



# Universidad **Mariana**

Prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios

Juan David Guerrero Marcillo

Universidad Mariana  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Mecatrónica  
San Juan de Pasto

2024

*Prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios.*

Prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios

Juan David Guerrero Marcillo

Trabajo realizado para obtener el grado de ingeniero mecatrónico.

Ing. Msc. Anghelo Marino Rubio López

Asesor

Universidad Mariana  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Mecatrónica  
San Juan de Pasto

2024

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007

Universidad Mariana

### **Agradecimientos**

En el transcurso de este viaje académico, me siento profundamente agradecido por las valiosas contribuciones y apoyo recibidos de individuos excepcionales que han dejado una marca imborrable en mi camino hacia la culminación de este proyecto de grado y esta etapa en mi vida.

Mi más sincero reconocimiento va dirigido al Ingeniero Anghelo, mi asesor y profesor, cuya orientación experta y colaboración han sido esenciales en cada fase de este proceso. Aprecio profundamente su dedicación y sabiduría, que han sido una fuente constante de inspiración.

Extendiendo mi gratitud al equipo de laboratorio, agradezco a Martin Moncayo y al personal de taller liderado por Julian Reina y sus monitores. Sus observaciones, valiosas contribuciones y correcciones han elevado la calidad y el alcance de mi proyecto.

A la Universidad Mariana, mi alma mater, le dedico un profundo agradecimiento por brindar los espacios necesarios y contar con un distinguido cuerpo docente que ha sido guía y fuente de conocimiento en mi trayectoria académica.

A mi amada familia, apreciados amigos, compañeros y todos aquellos que, de diversas maneras, han aportado en este emprendimiento que, durante mucho tiempo, fue un anhelado propósito de vida. Mi gratitud se desborda hacia ellos, deseando que las bendiciones de Hashem fluyan abundantemente en sus vidas.



### **Dedicatoria**

Con orgullo, me dedico este trabajo de grado como un fiel testimonio de mi esfuerzo, perseverancia y dedicación. Opté por apartarme de una vida rutinaria y cómoda, ya establecida, para embarcarme en este viaje académico. Al reflexionar sobre este logro, celebro no solo mi crecimiento personal, sino que también extiendo mis mejores deseos para que en el futuro alcance mis grandes ambiciones y proyectos. Que encuentre éxito y bendiciones en cada paso, con la guía y benevolencia de Hashem.

Juan David Guerrero Marcillo

## **Contenido**

Introducción .....	13
1. Resumen de la propuesta .....	14
1.1. Descripción del problema.....	14
1.1.1. Formulación del problema .....	16
1.2. Justificación.....	16
1.3. Objetivos .....	17
1.3.1. Objetivo general .....	17
1.3.2. Objetivos específicos.....	17
1.4. Marco de fundamentos teóricos .....	18
1.4.1. Antecedentes .....	18
1.4.1.1. Criterio de búsqueda y bases de datos.....	23
1.4.1.2. Vigencia de la temática. ....	23
1.4.1.3. Descripción de los mejores artículos.....	26
1.4.2. Marco teórico .....	28
1.4.2.1. Clasificación de los módulos de limpiadores de ventanas. ....	29
1.4.2.1.1. Módulo de locomoción.....	29
1.4.2.1.2. Módulo de adhesión .....	30
1.4.2.1.3. El módulo de limpieza.....	31
1.4.2.1.4. Board de desarrollo .....	31
1.4.3. Comunicación.....	32
1.4.3.1. Polipastos. ....	32
1.4.3.2. Tensión de cuerdas. ....	32
1.4.3.3. Factor de seguridad. ....	32

1.4.3.4.	PLA. ....	33
1.4.3.5.	Propela.....	33
1.5.	Metodología .....	33
1.5.1.	Tipo de estudio .....	33
1.5.2.	Línea de investigación.....	34
1.5.2.1.	Diseño cuantitativo.....	34
1.5.3.	Hipótesis.....	34
1.5.3.1.	Hipótesis de investigación.....	34
1.5.3.2.	Hipótesis alternativa.....	34
1.5.3.3.	Hipótesis nula.....	35
1.5.4.	Descripción metodológica.....	35
1.5.4.1.	Fase I Estudios y diseño.....	35
1.5.4.2.	Fase II. Implementación de hardware y software y ensamble del dispositivo.....	36
1.5.4.3.	Fase III. Pruebas de funcionamiento y validación. ....	37
1.5.5.	Validez de la investigación.....	38
1.5.5.1.	Validación interna.....	38
1.5.5.2.	Validación externa. ....	38
1.5.5.3.	Primer experimento. ....	38
1.5.5.4.	El segundo experimento.....	39
1.5.5.5.	Tercer experimento.....	40
2.	Resultados.....	41
2.1.	Diseño del sistema para la limpieza de ventanas con capacidad de movimiento vertical .....	41
2.1.1.	Alternativas de diseño propuestas.....	45
2.1.1.1.	Alternativa de diseño uno.....	45

*Prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios.*

2.1.1.2.	Alternativa de diseño dos.....	46
2.1.1.3.	Alternativa de diseño tres.....	47
2.1.1.4.	Alternativa de diseño cuatro.....	47
2.2.	Construcción del prototipo con las especificaciones técnicas necesarias para limpiar ventanas.....	48
2.2.1.	Módulo de locomoción.....	49
2.2.2.	Sección superior de las cuerdas.....	52
2.2.2.1.	Sección inferior de las cuerdas.....	54
2.2.3.	Módulo de adhesión .....	57
2.2.4.	Módulo de limpieza.....	66
2.2.5.	Módulo de procesamiento .....	69
2.2.6.	Aspecto del dispositivo finalizado .....	76
2.3.	Verificación del funcionamiento del prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios en un entorno de laboratorio.....	79
3.	Conclusiones.....	86
4.	Recomendaciones .....	87
	Referencias bibliográficas .....	88
	Anexos.....	92

**Índice de tablas**

Tabla 1 Criterios de búsqueda enfocada a máquinas limpiadoras de ventanas .....	23
Tabla 2 Principales mecanismos de adhesión.....	42
Tabla 3 Principales mecanismos de locomoción.....	43
Tabla 4 Principales mecanismos de limpieza .....	44
Tabla 5 Criterios que se tuvieron en cuenta para el armado del prototipo .....	45
Tabla 6 Alternativa de diseño de prototipo uno.....	46
Tabla 7 Alternativa de diseño de prototipo dos .....	46
Tabla 8 Alternativa de diseño de prototipo tres.....	47
Tabla 9 Alternativa de diseño de prototipo cuatro.....	48
Tabla 10 Diseño de los prototipos de limpieza de ventanas más relevantes .....	49
Tabla 11 Características físicas de la polea .....	50
Tabla 12 Arreglo de polipastos para el módulo de locomoción .....	51
Tabla 13 Tensión en las cuerdas superiores.....	53
Tabla 14 Factor de seguridad del dispositivo actuador .....	56
Tabla 15 Relación entre corriente y fuerza de los motores .....	58
Tabla 16 Mediciones de RPM y empuje .....	63
Tabla 17 Mediciones de la velocidad del aire generado por la propela en la entrada y en la salida.....	65
Tabla 18 Ficha técnica del rodamiento 607-2RS expedida por el fabricante .....	69
Tabla 19 Ficha técnica del rodamiento 607-2RS expedida por el fabricante .....	75

## **Índice de figuras**

Figura 1 Ejemplos de los sistemas consultados de Qingsong Xu y Zhenjing Li .....	18
Figura 2 Portable Autonomous Window Cleaning Robot.....	19
Figura 3 Automatic Skyscraper Window Cleaning System .....	20
Figura 4 Window Cleaning Robot by using Arduino as Microcontroller .....	21
Figura 5 Three-Modular Obstacle-Climbing Robot.....	22
Figura 6 Vigencia de los artículos .....	24
Figura 7 Vigencia de la investigación con filtros .....	25
Figura 8 Autores con más relevancia en la investigación .....	26
Figura 9 Taxonomía del marco conceptual .....	29
Figura 10 Descripción metodológica por fases .....	35
Figura 11 Experimento que evalúa la fuerza de la propela mediante una gramera.....	39
Figura 12 Representación del experimento para verificación de adhesión y limpieza .....	40
Figura 13 Secuencia de desarrollo del prototipo .....	41
Figura 14 Secciones de tensión de cuerdas .....	52
Figura 15 Sección superior de las cuerdas .....	53
Figura 16 Sujeción al actuador.....	54
Figura 17 Medición del peso del dispositivo .....	55
Figura 18 Experimento con las propelas EP8040 y 1045CCW .....	57
Figura 19 Gráficas de la relación entre corriente y fuerza .....	59
Figura 20 Balanceador de hélices comercial.....	60
Figura 21 Espacio destinado a la propela en el primer y segundo prototipo .....	61
Figura 22 Tacómetro láser y termómetro Extech RPM10.....	61
Figura 23 Toma de mediciones de RPM y del empuje generado por la propela.....	62

Figura 24 Entrada y salida de aire de la propela .....	64
Figura 25 Mecanismo de limpieza .....	66
Figura 26 Adaptación de distintos tipos de herramientas de limpieza .....	67
Figura 27 Rodamientos del carro de limpieza.....	68
Figura 28 Aspecto del ESP32-Cam y su disposición de pines .....	70
Figura 29 Seudocódigo del prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios.....	71
Figura 30 Software de control remoto del Esp32 - Cam.....	72
Figura 31 Diagrama de la electrónica del dispositivo .....	74
Figura 32 Diagrama eléctrico del dispositivo .....	76
Figura 33 Línea de tiempo de los bocetos de los prototipos .....	77
Figura 34 Aspecto final del primer prototipo físico de la máquina limpiadora de ventanas.....	77
Figura 35 Aspecto final del prototipo de maquina limpiadora de ventanas de edificios .....	78
Figura 36 Lugar donde el dispositivo se descolgó, donde simula una azotea de un edificio.....	79
Figura 37 Preparación del escenario con el que se validara parámetros del prototipo .....	80
Figura 38 Preparación del escenario con el que se validara parámetros del prototipo .....	81
Figura 39 Instalación de plumilla en el actuador .....	82
Figura 40 Preparación de la ventana con residuos para limpieza .....	83
Figura 41 Elevación del prototipo hasta la ventana .....	84
Figura 42 Prueba de limpieza del prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios .....	85

**Índice de anexos**

Anexo A. Planos del dispositivo de limpieza .....93

Anexo B. Artículo IEEE construcción del primer prototipo de máquina limpiadora de ventanas.  
..... 103

Anexo C. Acceso a los archivos digitales del prototipo ..... 112

Anexo D. Configuración de la impresora 3D..... 114



## **Introducción**

San Juan de Pasto, una urbe densamente poblada, experimenta un auge en la construcción de edificios de apartamentos para optimizar el limitado espacio de vivienda disponible. La ciudad se enfrenta a desafíos inherentes a la construcción en alturas considerables, y abordar estos problemas requiere un enfoque multidisciplinario. Entre las dificultades más destacadas, se encuentra la acumulación de suciedad en las ventanas de los edificios de apartamentos, especialmente en aquellas áreas de difícil acceso.

Esta problemática cobra notoriedad debido a la necesidad de los residentes de limpiar las ventanas, exponiéndose a riesgos innecesarios, especialmente cuando viven a más de 10 metros de altura. La tarea de limpiar ventanas en estos casos se vuelve extremadamente riesgosa, y se hace evidente la necesidad de desarrollar un dispositivo que pueda llevar a cabo esta labor de manera segura. Surge así la idea de diseñar un prototipo de limpiador de vidrios revolucionario, destinado a hacer esta tarea menos riesgosa para los habitantes de edificios altos.

El prototipo está diseñado con funciones esenciales para la tarea de limpieza. Utiliza un pescante que proporciona movimiento vertical sobre un área de trabajo considerable. Además, cuenta con un sistema de rociado de agua para aplicar el líquido necesario en las ventanas, un sistema de sujeción para alturas considerables y soportes que se apoyan de manera segura en la estructura del edificio. Además, se prevé la incorporación de asistencias mecánicas para ciertas tareas.

El control del prototipo se realizará a distancia, lo que requiere un sistema de control remoto seguro, dada la delicada manipulación de materiales no dúctiles como el vidrio de las ventanas. El proyecto sienta las bases teóricas para la construcción futura de un dispositivo a mayor escala. El prototipado servirá para estudiar las necesidades específicas de implementar una máquina de limpieza de ventanas en la ciudad de Pasto, considerando sus características y requisitos únicos.

## **1. Resumen de la propuesta**

El proyecto, bajo el título "Prototipo de Máquina Limpiadora de Ventanas para Edificios", se centra en la creación de un dispositivo diseñado para instalarse en la parte superior de un edificio y descender posteriormente. El objetivo primordial de este prototipo es llevar a cabo la limpieza de las ventanas exteriores de los edificios mediante un sistema motorizado. Este enfoque busca proporcionar una alternativa más segura para la realización de trabajos a gran altura en la región, considerando el crecimiento constante de edificios de apartamentos y la creciente problemática de acumulación de suciedad en las ventanas.

### **1.1. Descripción del problema**

En San Juan de Pasto, los cambios en su infraestructura urbana han sido notorios; las constructoras han volcado su mirada a las antiguas casas familiares para convertirlas en condominios de apartamentos lo cual ha generado un cambio en la forma de vivir en la ciudad de Pasto hasta nuestros días (Nelson, 2021).

Por su parte, dicho escenario crea una problemática inherente a las grandes estructuras para la población Nariñense, ya que el fenómeno de los grandes edificios ha estado evolucionado y no se detiene (Óscar A. R, 2010).

La altura de estos edificios impide una limpieza adecuada. La polución, los residuos biológicos de aves, la acumulación de basura, las plantas parásitas y la suciedad deterioran la estructura y dificultan el mantenimiento. Además, las empresas que ofrecen estos servicios, como 'Brilladoras El Diamante', que se especializan en la limpieza de alto riesgo, se ven limitadas por la disponibilidad de personal calificado. Este personal debe aprobar un curso en alturas, disponer de herramientas adecuadas, andamios y sujeciones. Además, se debe considerar el factor humano en la actividad de riesgo que implica el trabajo en alturas (Garcia & Gomez, 2019).

Por lo cual muchos edificios en lo que a San Juan de Pasto respecta se ven deteriorados ya que no se hace uso de este servicio por sus implicaciones económicas, que en lo que brilladoras el diamante refiere, no tiene tarifa fija, sino que se individualiza según los requerimientos.

Por esta razón, se busca abordar la problemática de la acumulación de residuos en las ventanas a grandes alturas mediante un prototipo de máquina capaz de realizar la limpieza de ventanales a gran altura. A nivel mundial, existen prototipos funcionales concebidos desde el punto de vista conceptual, como los diseños desarrollados por la empresa estadounidense SkyPro, que cuenta con alrededor de 4 unidades funcionales que equipan diferentes dispositivos enfocados en la limpieza de ventanas. Otra empresa destacada en este ámbito es IPC Eagle, que ofrece a sus clientes una variedad de productos centrados en la limpieza mediante máquinas (Mosquera & Gualdron, 2018). Asimismo, el dispositivo comercial Windoro ha ganado relevancia en el mercado (Young Ho & Kwang Mok, 2011).

La actual situación inmobiliaria en Pasto facilita la investigación de diversos métodos para la limpieza de fachadas y ventanas de edificios en el municipio. La conservación de edificaciones limpias y estéticamente atractivas no solo contribuiría al embellecimiento de la ciudad, sino que también abriría nuevas oportunidades de mercado para dispositivos de limpieza.

Aunque existen maquinarias destinadas a la limpieza de fachadas de edificios, especialmente desarrolladas en países europeos y en Estados Unidos, la revisión bibliográfica indica que estos avances aún no han llegado de manera generalizada a países latinoamericanos. Sin embargo, la revisión también destaca la creatividad desplegada en estos dispositivos. Lamentablemente, muchos de ellos son propiedad de empresas que actualmente realizan actividades económicas y no consideran su comercialización. Algunas empresas, como IPC Eagle, venden dispositivos, pero su costo de adquisición es elevado, ya que están diseñados a medida y orientados al mercado estadounidense.

El "Prototipo de Máquina Limpiadora de Ventanas de Edificios" propuesto busca llenar este vacío en el mercado local no sin antes iniciando desde el prototipado a nivel académico. Este dispositivo estará controlado mediante un sistema remoto y guiado por una cámara para evitar

incidentes con estructuras frágiles como ventanas, y para respetar la fauna urbana que, a grandes alturas, podría incluir aves que construyen sus nidos. Esta iniciativa no solo aborda un problema local, sino que también representa una oportunidad para demostrar el talento regional y la capacidad de proporcionar soluciones innovadoras a desafíos específicos de la región.

### **1.1.1. Formulación del problema**

¿Cómo desarrollar un prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios en la ciudad de Pasto?

## **1.2. Justificación**

Uno de estos desafíos es la acumulación de suciedad en las ventanas, lo que crea una oportunidad para la implementación de un dispositivo como el propuesto. A medida que la construcción de edificios crece, también lo hace la necesidad de soluciones eficientes para mantener la estética y funcionalidad de estas estructuras. El prototipo de máquina limpiadora de ventanas puede abordar específicamente esta problemática, ofreciendo una solución práctica y efectiva para el mantenimiento de los edificios en la región. El proyecto, por lo tanto, se posiciona como una respuesta innovadora a un desafío específico dentro del contexto local (Nelson, 2021).

En Pasto, los condominios residenciales, en promedio, cuentan con 14 pisos de altura. A pesar de que muchos de estos edificios son relativamente nuevos, se observa un evidente descuido en sus fachadas, manifestado en el crecimiento de hierbas parásitas y ventanas opacas debido a la acumulación de suciedad. Aunque la influencia de los agentes naturales es inevitable, abordar este problema es esencial, ya que el mantenimiento regular de los exteriores, especialmente a gran altura, es responsabilidad de los administradores de estos edificios. Este descuido no solo tiene implicaciones estéticas, sino que también afecta aspectos funcionales, sociales y, en algunos casos, la salud de los residentes.

El problema se intensifica en los pisos superiores, donde los residentes muestran un evidente malestar. Por lo tanto, se vuelve imperativo implementar un plan de limpieza periódica que permita

mantener el edificio en un estado agradable para sus habitantes y garantizar un ambiente más saludable y cómodo.

La finalidad del dispositivo denominado "Prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios en la ciudad de Pasto" es proporcionar la base para la creación de un medio seguro e innovador en la región. Este prototipo está diseñado para atender la creciente necesidad de limpieza de ventanas en las torres, ofreciendo un medio seguro donde los riesgos en alturas se mitiguen (Lenis, 2019). La reducción de accidentes por alturas sigue siendo un desafío, y este dispositivo busca ser una solución efectiva y local para mejorar la calidad de vida de los residentes y mantener la estética de los edificios en la ciudad.

En consecuencia, el prototipo tiene como objetivo fundamental abordar la necesidad de limpieza de ventanales, una tarea que de otro modo sería difícil, riesgosa y costosa para los residentes realizar por cuenta propia. Este dispositivo busca proporcionar una solución eficiente y segura para mantener las fachadas de los edificios en condiciones óptimas, contribuyendo así a mejorar la calidad de vida de los habitantes y a preservar la estética de las estructuras en la ciudad de Pasto.

### **1.3. Objetivos**

#### ***1.3.1. Objetivo general***

Desarrollar un prototipo de máquina controlada a distancia para la limpieza de ventanas de edificios desde un enfoque mecatrónico.

#### ***1.3.2. Objetivos específicos***

- Diseñar el sistema para la limpieza de ventanas con capacidad de movimiento vertical.
- Construir el prototipo con las especificaciones técnicas necesarias para limpiar ventanas.
- Verificar el funcionamiento del Prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificio en un entorno de laboratorio.

## **1.4. Marco de fundamentos teóricos**

### *1.4.1. Antecedentes*

Se realizó la búsqueda bibliográfica de los antecedentes en donde se encontró el trabajo denominado *A Survey on Techniques and Applications of Window-Cleaning Robots* del departamento de ingeniería electromecánica de la universidad de Macau en China a cargo de sus autores Qingsong Xu y Zhenjing Li, en donde describe el riesgo de los trabajadores a gran altura y hace un llamado al reemplazo de los humanos por robots. Como observa en la Figura 1, se presenta el entorno en el que estas máquinas operan, lo que denomina un entorno doméstico y a gran altura, distinguiendo así, los mecanismos de locomoción apropiados para cada entorno para cada aplicación específica (Li & Xu, 2021).

### **Figura 1**

*Ejemplos de los sistemas consultados de Qingsong Xu y Zhenjing Li*

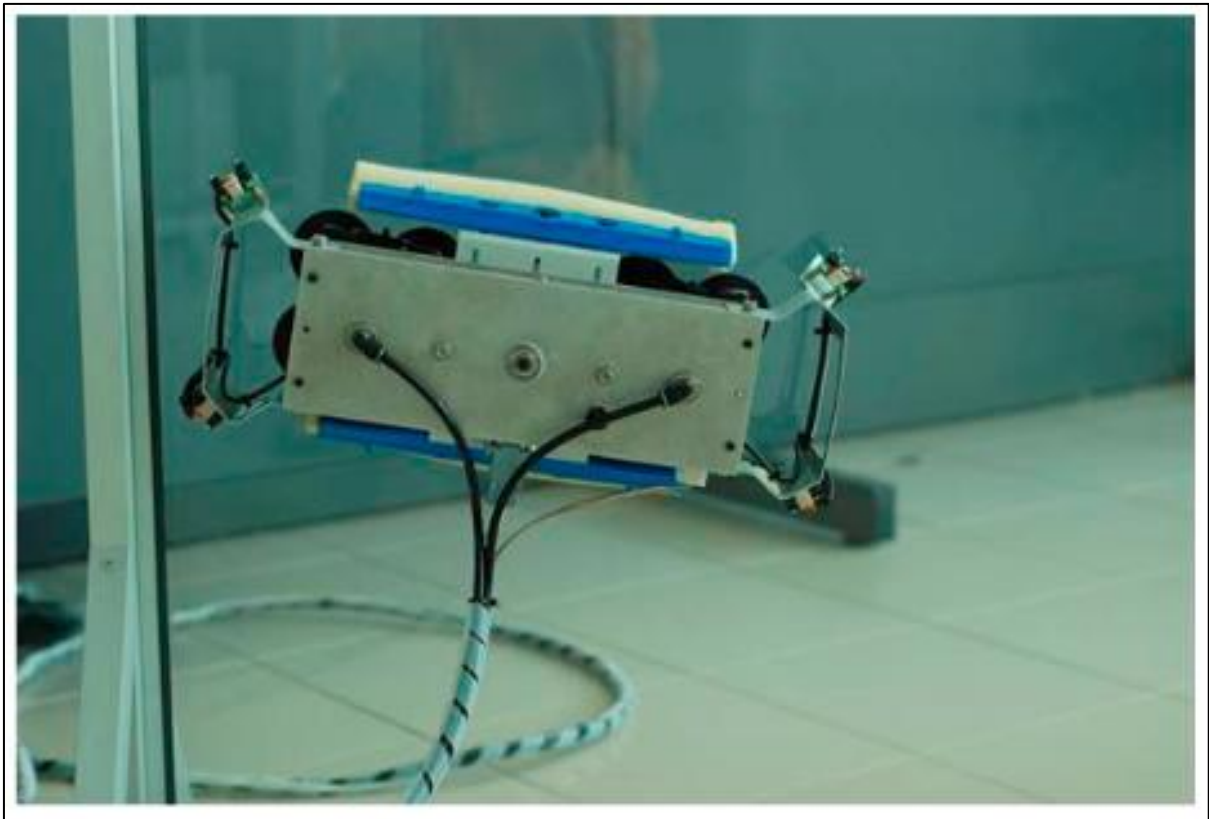


Fuente: Li & Xu, 2021.

El artículo denominado *Portable Autonomous Window Cleaning Robot* el cual hace parte de la International Conference on Robotics and Smart Manufacturing hace referencia a una máquina la cual tiene como objetivo limpiar ventanas, su particularidad radica en que funciona con ventosas, las cuales le permiten su adherencia a los cristales, mientras la máquina realiza su labor de limpieza, su aporte es su portabilidad, el autor refiere que este tipo de máquinas en formato grande a pesar de ser una idea buena, comercialmente son costosas por lo que se hace necesario la construcción de algo pequeño y portátil, esta máquina se la puede observar a continuación en la Figura 2 (Mir-Nasiri et al., 2018).

**Figura 2**

*Portable Autonomous Window Cleaning Robot*



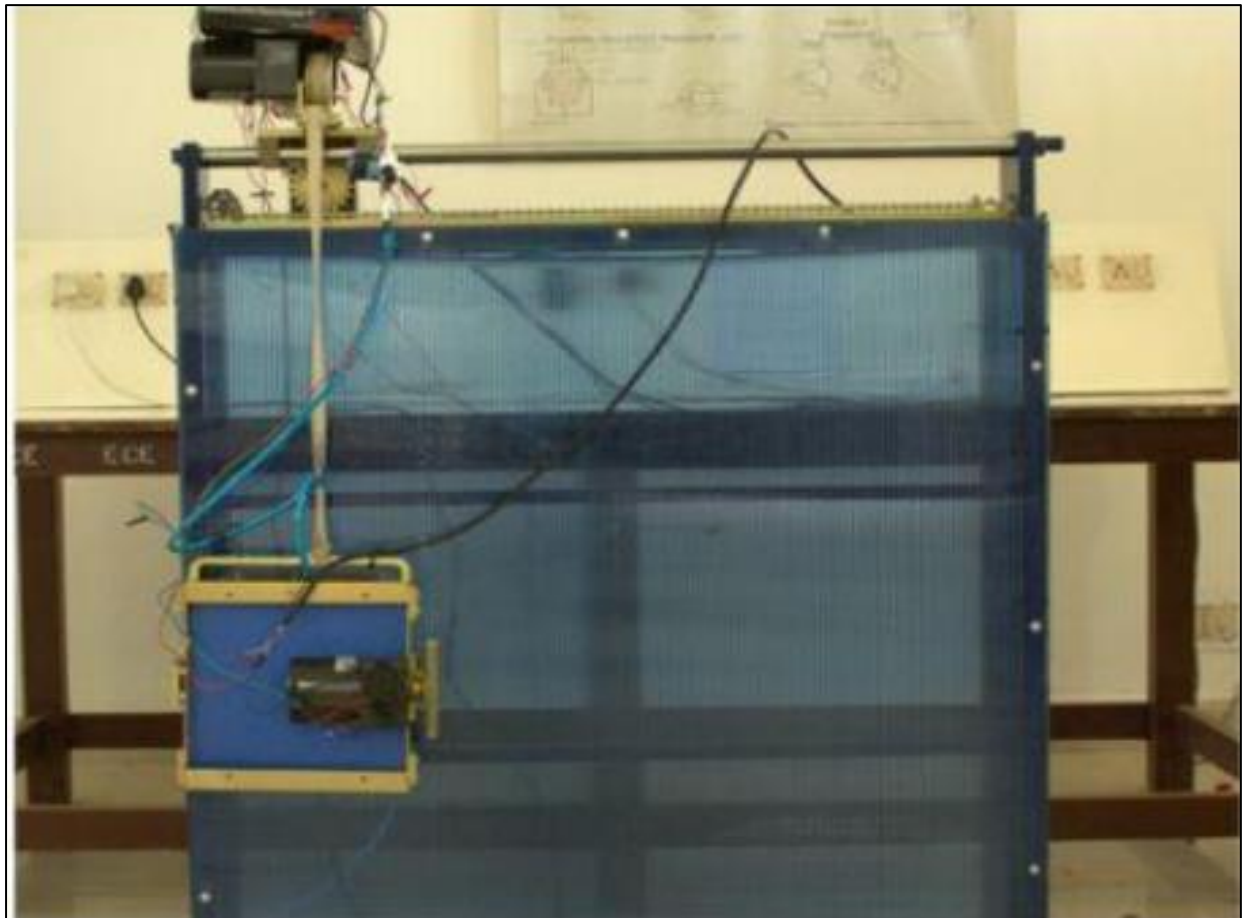
Fuente: Mir-Nasiri 2018.

El trabajo denominado *Automatic Skyscraper Window Cleaning System* creado en Sri Sivasubramaniya Nadar College of Engineering de la India el cual se muestra en la Figura 3; consiste en un robot pensado en minimizar los riesgos de alturas a la hora de limpiar ventanas, es

una plataforma móvil que tiene en su actuador un sistema de rodillos, su cerebro es el MSP430 de la Texas Instruments, su problemática principal consistió en dar solución por un lado al excesivo número de operarios que tiene un andamio y por otro, los riesgos a los que estos se ven sometidos (Kavya et al., 2017).

### **Figura 3**

*Automatic Skyscraper Window Cleaning System*



Fuente: Kavya 2017.

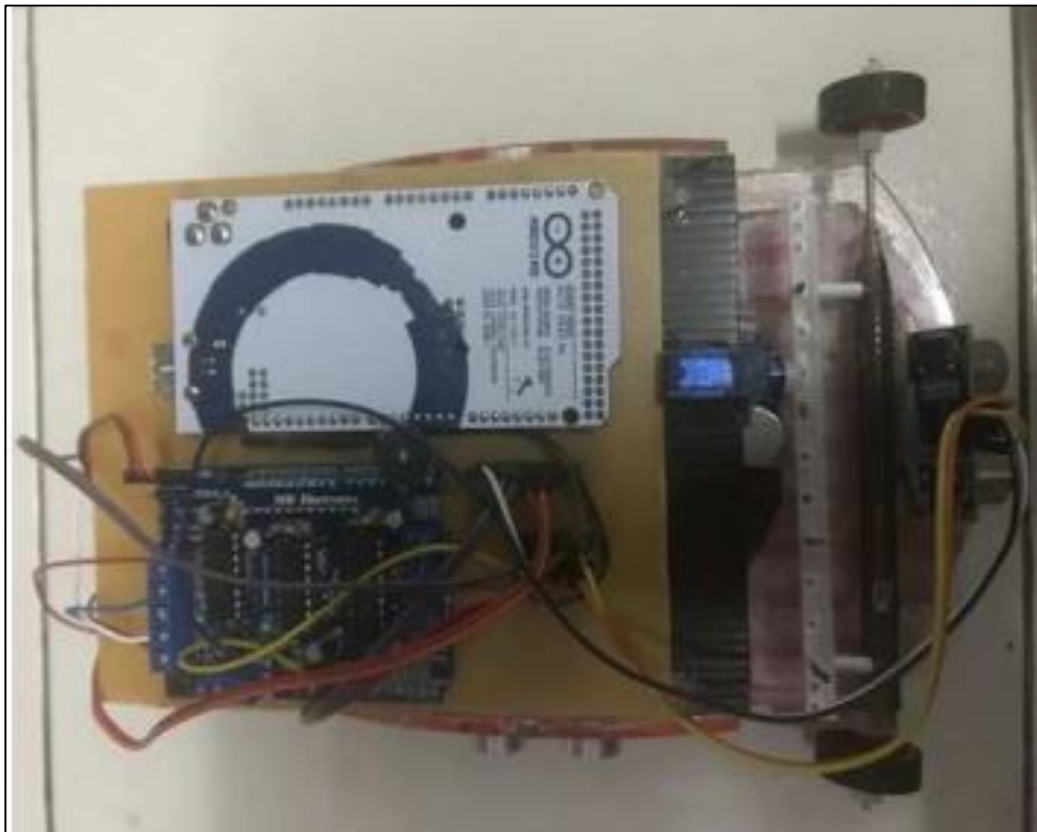
Por otra parte, como se observa en la Figura 4, encontramos un trabajo desarrollado en la placa Arduino denominado *Window Cleaning Robot by using Arduino as Microcontroller*, construido en Malasia en Shah Alam en la facultad de ingeniería eléctrica de Universiti Teknologi MARA, donde la problemática consistió en el gran apogeo que están teniendo los edificios de cristal y la excesiva acumulación de polvo. Los edificios de cristal son estructuras las cuales no muestran un muro hacia



el exterior sino ventanas, ello de igual forma, dificulta y aumenta los problemas a la hora de montar un andamio tradicional, ya que hay más estructuras en riesgo, por lo que se pensó en un artefacto el cual se desplaza de forma magnética, aunque su actuador se limitó a un paño el cual repasa la estructura para el retiro de las partículas acumuladas en las ventanas (Markom et al., 2020).

**Figura 4**

*Window Cleaning Robot by using Arduino as Microcontroller*



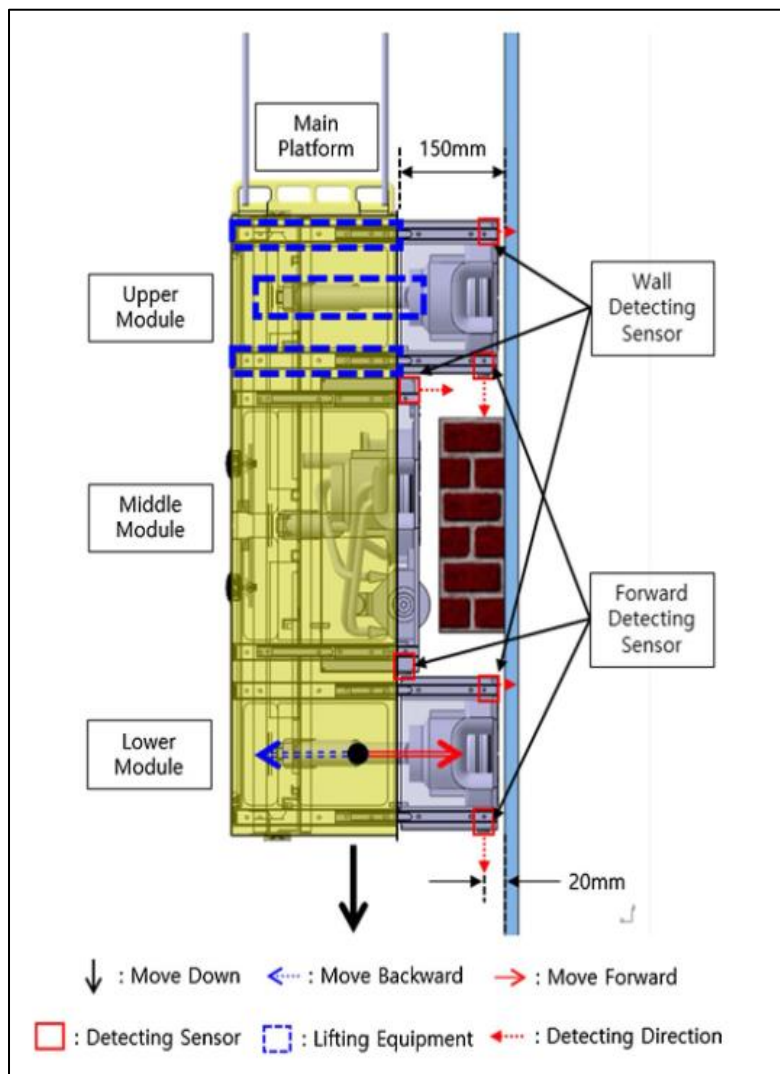
Fuente: Markom 2020.

Por parte del International Journal of Precision Engineering and Manufacturing está el dispositivo denominando *Three-Modular Obstacle-Climbing Robot for Cleaning Windows on Building Exterior Walls* desarrollado por Heonghwa Lee y Baeksuk Chu el cual se encuentra en la Figura 5, este artículo hace una sugerencia de un tipo de máquina la cual es útil para la limpieza de edificios, cuyo extra está en que funciona por módulos, el módulo central y el módulo inferior, corresponden a los sensores del dispositivo, mientras el módulo central corresponde al sistema de

limpieza que consta de un cepillo giratorio que aplica agua y solución jabonosa. La finalidad de los módulos radica en que, al detectar un obstáculo en la vertical, eleve los módulos que sean necesarios, de tal forma que el robot pueda sortear la dificultad (Lee & Chu, 2019).

### Figura 5

*Three-Modular Obstacle-Climbing Robot*



Fuente: Lee & Chu 2019.

**1.4.1.1. Criterio de búsqueda y bases de datos.** Con respecto a la búsqueda, se consulta en la base de datos llamada Scopus, en donde se tiene en cuenta los artículos con más relevancia en los últimos cuatro años, escritos en idioma inglés, los criterios de búsqueda se pueden observar en la Tabla 1, se advierte que la fecha de realización del presente trabajo de grado inicia en enero del 2022.

**Tabla 1**

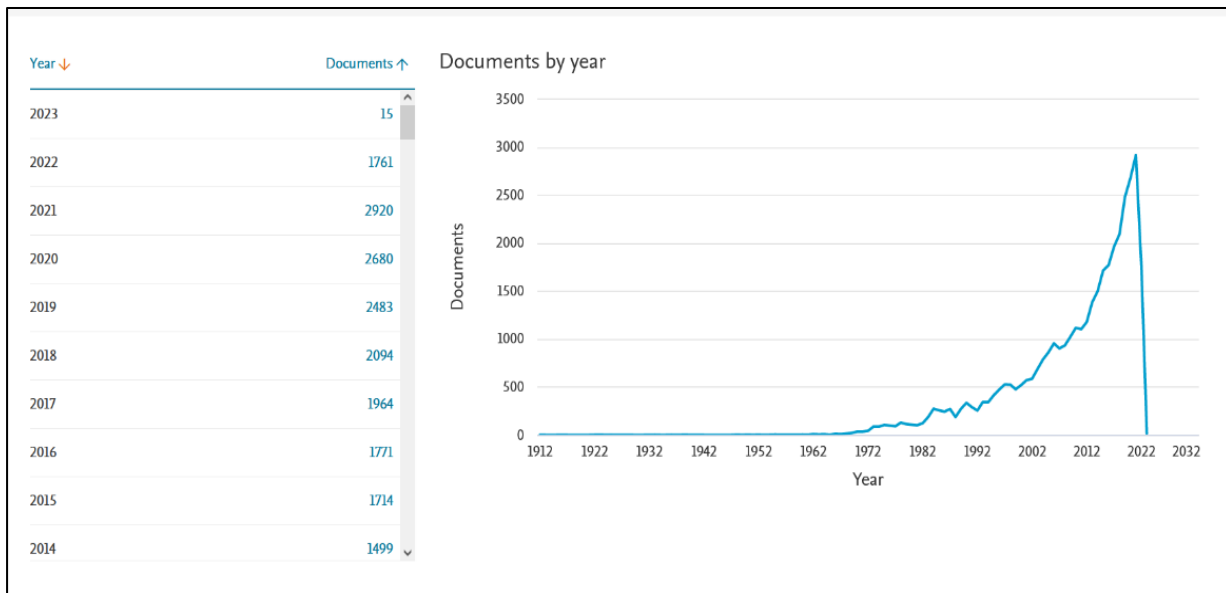
*Criterios de búsqueda enfocada a máquinas limpiadoras de ventanas*

<i>Tipo de búsqueda</i>	
<i>Criterios de búsqueda</i>	("robot" OR "device" ) AND ( "wash" OR "clean" OR "cleaning" OR "washer" )
<i>Periodo de búsqueda</i>	2019 – 2022
<i>Numero de documentos encontrados sin filtrar</i>	38436
<i>Idioma</i>	Solo en inglés
<i>Filtro por área temática</i>	Ingeniería
<i>Tipo de documentos</i>	Artículos
<i>Numero de documentos encontrados con filtros</i>	132

**1.4.1.2. Vigencia de la temática.** En la Figura 6, se puede observar el incremento a través de los años de las investigaciones al respecto de la temática.

**Figura 6**

*Vigencia de los artículos*

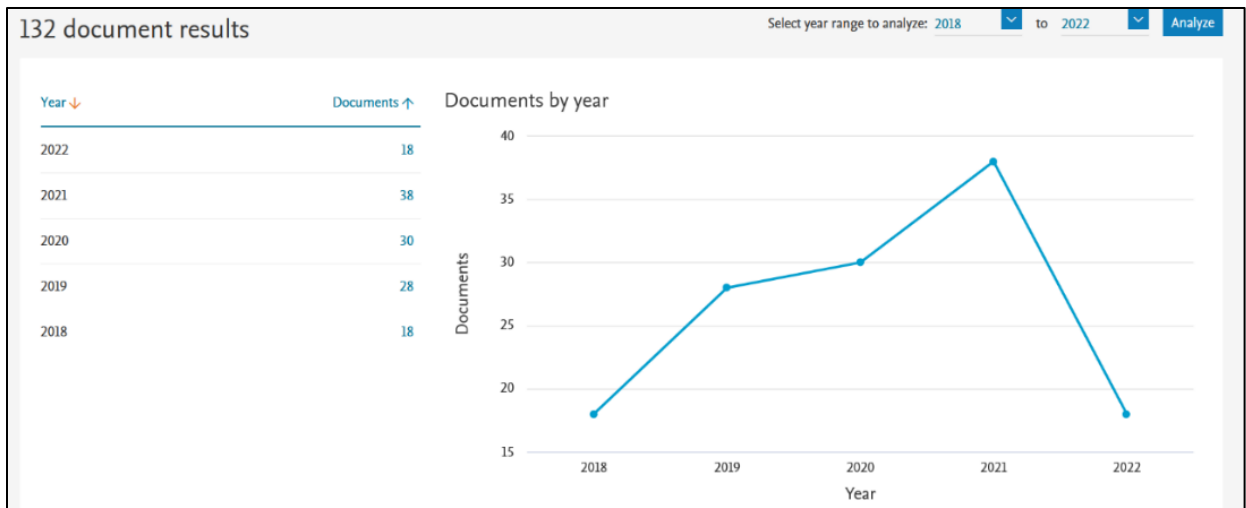


Fuente: Gráfica de documentos por año generada por Scopus. Recuperado de: <https://www.elsevier.com/es-es/products/scopus>

Al hacer uso de los filtros, se puede observar en la Figura 7, la vigencia de las publicaciones durante los últimos cinco años, respecto a la investigación, el proyecto presenta su inicio en el año 2022.

## Figura 7

### Vigencia de la investigación con filtros

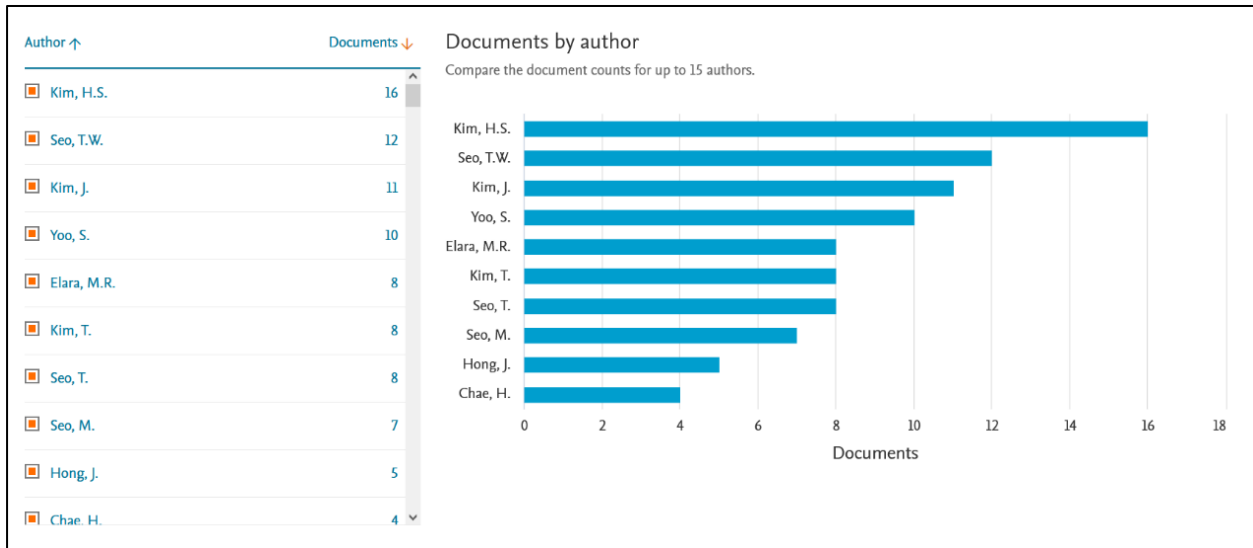


Fuente: Gráfica de vigencia de la investigación generada por Scopus. Recuperado de: <https://www.elsevier.com/es-es/products/scopus>

Como se puede observar en la Figura 8, los autores en orden de importancia que más relevancia han tenido y han investigado respecto al tema son los que se enumeran a continuación.

## Figura 8

*Autores con más relevancia en la investigación*



Fuente: Gráfica de relevancia de autores generada por Scopus. Recuperado de: <https://www.elsevier.com/es-es/products/scopus>

**1.4.1.3. Descripción de los mejores artículos.** Respecto a las máquinas diseñadas para la limpieza de ventanas, Zhenjing Li y Qingsong Xu hacen una revisión y sugieren la implementación de unos módulos para que un dispositivo de limpieza desempeñe de forma óptima su labor de limpiavidrios, proponiendo diferentes alternativas que se utilizan para locomoción, adherencia, limpieza y sensores de lo que sería la máquina ideal, los cuales según sea el tipo de modulo, el dispositivo se adapta de mejor o peor forma al entorno (Li & Xu, 2021).

A lo largo del tiempo, se construyeron y existen dispositivos a pequeña escala los cuales, cumplen el propósito de limpiar ventanas de edificios, es el caso de WINDORO el cual, es un dispositivo comercial portátil que cuenta con la capacidad de ser autónomo, cuyos módulos de adherencia son imanes y ventosas los cuales le permiten la locomoción por toda el área de la ventana, mientras que el módulo de limpieza se vale de las escobillas para lograr el retiro de partículas sobre el vidrio (Young Ho & Kwang Mok, 2011).

Por otro lado las investigaciones realizadas en la India por Arni Munira y Muhammad Asyraffuddeen identifican que existe una necesidad de vivienda, la cual se resolvió mediante la

construcción de edificios, pero dadas las particularidades de este tipo de estructuras, es lógico pensar que la polución afectara las ventanas, además, la gran altura deja de manifiesto que el trabajo sobre estas, acarrea riesgos inherentes como son las caídas, lesiones y pérdidas humanas, por eso se ideó un dispositivo útil para cumplir el propósito de limpieza, usando como microcontrolador el ATMEGA y teniendo como actuador un sistema de escobillas, dicha propuesta de dispositivo logra retirar de las ventanas la suciedad acumulada (Markom et al., 2020).

Respecto a la locomoción sobre los edificios que estos dispositivos deben tener, existen soluciones maso menos complejas, pero una en particular consiste en el diseño de un sistema de ruedas y cuerdas, el cual a manera de rodillos desliza la cuerda, permitiendo llevar el dispositivo hacia la ventana objeto de limpieza, dicho dispositivo se ensaya en el robot comercial WINDORO obteniendo resultados favorables (Ramkumar & Ambigai, 2016). El sistema de locomoción guiado por cuerdas que los autores Yoo y Seo desarrollaron, consistió en un sistema el cual aborda el problema del deslizamiento de las máquinas, por lo que ofrece una alternativa de solución basada en engranes y diferenciales los cuales buscan evitar dicho problema, ya que ello puede volver a la máquina limpiadora, difícil de controlar e imprecisa a hora de realizar su trabajo (Yoo et al., 2020).

Actualmente con respecto a los sistemas de locomoción, se observa que, los deslizamientos deben tenerse en cuenta ya que pueden poner en peligro la integridad del dispositivo, por lo que Choi y Chae idearon un sistema el cual también busca evitar el deslizamiento de la cuerda por la cual el dispositivo desciende, de esta forma consigue una máquina más maniobrable (Choi et al., 2021).

Luego, la complejidad del medio en el que estas máquinas se desempeñan aumenta, debido a las morfologías propias de la arquitectura de los edificios, en las cuales abundan los sobresaltos, de tal forma que los dispositivos tienen que tener adaptaciones que les permitan sortear este tipo de obstáculos, ya que de no hacerlo su actuación sería limitada, es por eso que Hong Jooyoung propone un modelo el cual se vale de actuadores elásticos, de ruedas triples, todo con el fin de sortear obstáculos y mejorar el desempeño de la máquina (Yoo et al., 2020).

De igual manera, la creación del robot Mantis V2 identifico que, durante la operación de estas máquinas, es complicado estimar la orientación del dispositivo, motivo por el cual, se valió de diferentes métodos como una unidad de medición inercial, encoders, cámaras y otros sensores, los cuales, mediante datos estadísticos, determinar la orientación de la máquina, esto hace que el sistema adquiera mayor robustez y sepa sortear obstáculos (Vega et al., 2020).

Por su parte, otros autores han abordado el problema de los obstáculos, sorteándolos mediante la modificación de la máquina, de tal forma se construya por módulos, los cuales permiten que, al momento de estar enfrentado a un obstáculo, la maquina modifique su estructura, todo ello con el fin de sobrepasar de la mejor manera los sobresaltos que se presentan en edificios y dar una alternativa diferente al momento de abordar los obstáculos (Lee & Chu, 2019).

Abordados temas de interés como lo son la locomoción y las sujeciones, también es importante pensar en el módulo el cual realiza la limpieza de las ventanas, por lo que Yoon y Ryu observaron que las escobillas y cepillos de goma, aumentan el peso del dispositivo considerablemente, por lo que pensaron en un sistema más sencillo, que consiste en un rociador el cual, de igual forma cumple el objetivo de limpiar, si bien el sistema no ha sido probado en campo, los resultados arrojados en laboratorio son favorables para su implementación en un entorno real (Yoon et al., 2021).

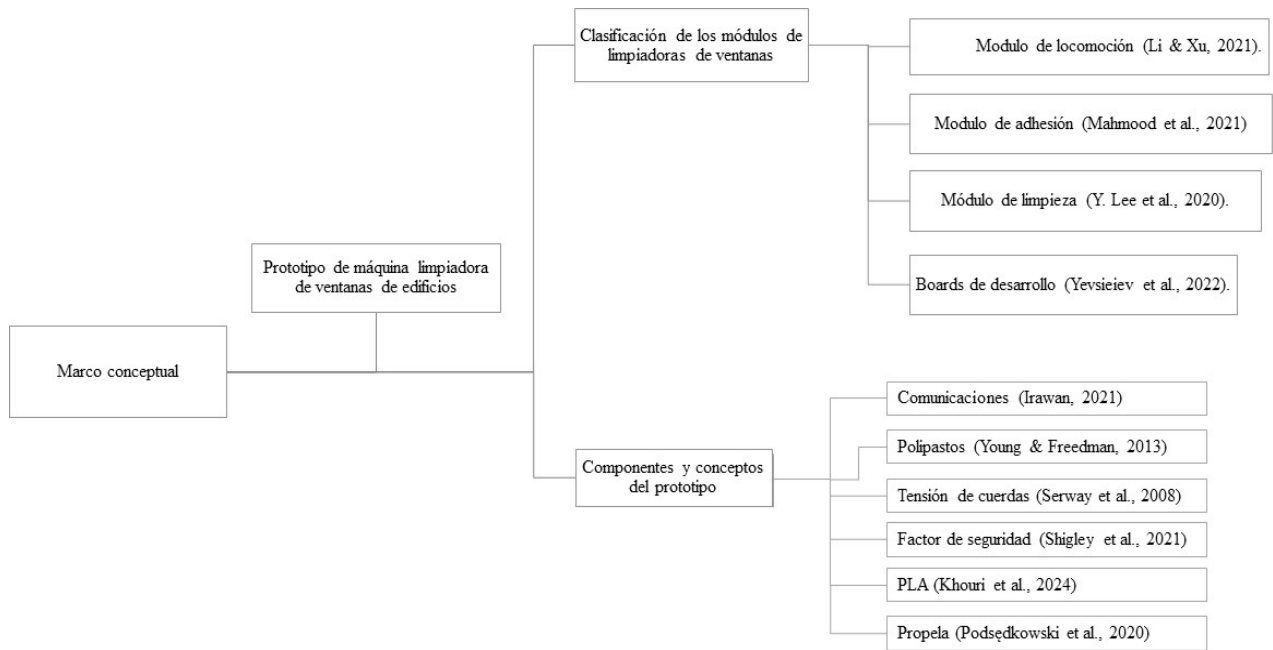
#### ***1.4.2. Marco teórico***

En la Figura 9, se esquematiza la taxonomía que representa los conceptos aquí tratados, para el desarrollo del presente proyecto de grado, por lo tanto, el esquema sigue de la siguiente forma:



Figura 9

Taxonomía del marco conceptual



**1.4.2.1. Clasificación de los módulos de limpiadores de ventanas.** Se ha realizado una revisión en donde se da por manifiesto que, para un correcto diseño de un dispositivo limpiador de ventanas, es importante dividirlo por módulos, de tal forma que se aborde principalmente la locomoción, adhesión y limpieza de la máquina, además de los sensores. La implementación de los módulos mencionados anteriormente, permiten adaptar a la máquina al entorno de trabajo (Zhang et al., 2022) (Li & Xu, 2021).

**1.4.2.1.1. Módulo de locomoción.** Respecto a la revisión de Qingsong Xu, define la locomoción, como la capacidad de las máquinas para moverse a través del edificio, lo cual lo pueden lograr de muchas maneras, dentro de las cuales destacan las siguientes formas de locomoción:

- Locomoción por ruedas
- Locomoción por orugas
- Locomoción de transición
- Locomoción por piernas
- Locomoción guiada por cable

Las anteriores formas de locomoción son ampliamente utilizadas en máquinas domésticas, como industriales, pueden ser utilizadas de forma exclusiva o en combinación, más en lo que respecta a la limpieza de edificios, se prefiere el uso de locomoción guiada por cable, ya que permite un buen control de la máquina y brinda seguridad debido a la sujeción (Li & Xu, 2021).

**1.4.2.1.2. Módulo de adhesión.** La adhesión hace referencia al contacto que debe tener la maquina con respecto a la pared vertical del edificio, esto es importante para que la máquina tenga un apoyo y de esta manera guiar la limpieza, la adhesión al igual que la locomoción se puede realizar de diferentes formas dentro de las cuales están:

- Adhesión por rieles
- Adhesión por propulsión
- Adhesión por presión negativa
- Adhesión magnética

Cada una de las formas de adhesión tiene su aplicación, dentro de la más utilizada en máquinas destinadas a la limpieza de ventanas están la adhesión por presión negativa (Eren & Doğan, 2022) y la adhesión por propulsión (Božić et al., 2022), la ventaja que tiene la adhesión por propulsión radica en que se adapta a diferentes tipos de superficies, desde rugosas hasta resbaladizas, lo que la hace ideal por encima incluso de la adhesión por presión negativa, es por eso que las máquinas limpiadoras de ventanas portan propelas las cuales les permiten adherirse al edificio.

**1.4.2.1.3. El módulo de limpieza** es el que permite retirar la suciedad de las ventanas, por lo cual se han ideado distintas formas de hacerlo, destaca, por tanto:

- Rodillos
- Rociador
- Brazo

Por lo general, los diseños propuestos se valen de rodillos, los cuales son simples de implementar y el costo no es elevado, más sin embargo se encuentran limitados cuando existen desniveles los cuales no pueden ser sorteados, es allí en donde se utiliza otros medios para retirar la suciedad como lo es el módulo rociador, este módulo permite alcanzar largas distancias, aunque se puede ver perturbado por vientos laterales, de igual manera se puede optar por un brazo, lo cual aumenta la complejidad y el diseño del prototipo (Lee & Chu, 2019; Sinnapatchai et al., 2022).

**1.4.2.1.4. Board de desarrollo.** En la vida moderna es común que un dispositivo sea una combinación electrónica y mecánico, lo anterior debido a los microcontroladores, estos dispositivos controlan el funcionamiento de una amplia variedad de electrodomésticos. En los últimos años, se han vuelto más disponibles y asequibles, por otro lado, las herramientas de desarrollo para ellos son simples y tienen una amplia comunidad de respaldo (Ibarra, 2021).

Por otro lado, la familia de los ESP corresponde a una familia de chips con su respectiva board de desarrollo las cuales son de bajo costo, alrededor de 45.000 COP, además de fácil programación utilizando el IDE de Arduino, lo cual facilita el diseño de prototipos. Particularmente el ESP32-CAM incorpora una cámara la cual puede transmitir en Streaming vía IP lo que hace de este dispositivo una herramienta útil, diversos autores se han valido del concepto de IoT para lograr el control a distancia de sus dispositivos, siendo esta una manera eficiente y eficaz la cual se puede implementar en un dispositivo prototipo limpiador de ventanas de edificios (Yevsieiev et al., 2022).

### **1.4.3. Comunicación**

El Wifi es la forma inalámbrica apropiada para la conexión de dispositivos remotos, tiene la ventaja de ser simple de implementar, además de permitir un envío de un volumen de datos mayor y tener un alcance considerable respecto al Bluetooth, además de ser ampliamente utilizado en proyectos de robótica y prototipado, lo cual ha permitido la creación de máquinas las cuales pueden ser controlados a distancia mediante Wifi (Irawan, 2021).

**1.4.3.1. Polipastos.** Los polipastos están diseñados para mover cargas pesadas y disminuir el esfuerzo que el operador realiza al elevar cargas por sobre la vertical. Estos dispositivos se componen de pocos elementos, incluyendo roldanas, mosquetones y cuerdas, conformando un arreglo sencillo, pero altamente efectivo y eficaz. Desde la antigüedad, los polipastos han sido de gran utilidad en diversas aplicaciones debido a su eficiencia en la manipulación de cargas, desde elevar agua de aljibes hasta aplicaciones industriales (Young & Freedman, 2013).

**1.4.3.2. Tensión de cuerdas.** se refiere a la fuerza que se ejerce a lo largo de una cuerda que está siendo estirada por fuerzas actuando en ambos extremos. Esta fuerza es siempre paralela a la cuerda y es uniforme a lo largo de su longitud. Los conceptos asociados a la tensión de cuerdas son aplicables también en sistemas con poleas, dependiendo de la aplicación que se esté ejecutando (Serway et al., 2008).

**1.4.3.3. Factor de seguridad.** Es un parámetro utilizado para garantizar que una estructura o componente funcionará de manera segura bajo las condiciones las de uso a las que se somete. Se define como la relación entre la resistencia máxima que puede soportar un material y la carga máxima esperada o real que se le aplicará durante su uso. Un valor del factor de seguridad mayor a 1 indica que la estructura o componente es seguro en el contexto dado. Por el contrario, valores inferiores a 1 indican que el dispositivo fallará y no podrá soportar la carga, lo que podría provocar su colapso (Shigley et al., 2021).

**1.4.3.4. PLA.** Abreviación de ácido poliláctico es un polímero que se sintetiza a partir del maíz o la caña de azúcar. Es conocido por su amplio uso en la fabricación de filamentos para impresión 3D. El PLA es respetuoso con el medio ambiente, porque se descompone en ciertas condiciones, lo que lo convierte en una alternativa al plástico convencionales, es fácil de trabajar y ofrece una buena resistencia y rigidez (Khoury et al., 2024).

**1.4.3.5. Propela.** es un dispositivo compuesto por palas montadas en un eje giratorio, utilizado para generar empuje en fluidos como el aire o el agua. Este empuje convierte la energía rotacional del motor en fuerza de avance, permitiendo el movimiento hacia adelante en drones y otros vehículos Para que una propela sea eficiente, hay varios parámetros a considerar, siendo el pitch, conocido en español como paso, uno de los más importantes. El pitch se refiere al ángulo o la inclinación de las palas de la propela y es crucial porque determina el desplazamiento del aire, lo cual es fundamental en aeronáutica para generar empuje. También es relevante en dispositivos de limpieza para proporcionar una adherencia efectiva al dispositivo (Podsędkowski et al., 2020).

## **1.5. Metodología**

### ***1.5.1. Tipo de estudio***

El tipo de investigación es de carácter exploratorio. Con el prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios, se abordan conceptos tales como la estática, la dinámica, los materiales de ingeniería, el diseño de máquinas, además de ciencias de la computación como el desarrollo e implementación de software capaz de tener la sinergia necesaria para poder manipular el dispositivo para llevarlo a cumplir un propósito (Castillo et al., 2007), que en este caso consiste en dar limpieza a ventanas de edificios; la parte cuantitativa del proyecto consiste en el análisis mecánico de las piezas que lo componen los cuales deben ser estructuralmente seguros y deben cumplir la función para lo que fueron implementados al mínimo coste posible, con la mejor relación eficacia y eficiencia.

### **1.5.2. Línea de investigación**

La línea de investigación es: diseño mecatrónico bajo el área de desarrollo de procesos y productos, debido a que el prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios contempla el diseño desde la idea, mediante software especializado con el fin de realizar un esbozo inicial de manera virtual y realizar las respectivas correcciones en el diseño.

Una vez se supere la fase de planos y diseño, a nivel teórico se estudiarán los distintos materiales con los que se puede construir la máquina, calcular los esfuerzos mecánicos, garantizar un factor de seguridad que se considere seguro para operar, además de desarrollar la electrónica del dispositivo que permita realizar la tarea para la que fue creado, se desarrollara un software que permita la conexión entre máquina operario para que de esta manera se pueda controlar el dispositivo remotamente.

**1.5.2.1. Diseño cuantitativo.** El diseño cuantitativo experimental es de tipo pre- experimental, en donde se pretende hacer una aproximación del fenómeno estudio, esto es, realizar la limpieza de una ventana y esperar que mediante aspersion se logre la limpieza de la misma.

### **1.5.3. Hipótesis**

**1.5.3.1. Hipótesis de investigación.** Es posible desarrollar un prototipo de máquina controlada a distancia, para la limpieza de ventanas de edificios con capacidad de movimiento vertical desde un enfoque mecatrónico cumpliendo las especificaciones técnicas necesarias.

**1.5.3.2. Hipótesis alternativa.** Es posible desarrollar un prototipo de máquina controlada a distancia, para la limpieza de ventanas de edificios con capacidad de movimiento vertical desde un enfoque mecatrónico cumpliendo algunas de las especificaciones técnicas.

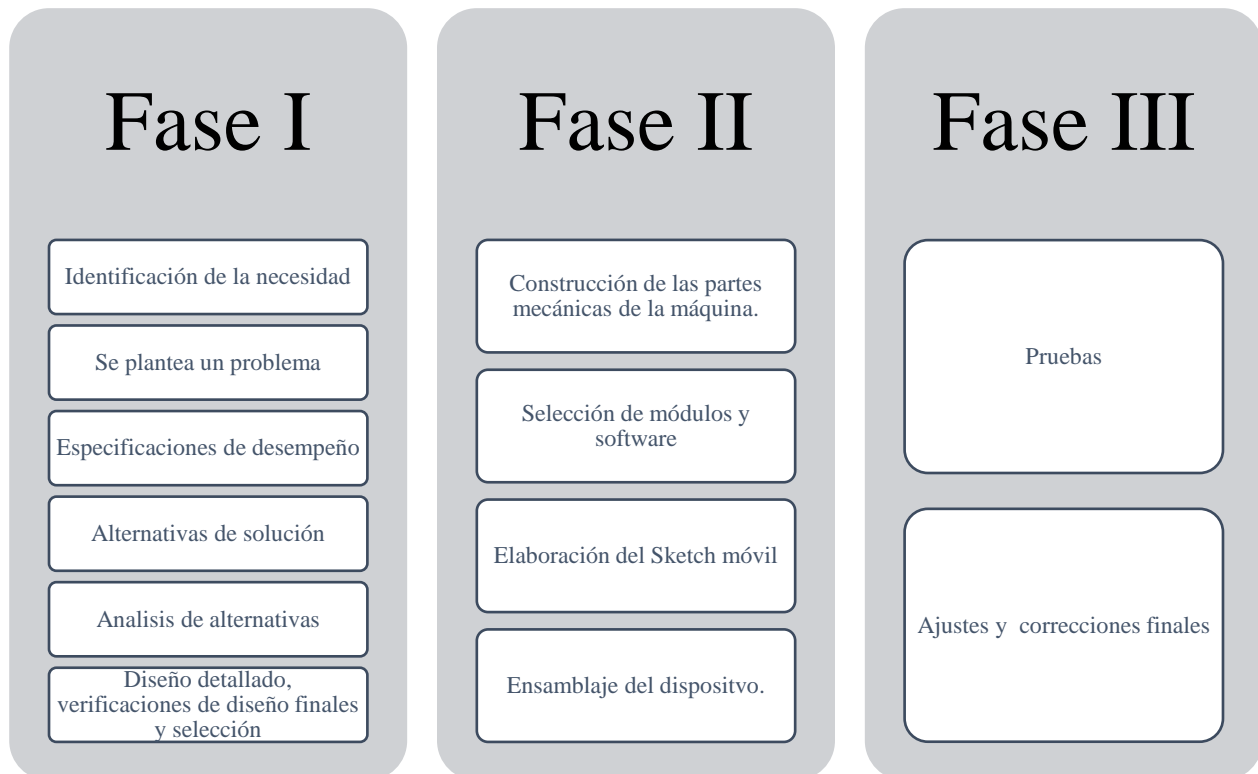
**1.5.3.3. Hipótesis nula.** No es posible desarrollar un prototipo de máquina controlada a distancia, para la limpieza de ventanas de edificios con capacidad de movimiento vertical desde un enfoque mecatrónico.

#### **1.5.4. Descripción metodológica**

El proyecto se realizará en tres fases las cuales se describen a continuación, las cuales se esquematizan en la Figura 10, que se muestra a continuación:

**Figura 10**

*Descripción metodológica por fases*



**1.5.4.1. Fase I Estudios y diseño.** Para el cumplimiento del objetivo específico 1 planteado el cual propone: diseñar el sistema para la limpieza de ventanas exteriores con capacidad de movimiento vertical, en la Fase I se llevará a cabo las siguientes actividades:

- Identificación de necesidad: Debido al auge que representa para San Juan de Pasto la urbanización en edificios tipo apartamento se identifica la necesidad de un dispositivo capaz de realizar una limpieza a ventanas exteriores de edificios.
- Investigación: se realiza la investigación de las diferentes soluciones a nivel mundial propuestas por diferentes investigadores y empresas privadas en lo que respecta a limpieza externa de ventanas.
- Se plantea un problema: La infraestructura en San Juan de Pasto, plantea un problema de diseño de un dispositivo versátil, portátil y de fácil operación, que sea capaz de operar a grandes alturas cuyo fin sea la limpieza de ventanas por la parte externa.
- Especificaciones de desempeño: En base a las investigaciones se plantea las dimensiones preliminares, las capacidades de carga, los esfuerzos en las piezas del prototipo basado por una parte en el estado del arte y por otra en las necesidades propias de los edificios construidos en San Juan de Pasto.
- Alternativas de solución: Los estudios preliminares en el diseño computarizado proponen distintas alternativas en las que se mejora o se descartan ciertas piezas o mecanismos por sobre otras, lo que plantea un reto de elegir las mejores alternativas, eficientes y eficaces.
- Análisis de alternativas: Con las distintas alternativas de solución estudiadas, se da pie al análisis cualitativo y cuantitativo, cuyo único fin sea la construcción del plano definitivo.
- Diseño detallado, verificaciones de diseño finales y selección: La culminación de los estudios realizados en la fase 1, permite la realización de un plano, en donde ya se definido las especificaciones del dispositivo y su desempeño, además de evaluadas las diferentes alternativas de abordaje del problema, se realiza la selección del diseño el cual se construye de manera física.

**1.5.4.2. Fase II. Implementación de hardware y software y ensamble del dispositivo.** La fase II se denomina: construcción implementación del hardware y software la cual corresponde al cumplimiento del objetivo específico 2 que contempla construir el prototipo con base al diseño preliminar con las especificaciones técnicas necesarias para limpiar ventanas.



- Construcción de las partes mecánicas de la máquina: Mediante procedimientos de taller y con la ayuda de impresión 3D se realizará la construcción de piezas para de esta manera poder abordar el problema ya de manera física.
- Selección de módulos y software: se utilizará la módulos y software que permitan controlar el dispositivo y su conexión remota, el Sketch principal se logrará mediante la programación dirigida hacia el módulo ESP82-CAM el cual logra la conexión cámara – software, después, se procede a la elaboración de la CCA que controla los procesos relacionados con el movimiento de los motores de las válvulas y de los sensores de la máquina.
- Elaboración del Sketch móvil: se elaborará un Sketch en Android Studio el cual conecte un dispositivo móvil con la máquina, esto con el fin de facilitar el transporte hacia el punto objetivo y evitar adicionar más dispositivos que de otra manera causan incomodidad al operador.
- Ensamble del dispositivo: Finalmente con los módulos y las partes mecánicas construidas se procede al ensamblaje de la máquina.

**1.5.4.3. Fase III. Pruebas de funcionamiento y validación.** El dispositivo terminado deberá ser sometido a pruebas en laboratorio, para lo que se dispondrá de la estabilidad de la conexión remota, del anclaje a lo que sería un edificio o simulación de este.

- Pruebas de laboratorio: Asegurado lo anterior, se suspenderá el prototipo y se bajará hacia la ventana diana, en donde se procederá a realizar la limpieza aplicando agua, jabón y nuevamente agua, todo lo anterior evaluando el desempeño en campo del dispositivo construido.
- Ajustes y correcciones finales: Siempre existirán desajustes, lo cual deberá ser abordado para evitar mantenimientos correctivos prematuros. Además, los imprevistos de diseño o funcionamiento deberán ser corregidas a fin de obtener una máquina funcional.

### **1.5.5. Validez de la investigación**

**1.5.5.1. Validación interna.** La máquina dispone de los siguientes módulos los cuales se enumeran a continuación:

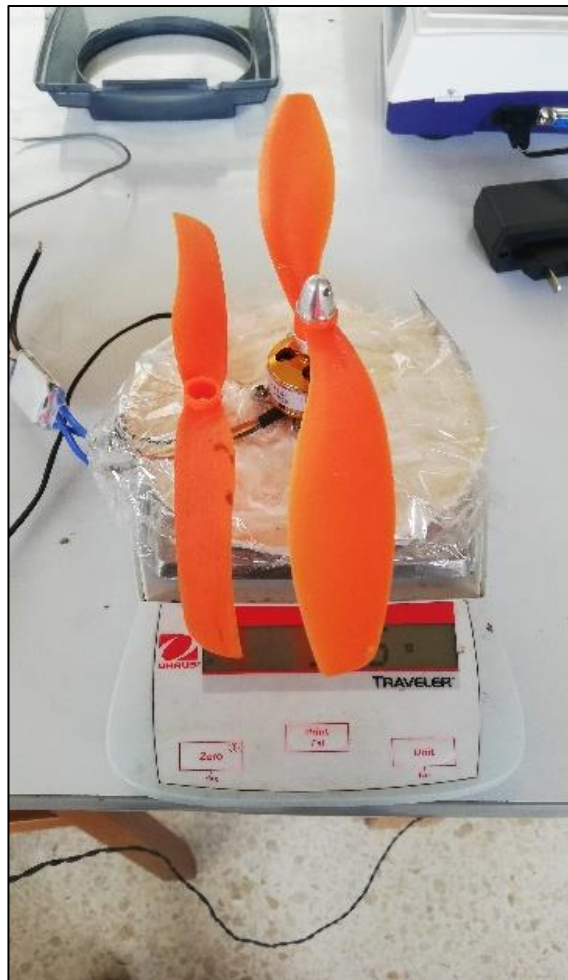
- **Módulo de locomoción:** La validación interna del módulo de locomoción consiste en garantizar el movimiento axial del dispositivo.
- **Módulo de adhesión:** La validación interna respecto al módulo de adhesión, corresponde en garantizar la adhesión a la superficie de una estructura, de esta manera el prototipo tendrá un punto de apoyo para poder realizar su función.
- **Módulo de limpieza:** la validación interna del módulo de limpieza consiste en garantizar la integridad del dispositivo, además de evaluar la velocidad con la cual el módulo puede realizar la limpieza de una ventana.

**1.5.5.2. Validación externa.** La validación externa, al depender de un concepto subjetivo como lo es la limpieza, se validará mediante experimentos en los cuales se le preguntará a un grupo de personas mediante encuesta, su perspectiva al respecto al trabajo realizado por la máquina.

**1.5.5.3. Primer experimento.** El primer experimento consiste en evaluar mediante datos estadísticos la capacidad de adherencia de la propela la cual hace parte del módulo de adherencia, esto es, mediante una estructura en la que soportara la propela se pretende conectar a una gramera y observar la fuerza con la cual la propela empuja a diferentes revoluciones, esto permite evaluar la posibilidad de anexar o no, más propelas para lograr que la máquina garantice una proximidad adecuada y estable al edificio, en la Figura 11, se observa un boceto del experimento propuesto.

**Figura 11**

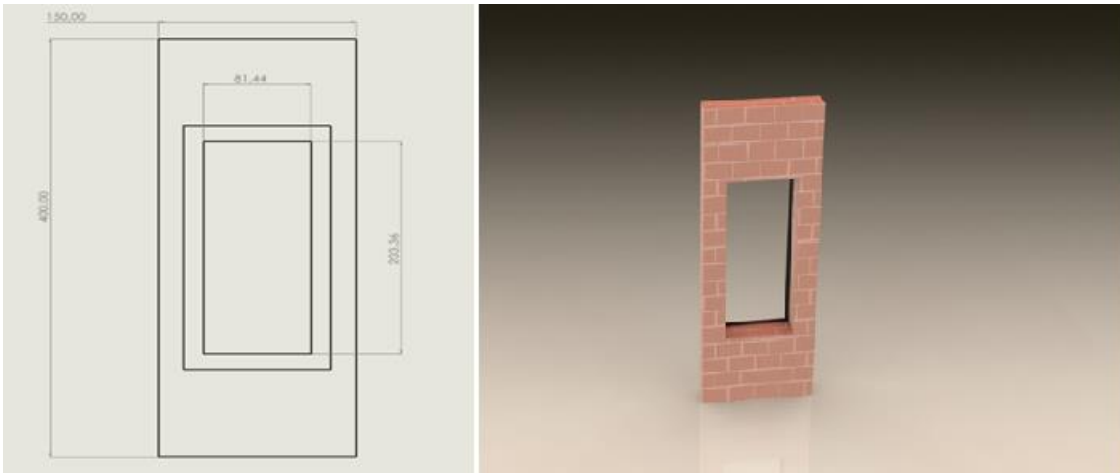
*Experimento que evalúa la fuerza de la propela mediante una gramera*



**1.5.5.4. El segundo experimento.** consiste en dar validez a los módulos de locomoción, adherencia y limpieza con los que la máquina cuenta, es decir, se evaluará el movimiento vertical de la máquina sobre una estructura, la capacidad de adherencia mediante propelas, además del alcance que el módulo de limpieza tiene, esto es, rociar agua barriendo todos los ángulos posibles, con el fin de tener un rango en el cual el dispositivo tiene rango de limpieza, por lo que se pretende armar una estructura en laboratorio la cual simula una ventana de un edificio y su respectiva caída vertical como lo muestra en la Figura 12, en donde de igual forma se especifica las medidas.

**Figura 12**

*Representación del experimento para verificación de adhesión y limpieza*



**1.5.5.5. Tercer experimento.** El tercer experimento implica primero ajustar el prototipo y luego seleccionar una ventana de prueba. Esta ventana se preparará previamente aplicando sustancias pulverulentas como serrín y otros contaminantes comunes, como polvo ordinario, para que la ventana tenga una capa de suciedad sobre la cual el limpiador de ventanas pueda actuar. Se activarán los dispositivos de limpieza y se comparará la sección que se supone limpia por el dispositivo con la sección sucia para poder evaluar los resultados. El experimento se repetirá 5 veces, el objetivo de las repeticiones es volver a preguntar a los colaboradores de tal manera de una idea de la percepción que estos tienen del trabajo de la máquina.

## **2. Resultados**

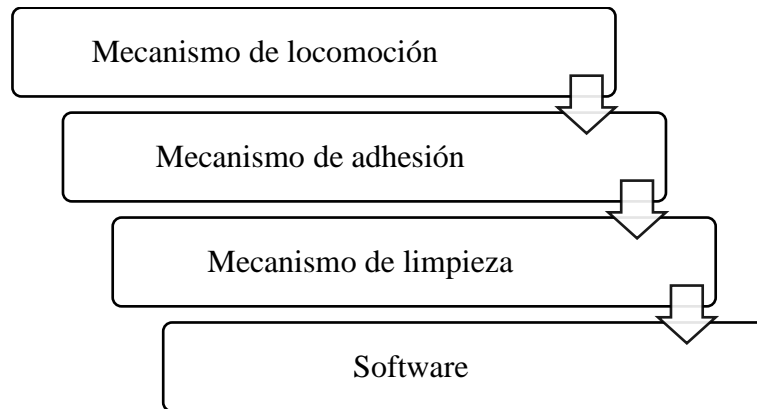
### **2.1. Diseño del sistema para la limpieza de ventanas con capacidad de movimiento vertical**

Aunque las máquinas limpiadoras de ventanas no son dispositivos académicos y su propósito es enteramente comercial en la mayoría de los casos, en todo el mundo existen diversas soluciones adaptadas por la industria a las circunstancias específicas de los entornos urbanos para los que fueron diseñadas. Estas soluciones, orientadas a abordar las demandas comerciales y prácticas de la limpieza de ventanas en edificaciones de gran altura, demuestran la versatilidad y la capacidad de adaptación de este tipo de tecnologías a las necesidades cambiantes de los contextos urbanos.

El desarrollo de la máquina se llevó a cabo de manera secuencial, utilizando una metodología modular que facilita una aproximación y abordaje eficientes del problema. Esta estructura modular evidencia en la Figura 13, donde se ilustra la secuencialidad adoptada en el proceso de desarrollo.

#### **Figura 13**

*Secuencia de desarrollo del prototipo*



A continuación, se presentan en la Tabla 2, las alternativas de mecanismos de adhesión analizadas, destacando aquellas seleccionadas por sus beneficios en términos de costos u operatividad para la máquina.

**Tabla 2**

*Principales mecanismos de adhesión*

<i>Mecanismos de adhesión</i>		
<i>Tipo</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
<b>Mecanismo por rieles</b>	Seguridad y estabilidad Eficiente y de alta velocidad Alta movilidad	No universal Se debe tener prediseños Alto costo
<b>Adhesión por propulsión (por propelas)</b>	Simple de implementar Se puede adaptar a cualquier superficie	Se debe implementar más de una propela Por sí solo no es suficiente, se requiere combinar mecanismo
<b>Adhesión por presión negativa</b>	Útil para robots pequeños Alta movilidad en edificios de cristal	Capacidad de carga limitada Pobre capacidad de superar obstáculos Necesita un sellado óptimo, de lo contrario no funcionara Propenso a fugas
<b>Adhesión magnética</b>	Útil en estructuras metálicas como barcos	Si no hay permeabilidad magnética en el muro, no funciona.

Fuente: Li & Xu, 2021.

De manera similar, se detallan en la Tabla 3, las alternativas de mecanismos de adherencia que fueron analizadas, resaltando aquellas seleccionadas por sus beneficios en términos de costos y operatividad para la máquina.

**Tabla 3**

*Principales mecanismos de locomoción*

<i>Mecanismo de locomoción</i>		
<i>Tipo</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
<b>Llantas</b>	Sencillo de implementar	Pobre capacidad de carga Pobre capacidad de superar obstáculos Dificultad de adherencia
<b>Locomoción con piernas</b>	Múltiples grados de libertad  Sortea obstáculos con mayor facilidad  Si tiene solo dos piernas es sencillo de implementar	Mayor número de patas para mejorar la capacidad de carga A mayor número de patas, mayor complejidad del sistema
<b>Guiada por cable</b>	Alto grado de seguridad debido a que la máquina siempre estará colgada al techo y apoyada.	Movimiento de péndulo Propenso a atascos Pobre movilidad en superficies irregulares

Fuente: Li & Xu, 2021.

En lo que respecta al mecanismo de limpieza, la bibliografía revisada no presenta un consenso claro sobre cuál es superior, ya que cada sistema se adapta al tipo de máquina en servicio. Se identifican tres mecanismos básicos: rodillos, rociadores y por brazos, junto con las posibles combinaciones entre ellos. Aunque en la Tabla 4, se detallan estos mecanismos, la literatura revisada no ha establecido una clara superioridad entre uno y otro.

**Tabla 4**

*Principales mecanismos de limpieza*

<i>Mecanismo de limpieza</i>		
<i>Tipo</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
<b>Rodillos</b>	Sencillo de implementar	No tiene más de un grado de libertad por sí solo. Se debe combinar con uno o más mecanismos
<b>Rociador</b>	Montaje simple	Nunca tendrá una trayectoria uniforme Depende de las condiciones climáticas para su correcto funcionamiento
<b>Brazos</b>	Varios grados de libertad	Es dispendioso y costoso de implementar según su complejidad Podría suponer un exceso de peso para la plataforma que lo soporta Informática robusta a la hora de implementar

Fuente: Li & Xu, 2021.

En cuanto a los sensores de los mecanismos, según la revisión bibliográfica, se identifican diversos tipos de sensores, todos enfocados en la validación interna de las máquinas desarrolladas. Estos abarcan desde sensores de efecto Hall para determinar la posición de los actuadores, hasta sensores ópticos como cámaras que permiten el reconocimiento del entorno por parte del operador, y sensores infrarrojos con diversos propósitos. Además, se observa la presencia de sensores destinados a la orientación y la autoprotección de la máquina. Cabe destacar que la mayoría de estos sensores se utilizan para la validación interna de la máquina, más que para su funcionamiento directo (Li & Xu, 2021).



### **2.1.1. Alternativas de diseño propuestas**

Las especificaciones de construcción deben proporcionar una solución adecuada al contexto de limpieza de ventanas. Por lo tanto, se seleccionan las características de locomoción, adhesión y un mecanismo de limpieza eficiente y eficaz. En la Tabla 5, se muestra un esbozo de lo que se busca en la máquina, junto con su respectiva explicación del porqué y el para qué, lo cual marca el punto de partida para el inicio de la construcción de un prototipo funcional.

**Tabla 5**


*Criterios que se tuvieron en cuenta para el armado del prototipo*

<b>Mecanismo</b>	<b>¿por qué?</b>	<b>¿para qué?</b>
Locomoción por cable	Sencillo de implementar y a bajo costo.	Facilitar el ascenso y descenso del dispositivo.
Chorro de agua	El chorro permite tener más alcance hacia ventanas las cuales no estén sobre la superficie.	Al tener mayor alcance y funcionar a presión, podría desprender suciedad más fácilmente que si se hace con otro mecanismo.
Adhesión por propulsión	En conjunto con locomoción por cable, permite una adhesión segura	Se necesita que el dispositivo se adhiera a la superficie con seguridad y en conjunto con el cable ha demostrado ser ideal.

**2.1.1.1. Alternativa de diseño uno.** En la Tabla 6, se presenta un esbozo del diseño Uno, el cual cumple con las especificaciones previamente establecidas. Este esquema visual del dispositivo resalta algunos aspectos a considerar antes de contemplar la posibilidad de su implementación. En la misma tabla se detallan las características específicas, ventajas y desventajas asociadas con este modelo.

**Tabla 6**

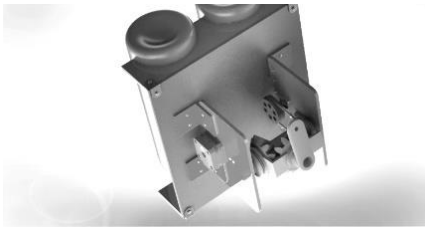
*Alternativa de diseño de prototipo uno*

<i>Modelo</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Robustes</li> <li>- Gran capacidad de carga</li> <li>- Rango de acción amplio del rociador.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Construcción costosa</li> <li>- Poleas sobredimensionadas</li> <li>- Morfología no adecuada para estructuras verticales</li> <li>- Alta probabilidad de romper vidrios por un posible golpe de ariete.</li> </ul>

**2.1.1.2. Alternativa de diseño dos.** En la Tabla 7, se presenta un esbozo del diseño dos, el cual cumple con las especificaciones previamente establecidas. Este esquema visual del dispositivo resalta algunos aspectos a considerar antes de contemplar la posibilidad de su implementación. En la misma tabla se detallan las características específicas, ventajas y desventajas asociadas con este modelo.

**Tabla 7**

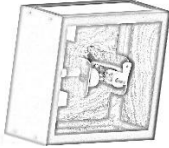
*Alternativa de diseño de prototipo dos*

<i>Modelo</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rango de acción amplio del rociador.</li> <li>- Fácil de transportar</li> <li>- Liviano y de fácil transporte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja capacidad de carga</li> <li>- Espacios vacíos</li> <li>- Alta posibilidad de atascos y golpes de ariete</li> <li>- Difícil anclaje</li> </ul>

**2.1.1.3. Alternativa de diseño tres.** En la Tabla 8, se presenta un esbozo del diseño dos, el cual cumple con las especificaciones previamente establecidas. Este esquema visual del dispositivo resalta algunos aspectos a considerar antes de contemplar la posibilidad de su implementación. En la misma tabla se detallan las características específicas, ventajas y desventajas asociadas con este modelo.

**Tabla 8**


*Alternativa de diseño de prototipo tres*

<i>Modelo</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
	<ul style="list-style-type: none"><li>- Rango de acción amplio del rociador.</li><li>- Fácil de transportar</li><li>- Liviano y de fácil transporte</li><li>- Morfología uniforme sin sobresaltos</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Baja capacidad de carga</li><li>- Pesado</li><li>- Probabilidad de acumulación de líquido en la parte inferior</li></ul>

**2.1.1.4. Alternativa de diseño cuatro.** En la Tabla 9, se presenta un esbozo del diseño dos, el cual cumple con las especificaciones previamente establecidas. Este esquema visual del dispositivo resalta algunos aspectos a considerar antes de contemplar la posibilidad de su implementación. En la misma tabla se detallan las características específicas, ventajas y desventajas asociadas con este modelo.

**Tabla 9**

*Alternativa de diseño de prototipo cuatro*

<i>Modelo</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
	<ul style="list-style-type: none"><li>- Rango de acción amplio del rociador.</li><li>- Fácil de transportar por su estructura reducida</li><li>- Capacidad de carga adecuada</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Difícil anclaje</li><li>- Baja adherencia a superficies</li><li>- Pocos lugares de sujeción</li></ul>

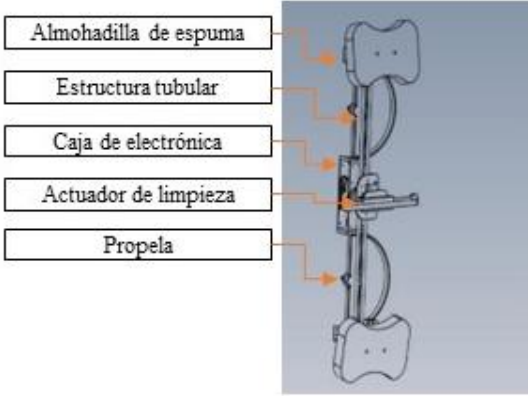
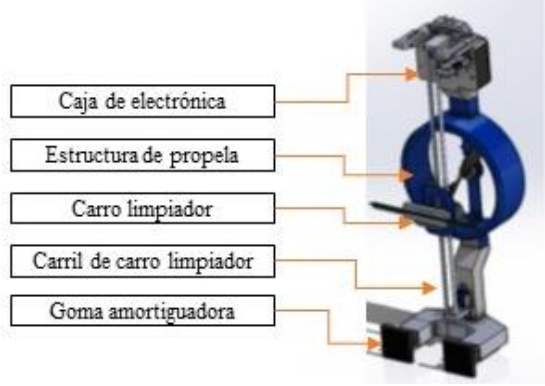
## **2.2. Construcción del prototipo con las especificaciones técnicas necesarias para limpiar ventanas.**

En el proceso de búsqueda de los mecanismos adecuados, como se esbozó en la sección anterior, se revelan pautas y directrices fundamentales que conducen a la generación de un producto final. Se realiza un análisis de las ventajas y desventajas de los prototipos esquematizados. La síntesis de los distintos módulos en un espacio compacto se vuelve crucial para evitar imponer una carga excesiva sobre el dispositivo. Como resultado de este enfoque, se desarrollan dos prototipos físicos cuyo esquema se observa en la Tabla 10, a continuación:

**Tabla 10**

*Diseño de los prototipos de limpieza de ventanas más relevantes*

---

<b>Prototipo uno</b>	<b>Prototipo dos</b>
 <p>Almohadilla de espuma</p> <p>Estructura tubular</p> <p>Caja de electrónica</p> <p>Actuador de limpieza</p> <p>Propela</p>	 <p>Caja de electrónica</p> <p>Estructura de propela</p> <p>Carro limpiador</p> <p>Carril de carro limpiador</p> <p>Goma amortiguadora</p>

---

*Nota:* hacia la izquierda se observa el antecesor de lo que sería el prototipo actual, el cual se muestra en el lado derecho.

Las máquinas tienen como punto de partida cuatro módulos expuestos anteriormente los cuales se enumeran a continuación:

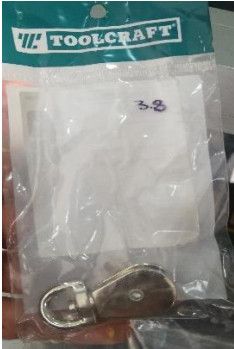
- Módulo de locomoción
- Módulo de adhesión
- Módulo de limpieza
- Microcontroladores

### ***2.2.1. Módulo de locomoción***

En relación al módulo de locomoción, es importante destacar que la locomoción se lleva a cabo en posición vertical mediante un sistema de poleas. Este arreglo proporciona ventajas mecánicas que facilitan la gestión del esfuerzo físico necesario para ascender o descender el equipo. El tipo de polea se muestra en la Tabla 11, se indican las especificaciones técnicas brindadas por el fabricante.

**Tabla 11**

*Características físicas de la polea*

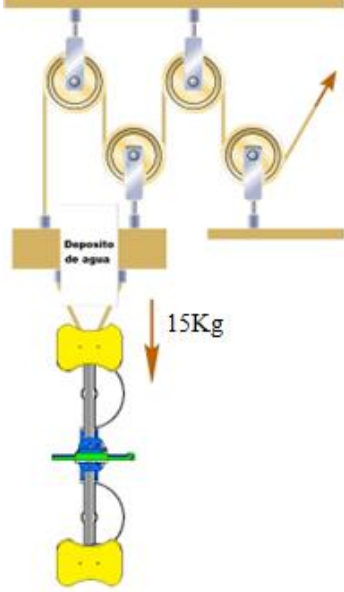
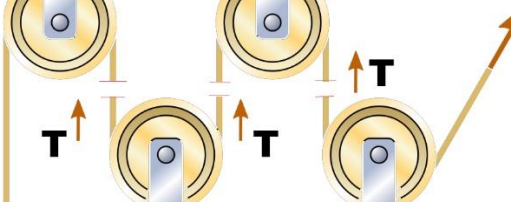
Imagen del producto	Especificaciones del producto	
	<b>Proveedor:</b>	<i>Toolcraft</i>
	<b>Referencia:</b>	<i>TC2583</i>
	<b>Diámetro:</b>	<i>1 pulgada</i>
	<b>Carga máxima</b>	<i>50kg</i>

Fuente: Fabricante ToolCraft Mexico. Recuperado de: [https://toolcraft.mx/cat\\_5/index.html](https://toolcraft.mx/cat_5/index.html)

Las poleas ofrecen ventajas mecánicas que se traducen en un menor esfuerzo al ascender y descender un objeto. Estos mecanismos multiplican la fuerza, cambian su dirección y pueden ajustar la velocidad necesaria para el movimiento. La combinación de varias poleas y cuerdas se conoce como polipasto. El propósito es que una fuerza relativamente pequeña pueda elevar o bajar una carga pesada. Por lo tanto, como se muestra en la Tabla 12, se lleva a cabo un análisis físico del polipasto, cuya ganancia mecánica es de  $1/3$  y consta de cuatro poleas, permitiendo el ascenso y descenso del dispositivo. Es importante destacar que se asume una carga total de 10 kg entre el depósito y el actuador.

Tabla 12

Arreglo de polipastos para el módulo de locomoción

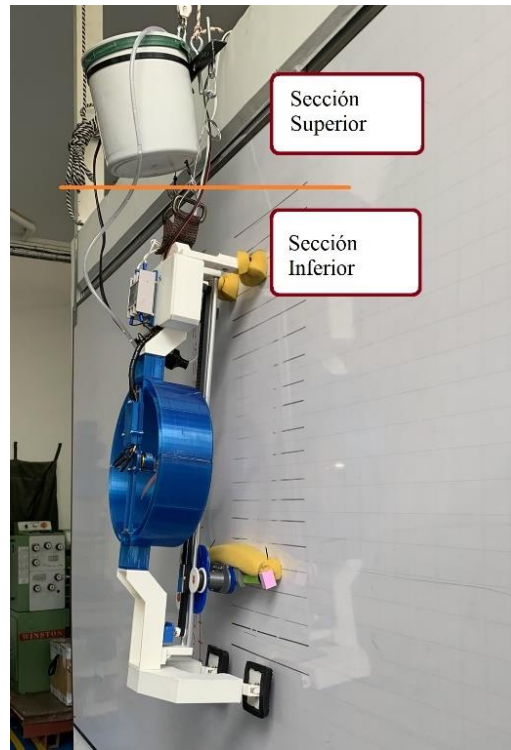
Polipasto del prototipo de máquina limpiadora de ventanas.	
Esquema	Diagrama de cuerpo libre
	 <p>Aplicando la sumatoria de fuerzas para hallar la tensión en la cuerda, el valor 98.1 corresponde al peso el cual se da por la multiplicación de la masa por la gravedad:</p> <p>Formula: <math>\sum F = 0</math></p> <p>Resolviendo: <math>3T - 147.15 = 0</math></p> <p>Resultado: <b>49.05 N</b></p>

*Nota:* En el esquema se observa el arreglo de polipastos y el diseño del prototipo uno. Este arreglo se conservó en el prototipo dos debido a la fiabilidad que proporciona.

Para analizar las tensiones del cable, es crucial señalar que ambos prototipos se dividen en dos secciones. La primera sostiene el recipiente con agua, y la segunda alberga el actuador, donde se encuentran los motores y la electrónica del dispositivo como se evidencia en la Figura 14.

**Figura 14**

*Secciones de tensión de cuerdas*



*Nota:* Se han añadido etiquetas para diferenciar entre la sección superior e inferior de sujeción.

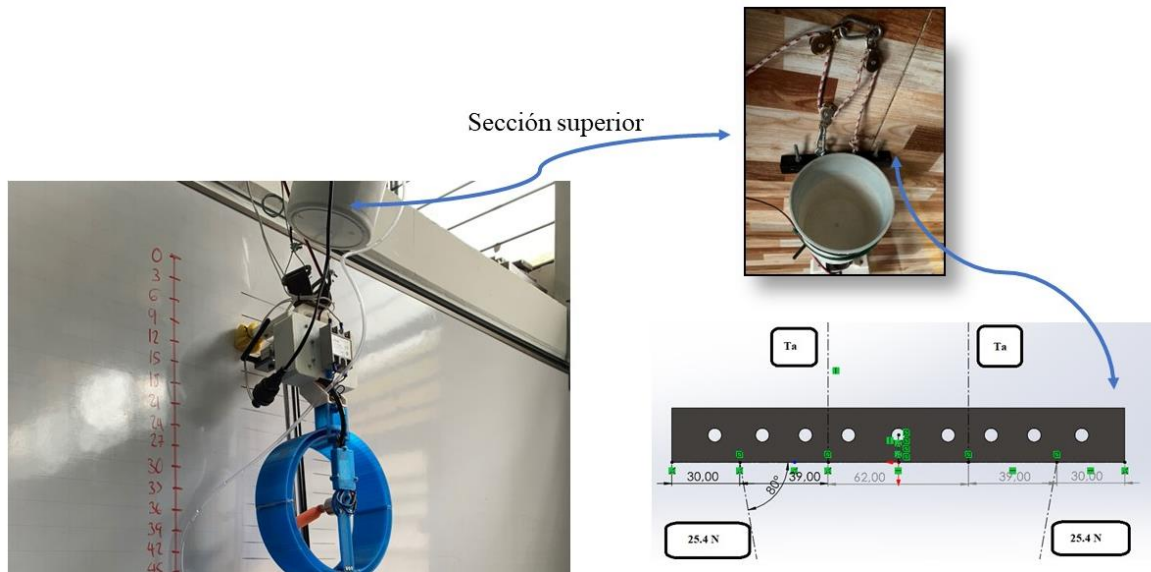
**2.2.2. Sección superior de las cuerdas**

La sección superior de cuerdas se muestra en la Figura 15, donde se destacan los accesorios, incluyendo el cubo de agua que suministra líquido para la limpieza de la ventana. Tanto en el prototipo uno como en el prototipo dos, no hay cambios significativos en la configuración y disposición de esta sección, permitiendo realizar un análisis general compartido entre ambos modelos.



**Figura 15**

Sección superior de las cuerdas



En la Tabla 13, se estima la tensión en las cuerdas superiores mediante la suma de momentos. La incógnita en cuestión es "Ta", que representa la tensión en la cuerda superior.

**Tabla 13**

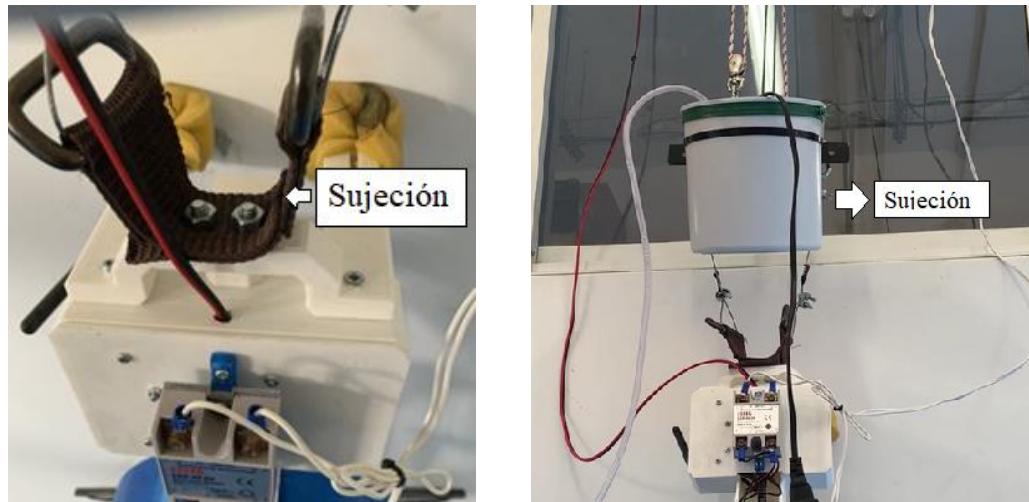
Tensión en las cuerdas superiores

<b>Tensión en las cuerdas superiores</b>	
	<div style="text-align: center;"> </div> <p><b>Resultados</b></p> <p>T= 73.6N</p> <p><b>Suma de momentos:</b></p> $\sum M = Ta(69) - 147.2(100) + Tb(131) = 0$ <p><b>Consideraciones</b></p> <p>Si <math>Ta = Tb = T</math> la cual es la Tensión en la cuerda</p>

**2.2.2.1. Sección inferior de las cuerdas.** En la Figura 16, se presenta la forma como el dispositivo se suspende, en donde mediante impresión 3D se realiza el respectivo soporte en donde se pondrá pernos para poder fijar el actuador.

**Figura 16**

*Sujeción al actuador*



*Nota:* La sujeción del prototipo dos se lleva a cabo utilizando el mismo principio que en el prototipo uno.

Es crucial asegurar la seguridad del equipo cuando está suspendido, ya que este aspecto es fundamental para su funcionamiento óptimo. Un fallo en el sistema de sujeción podría provocar su caída desde alturas considerables, con el consiguiente riesgo de daños. Por lo tanto, en la Figura 17, se muestra el peso del actuador, que es aproximadamente 2 kg, incluyendo toda su electrónica y sus accesorios.

**Figura 17**

*Medición del peso del dispositivo*

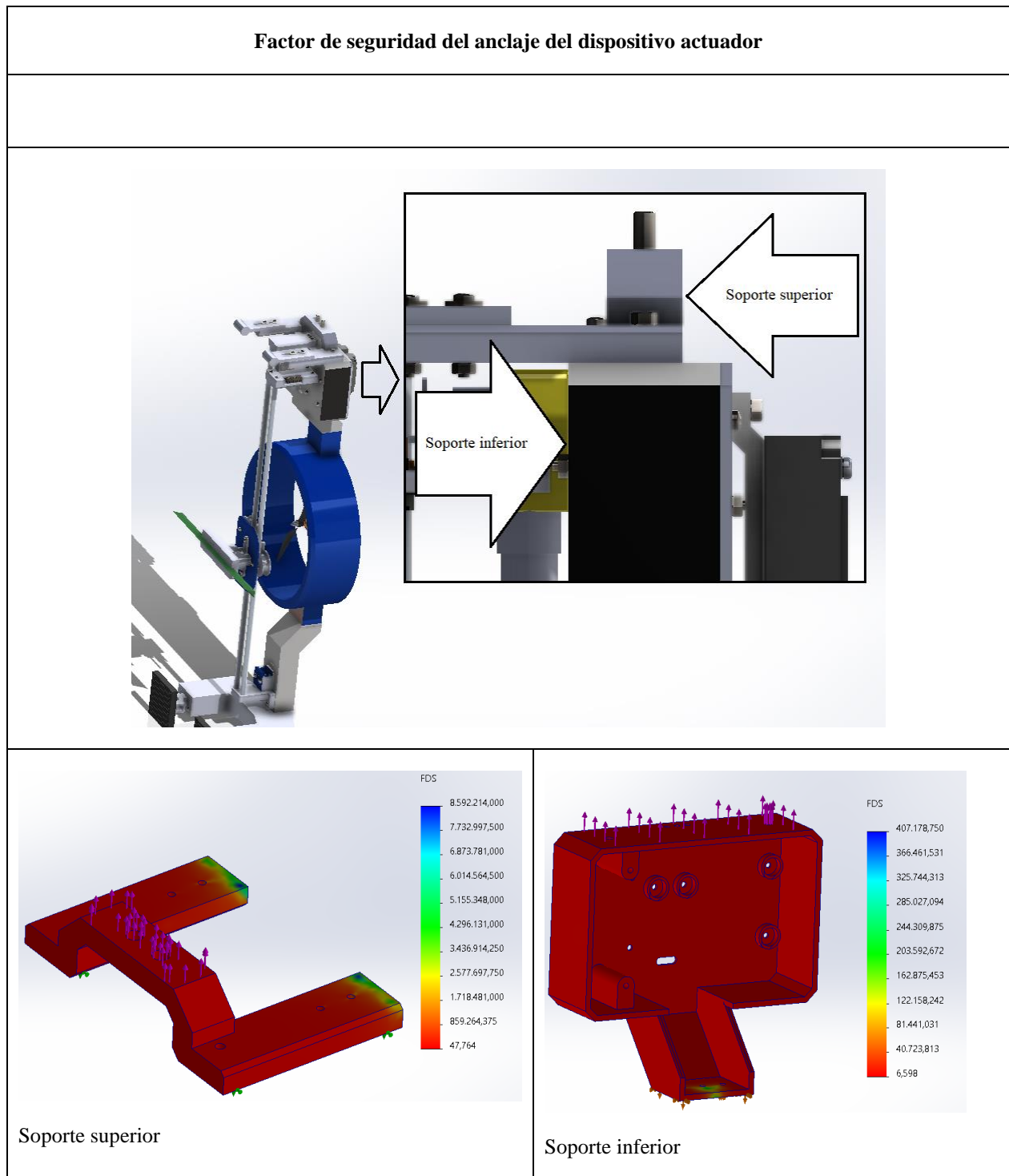


*Nota:* La balanza con la que se realizaron las medidas es una Ohaus t21p -2000 series.

En relación con el factor de seguridad en el punto de sujeción del actuador, es crucial destacar que su estructura está compuesta por elementos atornillados. Aunque su peso es de 1.8 kg, como se mencionó anteriormente, se recomienda estimarlo en 5 kg por encima de lo que pueda agregarse posteriormente al prototipo, con el fin de garantizar un margen de seguridad superior. El análisis se lleva a cabo mediante SolidWorks, utilizando el Toolbox para el análisis de elementos finitos. Se considera el material, ácido poliláctico (PLA), que constituye el componente encargado de sostener el dispositivo en suspensión. En la Tabla 14, se presenta el análisis generado, observándose que, aunque el factor de seguridad de la pieza más grande y maciza es de 47, mientras que el de la pieza delgada es de 6, se tomará el mínimo, ya que el factor de seguridad de un elemento corresponde a la seguridad proporcionada por el elemento más débil de toda la estructura. Por lo tanto, se estima un factor de seguridad de 6.

Tabla 14

Factor de seguridad del dispositivo actuador



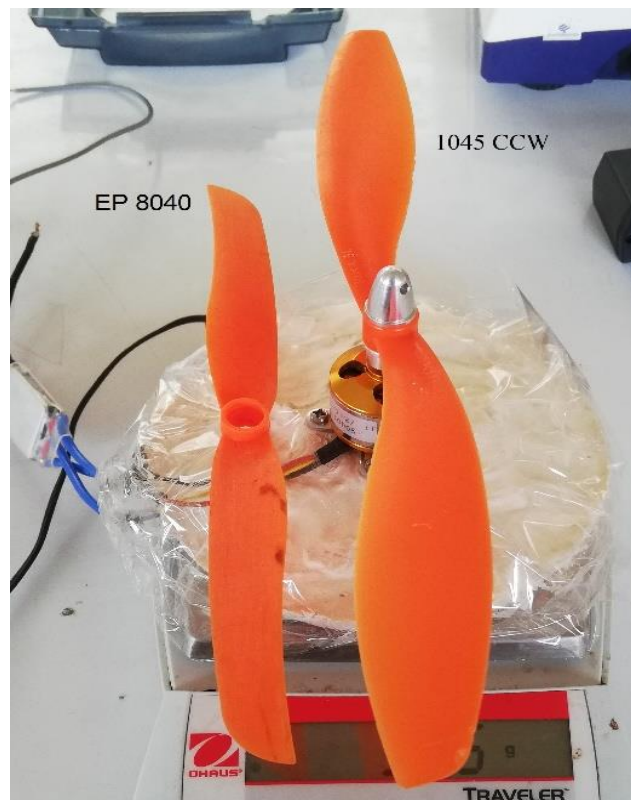
### **2.2.3. Módulo de adhesión**

La adhesión del equipo a la pared del edificio se logra mediante el uso de propelas. Inicialmente, se evaluaron dos tipos de propelas, la EP8040 y la 1045CCW, a través de pruebas de empuje en laboratorio. Durante este proceso, se identificó que la propela EP8040 resultó ser suficiente para el propósito deseado. Es importante destacar que la función de estas propelas difiere de la de los drones convencionales, ya que aquí el propósito no es volar, sino adherirse a una pared.

En la Tabla 15, se presentan los resultados de las pruebas realizadas a ambos tipos de propelas de fuerza en función de la corriente, y en la Figura 18, se muestra el experimento. Este consistió en medir la fuerza ejercida por la propela en una gramera.

### **Figura 18**

*Experimento con las propelas EP8040 y 1045CCW*



*Nota:* La balanza con la que se realizaron las medidas mostradas es una Ohaus traveler.

**Tabla 15**

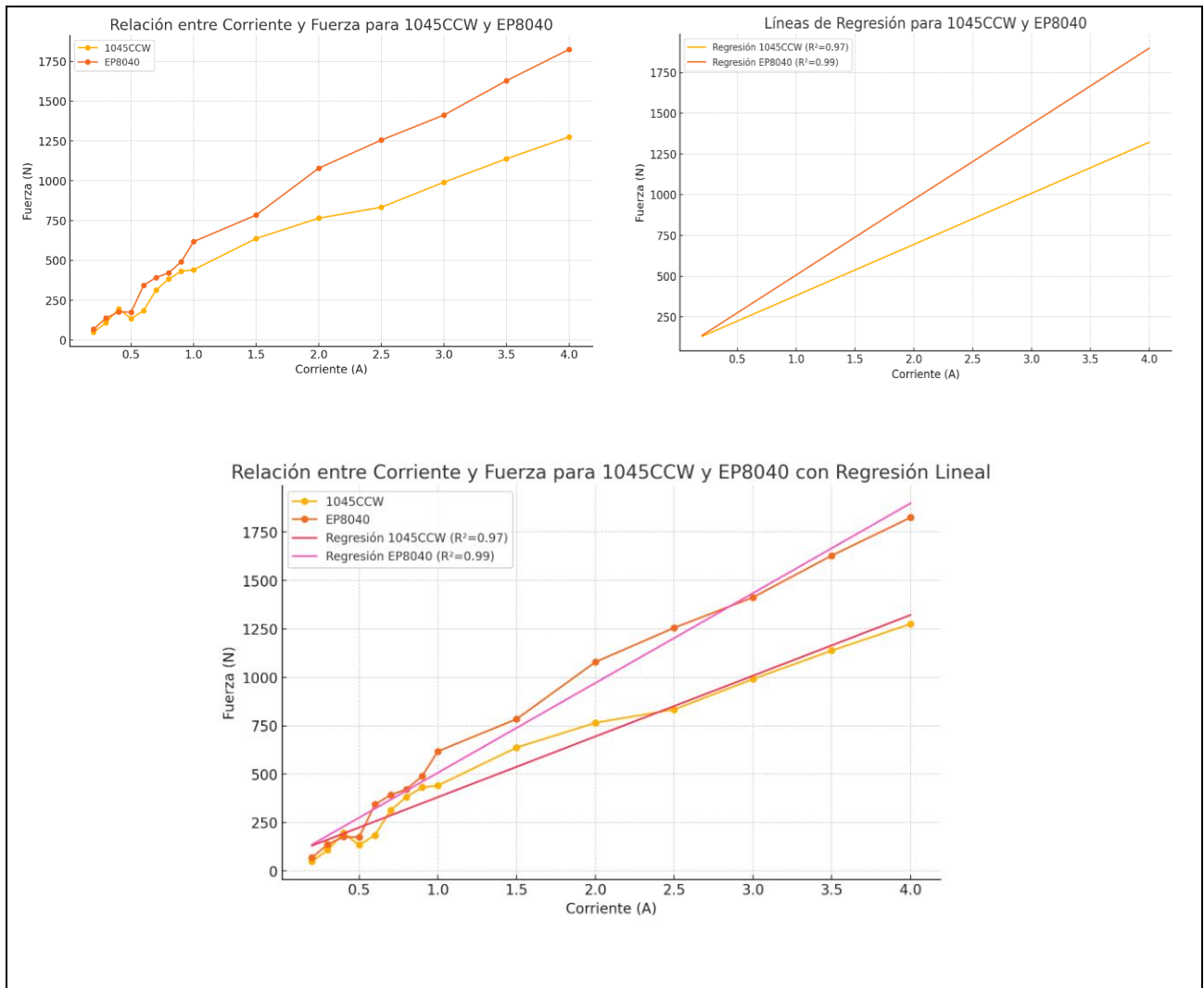
*Relación entre corriente y fuerza de los motores*

<b>Corriente (A)</b>	<b>Fuerza (N) 1045CCW</b>	<b>Fuerza (N) EP8040</b>
<b>0,2</b>	49.05	68.67
<b>0,3</b>	107.91	137.3
<b>0,4</b>	196.2	176.58
<b>0,5</b>	134.4	174.68
<b>0,6</b>	184.49	343.45
<b>0,7</b>	313.92	392.4
<b>0,8</b>	382.59	421.81
<b>0,9</b>	431.64	490.5
<b>1</b>	441.45	618.03
<b>1,5</b>	637.65	784.8
<b>2</b>	765.18	1079.1
<b>2,5</b>	833.85	1255.68
<b>3</b>	990.81	1412.64
<b>3,5</b>	1137.96	1628.46
<b>4</b>	1275.3	1824.7

Al examinar los datos y las gráficas en la Figura 19, se puede observar una relación clara entre la corriente aplicada y la fuerza generada para ambas configuraciones de propelas (1045CCW y EP8040), la propela EP8040 genera más fuerza que la 1045CCW a todos los niveles de corriente, mostrando una mayor consistencia y una relación más lineal entre corriente y fuerza, con un coeficiente de determinación  $R^2=0.994$  en comparación con 0.987 para la 1045CCW. Esto sugiere que EP8040 es más eficiente, haciendo de ella una mejor opción para la presente aplicación.

**Figura 19**

*Gráficas de la relación entre corriente y fuerza*





Para equilibrar las propelas, se emplea un dispositivo magnético que las sostiene y permite observar su comportamiento. El objetivo es lograr que queden perfectamente balanceadas, sin inclinarse hacia ningún lado. Esto se ilustra en la Figura 20, donde se muestra el dispositivo junto a una de las hélices.

**Figura 20**

*Balanceador de hélices comercial*



Una vez que las hélices están debidamente balanceadas, se procede a verificar su funcionamiento integral. Tras evaluar las propelas EP8040 y 1045CCW, se optó por la EP8040 debido a su destacado rendimiento. Posteriormente, se construyó la estructura que soportará este dispositivo, la cual se muestra en la Figura 21, asegurando una integración eficiente y segura en el prototipo.



**Figura 21**

*Espacio destinado a la propela en el primer y segundo prototipo*



Dado que se utiliza la hélice EP8040, es importante medir las RPM generadas por el motor en conjunto con las hélices y el empuje generado. Esta tarea se llevó a cabo en el laboratorio utilizando el dispositivo comercial Extech Instruments RPM10, que se muestra en la Figura 22, a continuación:

**Figura 22**

*Tacómetro láser y termómetro Extech RPM10*



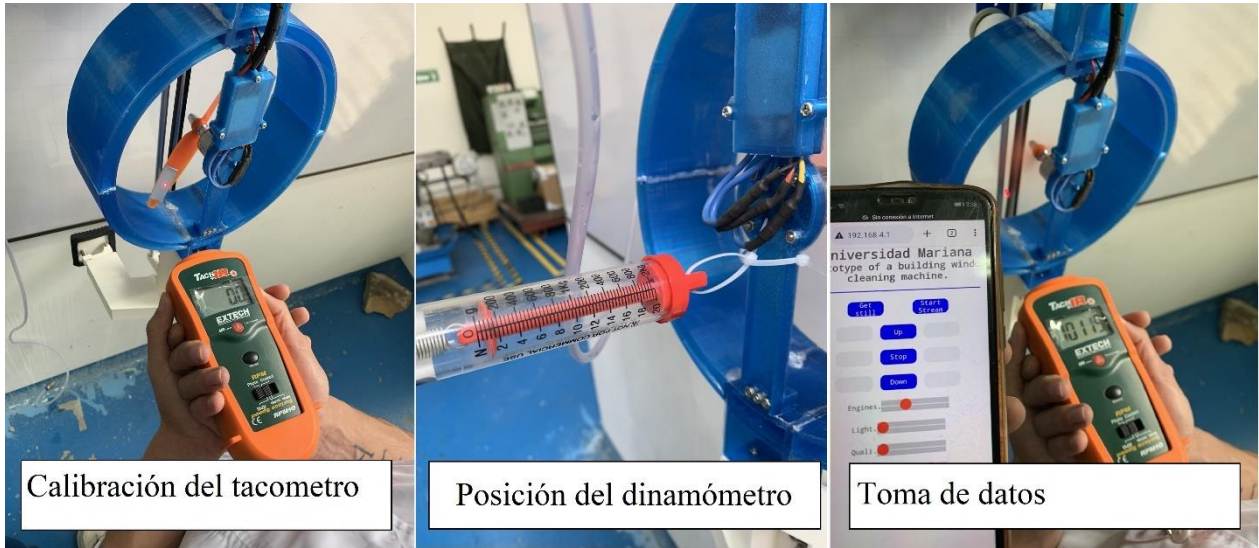
Recuperado de: <https://www.flir.com.mx/products/rpm10>

Se llevaron a cabo pruebas para explorar la relación entre las RPM (Revoluciones Por Minuto), medidas con el instrumento descrito anteriormente, y el uso de un dinamómetro. El objetivo era establecer el empuje generado por el motor, de manera que se consiga una adecuada adhesión en la ventana objetivo de limpieza. Estas pruebas se realizaron a tres velocidades distintas, correspondientes a los modos de operación baja, media y rápida del dispositivo, obteniéndose

resultados que confirman la efectividad en términos de adhesión. En la Figura 23, adjunta se ilustra la metodología empleada para la toma de mediciones, tanto con el tacómetro como con el dinamómetro.

### **Figura 23**


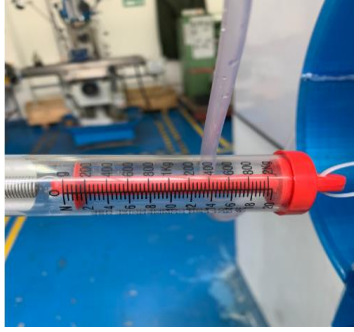




*Toma de mediciones de RPM y del empuje generado por la propela*



La Tabla 16, muestra los resultados de las tres mediciones mencionadas anteriormente, las cuales detallan las Revoluciones Por Minuto (RPM) obtenidas y su relación con la fuerza generada. Además, se complementan estos resultados con fotografías para una mayor claridad. Es importante destacar que, dado que el dinamómetro utilizado es un dispositivo analógico, las mediciones reportadas representan valores aproximados y no reflejan con precisión absoluta los valores reales, debido a las inherentes limitaciones de precisión del dinamómetro.

Tabla 16

Mediciones de RPM y empuje

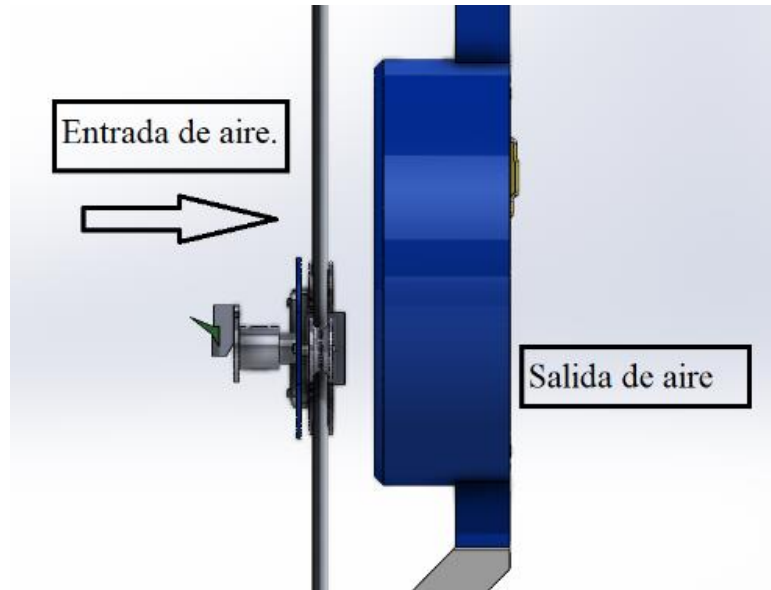
Mediciones de RPM y empuje generado por la propela			
RPM		erza (N)	
4237		1.4	
6045		1.6	
8160		2	

La hélice, al girar, genera naturalmente una corriente de aire. Por lo tanto, el modelo en cuestión se divide en una entrada de aire y una salida de aire, como se muestra en la Figura 24. A

continuación del esquema, se presentan los datos de la velocidad del viento generada por la hélice tanto en la entrada como en la salida. Se observa que, en la entrada, la velocidad del viento genera una corriente de aire suficiente para secar parte del agua aplicada en la ventana.

**Figura 24**




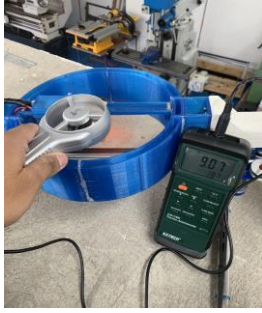

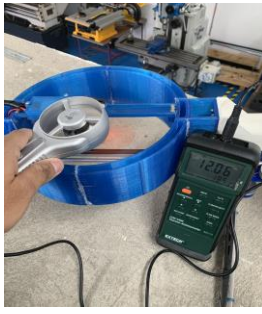
*Entrada y salida de aire de la propela*



En la siguiente Tabla 17, se detallan las mediciones de la velocidad del viento generada por la hélice, tanto en la entrada como en la salida de aire. Se destaca que la velocidad en la salida de aire exhibe aproximadamente el doble de la velocidad registrada en la entrada. Este análisis refleja el comportamiento del viento a diferentes niveles de velocidad de la hélice, que abarcan desde mínimas hasta máximas, de manera coherente con las mediciones previas de fuerza y empuje, según se ha descrito en secciones anteriores.

**Tabla 17**

*Mediciones de la velocidad del aire generado por la propela en la entrada y en la salida*

<b>la velocidad del aire generado por la propela en la entrada y en la salida</b>	
<i>Velocidad mínima, intermedia y máxima en entrada de aire (m/s)</i>	<i>Velocidad mínima, intermedia y máxima en salida de aire (m/s)</i>
2.22	2.43
	
5.15	9.07
	
6.57	12.6
	

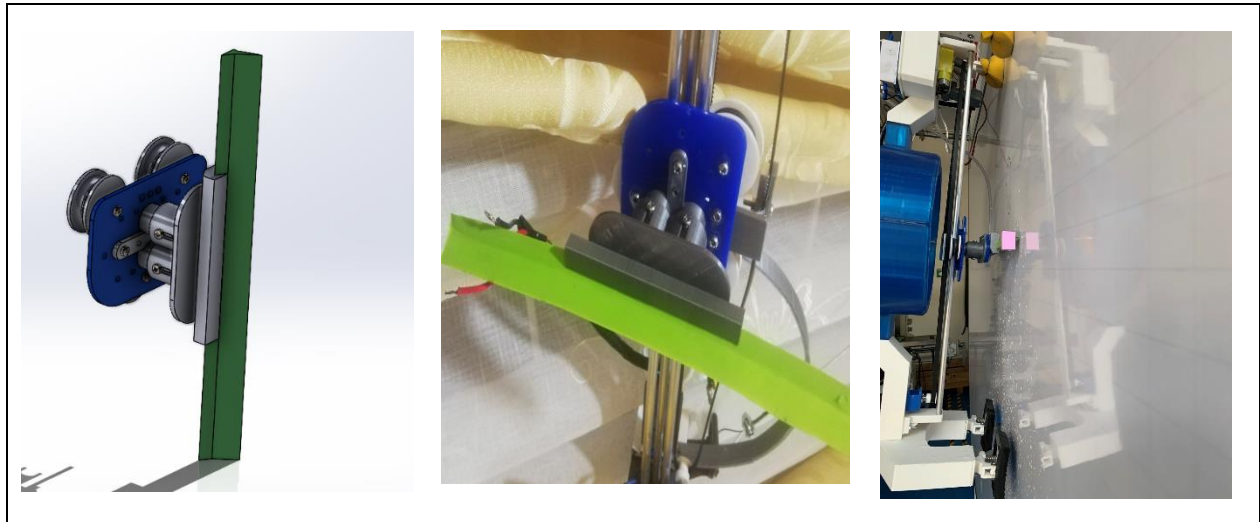


#### **2.2.4. Módulo de limpieza**

Esta estructura fue diseñada para ser desmontada con facilidad. Incorpora un limpiacristales de goma estándar, acoplado a una plataforma que se desplaza verticalmente para la limpieza de ventanas a través de un sistema de correas. El suministro de agua, controlado por una bomba de baja presión, minimiza el desperdicio. La Figura 25, exhibe el diseño y la construcción del sistema en un render a la izquierda, y muestra el montaje en el primer y segundo prototipo, al centro y derecha respectivamente, resaltando la fijación del limpiacristales.

**Figura 25**

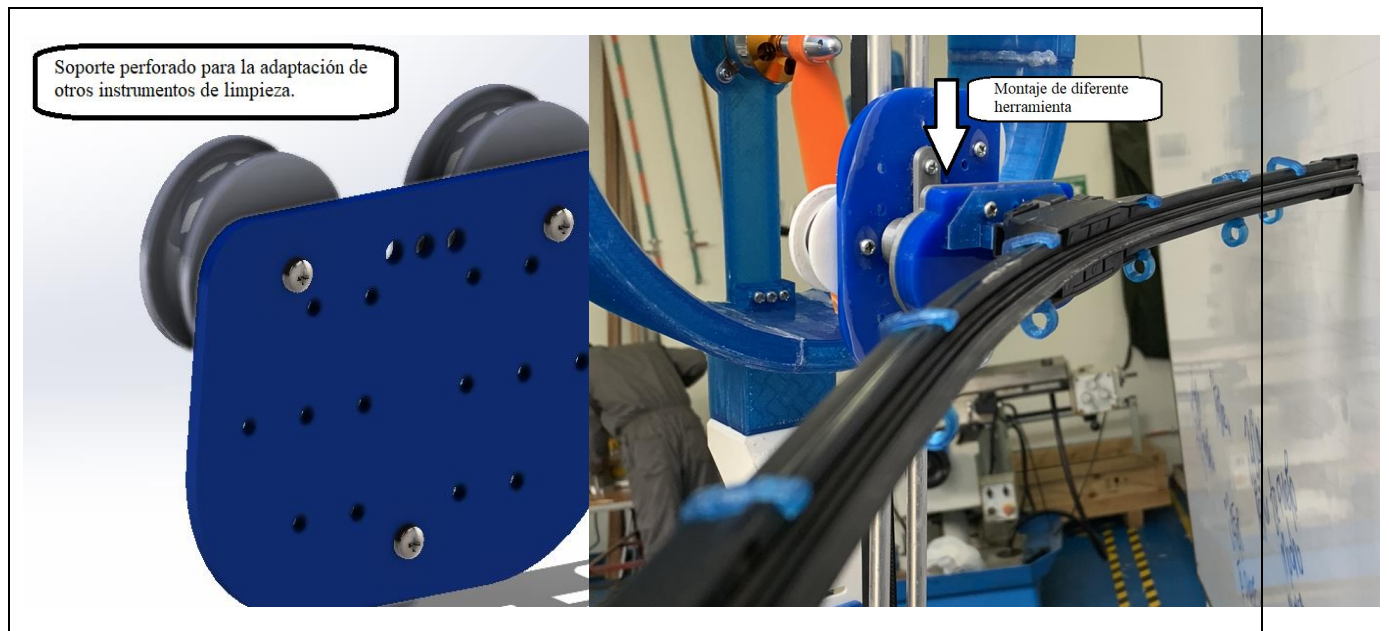
*Mecanismo de limpieza*



El soporte donde se monta la goma limpiadora está diseñado con perforaciones que permiten adaptar, mediante pernos, diversos aditamentos según las necesidades de limpieza o cualquier otro propósito específico del usuario. El proceso de montaje para los diferentes tipos de herramientas es intuitivo y rápido. En la Figura 26, se muestra cómo es posible acoplar otro instrumento; en este caso, un limpiaparabrisas genérico de bajo peso, cuyo mecanismo se ajusta fácilmente a la superficie sobre la que se apoya.

**Figura 26**

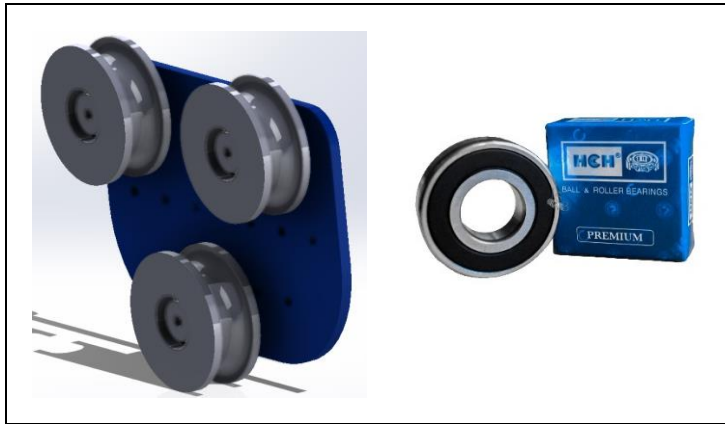
*Adaptación de distintos tipos de herramientas de limpieza*



Para asegurar un desplazamiento vertical suave y controlado del carro, este se ha equipado con rodamientos que se deslizan sobre dos barras verticales. El carro también se encuentra conectado mediante una correa a un tren motriz, facilitando así su ascenso y descenso de forma precisa. En la Figura 27, se ilustra cómo los rodamientos cuyo modelo comercial es el 607-2RS, alojados dentro de una carcasa plástica, y el modelo específico seleccionado para la construcción del carro contribuyen a esta funcionalidad.

**Figura 27**

*Rodamientos del carro de limpieza*



Las características físicas del rodamiento utilizado se detallan en la Tabla 18, donde se enumeran sus especificaciones. Aunque podría parecer que este dispositivo está sobredimensionado para la función que desempeña, su uso facilita el movimiento vertical del carro de manera eficiente y efectiva.



**Tabla 18**

*Ficha técnica del rodamiento 607-2RS expedida por el fabricante*

<i>Ficha técnica del rodamiento 607-2RS</i>	
Diámetro interior (mm):	7 mm
Diámetro exterior (mm):	19 mm
Ancho (mm)	6 mm
Tipo de jaula	Acero
Sellos	Caucho
Capacidad de carga dinámica	2kN
Capacidad de carga estática	1,1kN
Velocidad máxima limite	22000 RPM

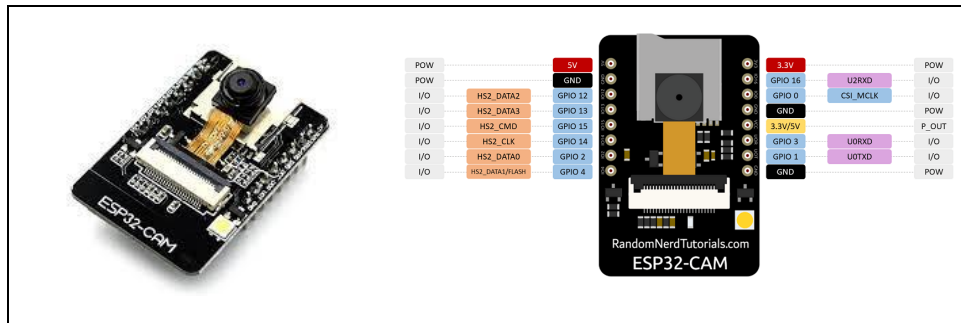
Fuente: HCH Bearings. Recuperado de: <http://www.hchbearing.com/>

### ***2.2.5. Módulo de procesamiento***

Dadas las características del ESP32-CAM la cual incorpora un microcontrolador de doble núcleo de 32 bits con conectividad Wi-Fi y una cámara que permite la visualización del exterior. Así, es posible verificar el nivel de limpieza mediante inspección visual, ya que la acumulación de polución se debe principalmente al polvo. Esto facilita la inspección y proporciona un acceso sencillo. La Figura 28, muestra el aspecto del módulo mencionado.

## Figura 28

Aspecto del ESP32-Cam y su disposición de pines

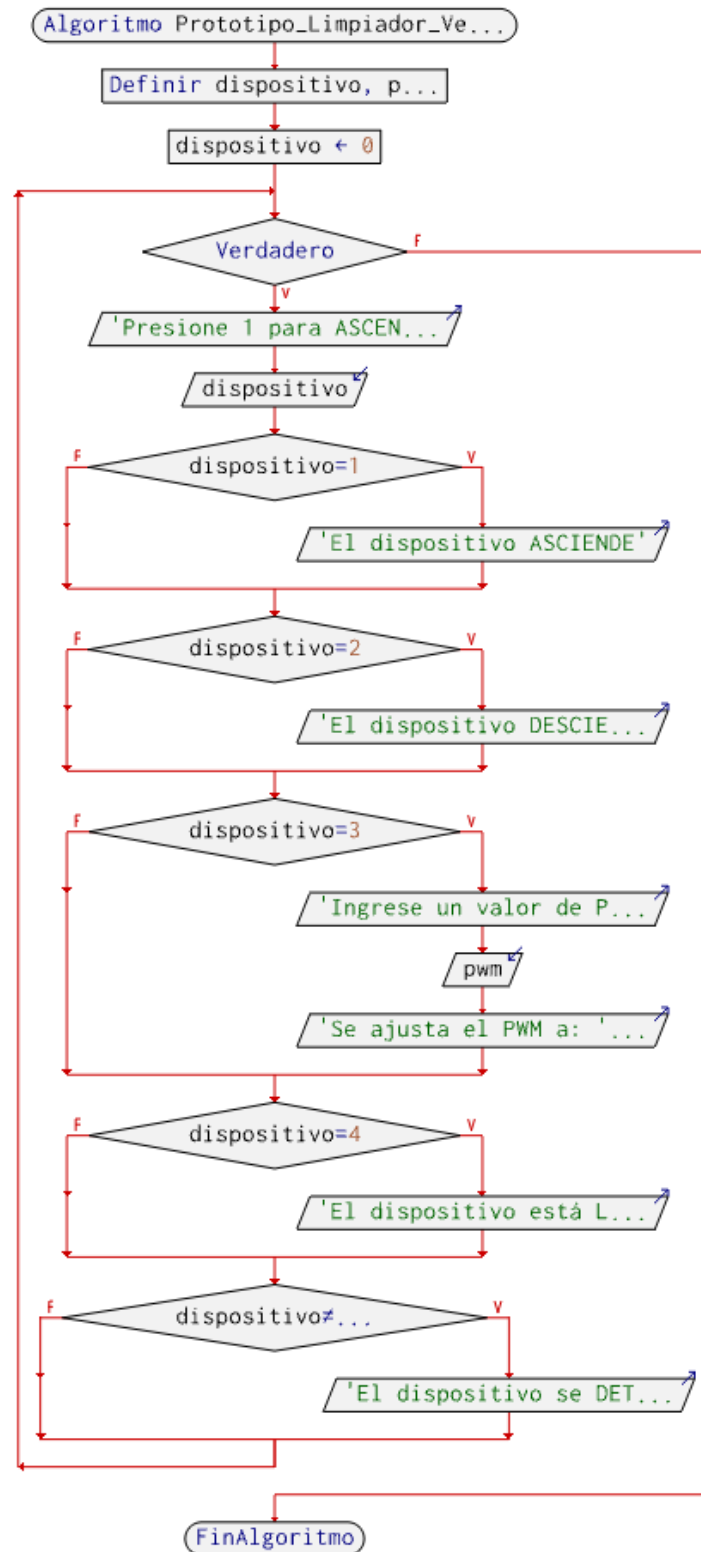


Fuente: Proveedor Vistronica. Recuperado de: [www.vistronica.com](http://www.vistronica.com)

El algoritmo para el control dispositivo limpiador de ventanas se ha desarrollado en pseudocódigo, y las partes esenciales del algoritmo se describen en detalle en la Figura 29. A través de esta representación, se pueden observar las acciones que se llevarán a cabo mediante un control remoto, el cual puede ser operado tanto desde un dispositivo móvil como desde una computadora, según la preferencia del usuario. A continuación, se presenta el pseudocódigo que resalta las acciones principales, que incluyen ascenso, descenso, limpieza y de las propelas.

Figura 29

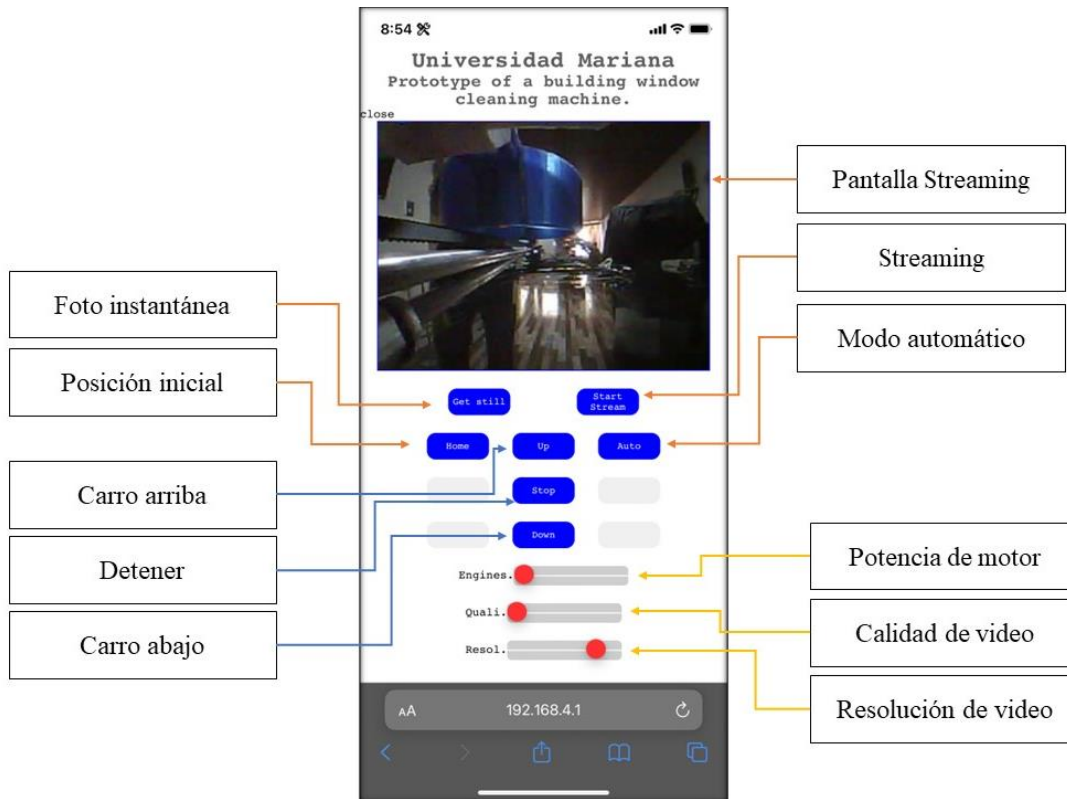
Seudocódigo del prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios



El software del prototipo del limpiador de ventanas incorpora un ESP32-CAM, que actúa como servidor. Esto permite conectarse a la red generada por el dispositivo y acceder, mediante una dirección IP, a un menú previamente configurado en el entorno de Arduino. El software controla los módulos necesarios para el funcionamiento del dispositivo limpiador de ventanas, incluyendo la capacidad de hacer streaming en tiempo real para visualizar lo que sucede, así como un botón para capturar imágenes estáticas que podrían ser útiles para verificar situaciones inesperadas en alturas. Los botones de arriba y abajo permiten controlar el movimiento ascendente y descendente de la goma de limpieza, mientras que, por defecto, al presionar el botón de abajo, la bomba de agua se activa para regar. Todos estos elementos se resumen en la Figura 30, que se presenta a continuación.

**Figura 30**

*Software de control remoto del Esp32 - Cam*



*Nota:* A la izquierda se describen los controles básicos del prototipo, mientras que a la derecha se muestra la aplicación en funcionamiento.

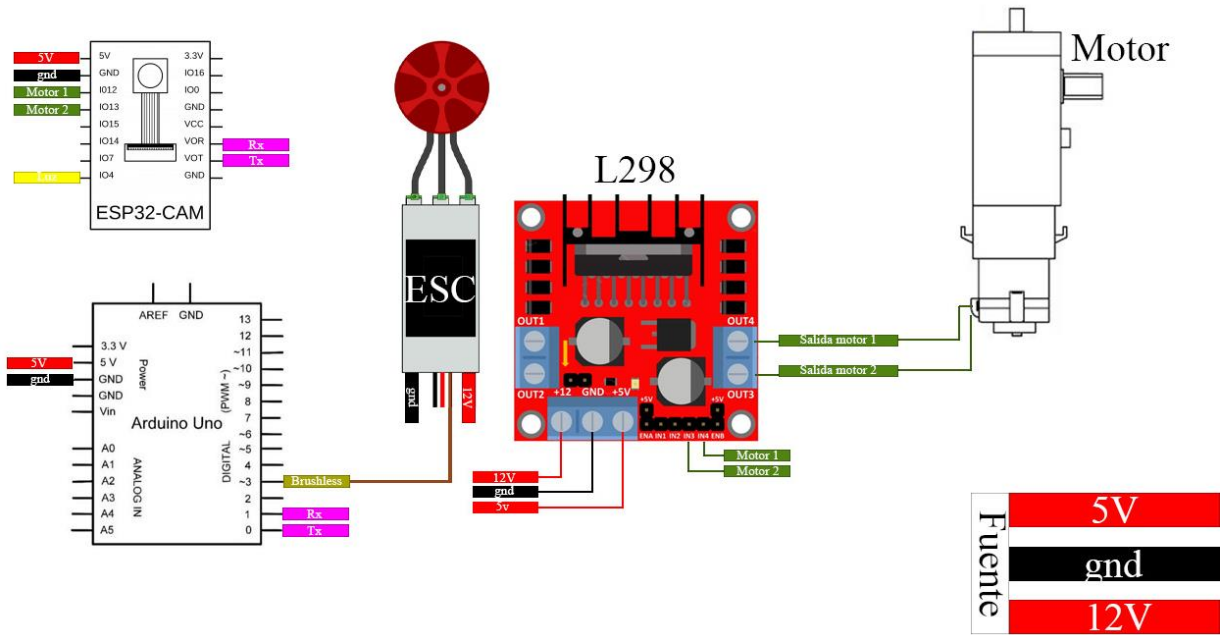
En cuanto al diagrama electrónico del dispositivo, se emplea una fuente de 12V, de la cual se derivan los 5V necesarios para alimentar los microcontroladores y los módulos a través de un reductor de voltaje denominado DC-DC LM2596. Además, los 12V se utilizan para alimentar el ESC, o Controlador Electrónico de Velocidad, cuya función es transformar los pulsos del microcontrolador en señales para el movimiento del motor que impulsa la hélice. También se utilizan los 12 voltios para accionar el motorreductor de la correa, la cual impulsa el carro de limpieza.

El ESP32-CAM se utiliza como servidor en este escenario. Sin embargo, debido a la limitación de pines GPIO disponibles en el módulo, expandir sus funcionalidades directamente podría resultar difícil. Por lo tanto, una solución práctica es conectar una board Arduino al ESP32-CAM a través de los pines seriales. Esto permite agregar nuevas funcionalidades al prototipo de manera más sencilla y escalable. Al utilizar la comunicación serial entre ambos dispositivos, se puede delegar ciertas tareas adicionales al Arduino mientras el ESP32-CAM continúa funcionando como servidor. Esta configuración a futuro proporciona la flexibilidad necesaria para agregar más dispositivos y funcionalidades al proyecto sin verse limitado por los pines GPIO disponibles en el ESP32-CAM.

A continuación, en la Figura 31, se presenta el diagrama electrónico con las etiquetas correspondientes a las conexiones realizadas para el funcionamiento del dispositivo, estas mismas etiquetas se describen con la Tabla 19, para mayor claridad.

Figura 31

Diagrama de la electrónica del dispositivo



**Tabla 19**

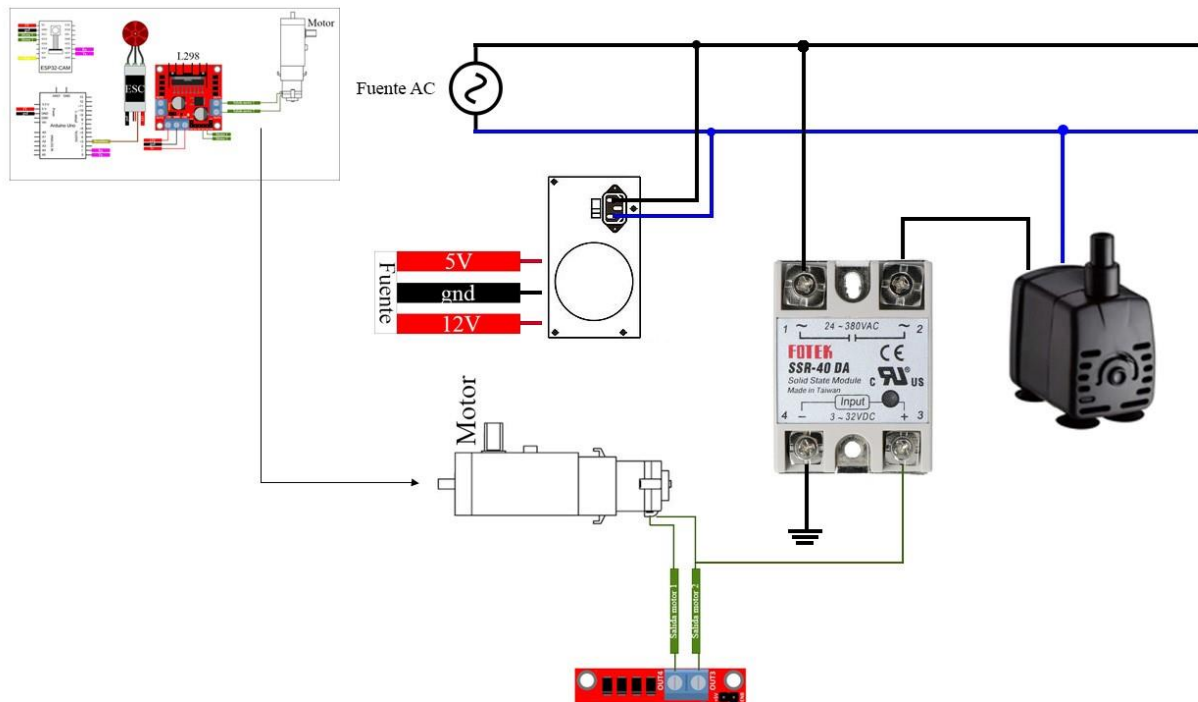
*Descripción de los rótulos de conexión*

<b>Descripción de los rótulos de conexión</b>	
<i>Color y etiqueta</i>	<i>Descripción</i>
<b>5V</b>	Voltaje de 5V
<b>gnd</b>	Gnd compartido con todo el dispositivo
<b>12V</b>	Voltaje de 12 V
<b>Motor 1</b>	Permite el ascenso del carro a través de la estructura
<b>Motor 2</b>	Permite el descenso del carro a través de la estructura y activa la bomba de agua
<b>Luz</b>	Permite encender una luz para mejorar la visualización
<b>Tx</b>	Transmisión de datos vía serial
<b>Rx</b>	Recepción de datos vía serial
<b>Brushless</b>	PWM para controlar giro de la hélice

En lo que respecta a la parte de tensión AC, los 120VAC de la red eléctrica se utilizan para accionar la bomba de agua necesaria para la limpieza de las ventanas. El encendido y apagado de la bomba está controlado por un relé de estado sólido. Además, los 120VAC se redirigen hacia una fuente ATX, la cual suministra los 12VDC – 10ADC necesarios para el funcionamiento del motor brushless. Sin embargo, uno de los principales problemas es que los microcontroladores no operan con dicho voltaje, por lo que es necesario reducirlo a 5VDC mediante un reductor de voltaje DC-DC. De esta manera, se completan todas las conexiones necesarias para el funcionamiento del dispositivo. Estas conexiones se muestran en la Figura 32.

**Figura 32**

*Diagrama eléctrico del dispositivo*



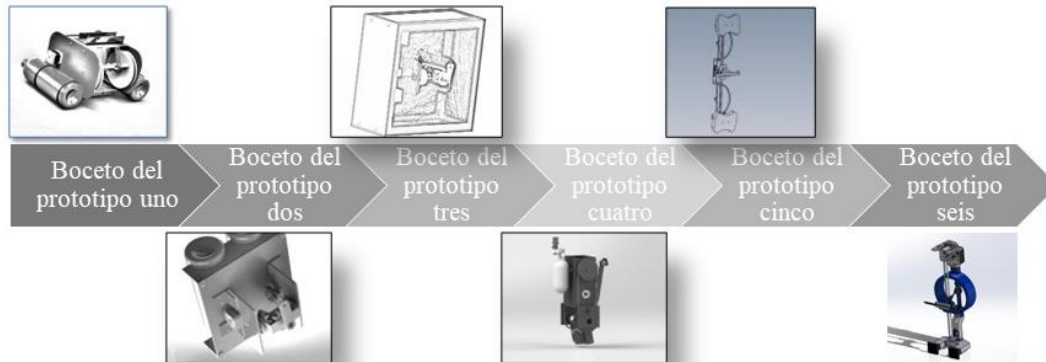
### **2.2.6. Aspecto del dispositivo finalizado**

La línea de tiempo que abarca desde los primeros esbozos de los prototipos hasta la creación de los dos prototipos físicos se muestra en la Figura 33. Inicialmente, a la izquierda, se presentan los esbozos que dieron lugar a conclusiones iniciales, como las ventajas y desventajas de cada diseño potencial. Algunas máquinas propuestas resultaron ser de difícil construcción, mientras que otras podrían presentar riesgos significativos, como la posibilidad de perder el control de la máquina en altura.



**Figura 33**

*Línea de tiempo de los bocetos de los prototipos*



Estas consideraciones llevaron a evaluar tanto los aspectos positivos como los negativos de cada esbozo, lo que condujo a la creación de un prototipo físico inicial. Sin embargo, este primer prototipo, aunque prometedor en papel, no cumplió con las expectativas en la realidad. Su estructura, que se basaba en tres perfiles circulares para soportar el peso, presentaba dificultades en la fijación de las piezas impresas en 3D. Aunque se esperaba que el pegamento epoxi fuera la opción más adecuada para unir estas piezas, resultó ser frágil al unir dos o más piezas de PLA, a continuación, en la Figura 34, se observa el dispositivo.

**Figura 34**

*Aspecto final del primer prototipo físico de la máquina limpiadora de ventanas*



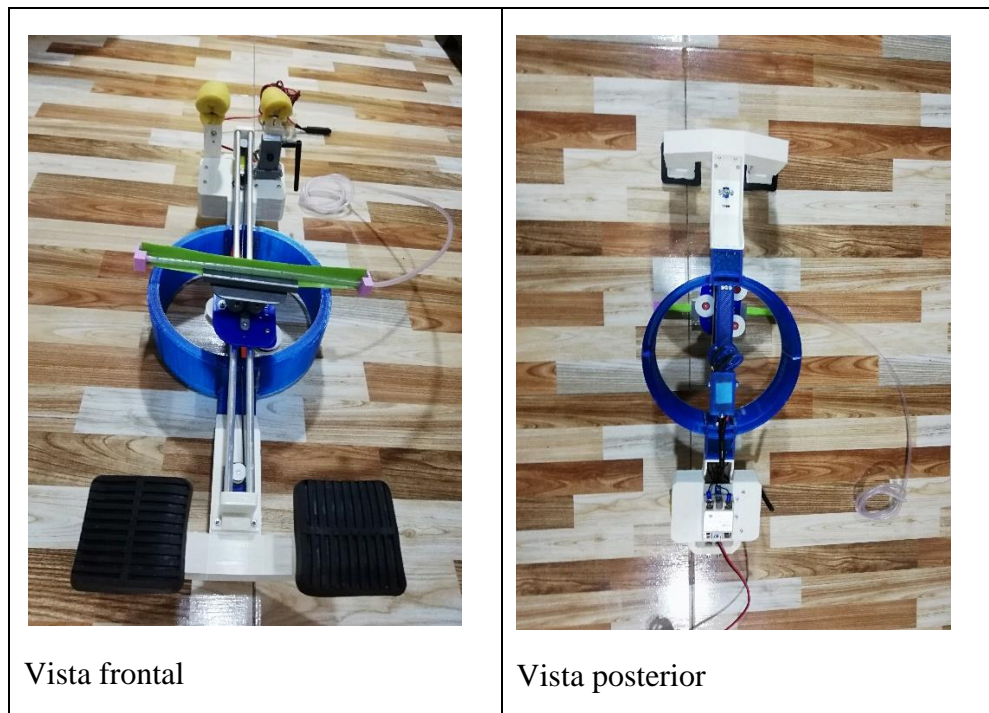
*Prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios.*

Esta situación llevó a considerar la posibilidad de utilizar tornillos, aunque se descartó inicialmente debido al peso adicional que implicarían. Sin embargo, dada la fragilidad del pegamento epoxi, la opción de no usar tornillos se volvió inviable. Este dilema resaltó la necesidad de encontrar una solución que equilibrara la resistencia estructural con el peso del prototipo, por lo tanto, se estudia los defectos de la máquina fabricada inicialmente y se opta por el prototipo dos, el cual es una mejora respecto al antecesor.

La culminación total del dispositivo se presenta de manera integral en la Figura 35, donde se exhiben todos los módulos que componen el prototipo. Este logro confirma que se ha completado la construcción del dispositivo, abriendo así la posibilidad de llevar a cabo pruebas de campo. Estas pruebas serán organizadas meticulosamente para facilitar la realización de estudios posteriores, consolidando así el avance hacia la fase de implementación y evaluación del prototipo en situaciones del mundo real, los planos de la máquina se observan en el Anexo A, mientras que en el Anexo B se presenta un artículo en el que se expone lo que respecta al armado del primer prototipo, en donde se observa el paso a paso de este dispositivo.

**Figura 35**

*Aspecto final del prototipo de maquina limpiadora de ventanas de edificios*



### **2.3. Verificación del funcionamiento del prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios en un entorno de laboratorio**

Se realizaron una serie de pruebas y análisis del prototipo de la máquina limpiadora de ventanas de edificios en un entorno controlado, representado en la Figura 36, que simula una azotea de un edificio desde donde el dispositivo se descolgará para llevar a cabo la limpieza de las ventanas, las cuales están colocadas previamente en la estructura. Estas pruebas se diseñaron con el fin de evaluar diversos aspectos del rendimiento y la funcionalidad del prototipo, como la resistencia de los pernos, la calidad del ensamblaje y la seguridad proporcionada por las distintas partes del dispositivo.

#### **Figura 36**

*Lugar donde el dispositivo se descolgó, donde simula una azotea de un edificio*

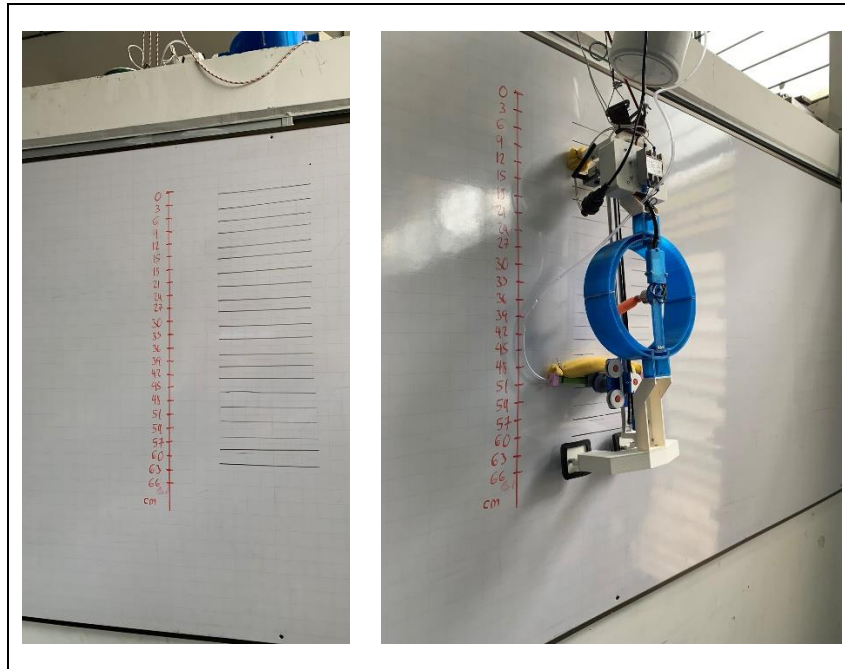


*Nota:* La altura del lugar donde se realizará la prueba es de 4 metros.

Una vez se ubicó el lugar para llevar a cabo el experimento, se procedió con el montaje de las poleas y las conexiones eléctricas necesarias. Luego, se verificaron posibles eventualidades que podrían surgir durante el primer experimento. Para este propósito, se utilizó un tablero que inicialmente sirvió para observar el comportamiento del dispositivo. Se trazaron algunas líneas guía en el tablero con propósitos generales, las cuales servían como referencia para la observación de la locomoción, la adhesión y la limpieza. Estos detalles se pueden apreciar en la Figura 37. que muestra este montaje.

**Figura 37**

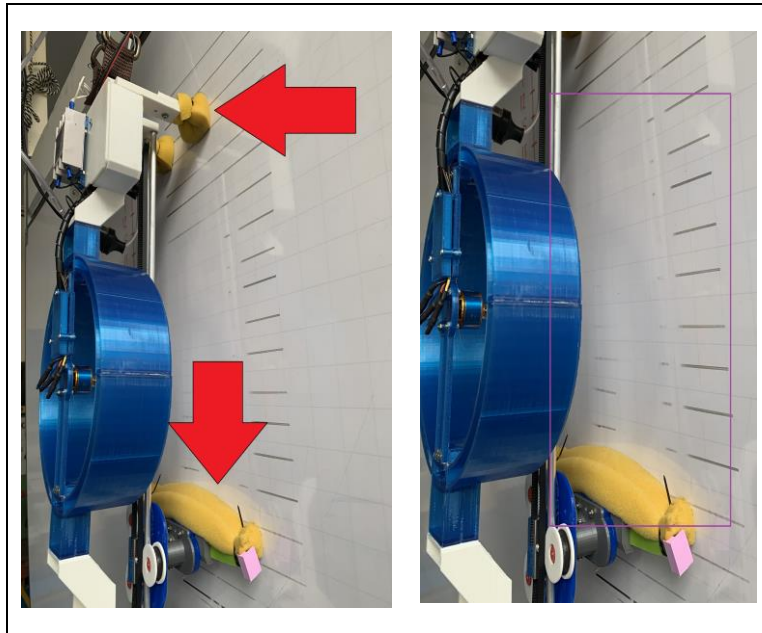
*Preparación del escenario con el que se validara parámetros del prototipo*



Una vez colocado el dispositivo, se ajusta el motor a una potencia ligeramente inferior a la máxima para observar la adhesión del aparato al tablero. Esto nos proporcionará una idea aproximada de cómo se comportaría la prueba en una ventana real. El propósito de esta prueba es verificar si el prototipo puede adherirse lo suficiente a la pared como para acercar el módulo de limpieza al objetivo. En la Figura 38, en la parte izquierda, se puede observar cómo se logra una adhesión adecuada, indicada por las flechas rojas, que permite al módulo de limpieza realizar esta tarea. Mientras tanto, en la parte derecha de la imagen, se lleva a cabo una pasada del módulo de limpieza, donde se pueden observar resultados favorables, marcados en el cuadro morado. Estos resultados sugieren que es posible limpiar una ventana en un entorno diferente. Es importante mencionar que no se roció agua, ya que el objetivo era verificar el comportamiento del dispositivo más que la eficacia de la limpieza.

**Figura 38**

*Preparación del escenario con el que se validara parámetros del prototipo*

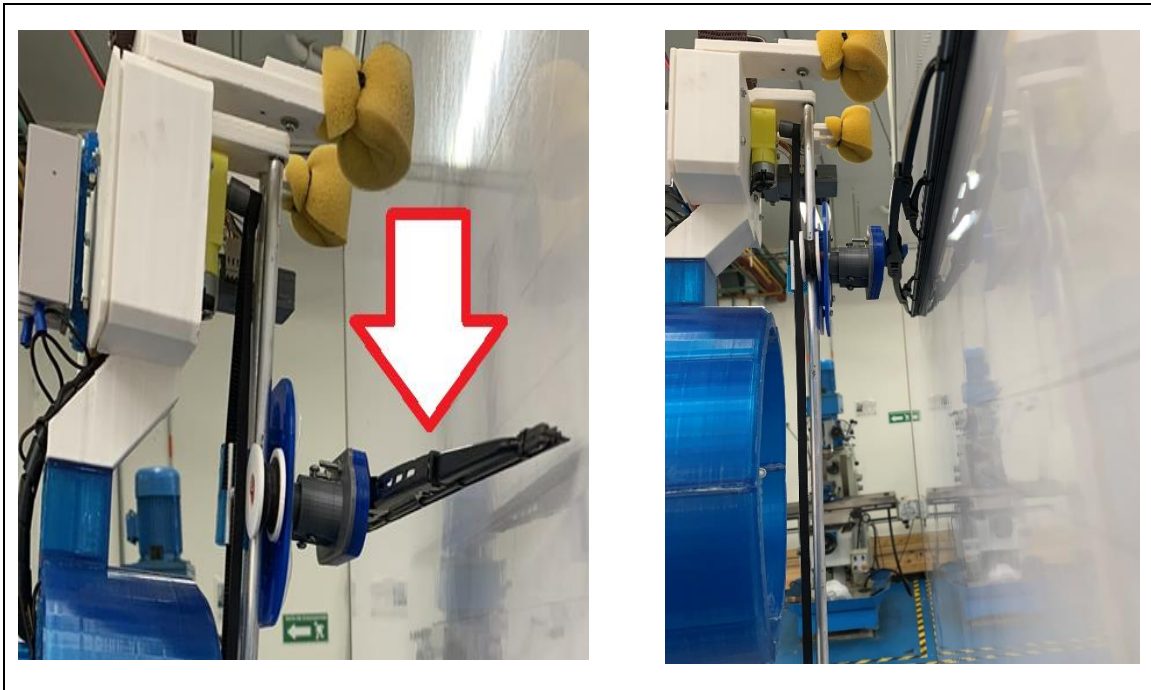


Las pruebas se llevaron a cabo de manera satisfactoria, lo que nos llevó a preparar un entorno más realista. En este contexto, se sustituyó la espuma original del módulo de limpieza por una escobilla de goma de mayor calidad, como la que se usa en los carros, como se muestra en la Figura 39. Este cambio se hizo para mejorar la eficacia de la plumilla en comparación con la espuma, que solo se utilizó para verificar el funcionamiento inicial. Una vez completada esta actualización, pasamos a la siguiente fase: la evaluación de la función de limpieza sobre una ventana real. Para ello, se ensucia la ventana de la estructura con diversos materiales polvorientos que dejaron residuos similares a los que se encuentran en un entorno real.



**Figura 39**

*Instalación de plumilla en el actuador*



La preparación de la ventana se llevó a cabo en dos etapas. En la primera, se impregnó la ventana con harina de trigo, la cual es difícil de retirar al contacto con el agua, y en la segunda se utilizó serrín. En la Figura 40 se puede observar la preparación previa de las ventanas. Es importante recordar que esta limpieza se lleva a cabo con el nuevo dispositivo de limpieza, que consiste en una goma limpiaparabrisas de vehículo comercial. Además, cabe mencionar que el actuador es intercambiable.

**Figura 40**

*Preparación de la ventana con residuos para limpieza*

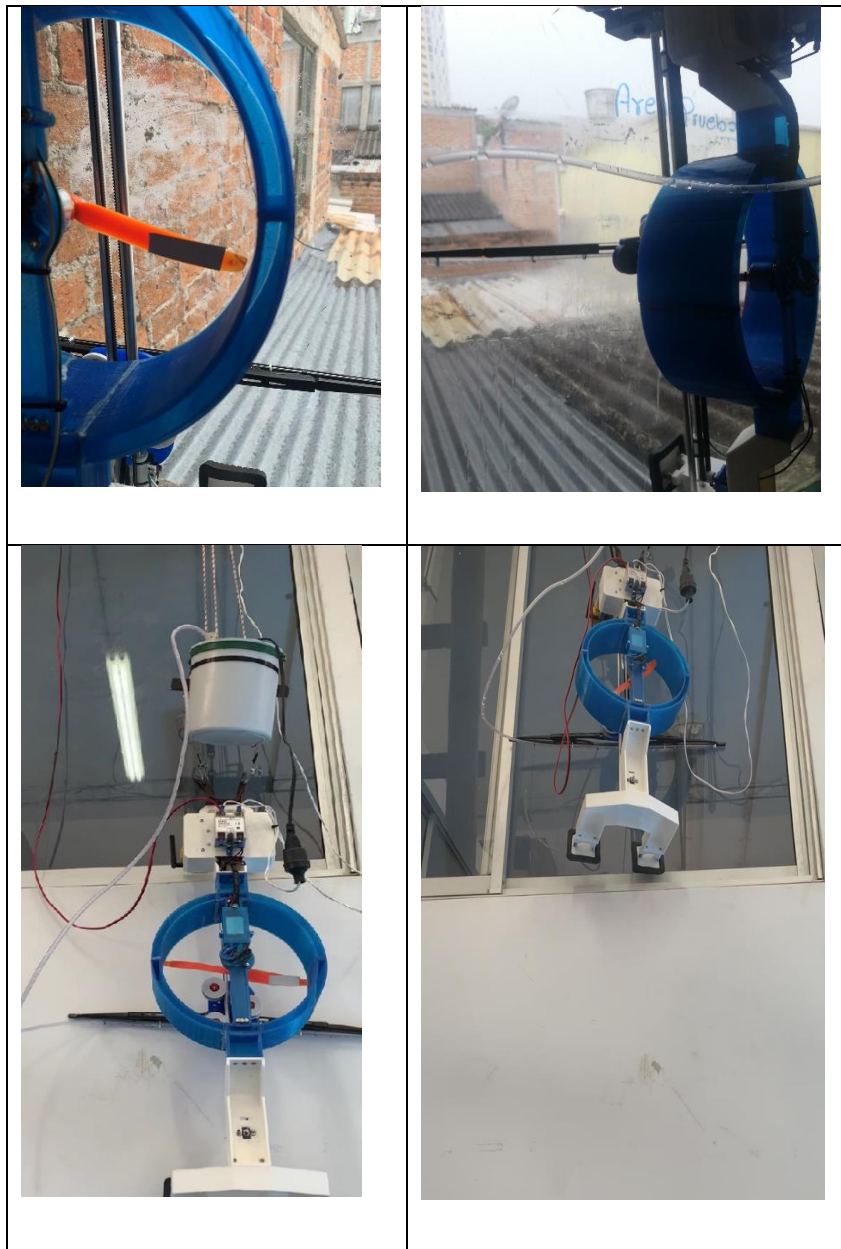


*Nota:* Las fotografías en la parte superior corresponden a la impregnación de la ventana con harina de trigo, mientras que las fotografías de la parte inferior corresponden a la impregnación con serrín.

Una vez preparadas las ventanas, se coloca el prototipo para la limpieza. En la Figura 41 se observa cómo el prototipo es elevado mediante su sistema de poleas hasta la diana. Para evaluar la adhesión y la eficacia de la limpieza. El sistema de poleas es fiable y no presenta preocupaciones, ya que fue probado previamente.

**Figura 41**

*Elevación del prototipo hasta la ventana*



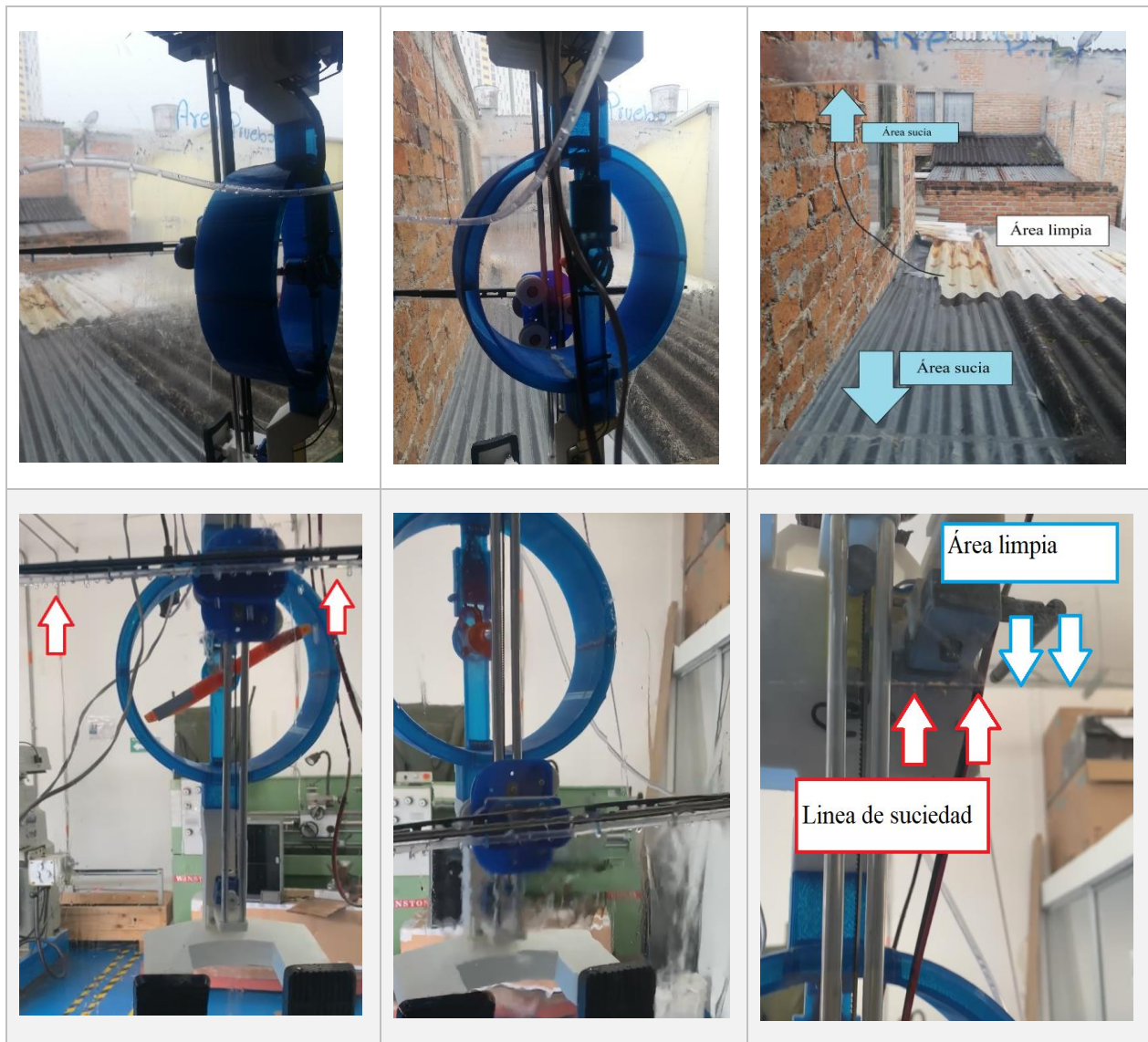
Una vez posicionado el dispositivo, se lleva a cabo la prueba de limpieza. Para ello, se ajusta el motor de la hélice a un nivel ligeramente inferior a su máxima capacidad mediante la aplicación móvil, lo que permite que se adhiera correctamente a la ventana. Además, se inicializa la bomba de agua para aplicar agua sobre la ventana y llevar a cabo la limpieza. Una vez que los módulos



están activados, se procede a limpiar la ventana en cuestión. Para evitar contratiempos, se utiliza la aplicación móvil en modo streaming para visualizar en todo momento la posición del módulo de limpieza. A continuación, se muestra el proceso descrito anteriormente: en la Figura 42, se puede observar la preparación previa en el lado izquierdo, la limpieza realizada en la imagen central, y la comparación del resultado obtenido en el lado derecho.

**Figura 42**

*Prueba de limpieza del prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios*



### **3. Conclusiones**

Se han desarrollado seis modelos, de los cuales solo dos se concretaron. Como era de esperar, los primeros modelos correspondían a esbozos preliminares que mostraban las desventajas inherentes a ciertas morfologías. Estas formas podrían resultar perjudiciales para los edificios, como el uso de tanques de acero o perfiles con terminaciones agudas. Además, esos esbozos presentaban desafíos técnicos considerables. A pesar de que el software CAD ofrece una aproximación del prototipo final, el comportamiento real resultaba incierto.

La construcción del primer modelo representó un desafío; aunque en el dibujo CAD las piezas encajaban y parecían rígidas, en la realidad las barras no lograban mantener la estructura sin rotar y desarticular las piezas. En respuesta a esto, se desarrolló un segundo modelo con una configuración diferente. Se optó por perfiles en forma de 'U' como plataforma de montaje en lugar de perfiles cilíndricos. Esta modificación permitió fijar las piezas con tornillos, facilitando el desmontaje para realizar mantenimiento y otorgando robustez al modelo. Además de mejorar su estabilidad, esta configuración aumentó la versatilidad del proceso de armado.

Durante el proceso de desarrollo del primer prototipo, se observaron varios problemas en su funcionamiento. La posición de la hélice causaba que el dispositivo fuera percibido como ingobernable e inestable a máximas velocidades. Además, el uso de espumas como amortiguador resultaba problemático, ya que, al entrar en contacto con el agua, estas se humedecían y aumentaban considerablemente el peso. Por otro lado, el software presentaba problemas de conectividad y funciones innecesarias que complicaban su operación. Estos problemas plantearon correcciones en el diseño del dispositivo, incluyendo un software más amigable y una disposición de piezas más coherente. Las correcciones realizadas tuvieron en cuenta las incomodidades y fallas de diseño presentadas en el prototipo uno, lo que permitió solventar los problemas encontrados y sintetizar un dispositivo más sencillo de operar.

#### **4. Recomendaciones**

Basado en los hallazgos y análisis realizados en este estudio, se presentan las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas:

En futuras investigaciones, se deben explorar enfoques alternativos para abordar las limitaciones identificadas. Por ejemplo, aplicar una metodología que permita la síntesis de un prototipo capaz de moverse entre edificios actuales. Dado que la arquitectura contemporánea tiende hacia geometrías más complejas, es crucial considerar este aspecto, ya que podrían representar un desafío para un prototipo diseñado exclusivamente para limpiar edificios tradicionales.

Incluir variables y escenarios adicionales para examinar más a fondo las relaciones y efectos observados. Esto ayudaría a capturar aspectos no contemplados en el estudio actual, como el comportamiento en entornos reales. La dificultad para emular las velocidades del viento sobre el prototipo en el laboratorio debido a limitaciones de equipos y permisos resalta la necesidad de incorporar escenarios más realistas para una evaluación completa y precisa de su efectividad en condiciones prácticas.

Aumentar la validez y generalización del dispositivo, se recomienda ampliar las funcionalidades a nivel de software y hardware. Por ejemplo, se sugiere la implementación de tecnologías de visión e inteligencia artificial, así como la capacidad de resolver problemas de manera autónoma. Además, se propone el uso de articulaciones que permitan al dispositivo sortear las geometrías de los edificios contemporáneos. Estas mejoras incrementarían la versatilidad y eficacia del dispositivo en una variedad de entornos y situaciones.

Utilizar los hallazgos de este estudio para desarrollar un producto final que ayude a realizar trabajos en altura en la región. Dado el riesgo asociado con estas tareas, es crucial abordar la seguridad de los trabajadores. El dispositivo basado en los resultados de esta investigación podría contribuir significativamente a mejorar la seguridad en el lugar de trabajo y reducir la incidencia de accidentes relacionados con caídas.

### **Referencias bibliográficas**

- Božić, M., Čaran, B., Švaco, M., Jerbić, B., & Serdar, M. (2022). Mobile Wall-Climbing Robot for NDT inspection of vertical concrete structures. *E-Journal of Nondestructive Testing*, 27(9). <https://doi.org/10.58286/27295>
- Castillo, J., Rodríguez, M., Wong, A., & Villalpando, P. (2007). Diseños experimentales e investigación científica (Experimental designs and scientific research). *Diseños Experimentales InnOvaciOnes de NegOciOs*, 4(2), 283–330.
- Choi, M., Chae, H., Kim, K., & Seo, T. W. (2021). Robust Design of a Rope Ascender Based on Geometric Parameters of Traction Sheave. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 22(5), 965–974. <https://doi.org/10.1007/s12541-020-00465-y>
- Eren, A., & Doğan, H. (2022). Design and implementation of a cost effective vacuum cleaner robot. *Turkish Journal of Engineering*, 6(2), 166–177. <https://doi.org/10.31127/tuje.830282>
- Garcia, F., & Gomez, M. (2019). Accidentalidad de Trabajo en Alturas en Colombia, especialmente en el sector de la construcción. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 1).
- Ibarra, O. (2021, September 7). Desarrollo de aplicaciones basadas en microcontroladores orientadas al IoT. *Universidad de Guanajuato*.
- Irawan, Y. (2021). Moving load robot using wifi network and android based. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2(3), 217–220. <https://doi.org/10.18196/jrc.2382>
- Kavya, S., Karthik, M., & Arun, C. (2017). Automatic Skyscraper Window Cleaning System. *IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*, 6(1), 15. <https://doi.org/10.11591/ijra.v6i1.pp15-20>
- Khouri, N. G., Bahú, J. O., Blanco-Llamero, C., Severino, P., Concha, V. O. C., & Souto, E. B. (2024). Polylactic acid (PLA): Properties, synthesis, and biomedical applications – A review

- of the literature. In *Journal of Molecular Structure* (Vol. 1309). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.138243>
- Lee, C., & Chu, B. (2019). Three-Modular Obstacle-Climbing Robot for Cleaning Windows on Building Exterior Walls. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20(8), 1371–1380. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00138-5>
- Lenis, G. A. U. (2019). Principales causas de accidentalidad del trabajo en alturas en empresas de construcción en Colombia. *Revista Interdisciplinaria de Estudios En Ciencias Básicas e Ingenierías.*, 7.
- Li, Z., & Xu, Q. (2021). A survey on techniques and applications of window-cleaning robots. *IEEE Access*, 9, 111518–111532. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3103757>
- Markom, A. M., Arriffinjee, M. A. Bin, Haironi, M. F. Bin, & Yusoff, Z. M. (2020). Window Cleaning Robot by using Arduino as Microcontroller. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 854(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/854/1/012033>
- Mir-Nasiri, N., Hudyjaya Siswoyo, J., & Ali, M. H. (2018). Portable Autonomous Window Cleaning Robot. *Procedia Computer Science*, 133, 197–204. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.024>
- Mosquera, A., & Gualdrón, O. (2018). Limpieza de ventanas de rascacielos y alternativas tecnológicas emergentes. *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, 2(30). <https://doi.org/10.24054/16927257.v30.n30.2017.2752>
- Nelson, C. (2021). *Expansión urbana y pérdida de la ruralidad. Análisis del POT de San Juan de Pasto* [Universidad de los Andes]. <http://hdl.handle.net/1992/53739>
- Óscar A. R., A. (2010). *Impactos socioeconómicos y demográficos de la metropolización de la población colombiana y de los mercados de trabajo y residenciales* (31; Issue 28). <https://www.uexternado.edu.co/wp-content/uploads/2021/02/DDT-31.pdf>

- Podsėdkowski, M., Konopiński, R., Obidowski, D., & Koter, K. (2020). Variable pitch propeller for UAV-experimental tests. *Energies*, *13*(20). <https://doi.org/10.3390/en13205264>
- Ramkumar, G., & Ambigai, R. (2016). *Design and Kinematic Analysis of Tethered Guiding Vehicle (TGV) for façade window cleaning.*
- Serway, R. A., Jewett, J. W., & Víctor Campos Olguín Traductor profesional Revisión Técnica Misael Flores Rosas, T. (2008). *Física para ciencias e ingeniería: Vol. I.*
- Shigley, J., Mischke, C., & Bocanegra, F. (2021). *Diseño en ingeniería mecánica* (mcgraw hill, Ed.; 10th ed.).
- Sinnapatchai, D., Mu'izz Zaini, E., Salleh, S., & Som, M. M. (2022). Cleaning Robot with Android Application Controller. *Multidisciplinary Applied Research and Innovation*, *3*(2), 354–361. <https://doi.org/10.30880/mari.2022.03.02.041>
- Vega, M., Ilyas, M., Ghanta, S., Vengadesh, A., Aisyah, S., & Elara, M. R. (2020). Multi-sensor orientation tracking for a façade-cleaning robot. *Sensors (Switzerland)*, *20*(5). <https://doi.org/10.3390/s20051483>
- Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Starodubcev, N. (2022, July 8). DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR ESP32-CAM OPERATION IN HTTP SERVER MODE FOR STREAMING VIDEO. *DÉBATS SCIENTIFIQUES ET ORIENTATIONS PROSPECTIVES DU DÉVELOPPEMENT SCIENTIFIQUE*. <https://doi.org/10.36074/logos-08.07.2022.049>
- Yoo, S., Joo, I., Hong, J., Kim, J., Kim, H. S., & Seo, T. W. (2020). Mechanical and Empirical Parameter Design on a Multi-wound Differential Pulley Winch for a Wall-Climbing Robot. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, *21*(5), 857–867. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00281-z>

- Yoon, D., Ryu, S., Hong, J., Lee, Y., & Seo, T. W. (2021). Empirical Optimization and Evaluation for Multi-Nozzle Cleaning Device. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 22(7), 1229–1236. <https://doi.org/10.1007/s12541-021-00514-0>
- Young, H., & Freedman, R. (2013). Física universitaria. In R. Fuerte (Ed.), *Física Universitaria* (12th ed., Vol. 1, pp. 419–455).
- Young Ho, C., & Kwang Mok, J. (2011). WINDORO : The World's First Commercialized Window Cleaning Robot for Domestic Use. *The 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI 2011)*.
- Zhang, Z., Zhuge, X., Li, X., Evans, R., & Liu, A. (2022). An Object-Oriented Approach to the Modular Design of Mechatronic Systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 1–17. <https://doi.org/10.1109/TEM.2022.3191438>

**Anexos**



**Anexo A.** Planos del dispositivo de limpieza

4

3

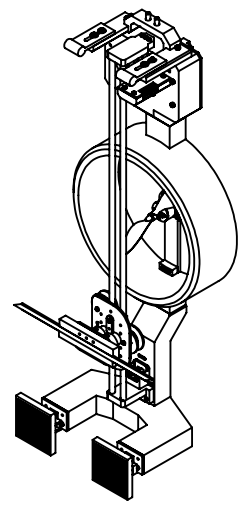
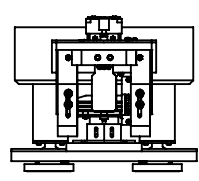
2

1

F

F

Vista Superior



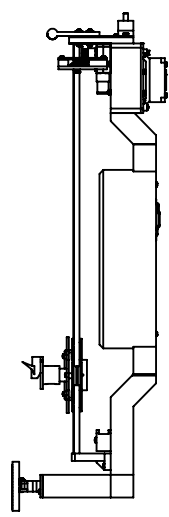
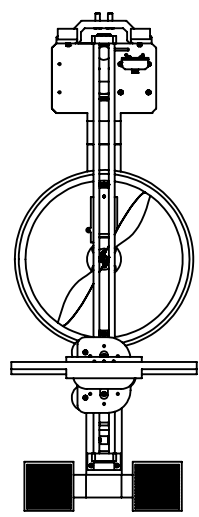
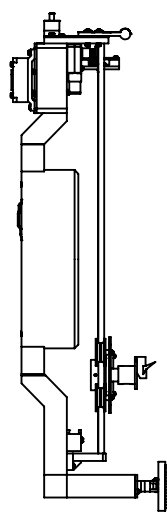
E

E

Vista Izquierda

Vista Frontal

Vista Derecha



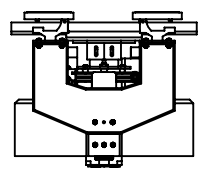
D

D

C

C

Vista Inferior



B

B

A

A



PROYECTO: Prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios

RESPONSABLE: Juan David Guerrero Marcillo

TÍTULO: Vistas del dispositivo

MATERIAL:

N.º DE DIBUJO  
1

A4

ESCALA:1:10

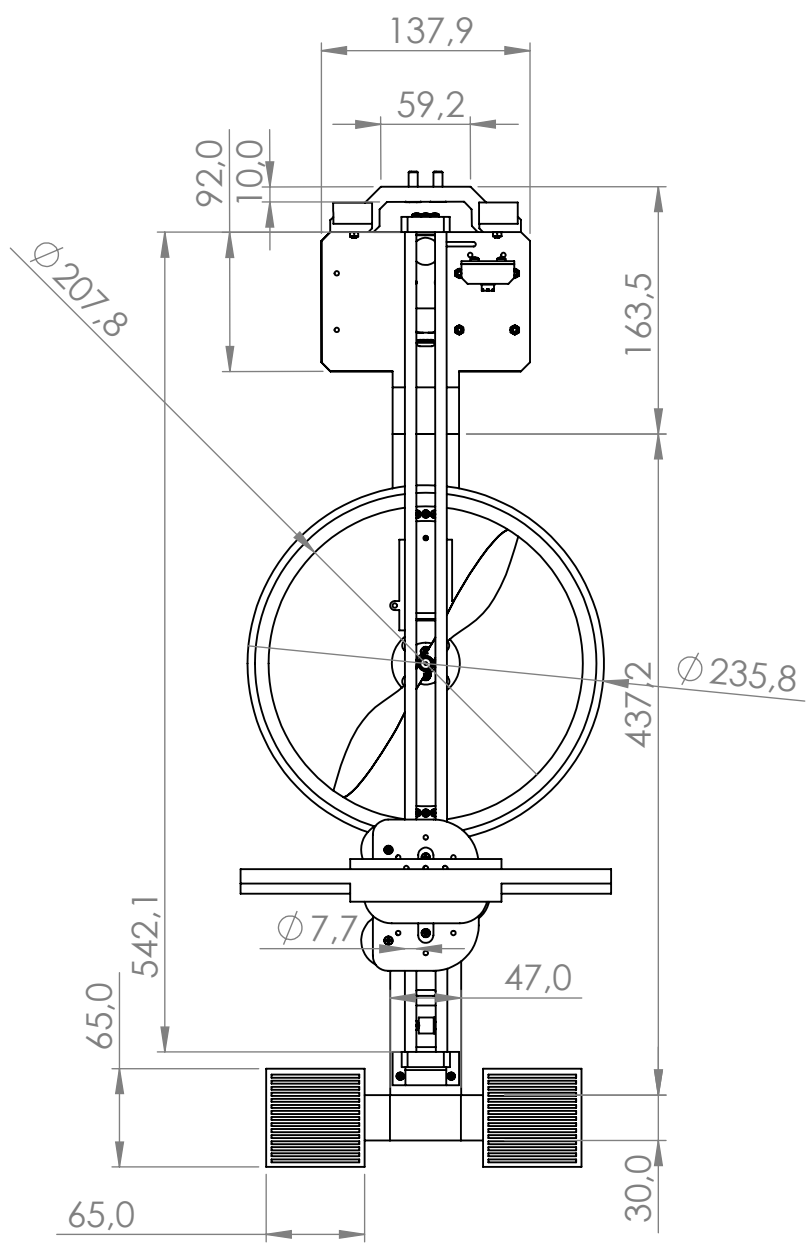
HOJA 1 DE 9

4

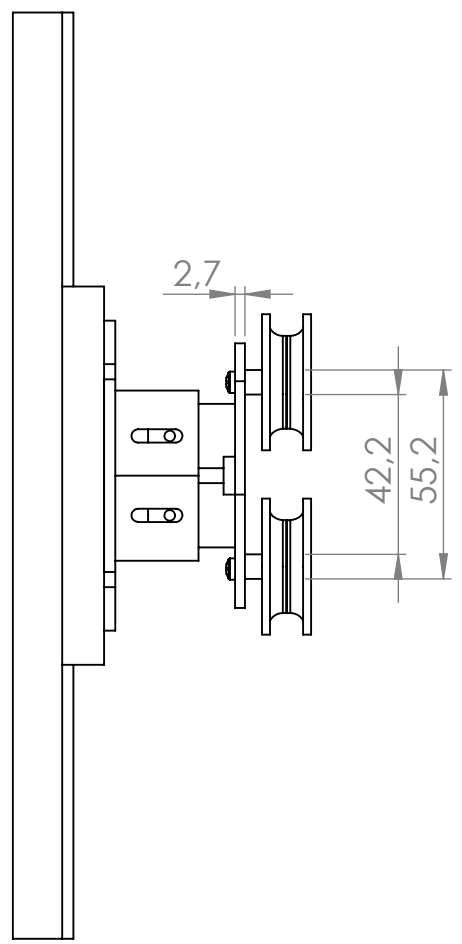
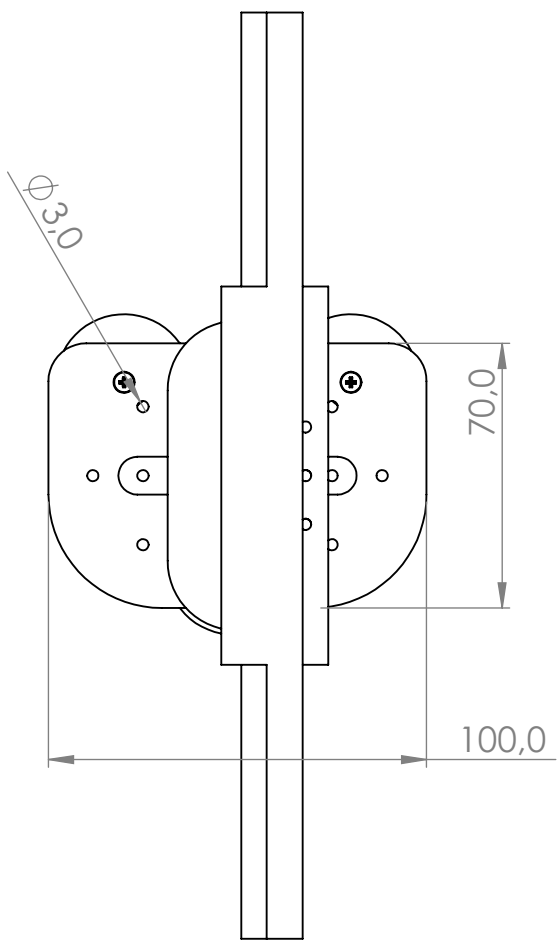
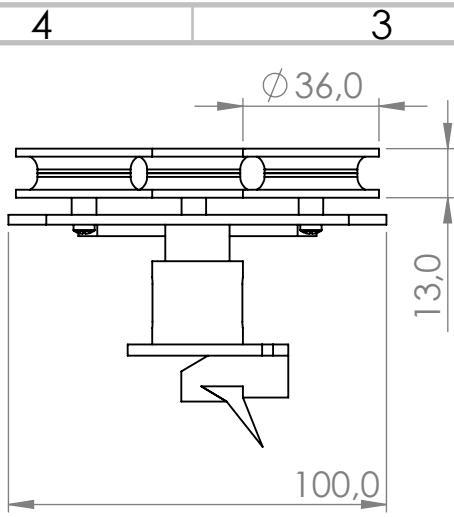
3


2

1

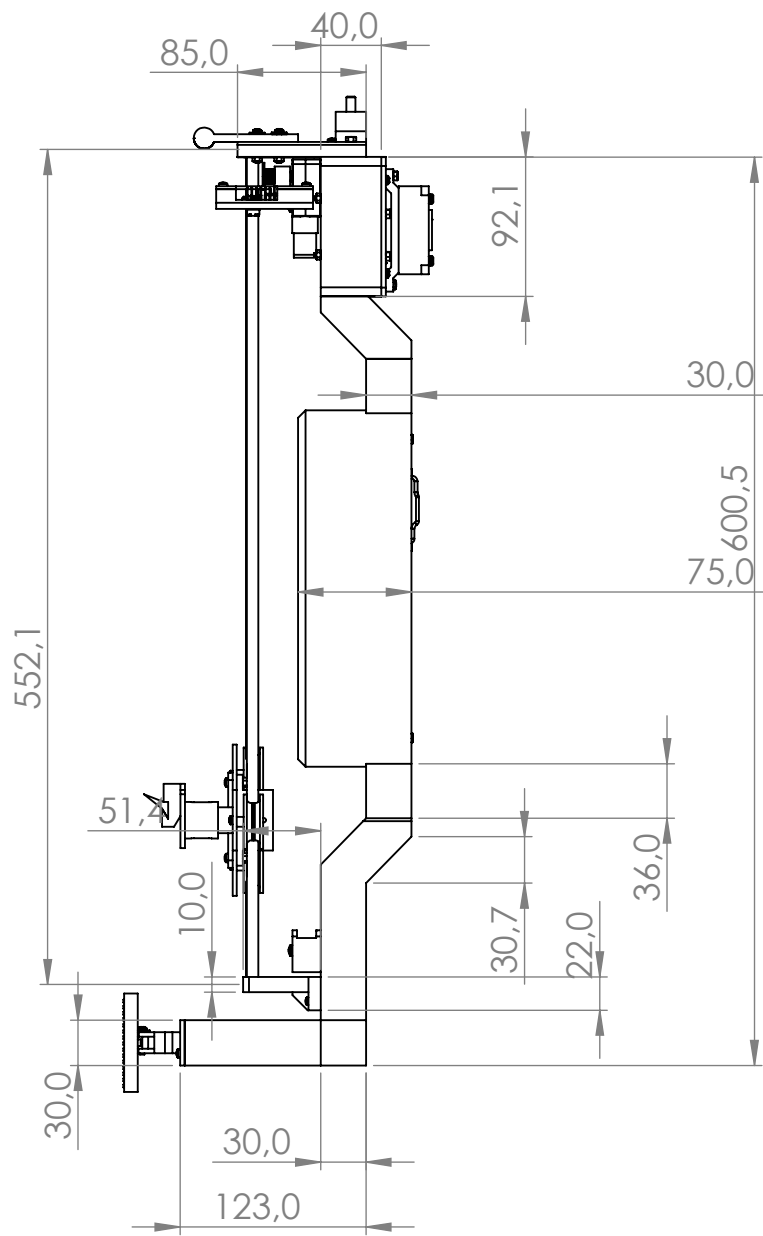


PROYECTO:		Prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios	
RESPONSABLE:		Juan David Guerrero Marcillo	
TÍTULO:		Cotas generales del actuador	
MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	A4	
		2	
ESCALA: 1:5		HOJA 2 DE 9	

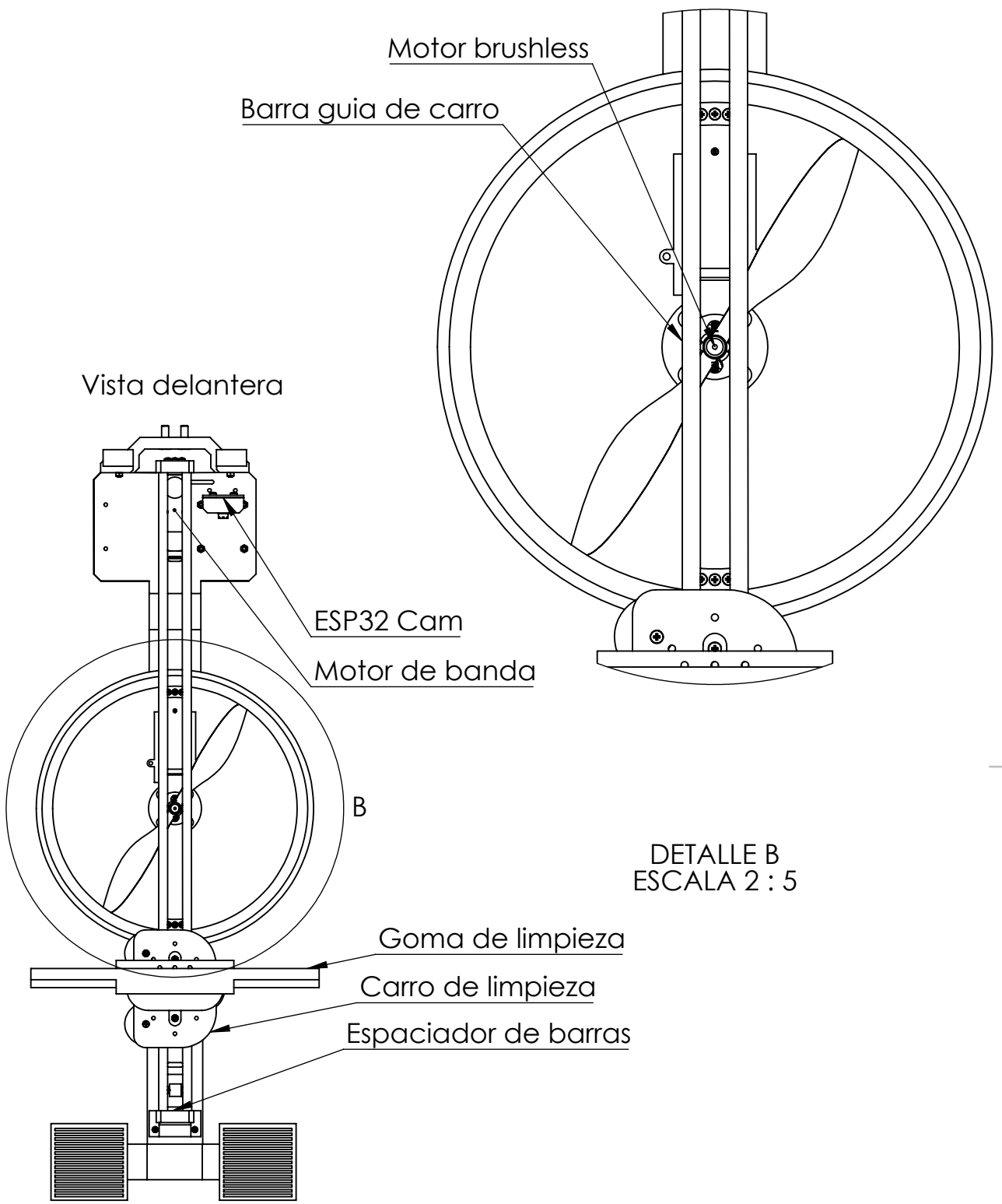



	PROYECTO: Prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios	
	RESPONSABLE: Juan David Guerrero Marcillo	
	TÍTULO: Cotas del modulo de limpieza	
	MATERIAL: Acrílico	N.º DE DIBUJO: 3
	ESCALA: 1:2	HOJA 3 DE 9

Grid labels: 4, 3, 2, 1 (horizontal); F, E, D, C, B, A (vertical)



PROYECTO:		Prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios	
RESPONSABLE:		Juan David Guerrero Marcillo	
TÍTULO:		Vista lateral del dispositivo	
MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	A4	
		4	
ESCALA: 1:5		HOJA 4 DE 9	



	PROYECTO: Prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios	
	RESPONSABLE: Juan David Guerrero Marcillo	
	TÍTULO: Partes en la vista delantera	
	MATERIAL:	N.º DE DIBUJO
	ESCALA:1:5	HOJA 5 DE 9

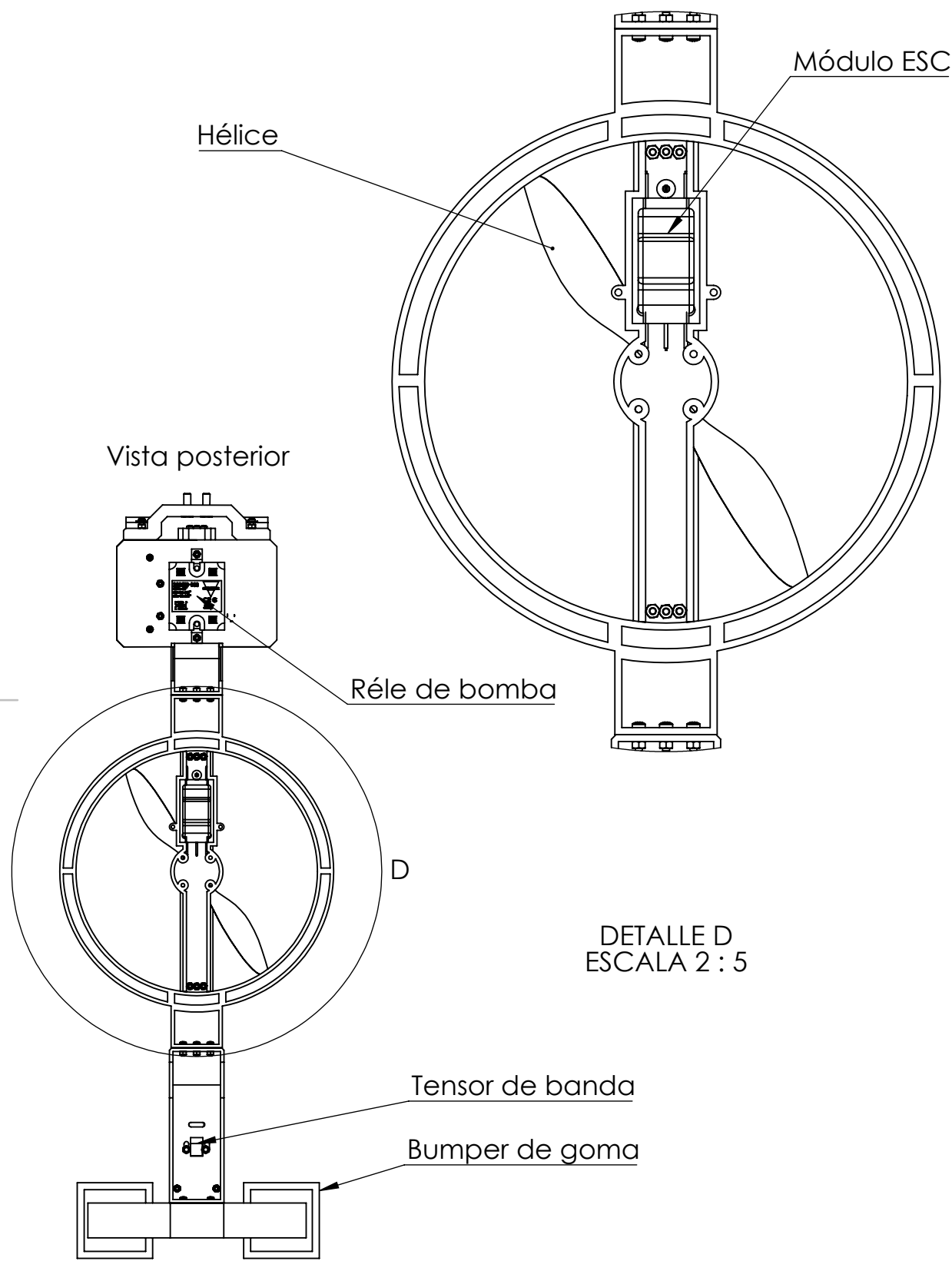
A4

5

4 3 2 1

F  
E  
D  
C  
B  
A

F  
E  
D  
C  
B  
A



Hélice

Módulo ESC

Vista posterior

Réle de bomba

DETALLE D  
ESCALA 2 : 5

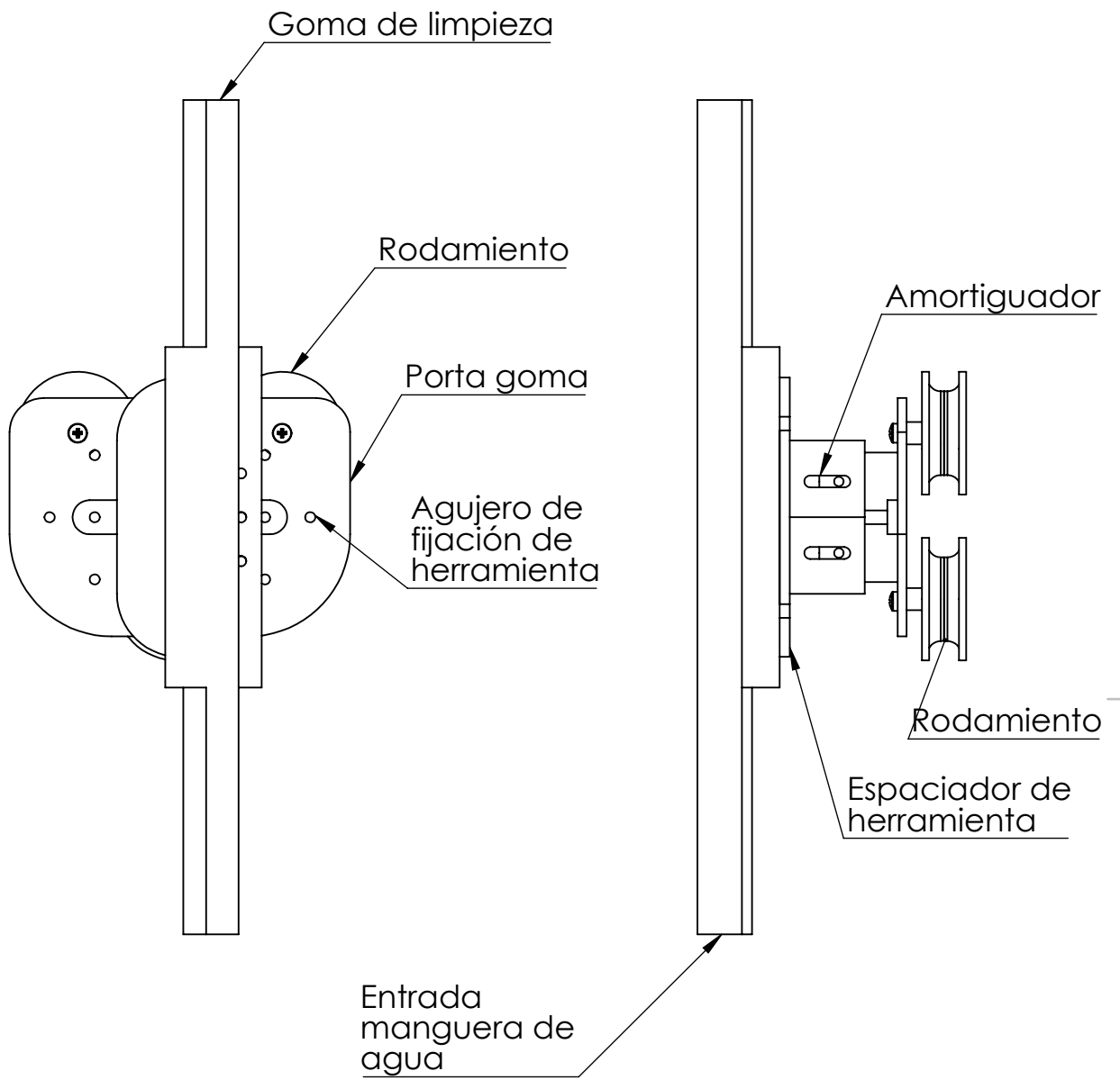
Tensor de banda

Bumper de goma



PROYECTO:		Prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios	
RESPONSABLE:		Juan David Guerrero Marcillo	
TÍTULO:		Componentes en la parte posterior	
MATERIAL:		N.º DE DIBUJO	A4
ESCALA:1:5		6	
		HOJA 6 DE 9	

4 3 2 1



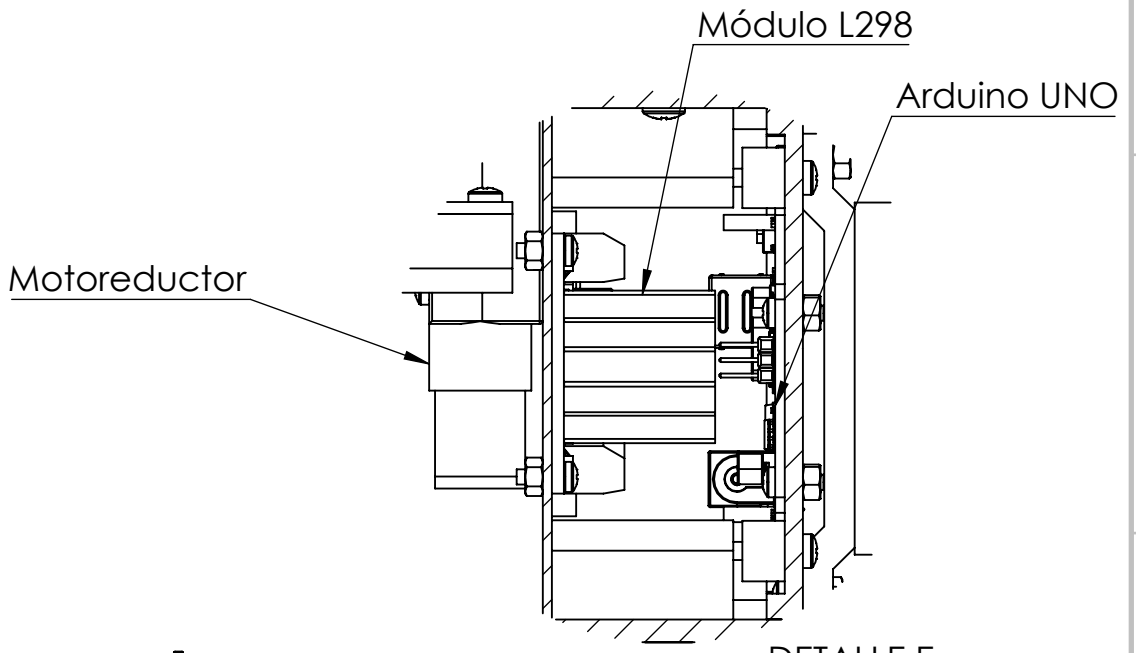
PROYECTO:		Prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios	
RESPONSABLE:		Juan David Guerrero Marcillo	
TÍTULO:		Componentes del módulo de limpieza	
MATERIAL:		N.º DE DIBUJO	A4
ESCALA:1:2		7	
		HOJA 7 DE 9	



4 3 2 1

F

F

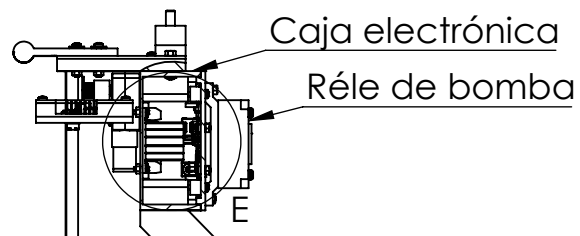


E

E

D

D

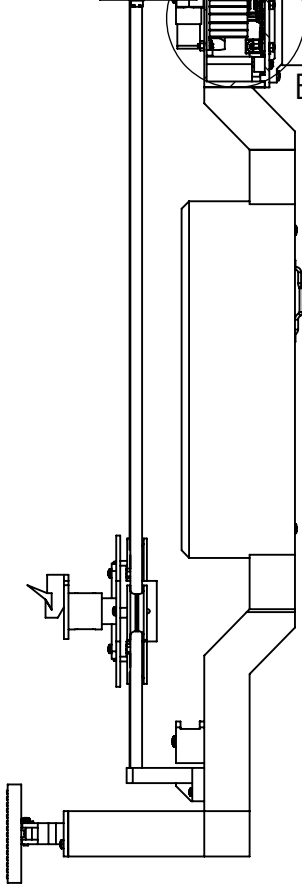


C

C

B

B



A

A



PROYECTO:		Prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios	
RESPONSABLE:		Juan David Guerrero Marcillo	
TÍTULO:		Componentes internos	
MATERIAL:		N.º DE DIBUJO	A4
ESCALA:1:5		8	
		HOJA 8 DE 9	

4 3 2 1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

C

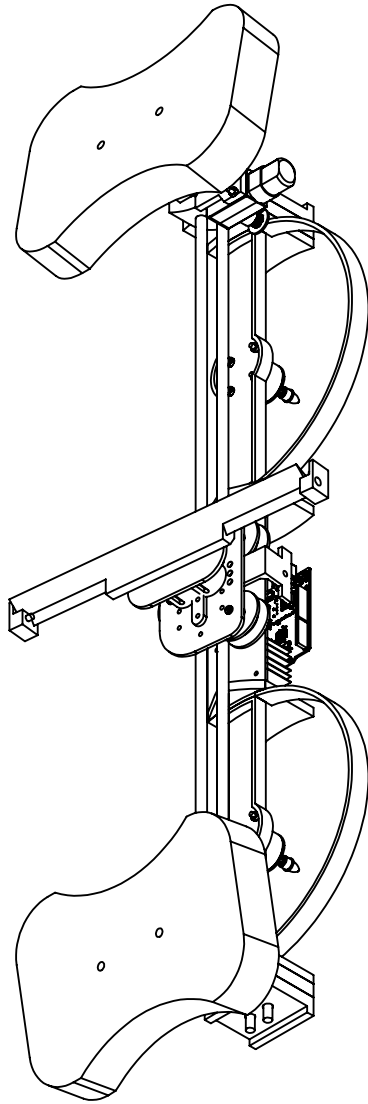
B

B

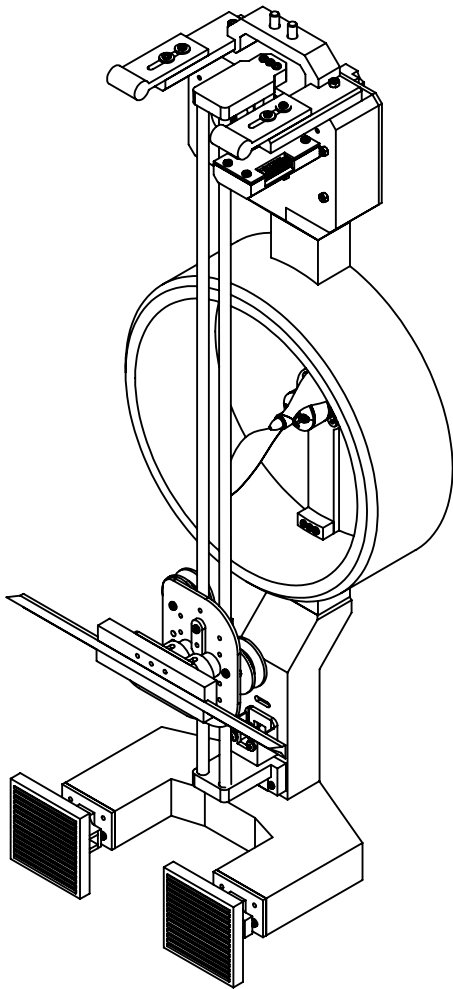
A

A

Prototipo uno



Prototipo dos



	PROYECTO: Prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios		
	RESPONSABLE: Juan David Guerrero Marcillo		
	TÍTULO: Prototipo uno y prototipo dos		
	MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	A4
	ESCALA:1:5	HOJA 9 DE 9	9

4

3

2

1

**Anexo B.** Artículo IEEE construcción del primer prototipo de máquina limpiadora de ventanas.

# Construcción de un prototipo de máquina limpiadora de ventanas

J. D. Guerrero Marcillo

Asesor: Ing. Mg Anghelo Marino Lopez Rubio

Programa de Ingeniería Mecatrónica

Universidad Mariana

San Juan de Pasto Pasto, Colombia

**Abstract**—The window cleaning machine prototype is designed for tall buildings in San Juan de Pasto, Colombia, addressing the issue of accumulated dirt on windows due to urban development. Intended as a solution for building maintenance, the device offers a safe alternative for both residents and cleaning workers in response to the growing population and increased construction projects in the area.

**Index Terms**—Window cleaning machine prototype, Tall buildings, Accumulated dirt on windows, Building maintenance solution, Safe alternative for residents and cleaning workers

## I. INTRODUCCIÓN

El proyecto, titulado "Construcción de un prototipo de máquina limpiadora de ventanas" implica la creación de un prototipo diseñado para su instalación en la parte superior de un edificio y su posterior descenso, funcionando como un péndulo. El objetivo principal de este prototipo es llevar a cabo la limpieza de las ventanas exteriores de los edificios utilizando un sistema motorizado y un mecanismo que opera a baja presión para aplicar agua. Este enfoque busca proporcionar una alternativa más segura para la realización de trabajos a gran altura en la región, considerando el crecimiento de los edificios de apartamentos y la creciente problemática de acumulación de suciedad en las ventanas. En San Juan de Pasto, los cambios en su infraestructura urbana han sido notorios; las constructoras han volcado su mirada a las antiguas casas familiares para convertirlas en condominios de apartamentos lo cual ha generado un cambio en la forma de vivir en la ciudad de Pasto hasta nuestros días [1]. Este escenario plantea un desafío significativo para la población de Nariño, dado que la tendencia hacia la construcción de edificios de gran altura no muestra signos de detenerse[1]. La altura de estas estructuras dificulta el mantenimiento adecuado, tanto en el ámbito de la construcción como en los servicios de limpieza. Como resultado, se observa una falta de mantenimiento evidenciada por la presencia de contaminantes, residuos biológicos de aves, acumulación de basura, proliferación

de plantas parásitas y suciedad, todos los cuales contribuyen al deterioro de las estructuras[2]. Además, las empresas que brindan servicios de mantenimiento se enfrentan a limitaciones, ya que su personal debe completar cursos de trabajo en alturas, contar con las herramientas necesarias, andamios y dispositivos de sujeción. Todo esto, sumado al factor humano en actividades de riesgo como el trabajo en alturas, crea un entorno desafiante para garantizar un mantenimiento adecuado. A nivel mundial, la conceptualización de estos prototipos ha sido una práctica destacada. Un ejemplo de esto se encuentra en los diseños desarrollados por la empresa estadounidense SkyPro, que cuenta con aproximadamente 4 unidades funcionales o del dispositivo llamado Windoro[3]. Estas unidades están equipadas con diversos dispositivos diseñados específicamente para la limpieza de ventanas. Asimismo, IPC Eagle es otra empresa que, de manera similar, brinda a sus clientes una amplia gama de productos con un enfoque centrado en la limpieza a través de maquinaria especializada[4].

## II. METODOLOGÍA

La investigación adopta un enfoque exploratorio. A través del desarrollo del prototipo de una máquina limpiadora de ventanas para edificios, se exploran conceptos fundamentales como la estática, los materiales de ingeniería, y el diseño de máquinas[5], además de abordar aspectos relacionados con las ciencias de la computación, tales como el desarrollo e implementación de software. Este software debe ser capaz de coordinar eficazmente las funciones del dispositivo para cumplir con su propósito principal: la limpieza de ventanas en edificios. La fase cuantitativa del proyecto se enfoca en el análisis mecánico de las piezas que componen el prototipo. Estas piezas deben ser estructuralmente seguras y cumplir eficientemente con la función para la cual fueron diseñadas. Todo esto se busca lograr con el menor costo posible, buscando una óptima relación entre eficacia y eficiencia. La línea de investigación se centra en el diseño y desarrollo mecatrónico, específicamente

en el ámbito de la automatización y control. Esto se debe a que el prototipo de la máquina limpiadora de ventanas para edificios abarca el proceso de diseño desde su fase preliminar, conocida como "prototipo", utilizando software especializado. El objetivo es realizar un esbozo inicial de manera virtual y efectuar las correcciones necesarias en el diseño. Una vez superada la fase de "prototipo", se llevará a cabo un estudio teórico que incluirá la evaluación de diversos materiales para la construcción de la máquina, el análisis de los esfuerzos mecánicos, la garantía de un factor de seguridad adecuado para su operación, y el desarrollo de la electrónica del dispositivo. Esto permitirá que la máquina pueda llevar a cabo la tarea para la cual fue creada. Además, se desarrollará un software que posibilitará la conexión entre la máquina y el operario, facilitando así el control remoto del dispositivo.[6]. El proyecto se llevará a cabo en tres fases, detalladas a continuación y esquematizadas en la Figura 1 que se presenta a continuación.

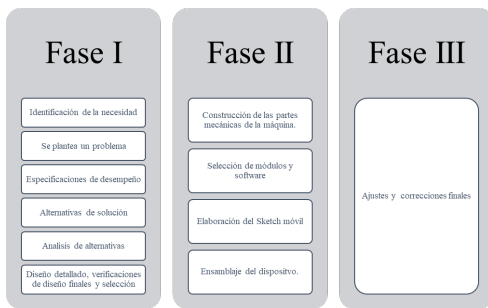


Fig. 1. Fases de desarrollo del proyecto.

#### A. Fase I.

Para cumplir con los objetivos de la Fase I establecidos, se propone el siguiente plan: diseñar un sistema para la limpieza de ventanas exteriores con capacidad de movimiento vertical. Durante la Fase I, se llevarán a cabo las siguientes actividades:

- **Especificaciones de desempeño:** Basándonos en las investigaciones realizadas, se establecerán dimensiones preliminares, capacidades de carga y esfuerzos en las piezas del prototipo. Esto se hará teniendo en cuenta tanto el estado del arte como las necesidades específicas de los edificios construidos en San Juan de Pasto.
- **Alternativas de solución:** Utilizando herramientas de diseño computarizado, se propondrán varias alternativas, mejorando o descartando ciertas piezas o mecanismos. Este proceso presentará el desafío de seleccionar las alternativas más eficientes y eficaces.
- **Análisis de alternativas:** Con las diversas alternativas de solución estudiadas, se llevará a cabo un

análisis cualitativo y cuantitativo, con el objetivo final de desarrollar el plano definitivo.

- **Diseño detallado, verificaciones finales y selección del diseño:** La conclusión de los estudios en la Fase 1 permitirá la creación de un plano detallado. En este punto, se habrán definido las especificaciones del dispositivo y su rendimiento. Después de evaluar las diferentes alternativas, se realizará la selección del diseño final, el cual se construirá físicamente.

#### B. Fase II.

La Fase II, tiene como objetivo materializar el prototipo conforme al diseño preliminar, incorporando las especificaciones técnicas necesarias para la limpieza de ventanas.

- **Construcción de las partes mecánicas de la máquina:** A través de procedimientos de taller y utilizando la tecnología de impresión 3D, se llevará a cabo la fabricación de las piezas necesarias, permitiendo así abordar el problema de manera física.
- **Selección de módulos y software:** Se emplearán módulos y software que posibiliten el control del dispositivo y su conexión remota. El Sketch principal se desarrollará mediante la programación dirigida hacia el módulo ESP82-CAM, encargado de la conexión entre la cámara y el software. Posteriormente, se procederá a la elaboración de la CCA (Circuito de Control y Adquisición) que gestionará los procesos relacionados con el movimiento de los motores de la válvula.
- **Elaboración del Sketch:** Se creará un Sketch en Arduino con el objetivo de conectar un dispositivo ESP32CAM a la máquina. Esto facilitará el transporte hacia el punto objetivo y evitará la necesidad de añadir dispositivos adicionales que pudieran resultar incómodos para el operador.

Esta fase tiene como propósito fundamental la materialización del diseño conceptual, integrando componentes mecánicos y electrónicos, así como desarrollando el software necesario para la operación del prototipo.

#### C. Fase III.

El dispositivo finalizado será sometido a pruebas exhaustivas en laboratorio para evaluar la estabilidad de la conexión remota y la efectividad del anclaje, simulando condiciones similares a las de un edificio.

- **Ajustes y correcciones finales:** Dada la naturaleza del proceso, es probable que surjan desajustes que deberán ser abordados para prevenir mantenimientos correctivos prematuros. Además, cualquier imprevisto en el diseño o funcionamiento deberá ser

corregido para garantizar la funcionalidad óptima del dispositivo.

Estas pruebas y ajustes finales son esenciales para validar el rendimiento del dispositivo en condiciones prácticas y asegurar que cualquier inconveniente sea resuelto antes de su implementación en un entorno real.

### III. RESULTADOS

Aunque las máquinas limpiadoras de ventanas no son comúnmente catalogadas como dispositivos académicos, ya que en su mayoría son propiedad de empresas con fines lucrativos, existen en todo el mundo diversas soluciones que se ajustan a las circunstancias específicas del entorno urbano para el cual fueron diseñadas. El planteamiento de Qingsong Xu y Zhenjing Li [7], en su revisión destaca diversas propuestas de solución para las máquinas de limpieza en alturas elevadas. En la Figura 2, se presenta un bosquejo que ilustra los componentes esenciales necesarios para el desarrollo de este tipo de dispositivos. Los cuatro mecanismos expuestos en



Fig. 2. Mecanismos propuestos para desarrollar el prototipo por módulos.

la figura 2 que se observó anteriormente, básicamente hacen referencia a los componentes fundamentales para el diseño de máquinas limpiadoras de ventanas en alturas elevadas, a saber:

- 1) Mecanismo de locomoción: Es el mecanismo que permite ascender y descender por la pared del edificio, lo puede hacer por cables, rieles u otro mecanismo[8].
- 2) Mecanismo de Adhesión: Es el mecanismo que permite adherirse a la pared del edificio, los más conocidos son los medios magnéticos mediante imanes o por ventosas, también existen otros mecanismos como las hélices[9].
- 3) Mecanismo de Limpieza: Es el mecanismo que realiza la limpieza a la ventana.[10]
- 4) Electrónica: Se refiere a microcontroladores y los sensores necesarios para el funcionamiento de la máquina.

#### A. Resultados de la Fase I.

La fase I del desarrollo comenzó con la exploración de diversos dispositivos disponibles en el mercado. Existen distintos tipos y tamaños, cada uno diseñado para abordar problemas específicos identificados por sus fabricantes. En este contexto, se consideraron diversas alternativas de solución. Se analizaron estas alternativas y se procedió a diseñar un prototipo para su evaluación

y mejora. Es importante destacar que este prototipo no constituye un diseño definitivo. El desarrollo del dispositivo definitivo se abordará posteriormente, ya que el prototipo es una etapa intermedia sujeta a evaluación y mejora.

- **Alternativa de desarrollo I:** El proceso de desarrollo condujo a la creación del prototipo mostrado en la figura 3, el cual presenta características que pueden resultar ideales para la función de limpiar ventanas. En la tabla I adjunta se detallan las ventajas y desventajas del dispositivo, las cuales fueron evaluadas cuidadosamente.
- **Alternativa de desarrollo II:** Se presenta un esbozo de lo que sería un diseño mejorado en comparación con la máquina propuesta anteriormente. La Figura 4 exhibe el dispositivo, mientras que en la Tabla II se identifican algunos aspectos cruciales que deben tenerse en cuenta antes de considerar la posibilidad de implementación.
- **Alternativa de desarrollo III:** El modelo mostrado en la figura 5 presenta diversas ventajas y desventajas, detalladas en la Tabla III, las cuales son de gran importancia al considerar esta opción.

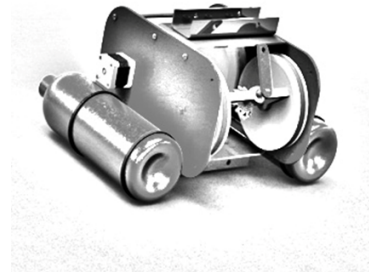


Fig. 3. Esbozo de la alternativa de desarrollo I.

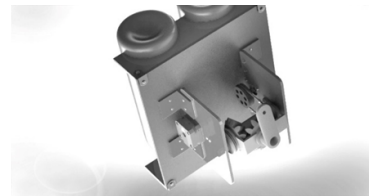


Fig. 4. Esbozo de la alternativa de desarrollo II.

#### B. Resultados de la Fase II.

La máquina y las alternativas de desarrollo tienen como punto de partida los cuatro módulos esenciales visto anteriormente.

Este proceso revela pautas y directrices fundamentales que conducen a la generación del producto final.

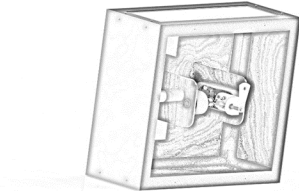


Fig. 5. Esbozo de la alternativa de desarrollo III.

TABLE I  
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL DISPOSITIVO I

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Robustez: La capacidad de resistir condiciones adversas.</li> <li>- Gran capacidad de carga: Puede soportar cargas pesadas sin deformarse.</li> <li>- Rango de acción amplio del rociador: Cubre un área extensa durante la pulverización.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Construcción costosa.</li> <li>- Poleas sobredimensionadas.</li> <li>- Morfología no adecuada para estructuras verticales.</li> <li>- Alta probabilidad de romper vidrios por un posible golpe de ariete.</li> </ul>

TABLE II  
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL DISPOSITIVO II

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rango de acción amplio del rociador.</li> <li>- Fácil de transportar.</li> <li>- Liviano y de fácil de construir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja capacidad de carga espacios vacíos.</li> <li>- Alta posibilidad de atascos y golpes de ariete.</li> <li>- Difícil anclaje</li> </ul>

TABLE III  
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL DISPOSITIVO III

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rango de acción amplio del rociador.</li> <li>- Fácil de transportar.</li> <li>- Morfología uniforme sin sobresaltos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja capacidad de carga.</li> <li>- Pesado.</li> <li>- Probabilidad de acumulación de líquido en la parte inferior.</li> </ul>

La síntesis precisa de estos módulos en un espacio compacto cobra gran relevancia, evitando así imponer una carga excesiva sobre el dispositivo en cuestión. Como resultado de este enfoque, el diseño arquitectónico definitivo del modelo adoptado se configura de la siguiente manera el cual se muestra en la Figura 6:

Por lo tanto, el diseño final elegido presenta ventajas significativas, tales como su peso ligero, fácil

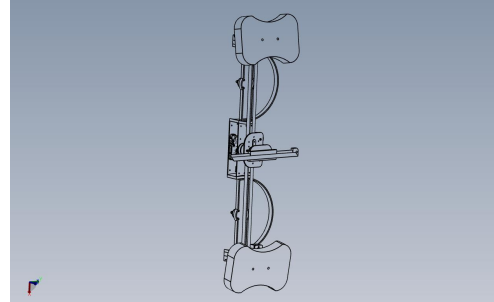


Fig. 6. Esbozo del desarrollo definitivo.

TABLE IV  
ESPECIFICACIONES DE LA GUAYA Y FACTOR DE SEGURIDAD ESTIMADO

Propiedad	Valor
Proveedor de la guaya	Guayas B & C Bogotá DC
Referencia	Super GX
Diámetro	1.6 mm
Resistencia a la ruptura	226 kg
Carga máxima estimada del prototipo	50 N
Área	1.6 mm <sup>2</sup>
Esfuerzo	31.08 MPa
Sy	250 MPa
Factor de seguridad estimado	8

construcción y una estructura que incorpora dispositivos para la adhesión, locomoción y el porte de un actuador. Una ventaja clave de este diseño es la modularidad e intercambiabilidad del actuador, brindando así versatilidad al dispositivo y permitiéndole adaptarse a diversas actividades a continuación se describen la síntesis de los mecanismos modulares.

- 1) Mecanismo de locomoción: ha sido diseñado para facilitar tanto el ascenso como el descenso del dispositivo. Para lograr esto, se seleccionó una guaya que permite suspender el dispositivo en el aire, proporcionando un factor de seguridad superior a 1. Esta elección asegura la integridad del dispositivo y la seguridad de las personas en la planta baja, reduciendo así el riesgo de caída del dispositivo, en la Tabla V se evidencia el cálculo del factor de seguridad de la guaya. Estos cálculos proporcionan un margen adecuado para la implementación de un sistema que permita tanto el ascenso como el descenso de la máquina. La forma en que la máquina lleva a cabo estas operaciones es mediante un carretón motorizado, como se evidencia en la Figura 7. Con esta implementación, se concluye exitosamente el mecanismo de locomoción de la máquina, con lo cual se concluye este mecanismo.



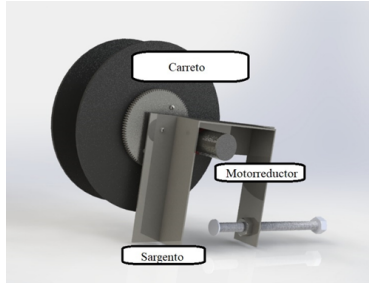


Fig. 7. Representación del mecanismo de locomoción.

2) Mecanismo de Adhesión: El mecanismo encargado de permitir la adherencia a la pared del edificio se logra mediante el uso de propelas. Estas propelas fueron seleccionadas con base en su capacidad para generar empuje. Inicialmente, se evaluaron dos tipos de propelas, la EP8040 y 1045CCW a través de pruebas de empuje en laboratorio. Durante este proceso, se identificó una propela que demostró ser suficiente para el dispositivo. Es importante destacar que la función de estas propelas difiere de la de los drones convencionales, ya que el propósito aquí no es volar, sino adherirse a una pared. En la Tabla V se presentan los resultados de las pruebas realizadas a los dos tipos de propelas, y en la Imagen 9 se muestra el experimento. Este consistió en medir la fuerza ejercida por la propela en una gramera.

TABLE V  
EXPERIMENTO DE AMBAS PROPELAS RELACIONANDO CORRIENTE Y EMPUJE

Corriente (A)	Empuje (g) 1045CCW	Empuje (g) EP8040
0.2	5	7
0.3	11	14
0.4	20	18
0.5	24	28
0.6	29	35
0.7	32	40
0.8	39	43
0.9	44	50
1.0	45	63
1.5	65	80
2.0	78	110
2.5	85	128
3.0	101	144
3.5	116	166
4.0	130	186

en donde se evidencia el armado de la estructura valiendose de impresión 3D la cual da la facilidad de moldear piezas a medida, este dispositivo por tanto, permite la adhesión de la máquina, dando con esto finalizado la realización del mecanismo de adhesión.

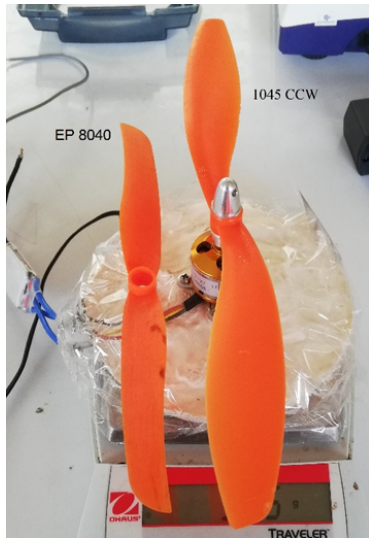


Fig. 8. Fotografía del experimento con las propelas.



Fig. 9. Fotografía del armado de la estructura de la propela.

Los experimentos proporcionaron resultados significativos para la propela EP8040, lo que llevó a la construcción de la estructura que soporta estas propelas, como se puede observar en la Figura 9

3) Mecanismo de Limpieza: Este mecanismo fue diseñado para ser desmontable. Aunque el prototipo presenta un limpiacristales de goma conectado a la plataforma, esta última se desplaza desde la parte superior hasta la inferior para llevar a cabo la limpieza de las ventanas mediante un sistema de correas. El suministro de agua se realiza a través de una bomba de baja presión que permite verter una cantidad moderada de agua sin desperdicio. En la Figura 10 se muestra tanto el render como la construcción real de la plataforma que sostiene el limpiacristales de goma y la manguera que suministra agua.

Por lo tanto, una vez completado el sistema de limpieza, se vuelve crucial el montaje en el basti-



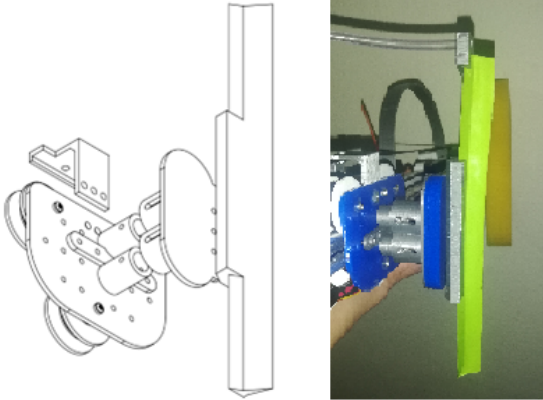


Fig. 10. Figura que muestra el render y el armado real de la plataforma de limpieza.

dor. Este bastidor no solo sirve como el soporte para el mecanismo de limpieza, permitiendo su movimiento, sino que también cumple la función de alojar la electrónica y todos los accesorios de la máquina. El bastidor está compuesto por una serie de vigas que muestran los esfuerzos calculados, como se ilustra en la Figura 11. Además, se presenta la disposición del bastidor en un render en la Figura 12, estos cálculos indican que el dispositivo no se flexionara de una manera que ponga en riesgo la integridad de la máquina. Para concluir, en la Figura 13 se presenta el montaje completo de la estructura con todos sus accesorios correspondientes. Este paso marca el final de la sección dedicada al mecanismo de limpieza, que es una parte esencial del dispositivo.

- 4) Sensores: Los sensores empleados en el dispositivo se basan en el sensor óptico integrado en el ESP32-Cam de manera nativa. Esta elección estratégica simplifica significativamente el control remoto del prototipo, ya que permite la conexión a través de Wifi. El ESP32-Cam, equipado con una antena, proporciona un alcance considerable, lo que se traduce en una amplia maniobrabilidad del dispositivo.

Para facilitar el control remoto y la interacción con el usuario, se desarrolló inicialmente un sketch que implementa nativamente una página web, permitiendo un acceso intuitivo y efectivo al control del dispositivo. Esta página web se visualiza de manera ejemplar en la Figura 14, proporcionando una interfaz amigable y funcional.

Además, con el objetivo de detallar y comprender mejor las funcionalidades del dispositivo, se ha creado un diagrama de pseudocódigo. Este diagrama, presentado de manera gráfica en la Figura 15, destaca las diversas operaciones y

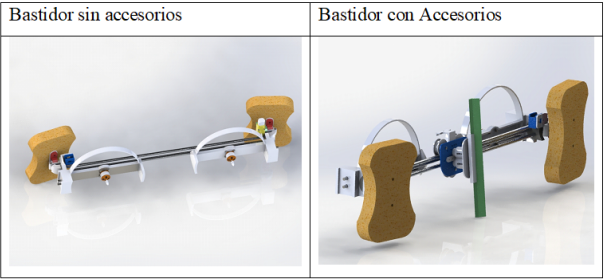


Fig. 11. Render del bastidor visto sin y con accesorios respectivamente

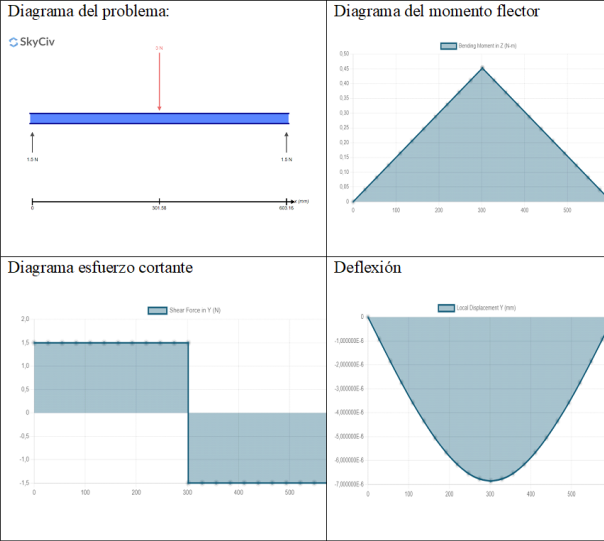


Fig. 12. Figura que muestra el calculo de los esfuerzos con sus gráficas.

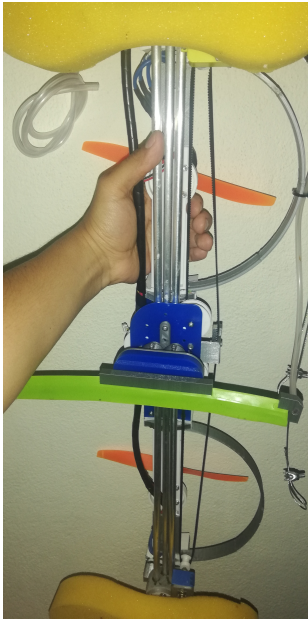


Fig. 13. Figura que muestra el calculo de los esfuerzos con sus gráficas.

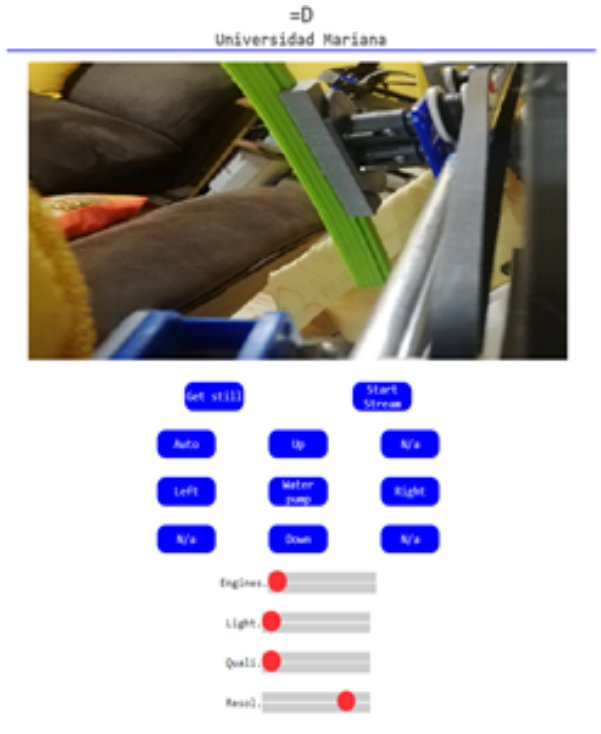


Fig. 14. Control remoto del dispositivo mediante pagina Web

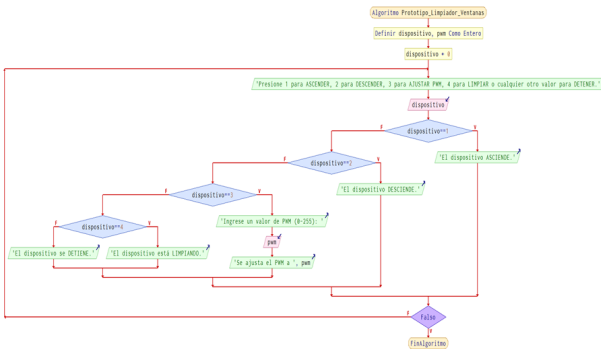


Fig. 15. Pseudocódigo del programa principal.

capacidades del dispositivo, proporcionando una visión clara y concisa de su comportamiento operativo. De esta manera se da por concluida la implementación de dispositivos los cuales permiten gobernar el prototipo y se procede a verificar los posibles ajustes que sean necesarios.

C. Resultados de la Fase III.

Durante esta fase del proyecto, se enfrentaron y resolvieron los desafíos surgidos durante la construcción del dispositivo. Se realizaron ajustes y se reemplazaron ciertas piezas problemáticas que afectaban el cor-



Fig. 16. Enrutado de cableado por medio de espiras plásticas

recto funcionamiento del prototipo. Estas modificaciones fueron cruciales para asegurar la eficacia y operatividad del dispositivo. Identificar y abordar estos problemas a tiempo fue esencial.

Uno de los problemas más destacables fue el enrutado del cableado. Al estar separados, los cables eran propensos a atascos en la máquina, afectando su rendimiento. Para solucionar este problema, se implementaron espirales plásticas que no solo resolvieron la cuestión de los atascos, sino que también organizaron los cables de manera adecuada tal como se observa en la Figura 16, mejorando la integridad del sistema. Asimismo, se identificó y corrigió un inconveniente relacionado con el Puller motriz de la banda. Las paredes del antiguo puller permitían el deslizamiento de la banda, resultando en descarrilamientos frecuentes. Para resolver esta problemática, se optó por incorporar un tope que asegurara que la correa se mantuviera en su posición original, eliminando así el riesgo de descarrilamientos que podrían dejar inoperativo el sistema de limpieza.

La solución más efectiva fue la construcción de un nuevo puller con un tope final grande, cuyas características se detallan en la Figura 17. Este rediseño abordó de manera exitosa el problema identificado, preservando la operatividad de la máquina y eliminando la amenaza de descarrilamientos que podría afectar su funcionamiento.

Además, durante el desarrollo del proyecto, surgieron algunos problemas menores que, aunque representaron desafíos, se abordaron y solucionaron de manera efectiva en su momento. A pesar de las dificultades temporales que pudieron haber surgido, la capacidad para proporcionar soluciones oportunas permitió superar estos contratiempos sin mayores inconvenientes.

D. Resultados de la construcción del prototipo.

La culminación total del dispositivo se presenta de manera integral en la Figura 18, donde se exhibe la totalidad de los módulos que componen el prototipo. Este logro confirma que se ha completado la construcción del dispositivo, abriendo así la posibilidad de llevar a cabo pruebas de campo. Estas pruebas serán organizadas meticulosamente para facilitar la realización de estudios



Fig. 17. Puller con tope final para evitar descarrilamiento de banda



Fig. 18. Fotografía de los componentes del dispositivo terminado

posteriores, consolidando de esta manera el avance hacia la fase de implementación y evaluación del prototipo en situaciones del mundo real.

#### IV. CONCLUSIONES

La creación de un prototipo para la limpieza de ventanas en San Juan de Pasto se ha logrado con éxito, impulsada por la creciente presencia de edificaciones de gran altura en la región. Afrontamos diversos desafíos, especialmente dada la complejidad de obtener un dispositivo universal. En este contexto, la adopción de una metodología de construcción modular se reveló clave, permitiéndonos visualizar cómo podría evolucionar este tipo de máquina. El punto de partida con una aproximación modular no solo facilita la implementación de funciones adicionales, sino que también sienta las bases para futuros estudios en los ámbitos mecánico

y computacional de la máquina. La estrategia modular descompone un problema grande en componentes manejables, abriendo la puerta al uso de motores más potentes, funciones avanzadas y la optimización de los módulos existentes. Todo esto converge hacia la creación de un producto final robusto. En consecuencia, el prototipo no solo representa una solución inmediata, sino que también constituye el primer paso hacia investigaciones más profundas y refinadas. Estas futuras investigaciones serán cruciales para la construcción y perfeccionamiento de una máquina completa que pueda abordar de manera eficiente las demandas específicas de la limpieza de ventanas en entornos urbanos en constante cambio.

#### REFERENCES

- [1] N. Cortés Bravo, B. (2021). Expansión urbana y pérdida de la ruralidad. Análisis del POT de San Juan de Pasto. *Universidad de los Andes*
- [2] J. F. Gracia, M. J. Gómez "Accidentalidad de trabajo en alturas en Colombia, especialmente en el sector de la construcción". Tesis de especialización, Universidad EAN, 2019.
- [3] Choi, Young-Ho, Jung, Kwang-Mok. (2011). Windoro: The world's first commercialized window cleaning robot for domestic use. 10.1109/URAI.2011.6145947.
- [4] Mykh, Artur. (2018). Limpieza de ventanas de rascacielos y alternativas tecnológicas emergentes. *Revista Colombiana de tecnologías de avanzada*
- [5] Myszka, D. (2012). Máquinas y mecanismos (4th ed.). Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
- [6] Arni Munira Markom et al 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 854 012033
- [7] Zhenjing Li, Qingsong Xu, and Lap Mou Tam, "A survey on techniques and applications of window-cleaning robots," *Department of Electromechanical Engineering*, vol. 9, no. 111518, pp. 111532, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS
- [8] Choi Myeongjin, Chae, Hobyong, Kim, Kyungmin, Seo, TaeWon. (2021). Robust Design of a Rope Ascender Based on Geometric Parameters of Traction Sheave. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 22. 10.1007/s12541-020-00465-y.
- [9] S K Mahmood1, S H Bakhy1 and M A Tawfik1. (2021) Propeller-type Wall-Climbing Robots: A Review. *Sci. Eng.* 1094 012106
- [10] S.-M. Yoon, S. M. Moon, C. Y. Shin, and D. Hong, "Cleaning process simulation for building façade maintenance robot with built-in guide rail," in Proc. 6th Int. Asia Conf. Ind. Eng. Manage. Innov., E. Qi, Ed. Paris, France: Atlantis Press, 2016, pp. 657–667.

**Anexo C.** Acceso a los archivos digitales del prototipo

## Acceso a los archivos digitales del prototipo



[https://drive.google.com/drive/folders/10D1DdJRi9wobrMaYjemrAnbKDbv0JaJe?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/10D1DdJRi9wobrMaYjemrAnbKDbv0JaJe?usp=drive_link)

Archivos pertenecientes al proyecto de grado denominado “Prototipo de máquina limpiadora de ventanas de edificios.” En donde reposa los archivos para impresión 3D y los dibujos CAD del dispositivo.

**Anexo D.** Configuración de la impresora 3D

## Configuración de la impresora 3D

La configuración de la impresora se ha establecido en función de una boquilla de 1 mm, ya que es adecuada para imprimir piezas de gran volumen. En los enlaces siguientes se adjunta el archivo descargable con los parámetros utilizados en el software CURA. La impresión se llevó a cabo en la impresora Ender 3, sin realizar modificaciones significativas aparte del cambio de boquilla.



[https://drive.google.com/drive/folders/1F0MkpocivTa4mmMPM7T-jUDjs-qJyJPq?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1F0MkpocivTa4mmMPM7T-jUDjs-qJyJPq?usp=drive_link)