

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DISEÑO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA  
LIMPIEZA DE VENTANAS EN EDIFICIOS DE ALTURA**

**Trabajo de Investigación para la obtención del grado académico de  
BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA  
MECATRÓNICA**

**AUTOR:**

Sergio Enrique Rubio Amoretti

**ASESOR:**

Luis Enrique García Zevallos

Lima, Agosto, 2020

## RESUMEN

En este trabajo de investigación, se presenta el diseño conceptual de un sistema para limpieza de ventanas en edificios de altura. Esta propuesta nace con la idea de convertirse en una solución de bajo costo, para enfrentar la problemática sobre accidentes por caída en este tipo de actividades. Por ello, el objetivo general del presente trabajo es diseñar un sistema automático para la limpieza de ventanas sin perfiles en edificios altos, cuyo funcionamiento puede ser automático o controlado por un operario desde un dispositivo móvil. El concepto de solución óptimo está conformado por un robot, encargado de realizar la limpieza por medio de un cepillo giratorio que remueve el polvo y la suciedad gracias a una solución líquida que es asperjada sobre las ventanas; y un sistema de acceso a fachadas o BMU (Building Maintenance Unit) portátil, encargado tanto de sujetar al robot desde la parte superior del edificio, como de su desplazamiento. Finalmente, mediante esta investigación se ha logrado demostrar que es posible elaborar un equipo automático de bajo costo para la limpieza de ventanas en edificios de altura, ya que las tecnologías a emplearse presentan una disponibilidad amplia y son de uso común en el desarrollo de proyectos.

# ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	IV
ÍNDICE DE TABLAS .....	VI
INTRODUCCIÓN .....	1
ANTECEDENTES .....	3
1.1 PROBLEMÁTICA .....	3
1.2 PROPUESTA DE SOLUCIÓN .....	7
1.2.1 Objetivos .....	7
1.2.2 Alcance.....	8
1.2.2 Metodología .....	9
1.3 ESTADO DEL ARTE .....	10
1.3.1 Limpiadores automáticos comerciales para ventanas .....	10
1.3.2 Patentes y Tesis .....	15
1.3.3 Investigaciones.....	17
1.3.4 Sensores.....	20
1.3.5 Actuadores y Mecanismos .....	27
1.3.6 Controladores .....	33
DISEÑO CONCEPTUAL .....	36
2.1 LISTA DE REQUERIMIENTOS.....	36
2.2 ESTRUCTURA DE FUNCIONES .....	40
2.2.1 Black Box del Sistema .....	40
2.2.2 Lista de Funciones.....	42
2.3 MATRIZ MORFOLÓGICA.....	47
2.4 CONCEPTOS DE SOLUCIÓN .....	52
2.4.1 Concepto de Solución 1 .....	52
2.4.2 Concepto de Solución 2 .....	54
2.4.3 Concepto de Solución 3 .....	56
2.5 EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA .....	59

2.6 CONCEPTO DE SOLUCIÓN ÓPTIMO .....	63
2.6.1 Subsistema de limpieza .....	63
2.6.2 Subsistema de soporte y movimiento.....	65
2.6.3 Subsistema de contacto con la superficie.....	66
2.6.4 Subsistema para equilibrar la fuerza del aire .....	67
CONCLUSIONES.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69



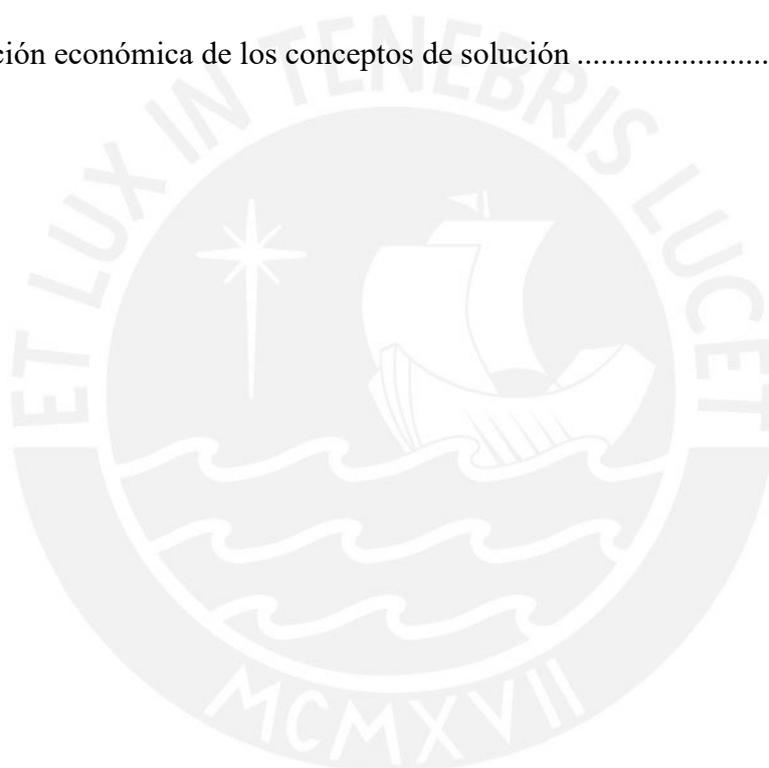
## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proforma de limpieza de ventanas en un edificio de cinco pisos .....	3
Figura 2. GEKKO Facade Robot .....	11
Figura 3. Robot Clean Kong .....	12
Figura 4. Kite Robot .....	13
Figura 5. SIRIUS Facade Cleaning Robot .....	14
Figura 6. Vista horizontal del Window Cleaning Robot.....	15
Figura 7. Window Cleaning Apparatus .....	16
Figura 8. Vista superior del vehículo escalador.....	17
Figura 9. Limpieza de ventanas mediante robot .....	18
Figura 10. Limpiador automático de fachadas de vidrio .....	19
Figura 11. CAFE Robotic Cleaning System.....	20
Figura 12. Sensor ultrasónico .....	21
Figura 13. Sensor infrarrojo.....	22
Figura 14. Sensor inductivo .....	22
Figura 15. Sensor de distancia capacitivo.....	23
Figura 16. Sensor láser de largo alcance.....	24
Figura 17. Modelo físico del acelerómetro .....	25
Figura 18. Acelerómetro piezoeléctrico.....	25
Figura 19. IMU .....	26
Figura 20. Módulo GPS .....	27
Figura 21. BMU sosteniendo un andamio .....	27
Figura 22. Plataforma suspendida por monorraíl.....	28
Figura 23. BMU motorizado.....	29
Figura 24. Sistema de vacío .....	30

Figura 25. Electric Ducted Fan (EDF).....	30
Figura 26. Sección transversal de fibra de algodón y de microfibra .....	31
Figura 27. Labio de goma .....	32
Figura 28. PLC Siemens .....	34
Figura 29. Tiva C Series TM4C123GH6PM .....	35
Figura 30. Black box del sistema.....	41
Figura 31. Diagrama de la estructura de funciones del sistema.....	46
Figura 32. Bosquejo del concepto de solución 1 .....	52
Figura 33. Concepto de solución 1- Detalle de bombeo y elementos de limpieza .....	53
Figura 34. Concepto de solución 1- Detalle de sistema de vacío y vista de perfil del robot...54	
Figura 35. Concepto de solución 2 .....	55
Figura 36. Concepto de solución 2-Detalle del sistema de bombeo de limpiavidrios.....	55
Figura 37. Concepto de solución 3 y detalle del mecanismo de husillo-tuerca.....	56
Figura 38. Concepto de solución 3-Detalle de sistema de bombeo de limpiavidrios .....	57
Figura 39. Concepto de solución 3 – BMU y detalle de cabezal móvil.....	57
Figura 40. Gráfico de dispersión.....	62
Figura 41. Concepto de solución óptimo .....	63
Figura 42. Subsistema de limpieza .....	64
Figura 43. Vista posterior .....	64
Figura 44. Vista lateral del robot .....	65
Figura 45. BMU portátil .....	66
Figura 46. Hélices posteriores.....	67
Figura 47. Hélices laterales.....	67

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Accidentes relacionados a limpieza de ventanas desde 03/2015 hasta 07/2019.....	4
Tabla 2. Comparación de sistemas de limpieza de ventanas para edificios automáticos .....	5
Tabla 3. Servicios de limpieza de fachadas ofrecidos por algunas empresas .....	6
Tabla 4. Comparación de equipos comerciales para exteriores de edificios altos.....	14
Tabla 5. Matriz morfológica .....	47
Tabla 6. Evaluación técnica de los conceptos de solución .....	60
Tabla 7. Evaluación económica de los conceptos de solución .....	61



## Introducción

El presente trabajo de investigación nace con la búsqueda de una solución para el riesgo latente asociado a la actividad de la limpieza de ventanas de edificios en altura, tanto a las caídas como al hecho de quedar atrapados en dispositivos de sujeción temporal, lo que conllevaría a sufrir lesiones graves o incluso la muerte. Debido a ello, el presente trabajo plantea el diseño conceptual de un sistema automático para realizar la limpieza de las ventanas en edificios de gran envergadura, con lo cual se eliminaría el riesgo de accidentes fatales.

Para poder concebir una solución óptima, se lleva a cabo una investigación del estado del arte, mediante la cual se encuentran tecnologías y componentes útiles que son de uso cotidiano en la industria; además de productos comerciales de origen extranjero. Tomando estos elementos como punto de partida, se desarrollan tres propuestas de solución, de las cuales se escoge la tercera como concepto de solución óptimo, tras haber realizado una evaluación técnico-económica.

El concepto de solución escogido consta de un módulo de limpieza, el cual se vale de un cepillo de cerdas suaves con movimiento vertical a través de un mecanismo de husillo-tuerca, y de una solución líquida que es asperjada sobre los vidrios gracias a la acción de una mini bomba de diafragma eléctrica. La sujeción y el movimiento vertical de este robot se lleva a cabo a través de un tirfor eléctrico, el cual se encuentra montado sobre un sistema de acceso a fachadas o BMU (Building Maintenance Unit) portátil, ubicado en la parte superior del edificio, que permite el movimiento horizontal al desplazarse por un riel. El método de adherencia sobre la superficie de las ventanas es a través de cuatro propulsores eólicos ubicados en la parte posterior del robot, que acercan el cepillo a las ventanas. Además, se ha considerado la

posibilidad de que el robot pierda la estabilidad debido al efecto pendular, por lo que se utilizan otros seis propulsores ubicados en sus caras laterales.

Por último, el sistema también se podrá manejar de manera remota mediante una conexión inalámbrica con el teléfono móvil del operario, en el que a través de una interfaz de usuario podrá realizar el control manual del sistema; además de visualizar mensajes y alertas.



## CAPÍTULO 1

### Antecedentes

En este primer capítulo se expone la problemática relacionada con la limpieza de ventanas en edificios altos a partir de información estadística. También se plantea una propuesta de solución a partir de una hipótesis, así como el objetivo general y los objetivos específicos de esta investigación.

#### 1.1 Problemática

En la actualidad, la limpieza de las ventanas de edificios en el Perú se lleva a cabo manualmente, lo cual supone un evidente riesgo para el personal dedicado a esta actividad; además de un uso ineficiente del recurso humano, lo que se traduce en un mayor costo operativo para esta actividad. Por ejemplo, en la Figura 1 se puede apreciar la cotización de la limpieza de un edificio de cinco pisos con un total de 108 ventanas por la empresa Hábitat Perfecta, con un costo de S/.1500 durante una jornada de 8 horas.



**PROPUESTA ECONOMICA**  
**COTIZACION: HP N° 08-08-2019**

Señores:  
**SR. RUBIO**  
Edificio:  
**RUCP.PE**

Por medio de la presente le hacemos llegar la propuesta económica por los trabajos solicitados para el servicio de limpieza integral.

Servicio	Precio unitario	Horas	Precio total
<b>Servicio de limpieza de altura en fachadas vidrios y ventanas.</b> ♦ Sillas verticales ♦ Yellowpaq ♦ SCTR ♦ EPP ♦ Equipos y materiales de limpieza. ♦ Técnicos de altura	<b>S/. 1500.00</b>	1 día	<b>S/. 1500.00</b>
<b>TOTAL COSTO</b>			<b>S/. 1500.00</b>

**INCLUIDO IGV**

Condiciones Generales:  
 Facturado o recibido  
 Forma de Pago: 50% a inicio y 50% a finalizar (Efectivo o transferencia bancaria)  
 Duración de la Oferta: 30 Días Continuos  
 Tiempo de ejecución: 1 día

Atte.  
**JHON ROJAS GOMEZ**  
**VENTAS**

Av. Lima Norte - Lima - Perú  
 Tel: 934 618 583  
 Correo: [contactanos@habitperfecta.com](mailto:contactanos@habitperfecta.com) / [habitperfecta@gmail.com](mailto:habitperfecta@gmail.com) / [www.habitperfecta.com](http://www.habitperfecta.com)

Figura 1. Proforma de limpieza de ventanas en un edificio de cinco pisos

Por otra parte, de acuerdo con el estudio “Estadísticas 2017 sobre Seguridad y Salud en el trabajo” publicado por el Instituto de Estudios Sindicales (IESI) (Instituto de Estudios Sindicales, 2017), a lo largo de ese año se registraron en el Perú 77 notificaciones de accidentes por caída de personal de altura pertenecientes a la actividad de limpieza de edificios. Asimismo, en el último Boletín Estadístico Mensual publicado por el Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo realizado en el mes de abril del 2018 se registraron un total de 1054 notificaciones de accidentes, de los cuales el 3.96% corresponde a caída de personal en altura de forma general. Sin embargo, este tipo de accidentes no se limitan solo al ámbito nacional: según un estudio realizado en Estados Unidos por la OSHA (Occupational Safety and Health Administration), desde marzo del 2015 hasta julio del 2019 se han registrado un total de 15 accidentes relacionados a la limpieza de ventanas en altura, de los cuales 9 han involucrado la muerte del operario, como se puede apreciar en la Tabla 1.

*Tabla 1. Accidentes relacionados a limpieza de ventanas desde 03/2015 hasta 07/2019*

Fecha	Descripción	Fatal
11/07/2019	Empleado muere al caer desde la parte superior de un edificio de 12 pisos	X
12/12/2018	Empleado muere al caer de silla colgante mientras limpiaba ventanas.	X
12/06/2018	Empleado muere mientras limpiaba ventanas usando una escalera eléctrica.	X
06/06/2018	Empleado sufre fractura al caer de escalera mientras limpiaba ventana	
01/06/2018	Empleado sufre graves lesiones y es hospitalizado por caer dos pisos al estar limpiando ventanas.	
23/02/2018	Limpiador de ventanas cae 3.6m al resbalar de escalera eléctrica sufriendo graves lesiones.	
20/02/2018	Limpiador de ventanas cae 12m cuando la mordaza que sostenía su arnés falla, sufriendo múltiples lesiones.	
14/11/2017	Limpiador de ventanas sufre lesiones al fallar la línea de vida que lo sostenía.	
07/08/2017	Limpiador de ventanas cae del piso 12 y muere por falla del arnés de seguridad	X
25/05/2017	Trabajador se electrocuta mientras limpiaba las ventanas de un hotel.	
18/05/2017	Empleado muere al caer 4.5m mientras limpiaba ventanas utilizando andamios	X
29/01/2017	Limpiador de ventanas muere al fallar línea de vida y caer 21m	X
17/09/2015	Limpiador de ventanas muere al caer 10 pisos	X
09/09/2015	Empleado muere al caer 18m mientras limpiaba lunas por un mal anclaje	X
03/03/2015	Empleado muere al caer mientras limpiaba ventanas de un edificio	X

Fuente: Extraído de Occupational Safety and Health Administration, 2018

Actualmente, en el mercado internacional ya existen sistemas automáticos para limpieza de ventanas en altura que son capaces de escalar superficies verticales como el “Clean Kong” de la empresa francesa Erylon o el “GEKKO Facade Robot” desarrollado por la empresa suiza Serbot Swiss Innovations. Ambos sistemas son comercializados en sus países de origen, pudiendo importarse pero considerando los costos además de los propios del equipo, los inherentes al envío y la carencia de asistencia técnica local para su mantenimiento y eventual reparación. Pues carecen de representación en el Perú, debido a la baja demanda por estos sistemas dado su alto costo.

En la Tabla 2 se compararán las características de los dispositivos de ambas empresas.

*Tabla 2. Comparación de sistemas de limpieza de ventanas para edificios automáticos<sup>1</sup>*

Modelo	Clean Kong	GEKKO Facade Robot
País de origen	Francia	Suiza
Voltaje	220VAC	220VAC
Método de limpieza	Rodillo recubierto con paños y líquido	Agua desmineralizada y paños
Sistema de sujeción y movimiento	Ventosas, ruedas y sujeción por cables de seguridad	Ventosas y cable de seguridad

En el mercado nacional, existen empresas que brindan servicios de mantenimiento de fachada de edificios, entre los que se encuentran la limpieza de ventanas en altura. Sin embargo, ninguna de ellas ofrece un sistema automático de limpieza, sino, utilizan los métodos tradicionales (Tabla 3).

<sup>1</sup> Extraído de <https://www.serbot.ch/en/facade-cleaning/gekko-facade-robot> y <https://www.erylon.com>

Tabla 3. Servicios de limpieza de fachadas ofrecidos por algunas empresas<sup>2</sup>

Empresa	Descripción del servicio ofrecido
Hábitat Perfecta	Empresa que brinda servicios de limpieza de ventanas en altura por medio de operarios que utilizan sillas verticales.
Servicios Impacto'Z	Empresa dedicada a brindar servicios de limpieza y trabajos de altura. El servicio de limpieza de ventanas en altura se lleva a cabo mediante operarios que utilizan sillas colgantes y arneses. Son los encargados de limpiar las ventanas del hotel Westin y el Swisshotel.
DMC Servicios	Empresa especialista en brindar servicios para trabajos en altura. La limpieza de ventanas se realiza con operarios sujetos por soga y arnés (limpieza vertical).
Prof Clean	Empresa de limpieza en general, cuyo servicio de limpieza de ventanas en altura se realiza por medio de operarios que aplican la limpieza vertical o por pasarela (andamios). El método de limpieza es por hidrolimpieza a presión.
Corplimax	Empresa dedicada a la limpieza en general, fumigación y mantenimiento industrial. El servicio de limpieza y sacudido de fachadas y ventanas en altura la realizan operarios en andamios de torre o colgante.
Spider EIRL	Empresa especializada en mantenimiento y limpieza en general, que ofrece un servicio de limpieza de ventanas en altura por medio de operadores montados en andamios colgantes eléctricos, andamios de torre o sillas de descenso de personal.

A partir de la información mostrada, se puede identificar la necesidad de contar con procedimientos, mecanismos o sistemas que brinden mayor seguridad en la actividad de limpieza de ventanas en altura. Además, considerando el continuo crecimiento del sector de servicios de limpieza en el país, y la carente oferta local para dar solución al problema de la seguridad, se abre una posibilidad a la innovación con el desarrollo de un sistema automático eficiente y de bajo costo. Este sistema permitiría cubrir la tácita demanda social, e implicaría

<sup>2</sup> Extraído de <http://www.grupodmc.com.pe/servicios.php> , <http://www.pfclean.com/servicio-limpieza-de-fachadas-lunas-y-vidrios-de-altura.php> , <http://www.habitatperfecta.com> , <http://spidermantenimiento.com> , [https://www.corplimax.com/limpieza\\_fachadas.php](https://www.corplimax.com/limpieza_fachadas.php) , <https://www.serviciosimpactoz.com>

una consecuente ventaja económica a mediano plazo para las empresas que se dedican a esta actividad.

## **1.2 Propuesta de solución**

Se propone el diseño conceptual de un sistema automático para la limpieza de ventanas de edificios con lunas de vidrio sin marcos. El sistema funcionará adherido a la superficie de vidrio y podrá desplazarse por ella de acuerdo a una ruta predefinida, empleando para ello una BMU (Building Maintenance Unit) portátil que, además, sostendrá al robot desde la parte superior del edificio. Asimismo, el sistema podrá comunicarse con el usuario por medio de un aplicativo para teléfono inteligente.

### **1.2.1 Objetivos**

En esta parte, se definen los objetivos del presente trabajo de investigación.

Objetivo general:

- Realizar el diseño conceptual de un sistema automático para la limpieza de ventanas de vidrio sin perfiles en edificios altos.

Objetivos específicos:

- Identificar el origen de la problemática en el proceso de limpieza de ventanas en altura
- Conocer las tecnologías actualmente vigentes empleadas en los sistemas automáticos de limpieza de ventanas.
- Elaborar una lista de requerimientos que debe cumplir el sistema que se va a diseñar.
- Definir las funciones parciales que debe cumplir el sistema
- Seleccionar aquellos elementos con principios de funcionamiento que satisfagan las funciones parciales del sistema.

- Configurar los conceptos de solución que cumplan la función total del sistema.
- Definir, mediante un análisis previo, el mejor concepto de solución.

### 1.2.2 Alcance

La propuesta conceptual contempla algunas consideraciones que delimitan su desarrollo, las cuales se detallan a continuación:

- El diseño conceptual consiste en un sistema para limpieza de ventanas en edificios con dos modos de funcionamiento: manual (control remoto) y automático.
- La superficie de trabajo del sistema deben ser lunas de vidrio en ventanas sin marcos ni separaciones.
- La superficie de trabajo en las ventanas debe estar contenida en un plano vertical. El sistema no trabajará sobre superficies inclinadas.
- El alcance máximo del robot es de 145 metros, medidos desde su origen de desplazamiento vertical. Considerando que el edificio más alto del Perú es la Torre del Banco de la Nación, con una altura de 140.1 metros.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Extraído de <http://www.skyscrapercenter.com/building/torre-banco-de-la-nacion/16714>

### 1.2.2 Metodología

Para el presente trabajo de investigación se utilizará la metodología para el diseño de sistemas técnicos y productos (VDI 2221). Esta metodología se aplica según los pasos detallados a continuación:

- Definir y delimitar la problemática
- Revisar el estado del arte relacionado a sistemas automáticos de limpieza de ventanas, para reconocer las tecnologías vigentes en ese campo
- Determinar las necesidades y características de funcionamiento que deben ser cubiertas por una posible solución, y presentarlos en una lista de requerimientos.
- Identificar las funciones parciales necesarias en un sistema automático de limpieza de ventanas, así como su interrelación y plasmarlas en un diagrama de estructura de funciones.
- Proponer para cada una de las funciones parciales, alternativas de principios de funcionamiento que sirvan como portadores de solución para esa función. Presentarlos en una tabla para conformar la matriz morfológica.
- Configurar conceptos de solución que cumplan la función principal, empleando la combinación de los portadores de función presentados en la matriz morfológica.
- Realizar una evaluación de carácter técnico-económico para los conceptos de solución propuestos para determinar el concepto óptimo.

### 1.3 Estado del Arte

En el presente subcapítulo, se muestran equipos automáticos comerciales para limpieza de ventanas, así como trabajos de investigación previos, tales como patentes, tesis y artículos, con el fin de adquirir conocimiento que será de utilidad para la elaboración del diseño.

#### 1.3.1 Limpiadores automáticos comerciales para ventanas

La oferta de máquinas para limpieza de ventanas cuenta tanto con equipos para uso doméstico como para uso profesional en grandes edificios de altura.

##### 1.3.1.1 Limpiadores automáticos de fachadas de edificios de gran altura

En esta parte se presentarán equipos comerciales destinados para la limpieza automática de edificios de grandes dimensiones.

##### *GEKKO FACADE ROBOT – SERBOT SWISS INNOVATIONS*

El robot GEKKO (Figura 2) es fabricado por la empresa suiza Serbot Swiss Innovations y utilizado para la limpieza de lunas de vidrio a grandes alturas. El sistema de adherencia se basa en el principio que presentan los reptiles llamados gecos, para lo cual utilizan un sistema de succión compuesto por un arreglo de chupones con forma taza de té invertida distribuidos formando la letra D, los cuales están sujetos a una faja que le permite avanzar a una velocidad máxima de 7.8 m/min. Para la limpieza de ventanas utiliza una combinación de cepillos rotatorios con agua desmineralizada. Asimismo, posee un sistema de sujeción que puede ser integrado a casi todos los tipos de BMU instalados en los edificios.



Figura 2. GEKKO Facade Robot

Fuente: <https://www.serbot.ch/en/facade-cleaning/gekko-facade-robot>

### *CLEAN-KONG - ERYLON*

Sistema automático para la limpieza de ventanas y fachadas de edificios (Figura 3) desarrollado por la empresa francesa Erylon. Este sistema de limpieza es sostenido desde el techo del edificio por un cable y un polipasto eléctrico que controla la velocidad de subida y bajada del robot, al tiempo que este se encarga de la limpieza de las ventanas. Para ello, cuenta con un tanque de agua pura y otro tanque donde deposita el agua que ya ha sido utilizada. Además, posee un rodillo horizontal recubierto con paños para remover la suciedad de las ventanas. El método de adherencia es por medio de 5 ventosas dispuestas verticalmente y el movimiento sobre la superficies se da mediante cuatro ruedas. El método de trabajo es una limpieza de abajo hacia arriba y luego un operario desde la zona de control mueve al robot hacia la siguiente columna por medio de control remoto.



Figura 3. Robot Clean Kong  
A. En operación; B. Rodillo y sistema de ventosas

Fuente: <https://www.erylon.com>

### *KITE ROBOT – KITE ROBOTICS*

Este robot es desarrollado por la empresa holandesa KITE Robotics. El sistema está conformado por un cepillo rotatorio autónomo y por cuatro cables (Figura 4) conectados a sus respectivos polipastos que se encargan de sostener al cepillo. Se ubican dos polipastos en la parte superior del edificio a ser limpiado y los restantes en la base, simétricamente. De esta manera, el cepillo es capaz de desplazarse por toda la superficie vertical de forma segura. El método de limpieza se da a través de un conducto surtidor de agua desmineralizada, sostenido en la parte superior del edificio que llega hasta la zona de limpieza del cepillo.



Figura 4. Kite Robot

Fuente: <https://www.linkedin.com/company/kite-robotics>

#### *SIRIUS FACADE CLEANING ROBOT - IFF*

Este sistema de limpieza de ventanas (Figura 5) fue desarrollado por el Instituto Fraunhofer de Operaciones Fabriles y Automatización (IFF) para la limpieza de un edificio de gran altura ubicado en München, Alemania. La unidad de limpieza se encuentra sostenida por cuatro cables conectados a un brazo de grúa posicionado en la parte superior del edificio. Además de sostener al robot, dichos cables le suministran información y energía. La posición inicial del robot es en la parte superior del edificio, luego baja y empieza a limpiar una columna. A continuación, vuelve a subir y es movido lateralmente por la grúa para empezar el proceso de nuevo. El método de adherencia es por medio de succión por ventosas (Elkmann et al., 2005).



Figura 5. SIRIUS Facade Cleaning Robot

Fuente: <https://www.iff.fraunhofer.de/en/business-units/robotic-systems/facade-cleaning-sirius.html>

En la Tabla 4 se presenta una comparación con los productos anteriormente mostrados.

Tabla 4. Comparación de equipos comerciales para exteriores de edificios altos<sup>4</sup>

	GEKKO Facade Robot	Clean-Kong	KITE Robot	SIRIUS Facade Cleaning Robot
Fabricante	Serbot Swiss Innovations	Erylon	KITE Robotics	IFF
Origen	Suiza	Francia	Holanda	Alemania
Alimentación	Cable-220AC	No específica	No específica	No específica
Capacidad de limpieza	400m <sup>2</sup> /h	360m <sup>2</sup> /h	No específica	80m <sup>2</sup> /h
Sistema de adherencia	Presión de vacío por ventosas	Presión de vacío por ventosas	Sistema de cables	Presión de vacío por ventosas
Peso	79Kg	28Kg	No específica	No específica
Método de limpieza	Agua desmineralizada y paños	Agua y paños	Agua desmineralizada y cepillo rotatorio	No específica

Fuente: Extraído de Elkmann et al., 2005

<sup>4</sup> Extraído de <http://www.kiterobotics.com> , <https://www.erylon.com> , <https://www.serbot.ch/en/facade-cleaning/gekko-facade-robot>

### 1.3.2 Patentes y Tesis

Con el fin de poder recabar información útil a partir de tecnología ya existente, se han revisado patentes y tesis que muestran distintos métodos para el desplazamiento sobre ventanas y su respectiva limpieza.

#### 1.3.2.1 Patente KR20080054130A “Window Cleaning Robot”–Inventor: Kim, H.J- Publicación: 15/12/2008

Esta patente presenta un robot que limpia ambos lados de una ventana simultáneamente. El sistema está compuesto por dos platos: uno se encuentra a un lado de la ventana y presenta un motor que acciona una rueda, mientras que del otro lado se encuentra el segundo plato con una rueda simple (Figura 6). El método de adherencia es magnético, teniendo polos opuestos ambos platos.

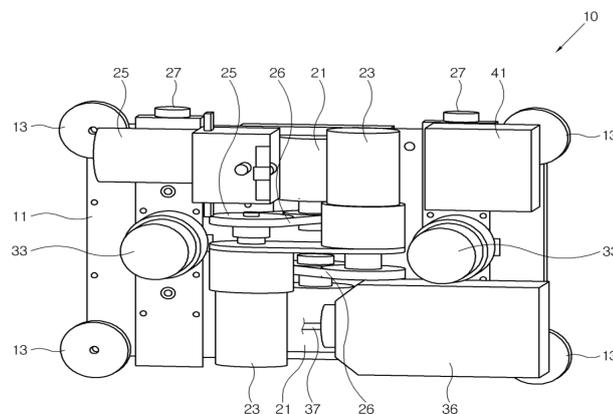


Figura 6. Vista horizontal del Window Cleaning Robot  
Fuente: Extraído de Patent No. KR20080054130A, 2009

#### 1.3.2.2 Patente EP0642318B1 “Window Cleaning Apparatus”–Inventores: Allen, C., Pawson, R., Farsi, M. & Johnson, P. – Publicación: 15/03/1995

Dispositivo para limpieza de ventanas (Figura 7) que posee un limpiador tipo parabrisas extensible. Dicho limpiador es controlado para desplazarse automáticamente a lo largo de la superficie de la ventana para aplicar y remover el líquido limpiador (agua y

detergente). Además, se puede desactivar el modo automático para que un operario pueda manejarlo manualmente. El sistema se desplazará verticalmente por medio de un arreglo de rieles ubicados en los extremos de las ventanas y está sujeto por cables desde la parte superior del edificio.

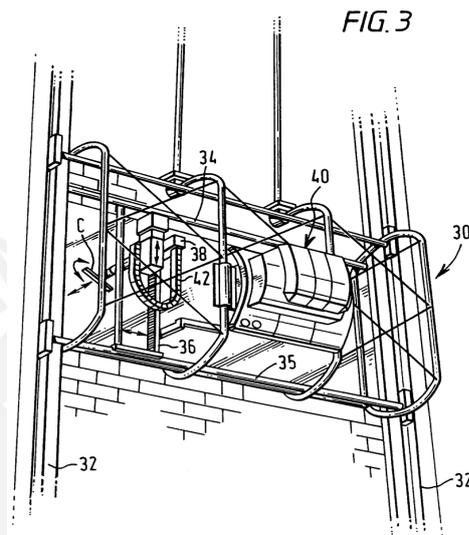


Figura 7. Window Cleaning Apparatus  
Fuente: Extraído de Patent No. EP0642318B1, 1993

### ***1.3.2.3 Tesis “Diseño de un móvil escalador de paredes laterales y superiores para inspección en trabajos de construcción civil”***

La presente tesis propone el diseño de un vehículo automático capaz de escalar paredes y techos para inspeccionar trabajos de construcción. El tema de interés para la limpieza automática de ventanas es el sistema para adherirse a las superficies. Para ello utiliza cuatro turbinas eléctricas conocidas como EDF por Electric Ducted Fan (Figura 8), cuyas hélices giran a una velocidad lo suficientemente alta para generar la fuerza de empuje que permite al vehículo adherirse. Además, cuenta 4 ruedas para poder desplazarse sobre las superficies.

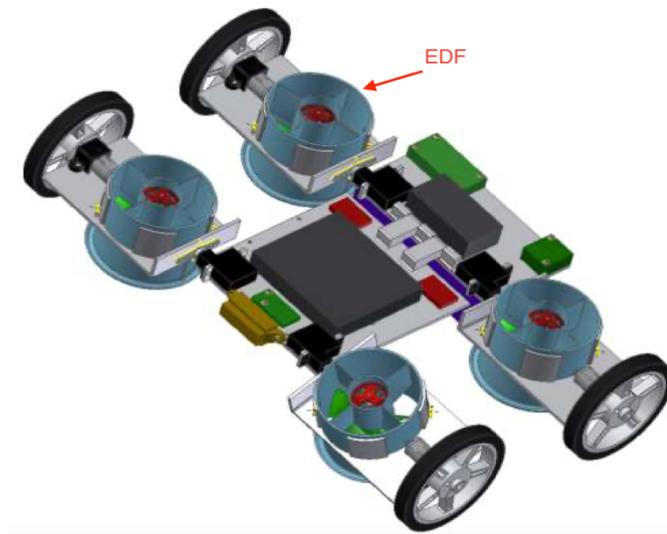


Figura 8. Vista superior del vehículo escalador  
Fuente: Extraído de Alvarado, 2015

### 1.3.3 Investigaciones

#### 1.3.3.1 *“Design and fabrication of an automatic window cleaning robot” por Abdulgani Albagul*

En este artículo se propone el diseño de un sistema automático para limpiar ventanas en altura. Este sistema está compuesto por una barra horizontal dentada que se desplaza verticalmente a lo largo de rieles gracias a dos motores DC, y por una estación compuesta por un disco recubierto con un paño, dos tanques que contienen agua y líquido para limpieza. La estación se desplaza horizontalmente a lo largo de la barra dentada gracias a un piñón accionado por un tercer motor DC (Figura 9). El control se da por medio de un PLC.



Figura 9. Limpieza de ventanas mediante robot  
 A: Vista frontal; B: Vista en detalle de la limpieza  
 Fuente: Extraído de Albagul, Asseni, Jomah, Omer, & Farge, 2010

### ***1.3.3.2 “Design and Fabrication of Automated Glass Curtain Cleaning Machine” por Vinod Kumar, Prem Kumar, Prasad BG y Syed Razeequlla***

En este artículo, se presenta un sistema para limpiar fachadas de vidrio que consta principalmente de un rodillo giratorio, un marco de metal por donde se desliza el rodillo, un labio limpiador, dos ruedas inferiores y dos ventosas superiores para adherirse a la superficie (Figura 10). Además, cuenta con un sistema de poleas, ubicadas en la parte superior del edificio, que le permiten al sistema desplazarse verticalmente de manera que solo el rodillo giratorio, las ventosas y las ruedas estén en contacto con la superficie de vidrio. La limpieza se realiza en dos pasadas: en la primera el rodillo se desplaza desde la base hasta la parte superior del marco, mientras 3 rociadores echan una mezcla de agua y jabón. En la segunda pasada, el cepillo vuelve a la base del marco a la vez que 5 rociadores echan agua pura. En este momento, el labio limpiador desciende por el marco mientras frota la ventana. Finalmente, el labio retorna a su posición inicial, las poleas son accionadas para movilizar el sistema y se continúa con la limpieza de otra zona.

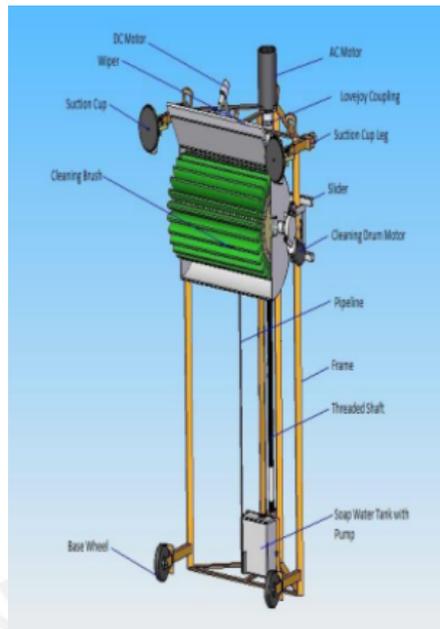


Figura 10. Limpiador automático de fachadas de vidrio  
Fuente: Extraído de Kumar, Kumar, Prasad, & Razeequlla, 2014

### ***1.3.3.3 “Control System for a Semi-automatic Facade Cleaning Robot” por E. Gambao y M.Hernando***

En este artículo, se presenta un sistema semiautomático para limpieza de ventanas en altura llamado CAFE Robotic Cleaning System basado en la existencia de una BMU tipo góndola en la parte superior del edificio en el que se llevará a cabo la limpieza de ventanas. Dos cables son conectados desde la BMU hacia el robot, el cual podrá moverse tanto en el eje X como en el Y. El sistema de adherencia a la superficie vertical de vidrio se dará a través de succión por ventosas y el desplazamiento sobre dicha superficie se da a través de ruedas. La limpieza se lleva a cabo por medio de cepillos rotatorios en un plano paralelo a la superficie y un sistema de reutilización de agua (Figura 11).

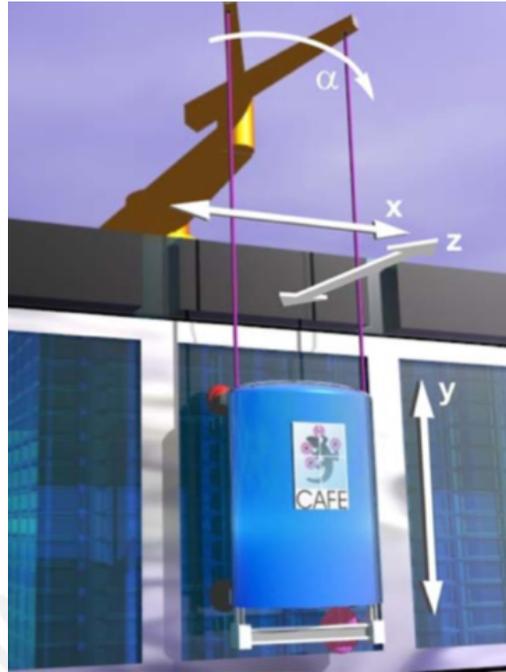


Figura 11. CAFE Robotic Cleaning System  
Fuente: Extraído de Gambao & Hernando, 2006

### 1.3.4 Sensores

El presente trabajo requiere la medición de ciertas magnitudes físicas y variables como la distancia, detección de bordes de la superficie a limpiar, humedad y suciedad. Para ello se presentarán diversos sensores con distintos principios de funcionamiento y al final se realizará una tabla comparativa.

#### 1.3.4.1 Sensores de distancia

Actualmente, existe en el mercado una gran variedad de sensores con la capacidad de medir la distancia entre dos puntos. Estos sensores poseen distintos rangos de medición, diferente precisión, tamaño y forma, de acuerdo con el método utilizado para realizar la medición. A continuación, se presentan algunos de estos sensores.

### *Sensor de ultrasonido*

Este tipo de sensor de distancia es el más utilizado en la industria. Su principio de funcionamiento se basa en la emisión y recepción de ondas ultrasónicas mayores a los 20KHz. Para generar estas ondas se utilizan transductores (piezoeléctricos) que reaccionan ante un estímulo eléctrico vibrando y emitiendo ondas. Para calcular la distancia, se utiliza el tiempo transcurrido entre la emisión de la onda y la recepción del eco producido por la presencia de un cuerpo a una determinada distancia.



Figura 12. Sensor ultrasónico  
Fuente: <https://naylampmechatronics.com>

### *Sensor infrarrojo*

Son dispositivos optoelectrónicos capaces de medir la radiación infrarroja que reflejan los cuerpos. Para ello se cuenta con un diodo LED infrarrojo (emisor) y un fototransistor (receptor). El método para medir distancias se da al emitir en línea recta la luz infrarroja hasta que se tope con un cuerpo. Dicha luz se refleja y es devuelta con un cierto ángulo de apertura de acuerdo a la distancia; finalmente, el ángulo con el que regresa el haz de luz infrarroja es detectado por el receptor. A medida que la distancia se incrementa, el ángulo se hace menos agudo.

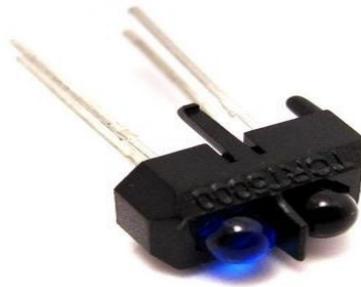


Figura 13. Sensor infrarrojo

Fuente: <https://www.wittronics.com.mx/tienda/sensores/sensor-infrarrojo-tcrt5000/>

### *Sensores de distancia inductivos*

Son sensores de distancia sin contacto que se basan en la variación de la corriente de inducción. El sensor presenta una bobina que genera un campo electromagnético y un circuito de oscilación. Al acercarse un objeto metálico al campo electromagnético, se le induce una corriente. A medida que el objeto se acerca más al sensor, el flujo de corriente inducida aumenta y la frecuencia del circuito de oscilación varía. Luego, el sensor detecta esta variación y emite una señal de detección (Laboratorio de Sensores y Actuadores, 2017).



Figura 14. Sensor inductivo

Fuente: <https://demia.com.mx/producto/sensor-inductivo-10/>

### *Sensores de distancia capacitivos*

Son sensores de proximidad sin contacto que permite la detección de objetos metálicos y no metálicos. Esto es debido a que la capacitancia del circuito oscilador que lo conforma varía una vez que el objeto a detectar ingresa o se aleja del campo eléctrico generado por los electrodos. Luego, esta capacitancia es transformada en una señal eléctrica variable que es leída por el circuito disparador.



Figura 15. Sensor de distancia capacitivo

Fuente: <https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/296-sensor-de-proximidad-capacitivo-ljc18a3-h-zbx.html>

### *Sensor láser de largo alcance*

Posee un emisor láser que permite obtener la distancia al objeto requerido mediante el tiempo que demora el láser en regresar al sensor, luego de haberse reflejado en el objeto.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Extraído de [https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/laser\\_location/info/](https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/laser_location/info/)



Figura 16. Sensor láser de largo alcance  
Fuente: <https://www.sick.com>

#### ***1.3.4.1 Sensores de posición***

El conocimiento de la posición en la que se encuentra el robot sobre la superficie vertical de vidrio a limpiar es de gran importancia, pues de esta manera se podrá controlar que el desplazamiento del sistema no sobrepase los límites de la superficie, se podrán guardar en la memoria puntos de la superficie que no presentan una adecuada limpieza, entre otras aplicaciones. Para obtener esta variable, en el mercado se puede encontrar una gama de sensores inerciales y de localización que se detallarán a continuación.

#### ***Acelerómetro***

Un acelerómetro es un dispositivo de un solo grado de libertad que posee una masa sísmica soportada en un extremo por un sistema tipo resorte y en el otro por un marco con propiedades de amortiguación (Figura 17).

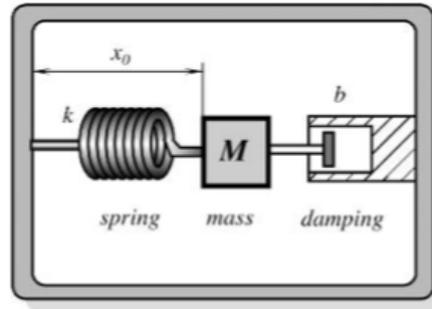


Figura 17. Modelo físico del acelerómetro  
Fuente: Extraído de Farden, 2003

Este sensor tiene la función de medir las vibraciones o aceleración generadas por el movimiento de un cuerpo o estructura. Las vibraciones ocasionan que la masa se mueva y choque con una determinada fuerza contra una superficie que usualmente tiene propiedades piezoeléctricas o capacitivas. En el caso de ser la primera, se genera una señal eléctrica que está relacionada a la fuerza de impacto, que a su vez es proporcional a la aceleración debido a que la masa del objeto sísmico es constante. En el segundo caso, el choque de la masa ocasiona que la superficie capacitiva se desplace una distancia respecto a otra que está fijada a la base, lo cual ocasiona un cambio en la capacitancia que es proporcional a la aceleración (Farden, 2003). Una vez obtenida la aceleración es posible conocer la posición gracias a un algoritmo basado en integrales.



Figura 18. Acelerómetro piezoeléctrico  
Fuente: <https://es.omega.com/prodinfo/acelerometro.html>

### *Inertial Measurement Unit (IMU)*

El IMU (Figura 19) es un dispositivo que integra las funcionalidades ofrecidas por el acelerómetro y el giroscopio, ya que es capaz de detectar tanto aceleraciones como

rotaciones. Luego, esta información es transmitida a un controlador que calcula la velocidad y posición actual mediante integrales, conociendo previamente la posición y velocidad iniciales (Nomdedu, Sales, Marín, Cervera, & Aez, 2011).



Figura 19. IMU  
Fuente: [www.digikey.com](http://www.digikey.com)

### *Módulo GPS*

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés) es un sistema que le permite al usuario conocer las coordenadas de cualquier punto sobre la superficie del planeta debido al uso de un sistema de referencia global. Esto se logra midiendo la distancia simultánea a cuatro satélites como mínimo con coordenadas de ubicación conocidas. Para la transmisión de datos, los módulos GPS utilizan sentencias que siguen el protocolo NMEA, siendo una de las más usadas la GPRMC que brinda una cadena de datos entre los cuales se encuentran la hora, latitud, longitud, velocidad, orientación y fecha (Huerta, Mangiaterra, & Noguera, 2005).



Figura 20. Módulo GPS  
Fuente: [www.digikey.com](http://www.digikey.com)

### 1.3.5 Actuadores y Mecanismos

En esta parte se mostrarán los distintos actuadores y mecanismos cuyos principios de funcionamiento podrían ser empleados en la elaboración del proyecto. Algunos de ellos están presentes en los sistemas de limpieza comerciales presentados en el inciso 1.3.1.

#### 1.3.5.1 Building Maintenance Unit (BMU)

Llamados también sistemas de acceso a fachadas, los BMUs son máquinas ubicadas en la parte superior de edificios de gran altura para poder dar asistencia al sostener de manera segura los diferentes dispositivos y operarios involucrados en brindar servicios de mantenimiento a las fachadas de edificios como limpieza o reemplazo de ventanas, instalación de paneles de publicidad, pintado de fachadas, entre otros (Figura 21).

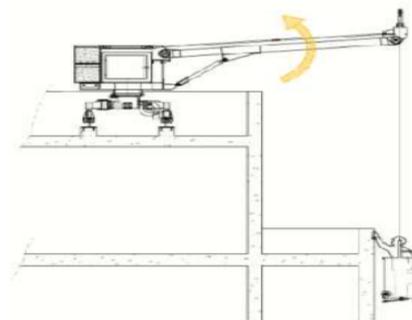


Figura 21. BMU sosteniendo un andamio<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Extraído de [http://www.vtmeconsulting.com/images/Facade Access Equipment BMU Design Planning by SAMSON RAJAN BABU.pdf](http://www.vtmeconsulting.com/images/Facade%20Access%20Equipment%20BMU%20Design%20Planning%20by%20SAMSON%20RAJAN%20BABU.pdf)

Estas unidades de mantenimiento pueden clasificarse como sistemas de acceso temporal (cuerdas y plataformas tipo andamios) y sistemas de acceso permanente. Para edificios de gran altura se utiliza la segunda opción, entre los que destacan:

#### *Plataformas suspendidas por monorraíl*

Este sistema está compuesto por un monorraíl instalado en el perímetro de la parte superior del edificio (Figura 22). Sobre este se pueden desplazar superficies como góndolas para que el operario pueda realizar el servicio requerido. Este es uno de los sistemas más económicos.



Figura 22. Plataforma suspendida por monorraíl  
Fuente: Extraído de Varghese, 2016

#### *Maquinas motorizadas*

Son un tipo de BMU con contrapeso que se traslada a lo largo de una vía (comúnmente rieles) instalada en la parte superior del edificio (Figura 23). Estas máquinas, pueden ser automáticas, operadas a control remoto o mecánicas. Generalmente, están consideradas en el diseño previo a la construcción del edificio donde irán instaladas (Varghese, 2016).



Figura 23. BMU motorizado

Fuente: [http://www.rostek-uk.com/html/building\\_maintenance\\_units.html](http://www.rostek-uk.com/html/building_maintenance_units.html)

### ***1.3.5.2 Métodos de adherencia sobre superficies lisas***

Existen diversos métodos de adherencia, siendo los más empleados los mostrados a continuación:

#### *Método de succión por vacío*

Este método consiste en la generación de vacío a través de un sistema para permitir la adherencia a una superficie determinada (Figura 24). El vacío o depresión existe cuando la presión dentro de un perímetro cerrado es menor a la presión ambiental. Un sistema de vacío está compuesto principalmente por dos elementos: el generador de vacío y las ventosas. La generación de vacío se puede dar neumática o eléctricamente, los que usan la neumática son utilizados para ser integrados directamente a un sistema, gracias a su diseño compacto y ligero; mientras que los eléctricos se utilizan cuando no se dispone de aire comprimido o cuando es necesaria una gran fuerza de succión. Las ventosas son los elementos que constituyen la unión entre el dispositivo a ser adherido y la superficie,

son elastómeros comúnmente circulares que poseen una boquilla en el centro. La ventosa es el perímetro cerrado en el que se realiza la depresión (Schmalz, 2019).

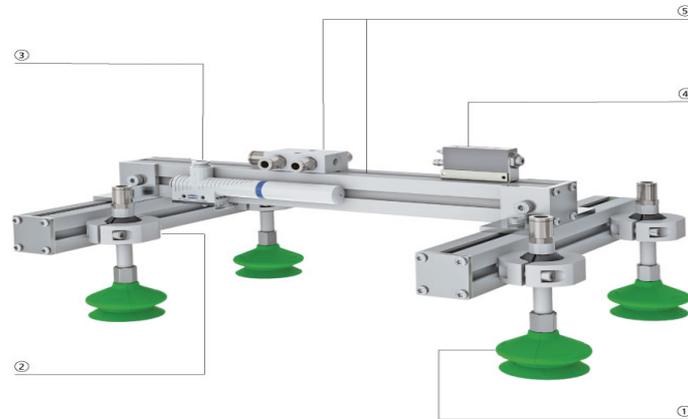


Figura 24. Sistema de vacío

Fuente: <https://www.schmalz.com/es/saber-de-vacio/el-sistema-de-vacio-y-sus-componentes/>

#### *Método por fuerza de empuje ( $F_{th}$ )*

El presente método consiste en utilizar turbinas eléctricas conocidas como Electric Ducted Fan (Figura 25) compuestas por un motor “brushless” y un recipiente con forma de taza invertida. La potencia de este dispositivo deberá ser escogida para que la fuerza de empuje que genera sea mayor a la fuerza de agarre necesaria para poder adherir al objeto en cuestión a una superficie determinada.



Figura 25. Electric Ducted Fan (EDF)

Fuente: <https://www.ebay.es/itm/AEO-Aircraft-4300KV-Brushless-Motor-55mm-8-Blade-Electric-Ducted-Fan-EDF-OM129-/253677067793>

### 1.3.5.1 Materiales para limpieza de cristales

A continuación, se detallarán los materiales de uso más común en la limpieza de cristales.

#### *Paños de microfibra*

La microfibra tipo gamuza es un material altamente utilizado para la limpieza de vidrios y cristales debido a su propiedad de remover las partículas de polvo sin la necesidad de utilizar un líquido limpiavidrios. Además, posee un alto nivel de absorción de líquidos, ya que la sección transversal de cada fibra posee forma de asterisco (Figura 26). Gracias a ello, presenta espacios para absorber una mayor cantidad de líquido (7 veces su peso). Finalmente, las fibras de este material están cargadas positivamente, mientras que las partículas de polvo lo están negativamente, lo que produce una atracción que favorece la limpieza.

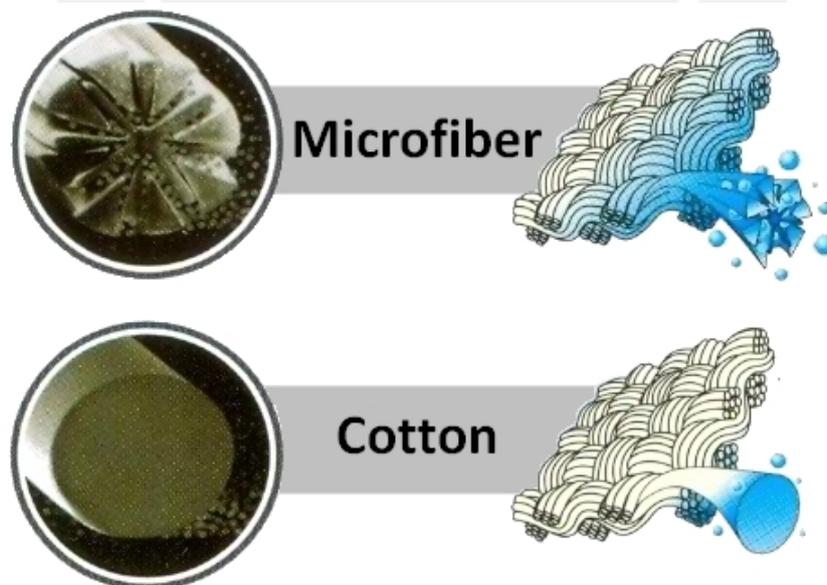


Figura 26. Sección transversal de fibra de algodón y de microfibra  
Fuente: Extraído de Microfiber Wholesale, 2019

### *Labios de goma*

Los labios de goma natural (NR) vulcanizados (Figura 27) son utilizados para la limpieza de vidrios y cristales en general, debido a su fácil adquisición y la ventaja de no dejar marcas sobre la superficie. Además, evita el efecto escalón (pequeños saltos a la hora de deslizarse sobre la superficie) a diferencia de otros materiales como el plástico.



Figura 27. Labio de goma

Fuente: <https://www.quiser.es/guias-y-gomas>

#### ***1.3.5.2 Soluciones líquidas para limpieza de cristales***

A continuación, se presentarán las soluciones líquidas más populares para la limpieza de cristales.

##### *Agua y jabón*

Esta es una de las soluciones más tradicionales para la limpieza de ventanas. Para llevar a cabo el procedimiento de manera correcta se debe diluir el jabón casi totalmente en el agua limpia para evitar dejar manchas en los cristales. Sin embargo, esta solución solo puede ser utilizada en vidrios con poca suciedad, ya que la composición de la mezcla es muy suave.

### *Agua y amoniaco*

Esta mezcla se utiliza en cristales donde se ha acumulado mucha suciedad debido a factores climáticos como la polución. Debido a que el amoniaco es tóxico, se recomienda utilizar elementos de protección como mascarillas y guantes. Para realizar la mezcla adecuadamente, por cada litro de agua se añadirán solo unas gotas de amoniaco.

### *Productos industriales*

En el mercado están disponibles una gran gama de productos para limpieza de cristales entre los que se destacan aquellos que poseen un efecto desengrasante y los que son ecológicos. Los del primer grupo se caracterizan por ser utilizados sobre superficies de vidrio que concentran una gran cantidad de suciedad, ya que su composición química permite recuperar el brillo de dichos cristales gracias a que se mezclan los beneficios que ofrecen los productos desengrasantes con los limpiavidrios comunes. Los del segundo grupo son una innovación tecnológica que además de no contaminar el medio ambiente, poseen la cualidad de generar una delgada película sobre la superficie limpiada que repele la suciedad por un período prolongado de tiempo y ofrecen un secado más rápido (Perdigones, 2011).

### **1.3.6 Controladores**

Es un dispositivo electrónico capaz de procesar información y seguir un comportamiento basado en una lógica de programación, contando para ello con entradas y salidas para poder interactuar con los demás periféricos del sistema. Existen diversos tipos de controladores con características adecuadas a las exigencias y condiciones de aplicación. A continuación, se presentan los tipos de mayor uso:

### ***1.3.6.1 Controlador lógico programable***

Los controladores lógicos programables (Figura 28) están basados en microprocesadores que utilizan una memoria programable para almacenar instrucciones e implementar funciones con el objetivo de controlar procesos y máquinas. Están orientados hacia el uso industrial, poseen un lenguaje simple e intuitivo y presentan una robustez elevada para soportar vibraciones, humedad, temperatura y ruido (Bolton, 2006).



Figura 28. PLC Siemens

Fuente: <https://sensoricx.com/plc-siemens-s7-1200/>

### ***1.3.6.2 Tarjetas de desarrollo basadas en microcontroladores***

Una tarjeta de desarrollo (Figura 29) es un dispositivo que incluye hardware y software orientado hacia el desarrollo de tareas específicas (Kamal, 2011), como el control de una lavadora o de una impresora por medio de un código de programación. Generalmente son de tamaño reducido y presentan pines de entrada y salida para interactuar con periféricos. Además, son capaces de recibir y emitir señales discretas y analógicas, tener comunicación serial y ethernet, y dependiendo del modelo, pueden incluir periféricos y puertos adicionales, lo que aumenta su versatilidad.

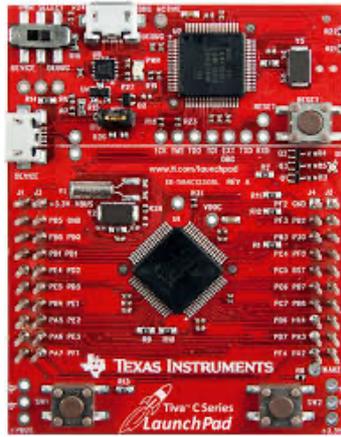


Figura 29. Tiva C Series TM4C123GH6PM

Fuente: <https://www.ti.com/lit/ug/spmu296/spmu296.pdf>



## CAPÍTULO 2

### Diseño Conceptual

En este capítulo, se presenta una lista de requerimientos que permitan la viabilidad de la propuesta. A partir de ello se identifican las entradas y salidas de la función principal (caja negra), se definen las funciones parciales y su interacción (estructura de funciones), se proponen elementos capaces de cumplir las funciones parciales (matriz morfológica) y finalmente se constituyen los conceptos de solución capaces de resolver la función principal.

#### 2.1 Lista de Requerimientos

Existen ciertas necesidades, exigencias y deseos, que deben ser satisfechos mediante esta propuesta con la finalidad de cumplir con las expectativas de quienes serán influenciados por esta solución.

A continuación, se describen y justifican los requerimientos agrupados según su funcionalidad.

- **Función principal:** Limpiar ventanas en edificios de altura de forma automática, mediante desplazamiento controlado por paredes verticales de cristal.
- **Energía:** Se contemplará energía de entrada y salida:

Entrada:

- Energía eléctrica proveniente de la línea de alimentación monofásica (220 VAC).

Salida:

- Energía cinética como consecuencia del desplazamiento del robot.

- Energía térmica producida por el funcionamiento de motores, las baterías y la fuente de voltaje.
  - Vibración producida por la fricción de los paños y el mecanismo de adherencia con las ventanas.
- **Señal:** Se presentarán señales de entrada y salida:

Entrada:

- Señal de encendido general del sistema
- Señal de inicio de proceso
- Señal de posicionamiento inicial
- Señal de retorno
- Señal de modo de uso
- Señal de detención de proceso
- Señal de grabado de posición

Salida:

- Señal visual de modo de uso
  - Señal de emergencia por corte de energía eléctrica
  - Señal de falta de líquido limpiador
  - Señal de estado de proceso
  - Señal de nivel de energía en la batería
  - Señal de zona con limpieza inadecuada
- **Material:** Para la estructura del robot, se escogerá un material ligero y de bajo costo. Por otro lado, para el sistema de sujeción y traslación que se debe armar en la parte superior del edificio, se utilizará un material lo suficientemente resistente para soportar grandes fuerzas de torsión, pero que no posea un peso muy elevado. En ambos casos,

los materiales deberán ser resistentes a temperaturas de 10°C - 50°C, a la humedad, a la exposición directa al sol y a productos de limpieza.

- **Uso:** El sistema automático de limpieza podrá ser utilizado en ambientes con una temperatura de 10°C-50°C, con una humedad no mayor al 98%. El sistema será totalmente automático, sin embargo, también podrá ser utilizado a control remoto por un operario a través de un aplicativo móvil. Se utilizará el robot para limpieza de ventanas de vidrio o cristal sin marcos externos en edificios con una altura máxima de 141 m, siendo el edificio más alto del Perú la Torre del Banco de la Nación con 140,1m.
- **Fuerzas:** La fuerza ejercida por la masa total del robot debe ser soportada con facilidad por el sistema de adherencia. El robot debe mantenerse estable y soportar las fuerzas provenientes de diversas direcciones, producto de las corrientes de aire. El peso del robot no deberá superar los 70Kg y será sostenido por el sistema BMU.
- **Seguridad:** El robot debe permanecer en su posición en altura, incluso si falla el sistema de adherencia. Se delimitará un área de seguridad en la base del edificio por donde no podrán circular transeúntes. En caso de corte del suministro de energía eléctrica, se activará una batería de seguridad que poseerá una duración de 30 minutos para que el robot se pueda posicionar en una zona segura.
- **Transporte:** Tanto el robot como los elementos que componen el BMU podrán ser levantados por dos personas. Además, las dimensiones de estos componentes no deben superar el metro por lado, para facilitar su traslado en coches de carga y su ingreso en ascensores de servicio.
- **Montaje:** El montaje del sistema automático de limpieza podrá ser realizado por un solo operario. Se debe disponer de una zona libre en el techo del edificio para instalar el sistema de desplazamiento del BMU. Además, la altura máxima de los parapetos en los edificios en los que se realizará la limpieza de ventanas será como máximo 1.50m,

siendo el mínimo recomendado por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento 1.10m (Ministerio de vivienda construcción y saneamiento, 2018).

- **Mantenimiento:** Las piezas sujetas a mayor desgaste por uso deben ser de fácil acceso para realizar el mantenimiento. Además, deben contar con características estándar y estar disponibles para adquisición local.
- **Fabricación:** Los procesos de manufactura mecánica necesarios deben ser de complejidad estándar sin requerir maquinaria especializada, de forma que se puedan realizar en talleres metal-mecánicos locales.
- **Software:** El software utilizado deberá ser de código abierto.
- **Comunicación:** La comunicación entre el robot y la estación BMU será inalámbrica para evitar el uso de cables de comunicación de gran extensión. De igual forma se trabajará la comunicación entre el aplicativo móvil del usuario y el sistema.
- **Control:**
  - Elaborar un control de velocidad horizontal
  - Elaborar un control de velocidad vertical
  - Implementar un control para la calidad de la limpieza
  - Controlar la posición horizontal del BMU
  - Controlar la posición vertical del robot
  - Controlar el volumen de líquido para limpieza
  - Controlar el contrapeso del BMU
- **Cinemática:** La velocidad máxima de desplazamiento del robot será de 8 m/min, tanto en el eje vertical como en el horizontal. Este valor se escoge tomando como base la velocidad máxima del robot de limpieza comercial Gekko Facade Robot, la cual es de 7.8 m/min (ver subcapítulo 1.3).

## 2.2 Estructura de Funciones

Con el fin de plantear las funciones con las que contará el sistema propuesto, primero se lleva a cabo un análisis para identificar las entradas y salidas del sistema en general, las cuales se ven plasmadas en el Black Box del sistema. A continuación, se realiza un listado de las funciones para atender problemas específicos y que, en conjunto, resuelven la problemática principal. Finalmente, se agrupan las funciones por subsistemas en un diagrama (estructura de funciones).

### 2.2.1 Black Box del Sistema

En la Figura 30 se muestran las entradas y salidas del sistema agrupadas según su naturaleza: materia (M), energía (E) y señales (S). Según la lista de requerimientos, se ingresará líquido limpiavidrios al sistema para que, en conjunto con un cepillo, se limpien ventanas sucias de edificios. El resultado son ventanas limpias gracias al líquido expulsado, además de cerdas sucias, residuos líquidos y chorro de aire (en caso de usar adherencia por ventosas neumáticas). Por otro lado, para poner en marcha el sistema, se necesita energía, en este caso será eléctrica para energizar los componentes electrónicos del sistema de control y aire (si se emplean ventosas para la adherencia). Como resultado se obtendrá energía cinética, producto del movimiento de los arneses y las ráfagas del viento; energía lumínica, debido a las diversas señales visualizadas en la interfaz de usuario; y energías acústica y térmica, propias de los procesos de limpieza, desplazamiento y del aumento de temperatura propio de los componentes electrónicos. Finalmente, las señales de entrada que recibe el sistema son la señal de encendido, la señal de inicio de proceso, la señal de posicionamiento inicial, la señal de retorno, señal de grabado de posición y la señal de detención de proceso; mientras que las de salida

son la señal visual de modo de uso, emergencia, nivel de líquido en tanque, nivel de batería y estado de proceso, visualizadas en la aplicación de interfaz con el usuario.

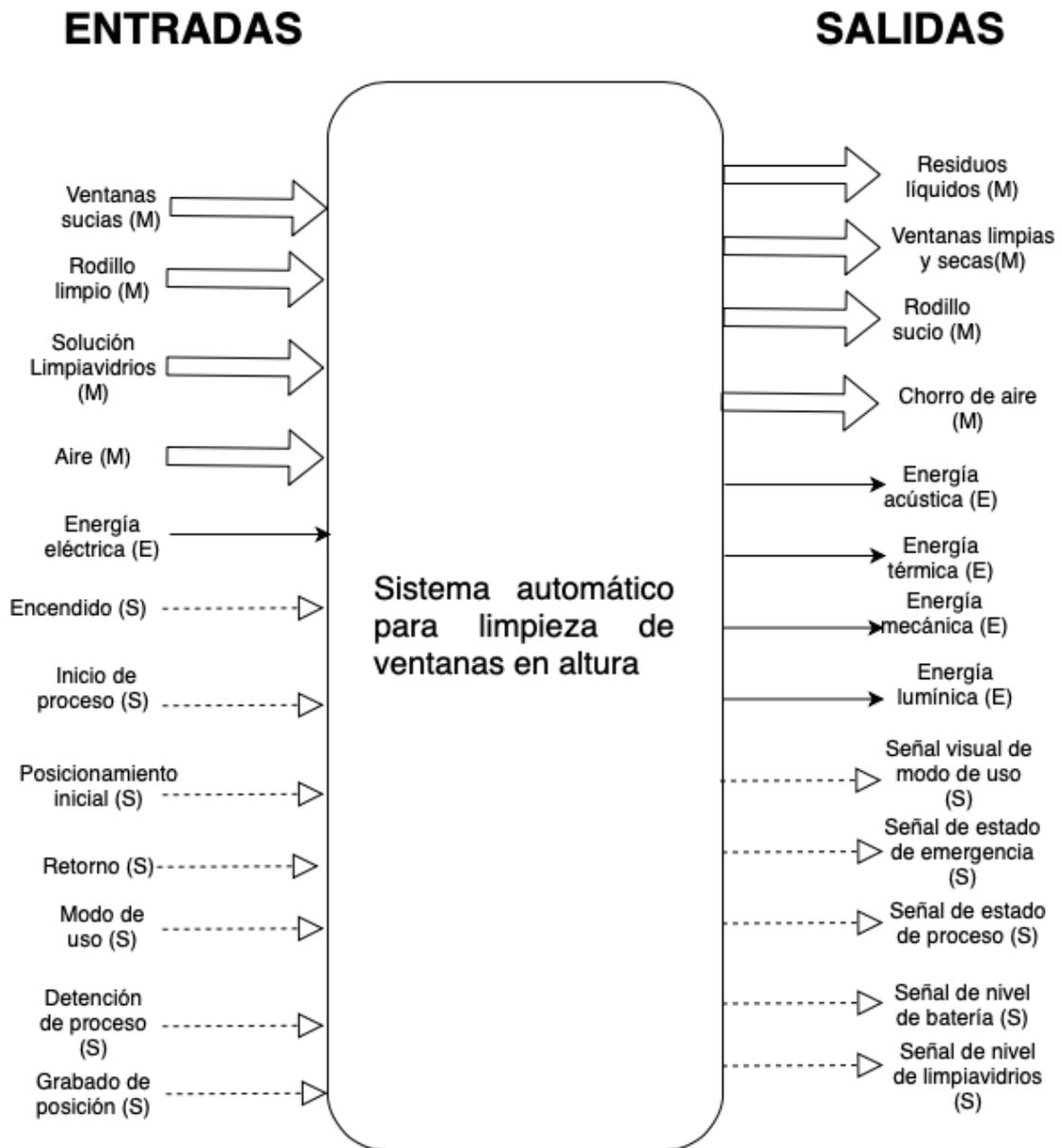


Figura 30. Black box del sistema

### 2.2.2 Lista de Funciones

A continuación, se presentan las funciones que el sistema debe desarrollar para cumplir con la función principal. Estas funciones son agrupadas en 6 subsistemas: Subsistema de materia, Subsistema de actuación, Subsistema de medición, Subsistema de energía, Subsistema de control y Subsistema de interfaz con el usuario.

#### 2.2.2.1 Subsistema de materia

- **Recibir limpiavidrios:** Se encarga de recibir y contener la solución del limpiavidrios.
- **Generar caudal para limpiavidrios:** Produce flujo del limpiavidrios desde el reservorio hasta el aspersor.
- **Rociar limpiavidrios:** Se encarga de esparcir la solución.
- **Limpiar ventanas:** Se encarga de retirar el polvo acumulado en los vidrios de las ventanas.
- **Secar ventanas:** Se encarga de retirar la humedad remanente, luego de haberse realizado la limpieza.
- **Adherirse a la superficie:** Mantiene en contacto el cepillo de limpieza con el vidrio.
- **Posicionar para adherencia:** Función que se encarga de aproximar el robot a la superficie para posibilitar la adherencia.
- **Desplazarse horizontalmente:** Función que se encarga de desplazar el BMU horizontalmente a través de la guía instalada en la parte superior del edificio.
- **Desplazarse verticalmente:** Función encargada de desplazar al robot verticalmente mediante el cable que lo sostiene desde el BMU.

### 2.2.2.2 Subsistema de actuación

- **Accionar adherencia:** Función que recibe como entrada una señal enviada por el controlador para accionar el actuador encargado del mecanismo de adherencia sobre la superficie vertical de vidrio.
- **Accionar desplazamiento vertical:** Función que, mediante un actuador, enrolla o desenrolla el cable que sostiene el robot para que se desplace verticalmente hacia arriba o abajo, respectivamente.
- **Accionar desplazamiento horizontal:** Función que permite el desplazamiento horizontal del BMU por los rieles, mediante un actuador.
- **Accionar rociador de limpiavidrios:** Esta función relaciona una señal de control y la activación del mecanismo para rociar líquido limpia vidrios sobre las ventanas.
- **Accionar mecanismo de limpieza:** Esta función se encarga de activar el mecanismo de limpieza por medio de un actuador.
- **Accionar secado de ventanas:** Esta función se encarga de activar el mecanismo de secado de ventanas, por medio de un actuador.
- **Accionar generación de caudal:** Función que se encarga de accionar el actuador para generar caudal del líquido limpia vidrios, gracias a una señal del controlador.
- **Accionar posicionamiento para adherencia:** Función que se encarga de accionar el mecanismo de acercamiento a la superficie de vidrio.
- **Energizar:** Función que se encarga de energizar eléctricamente al equipo.

### ***2.2.2.3 Subsistema de medición***

- **Sensar suciedad:** Función que se encarga de verificar la presencia de partículas ajenas a la superficie de vidrio.
- **Sensar distancia de contacto:** Esta función tiene como tarea medir la distancia entre el robot y el plano vertical de la ventana de vidrio.
- **Sensar nivel de solución de limpieza en tanque:** Esta función se encarga de medir la cantidad de limpia vidrios restante en el reservorio portable.
- **Sensar nivel de carga de batería:** Función que se encarga de medir el nivel de voltaje en la batería.
- **Grabar posición:** Función que permite guardar en la memoria del sistema la posición actual del robot respecto de la posición inicial.

### ***2.2.2.4 Subsistema de energía***

- **Acondicionar energía a actuadores:** Esta función se encarga de adecuar la energía eléctrica para el funcionamiento de los actuadores del sistema.
- **Acondicionar energía a sensores:** Función que acondiciona energía eléctrica para alimentar a los sensores.
- **Acondicionar energía para control:** Esta función se encarga de adecuar la energía eléctrica para el funcionamiento del controlador.
- **Almacenar energía:** Mediante esta función se almacena energía en la batería.

### ***2.2.2.5 Subsistema de control***

- **Ingresar datos y parámetros:** Esta función se encarga de recibir señales iniciales como inicio de proceso, modo de uso, posición inicial y retorno.

- **Controlar calidad de limpieza:** Esta función se encarga de controlar la óptima limpieza del vidrio de las ventanas gracias a la información provista por los sensores.
- **Controlar secado de ventanas:** Función que se encarga de controlar que las ventanas queden secas luego de rociar los líquidos para su respectiva limpieza.
- **Controlar posición:** Función que se encarga de controlar la variable posición del robot.
- **Controlar interfaz de usuario:** Función encargada de la interacción entre el sistema y el operario.
- **Controlar rociamiento de líquidos:** Función encargada de manejar el rociamiento de solución limpiadora.
- **Controlar batería de emergencia:** Esta función se encarga de controlar el uso de la batería de emergencia en caso de corte de suministro eléctrico.
- **Controlar generación de caudal:** Función encargada de controlar la generación del caudal necesario para el rociamiento de la solución limpiavidrios.
- **Controlar compresión de aire:** Función encargada de generar aire comprimido para los actuadores neumáticos.
- **Controlar posicionamiento para adherencia:** Función encargada de controlar el accionamiento del mecanismo encargado de posicionar el sistema para su respectiva adherencia.

#### ***2.2.2.6 Subsistema de interfaz con el usuario***

- **Mostrar estado de proceso, alarmas e indicadores:** Esta función se encarga de hacer visible señales y datos en la interfaz de interacción con el usuario. Además, gobierna el movimiento del robot mediante el mando remoto para realizar un proceso de limpieza teledirigido.

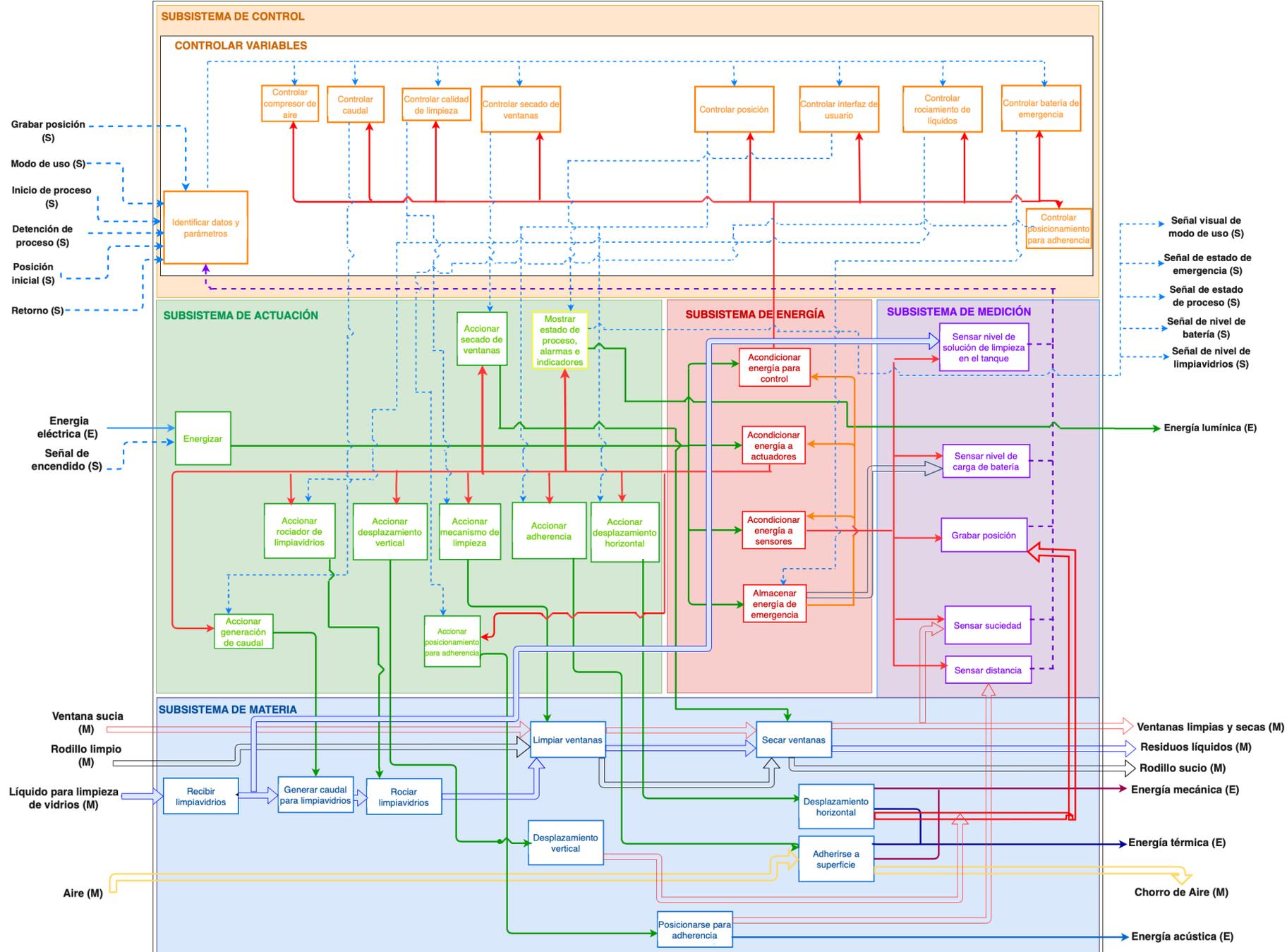


Figura 31. Diagrama de la estructura de funciones del sistema

## 2.3 Matriz Morfológica

En la matriz morfológica cada función dispone de tres portadores de solución, considerados a partir de las tecnologías expuestas previamente en el Estado del Arte (ver subcapítulo 1.3).

Además, la matriz estará dividida por subsistemas operacionales.

Solución 1: 

Solución 2: 

Solución 3: 

Tabla 5. Matriz morfológica

	<b>Función</b>	<b>Portador 1</b>	<b>Portador 2</b>	<b>Portador 3</b>
Subsistema de soporte y movimiento	Desplazamiento vertical	 Cabestrante		 Tirfor eléctrico
	Desplazamiento horizontal	 BMU	 Monorraiel	
	Grabar posición	 Módulo GPS	 IMU	 Encoder
	Accionar desplazamiento vertical	 Motor DC		 Motorreductor AC
	Accionar desplazamiento horizontal	 Motor DC		 Motorreductor AC

Tabla 5. Continuación - Matriz morfológica

	Función	Portador 1	Portador 2	Portador 3
Subsistema de limpieza	Recibir solución limpiavidrios	 Reservorio de plástico		 Reservorio de lona
	Limpiar ventanas	 Paños de microfibra	 Cepillo giratorio	 Rodillo recubierto de paños
	Secar ventanas	 Paños de microfibra	 Labio de goma	
	Rociar limpiavidrios		 Boquillas pulverizadoras	
	Generar caudal para limpiavidrios		 Mini bomba de diafragma eléctrica	
	Sensor nivel de solución de limpieza en el tanque	 Interruptor de flotador	 Sensor de nivel acústico	

Tabla 5. Continuación - Matriz morfológica

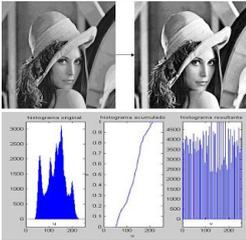
	Función	Portador 1	Portador 2	Portador 3
Subsistema de limpieza	Sensor suciedad	 <p>Procesamiento de imágenes</p>		 <p>Sensor fotoeléctrico</p>
	Accionar rociador de limpiavidrios	 <p>Motor DC</p>		
	Accionar mecanismo de limpieza	 <p>Motor DC</p>	 <p>Motor DC y motor a pasos</p>	
	Accionar secado de ventanas	 <p>Motor DC</p>	 <p>Desplazamiento vertical del robot usando un labio de goma</p>	
	Accionar generación de caudal	 <p>Mini bomba de diafragma eléctrica</p>		

Tabla 5. Continuación - Matriz morfológica

	<b>Función</b>	<b>Portador 1</b>	<b>Portador 2</b>	<b>Portador 3</b>
Subsistema de contacto con la superficie	Adherirse a superficie	 Succión por ventosas	 Succión por turbinas eléctricas	 Hélices
	Posicionarse para adherencia	 Hélices	 Succión por turbinas eléctricas	 Succión por turbinas eléctricas
	Sensor distancia de contacto	 Sensor capacitivo	 Sensor infrarrojo	 Sensor ultrasónico
	Accionar adherencia	 Motor brushless	 Motor brushless	 Eyectores de vacío
	Accionar posicionamiento para adherencia	 Motor brushless	 Motor brushless	 Eyectores de vacío

Tabla 5. Continuación - Matriz morfológica

	<b>Función</b>	<b>Portador 1</b>	<b>Portador 2</b>	<b>Portador 3</b>
Subsistema de energía	Energizar	 Llave termomagnética		 Interruptor rotativo
	Acondicionar energía a actuadores, sensores y controlador	 Fuente conmutada	 Regulador de voltaje	
	Almacenar energía de emergencia	 Batería Li-Po	 Batería Nimh	 Batería Nicd
Subsistema de control	Controlar variables, procesos y procesamiento de señales	 Microcomputador		
	Sensar nivel de carga de batería	 Módulo indicador de nivel de voltaje		
	Identificar datos y parámetros	 Wi-Fi		 Bluetooth
Subsistema de interfaz con el usuario	Mostrar estado de procesos, alarmas e indicadores	 Pantalla de celular		

## 2.4 Conceptos de Solución

A partir de las soluciones elaboradas en la Matriz Morfológica, se bosquejan tres propuestas viables; las cuales muestran la geometría general del sistema, la distribución de componentes y algunas dimensiones generales. A continuación, se explica cada uno de los conceptos de solución acompañados de sus respectivos bosquejos generales.

### 2.4.1 Concepto de Solución 1

En el presente concepto de solución, el robot (1) está unido mediante un cable (2) a un cabezal (3), lo que permite tanto el desplazamiento vertical, como horizontal, ya que éste se moviliza sobre un monorraíl (4) instalado en la parte superior del edificio.

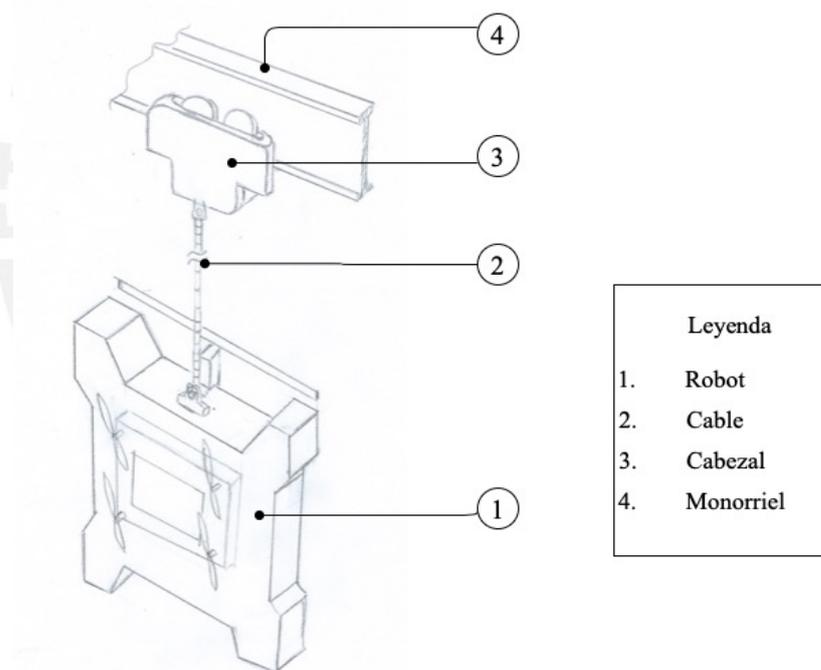


Figura 32. Bosquejo del concepto de solución 1

Se plantea una limpieza de ventanas por medio de dos discos de 200mm de diámetro (5) recubiertos por una capa de microfibras. Paralelamente, se utilizará una solución (6) de agua limpia y líquido para limpiar vidrios rociada por medio de pulverizadores (7). Esta mezcla se encuentra dentro de dos reservorios de plástico (8) ubicados en el interior del robot y es bombeada hacia las boquillas para ser rociada sobre las ventanas.

Además, se cuenta con un labio de goma (9) en la parte superior, con el fin de poder escurrir los líquidos residuales de los vidrios. El sistema también contempla una verificación de la limpieza de las ventanas para determinar si esta ha sido óptima; para ello, se utilizarán sensores fotoeléctricos (10) que de acuerdo con el nivel de intensidad de luz reflejada podrán determinar el nivel de transparencia del cristal de la ventana.

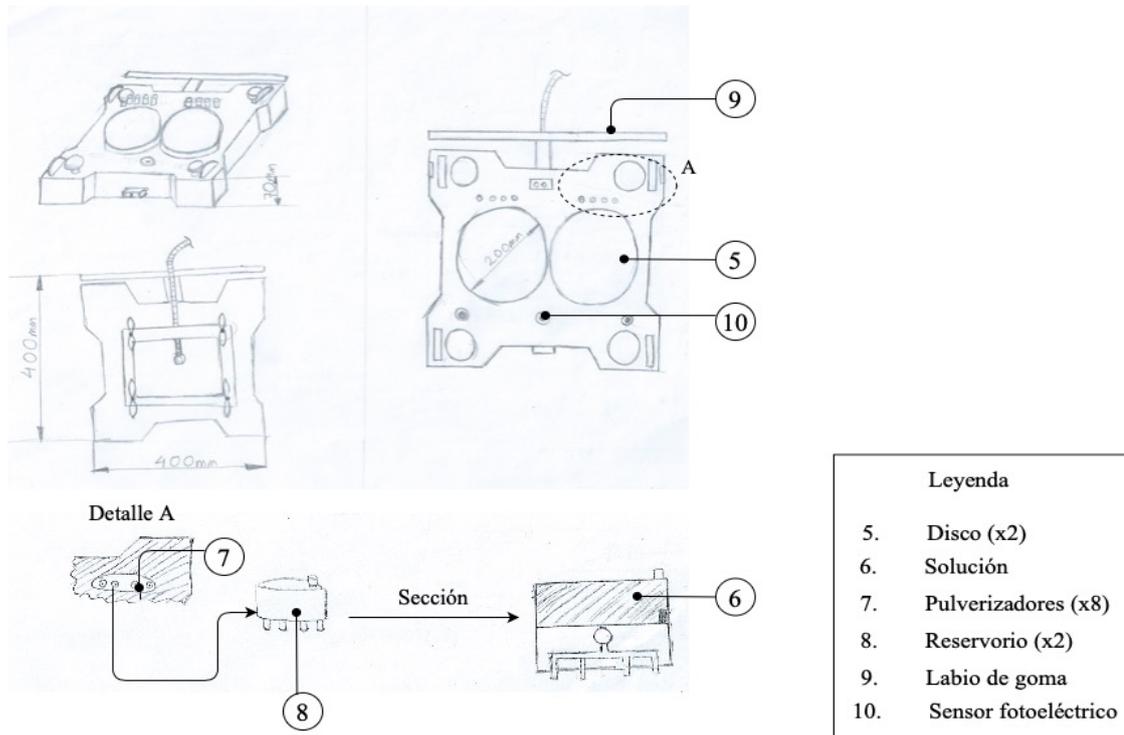


Figura 33. Concepto de solución 1- Detalle de bombeo y elementos de limpieza

El diseño considera necesario contar con aire comprimido para poder alimentar al sistema neumático de generación de vacío encargado de la adherencia a la superficie vertical de las ventanas por medio de ventosas (11). Un juego de 4 hélices (12) se encarga de acercar al robot a la superficie de vidrio hasta una distancia en la que la succión de las ventosas pueda mantener adherido al sistema.

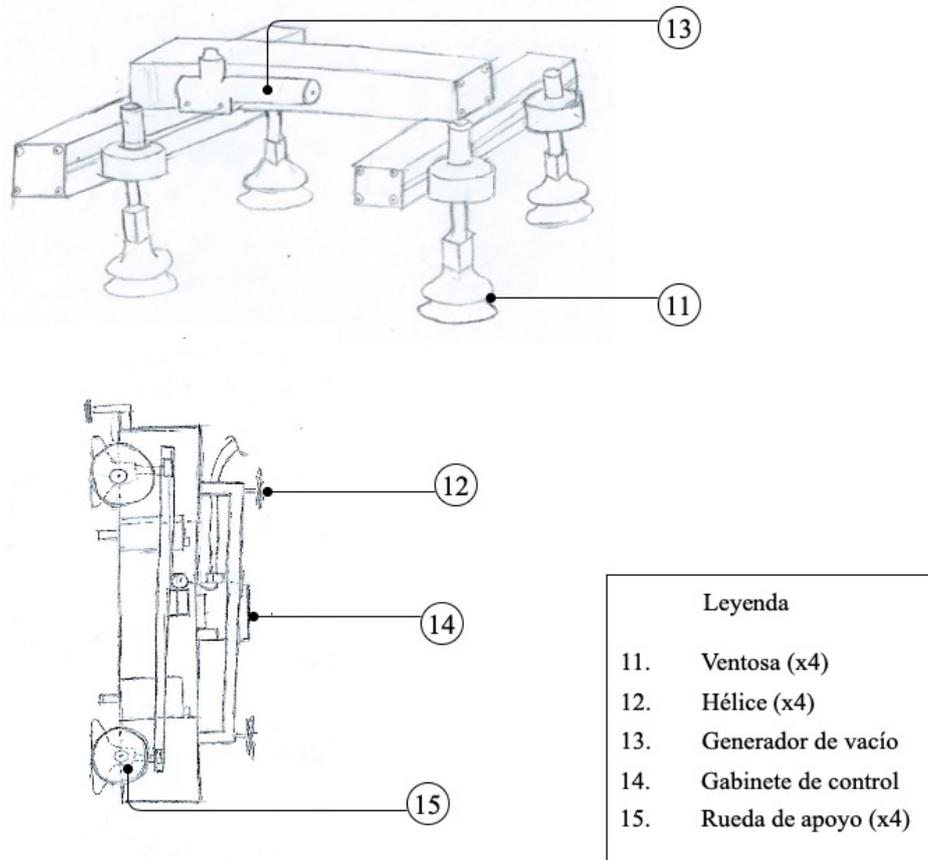


Figura 34. Concepto de solución 1- Detalle de sistema de vacío y vista de perfil del robot

### 2.4.2 Concepto de Solución 2

En el segundo concepto de solución se propone un sistema de limpieza compuesto por un cepillo (1) giratorio mediante un motor DC (2), un rodillo (3) recubierto de paños de microfibra para el secado de las ventanas y una solución de agua limpia y líquido para limpieza de vidrios. La adherencia del sistema con la superficie de vidrio de las ventanas es llevada a cabo por medio de 4 turbinas EDF (Electric Ducted Fan, por sus siglas en inglés) (4). El sistema se moviliza tanto vertical como horizontalmente por la superficie de vidrio mediante un cabezal que se desplaza a lo largo de un monorraíl instalado previamente en la parte superior del edificio. La distancia desde la posición actual del robot hasta el suelo se medirá por medio de un sensor láser de largo alcance (5), el cual estará ubicado en la parte inferior del sistema. La verificación de la limpieza óptima de

las ventanas se llevará a cabo mediante procesamiento de imágenes mediante una cámara (6) ubicada en la parte superior del robot.

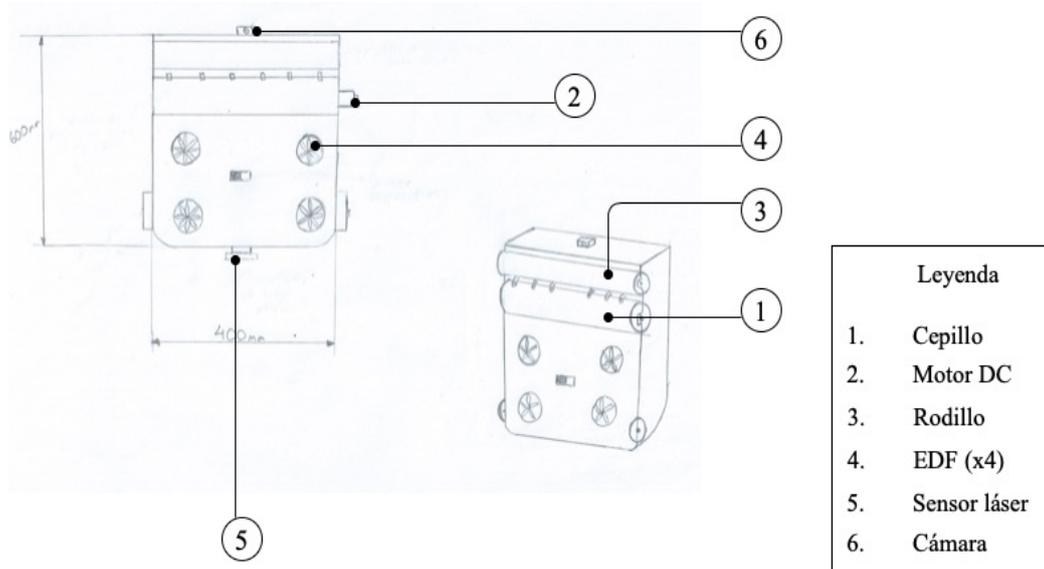


Figura 35. Concepto de solución 2

El cepillo se humedecerá periódicamente a través del rociamiento de la solución por medio de conductos (7) ubicados en la parte superior del rodillo. Este líquido se encuentra dentro de un tanque (8) ubicado en la parte superior del robot y es bombeado hacia los conductos cuando se abre la electroválvula (9) encargada del paso del fluido.

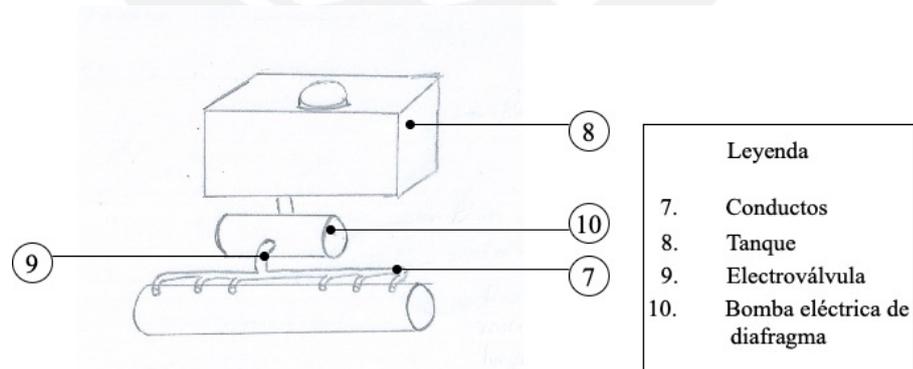


Figura 36. Concepto de solución 2-Detalle del sistema de bombeo de limpiavidrios

### 2.4.3 Concepto de Solución 3

El sistema consta de un cepillo (1) giratorio como elemento de limpieza, el cual se desplaza verticalmente empleando un motor a pasos (2) con un mecanismo husillo-tuerca (3) que cuenta con dos guías laterales (4) para evitar el desalineamiento.

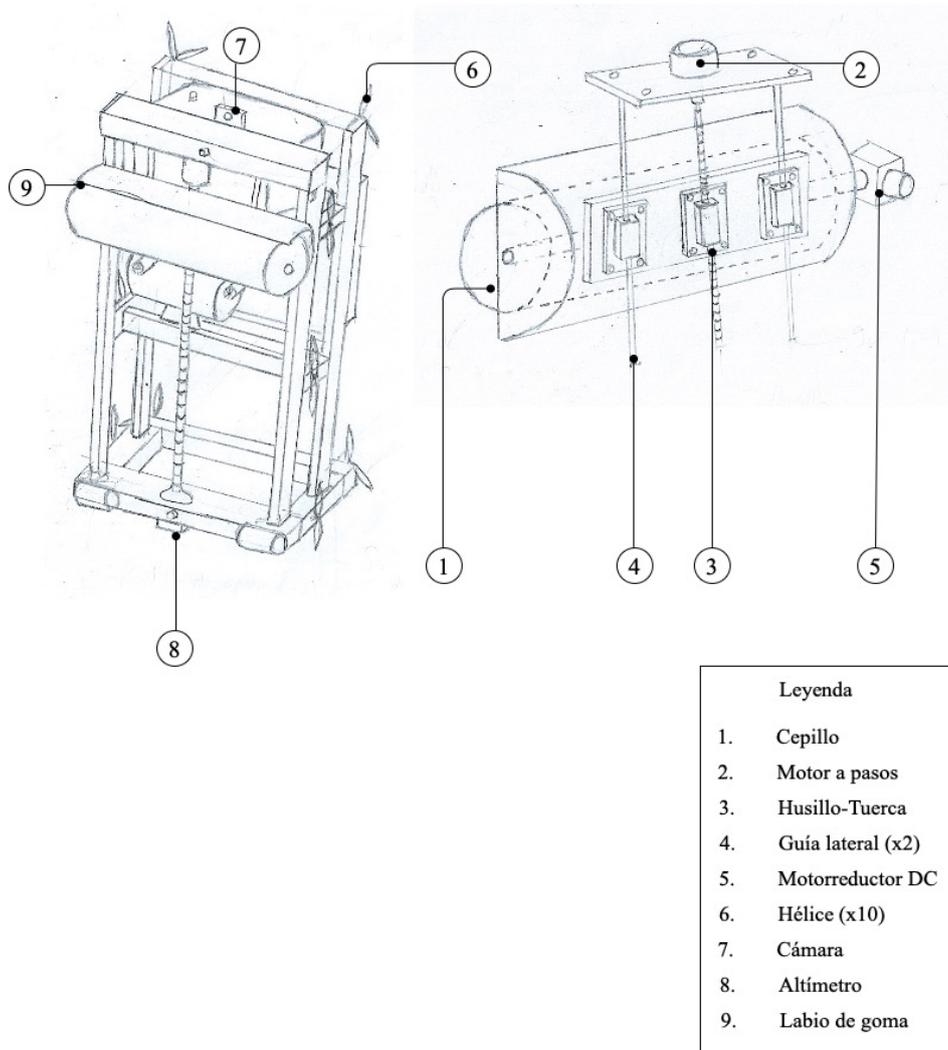


Figura 37. Concepto de solución 3 y detalle del mecanismo de husillo-tuerca

Para evitar el daño sobre la superficie por el efecto abrasivo se emplea una solución limpiavidrios, la cual se encuentra en un reservorio (10) en la parte posterior del robot (Figura 38). Un labio de goma (9) ubicado en la parte superior facilita el escurrimiento del agua residual. Con la finalidad de evitar inestabilidad sobre el robot colgante, provocada por el viento y el efecto pendular del cable de sujeción, se emplean

propulsores eólicos, los cuales consisten en 10 hélices (6) ubicadas en la parte posterior y lateral del robot.

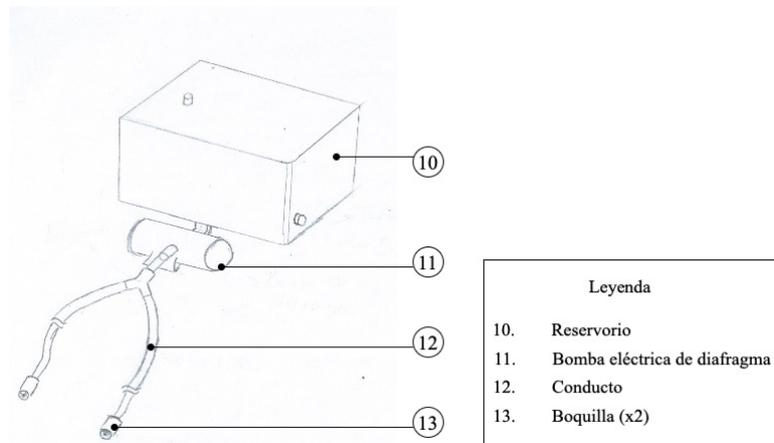


Figura 38. Concepto de solución 3-Detalle de sistema de bombeo de limpiavidrios

El desplazamiento se llevará a cabo por medio de un sistema BMU portátil (14) instalado sobre un riel (15) en la parte superior del edificio que estará conectado al robot mediante un cable (16). De esta manera, el desplazamiento horizontal sobre la superficie de vidrio se realizará mediante la movilización sobre el riel; mientras que el desplazamiento vertical se llevará a cabo a través de un tirfor eléctrico (17) encargado de enrollar o desenrollar el cable sujetador (Figura 39).

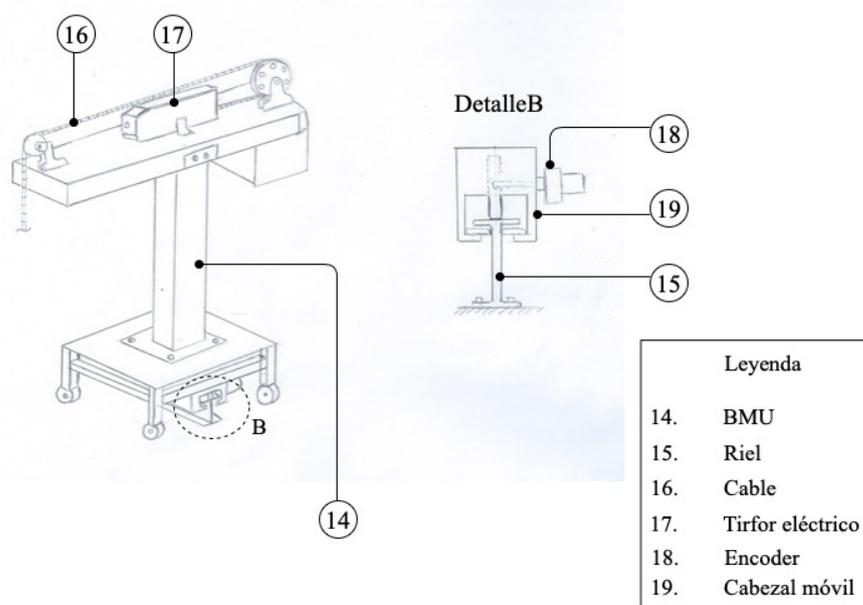


Figura 39. Concepto de solución 3 – BMU y detalle de cabezal móvil

Además, el sensado de la posición en la que se encuentra el robot en el eje horizontal es realizado por medio de un encoder (18) en el motor del cabezal (19) del BMU que está en contacto con el riel; mientras que la posición en el eje vertical se da por medio de un altímetro (8). Finalmente, la verificación de la limpieza óptima de las ventanas se llevará a cabo mediante procesamiento de imágenes mediante una cámara (7) ubicada en la parte superior del robot.



## 2.5 Evaluación Técnico-Económica

En este subcapítulo se realiza una evaluación de los conceptos de solución planteados, tomando en cuenta criterios técnicos y económicos relevantes para la viabilidad del proyecto. A continuación, se presentará la descripción de cada uno de los criterios escogidos.

### Evaluación técnica

1. Fabricación: Los procesos de fabricación requeridos pueden realizarse en talleres con equipamiento estándar. No se requieren procesos complejos y especializados para la implementación de la solución.
2. Facilidad de montaje: El montaje del sistema realizado previo al uso del equipo no presenta mayor complejidad para los operarios encargados.
3. Peso: El peso del elemento que se suspende en el aire es mínimo.
4. Seguridad: El uso del sistema no compromete la integridad física del usuario o de las personas a su alrededor.
5. Lista de requerimientos: El sistema cumple plenamente las condiciones con la mayor cantidad condiciones requeridas.
6. Duración: El proceso de limpieza se realiza en un lapso reducido.
7. Mantenimiento: El mantenimiento y la limpieza del equipo no requiere un procedimiento complejo. Además, las partes o elementos que sufren mayor desgaste son de fácil adquisición.
8. Control de calidad: El sistema cuenta con un procedimiento de control de calidad que garantiza un desempeño correcto del equipo.
9. Dimensiones: El volumen del robot es pequeño, de tal forma que facilite su movilización.
10. Autonomía: El robot puede operar un tiempo considerable sin requerir energía de alimentación externa y/o suministros para limpieza.

11. Durabilidad: Los componentes requeridos tienen un tiempo de vida alto.

Tabla 6. Evaluación técnica de los conceptos de solución

EVALUACIÓN TÉCNICA										
Peso de criterio (G): 1=Baja importancia, 2=Medianamente importante, 3=Importante, 4=Indispensable										
Puntaje de alternativa (P): 0= No satisface, 1=Pobre, 2=Suficiente, 3=Bien, 4=Muy bien (Ideal)										
Nº	Criterio	Peso	Alternativa							
			Solución 1		Solución 2		Solución 3		Ideal	
		Gi	P1	GP	P2	GP	P3	GP	PI	GP
1	Fabricación	3	2	6	2	6	3	9	4	12
2	Facilidad de montaje	4	2	8	1	4	3	12	4	16
3	Peso	4	2	8	1	4	3	12	4	16
4	Seguridad	4	3	12	3	12	3	12	4	16
5	Lista de requerimientos	4	3	12	2	8	3	12	4	16
6	Duración	2	1	2	3	6	3	6	4	8
7	Mantenimiento	3	3	9	2	6	3	9	4	12
8	Control de calidad	1	2	2	1	1	3	3	4	4
9	Dimensiones	3	1	3	2	6	2	6	4	12
10	Autonomía	3	2	6	1	3	2	6	4	12
11	Durabilidad	3	2	6	2	6	3	9	4	12
TOTAL			23	74	20	62	31	96	44	136
Ponderado técnico Xi			0.523		0.455		0.705		1.000	

### Evaluación económica

1. Número de piezas: El sistema tiene un reducido número de piezas, lo que podría implicar una menor complejidad en el armado, mantenimiento y fabricación, dando como consecuencia un menor gasto en mano de obra.
2. Adquisición de materiales: Los materiales para la fabricación son de amplia disponibilidad y de relativo bajo costo.

3. Costo de tecnología: Las tecnologías empleadas en la solución son de uso masivo y con pocas restricciones para su implementación. Están disponibles abiertamente y al alcance de cualquiera.
4. Número de operarios: Se requiere de pocos operarios para la puesta en operación y el manejo.
5. Costos de instalación del sistema: La puesta en operación del sistema requiere un procedimiento de instalación simple y de bajo costo.
6. Disponibilidad de repuestos: Los componentes a usar son de amplio uso y de fácil adquisición.
7. Consumo energético: Requiere la menor cantidad de energía para realizar la operación.

Tabla 7. Evaluación económica de los conceptos de solución

EVALUACIÓN ECONÓMICA										
Peso de criterio (G): 1=Baja importancia, 2=Medianamente importante, 3=Importante, 4=Indispensable										
Puntaje de alternativa (P): 0= No satisface, 1=Pobre, 2=Suficiente, 3=Bien, 4=Muy bien (Ideal)										
Nº	Criterio	Peso	Alternativa							
			Solución 1		Solución 2		Solución 3		Ideal	
		Gi	P1	GP	P2	GP	P3	GP	PI	GP
1	Número de piezas	3	1	3	3	9	3	9	4	12
2	Adquisición de materiales	4	2	8	3	12	3	12	4	16
3	Costo de tecnología	3	1	3	2	6	3	9	4	12
4	Número de operarios reducido	4	3	12	3	12	3	12	4	16
5	Costos de instalación del sistema	3	2	6	2	6	2	6	4	12
6	Disponibilidad de repuestos	3	2	6	3	9	3	9	4	12
7	Consumo energético	2	2	4	3	6	2	4	4	8
TOTAL			13	42	19	60	19	61	28	88
Ponderado económico Yi			0.464		0.679		0.679		1.000	

A partir de las tablas 5 y 6, se realiza un gráfico de dispersión en el que se plasman los promedios de cada solución (Figura 40), en el que se evidencia una ventaja notable tanto en el aspecto técnico como en el económico del concepto de solución 3, pues destaca en ambos criterios y se encuentra muy cerca a la línea de simetría, lo que evidencia el equilibrio adecuado entre lo técnico y lo económico.

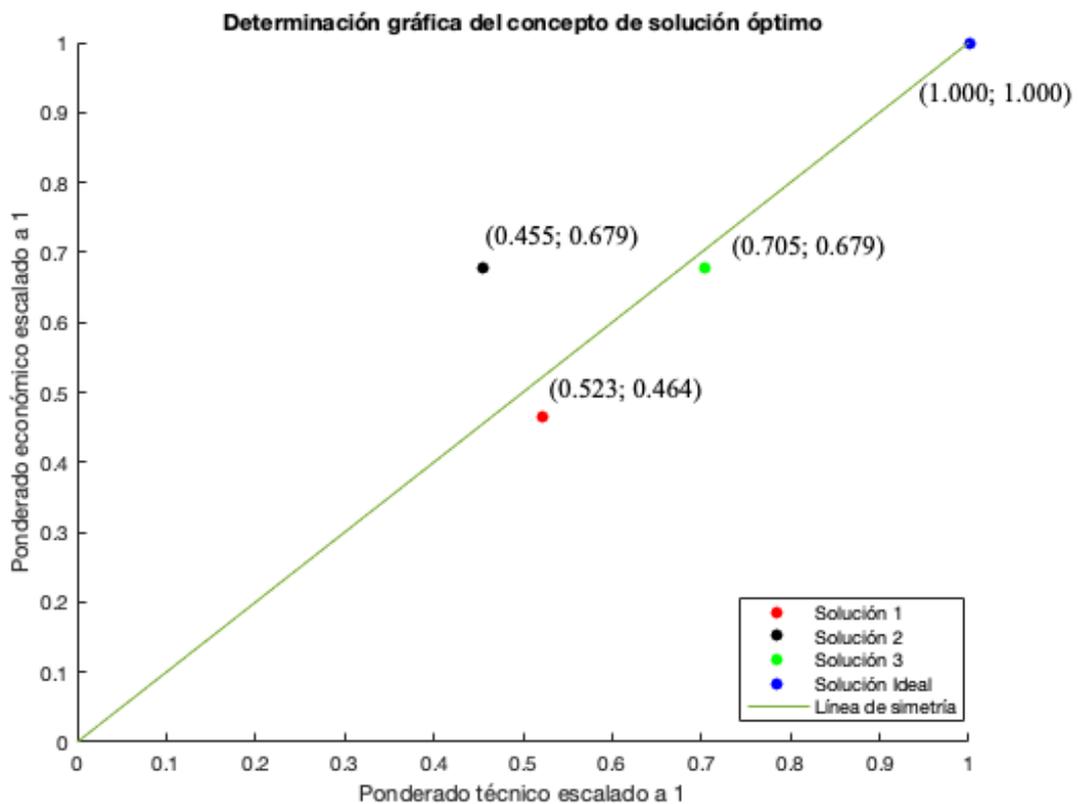


Figura 40. Gráfico de dispersión

## 2.6 Concepto de solución óptimo

El diseño está conformado por un robot de 1000mm x 650mm x 400mm sostenido por un BMU portátil instalado en la azotea del edificio a limpiar (Figura 41). El elemento principal para la limpieza de las ventanas es un cepillo de cerdas, el cual gira por medio de un motor DC y se desplaza verticalmente a través de dos guías mediante un husillo y un motor a pasos. Además, la solución limpiavidrios estará almacenada en un reservorio de plástico dentro del módulo y será rociada sobre las ventanas a través de dos boquillas ubicadas debajo del cepillo.

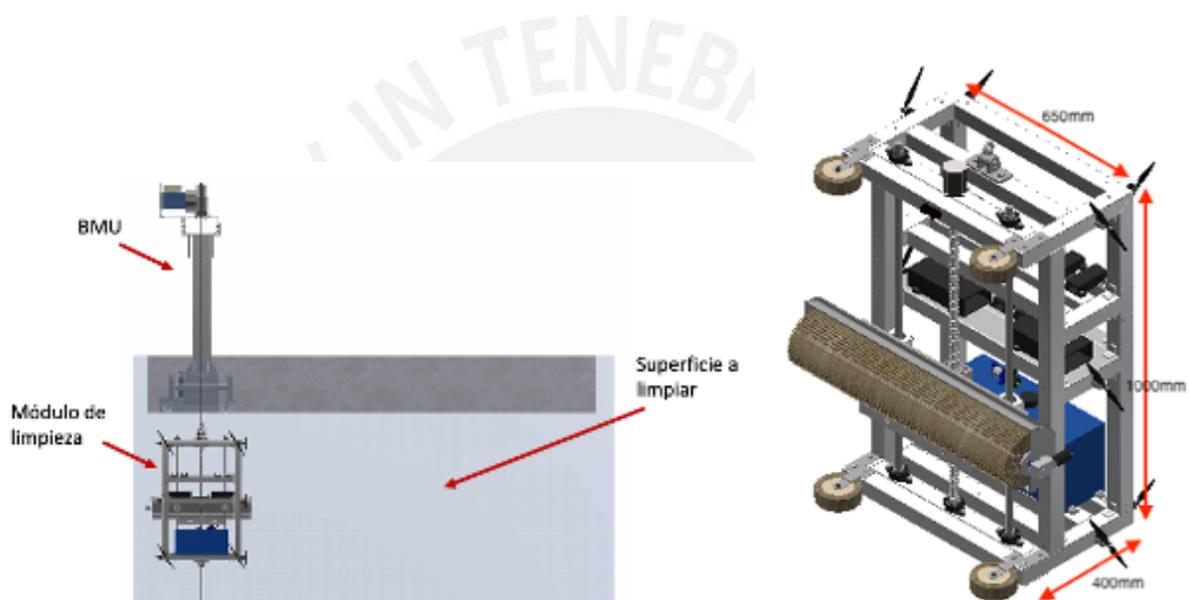


Figura 41. Concepto de solución óptimo  
A: BMU sosteniendo al robot; B: Vista isométrica del robot

### 2.6.1 Subsistema de limpieza

La limpieza propiamente dicha de los edificios estará a cargo del presente subsistema, compuesto por un cepillo giratorio y el mecanismo de asperjado de líquido limpiavidrios. Como ya se mencionó anteriormente, el cepillo motorizado podrá deslizarse por dos guías utilizando un husillo y su respectivo motor a pasos (Figura 42).

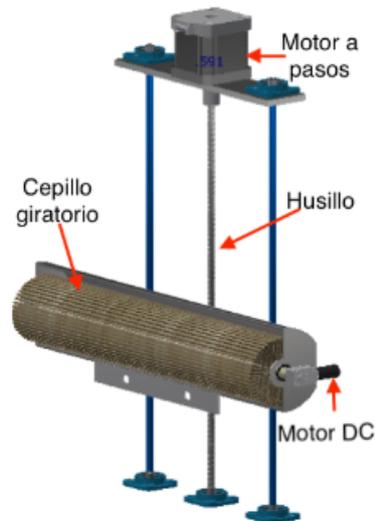


Figura 42. Subsistema de limpieza

Además, se utilizarán dos sensores de fin de carrera ubicados a los extremos del husillo para indicarle al mecanismo cuando detenerse. En la parte inferior del cepillo se ubicarán dos boquillas por donde se rociará la solución limpiavidrios gracias a una mini bomba de diafragma eléctrica conectada mediante un conducto a un reservorio de plástico ubicado en la zona inferior del robot (Figura 43).

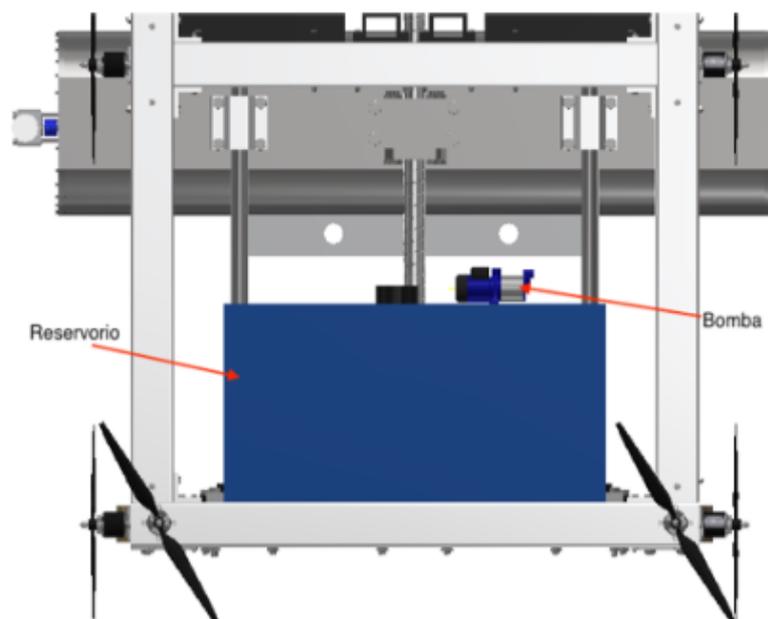


Figura 43. Vista posterior

### 2.6.2 Subsistema de soporte y movimiento

El presente subsistema tiene como tarea encargarse del desplazamiento del robot tanto vertical como horizontalmente mediante un BMU instalado en la azotea del edificio a ser limpiado. El desplazamiento vertical se lleva a cabo mediante un tirfor eléctrico, ubicado en la mitad de la viga superior del BMU, que permite el paso bidireccional de un cable de acero. Un extremo de este cable sostiene al módulo de limpieza; mientras que el otro se encuentra apoyado en una polea ubicada a una distancia por debajo del módulo de limpieza (Figura 44).

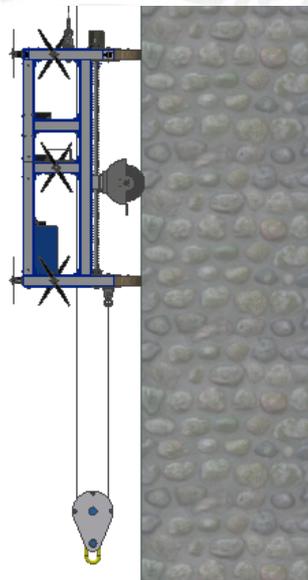


Figura 44. Vista lateral del robot

Esta distancia variará dependiendo de la altura del edificio a limpiar, ya que la longitud del cable que cuelga del BMU se debe mantener constante para evitar un torque variable. Por otro lado, el desplazamiento horizontal es realizado mediante el movimiento del BMU a lo largo de un riel anclado al suelo de la parte superior del edificio (Figura 45). Para medir la posición actual del robot relativa a la superficie a limpiar se utilizará un encoder acoplados al motor del cabezal en contacto con el riel y un altímetro.

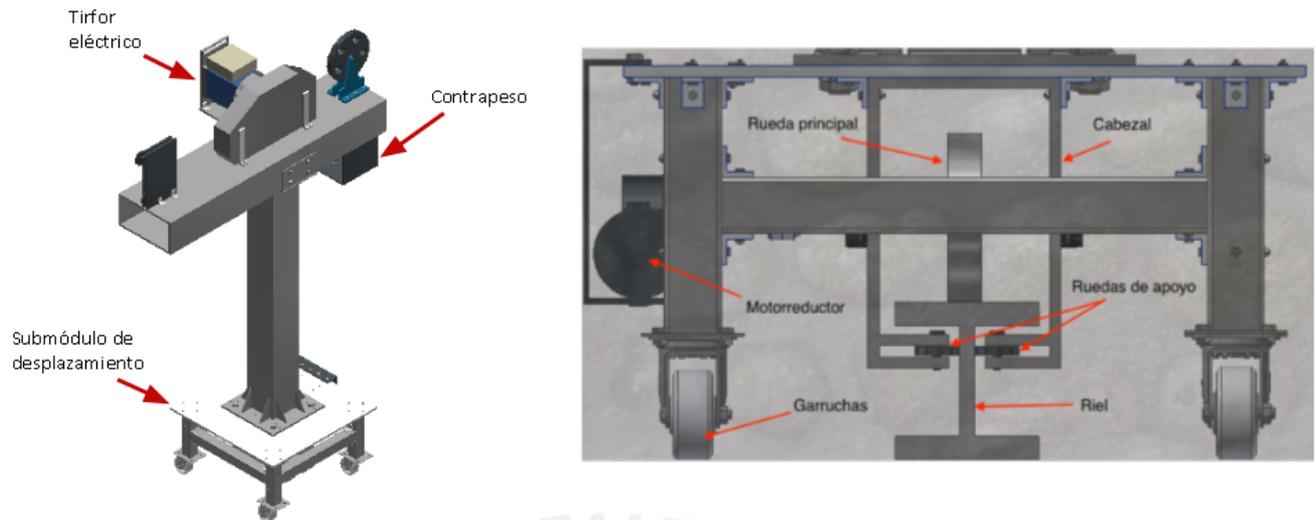


Figura 45. BMU portátil  
A: BMU; B: Detalle de cabezal

### 2.6.3 Subsistema de contacto con la superficie

El presente subsistema se encarga de generar la fuerza necesaria para la aproximación del robot a la superficie vertical de vidrio de las ventanas. La acción de cuatro hélices empuja al módulo contra el vidrio hasta aproximarlo y hacer contacto con la ventana para poder activar el mecanismo de limpieza (Figura 46). Estas hélices son accionadas por cuatro motores brushless, los cuales son controlados por medio de un driver. Además, se cuenta con un sensor de proximidad infrarrojo encargado de medir constantemente la distancia entre la superficie de vidrio a ser limpiada y el módulo: si se pierde la distancia necesaria para generar el contacto, las hélices generarán la fuerza de empuje.

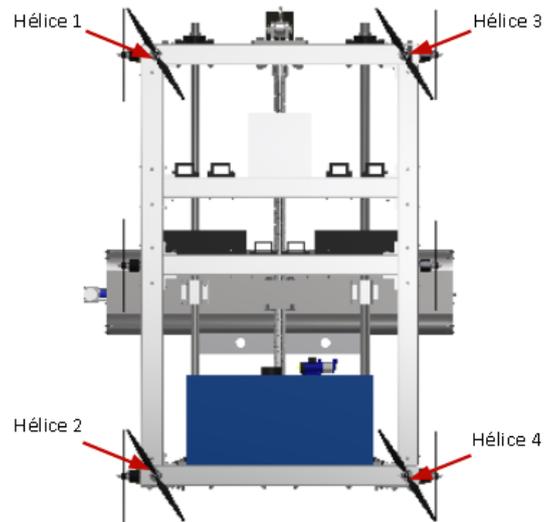


Figura 46. Hélices posteriores

#### 2.6.4 Subsistema para equilibrar la fuerza del aire

Debido a que el módulo de limpieza va a desempeñarse en alturas considerables, se debe tomar en cuenta la fuerza provocada por el aire que podría ocasionar un movimiento de tipo pendular. Para poder contrarrestar este efecto, se utilizará un subsistema compuesto por un acelerómetro, para sensar la inclinación; y tres hélices ubicadas a ambos lados del módulo de limpieza, encargadas de generar la fuerza necesaria para mantener el equilibrio (Figura 47).

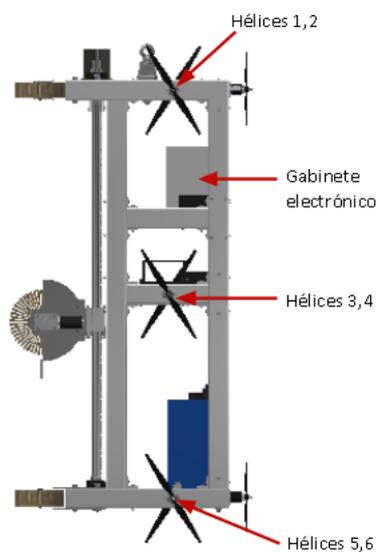


Figura 47. Hélices laterales

## Conclusiones

- Tomando como base la metodología de diseño de sistemas técnicos y productos VDI 2221, se ha logrado realizar el diseño conceptual de un sistema automático para limpiar ventanas en edificios de altura, el cual contempla la elaboración de un concepto de solución óptimo a partir de una investigación previa del estado del arte. Se elaboró una lista de requerimientos, se plantearon tres conceptos de solución a partir de la matriz morfológica, se escogió una solución óptima previa evaluación técnico-económica y se elaboró un modelado CAD.
- Se logró identificar el origen de la problemática en el proceso de limpieza de ventanas en altura, a través de una investigación de los accidentes ocurridos en los últimos años tanto en el Perú como en el extranjero.
- A partir de la investigación realizada en el estado del arte, se pudo encontrar diversos dispositivos comerciales que tratan de dar solución a la problemática planteada al inicio del presente trabajo; no obstante, todos estos productos se comercializan en el extranjero, por lo que en el Perú aún se siguen utilizando los métodos tradicionales de limpieza de ventanas.
- Se logró elaborar una lista de requerimientos tomando en cuenta las necesidades principales de los posibles clientes, en base a las cuales se han desarrollado los conceptos de solución.
- Se dividió la problemática principal en problemas más simples, resueltos por funciones parciales que fueron plasmadas en la gráfica de la Estructura de Funciones (EDF).
- Con el diseño de la solución óptima, se puede demostrar que es factible la elaboración de un equipo automático de bajo costo para limpieza de ventanas de vidrio en edificios de altura, ya que las tecnologías a emplearse son ampliamente disponibles y de uso común en el desarrollo de proyectos.

## Bibliografía

- Albagul, A., Asseni, A., Jomah, O., Omer, M., & Farge, B. (2010). *Design and fabrication of an automatic window cleaning robot*. Recuperado de:  
[https://www.researchgate.net/publication/228808015\\_Design\\_and\\_fabrication\\_of\\_an\\_automatomatic\\_window\\_cleaning\\_robot](https://www.researchgate.net/publication/228808015_Design_and_fabrication_of_an_automatomatic_window_cleaning_robot)
- Allen, C., Pawson, R., Farsi, M., & Johnson, P. (1993). *Patent No. EP0642318B1*.  
 Recuperado de:  
<https://patents.google.com/patent/EP0642318B1/en?q=window&q=washing&q=robot&oq=window+washing+robot>
- Alvarado, J. (2015). *Diseño de un móvil escalador de paredes laterales y superiores para inspección en trabajos de construcción civil* (Pontificia Universidad Católica del Perú).  
 Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/5943>
- Bolton, W. (2006). *Programmable Logic Controlers* (4th ed.). Oxford: Elsevier.
- Elkmann, N., Kunst, D., Krueger, T., Lucke, M., Böhme, T., Felsch, T., & Sürze, T. (2005). *SIRIUSc — Facade Cleaning Robot for a High-Rise Building in Munich, Germany*.  
 Recuperado de: [https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/3-540-29461-9\\_101.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/3-540-29461-9_101.pdf)
- Farden, J. (2003). *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications* (3rd ed.). San Diego: Springer.
- Gambao, E., & Hernando, M. (2006). Control System for a Semi-automatic Façade Cleaning Robot. *2006 Proceedings of the 23rd ISARC*, 406–411.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.22260/ISARC2006/0078>
- Huerta, E., Mangiaterra, A., & Noguera, G. (2005). *GPS Posicionamiento Satelital*. Rosario: UNR Editora.
- Instituto de Estudios Sindicales. (2017). Estadísticas 2017 sobre seguridad y salud en el trabajo. Recuperado Marzo 31, 2019, de  
[https://www.iesiperu.org.pe/index.php?option=com\\_content&view=article&id=460&catid=102&Itemid=949](https://www.iesiperu.org.pe/index.php?option=com_content&view=article&id=460&catid=102&Itemid=949)
- Kamal, R. (2011). *Embedded Systems – Architecture, Programming and Design* (2nd ed.). Nueva Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company.
- Kim, H. J. (2009). *Patent No. KR20080054130A*. Recuperado de  
<https://patents.google.com/patent/KR101003486B1/en?q=window&q=washing&q=robot&oq=window+washing+robot>
- Kumar, V., Kumar, P., Prasad, B. G., & Razeequlla, S. (2014). Design and Fabrication of Automated Glass Curtain Cleaning Machine. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH*, 3(9), 197–200. Recuperado de:  
<http://www.ijstr.org/final-print/sep2014/Design-And-Fabrication-Of-Automated-Glass-Curtain-Cleaning-Machine.pdf>

- Laboratorio de Sensores y Actuadores. (2017). *Guía: Sensores de distancia y actuador lineal*. Lima: PUCP.
- Microfiber Wholesale. (2019). How Microfiber works. Recuperado Abril 8, 2019, de <http://www.microfiberwholesale.com/info/knowledgebase/microfiber-works/>
- Ministerio de vivienda construcción y saneamiento. (2018). *Norma E.020 - Vivienda* (p. 7). p. 7. Lima.
- Nomdedu, L., Sales, J., Marín, R., Cervera, E., & Aez, J. S. (2011). Sensing capabilities for mobile robotics. In Y. Baudoin & K. Maki (Eds.), *Using Robots in Hazardous Environments* (1st ed., pp. 125–146). <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857090201.2.125>
- Occupational Safety and Health Administration. (2018). Accident Search Results. Recuperado Agosto 10, 2019, de [https://www.osha.gov/pls/imis/AccidentSearch.search?acc\\_keyword=%22Window Washer%22&keyword\\_list=on](https://www.osha.gov/pls/imis/AccidentSearch.search?acc_keyword=%22Window Washer%22&keyword_list=on)
- Perdigones, J. M. (2011). *MF1087\_1: Limpieza de cristales en edificios y locales*. (1st ed.). Málaga: IC Editorial.
- Schmalz. (2019). Conocimientos y conceptos básicos.
- Varghese, S. (2016). Facade Access Systems & Building Maintenance Units (BMU). Recuperado Agosto 13, 2019, de <https://www.linkedin.com/pulse/facade-access-systems-building-maintenance-units-bmu-shanu-varghese>