto de polvo sobre los paneles solares

El polvo es un factor importante que afecta la eficiencia de celdas fotovoltaicas. El polvo natural, es decir, la suciedad que se acumula en los módulos fotovoltaicos debido a la deposición de partículas presentes en el aire a lo largo del tiempo sin limpieza externa representa una fuente de contaminación. La humedad relativa alta contribuye a que estas partículas de suciedad se adhieran más fuertemente a los módulos fotovoltaicos, lo que dificulta su limpieza por el viento [10].

El polvo en cuestión se manifiesta como una capa delgada que recubre la superficie del panel solar. Por lo general, las partículas de polvo son pequeñas, con un diámetro de menos de 10 micrómetros, aunque esto puede variar según la ubicación y el entorno. El origen del polvo puede ser diverso, incluyendo factores como la contaminación transportada por el viento, erupciones volcánicas, actividad peatonal, movimientos de vehículos, entre otros. Con el tiempo, la acumulación de polvo agrava el efecto de la suciedad en los módulos fotovoltaicos. Esta acumulación de polvo tiene un impacto significativo en la cantidad de energía generada por los módulos fotovoltaicos en un período diario, mensual, estacional y anual [10].

A medida que se expande la adopción de paneles fotovoltaicos, se incrementa la demanda de supervisar y mantener limpias las superficies de estos paneles. La frecuencia con

la que se requiere limpiar los paneles solares varía según el lugar de instalación. Una compañía en Nueva Zelanda sugiere que los paneles solares deberían limpiarse dos veces al año en el entorno de Nueva Zelanda [11].

Existen dos factores interrelacionados que influyen en la evaluación de la acumulación de suciedad en los paneles solares: las características del polvo y el entorno local. Las propiedades del polvo incluyen su tamaño, composición, forma y peso.

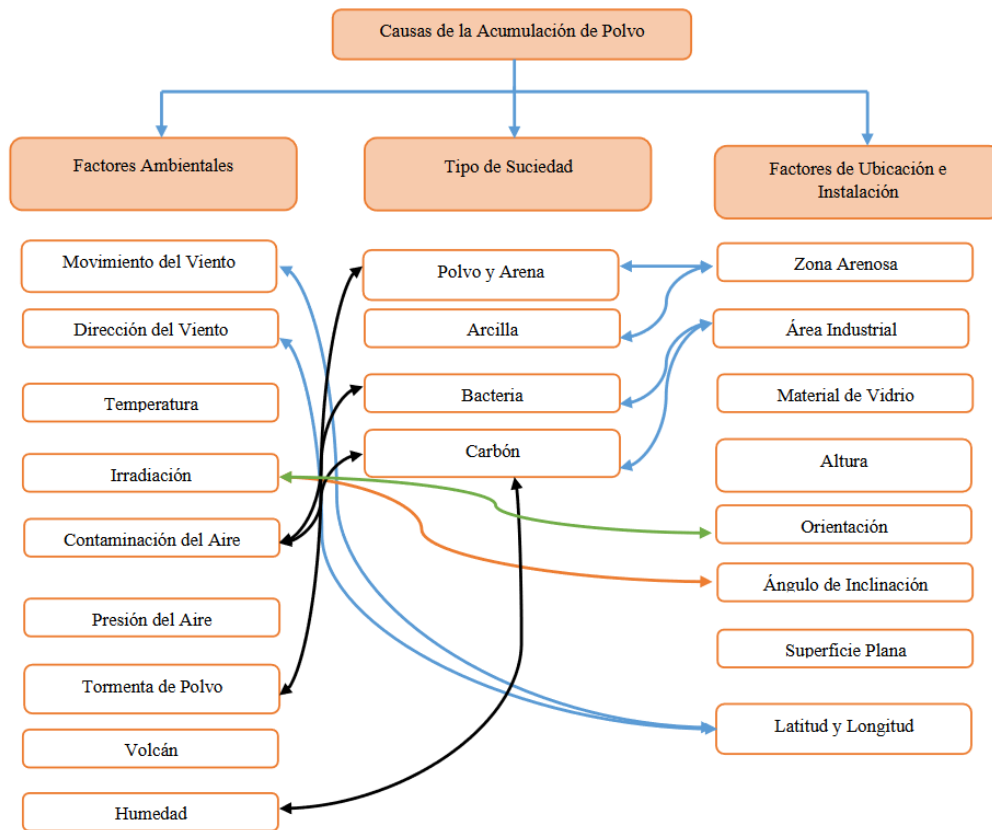
La superficie de los paneles solares también desempeña un papel crucial en el proceso de ensuciamiento. Si la superficie no es suave y, en cambio, es rugosa o adhesiva, tiende a acumular más polvo. La orientación del panel, que depende de la dirección de la luz solar y la dirección del viento, también es un factor relevante en la acumulación de suciedad. Las superficies horizontales tienden a acumular más polvo. Además, la velocidad del viento juega un papel importante: una brisa suave puede propiciar la acumulación de polvo, mientras que vientos fuertes pueden limpiar la superficie del panel. Sin embargo, el flujo de aire causado por el viento puede influir en la acumulación o dispersión de polvo en áreas específicas del panel solar.

La velocidad del viento y la presión no son constantes en la superficie del panel solar. En presencia de viento, donde la velocidad del aire es más alta, la presión es menor, lo que puede resultar en una menor acumulación de polvo, y viceversa. Además, las características del polvo, como su tipo, tamaño, peso y forma, también desempeñan un papel fundamental en su dispersión [12].

En la Figura 1.3 podemos observar como el polvo se acumula dependiendo de diversos factores, el tipo de suciedad y la relación entre estos.

**Figura 1.3**

*Causas de acumulación de polvo*



#### 1.4.4 Sistemas de limpieza

Los sistemas de limpieza se dividen en tres categorías: Manual, limpieza a presión, mecanizado y automatizado.

##### 1.4.4.1 Manual con pértigas.

Este enfoque es ampliamente utilizado y se basa en la limpieza mecánica con pértigas especializadas diseñadas para vidrio. Se emplea un sistema de bombeo de agua con mangueras, generalmente montado en un vehículo para facilitar la movilidad. El agua se somete a un proceso de filtrado de partículas y descalcificación, con el propósito de prevenir la acumulación de polvo en los paneles solares.

En la Figura 1.4 se observa la aplicación del agua se realiza mediante pértigas de fibra de carbono y poliéster diseñadas para limpiar el vidrio sin causar rayones. Se utilizan para limpiar

instalaciones con múltiples filas de paneles, pudiendo alcanzar alturas de hasta veinte metros desde el suelo hasta el extremo superior de los paneles. Una longitud mayor puede dificultar su manejo.

Es importante destacar que algunos fabricantes de paneles solares pueden desaconsejar la limpieza a alta presión [13].

#### **Figura 1.4**

*Limpieza con pértigas de fibra de carbono*



##### **1.4.4.2 Limpieza a presión.**

En la Figura 1.5 se tiene un sistema de limpieza se lleva a cabo a través de un vehículo equipado con un tanque de agua y una motobomba. Este mecanismo de limpieza se presenta en varias variantes. En instalaciones fijas, se puede optar por un operario que utilice una pistola a presión mientras otro conduce el vehículo. También existen versiones donde el conductor, además de manejar el vehículo, utiliza pistolas de agua montadas en el vehículo, apuntadas hacia los módulos. Estas últimas requieren una mayor automatización de las pistolas.

Para instalaciones con grandes estructuras de seguimiento, se pueden encontrar alternativas como un operario incorporado en una plataforma elevadora ligera que le permite maniobrar con eficacia. En este caso, todas las tuberías están dentro de los brazos de la plataforma y el agua a presión se toma desde una cesta instalada (Figura 1.6) [13].

**Figura 1.5**

*Vehículo para limpieza a presión*

**Figura 1.6**

*Limpieza sobre plataformas elevadoras*



#### **1.4.4.3 Mecanizado y automatizado.**

En la Figura 1.7 el sistema se basa en un vehículo que se desplaza de forma autónoma y está equipado con un rodillo de limpieza que incorpora cerdas suaves para asegurar que no se dañe la superficie de los módulos solares. El operario se posiciona en un lugar que ofrece una visión óptima de la instalación, y la limpieza se efectúa mediante el uso de agua descalcificada, lo cual previene la acumulación de residuos de cal que podrían reducir la vida útil del sistema [10].

**Figura 1.7***Limpieza con rodillo*

Los avances en el mundo de la robótica han permitido la creación de robots autónomos capaces de llevar a cabo una variedad de tareas de limpieza, que van desde la limpieza de fachadas y cubiertas de vidrio en edificios hasta la limpieza de piscinas e incluso paneles solares fotovoltaicos. Estos robots se han convertido en soluciones eficaces para abordar la limpieza en entornos diversos [14]. Unos de esos robots se diseñaron con la capacidad de trabajar con un ángulo de inclinación que no supere los 45 grados, y su diseño se inspirará en la semejanza con los robots utilizados en la limpieza de piscinas [13]. En la Figura 1.8Figura 1.7 se muestra la propuesta del prototipo que ofrece un gran potencial para mejorar significativamente la limpieza de los módulos solares instalados en sobrecubierta, donde la accesibilidad a menudo es un desafío.

**Figura 1.8***Sistema de limpieza basado en robots para módulos fotovoltaicos*

## 1.5 Estado del arte

En el ámbito actual, se han desarrollado diversas categorías de sistemas automatizados diseñados para llevar a cabo la limpieza de paneles solares. Entre estos sistemas, los robots son los más comunes y se pueden clasificar en varias categorías, que incluyen robots móviles, drones limpiadores y sistemas de control automáticos.

Además, se llevó a cabo una investigación exhaustiva de trabajos previos relacionados con el tema propuesto. Entre los hallazgos, se encontraron varias tesis significativas que se centran en el diseño y control de sistemas limpiadores de paneles solares. Una de estas tesis, titulada "Diseño y construcción de un sistema automático para la limpieza de paneles solares", aborda el desarrollo de un sistema automatizado para la limpieza de paneles solares.

En la Figura 1.9 se puede observar la propuesta de otra tesis investigada, con el título "Diseño de un prototipo limpiador automatizado para paneles solares de dimensiones 160 x 90 x 4", se enfoca en la creación de un prototipo específico de limpiador automatizado diseñado para paneles solares de dimensiones particulares [11].

### Figura 1.9

*Prototipo de robot limpiador para panel solar*



Estos trabajos previos proporcionan una base sólida para el diseño y control de sistemas limpiadores de paneles solares, y sirven como referencia valiosa para el desarrollo del presente proyecto. El objetivo de este proyecto es tomar inspiración de los avances encontrados en la literatura y diseñar una solución local que cumpla con las necesidades específicas de limpieza

de paneles solares de dos grados de libertad, admitiendo una cantidad considerable de paneles y garantizando la eficiencia en la operación y reduciendo costos de mantenimiento.



## Capítulo 2

## **2 METODOLOGÍA**

En este capítulo se presenta el procedimiento para alcanzar el objetivo de este proyecto. Se aborda cada fase del proceso de diseño, comenzando por la identificación y evaluación de alternativas viables que puedan ofrecer una solución efectiva a la problemática planteada. A continuación, se detalla la meticulosa identificación de los requerimientos del sistema, considerando aspectos mecánicos, eléctricos y de control, con el propósito de establecer las bases necesarias para el desarrollo del diseño final. Asimismo, se discute el proceso de selección de elementos clave, destacando cómo la elección de componentes mecánicos, eléctricos y de control contribuye al diseño.

### **2.1 Selección de la alternativa de solución**

Basándonos en la problemática presentada en el capítulo previo, se han identificado y delineado tres posibles soluciones para abordar el sistema de limpieza automatizado, las cuales se describen a continuación:

#### **Alternativa 1:**

Diseño y control de un sistema limpiador de paneles solares que se desplace a través de rieles, por toda la fila de paneles solares, cuando se encuentre en la posición indicada, el mecanismo se colocará a la altura de la celda fotovoltaica y se moverá de izquierda a derecha mediante una irrigación de agua seguido de un escurridor de vidrios para su limpieza.

#### **Alternativa 2:**

Diseño y control de un sistema limpiador de un panel solar que recorre toda la superficie mediante un brazo articulado de dos eslabones, con el uso un cepillo de cerdas suaves para remover la suciedad.

#### **Alternativa 3:**

Diseño y control de un sistema limpiador de paneles solares que permite la limpieza de dos paneles solares a la vez, que estará entre estos y se moverán a través de dos brazos

articulados de forma simultánea, mediante el uso de irrigación de agua seguido de un escurridor para vidrios para su limpieza.

Para poder seleccionar una alternativa era necesario establecer criterios de selección y su respectiva prioridad, tal y como se muestran en la

**Tabla 2.1.** Explicando brevemente cada criterio:

- **Viabilidad:** Probabilidad de llevar a cabo este mecanismo con los recursos y procesos establecidos.
- **Costo:** El costo debe ser mucho menor que el costo de los paneles solares.
- **Replicabilidad:** Poder colocar un mecanismo por cada fila de paneles solares.
- **Distribución de espacio:** Trabajar en espacios reducidos para evitar colisiones con las otras filas de paneles
- **Autonomía:** Capacidad de funcionar por sí solo, sin la intervención de un operario.
- **Tiempo de operación:** Debe realizar la operación en un tiempo óptimo para limpiar el 99% de la superficie del panel solar.
- **Mantenimiento:** Fácil limpieza, lubricación y/o intercambio de piezas para su mantenimiento.

**Tabla 2.1***Criterios de selección para las alternativas*

Criterios de selección			
Peso	Criterios	Rango de Importancia	% de Decisión
3	Viabilidad	1	20
2.5	Costo	2	16.67
2.5	Replicabilidad	3	16.67
2	Distribución de espacio	4	13.33
2	Autonomía	5	13.33
2	Tiempo de operación	6	13.33
1	Mantenimiento	7	6.67
15	Total		100

Cada alternativa propuesta fue evaluada para cada criterio establecido anteriormente.

Tras los resultados de la

Tabla 2.2, procedemos a seleccionar la alternativa 1 ya que se considera la opción óptima para abordar esta problemática, siendo viable y replicable su fabricación para su uso, donde el diseño nos permite desmontar ciertas piezas para su mantenimiento y limpieza, como el cambio de rodillos.

**Tabla 2.2***Puntuación de las alternativas según los criterios establecidos*

Pesos	Opciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
3	Viabilidad	3	2	2
2.5	Costo	2	3	2
2.5	Replicabilidad	2	3	2
2	Distribución de espacio	2	2	3
2	Autonomía	2	1	2
2	Tiempo de operación	3	2	2
1	Mantenimiento	2	2	2
	Puntaje sin peso	16	15	15
	Puntaje con peso	35	33	32
	Prioridad	1	2	3

## 2.2 Requerimientos de diseño

Con el propósito de diseñar el sistema limpiador de paneles solares, resultó fundamental conocer de antemano los requisitos proporcionados por el cliente. En la

**Tabla 2.3** se presenta un desglose detallado para tener en cuenta los requerimientos de diseño.

**Tabla 2.3**

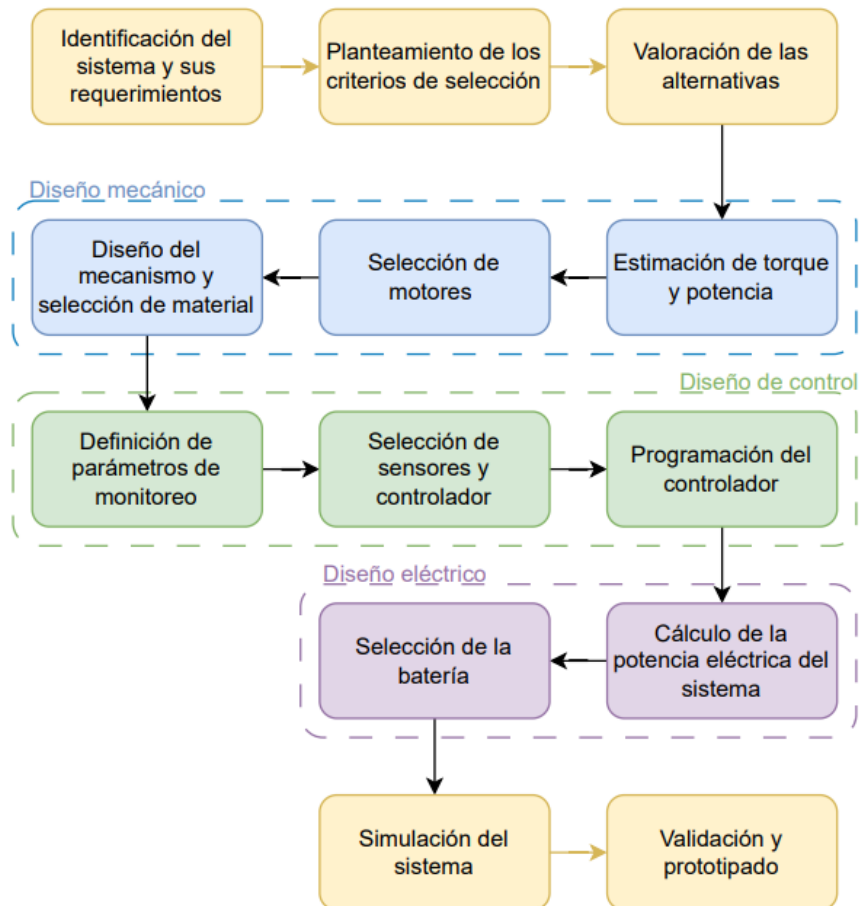
*Detalles de los requerimientos*

Funcionalidad	Capaz de limpiar de manera automática y continua los paneles solares.
Costo	Una inversión rentable capaz de ser replicable para la capacidad de paneles solares.
Autonomía	Que pueda ser montable sin complicaciones en los paneles solares.
Peso	Ser lo suficientemente liviano para que los paneles soporten su peso.

## 2.3 Proceso de diseño

**Figura 2.1**

*Proceso de diseño del limpiador de paneles solares*



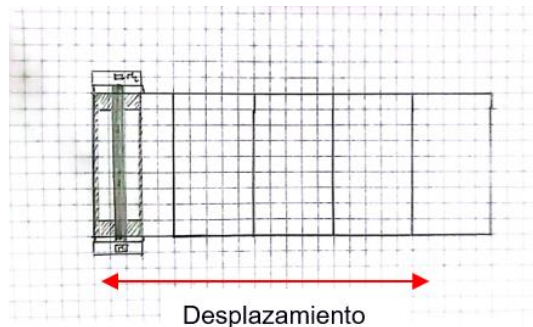
## 2.4 Diseño conceptual

Con el enfoque en los requisitos delineados por el cliente, la formulación del diseño involucró la descomposición del problema en sus componentes fundamentales. Esto permitió abordar de manera adecuada la problemática presentada, de igual manera que se revisaban los requisitos técnicos específicos y se proponía una solución factible. En consideración a la solicitud de un diseño de bajo costo, con capacidad de replicación, ligereza para que el panel solar soporte su peso, y la habilidad de realizar una limpieza automatizada y continua, se presenta un sistema de estructura simple que abarque de manera vertical el panel solar e incorporaría el uso de un rodillo giratorio junto con un desplazamiento a los bordes superior e inferior del panel solar, como

se muestra en la Figura 2.2, en donde se muestra cómo será su desplazamiento a través de los paneles solares y en la Figura 2.3 se observa una vista lateral del sistema de limpieza para paneles.

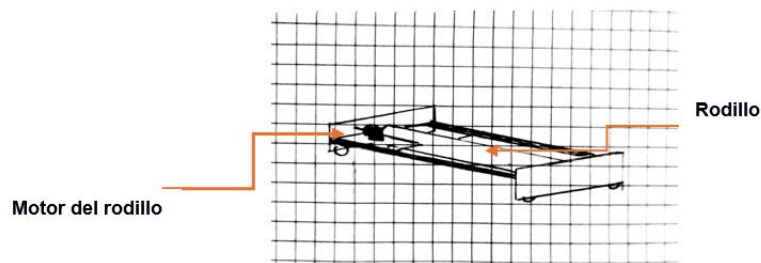
### Figura 2.2

*Vista superior del diseño conceptual*



### Figura 2.3

*Vista lateral del sistema de limpieza*



## 2.5 Diseño mecánico

### 2.5.1 Diseño de ruedas

La estructura dispone de cuatro ruedas para desplazarse y cuatro ruedas de apoyo. Las ruedas de apoyo sirven para acomodar el sistema en la parte lateral del marco del panel solar, siendo esenciales para que el mecanismo pueda operar en superficies inclinadas, además de un apoyo de la existencia de una separación entre paneles solares.

Las ruedas de apoyo manufacturadas en impresión 3D a base del material PLA, debido a sus propiedades mecánicas para este tipo de piezas.



El uso del análisis de resistencia estática sirve para el dimensionamiento de las ruedas de apoyo. Usando el caso más extremo para su estudio, donde el panel se encuentra perpendicular a la superficie de la tierra, todo el peso del mecanismo recae sobre las ruedas. Se puede obtener la fuerza generada por el peso del sistema con la ecuación 2.1:

$$F = m \times g \quad (2.1)$$

$$F = 14[kg] \times 9.81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] = 138[N]$$

Este resultado es dividido entre dos, debido a que lo soportará dos ruedas de apoyo, dando como resultado 69 N.

Realizando los análisis de tensión (Esfuerzo de Von Mises) a través de un programa de simulación, en este caso Inventor, se obtiene que la tensión máxima es de 0.0445 MPa, su deformación máxima es de  $2.9 \times 10^{-4} [mm]$  y un factor de seguridad de 15, por lo que se deduce que la pieza no sufrirá daño.

## 2.5.2 Dimensionamiento del motor del cepillo

La dimensión del rodillo es de 90 cm de longitud por 10 cm de ancho. Un eje hecho a partir de alambre galvanizado. Con estas especificaciones el cepillo pesa aproximadamente gramos 450 gramos.

Considerando estos datos, se calcula el torque requerido con la ecuación 2.2 para que el cepillo pueda girar a velocidad constante con una fricción despreciable, para así escoger un motor adecuado para el cepillado.

$$\tau = F \times r \quad (2.2)$$

$$\tau = \left( 0.45[kg] \times 9.81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \right) \times 0.05[m] = 0.22[Nm] = 2.2[kg.cm]$$

Por medio de este resultado se escoge un motor DC JGA25-370, el cual posee un torque nominal de 2.3 kg, siendo necesario para que el rodillo gire sin problemas.

Además, se calcula el par de arranque mediante el momento de inercia con la ecuación 2.3, en este caso es el momento de inercia de base circular:

$$I = \frac{1}{2} \times m \times r^2 \quad (2.3)$$

$$I = \frac{1}{2} \times 0.45[kg] \times 0.05^2[m^2] = 5.63 \times 10^{-4}[kg.m^2]$$

Con la velocidad nominal que nos otorga el fabricante, podemos obtener la aceleración angular (ecuación 2.4):

$$\alpha = \frac{\omega}{t} \quad (2.4)$$

$$\alpha = \frac{65[rad/s]}{2[s]} = 32.5[rad/s^2]$$

Con los datos calculados anteriormente, se calcula el torque y par de arranque (ecuación 2.5):

$$\tau = \alpha \times I \quad (2.5)$$

$$\tau = 32.5[rad/s^2] \times 5.63 \times 10^{-4}[kg.m^2] = 0.18[kg.cm]$$

$$\tau_{arranque} = 2.2[kg.cm] + 0.18[kg.cm] = 2.38[kg.cm]$$

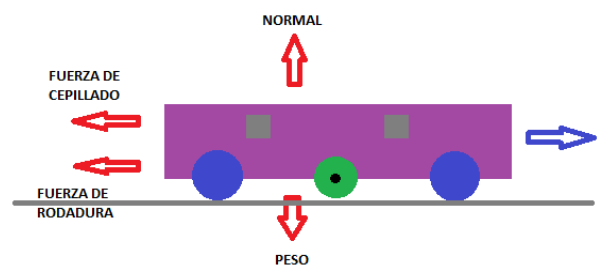
### 2.5.3 Dimensionamiento de los motores de desplazamiento

Para el dimensionamiento de los motores de desplazamiento, es necesario conocer el torque requerido para mover el sistema. Por lo que se determina la fuerza necesaria que ejercen los motores, siendo esta igual a la fuerza de cepillado más la fuerza de rodadura (ecuación 2.6).

$$F_{neto} = F_{cepillado} + F_{rodadura} \quad (2.6)$$

#### Figura 2.4

Diagrama de cuerpo libre del sistema de apoyo



La fuerza del cepillado es despreciable por su magnitud en comparación a las demás fuerzas. Después se calcula la fuerza de rodadura, donde la fuerza normal está dada por el peso del sistema, para así multiplicarlo con el coeficiente de fricción entre las ruedas y el aluminio (Figura 2.4) (Ecuación 2.7).

$$F_{rodadura} = F_N \times \mu \quad (2.7)$$

$$F_{rodadura} = (14[kg] \times 9.81 [m/s^2]) \times 0.5 = 68.67[N]$$

Por consiguiente, se calcula el torque con los datos obtenidos y el radio de las ruedas acopladas al motor de desplazamiento (Ecuación 2.2):

$$\tau = 68.67[N] \times 0.0325[m] = 2.23[Nm] = 22.3[kg.cm]$$

$$\tau = 5.58[kg.cm]$$

Este resultado se dividió para los 4 motores que están disponibles en el mecanismo para su desplazamiento constante. Con esto se puede escoger el motor JGB37-520 que es apropiado por su gran torque.

Con la selección del motor, se aproxima la velocidad que tendrá el mismo en el torque calculado, por lo que se estima que girará a 18 rpm, tenemos que:

$$18 \left[ \frac{rev}{min} \right] \times \frac{1 [min]}{60[s]} \times \frac{2 \times \pi \times 0.0325[m]}{1 [rev]} = 0.06 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Así como la selección del motor de cepillo, aseguraremos que el torque de arranque sea el adecuado cuando llegue a su velocidad final en un lapso de 0.5 s, por lo que es necesario el momento de inercia de la rueda (ecuación 2.3):

$$I = \frac{1}{2} \times m \times r^2 = \frac{1}{2} \times 14[kg] \times 0.0325^2[m^2] = 73.9 \times 10^{-4}[kg.m^2]$$

Con la velocidad obtenida podemos transformarla y calcular la aceleración angular de la rueda (ecuación 2.4):

$$\alpha = \frac{\omega}{t} = \frac{1.89[rad/s]}{0.5[s]} = 3.77[rad/s^2]$$

Con los datos calculados anteriormente, se calcula el torque de arranque (ecuación 2.5):

$$\tau = \alpha \times I = 3.77 \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right] \times 73.9 \times 10^{-4} [\text{kg} \cdot \text{m}^2] = 0.27 [\text{kg} \cdot \text{cm}]$$

$$\tau_{\text{arranque}} = 5.58 [\text{kg} \cdot \text{cm}] + 0.27 [\text{kg} \cdot \text{cm}] = 5.85 [\text{kg} \cdot \text{cm}]$$

#### 2.5.4 Selección de materiales y dimensiones de estructuras

Las dimensiones promedio de un panel solar son de 99 cm x 165 cm con un marco de 4 cm de grosor, por lo que el rodillo del sistema de limpieza deberá tener una longitud de 155 cm y un diámetro de 15 cm, por lo que la estructura debe tener 25 cm de altura [15].

Para la elección del material apropiado para la construcción de la estructura del sistema, se identificó que el aluminio es la opción más adecuada tomando en cuenta los requerimientos del cliente, como se muestra en la

#### Tabla 2.3.

La elección del material de aluminio para el diseño se debe a varias de sus propiedades y características:

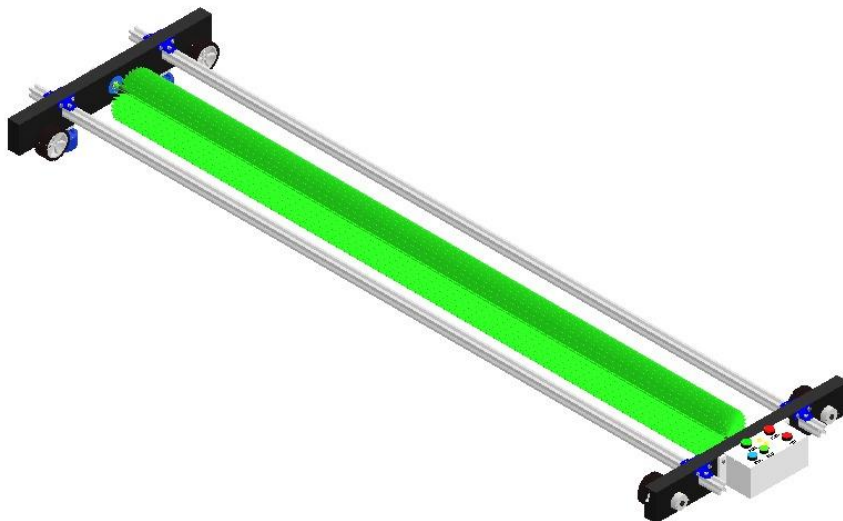
- **Baja Densidad:** El aluminio tiene una baja densidad en comparación con muchos otros metales, lo que lo convierte en un material ligero. Su densidad específica es de aproximadamente un tercio de la del acero.
- **Buena Resistencia a la Corrosión:** El aluminio forma una capa de óxido superficial que le proporciona una excelente resistencia a la corrosión. Esta propiedad es especialmente útil en entornos exteriores o en condiciones húmedas.
- **Facilidad de Fabricación:** El aluminio es fácil de trabajar y moldear, lo que facilita la fabricación de piezas y estructuras personalizadas. Esto también contribuye a la versatilidad del material en aplicaciones específicas.

- Alta Relación Resistencia-Peso: A pesar de ser liviano, el aluminio tiene una buena resistencia mecánica. Su alta relación resistencia-peso lo hace valioso en aplicaciones donde se requiere fuerza estructural sin agregar un exceso de peso.
- Conductividad Térmica: El aluminio es un buen conductor térmico, lo que lo hace útil en aplicaciones donde se busca disipar el calor de manera eficiente.

Es esencial considerar que el sistema, al incorporar un rodillo, debe ser diseñado de manera que este sea desmontable para facilitar un mantenimiento adecuado, reemplazo en caso de desgaste u otras eventualidades. Para lograr esto, se han integrado surcos estratégicamente en el diseño (Figura 2.5), permitiendo que los ejes del rodillo se acoplen de manera sencilla. Estos surcos no solo simplifican el proceso de desmontaje del rodillo, sino que también proporcionan una solución eficiente para realizar ajustes, mejoras o cualquier tarea de mantenimiento necesaria en el sistema. Este enfoque garantiza una operación continua y eficaz al tiempo que facilita la gestión y prolonga la vida útil del rodillo.

### Figura 2.5

*Diseño 3D del sistema de limpieza para paneles solares*



## 2.6 Diseño eléctrico y de control

En el diseño actual del sistema de limpieza para paneles solares, es crucial definir parámetros específicos para garantizar su funcionamiento óptimo. Se deben considerar aspectos

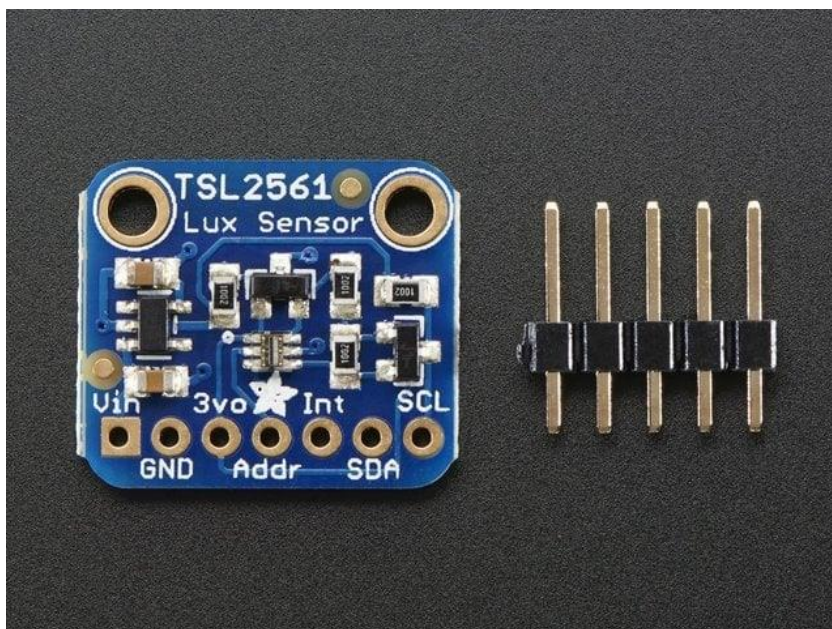
como la velocidad de desplazamiento, la activación automática del sistema en respuesta a la pérdida de potencia generada debido al nivel de suciedad, la posibilidad de un accionamiento manual y la programación automática de mantenimiento basada en frecuencias predefinidas. Es esencial establecer estos parámetros para lograr un rendimiento eficiente y asegurar que el sistema opere de manera efectiva en diversas condiciones.

### 2.6.1 Selección de sensores y controlador

Al escoger la respectiva variable de monitoreo es necesario escoger un sensor que capte este fenómeno, en este caso será la de luz solar. Sabiendo esto el sensor TSL2561 es el indicado para la ejecución del sistema, ya que la salida de este es un voltaje directamente proporcional a la intensidad lumínica enviada hacia el microcontrolador (Figura 2.6).

**Figura 2.6**

*Sensor TSL2561*



Con este sensor podemos controlar que tan sucio se puede encontrar el panel solar y así, envíe una señal al microcontrolador para activar los motores de movimiento y limpieza.

El Arduino nano será el controlador que se usará, por su costo y facilidad de uso, además de ser compatible con el TSL2561, que también permite el acople de módulos controladores de motores-reductores, siendo el más común el puente H (Figura 2.7 y Figura 2.8).

**Figura 2.7**

*Arduino nano*



**Figura 2.8**

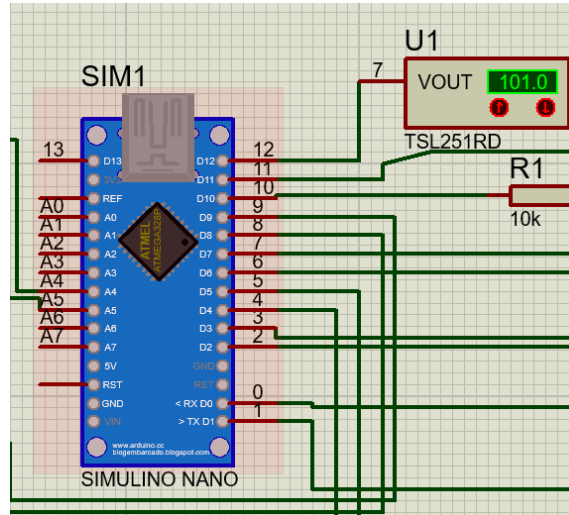
*Módulo puente H para motores DC*



La conexión entre el TSL2561 y el Arduino se muestra en la figura, para sensar la luminosidad del ambiente y establecer un rango de frecuencias para que los actuadores y/o motores empiecen su funcionamiento (Figura 2.9).

**Figura 2.9**

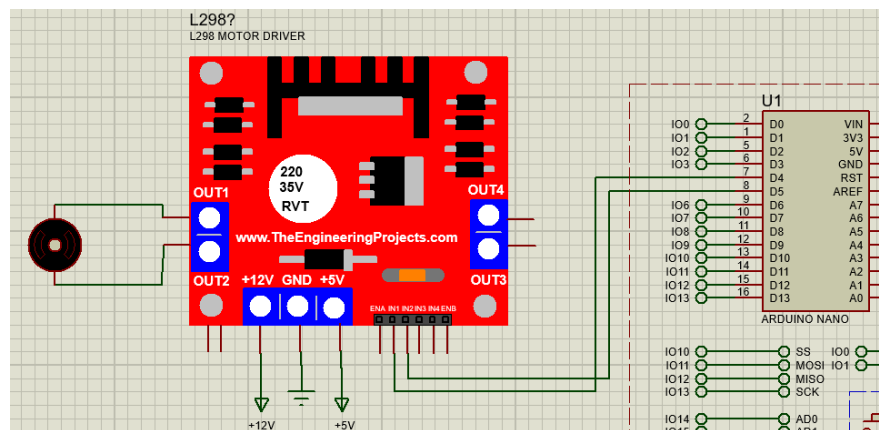
*Diagrama de conexión del TSL256*



En la Figura 2.10 se presenta la conexión de referencia del puente H al Arduino, que controlará la velocidad del motor que genera el movimiento del mecanismo.

**Figura 2.10**

*Diagrama esquemático de ejemplo de conexión del puente H al Arduino*



**2.6.2 Selección de batería**

Para el diseño eléctrico, se decidió usar una batería recargable para facilitar el uso del sistema y evitar las restricciones de conexiones por cables a alguna fuente de energía.

Para la selección de la batería se consideró las especificaciones de los motores y elementos eléctricos a usar en el sistema, para así considerar la capacidad que se requiera, por



lo que en base a estas consideraciones se decidió usar una batería sellada de ácido-plomo, 12 Vcc - 7 Ah (Figura 2.11).

**Figura 2.11**

*Batería de ácido-plomo*



## Capítulo 3

### **3 RESULTADOS Y ANÁLISIS**

En esta sección, se expone el modelado tridimensional del mecanismo de limpieza automática, revelando la disposición del sistema sobre el panel solar. Se detalla la estructura del mecanismo, destacando sus elementos más significativos. Respecto a la parte eléctrica y de control, se presenta tanto la caja de control como la simulación del funcionamiento del sistema, proporcionando una visión integral de su diseño y operación.

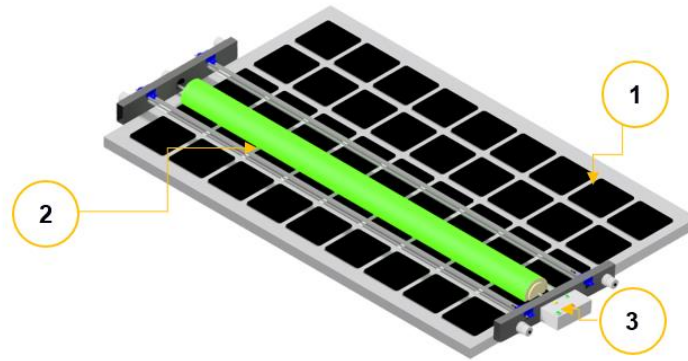
#### **3.1 Diseño mecánico**

En la Figura 3.1 se presenta el diseño propuesto para sistema limpiador de paneles solares con dos grados de libertad, el cual fue diseñado en el software Autodesk Inventor.

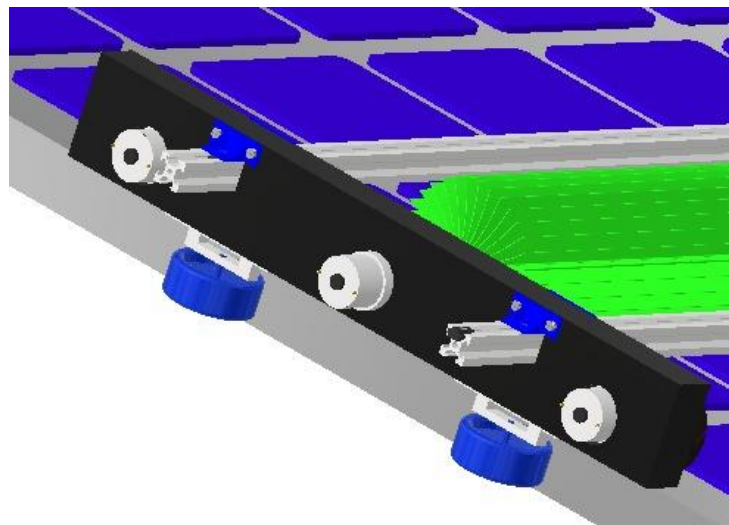
El sistema cuenta con un panel simple de control intuitivo ubicado en la parte inferior, ajustado a la placa inferior. Este panel permite la activación manual, brindando a los operadores la flexibilidad de llevar a cabo la limpieza en momentos específicos o realizar pruebas de funcionamiento por cualquier motivo como una prueba de funcionamiento después de cualquier tarea de mantenimiento (Figura 3.2). Este diseño facilita el manejo del mecanismo, asegurando una operación eficiente y adaptada a las necesidades operativas del usuario. Cabe destacar que el sistema está diseñado con dos perfiles de tipo V para una regulación de la longitud del mecanismo. Esta característica permite ajustar el tamaño del mecanismo para hacer frente a posibles variaciones en las dimensiones de los paneles solares, garantizando una flexibilidad ante cambios en las especificaciones de los paneles solares.

**Figura 3.1**

*Diseño 3D del sistema limpiador de paneles solares: (1) Panel solar, (2) Rodillo del sistema limpiador, (3) Panel de control*

**Figura 3.2**

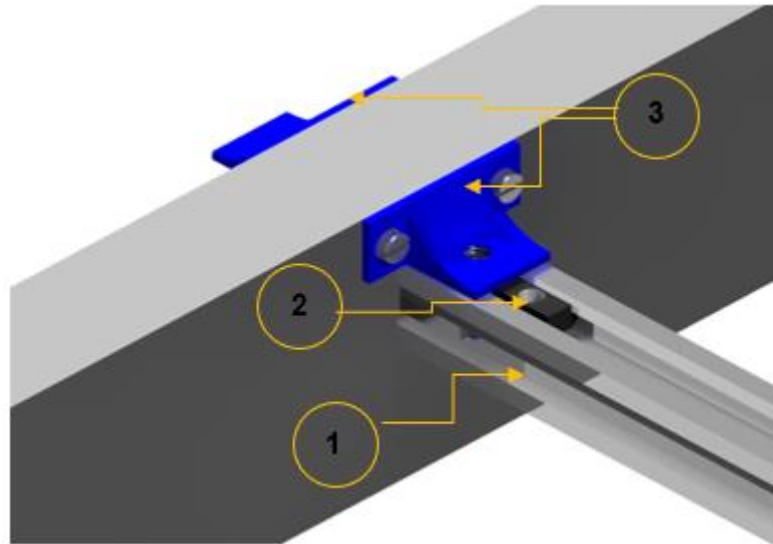
*Vista lateral del mecanismo*



La Figura 3.3 ilustra la capacidad ajustable en longitud del mecanismo mediante el empleo de perfiles "V" de aluminio y tuercas deslizantes. Esto se logra en combinación con la instalación de dos sujetadores en ambos lados de las placas. De esta manera, mediante el uso de pernos, es posible ajustar el perfil "V" a la distancia requerida, de acuerdo con las especificaciones del panel solar o para facilitar el desmontaje o montaje del mecanismo sobre el panel.

**Figura 3.3**

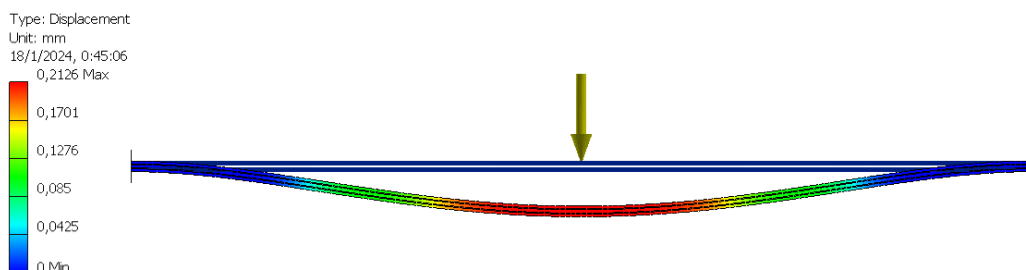
*Mecanismo de ajuste con perfil "v": (1) Perfil "v", (2) Tuerca deslizante, (3) Sujetadores*



El material del perfil "v" es aluminio 6063, una aleación ideal para el mecanismo ya que tiene una estructura lo suficientemente robusta que se adhiere a las exigencias del sistema que se pretende diseñar, lo suficientemente ligero como para optimizar la carga del mecanismo. En la Figura 3.4 se aprecia el desplazamiento lineal en función de su propio peso. Dado que el perfil carece de apoyo en su parte media, se observa una ligera flexión. No obstante, el desplazamiento máximo, ubicado en su parte céntrica con un valor de 0.2126 mm no genera ningún inconveniente en la capacidad estructural del mecanismo. Adicionalmente Figura 3.5 presenta el análisis de esfuerzos de Von Mises, dando como resultado 1.65 MPa.

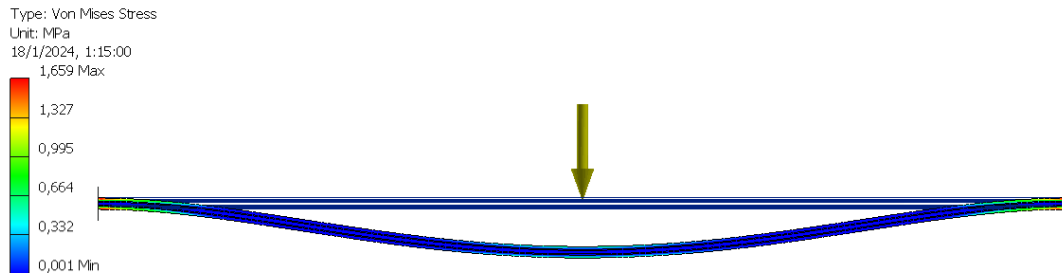
**Figura 3.4**

*Análisis de deformación lineal debido a su propio peso*



**Figura 3.5**

*Análisis de esfuerzo de Von Mises*

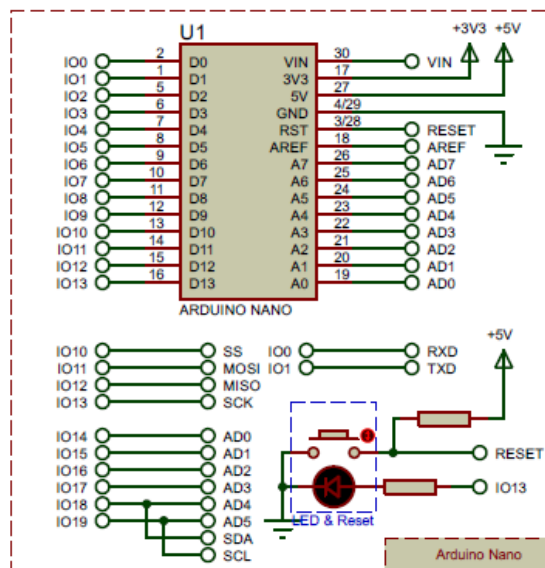


### 3.2 Diseño electrónico

El diseño electrónico tenemos la disposición de los elementos conectados entre sí, donde se observa la relación que tienen los componentes entre sus pines. Empezando por el Arduino Nano en la Figura 3.6.

**Figura 3.6**

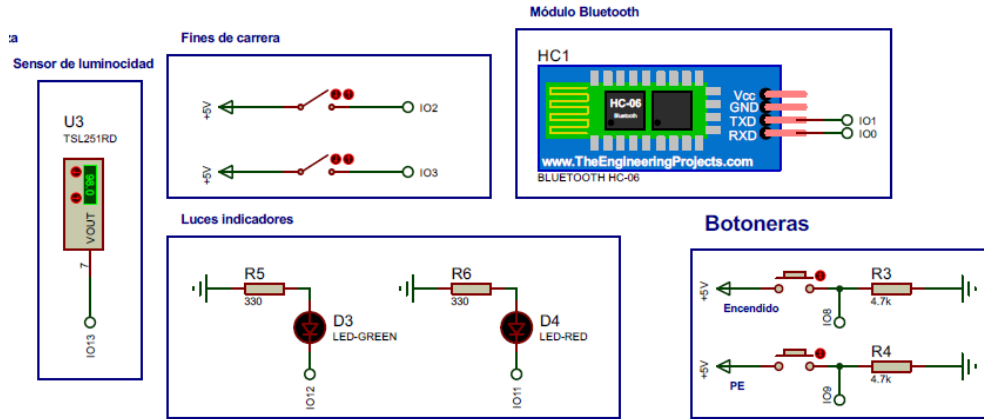
*Diagrama esquemático del Arduino Nano*



En la figura se muestran los módulos de control y sensores, tales como: sensor de luminosidad, fines de carrera, luces indicadoras, botonera y modulo bluetooth (Figura 3.7).

**Figura 3.7**

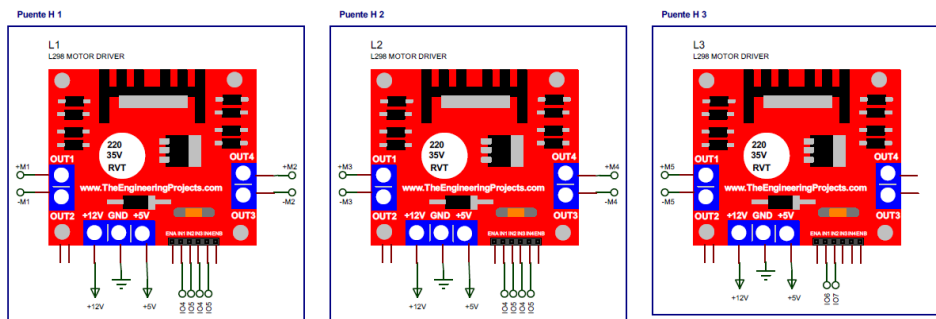
*Diagrama de conexiones de los sensores y luces indicadores*



En la figura se puede observar los 3 puentes H, debido a que cada uno de estos puede controlar 2 motores de manera independiente (Figura 3.8).

**Figura 3.8**

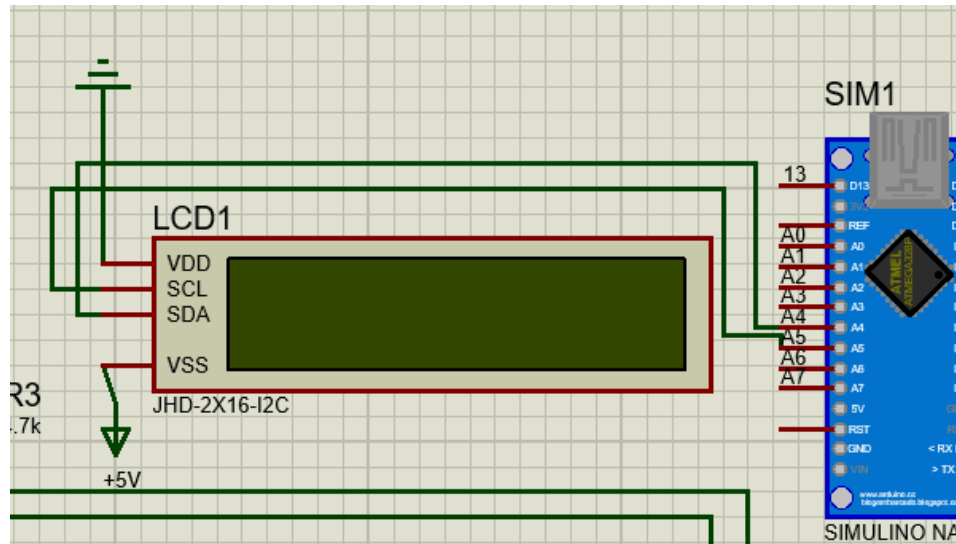
*Diagrama de conexiones de los puentes H*



Mediante el LCD I2C se puede observar mensajes de la operación que está ejecutando el sistema, ya sea en “marcha” o en “espera” (Figura 3.9).

**Figura 3.9**

Diagrama de conexiones del LCD I2C



### 3.3 Diagrama de flujo para la programación

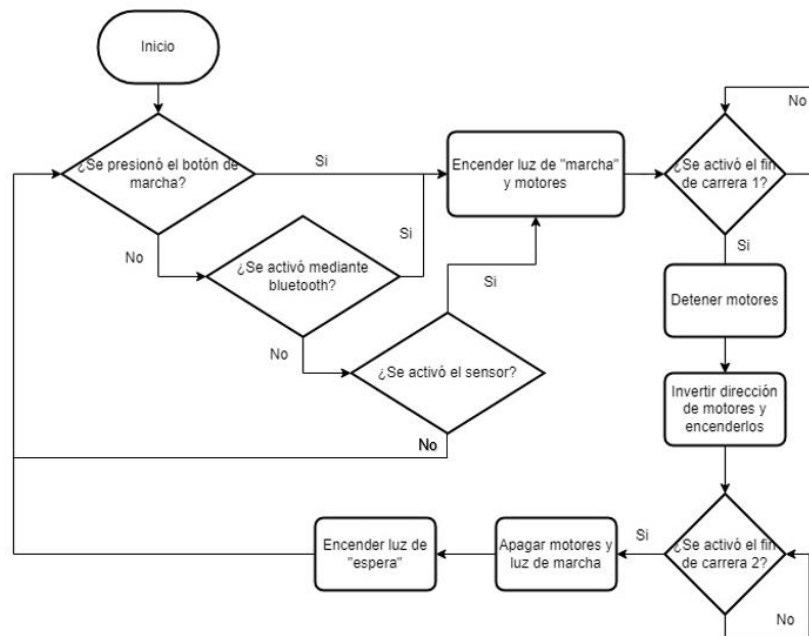
El diagrama de flujo es necesario para poder codificar los procesos que debe realizar el sistema, ya que este debe seguir un orden para no generar conflictos entre los sensores y/o entradas al microcontrolador, así como sus salidas en los motores (Figura 3.10).

El proceso inicia y toma la decisión si se cumple una de las condiciones de activación, ya sea presionar el botón de marcha, bluetooth o el sensor; lo consiguiente es encender la luz indicadora de marcha y encender los motores de desplazamiento y el motor de cepillo. Después se pregunta si se activó el final, de ser ese el caso, se detiene los motores e invierte su dirección para dar marcha atrás. El sistema espera hasta que el fin de carrera dos se active para desactivar los motores y apagar la luz indicadora de marcha, para que al final se encuentre en reposo y se encienda la luz indicadora de espera. Para que al final espere de nuevo una acción que active el sistema.



Figura 3.10

Diagrama de flujo de la codificación



### 3.4 Diseño del panel de control compacto

El diseño del panel del control del mecanismo se observa en la Figura 3.11, donde se aprecia el accionamiento. El panel cuenta con tres botones; encendido, marcha y paro. Adicionalmente se tiene dos luces piloto indicadores del estado del sistema, ya sea en marcha o por parada de emergencia.

Figura 3.11

Panel de control



### 3.5 Análisis de costos

En el presente proyecto se realizó un análisis de costos, el cual se encuentra dividido en tres partes detallados como diseño mecánico, diseño electrónico y mano de obra.

En la Tabla 3.1 se muestra el análisis de costos del diseño mecánico.

**Tabla 3.1**

*Costos de diseño mecánico*

Cantidad	Rubro	Costo unitario	Costo total
4	Perfil en "V" slot de aluminio	\$ 8.36	\$ 33.44
1	Tubo rectangular de acero 30X70	\$ 7.65	\$ 7.65
4	Motor JGB37-520	\$ 17.99	\$ 71.96
1	Motor DC de caja reductora JGA25- 370	\$ 20.00	\$ 20.00
8	Impresión 3D de sujetadores	\$ 10.00	\$ 80.00
8	Tuercas deslizantes 20mm	\$ 1.25	\$ 10.00
7	Impresión 3D de las ruedas	\$ 5.00	\$ 35.00
2	Mecanizado de las placas superior e inferior	\$ 50.00	\$ 100.00
5	Impresión 3D de elementos de protección	\$ 5.00	\$ 25.00
1	Rodamiento 608 8x22x7 mm	\$ 4.65	\$ 4.65
1	Elementos de sujeción	\$ 10.00	\$ 10.00
		Total	\$ 397.70

En la Tabla 3.2 se muestra el análisis de costos del diseño electrónico.

**Tabla 3.2***Costos de diseño electrónico*

Cantidad	Rubro	Costo unitario	Costo total
1	Arduino NANO	\$ 8.90	\$ 8.90
3	Puente H	\$ 4.35	\$ 13.05
1	Módulo HC-05	\$ 3.00	\$ 3.00
2	Interruptor final de carrera	\$ 2.00	\$ 4.00
1	Sensor TSL251RD	\$ 7.00	\$ 7.00
3	Botones de accionamiento	\$ 1.50	\$ 4.50
1	Pantalla LCD I2C	\$ 5.83	\$ 5.83
2	Luces indicadoras	\$ 0.70	\$ 1.40
2	Resistencias 4.7K ohmios	\$ 0.05	\$ 0.10
2	Resistencias 330 ohmios	\$ 0.05	\$ 0.10
		Total	\$ 47.88

En la Tabla 3.3 se muestra el análisis de costos de la mano de obra.

**Tabla 3.3***Costos de mano de obra*

Cantidad	Rubro	Costo unitario	Costo total
1	Diseño	\$ 300.00	\$ 300.00
1	Instalación	\$ 100.00	\$ 100.00
		Total	\$ 400.00

En la Tabla 3.4 Se muestra el análisis de costo total.

**Tabla 3.4***Análisis de costo total*

Rubro	Costo total
Diseño mecánico	\$ 397.70
Diseño electrónico	\$ 47.88
Diseño computacional	\$ 400.00
Total	\$ 845.58

El costo total de construcción final del mecanismo es de \$ 845.58.

## Capítulo 4

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- El mecanismo diseñado ha logrado cumplir eficazmente con los requerimientos de funcionalidad. Su estructura simple y ligera, junto con la facilidad de desarme, facilita tanto el ensamblaje como el desmontaje del sistema, contribuyendo significativamente a su mantenimiento. Las ruedas permiten el desplazamiento a lo largo de los paneles solares, mientras que el rodillo cumple con la tarea eficiente de limpiar el polvo de manera efectiva.
- El sistema se destaca por su enfoque en la automatización y la accesibilidad remota. Con la inclusión de un sensor de luz y dos finales de carrera, el mecanismo permite un control preciso y ajustado a las condiciones ambientales. La adición del módulo Bluetooth brinda la conveniencia de un control remoto a través de una aplicación, asegurando flexibilidad operativa.
- El diseño del mecanismo no solo se centra en la funcionalidad y el control remoto, sino que también aborda la eficiencia energética y el costo de mantenimiento. La limpieza regular del panel solar, respaldada por datos que indican una reducción del 28% en el rendimiento debido a la suciedad, se espera que restaure el rendimiento del panel cercano al 100%. Esto no solo optimiza la generación de energía, sino que también resulta en un ahorro económico a largo plazo para los propietarios de instalaciones solares.

## 4.2 Recomendaciones

- El diseño puede modificarse para aumentar un sistema de irrigación y un limpia vidrios, para asegurar el 100% de limpieza en los paneles fotovoltaicos, de tal manera que primero se limpie con el rodillo limpiador, seguido del agua irrigada y escurrirla pasando un escurridor de vidrios.
- Aumentar un sistema notificador de mantenimiento, ya sea para un mantenimiento general o cambio de rodillos o repuestos, siendo este enviado hacia el dispositivo móvil mediante SMS, Telegram o correo.

## REFERENCIAS

- [1] M. Schmela y R. Rossi, "Global Market Outlook For Solar Power," Junio 2023. [En línea]. Available: [www.solarpowereurope.org](http://www.solarpowereurope.org).
- [2] M. Kingsley-Amaehule, R. Uhunmwangho, N. Nwazor, E. Mbonu y K. Okedu, "Investigation of the Impact of Soot on the Efficiency of Solar Panels using a Smart Intelligent Monitoring System," *INTERNATIONAL JOURNAL of SMART GRID*, vol. 7, nº 1, p. 14, 2023.
- [3] M. d. E. d. Ecuador, "Expansión de la generación," Ecuador, 2019.
- [4] R. Barnett, "Bloomberg Intelligence," 18 Agosto 2021. [En línea]. Available: <https://www.bloomberg.com/professional/blog/midyear-outlook-global-solar-energy/>. [Último acceso: 6 Noviembre 2023].
- [5] M. Cajas y D. Montaluisa, Artists, Diseño y construcción de un sistema automático para limpieza de paneles solares. [Art]. Escuela Politécnica Nacional, 2012.
- [6] Diario La Hora, "La inversión en energía fotovoltaica se cuadruplicará en Ecuador hasta 2023," *La Hora*, p. 1, 21 Octubre 2021.
- [7] F. A. García Barrios, "Efecto de los factores ambientales en la eficiencia de arreglos de paneles solares fotovoltaicos," Barranquilla, 2018.
- [8] N. Budini, "Universidad Nacional del Litoral - Biblioteca Virtual," 26 Septiembre 2012. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/11185/393>. [Último acceso: 6 Noviembre 2023].
- [9] J. Garrido, Artist, ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ENSUCIAMIENTO POR POLVO EN LA TEMPERATURA DE UN PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO MEDIANTE UN MODELO COMPUTACIONAL UNIDIMENSIONAL. [Art]. Universidad de Chile, 2020.



- [10] M. Herrera, Artist, EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE PANELES FOTOVOLTAICOS BAJO LAS CONDICIONES AMBIENTALES DE GUAYAQUIL. [Art]. Universidad Politécnica Salesiana, 2022.
- [11] J. Carrasco y M. Ramirez, Artists, J. Carrasco y M. Ramirez, Artists, DISEÑO DE UN PROTOTIPO LIMPIADOR AUTOMATIZADO PARA PANELES SOLARES DE DIMENSIONES 160 X 90 X 4. [Art]. Universidad Señor de Sipán, 2020.
- [12] H. Arteaga y L. Uñaca, Artists, INFLUENCIA DE LA ACUMULACIÓN DE POLVO EN LA GENERACION DE POTENCIA DE MODULOS FOTOVOLTAICOS. [Art]. Universidad Nacional del Santa, 2021.
- [13] B. Malo, Artist, ESTUDIO DEL EFECTO DE LA LIMPIEZA DE MÓDULOS EN PLANTAS FOTOVOLTAICAS.. [Art]. Universidad de Sevilla, 2011.
- [14] M. Lucena, Artist, ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DE LA LIMPIEZA DE HELIÓSTATOS DE UN CAMPO SOLAR. [Art]. Universidad de Sevilla, 2010.
- [15] Solaico, "Solaico," [En línea]. Available: <https://solaico.com/productos/24-voltios-sl-606-255-260-265-275-280-wp/>. [Último acceso: 15 12 2023].

## **Apéndices**

## APÉNDICE A

### Código Arduino

```
#include <Wire.h>
#include "DFRobot_LCD.h"

//LCD
const int colorR = 255;
const int colorG = 0;
const int colorB = 0;

DFRobot_LCD lcd(16, 2); //16 characters and 2 lines of show

//Iniciar pines de motores
//Motor A - Movimiento
//Luces indicadores
int G = 10;
int R = 11;

//Motor A - Movimiento
int IN1 = 4;
int IN2 = 5;
//Motor B - Rodillo
int IN3 = 6;
int IN4 = 7;
//Fines de carrera
int FC1 = 2;
int FC2 = 3;
//Botoneras
int RUN = 8;
int PE = 9;
//Lectura de dato serial
int dato = 0;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(G, OUTPUT);
  pinMode(R, OUTPUT);

  pinMode(IN1, OUTPUT);
  pinMode(IN2, OUTPUT);

  pinMode(IN3, OUTPUT);
  pinMode(IN4, OUTPUT);
}
```

```

pinMode(FC1, INPUT);
pinMode(FC2, INPUT);

pinMode(RUN, INPUT);
pinMode(PE, INPUT);

lcd.init();
lcd.setRGB(colorR, colorG, colorB);

Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  lcd.clear();
  lcd.print("En espera");
  int SENSOR = analogRead(A7);
  digitalWrite(R, HIGH);
  digitalWrite(G, LOW);
  char dato = Serial.read();
  int estadoPE = 0;
  delay(1000);

  if (SENSOR == 'A' || digitalRead(RUN) == HIGH || SENSOR <= 434) {
    //Posicion Inicial
    do {
      if (digitalRead(PE) == HIGH) { break; }
      digitalWrite(IN1, LOW);
      digitalWrite(IN2, HIGH);
      lcd.clear();
      lcd.print("Mov Pos Ini");
      delay(500);
    } while (digitalRead(FC1) != HIGH);
    digitalWrite(IN1, LOW);
    digitalWrite(IN2, LOW);
    delay(1000);

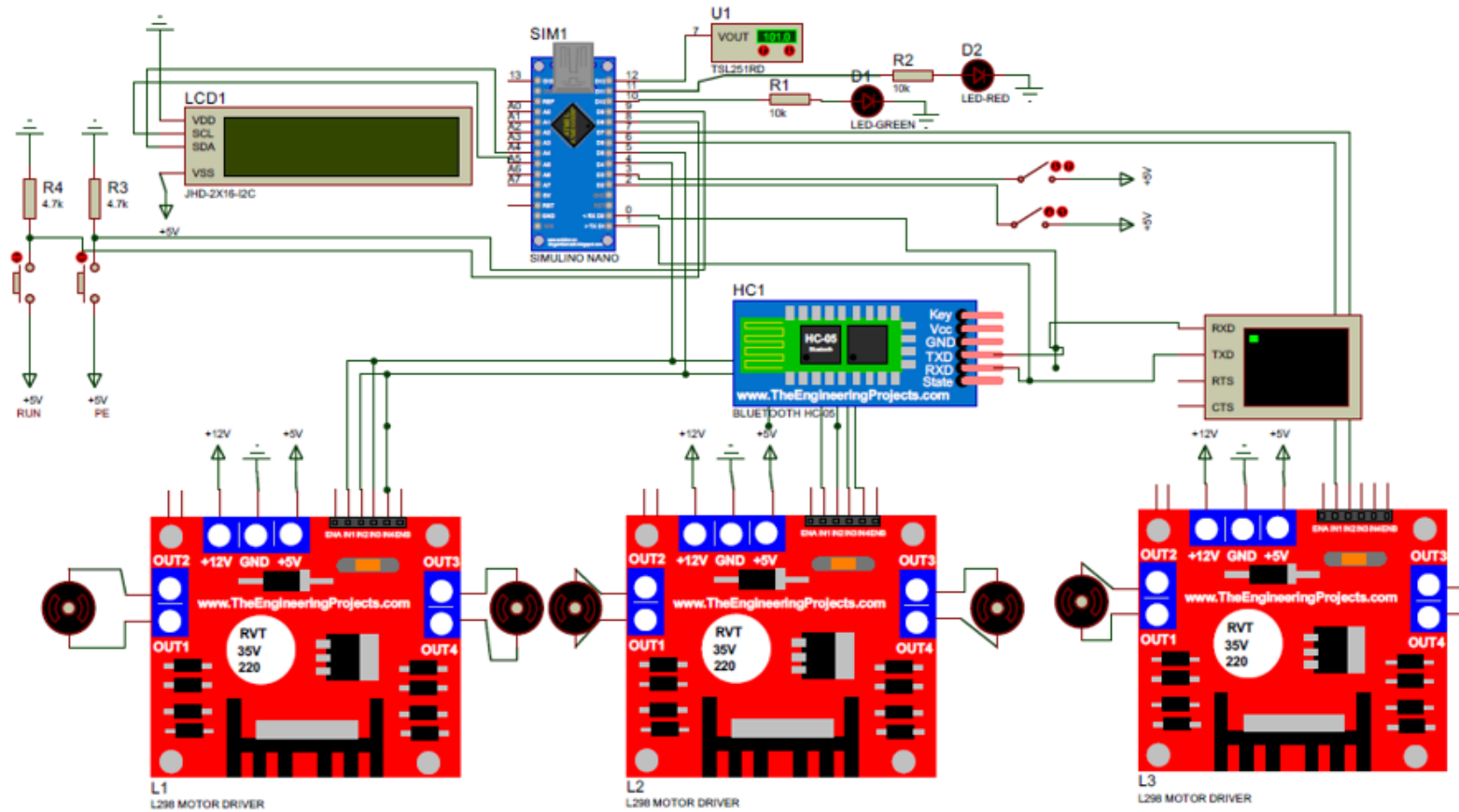
    while (digitalRead(FC2) != HIGH) {
      //Gira Motor B sentido horario
      if (digitalRead(PE) == HIGH) { break; }
      digitalWrite(IN3, HIGH);
      digitalWrite(IN4, LOW);
      lcd.clear();
      lcd.print("En Marcha!");
      delay(1000);
      //Gira Motor A sentido horario
      if (digitalRead(PE) == HIGH) { break; }
      digitalWrite(IN1, HIGH);
      digitalWrite(IN2, LOW);
    }
  }
}

```

```
    delay(500);  
  }  
  
  lcd.clear();  
  lcd.print("En espera");  
  digitalWrite(IN1, LOW);  
  digitalWrite(IN2, LOW);  
  digitalWrite(IN3, LOW);  
  digitalWrite(IN4, LOW);  
  delay(3000);  
}  
}
```

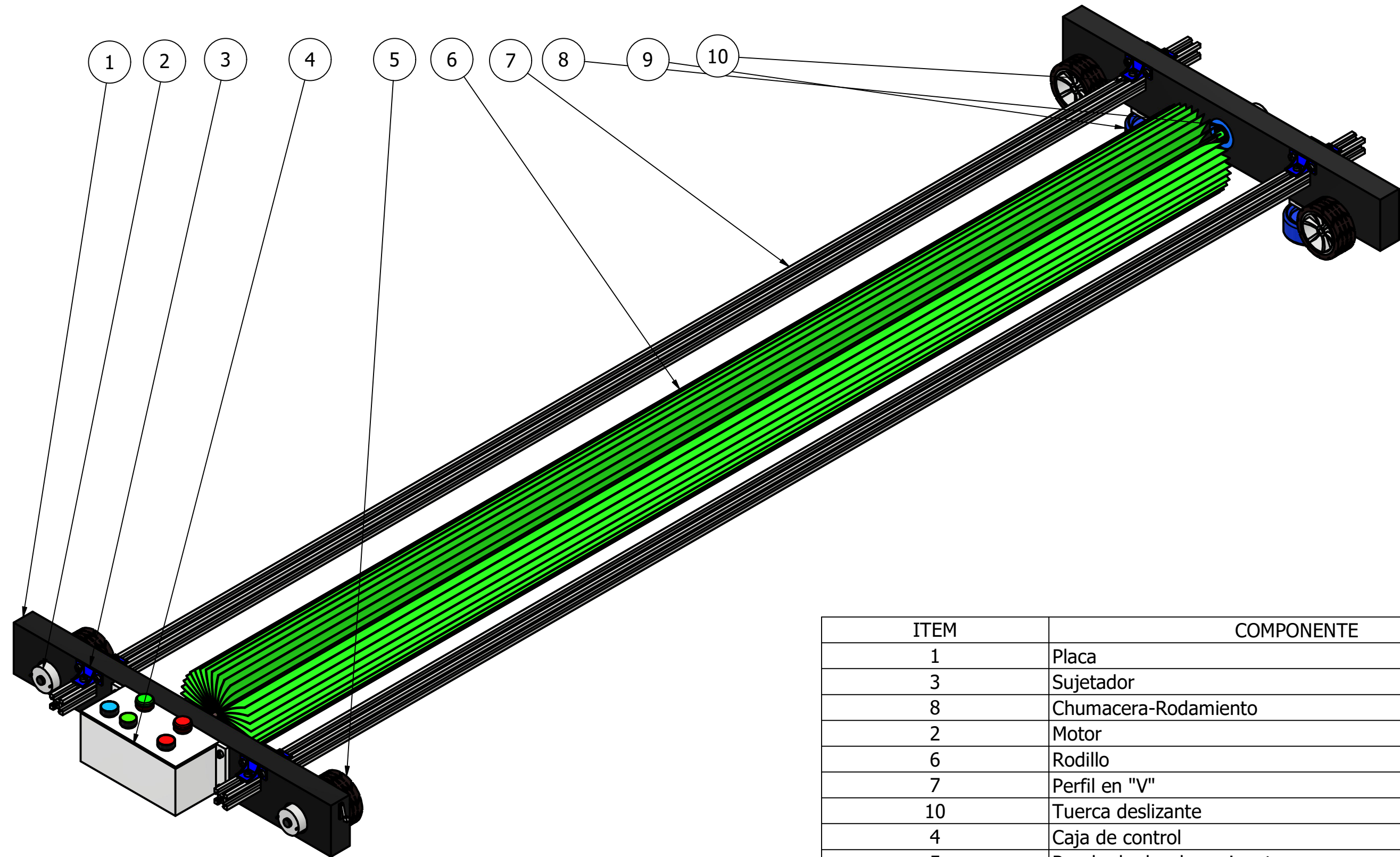
# APÉNDICE B

## Circuito Electrónico



## APÉNDICE C

Planos Mecánicos

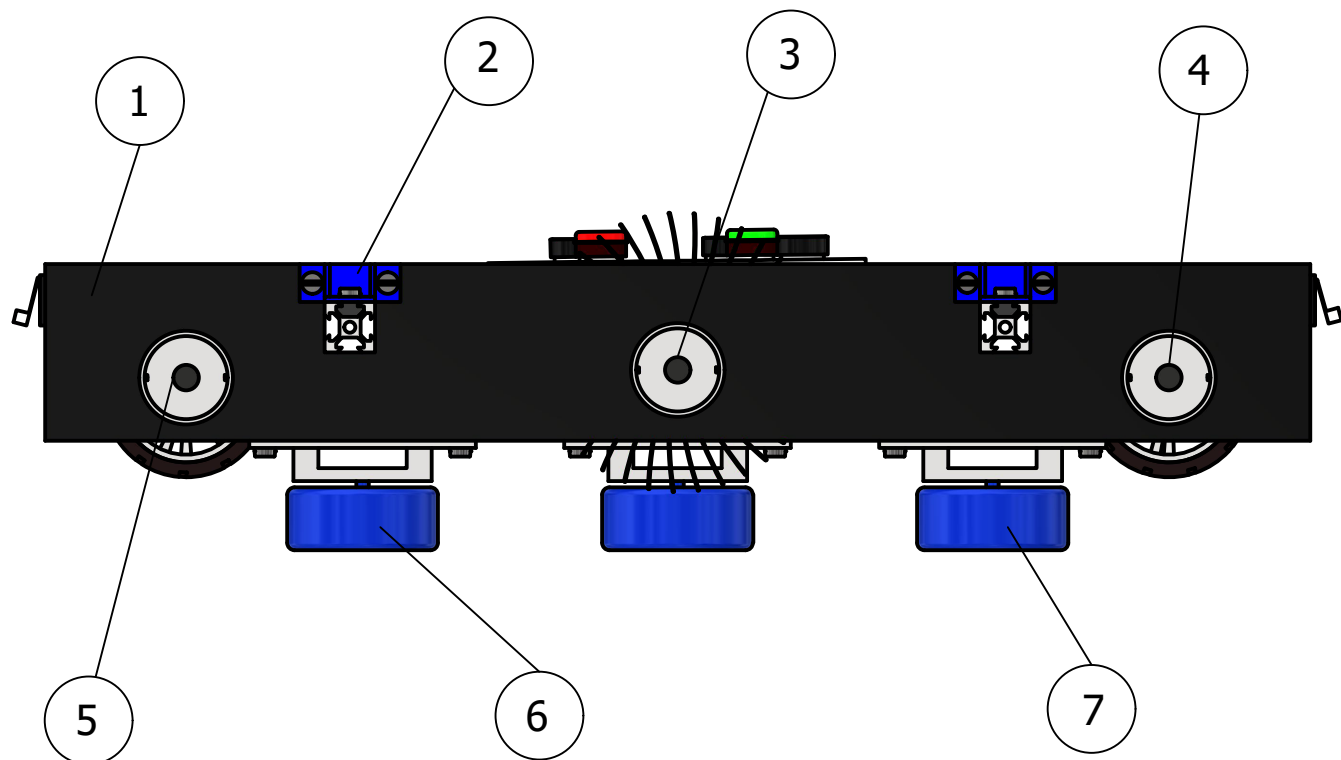


ITEM	COMPONENTE
1	Placa
3	Sujetador
8	Chumacera-Rodamiento
2	Motor
6	Rodillo
7	Perfil en "V"
10	Tuerca deslizante
4	Caja de control
5	Rueda de desplazamiento
9	Ruedas de apoyo

				TOLERANCIAS	PESO	MATERIALES:	
						ABS PLASTIC	
				FECHA	NOMBRE	DENOMINACIÓN:	ESCALA:
				DIB. 26/01/24	A. G. & D. F.	LIMPIADOR DE PANELES SOLARES	1 : 4
				REV.			
				APROB.			
						NUMERO DE DIBUJO:	
						1/13	
						SUSTITUYE A:	
EDI-CION	MODIFI-CACION	FECHA	NOMBRE				



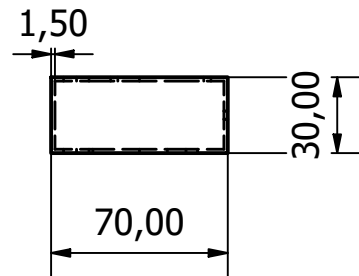
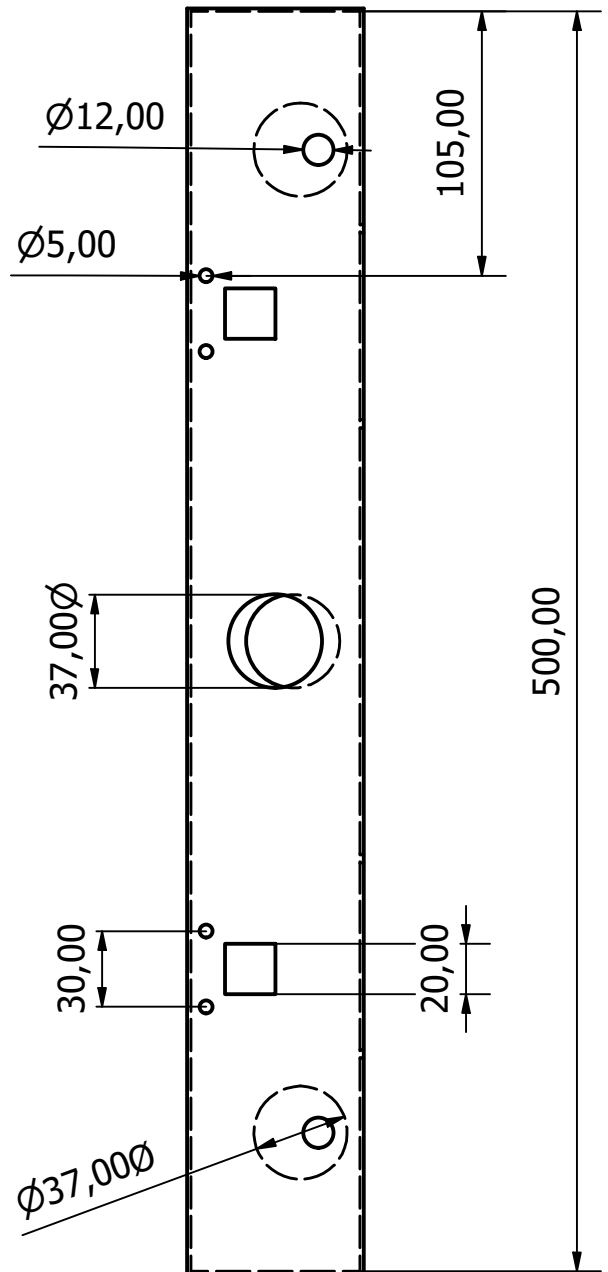
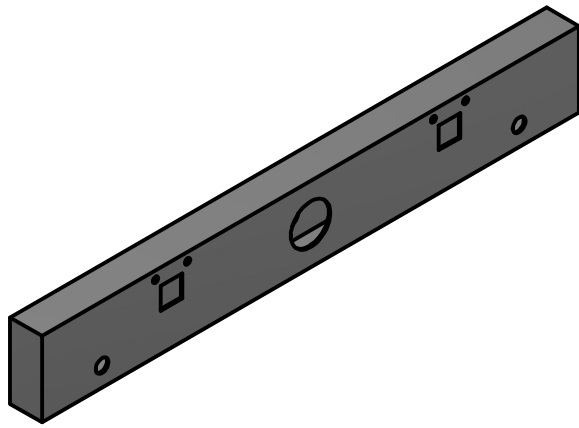




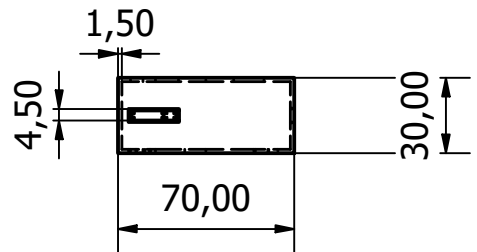
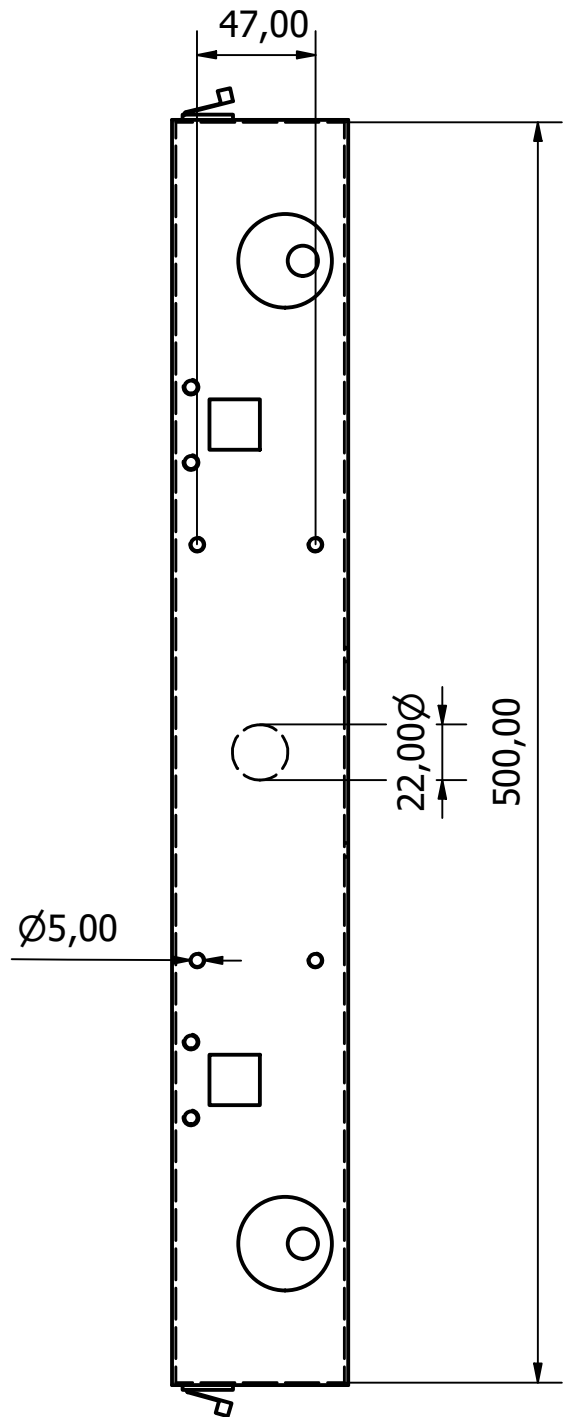
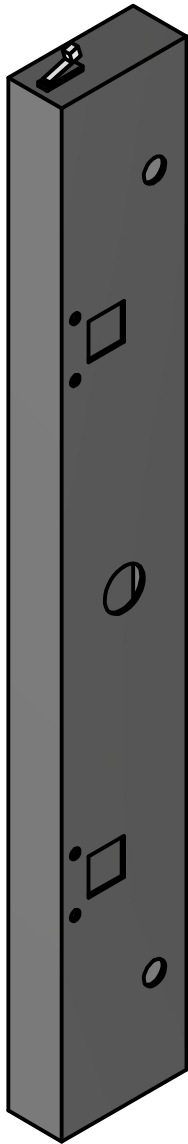
ITEM	COMPONENTE
1	Placa superior
2	Sujetador
3	Motor del rodillo
4	motoro de la rueda 2
5	Motor de la rueda 1
6	Rueda de apoyo superior 1
7	Rueda de apoyo superior 2

				TOLERANCIAS	PESO	MATERIALES:	
				FECHA	NOMBRE	DENOMINACIÓN:	
				DIB. 21/01/24	A. G. & D. F.	PARTES DEL MECANISMO: VISTA LATERAL IZQ.	
				REV.		ESCALA:	
				APROB.		1 : 3	
						NUMERO DE DIBUJO:	
						2/13	
EDI- CIÓN	MODIFI- CACIÓN	FECHA	NOMBRE				

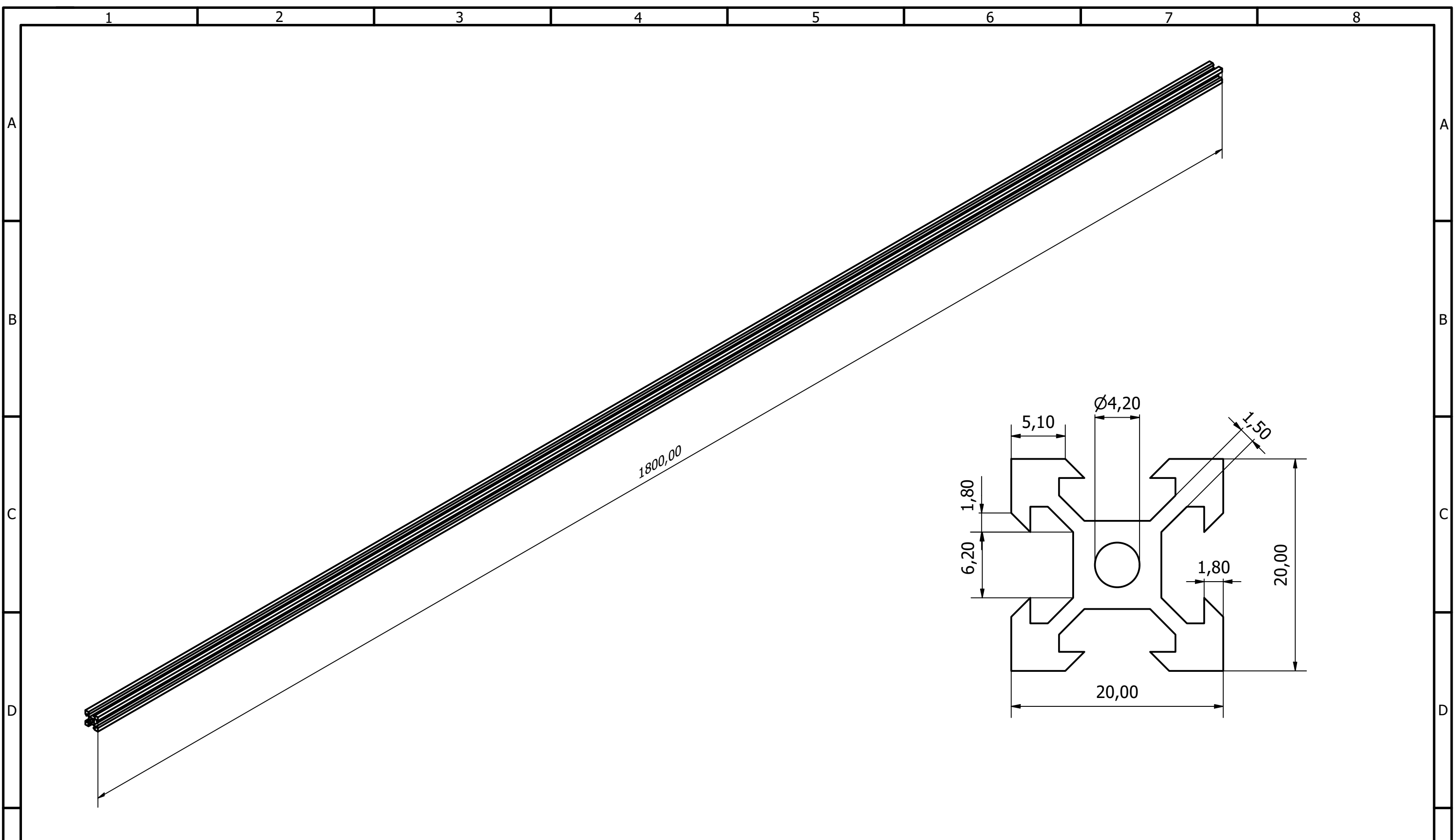




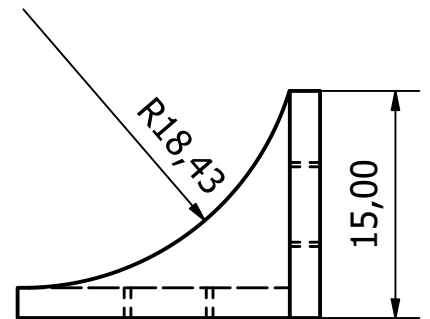
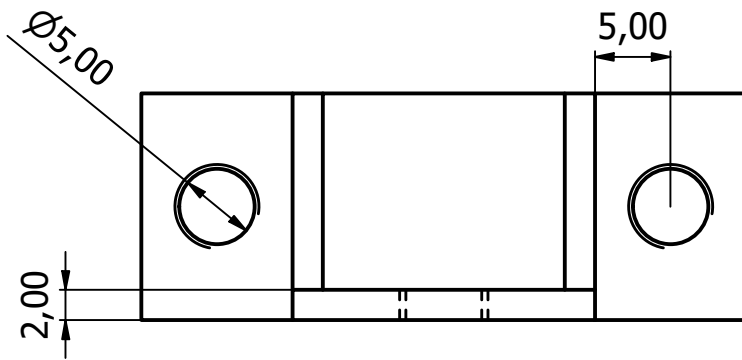
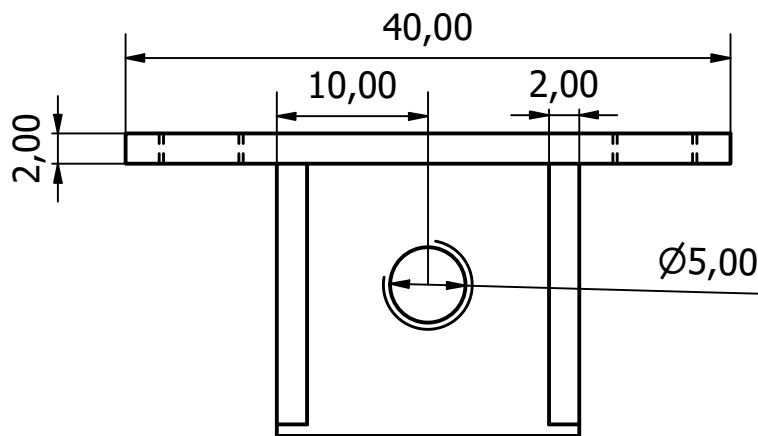
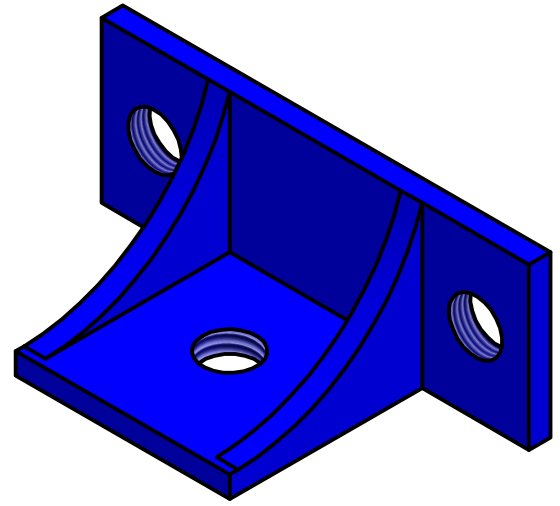
				TOLERANCIAS	PESO	MATERIALES: <b>ACERO AL CARBONO</b>	
						DENOMINACIÓN: <b>PLACA SUPERIOR</b>	
				DIB.	FECHA 21/01/24	NOMBRE A. G. & D. F.	ESCALA: 1 : 3
				REV.			
				APROB.			
						NUMERO DE DIBUJO: <b>4/13</b>	
EDI- CIÓN	MODIFI- CACIÓN	FECHA	NOMBRE				



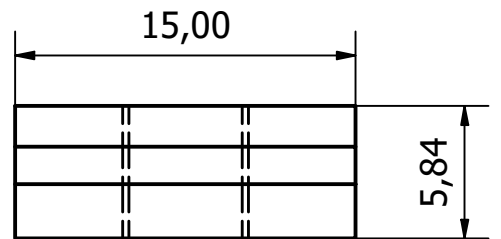
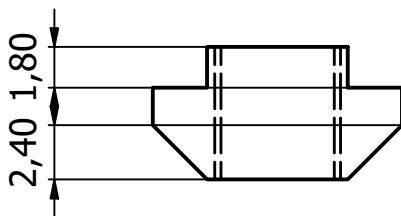
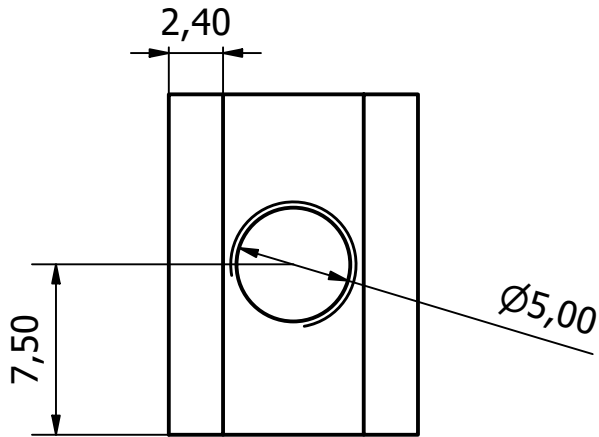
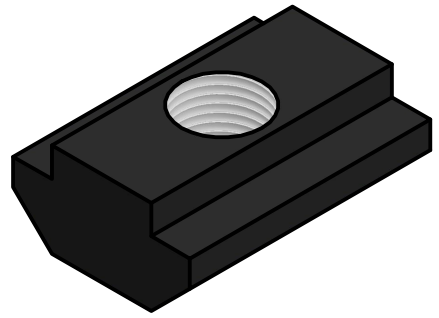
				TOLERANCIAS	PESO	MATERIALES: <b>ACERO AL CARBONO</b>	
						DENOMINACIÓN: <b>PLACA INFERIOR</b>	
				DIB.	FECHA	NOMBRE	ESCALA:
				REV.	21/01/24	A. G. & D. F.	1 : 3
				APROB.			
						NUMERO DE DIBUJO: <b>5/13</b>	
EDI- CIÓN	MODIFI- CACIÓN	FECHA	NOMBRE				



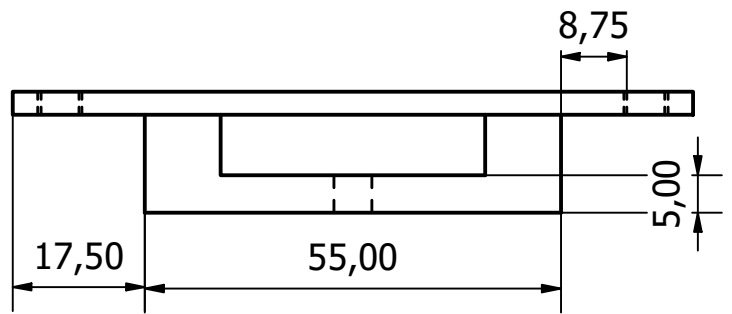
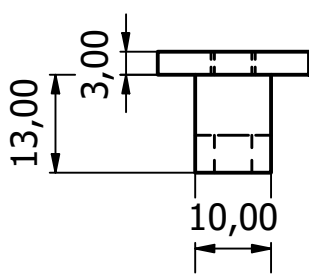
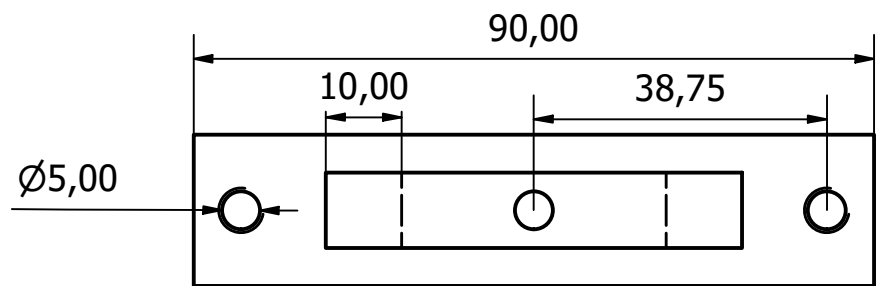
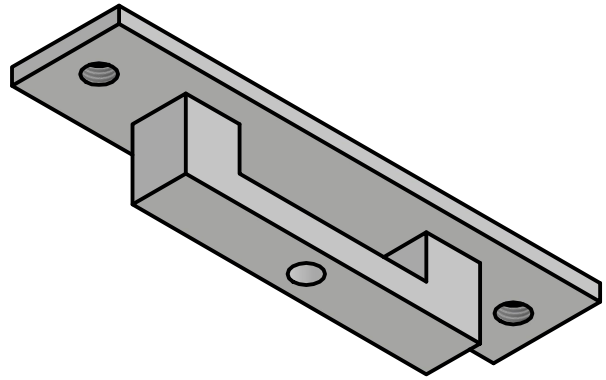
				TOLERANCIAS	PESO	MATERIALES:	
						ALUMINIO	
						DENOMINACIÓN:	ESCALA:
				DIB.	FECHA	NOMBRE	1 : 4
				REV.	26/01/24	A. G. & D. F.	3 : 1
				APROB.			
						NUMERO DE DIBUJO:	
						6/13	
						SUSTITUYE A:	
EDI- CION	MODIFI- CACIÓN	FECHA	NOMBRE				



				TOLERANCIAS	PESO	MATERIALES:	
						ABS PLASTIC	
						DENOMINACIÓN:	ESCALA:
				DIB.	FECHA	SUJETADOR	2 : 1
				REV.	21/01/24		
				APROB.	A. G. & D. F		
						NUMERO DE DIBUJO:	
						7/13	
EDI- CIÓN	MODIFI- CACIÓN	FECHA	NOMBRE				

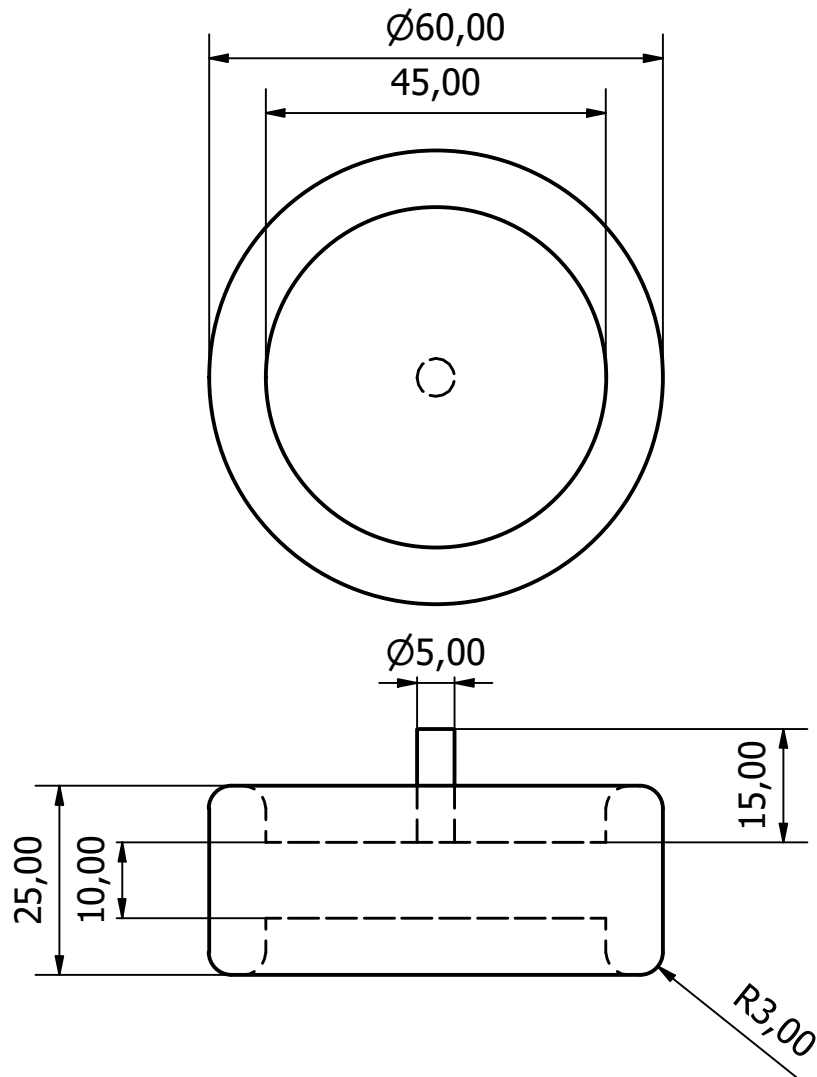
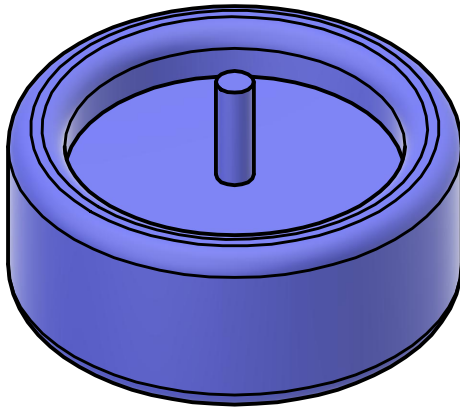


				TOLERANCIAS	PESO	MATERIALES: <b>ACERO AL CARBONO</b>	
						DENOMINACIÓN:	ESCALA:
				DIB.	FECHA	NOMBRE	<b>TUERCA DESLIZANTE</b> 3 : 1
				REV.	21/01/24	A. G. & D. F.	
				APROB.			
						NUMERO DE DIBUJO:	
EDI- CIÓN	MODIFI- CACIÓN	FECHA	NOMBRE			<b>8/13</b>	

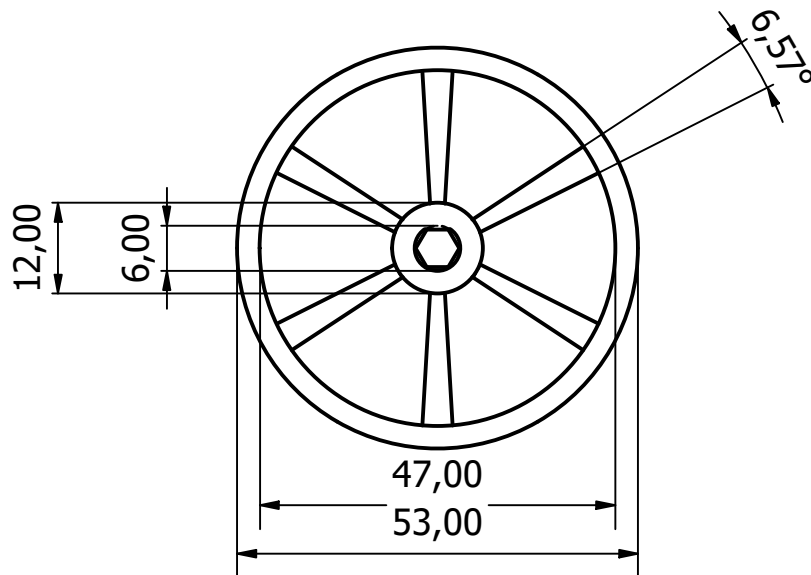
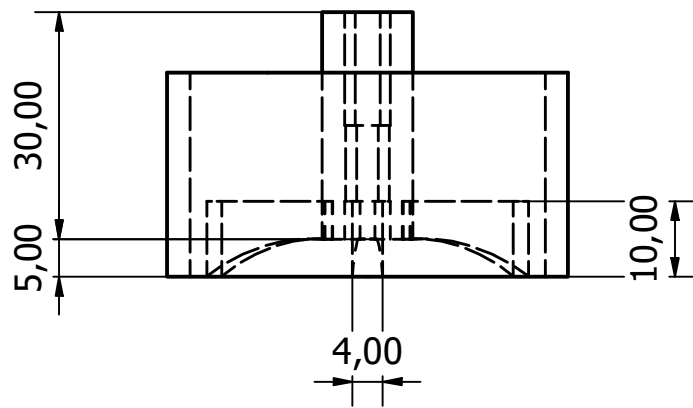
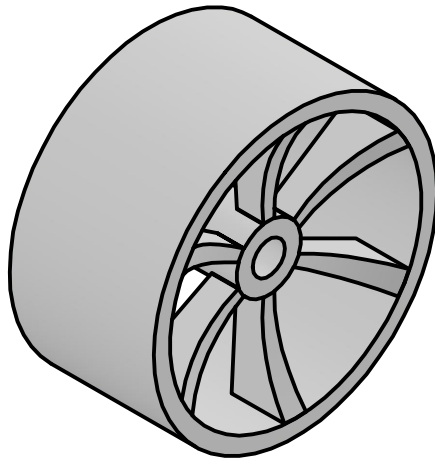


				TOLERANCIAS	PESO	MATERIALES: <b>ABS PLASTIC</b>		
						DENOMINACIÓN: <b>SOPORTE</b>	ESCALA: 1 : 1	
				DIB.	FECHA 21/01/24		NOMBRE A. G. & D. F.	
				REV.				
				APROB.				
						NUMERO DE DIBUJO: <b>9/13</b>		
EDI- CIÓN	MODIFI- CACIÓN	FECHA	NOMBRE					

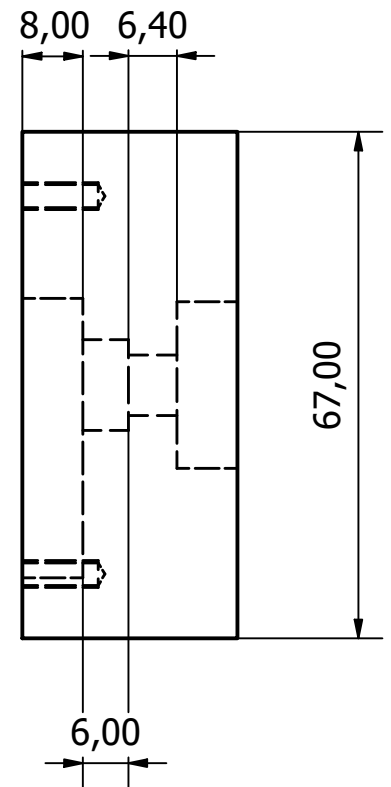
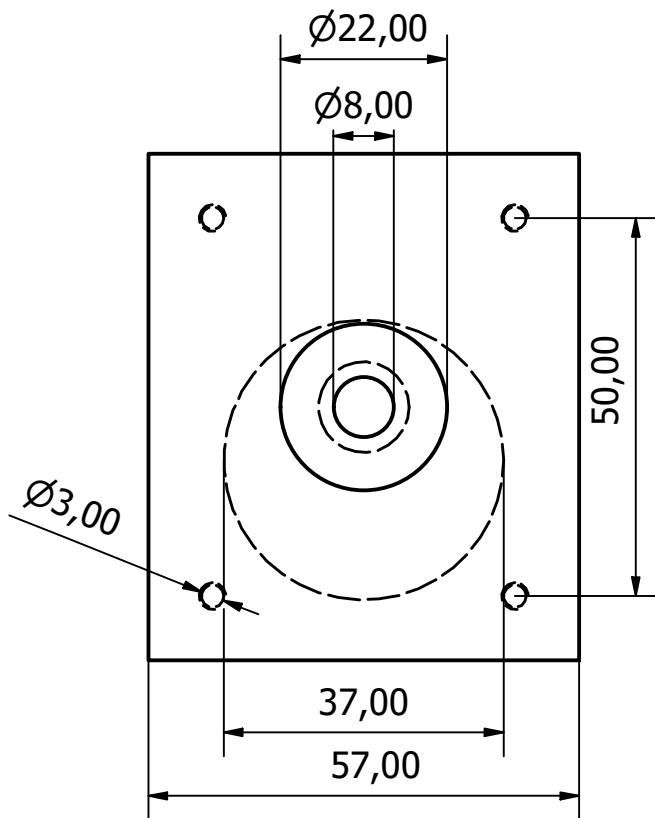
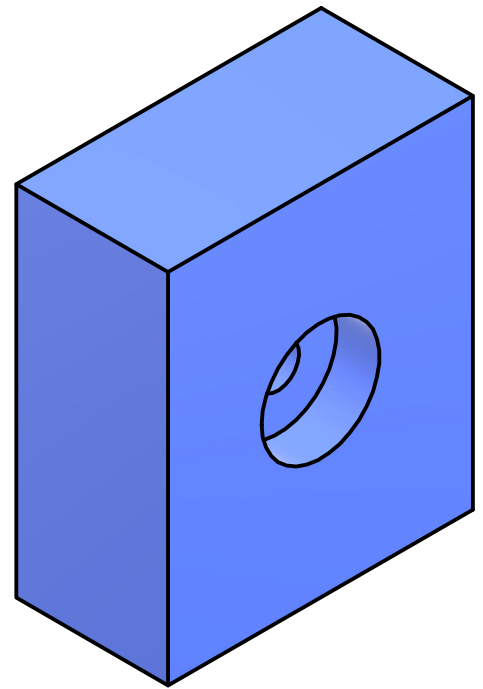
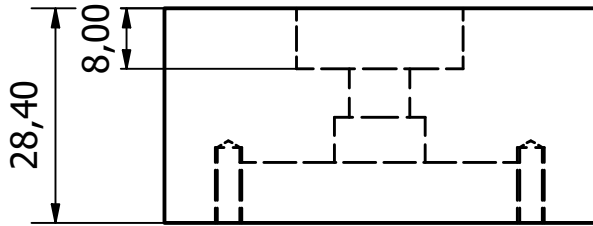




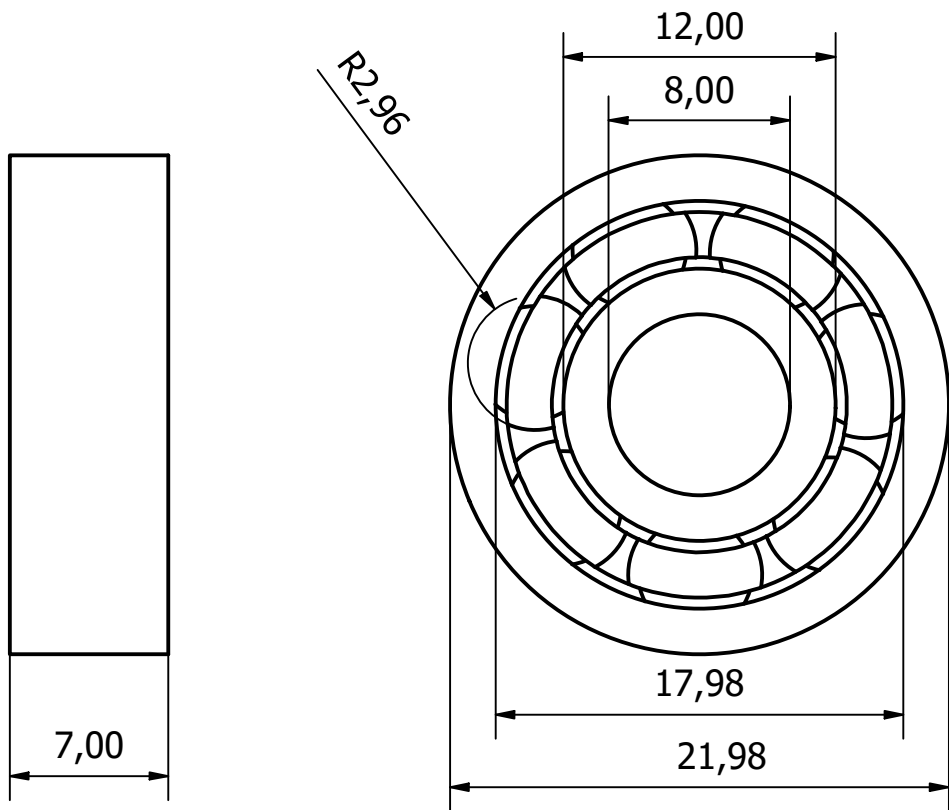
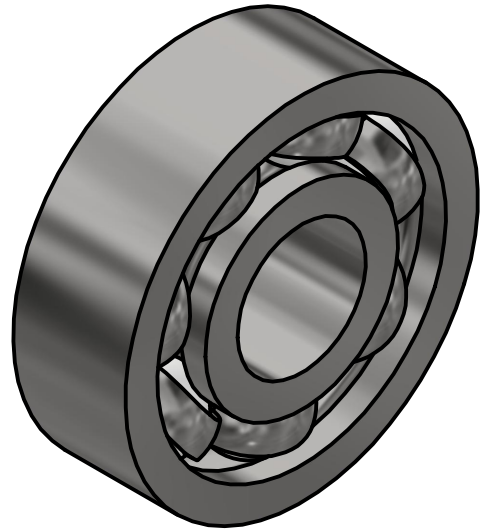
				TOLERANCIAS	PESO	MATERIALES: <b>ABS PLASTIC</b>	
						DENOMINACIÓN: <b>RUEDA DE APOYO</b>	
				DIB.	FECHA 21/01/24	NOMBRE A. G. & D. F.	ESCALA: 1 : 1
				REV.			
				APROB.			
						NUMERO DE DIBUJO: <b>10/13</b>	
EDI- CIÓN	MODIFI- CACIÓN	FECHA	NOMBRE				



				TOLERANCIAS	PESO	MATERIALES:  ABS	
						DENOMINACIÓN: ARO DE RUEDA DE DEZPLAZAMIENTO	
				DIB.	FECHA	NOMBRE	ESCALA:
					21/01/24	A. G. & D. F.	1 : 1
				REV.			
				APROB.			
						NUMERO DE DIBUJO: 11/13	
EDI- CIÓN	MODIFI- CACIÓN	FECHA	NOMBRE				



				TOLERANCIAS	PESO	MATERIALES: <b>ABS PLASTIC</b>	
						DENOMINACIÓN:	ESCALA:
				DIB.	FECHA	NOMBRE	<b>CHUMACERA</b> 1 : 1
				REV.	21/01/24	A. G. & D. F.	
				APROB.			
						NUMERO DE DIBUJO:	
EDI- CIÓN	MODIFI- CACIÓN	FECHA	NOMBRE			<b>12/13</b>	



				TOLERANCIAS	PESO	MATERIALES: ACERO	
						DENOMINACIÓN: RODAMIENTO	
				DIB.	FECHA 21/01/24	NOMBRE A. G. & D. F.	ESCALA: 3 : 1
				REV.			
				APROB.			
						NUMERO DE DIBUJO: 13/13	
EDI- CIÓN	MODIFI- CACIÓN	FECHA	NOMBRE				