



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA
UNIDAD QUERÉTARO**

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA AVANZADA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT DE CINCO
GRADOS DE LIBERTAD PARA TAREAS DE SERVICIO EN
SUPERFICIES VERTICALES.”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN TECNOLOGÍA AVANZADA

PRESENTA:
ING. GINNA MARCELA GARCÍA RODRÍGUEZ

DIRECTOR DE TESIS
DR. EDUARDO CASTILLO CASTAÑEDA



Santiago de Querétaro, Qro, mayo 2022.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-13
REP 2017

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Ciudad de México, a 6 de junio del 2022

El Colegio de Profesores de Posgrado de **CICATA Unidad Querétaro** en su Sesión Ordinaria No. 220603 celebrada el día 03 del mes junio del 2022, conoció la solicitud presentada por el alumno:

Apellido Paterno:	GARCÍA	Apellido Materno:	RODRÍGUEZ	Nombre (s):	GINNA MARCELA
--------------------------	--------	--------------------------	-----------	--------------------	---------------

Número de registro:

B	2	0	0	5	4	6
---	---	---	---	---	---	---

del Programa Académico de Posgrado:

Maestría en Tecnología Avanzada

Referente al registro de su tema de tesis; acordando lo siguiente:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT DE CINCO GRADOS DE LIBERTAD PARA TAREAS DE SERVICIO EN SUPERFICIES VERTICALES.
--

Objetivo general del trabajo de tesis:

DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO ELECTROMECAÁNICO, SEMIAUTÓNOMO Y MÓVIL, BASADO EN UNA CONFIGURACIÓN CARTESIANA, PARA TAREAS DE SERVICIO EN SUPERFICIES VERTICALES.

2.- Se designa como Directores de Tesis a los profesores:

Director:

DR. EDUARDO CASTILLO CASTAÑEDA

 2° Director:

--

No aplica:

3.- El Trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:

CICATA-Unidad Queretaro

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente, hasta la aprobación de la versión completa de la tesis por parte de la Comisión Revisora correspondiente.

Director de Tesis

Dr. Eduardo Castillo Castañeda

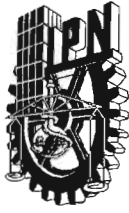
2° Director de Tesis

Presidente del Colegio

Dr. Juan Bautista Huidobro Ramos
DIRECCIÓN

Aspirante

Ginna Marcela García Rodríguez



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de siendo las horas del día del mes de del se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de: para examinar la tesis titulada:

del (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	GARCÍA	Apellido Materno:	RODRÍGUEZ	Nombre (s):	GINNA MARCELA
-------------------	--------	-------------------	-----------	-------------	---------------

Número de registro:

Aspirante del Programa Académico de Posgrado:

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 17% de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo **SI** **NO** **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN:

Ninguno de los documentos citados en el reporte rebasa el 1% de similitud

Finalmente y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:

La tesis está redactada correctamente y su contenido constituye una aportación novedosa en el campo de la robótica de servicio

COMISIÓN REVISORA DE TESIS

Director de Tesis
Dr. Eduardo Castillo Castañeda

Dra. Xochitl Yamile Sandoval Castro

Mtro. Maximiliano Francisco Ruiz Torres

Dr. Francisco Javier Ornelas Rodríguez

Dr. Jorge Pineda Piñón

Dr. Juan Bautista Hurtado Ramos
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES
DIRECCIÓN
Página 1 de 1



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE USO DE OBRA PARA DIFUSIÓN

En la Ciudad de México el día 25 del mes de mayo del año 2022, el (la) que suscribe Ginna Marcela García Rodríguez, alumno(a) del programa de Maestría en Tecnología Avanzada con número de registro B200546, adscrito(a) al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada – CICATA, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección del Dr. Eduardo Castillo Castañeda y cede los derechos del trabajo intitulado “Diseño y construcción de un robot de cinco grados de libertad para tareas de servicio en superficies verticales”, al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expresado del autor y/o director(es). Este puede ser obtenido escribiendo a las siguiente(s) dirección(es) de correo ginnagarcia89@hotmail.com. Si el permiso se otorga, al usuario deberá dar agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.



GINNA MARCELA GARCÍA
RODRIGUEZ

“La robótica no aspira a sustituir a los seres humanos mediante la mecanización y la automatización de tareas, sino a encontrar formas de colaboración más eficaces entre robots y personas.”

Daniela Rus.

Dedicatoria

Dedico con todo mi corazón este trabajo a mi hijo y familia. La bendición de mis padres a lo largo de mi vida me protege y me impulsa a lograr mis metas. A mi hijo, le debo quien soy, y su existencia es la muestra perfecta del amor de Dios hacia a mí.

Gracias padres míos por ser los principales promotores de mis sueños, gracias por confiar y creer en mí siempre, gracias a mi madre por estar dispuesta a acompañarme cada día y noche, sus palabras y amor eran para mí como agua en el desierto; gracias a mi padre, por sus consejos y su incondicional cariño que han sido los pilares que me sostienen e impulsan a tener carácter y determinación para levantarme cuando caigo.

Por esto y mucho más, doy mi trabajo en ofrenda por el compromiso, la paciencia, el apoyo incondicional y su infinito amor.

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi agradecimiento al director de esta tesis, el Dr. Eduardo Castillo, por su confianza, paciencia y dedicación. Agradezco la disposición por compartirme sus conocimientos, por el respeto a mis sugerencias e ideas y por su orientación de forma integral, gracias por ayudarme a hacer posible este logro.

Al Centro de Investigación de Ciencias Aplicadas de Tecnología Avanzada CICATA - Querétaro, al Instituto Politécnico Nacional de México IPN, a sus directivos y administrativos por la oportunidad y el apoyo brindado durante mi proceso.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT- México, por financiar mi estudio y estancia, su misión de promover el avance de la investigación científica, es imprescindible para quienes queremos contribuir al desarrollo, gracias por apoyar a soñadores como yo.

A los profesores que me guiaron en el proceso para obtener mi título. Mis formadores: Dra. Yamile Sandoval, Dr. Eduardo Morales, Maestro Maximiano Ruiz, Dr. Pedro Vázquez, personas de gran sabiduría, son inspiración para mí, gracias por sus enseñanzas.

ÍNDICE

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1. _INTRODUCCIÓN.....	28
1.1. ANTECEDENTES	28
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	36
1.3. HIPÓTESIS	37
1.4. OBJETIVOS	37
1.5. METODOLOGÍA.....	37
CAPÍTULO 2. _ESTADO DEL ARTE	39
2.1. ROBOTS DE SERVICIO	39
2.2. PROTOTIPOS DESARROLLADOS.....	40
CAPÍTULO 3. _DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA.....	35
CAPÍTULO 4. _ANÁLISIS CINEMÁTICO Y ESTÁTICO.....	40
4.1. ANÁLISIS CINEMÁTICO	40
4.2. CARACTERIZACIÓN DE LA TRAYECTORIA	50
4.3. ANÁLISIS ESTÁTICO	54
CAPÍTULO 5. _DISEÑO CAD	58
6.1. CONSTRUCCIÓN PROTOTIPO DE LABORATORIO	67
6.2. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL	76
CONCLUSIONES	83
TRABAJOS FUTUROS.....	84
REFERENCIAS.....	85
ANEXOS	89

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1. CONTAMINACIÓN EN LA CIUDAD DE MÉXICO. [2]	29
FIG. 2. PROLIFERACIÓN DE PALOMAS EN EDIFICIOS. [4]	29
FIG. 3. FACHADA SOMETIDA A LIMPIEZA CON CHORRO DE AGUA A ALTA PRESIÓN. [11].....	32
FIG. 4. OPERADOR REALIZANDO TAREAS DE LIMPIEZA EN UNA FACHADA. [13]	34
FIG. 5. ACCIDENTE OCURRIDO DURANTE LIMPIEZA DE FACHADA. [14]	35
FIG. 6. CONFIGURACIÓN DE UN ROBOT CARTESIANO. [15].....	36
FIG. 7. METODOLOGÍA DEL PROYECTO.....	38
FIG. 8. VENTAS OBTENIDAS DE ROBOTS DE SERVICIO PROFESIONAL CON PROYECCIONES AL AÑO 2023. [20].....	40
FIG. 9. A. DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DEL ROBOT; B. ENSAMBLE REAL DEL ROBOT. [21].....	40
FIG. 10. A. CONFIGURACIÓN DE LAS PATAS; B. TRAYECTORIA DEL PASO. C. UBICACIÓN DE VENTOSAS; D. ORIENTACIÓN DEL TÓRAX. [22].....	41
FIG. 11. A. VISTA ISOMÉTRICA - DISEÑO CAD; B. INTEGRACIÓN DEL SISTEMA. [23].....	20
FIG. 12. A. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA. B. ENSAMBLE DEL ROBOT, LA GUÍA Y FACHADA. [24].....	22
FIG. 13. LIMPIEZA EN FACHADA DE VIDRIO POR UN SKYCLEANER. [26]	25
FIG. 14. A. MODELO DEL ROBOT. B. MODELO SELLADO DEL ROBOT. [33]	26
FIG. 15. A. ROBOT TREPADOR REALIZANDO LIMPIEZA. B. ANÁLISIS DE FUERZA DE LA TRAYECTORIA. [34].....	27
FIG. 16. A. GRAN TEATRO NACIONAL DE CHINA. B. ROBOT AUTO-TREPANTE. [35]	28
FIG. 17. A. ROBOT HEXÁPODO TREPADOR. B. ROBOT TREPANDO EN SUPERFICIE DE HORMIGÓN. [36].....	28
FIG. 18. ROBOT DE LIMPIEZA DE FACHADAS. [37]	30
FIG. 19. ROBOT TREPAMUROS. [38].....	30
FIG. 20. APARTO DE LIMPIEZA DE FACHADAS EN VIDRIO. [39]	31
FIG. 21. VISTA LATERAL DEL APARTO DE LIMPIEZA FRENTE A LA FACHADA DE UN EDIFICIO. [40].....	32
FIG. 22. ESTRUCTURA MÓVIL DEL DISPOSITIVO DE LIMPIEZA.....	35
FIG. 23. DISPOSITIVO BASE, INTEGRADO CON EL SISTEMA PAN-TILT Y EFECTOR FINAL.	36
FIG. 24. ANIMACIÓN DEL CONCEPTO DE PROPUESTA DESCRITA – DISPOSITIVO DE LIMPIEZA.	36
FIG. 25. ARTICULACIONES DEL ROBOT (5GDL).	37
FIG. 26. VISTA ISOMÉTRICA DE LA PROPUESTA PRELIMINAR DE DISEÑO CONCEPTUAL.	38
FIG. 27. MARCOS: A) ESTRUCTURA DE TIPO CARTESIANO, B) PAN-TILT Y EL EFECTOR FINAL.	40
FIG. 28. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEA DE LOS MARCOS 0 – 1.....	41
FIG. 29. A. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEA DE LOS MARCOS 1 – 2; B. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA ROTACIÓN CON RESPECTO A LOS EJES.	42
FIG. 30. A. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEA DE LOS MARCOS 2 – 3; B. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA ROTACIÓN CON RESPECTO A LOS EJES.	43
FIG. 31. DIAGRAMA CINEMÁTICO DEL SISTEMA CARTESIANO (3 GDL) - MARCOS 1, 2 Y 3.....	44
FIG. 32. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEA DE LOS MARCOS 3 – 4.....	44
FIG. 33. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEA DE LOS MARCOS 4 – 5.....	45
FIG. 34. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEA DE LOS MARCOS 5 – 6.....	46
FIG. 35. DIAGRAMA CINEMÁTICO DEL SISTEMA PAN-TILT (2 GDL) Y EFECTOR FINAL - MARCOS 4, 5 Y 6.....	47
FIG. 36. POSICIÓN DEL EFECTOR FINAL EN FUNCIÓN DE UN VECTOR NORMAL DE LA SUPERFICIE DE LA FACHADA.	49
FIG. 37. TRAYECTORIAS PARA LA LIMPIEZA DE FACHADA.	50
FIG. 38. REPRESENTACIÓN DIGITAL DE UN EDIFICIO.	50
FIG. 39. REPRESENTACIÓN DIGITAL DE UNA REGIÓN DE LA SUPERFICIE DE LA FACHADA.....	51
FIG. 40. VECTOR NORMAL A LA SUPERFICIE DE CADA ELEMENTO DE LA MALLA.....	51
FIG. 41. REPRESENTACIÓN CUATRO PUNTOS QUE PERTENECEN A UN ELEMENTO DE LA MALLA.....	52
FIG. 42. DISPOSITIVO SIGUIENDO LA TRAYECTORIA PROPUESTA.....	53

FIG. 43. FUERZAS DE ACCIÓN, REACCIÓN Y MOMENTOS DEL DISPOSITIVO DE LIMPIEZA: A. DISPOSITIVO BASE MÁS PRÓXIMO A LA FACHADA. B. DISPOSITIVO BASE MAS ALEJADO DE LA FACHADA.	54
FIG. 44. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS VARIABLES ESTÁTICAS DEL ROBOT.	57
FIG. 45. DISEÑO CAD DEL DISPOSITIVO PROPUESTO: ACOPLAMIENTO DE LA ESTRUCTURA Y PLATAFORMA MÓVIL, EL DISPOSITIVO BASE, SISTEMA PAN-TILT Y EFECTOR FINAL.	59
FIG. 46. DISEÑO CAD DEL DISPOSITIVO COMPLETO.	60
FIG. 47. SISTEMA TORNILLO-TUERCA.	60
FIG. 48. SISTEMA DE CORREDERA.....	61
FIG. 49. ESTRUCTURA MÓVIL CON RUEDAS Y SISTEMA DE FRENADO INCORPORADO, Y EL SISTEMA DE POLEAS.	62
FIG. 50. VISTAS ISOMÉTRICAS DEL SISTEMA PAN-TILT ACOPLADO AL EFECTOR FINAL, ACOPLADOS AL DISPOSITIVO BASE Y PLATAFORMA MÓVIL.	63
FIG. 51. VISTA ISOMÉTRICA DE LA PLACA DE ACRÍLICO, EL SISTEMA PAN-TILT Y EFECTOR FINAL.	64
FIG. 52. VISTA SUPERIOR DE DISEÑO CAD - DISPOSITIVO DE LIMPIEZA.	64
FIG. 53. ANIMACIÓN DEL DISPOSITIVO DE ASISTENCIA, DESARROLLANDO TAREA DE LIMPIEZA EN FACHADA DE EDIFICIO.	65
FIG. 54. VISTA FRONTAL DE DISEÑO CAD, DEL DISPOSITIVO CON UN PACÓMETRO ACOPLADO COMO EFECTOR FINAL - CONCEPTO MODULAR.	66
FIG. 55. VISTA GENERAL DE LA APLICABILIDAD DEL DISPOSITIVO PROPUESTO, UTILIZANDO EL PACOMÉTRO COMO EFECTOR FINAL.	66
FIG. 56. ESTRUCTURA MÓVIL: A. CORTE DE PERFILES. B. ENSAMBLE DEL MARCO. C. SUJETADORES STANDAR PARA LAS UNIONES PRINCIPALES.	68
FIG. 57. ACOPLA DE LAS RUEDAS A LA PLATAFORMA MÓVIL.	68
FIG. 58. ACOPLAMIENTO DE LAS CORREDERAS Y LA PLATAFORMA MÓVIL.	69
FIG. 59. A. PLATAFORMA MÓVIL, CON EL DISPOSITIVO BASE ACOPLADO. B. SISTEMA DE POLEAS – MOVIMIENTO VERTICAL.	69
FIG. 60. A. BARRENADO DE LA PLACA DE ACRÍLICO. B. PLACA Y SISTEMA TORNILLO TUERCA. C. PLACA EMPOTRADA.	70
FIG. 61. SISTEMA DE CORREDERA: A. BARRENADO DEL PERFIL EN U; B. ENSAMBLE DE LAS PLACAS EN L; C. ACOPLA DE LA PLATAFORMA MÓVIL Y SISTEMA CORREDERA.	71
FIG. 62. A. CARRITOS; B. ANIMACIÓN DEL SISTEMA CORREDERA.	71
FIG. 63. BASES Y MOTORES ACOPLADOS. A. MOTOR BERNIO MR 752; B. MOTOR POLULU 1472	72
FIG. 64. ACOPLA DEL MOTOR Y SISTEMA PIÑÓN-CREMALLERA - MOVIMIENTO HORIZONTAL.....	72
FIG. 65. PATAS: A. ACOPLA CON EL SISTEMA DE CORREDERA. B. ACOPLA CON EL DISPOSITIVO BASE.	73
FIG. 66. PLACA DE ACRÍLICO: A. ACOPLADA AL SISTEMA TORNILLO-TUERCA. B. ACOPLADA AL SISTEMA PAN-TILT. C. DISPOSITIVO BASE.	73
FIG. 67. A Y B. SISTEMA DE CABLEADO.	74
FIG. 68. A) ESTRUCTURA MÓVIL, B) SISTEMA LINEAL TORNILLO-TUERCA, C) PLACA DE ACRÍLICO.	74
FIG. 69. A) SISTEMA PIÑÓN-CREMALLERA; B) PAN-TILT Y PISTOLA DE ALTA PRESIÓN	75
FIG. 70. MOTOR BERNIO MR 752 L63.....	76
FIG. 71. DESPLAZAMIENTO EJE VERTICAL. A. POSICIÓN INFERIOR. B. POSICIÓN MEDIA. C. POSICIÓN SUPERIOR.	77
FIG. 72. DESPLAZAMIENTO EJE HORIZONTAL. POSICIONES: A. EXTREMO IZQUIERDO. B. MEDIO IZQUIERDO. C. MITAD. D. EXTREMO DERECHO.	78
FIG. 73. DESPLAZAMIENTO EJE PROFUNDIDAD. POSICIONES: A. EXTREMO DERECHA. B. MEDIO DERECHA. C. MEDIO IZQUIERDA.	79
FIG. 74. MOTOR POLOLU 1472.....	80
FIG. 75. A, B, C, D Y E. DESPLAZAMIENTO DEL PAN EN DIFERENTES POSICIONES ANGULARES.	81
FIG. 76. A, B, C Y D. DESPLAZAMIENTO DEL TILT EN DIFERENTES POSICIONES ANGULARES.	82

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. MÉTODOS TRADICIONALES DE LIMPIEZA EN FACHADAS DE EDIFICIOS. [12].....	34
TABLA 2. FASES DE TAREA DE LIMPIEZA DE FACHADAS DE VIDRIO	29
TABLA 3. ATRIBUTOS DE DISEÑO ROBOT.	29
TABLA 4. COMPARATIVA DEL ESTADO DEL ARTE.	34
TABLA 5. PARÁMETROS DE DENAVIT-HARTENBERG.	37

Resumen

A pesar de los avances en la robótica y automatización para tareas de servicios en superficies verticales, continúa este siendo un desafío y actualmente las labores (p. ej. limpieza, inspección, etc.) se desarrollan en alturas desde complejos andamios, o colgados de arneses. Estos trabajos son costosos y peligrosos para los operadores que deben trabajar bajo el riesgo de caídas desde alturas considerables y de exposición a sustancias tóxicas.

Este trabajo presenta un dispositivo robótico con 5 grados de libertad basado en una configuración cartesiana y un sistema de tipo Pan-Tilt; este último permite el acoplamiento de efectores finales como: pistola de hidrolavadora (para el presente caso), pistola de pintura, pacómetro, entre otros.

Es por esto, que se propone el desarrollo de un dispositivo de asistencia, capaz de realizar tareas de servicio en superficies verticales, de una manera segura, confortable y no tan costosa.

Palabras clave: Robot tipo cartesiano, limpieza de fachadas, robot de servicio, hidrolavadora.

Abstract

Despite advances in robotics and automation for service tasks on vertical surfaces, this continues to be a challenge and currently the tasks (eg cleaning, inspection, etc.) are carried out at heights from complex scaffolding, or hanging from harness. These jobs are expensive and dangerous for operators who must work under the risk of falls from considerable heights and exposure to toxic substances.

This work presents a robotic device with 5 degrees of freedom based on a Cartesian configuration and a Pan-Tilt type system; the latter allows the coupling of end effectors such as: pressure washer gun (for the present case), paint gun, pacometer, among others.

For this reason, the development of an assistance device is proposed, capable of performing service tasks on vertical surfaces, in a safe, comfortable and inexpensive way.

Keywords: Cartesian type robot, facade cleaning, service robot, high-pressure washer.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta el desarrollo de un dispositivo electromecánico de cinco grados de libertad para tareas de servicio en superficies verticales. En el primer capítulo se da a conocer los antecedentes, justificación, objetivos y metodología del proyecto.

1.1. ANTECEDENTES

En todas las ciudades del mundo, el patrimonio arquitectónico e histórico está presente. Edificios y monumentos importantes copan los centros de muchos núcleos urbanos. [1]. Sin lugar a duda, estos centros urbanos hoy por hoy representan una oportunidad para el desarrollo de una ciudad, toda vez que poseen la capacidad de generar fuentes de empleo, impactar positivamente al turismo, la cultura y múltiples beneficios sociales, sin dejar de lado su gran valor intangible. Con el tiempo, estas edificaciones expuestas a agentes meteorológicos como el viento, lluvia, tormentas, altas o bajas temperaturas, agentes ambientales y biológicos, o a la acción humana a través de la proliferación de pintadas en sus superficies, y la presencia de animales como las palomas, provoca la degradación y desintegración progresiva de los materiales, generando también efectos indeseables desde el punto de vista estético.

Los gases contaminantes que emiten los vehículos a motor y las actividades industriales producen un deterioro de los materiales. El incesante tráfico, unido a fábricas que no controlan sus emisiones, convierten el aire de las ciudades en un aire contaminado, cargado de partículas y gases, los cuales, además de afectar a la calidad de vida de las personas y su salud, tiñen y devoran poco a poco los materiales de estas estructuras.

En la Fig. 1, se evidencia la contaminación que devora día a día a la Ciudad de México, la cual se ve afectada por los agentes anteriormente descritos, pero se agrava por su situación geográfica. Está en el Valle de México, una gran cuenca de la alta meseta de la región central, y la rodea el volcán Popocatepetl, de 5.500 metros de altura. Por el alto contenido de azufre e hidrocarburos del aire, durante mucho tiempo se consideró a la Ciudad de México la ciudad más contaminada del mundo. [2]



Fig. 1. Contaminación en la Ciudad de México. [2]

Otro flagelo que atenta contra la integridad arquitectónica y estructural de los edificios, son las palomas, Fig. 2. Estas aves generan suciedad, bacterias, obstruyen los canales de desagüe y ventilación de las infraestructuras, propagan enfermedades y propician la aparición de otras plagas. Al mezclarse el excremento de estos animales con la lluvia, el aire y otros contaminantes ambientales, favorecen el crecimiento de microflora lo que produce ácidos y otros metabólicos, provocando la corrosión y erosión de los materiales constructivos. Como consecuencia de esta actividad metabólica, se originan efectos indeseables visiblemente, e internamente ocasiona una desintegración progresiva de los materiales, que con el tiempo afecta la integridad de los revestimientos. [3]



Fig. 2. Proliferación de palomas en edificios. [4]

Existen innumerables problemáticas desencadenadas por la no limpieza de las fachadas que afectan estructural y estéticamente a las edificaciones, comprometiendo, además, la salud de los usuarios y de quienes permanecen en su interior. Si bien, los diseños de los edificios son herméticamente cerrados, con sistemas de climatización que no suelen limpiarse, al menos no con la frecuencia requerida. Conceptos como el de “edificio enfermo” definido desde 1982 por la OMS, nos alertan sobre la importancia de preservar estas estructuras de la acción de microorganismos nocivos. [5]

Sería importante mencionar que la mayor parte de los microorganismos, especialmente los mohos, se propagan a través del aire. Así, una fachada contaminada por microorganismos, soporta el riesgo de que éstos se transmitan al interior, desencadenando reacciones patológicas en los seres humanos (por contacto, por inhalación, etc.). [6]

Para las personas quienes pasan más del 80% en estas edificaciones, las consecuencias pueden ser graves, y ahora más en situaciones de pandemia. Por ello, el mantenimiento y limpieza de las fachadas deben ser continuas y periódicas, ya que estas acciones son imprescindibles para su cuidado y protección, de tal manera que éste conserve su más óptimo aspecto físico y continúe tras del tiempo, aportando una prestación funcional. [7]

En la Fig. 3 se puede observar el evidente cambio del “PRUDENTIAL BUILDING EN CHICAGO, EE. UU.”, antes y después de limpiar a fondo su fachada.



Fig. 3. Limpieza de fachada. [8]

El resultado final de la limpieza de una fachada es generalmente irreversible; por lo anterior, hay que seleccionar el método más conveniente y los materiales adecuados para llevarla a cabo y evitar causar un daño irreparable a la superficie que se desea limpiar. La gran mayoría de estas técnicas aún son manuales, requieren de robustos andamiajes, operadores en riesgos de caídas o accidentes, el tiempo que tarda la ejecución de dichas tareas de limpieza puede llegar a ser extenso y los costos muy elevados. [9]

Actualmente, se realizan actividades previas a la ejecución de tareas de limpieza a las fachadas de los edificios, las cuales son imprescindibles como se muestra a continuación: [9]

- i. Realizar un análisis metódico completo de la superficie a intervenir, donde se identifica la clase del material, su estado de conservación, la existencia de elementos ornamentales, y si es necesario la estabilización de algunas partes.
- ii. Efectuar un estudio de las condicionantes del entorno, la viabilidad de andamios, métodos de elevación o posibilidad de realizar anclajes, toda vez que son requerimientos para la ejecución de trabajos de manera vertical.
- iii. De acuerdo a los pasos anteriores, una vez elegido el método de limpieza, es imprescindible realizar una prueba de su idoneidad. Una primera aproximación puede ser, realizar la prueba de manera manual con cepillo en seco y con humedad, para más adelante aplicar el método elegido. Esta prueba nos dará una idea de la fijación que tiene la suciedad a la superficie, el comportamiento del estrato tratado o la facilidad de la limpieza a realizar.

1.1.1. Limpieza a alta presión

La limpieza profesional se puede desarrollar bajo diferentes métodos, como la aplicación de agentes químicos o solventes, material abrasivo o simplemente con agua, la micro-vibración, el uso de vapor seco u ondas de ultrasonido, entre otros. Uno de los métodos más utilizados dentro de la limpieza profesional es la limpieza a alta presión, la cual es conocida también como hidrolavado, y consta de limpiar un área en específico, mediante el impacto de chorros de agua a alta presión, como se puede ver en la Fig. 4. Se considera agua a alta presión a partir de 70 bar. [10]



Fig. 4. Fachada sometida a limpieza con chorro de agua a alta presión. [11]

La limpieza intensiva y meticulosa con limpiadores de alta presión ofrece la posibilidad de lograr un alto nivel de higiene. Son especialmente útiles al limpiar y desinfectar grandes superficies como techos, paredes y pisos y pueden combatir eficazmente gérmenes, bacterias y virus. El rendimiento de limpieza, resulta de la combinación entre cantidad y presión del chorro (agua, arena, químicos, etc). Cuanto más óptimamente adaptados estén ambos factores, tanto más fácil será desprender la suciedad incrustada y tanto más rápidamente se podrán limpiar superficies grandes. [12]

1.1.2. Métodos actuales de limpieza [12]

A continuación, se relacionan los métodos más utilizados actualmente, para la limpieza de superficies verticales, como fachadas de edificios:

- Limpieza criogénica

La técnica consiste en utilizar hielo seco, bajo la forma de micropartículas de CO₂, y aplicarlo sobre la superficie a alta velocidad por medio de aire comprimido. Las partículas se convierten en gas al impactar la superficie removiendo la suciedad de la superficie donde se aplica sin dañarla.

- Granallado abrasivo

Es una técnica agresiva que proyecta material abrasivo a alta presión hacia la superficie que se desea limpiar. Los materiales usados son: arena, esferas de vidrio, silicona, granos de maíz y algunos otros. Este tipo de granallado es útil para eliminar oxidación en superficies metálicas, para quitar pintura, para reducir la corrosión grave y otros contaminantes adheridos a las superficies.

- Blasteo de sosa

A pesar de que la sosa (hidróxido de sodio) tiene un nivel alto de abrasión, se trata de un material de limpieza eficaz. Al igual que las otras técnicas, requiere de aire a alta presión para aplicar partículas de sosa contra una superficie. Se trata de un método de limpieza muy utilizado ya que no es destructivo.

- Chorro de agua a alta presión

Se trata del método más simple y económico de todos los revisados, consiste en proyectar agua a alta presión sobre la superficie a limpiar. El agua solo permite eliminar suciedad y polvo rápidamente.

- Limpieza con disolventes

Esta técnica involucra agentes químicos para disolver materiales no deseados sobre la superficie; al terminar el lavado, se requiere, frecuentemente, un proceso de lavado o enjuague para eliminar los materiales disueltos. Se requiere de máquinas de montaje que lo convierten en una técnica de limpieza muy lenta y costosa.

- Limpieza con herramienta de mano

Se trata de un método completamente manual que puede resultar agresivo para las superficies a limpiar ya que requiere cepillos de alambre, cinceles, entre otras herramientas. La limpieza consume mucho tiempo y una gran cantidad de empleados que, además, realizan movimientos repetitivos que pueden causar daño en las articulaciones a largo plazo.

En la Tabla 1, se relacionan los distintos métodos de limpieza aplicados de forma actual, para la remoción de suciedad en paredes verticales o fachadas de edificios. Con esto se evidencia que la limpieza criogénica es la mejor alternativa, pues al ser un medio suave no daña la superficie, al no producir residuos secundarios se convierte en una práctica ecológica, y la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos), FDA (La Administración de Alimentos y Medicamentos es la agencia del Gobierno de los Estados Unidos) y USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), han aprobado al hielo seco como material de grado alimentario por lo que no genera reacciones tóxicas en los operadores; y finalmente, este material no es conductor de la electricidad, por lo que no causa corrosión durante o después de la tarea de limpieza, lo que permite a su vez, la aplicación de este método en componentes eléctricos con total seguridad. Los demás métodos, pueden presentar inconvenientes de tipo tóxico, ecológico, conductivo, y en algunos casos, llegan a ser muy agresivos para las fachadas.

Tabla 1. Métodos tradicionales de limpieza en fachadas de edificios. [12]

MÉTODO DE LIMPIEZA	ABRASIVA	RESIDUOS SECUNDARIOS	ECOLÓGICA	TÓXICA	CONDUCTIVA
Limpieza Criogénica	No	No	Si	No	No
Blasteo Abrasivo	Si	Si	No	*	No
Sosa Cáustica	Si	Si	No	*	No
Lavado a Presión	No	Si	No	*	Si
Solventes/ Químicos	No	Si	No	Si	N/A
Herramientas Manuales	Si	No	N/A	N/A	N/A

El común denominador de los métodos nombrados anteriormente, son sus prácticas de limpieza aún manuales, las cuales se realizan a través de la expulsión de diferentes elementos (como arena, agua, disolventes, químicos, etc) a gran presión por medio de un chorro de aire. En la Fig. 5, se muestra esta dinámica, donde operarios colgados de arneses, sobre andamiajes, o plataformas elevadoras, ejecutan actividades de limpieza de manera repetitiva, con el fin de alcanzar cada punto de la superficie de las fachadas.



Fig. 5. Operador realizando tareas de limpieza en una fachada. [13]

Por ser prácticas que no requieren de gran capacitación o conocimientos técnicos, es fácil el reclutamiento de personas dispuestas a realizar dichas actividades de

limpieza a grandes alturas. Sin embargo, las debilidades de la solución actual, radican en los riesgos que trae consigo: caídas, heridas, salpicaduras, inhalación e ingestión de químicos, y sobre esfuerzos en la manipulación de los equipos. Además de generar estos riesgos físicos y de salud para los operarios, son métodos demorados y costosos. Uno de los tantos eventos que ocurren a diario, por el riesgo que genera la limpieza tradicional de edificios, ocurrió en Chile durante la intervención de la fachada del Hotel Crowne Plaza, provocado por una fatiga de material de las cuerdas que sostenían la plataforma elevadora, Fig. 6.



Fig. 6. Accidente ocurrido durante limpieza de fachada. [14]

Las personas u organizaciones que están involucrados actualmente en la resolución del problema, son las empresas prestadoras de servicio de limpieza, las cuales están en constante búsqueda de mejora en sus técnicas, y con ello ser pioneras ante su competencia. Así mismo, hay intereses por parte de las entidades públicas, ya que ellas generan gastos anuales para el cuidado, mantenimiento y limpieza de los bienes del estado de cada país.

1.1.3. Robot de configuración cartesiana (PPP)

El robot cartesiano, consiste en la combinación de movimientos lineales independientes que generan trayectorias complejas en un espacio tridimensional.

Un robot cartesiano es una configuración de tres articulaciones prismáticas representadas por cubos como se observa en la Fig. 7, cuyas variables son las coordenadas cartesianas de la herramienta utilizada como efector con respecto a la base del mismo, es una configuración simple y sus aplicaciones principalmente se enfocan en campos de ensamble, almacenaje de productos y conformación de objetos mediante la aportación o eliminación de material. [15]

La configuración cartesiana, proporciona un espacio de trabajo en forma de caja, razón por la cual también se les denomina robots de coordenadas rectangulares.

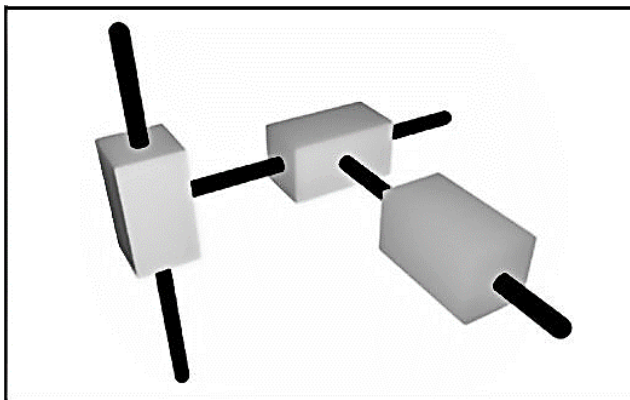


Fig. 7. Configuración de un robot cartesiano. [15]

1.2. JUSTIFICACIÓN

El 2020 fue un año desafiante para todos nosotros. La pandemia de coronavirus está teniendo un impacto crucial tanto en el mundo empresarial como en nuestra vida privada. Una de las aplicaciones más destacadas para luchar contra coronavirus son los robots de limpieza y desinfección. El aumento de las exigencias higiénicas abre este nuevo nicho para los robots de servicio. En realidad, la pandemia ha impulsado el mercado de soluciones desinfectantes robóticas. Por lo tanto, no es difícil de entender por qué la industria de la robótica de servicios dejará este desafío global en el carril de la victoria.

Un dispositivo electromecánico, móvil, teleoperado, modular y escalable, capaz de realizar tareas de servicio en superficies verticales, representa una innovación tecnológica en este mercado. Los beneficios técnicos como la precisión, la repetición permanente y sin fallos de las actividades, los niveles de calidad óptimos, la simplificación de las tareas y flexibilidad frente a los requerimientos específicos de cada cliente, generan una gran ventaja competitiva, ya que se puede dar una mejor respuesta a las necesidades actuales.

Por ende, lo que hace especialmente ventajoso al presente dispositivo de asistencia frente a los métodos convencionales, es que constituye una solución y herramienta eficaz para realizar tareas como limpieza e inspección las fachadas de forma automatizada, lo que conlleva a una disminución de gastos operacionales, una optimización en los tiempos de las actividades y reducción de forma abrupta de los riesgos habitualmente generados durante estas prácticas.

1.3. HIPÓTESIS

Cinco grados de libertad son suficientes para un robot que desarrolla tareas de servicio en superficies verticales.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollo de un dispositivo electromecánico, semiautónomo y móvil, basado en una configuración cartesiana, para tareas de servicio en superficies verticales.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el diseño conceptual de un dispositivo electromecánico de configuración cartesiana.
- Definir las tareas de servicio que el dispositivo electromecánico podrá realizar.
- Analizar las fuerzas a las que estará sometido el dispositivo electromecánico, y análisis cinemático en posición del dispositivo.
- Construir y validar el dispositivo.

1.5. METODOLOGÍA

La metodología, Fig. 8, que se emplea para el desarrollo de este proyecto cuenta con cinco etapas principales:

- i. **Análisis:** En la primera etapa del proyecto, se genera la búsqueda de información sobre los métodos y técnicas utilizadas en la limpieza de fachadas de edificios, con el fin de caracterizar, obtener y definir los parámetros de diseño necesarios que resuelvan de manera óptima la problemática planteada en este documento.
- ii. **Diseño y simulación:** En esta etapa se realiza el diseño CAD, análisis estático y dinámico del dispositivo electromecánico, y por último se desarrolla el diseño de configuración cartesiano.
- iii. **Implementación e integración de sistemas:** Una vez efectuada con éxito la etapa de Diseño y Simulación, se implementa el sistema de limpieza comercial, al dispositivo electromecánico. Este a su vez, estará compuesto de un sistema *Pan-Tilt* y una pistola como efector final. Finalmente, se integran los sistemas de limpieza, *Pan-Tilt* y de configuración cartesiano.

iv. Fabricación de prototipo de laboratorio: Comprenderá la adquisición de materiales, construcción y ensamble de piezas necesarias para la fabricación de un primer prototipo. (Mecánica, adquisición de la electrónica, actuadores e hidrolavadora, entre otros.)

v. Validación experimental: En esta etapa se valida experimentalmente la funcionalidad de la parte mecánica del dispositivo, a través de un sistema de control en lazo abierto. Se evalúan: la movilidad del sistema Pan-Tilt permite determinar si el chorro de agua es capaz de llegar a todos los puntos de la superficie de trabajo; y el sistema de configuración cartesiano, que permite determinar si el robot es capaz de seguir la trayectoria requerida.

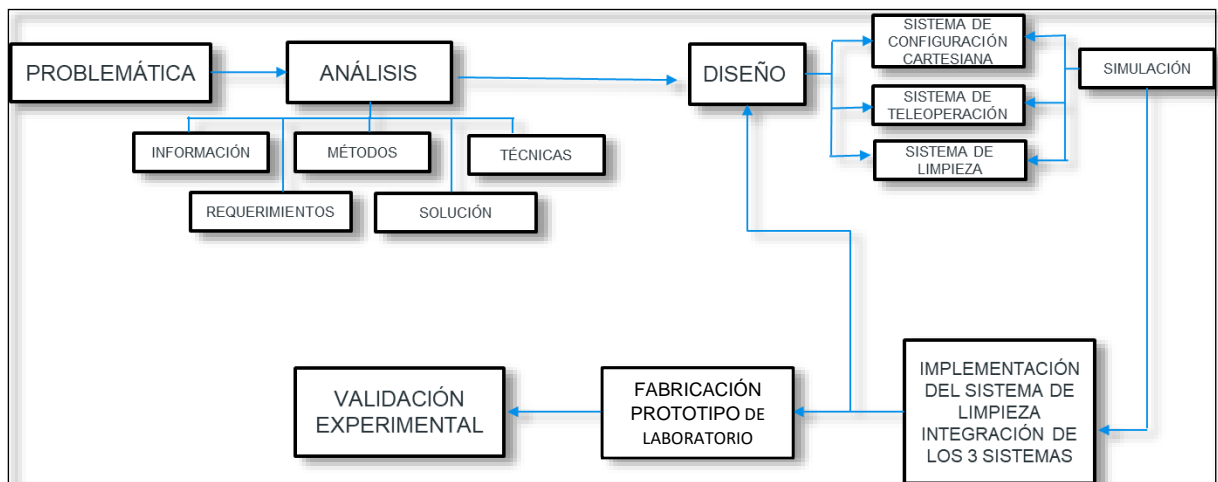


Fig. 8. Metodología del Proyecto.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

El presente capítulo contiene las investigaciones y prototipos de los robots de servicio que vienen desarrollándose a nivel de laboratorio, dispositivos comerciales y los registros de patente.

2.1. ROBOTS DE SERVICIO

Los robots de servicio se definen como aquellos que realizan tareas útiles para humanos o equipos, excluidas las aplicaciones de automatización industrial". [18]

Según la norma ISO 8373, los robots requieren "un grado de autonomía", que es la "capacidad para realizar las tareas previstas en función del estado actual y la detección, sin intervención humana". Para los robots de servicio, esto va desde la autonomía parcial, incluida la interacción del robot humano, hasta la autonomía total, sin la intervención activa del robot humano. Por lo tanto, las estadísticas IFR (International Federation of Robotics) para robots de servicio incluyen sistemas basados en algún grado de interacción entre robots humanos o incluso teleoperación completa, así como sistemas completamente autónomos. [19]

El nuevo paradigma de distanciamiento social y las restricciones de viaje relacionadas con Covid-19 brindan excelentes oportunidades de crecimiento para las aplicaciones robóticas y, por ende, los robots se han vuelto más comunes en entornos públicos. Las ventas de robots de servicio para uso profesional tuvieron un valor estimado de US \$ 11.200 millones en 2019, obteniendo un crecimiento del 42%. [20]

Los desarrollos principales de la robótica de servicios se encuentran entre las aplicaciones de Inspección y mantenimiento, limpieza profesional, robots de campo y exoesqueletos humanos con motor. La aplicación con mayor desarrollo y ventas en el 2020 y esperadas para el año 2023, es y será la limpieza profesional, Fig. 9. [20]

Dentro de las tendencias tecnológicas y aplicaciones en robótica de servicios, se destacaron en el año 2020, 30 nuevos modelos de robot de desinfección, al igual que a raíz de la pandemia por Covid-19, los robots sanitarios llamaron la atención. Las perspectivas a largo plazo para la robótica siguen siendo excelentes, ya que las aplicaciones colaborativas entre humanos y robots complementarán la robótica tradicional. [20]

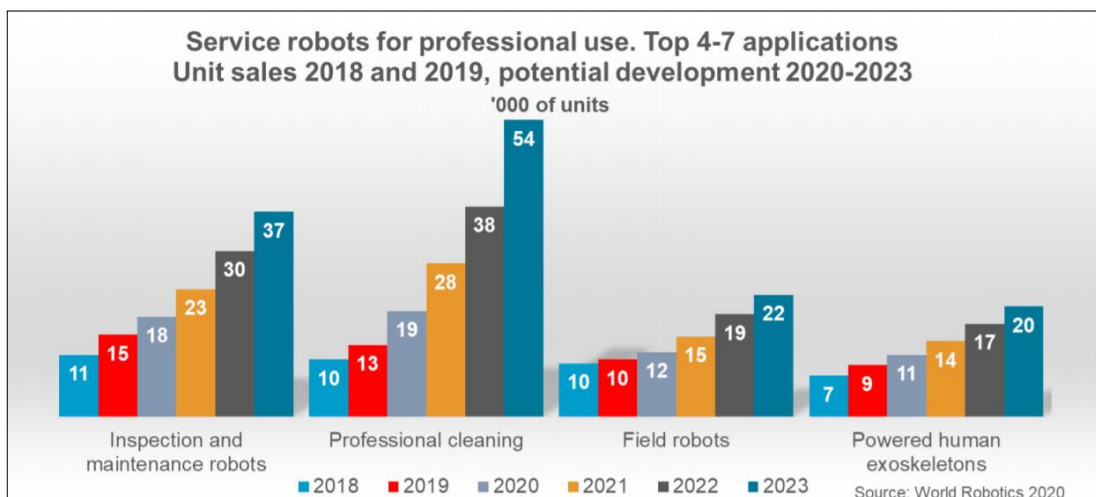


Fig. 9. Ventas obtenidas de robots de servicio profesional con proyecciones al año 2023. [20]

2.2. PROTOTIPOS DESARROLLADOS

Los desarrollos existentes se pueden encontrar en investigaciones y prototipos de nivel laboratorio, dispositivos comerciales y patentes registradas. A continuación, se presentan algunos de ellos:

2.2.1. Hex-Piderix

La Dra. Y. Sandoval desarrolla un robot caminante trepador llamado Hex-piderix, Fig. 10, que tiene 3DOF en cada una de las seis patas, una ventosa para escalar superficies verticales en cada punta de la extremidad y un algoritmo de locomoción, dispositivo que cuenta con un sistema de visión por computadora que utiliza análisis de imágenes para inspección, empleando una cámara montada. [21]

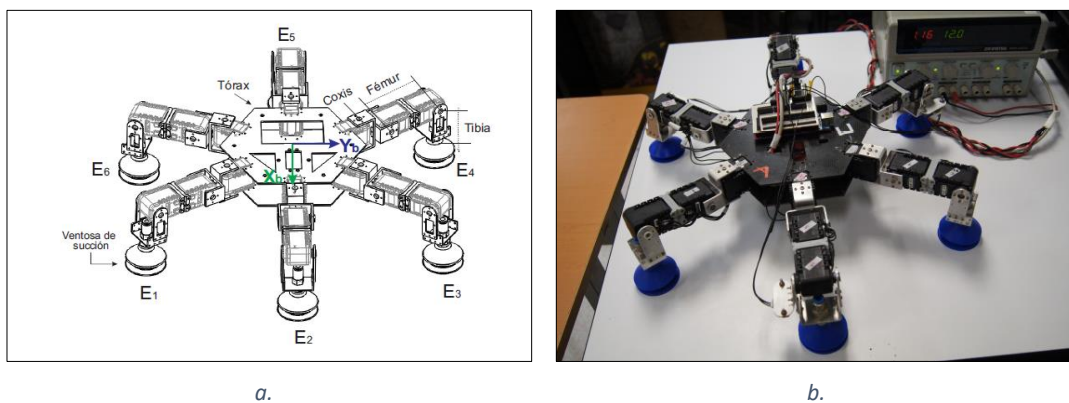


Fig. 10. a. Diseño y descripción del robot; b. Ensamble real del robot. [21]

2.2.2. Robot hexápodo

En este trabajo el autor J. Franco, presenta el diseño de un algoritmo para la locomoción de un robot hexápodo en superficie vertical, Fig. 11. El Robot llamado Wall-Bot es un prototipo bio-inspirado y se compone de seis cadenas cinemáticas abiertas unidas a un tórax rígido y distribuidas uniformemente, donde las dos patas traseras y las dos patas delanteras, están compuestas por cuatro articulaciones rotacionales, y las dos patas laterales, están compuestas por tres articulaciones rotacionales. El algoritmo consiste en realizar una serie de cálculos antes de iniciar la secuencia de marcha, donde se inicia un contador en tiempo real y se pregunta por la distancia según el perfil de posición, esta distancia es almacenada y se compara con el primer vector columna de una matriz con información angular de cada articulación, se escoge el dato más cercano a los valores calculados y así podemos saber las posiciones angulares de cada motor en función del tiempo. El sistema de sujeción implementado es tipo ventosa, el cual se compone de electro válvulas, generadores de vacío y ventosas. La secuencia de locomoción implementado se llama trípode alterno. [22]

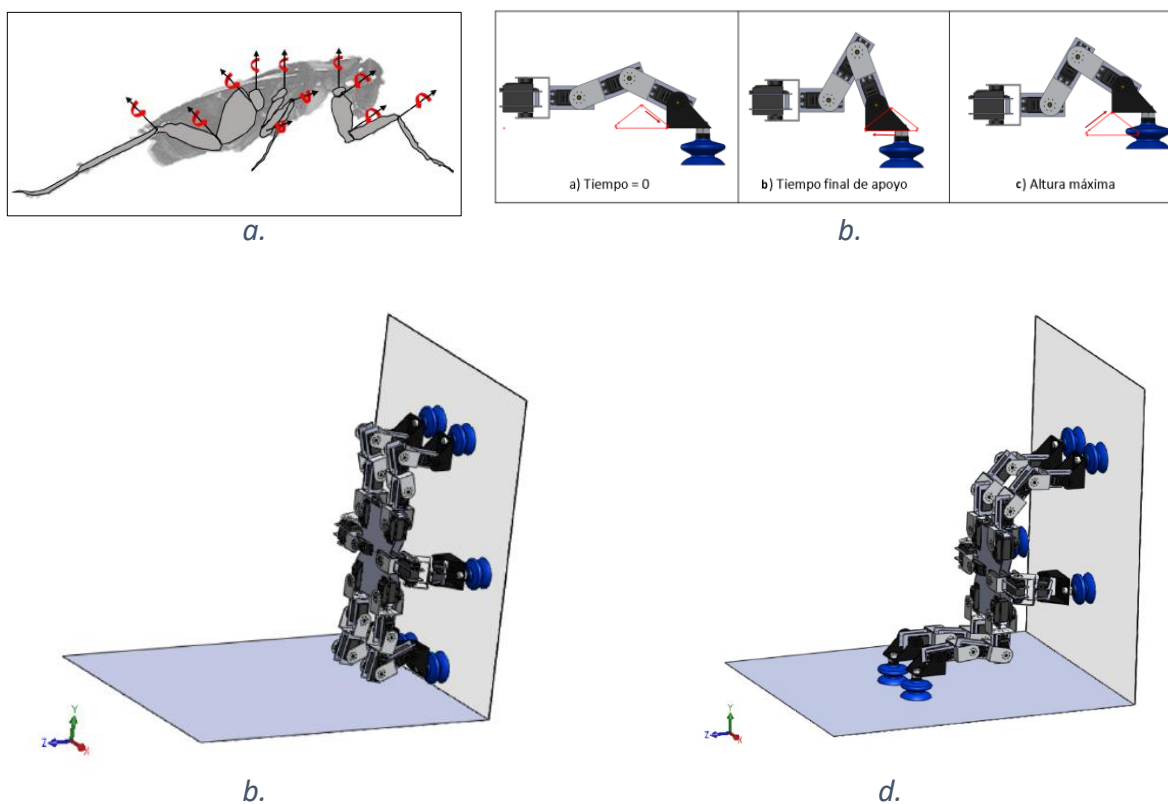


Fig. 11. a. Configuración de las patas; b. Trayectoria del paso. c. Ubicación de ventosas; d. Orientación del tórax. [22]

2.2.3. Robot para limpieza de alta presión

Este dispositivo desarrollado por E. Orozco, Fig. 12, consta de una base móvil de tres ruedas, con locomoción de tipo tracción diferencial, y un sistema Pan-Tilt de dos grados de libertad, montado sobre la base móvil. Dentro de la base móvil se encuentra alojada una hidrolavadora comercial, así como el sistema eléctrico, electrónico, de tracción y control del robot. Una pistola de chorros de agua a alta presión se encuentra montada en el sistema Pan-Tilt como efector final del robot, la cual se manipula vía remota, así como la base móvil, desde un gamepad comercial; esto permite que el usuario pueda operar el robot de manera sencilla sin necesidad de tener que programar alguna trayectoria o requerir de un mínimo conocimiento de robótica. El modo de operación del robot permite que la base móvil se puede desplazar libremente cuando el sistema Pan-Tilt no se encuentra en uso, y de igual manera, el sistema Pan-Tilt se puede manipular con libertad cuando la base móvil se encuentra estática. Esto permite que el análisis mecánico del robot se pueda separar en un análisis estático de la base móvil y un análisis dinámico del sistema Pan-Tilt. [23]

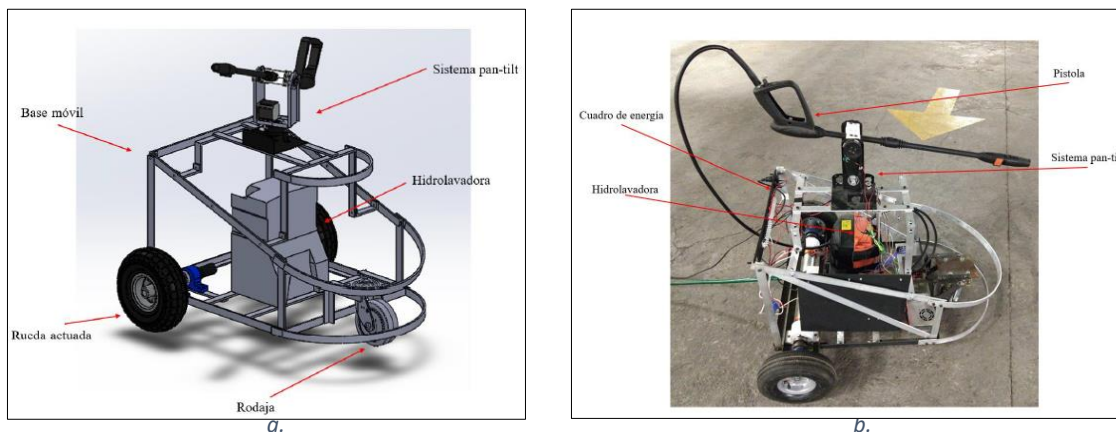


Fig. 12. a. Vista isométrica - Diseño CAD; b. Integración del sistema. [23]

2.2.4. Robot con guía incorporada.

En la actualidad el número de edificios de gran altura ha aumentado junto con el desarrollo de tecnología, y con ello muchas investigaciones sobre un sistema automático de mantenimiento de fachadas de edificios para satisfacer las crecientes demandas, la mayoría de las investigaciones se han centrado en el mecanismo y la composición del sistema, mientras que los problemas de seguridad laboral no se han abordado lo suficiente.

El robot que presentan en este artículo, es un robot incorporado a la fachada del edificio, Fig. 13. A su vez, está compuesto por un robot vertical y un robot horizontal que se mueve a lo largo del riel de la fachada. Dentro de los problemas que tiene el robot vertical, incluyen la seguridad del proceso de acoplamiento y la estabilidad del movimiento. Durante el proceso de acoplamiento para la circulación entre pisos del robot horizontal, Se generan choques y errores de posicionamiento debido al aumento de carga. Para resolver esto, el sistema de freno de riel se opera para suprimir el impacto durante el proceso de acoplamiento, y se realiza un proceso de nivelación para compensar el espacio que es igual al error de posicionamiento entre el riel de popa integrado del robot y la baranda del espejo de popa del edificio. Además, se generan muchos ruidos del entorno que afectan significativamente el movimiento del robot vertical debido a la vibración. Para mejorar la estabilidad de movimiento del robot vertical, se desarrolla el control de supresión de vibraciones, utilizando la estimación del estado que considera las propiedades dinámicas del cable. [24]

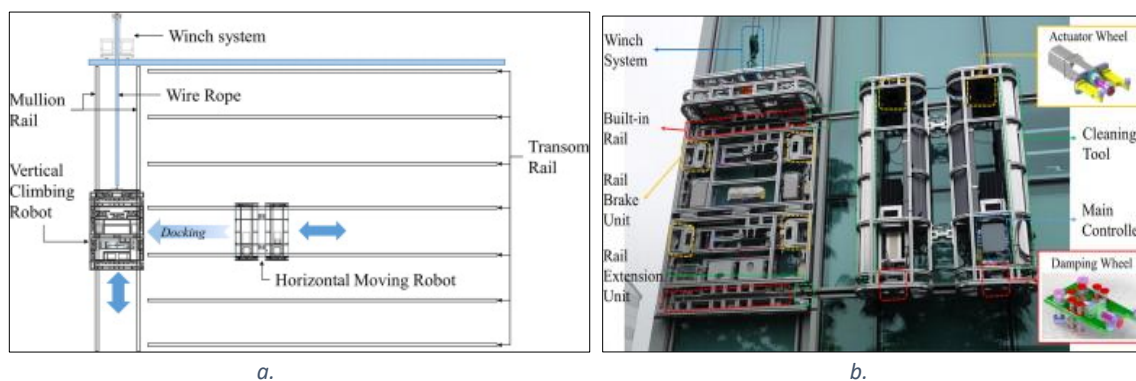


Fig. 13. a. Descripción del sistema. b. Ensamble del robot, la guía y fachada. [24]

2.2.5. Revisión robots trepadores

La limpieza de fachadas de edificios de gran altura y rascacielos ofrece enormes oportunidades para el uso de robots. En las últimas décadas, los rascacielos, representados por el Burj Khalifa en Dubái y Shanghai Tower en Shanghai, se han construido debido a las mejoras en las tecnologías de construcción y procesos. Incluso en estos nuevos rascacielos, las fachadas son generalmente limpiadas por personas.

Uno de los componentes fundamentales de cualquier robot de limpieza de fachadas es su mecanismo adhesivo, lo que permite que el robot se adhiera a la superficie de la pared. Dicho mecanismo también debería ser lo suficientemente adaptable para permitir que el robot sea móvil y cubra el área requerida. Así mismo, concluye

expandiéndose más allá de los mecanismos adhesivos al discutir un conjunto de atributos de diseño deseables de un robot de limpieza de fachadas de vidrio ideal para facilitar el futuro específica investigación con objetivos técnicos claros y límites de compensación de diseño bien definidos. [25]

2.2.5.1. Métodos de escalada de pared

Los seis principios de adhesión identificados en robots trepadores de paredes, incluyen la adhesión con ventosa, oruga de ventosa, adhesión de bomba de vacío, adhesión magnética y adhesión bioinspirada. Cada uno de estos principios presentan un conjunto único de ventajas y desventajas a saber, la naturaleza de atravesar el terreno y la configuración de la aplicación. [25]

i. Adhesión con ventosa

Este método funciona eficazmente en superficies de paredes de textura fina con menos asperezas (vidrio). El robot está totalmente impulsado por actuadores neumáticos, lo que ofrece la ventaja de reducir la carga útil, y se adhiere a la pared de vidrio mediante la fuerza de succión. Sin embargo, poseen baja velocidad ya que existe un retraso de tiempo adicional que surge de la necesidad de variar la presión negativa dentro de las ventosas para su control. [25]

El Skycleaner, Fig. 14, es un ejemplo de ello, y se instala con las ventosas en ambos extremos de los actuadores, como una etapa X-Y, las cuales están conectadas a una bomba de vacío [26]. Además, el robot se adhiere a la pared de vidrio mediante la fuerza de succión. Una de las características importantes en este caso es que el robot está totalmente impulsado por actuadores neumáticos, lo que ofrece la ventaja de reducir la carga útil.



Fig. 14. Limpieza en fachada de vidrio por un Skycleaner. [26]

ii. Adhesión de la correa eslabonada con ventosa

Este método consiste en instalar las ventosas en las orugas de un tractor. La movilidad del robot se logra mediante el uso de la rotación de la oruga mientras se mantienen las fuerzas de succión. Por lo tanto, este método supera el problema de baja velocidad que se enfrenta en el caso del principio de adhesión de ventosa. [25]

Kim et al. crearon un robot trepador de paredes utilizando el principio de oruga con ventosa, en el que se colocan válvulas mecánicas en las ventosas [27]. La plataforma del robot usa dos pistas con doce ventosas en cada una de ellas, y estas ventosas se activan mediante un nuevo diseño de válvula mecánica [28]. La válvula mecánica se compone de un resorte y un mecanismo de leva. La válvula se abre mecánicamente mientras la ventosa se mueve hacia el fondo de la pista. Este trabajo también presenta la optimización de la presión de vacío utilizando el método Taguchi [29, 30]. Además, se han realizado esfuerzos para modularizar el diseño del robot y se ha desarrollado una plataforma con tres módulos principales [31]. Cada módulo está equipado con las orugas de ventosas antes mencionadas, mediante el control de cada uno de estos módulos en función del análisis cinemático, se ha realizado y validado un control de transición entre dos superficies ortogonales a través de experimentos de campo con el robot desarrollado.

iii. Adhesión de la bomba de vacío

Este método utiliza una presión negativa entre el robot y la pared generalmente a través del uso de una bomba. [25]

Gao y Kikuchi, han desarrollado un robot trepador, Fig. 15, que utiliza el sistema de ruedas con presión negativa generada por una bomba de vacío que actúa como impulsor o hélice [32]. El robot consta básicamente de un cuerpo central sellado, dos ruedas para movilidad y dos bombas de vacío [33]. Para los sistemas de hélice, la presión negativa generada por la hélice y el espacio intermedio entre el sello y la pared se calcula y analiza en función de la dinámica y las relaciones entre los parámetros del robot y el aire que entra en la cámara de vacío.

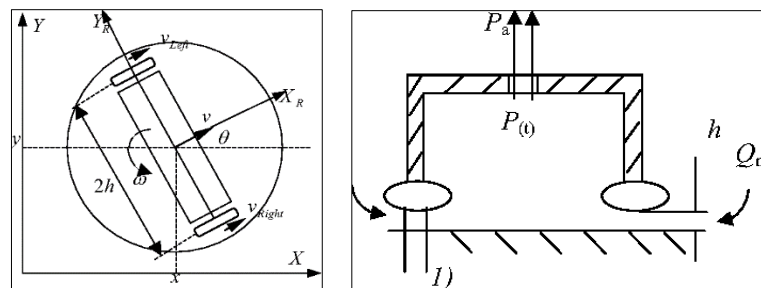


Fig. 15. a. Modelo del robot. b. Modelo sellado del robot. [33]

iv. Adherencia magnética

Este método se adopta a menudo para paredes que tienen altos niveles de permeabilidad magnética. Ya que la mayoría del trabajo anterior en esta área utiliza imanes permanentes, esto elimina la necesidad de cualquier dispositivo como fuente de alimentación. [25]

Xu y Ma, crearon un robot trepador de paredes con pistas magnéticas, como se puede apreciar en la Fig. 16. Los imanes permanentes y los bloques de metal se colocan alternativamente en las orugas montadas en el robot. Se ha diseñado un novedoso torso elástico que permite atravesar superficies de paredes cóncavas-convexas, y se ha adoptado un mecanismo de paralelogramo para mejorar aún más la adaptabilidad del robot. Este método no requiere ningún dispositivo adicional como una fuente de alimentación para navegar por las superficies de la pared, ya que solo se necesitan imanes permanentes para generar la fuerza de succión requerida. Este ahorro de carga ayuda a mejorar la capacidad de carga útil. [34]

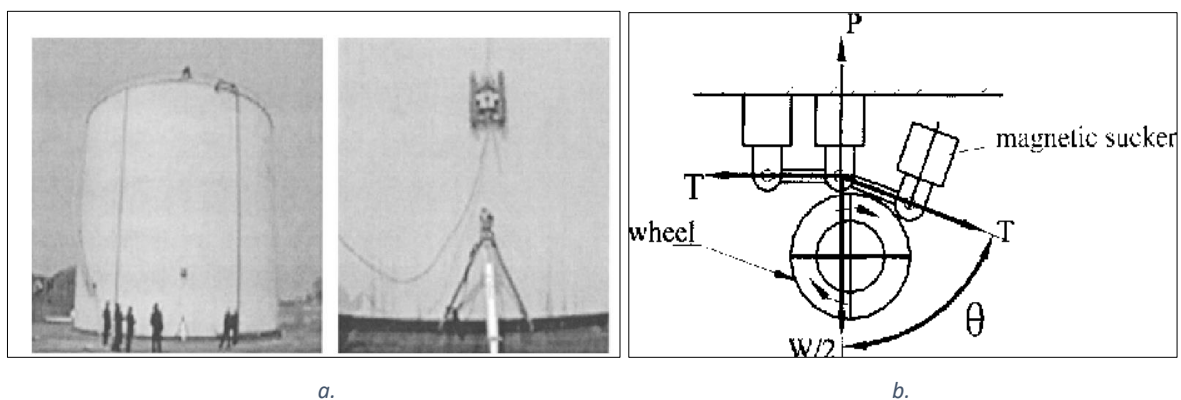


Fig. 16. a. Robot trepador realizando limpieza. b. Análisis de fuerza de la trayectoria. [34]

v. Agarre de cuerda y / o riel

Este método utiliza un ascendedor de cuerda instalado en la pared para soportar la plataforma del robot de navegación. Este enfoque garantiza un alto grado de seguridad, ya que el robot siempre está asegurado a la pared o el techo a través de una cuerda o cable, que a veces incluso ayuda con la movilidad del robot. [25]

Zhang H. Zhang J, Liu y Zong, han diseñado y construido un robot trepador para limpiar una superficie esférica fachada [35]. Este robot auto-trepante está destinado a utilizarse para limpiar la media concha elíptica del Gran Teatro Nacional de China. El robot consta de un mecanismo trepador, un mecanismo de movimiento, dos cepillos de limpieza y mecanismos de apoyo, Fig. 17.

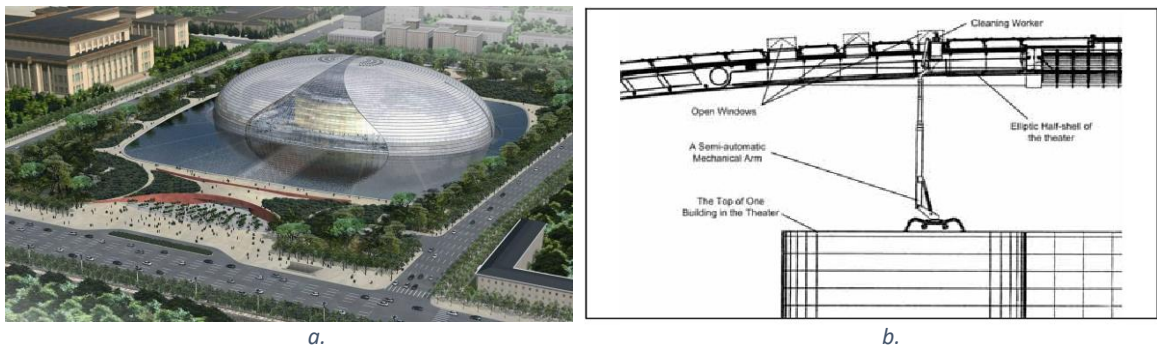


Fig. 17. a. Gran Teatro Nacional de China. b. Robot auto-trepante. [35]

vi. Adhesión bioinspirada

Este enfoque imita las características de las especies vivas en la naturaleza que pueden navegar superficies de paredes verticales, utilizando la bioinspiración como principio básico para sintetizar nuevos mecanismos artificiales de locomoción. [25]

Funatsu y Kawasaki, investigaron la condición de deslizamiento en una superficie de pared vertical y proponen un robot hexápodo de escala en cm, que puede trepar por la pared vertical enganchando sus garras [36]. Este robot ha sido diseñado para ser liviano y de tamaño compacto, de modo que trepe por las paredes sin ninguna fuerza de succión, Fig. 18. Se ha realizado un análisis de estabilidad en relación con la aspereza de la superficie del muro y los límites de funcionamiento estables se han identificado mediante simulaciones. Dado que la fuerza de volumen, como la gravedad, es proporcional a la longitud al cubo y la fuerza de área, como la fuerza del músculo, es proporcional a su sección transversal, es decir, la longitud al cuadrado, un objeto es más capaz de vencer la gravedad cuanto más pequeño es.

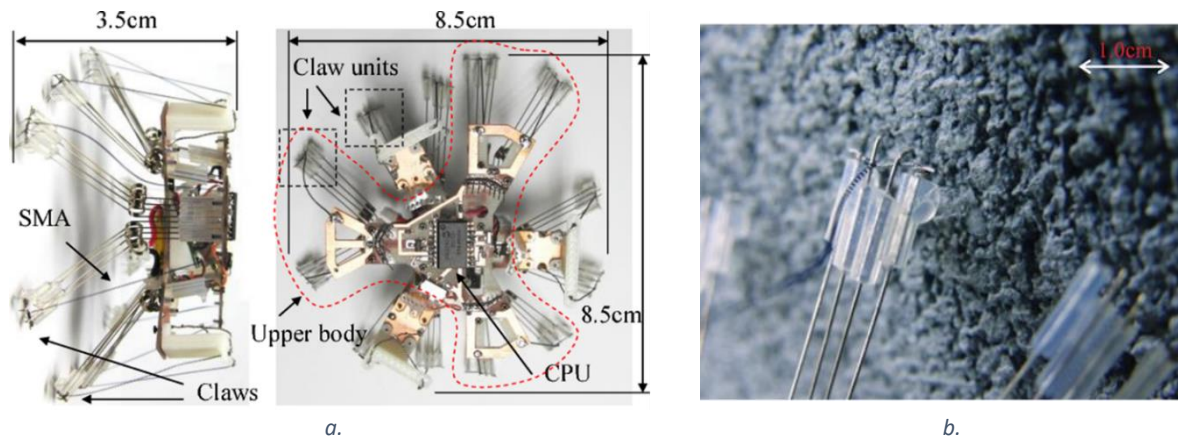


Fig. 18. a. Robot hexápodo trepador. b. Robot trepando en superficie de hormigón. [36]

A través del estudio de más de 100 referencias bibliográficas, en este artículo se caracterizaron las fases que comprende una tarea de limpieza, Tabla 2.

Tabla 2. Fases de tarea de limpieza de fachadas de vidrio

TAREAS DE LIMPIEZA DE FACHADAS DE VIDRIO			
FASES	CONDICIONES AMBIENTALES		
	CÁLIDAS Y SECAS	LLUVIA	DESÉRTICO
Navegación sobre el área definida.	x		x
Adaptación a las formas de las ventanas.	x		x
Lavar/Cepillar ventanas.	x		x
Líquido limpiador.	x		

Los atributos que se deben tener en cuenta para el diseño ideal de un robot de limpieza de superficies regulares como el vidrio, se resumen en la Tabla 3:

Tabla 3. Atributos de diseño robot.

CONJUNTO DE ATRIBUTOS DE DISEÑO DESEABLES PARA UN ROBOT DE LIMPIEZA DE FACHADAS DE VIDRIO IDEAL	
MAXIMIZAR	MINIMIZAR
El área total de la pared cubierta.	El tiempo total para cubrir un área de pared determinada.
La tolerancia a fallas.	El área de la pared limpiada varias veces.
La información perceptible.	El deslizamiento de la pared.
La eliminación de polvo.	El consumo de energía.
La seguridad.	El ruido.
La interacción del usuario.	Los cambios de infraestructura necesarios para la implementación de robots.

2.2.6. Robot para limpieza de fachada - CN104983369B.

Este robot de limpieza de fachadas se caracteriza porque incluye una plataforma rodante de servo seguro, Fig. 19. La sección inferior está conectada con el cuerpo de limpieza mediante un cable de seguridad, que a su vez está provista de pista móvil. Posee un dispositivo retractor que en su parte inferior está conectada con la ventosa. El dispositivo incluye un cepillo giratorio y una cuchilla limpiadora, los cuales son accionados en cuanto sale el chorro de agua a presión; la parte superior

del cuerpo de limpieza está provista de medios de fijación de corredera conectados con el cabezal de limpieza. [37]

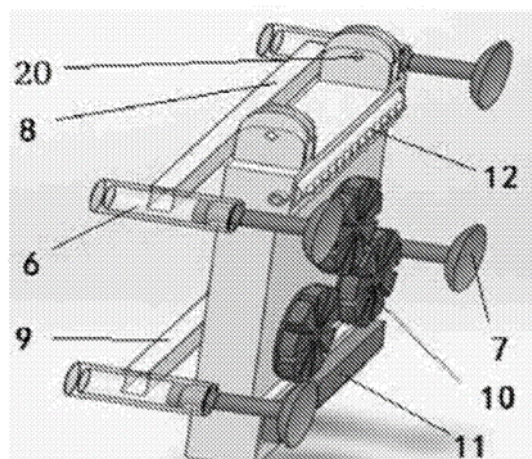


Fig. 19. Robot de limpieza de fachadas. [37]

2.2.7. Aparato trepamuros - CN101554892B.

El limpiador automático de paredes exteriores, un dispositivo especial de alta tecnología y de integración electromecánica, diseñado para limpiar las fachadas de edificios modernos de gran altura, Fig. 20. El modelo de utilidad está compuesto por un cabezal de limpieza, un riel colgante, un brazo grande, una placa base, un marco de máquina, un mecanismo de marcha, un mecanismo de dirección, un mecanismo de cambio de amplitud, un mecanismo de elevación y un sistema de control eléctrico. [38]

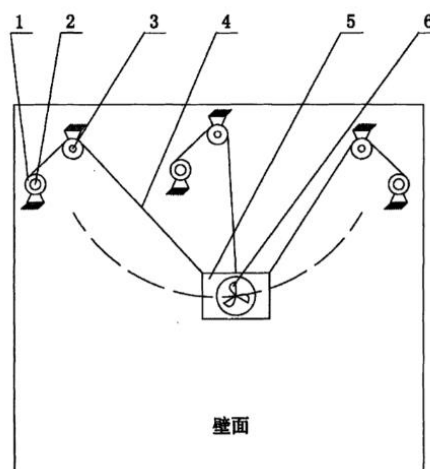


Fig. 20. Robot Trepamuros. [38]

2.2.8. Aparato para limpiar fachada de edificio - US8661598B2.

Esta invención se trata de un aparato para limpiar fachadas de vidrio de edificios de gran altura, utilizando un sistema de limpieza por recirculación, Fig. 21.

El aparato tiene un marco estructural, un proveedor de empuje como generador de fuerza para mantenerse en contacto con la fachada, y un circuito cerrado de lámina de tela como sistema de limpieza. Cuenta con una bomba de agua a alta presión que descarga líquido en la lámina de tela a través de boquillas rociadoras, mientras los rodillos exprimidores extraen los líquidos. Posee una bandeja colocada debajo de los rodillos exprimidores y las boquillas de pulverización para recoger el líquido de limpieza exprimido y pulverizado, así como también, un depósito de agua de reserva que suministra líquido de limpieza a la bomba de agua a alta presión. Una unidad de filtración, almacena el líquido de limpieza recogido por la bandeja colectora, desde donde una pequeña bomba lo envía al depósito de agua de reserva ya filtrado. Mediante sus brazos retráctiles que se extienden hacia la fachada, pone la lámina de tela en contacto con la superficie, en cuanto la unidad de elevación proporciona el movimiento vertical al aparato. Tiene un sistema de sujeción con cable de acero que suspende el aparato desde la parte superior del edificio, para darle estabilidad a toda estructura. [39]

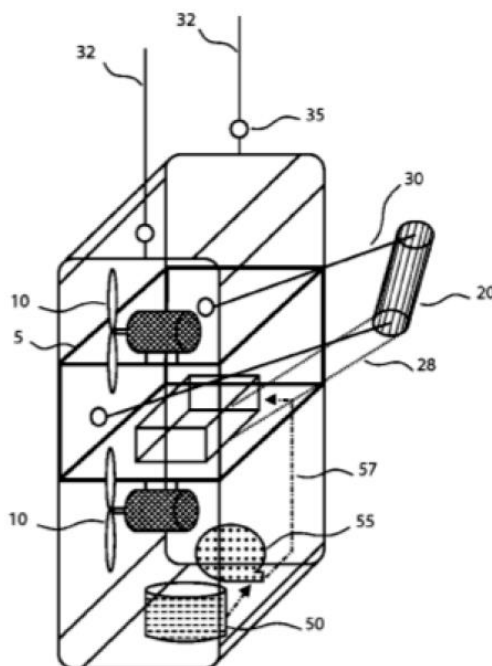


Fig. 21. Aparato de limpieza de fachadas en vidrio. [39]

2.2.9. Limpieza Vertical Estabilizada - US8790468B2

Este sistema de limpieza automatizado por aplicación de líquido para estructuras tales como edificios, está diseñado a partir de plataformas estabilizadas por uno o más propulsores que dirigen una plataforma contra una superficie vertical, Fig. 22.

Posee un sistema de control que puede ser operado en configuración completamente manual o semiautomática por un solo operador ubicado de manera segura a la vista del dispositivo (por observación directa o por cámaras), y tiene como segunda opción unos contrapesos que mantienen el carro en contacto firme con la superficie, ya que incorpora una tecnología estabilizadora inventiva de los propulsores. Un primer motor acciona los elementos de lavado y, el cabrestante para subir, bajar y desplazar horizontalmente la plataforma de lavado a lo largo de la superficie vertical. Un segundo motor, es usado para mover un carro de soporte de techo horizontalmente con respecto a la superficie, mientras que un tercer motor puede controlar el movimiento vertical del carro de lavado. La plataforma está estabilizada contra el movimiento de alejamiento de la superficie vertical por al menos un propulsor (p. ej., un propulsor de gas, como un propulsor de aire y/o un propulsor de agua residual/recuperada) colocado entre al menos dos puntos de contacto entre la superficie vertical superficie y el sistema de limpieza móvil. [40]

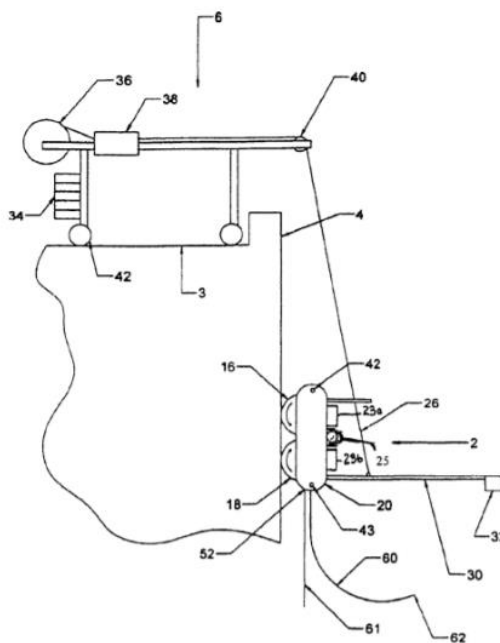


Fig. 22. Vista lateral del aparato de limpieza frente a la fachada de un edificio. [40]

2.2.10. Comparativa de dispositivos de limpieza

El auge de la robótica de servicios tiende al desarrollo de dispositivos autónomos, trepadores o autopropulsados, lo que se vé significativamente limitado por la capacidad del robot en impulsarse sobre superficies compuestas, es decir, con elementos tridimensionales, inclinaciones, escalones o simplemente con espacios, lo que genera inestabilidad en su trayectoria u orientación, a la hora de atravesar dichas irregularidades.

Si bien, en la mayor parte de la revisión del estado del arte, se encuentran dispositivos enfocados a la aplicación de limpieza en superficies regulares como el vidrio, pero sumado a los problemas expuestos anteriormente, las superficies resbaladizas pueden hacer que los robots convencionales pierdan fácilmente una parte importante, si no toda, de su tracción sobre la superficie.

Otro problema con los robots diseñados para trabajar en superficies verticales, es su reducida capacidad de carga útil, pues la gravedad es y será el desafío mas complejo de superar a la hora de desarrollar estos dispositivos.

Estos robots operan estando sujetos del edificio, a través de cables o cuerdas que van empotrados en su parte superior o inferior, y conectados en algun punto de la cubierta o fachada de la estructura, lo que puede restringir el desplazamiento y seguimiento idóneo de las trayectorias propuestas por la interrupción de dichos elementos. Habitualmente, estos dispositivos cuentan con elementos adicionales como poleas y sistemas complementarios, que generan cargas adicionales a la edificación, que unidas con la fuerza del viento pueden generar un riesgo latente para su propia estabilidad.

Otros dispositivos requieren condiciones de las estructuras especiales, como es el caso de la permeabilidad magnética, o simplemente tener superficies muy finas, para garantizar una adhesión constante.

El dispositivo que se propone en el presente documento, es aplicable a cualquier tipo de material (p.ej: hormigón, vidrio, mampostería, cerámica, entre otras). No se adhiere a la fachada, por lo cual, supera las restricciones que tienen los dispositivos convencionales; no posee limitación con las irregularidades o elementos tridimensionales de la fachada, ya que se acomoda a cualquier tipo de perfil estructural y configuración morfológica; no requiere que la superficie operacional cuente con características especiales, como en el caso de la adherencia

magnética; y, por último no adiciona carga a la infraestructura, pues el robot jamás entrará en contacto con la superficie durante el desarrollo de las tareas de limpieza.

En la tabla 4, se expone de forma sintetizada una comparativa entre los desarrollos robóticos estudiados y analizados, y se clasifica según su principio de adhesión.

Tabla 4. Comparativa del estado del arte.

COMPARATIVA ESTADO DEL ARTE	
<i>El factor diferenciador es que nuestro dispositivo no va acoplado o estará en contacto con las superficies.</i>	
OTROS DISPOSITIVOS TREPADORES	DISPOSITIVO DE 5 GDL
Gravedad - Carga útil	No tiene problema con la gravedad.
POR PRINCIPIOS	
1. Adhesión con ventosa Funciona en superficies muy finas solamente (vidrio) Se limita por divisiones o irregularidades en el perfil.	Aplicable a cualquier tipo de material. Se adapta a cualquier perfil o concavidad.
2. Adherencia de orugas con ventosa. Funciona en superficies muy finas solamente (vidrio) Se limita por divisiones o irregularidades en el perfil.	Aplicable a cualquier tipo de material. Se adapta a las diferentes configuraciones morfológicas.
3. Adhesión de la bomba de vacío Funciona en superficies muy finas solamente (vidrio) Se limita por divisiones o irregularidades en el perfil.	Aplicable a cualquier tipo de material. Admite espaciados, salientes, entrantes y aplicabilidad sin importar su forma.
4. Adhesión magnética Requiere altos niveles de permeabilidad magnética en la superficie.	No requiere permeabilidad magnética.
5. Agarre de cuerda y/o riel. Genera carga adicional a la superficie. Requiere de propulsores adicionales.	No genera cargas adicionales, pues no entra en contacto con la superficie. No requiere propulsores adicionales.

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

Considerando los métodos actuales de limpieza, este proyecto pretende optimizar y mejorar dicha práctica, a través del desarrollo de un dispositivo de asistencia de cinco grados de libertad, cuya parte mecánica está conformada por un sistema de configuración cartesiano (3GDL), un sistema Pan-Tilt (2GDL) y una pistola de chorro a alta presión como efector final (Modular).

El prototipo de laboratorio, es un robot cartesiano de aplicación de servicio, sin embargo, durante el escalonamiento de la investigación, podrá ser adaptado para abarcar otras aplicaciones robóticas como inspección.

El robot consta de una estructura móvil “tipo andamiaje” como se muestra en la Fig. 23, la cual cuenta con ruedas en sus cuatro bases de apoyo y que incluyen un sistema de frenado que impide los movimientos no deseados. En su interior, acopla una plataforma móvil, habilitada para desplazarse a lo largo de la estructura.

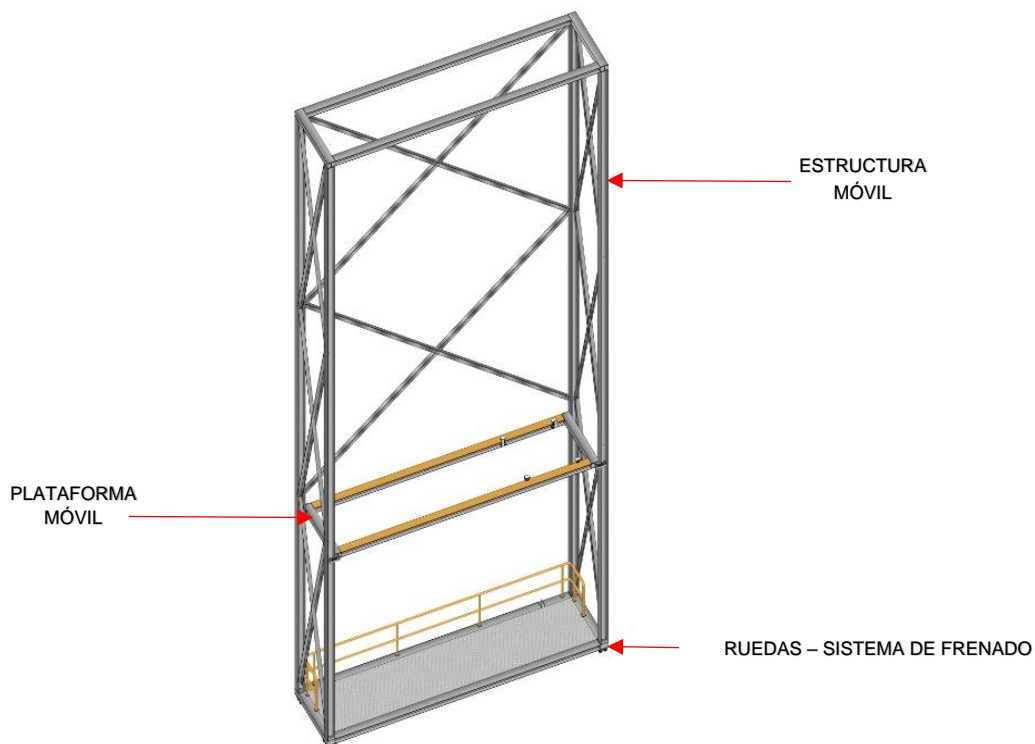


Fig. 23. Estructura Móvil del dispositivo de limpieza.

Una pistola de chorros a alta presión se encuentra montada sobre un sistema del tipo Pan-Tilt como efector final del robot (pistola de hidrolavadora), la cual se manipula vía remota. Fig. 24.

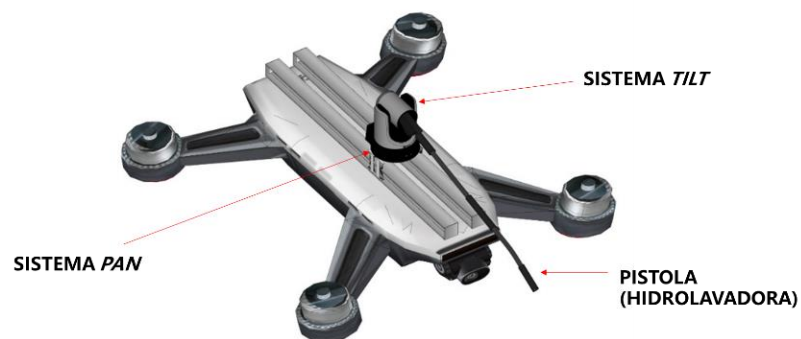


Fig. 24. Dispositivo base, integrado con el sistema Pan-Tilt y efector final.

La trayectoria de limpieza se efectuará en forma de Zig-Zag sobre la región deseada de manera automática. Esta región se recorrerá de manera manual por el operador, quien podrá orientar el dispositivo en relación con su velocidad y posición desde un lugar seguro. Fig. 25.

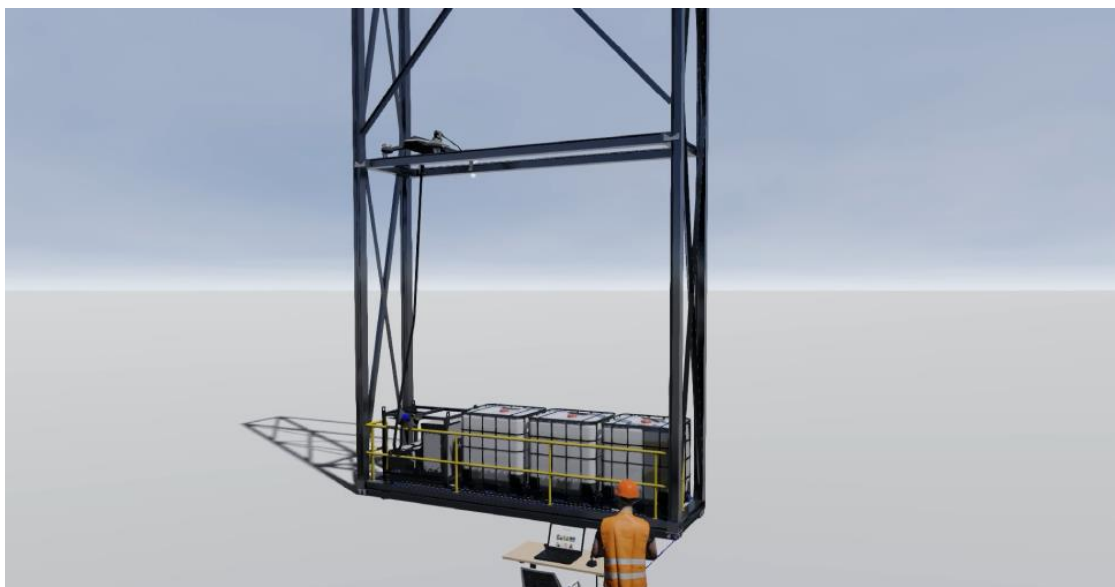


Fig. 25. Animación del concepto de propuesta descrita – Dispositivo de limpieza.

La Fig. 26 presenta un diagrama esquemático de la configuración completa del robot. Se tienen 3 traslaciones (ilustradas por cubos) y dos rotaciones (ilustradas por cilindros):

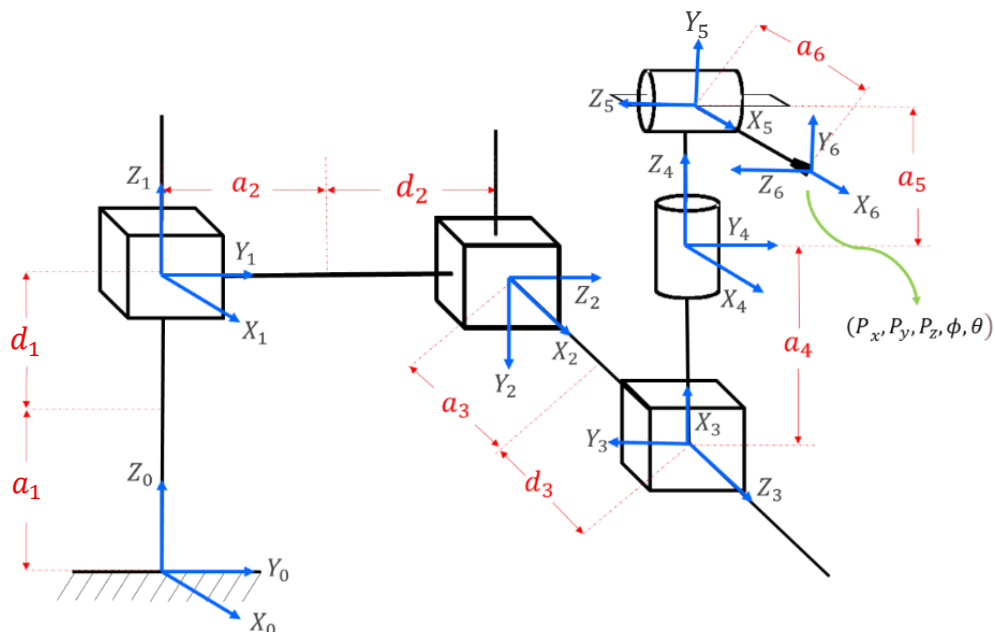


Fig. 26. Diagrama cinemático del robot (5GDL).

El dispositivo que en el presente capítulo se propone, está conformado por articulaciones prismáticas y rotacionales, cuyas dimensiones están definidas por las constantes a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 , a_6 , las variables articulares por las distancias traslacionales d_1 , d_2 , d_3 y por los ángulos rotacionales θ_1 , θ_2 .

En la Tabla 5, se muestran los parámetros de Denavit-Hartenberg, los cuales nos ayudan a describir la geometría del robot.

Tabla 5. Parámetros de Denavit-Hartenberg.

Joint i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	0	d_1	a_1	0
2	0	d_2	a_2	0
3	0	d_3	a_3	0
4	θ_1	0	a_4	0
5	θ_2	0	a_5	0

La Fig. 27, presenta una vista isométrica del diseño conceptual, donde el sistema Pan-Tilt permite orientar la pistola de la hidrolavadora.



Fig. 27. Vista isométrica de la propuesta preliminar de diseño conceptual.

El dispositivo permite la limpieza de superficies conformadas por cualquier tipo de material, superficies planas elevadas, inclinadas y/o verticales, regulares o con concavidades, sin la necesidad de que el personal suba a plataformas colgantes, andamios y sean suspendidos por cuerdas para entrar en contacto con la superficie, como se hace actualmente. El sistema se puede automatizar por completo, o permitir el control del sistema por parte de alguien que se encuentre en una posición distal o próxima al punto directo de aplicación de la actividad de limpieza. El sistema también puede ser operado en configuración completamente manual o semiautomática por un solo operador ubicado de manera segura a la vista del dispositivo (por observación directa o por cámaras).

La plataforma móvil que sostiene el dispositivo base, puede bajar o subir, y desplazarse horizontalmente a lo largo de la superficie vertical en cuanto el efector final (p. ej. pistola de hidrolavadora, pacómetro, etc) es accionado de forma perpendicular hacia cada uno de los puntos del área objetivo. El dispositivo base que se encuentra acoplado con la pistola de alta presión (para el presente caso), puede acercarse o alejarse de la superficie, adaptándose a sus irregularidades o concavidades.

Cabe resaltar que el enfoque de este proyecto, no se basa en la sustitución de las personas por una solución robótica, sino de crear una herramienta de asistencia que permita generar una acción colaborativa entre humanos y robots. Lo anterior, con el objetivo de minimizar los riesgos a los cuales se exponen los operarios en dichas prácticas, reducir los costos operacionales, y optimizar los tiempos que tarda llevar a cabo una tarea de servicio como lo es por ejemplo la limpieza de una fachada.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS CINEMÁTICO Y ESTÁTICO

4.1. ANÁLISIS CINEMÁTICO

En esta sección se analiza el movimiento del robot con respecto a un sistema de referencia fijo, que puede ubicarse en el extremo inferior derecho de la estructura móvil tipo andamiaje. El propósito es obtener una descripción analítica del movimiento espacial, y de la posición y orientación del efector final del robot, variables que estarán en función de las articulaciones, es decir, del valor articular traslacional o rotacional.

En la actualidad existen diferentes métodos para resolver este problema, pero en el caso presente se hizo uso de las matrices de transformación homogénea. Tomando las consideraciones de nuestra propuesta, se determinan los marcos de referencia para el dispositivo, como se muestra en la Fig. 28.



Fig. 28. Marcos: a) Estructura de tipo Cartesiano, b) Pan-Tilt y el efector final.

El análisis cinemático del dispositivo se simplifica considerando que está compuesto por dos partes: una estructura de configuración cartesiana y un sistema Pan-Tilt. Tomando la Fig. 25, donde se muestra el diagrama del robot de 5 grados de libertad: 3 traslaciones y 2 rotaciones, y la pose del efector final está definida por P_x , P_y , P_z , ϕ , θ , y una vez establecidos los parámetros de Denavit-Hartenberg consignados en la Tabla 5, se hallan las matrices de transformación homogénea correspondientes, como se muestra a continuación:

Eslabón 1: Sufrió una traslación de d_1 a lo largo del eje Z_0 , Fig. 29.

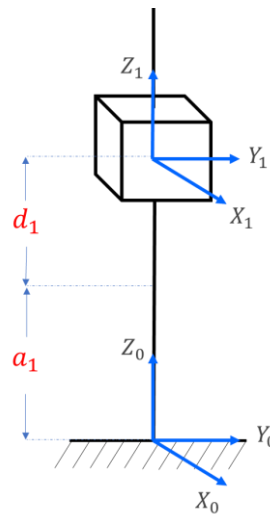


Fig. 29. Representación gráfica de la transformación homogénea de los marcos 0 – 1.

La transformación total para el sistema 0T_1 es la siguiente:

$${}^0T_1 = T(z_0, a_1 + d_1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a_1 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 1})$$

Eslabón 2: Sufrió una rotación de -90° alrededor del eje X_1 , y además una traslación de d_2 a lo largo del eje Z_1 , Fig. 30.

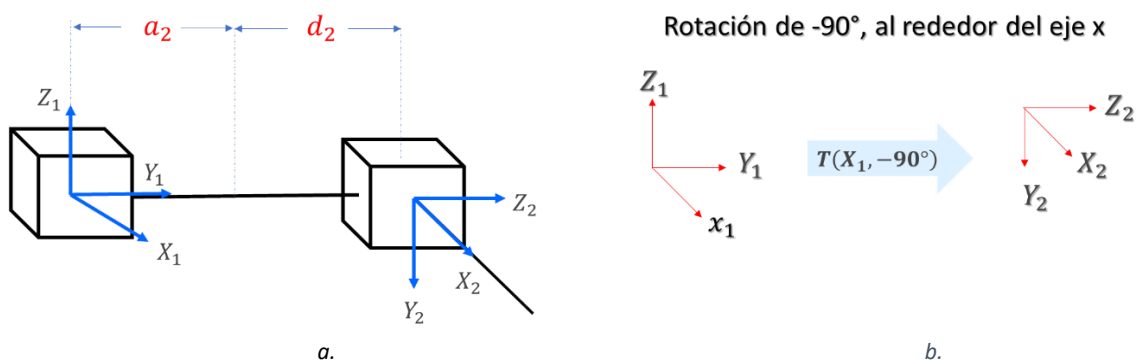
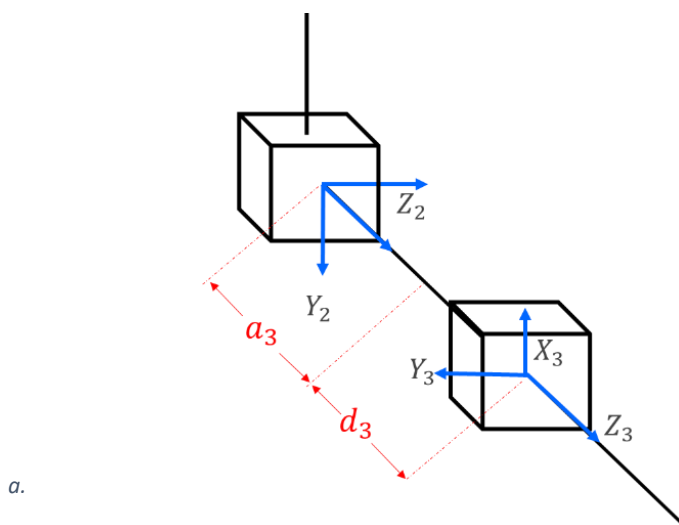


Fig. 30. a. Representación gráfica de la transformación homogénea de los marcos 1 – 2; b. Representación gráfica de la rotación con respecto a los ejes.

La transformación total para el sistema 1T_2 es la siguiente:

$${}^1T_2 = T(x_1, -90) T(z_1, a_2 + d_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a_2 + d_2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2})$$

Eslabón 3: Sufrió dos rotaciones: de -90° alrededor del eje Z_2 , y de -90° alrededor del eje X_2 ; además una traslación de d_2 a lo largo del eje Z_2 , Fig. 31.



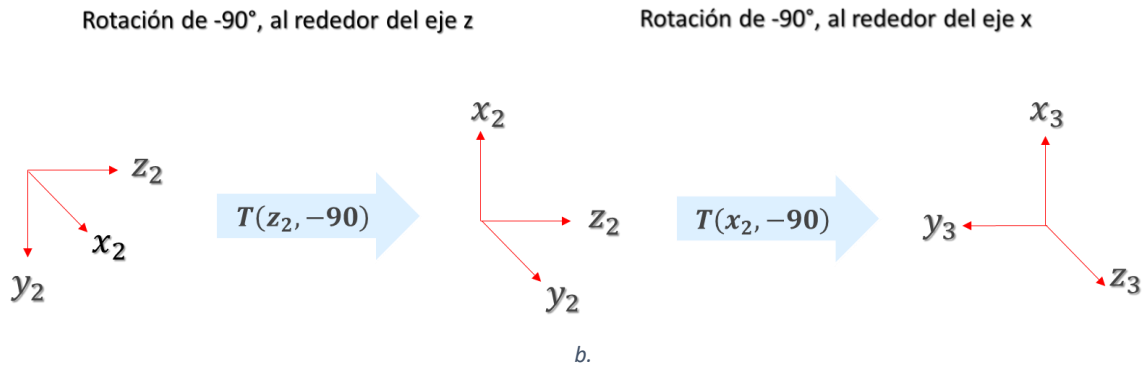


Fig. 31. a. Representación gráfica de la transformación homogénea de los marcos 2 – 3; b. Representación gráfica de la rotación con respecto a los ejes.

La transformación total para el sistema 2T_3 es la siguiente:

$${}^2T_3 = T(z_2, -90)T(x_2, -90)T(z_2, a_3 + d_3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & a_3 + d_3 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 3})$$

Eslabones 1, 2 y 3:

La transformación matricial total, que representa el sistema cartesiano, de los marcos 1, 2 y 3, Fig. 32, es la siguiente:

$${}^0T_3 = {}^0T_1 * {}^1T_2 * {}^2T_3$$

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & a_3 + d_3 \\ 0 & -1 & 0 & a_2 + d_2 \\ 1 & 0 & 0 & a_1 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 4})$$

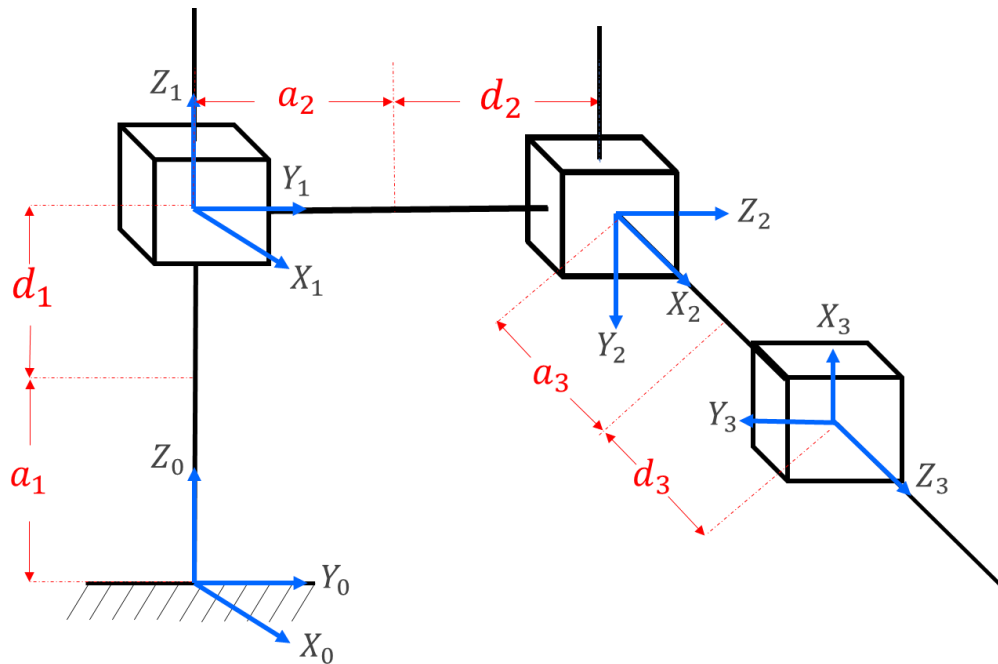


Fig. 32. Diagrama cinemático del sistema cartesiano (3 GDL) - Marcos 1, 2 y 3.

Eslabón 4: Sufrió tres rotaciones: de -90° alrededor del eje X_3 , de -90° alrededor del eje Z_3 , y de nuevo una de -90° alrededor del eje X_3 , Fig. 33.

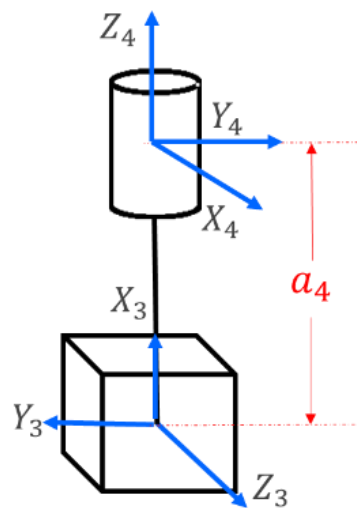


Fig. 33. Representación gráfica de la transformación homogénea de los marcos 3-4.

La transformación total, que representa el sistema $Pan {}^3T_4$, es la siguiente:

$${}^3T_4 = T(x_3, -90)T(z_3, -90)T(x_3, -90)T(z_3, a_4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & a_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 4})$$

Eslabón 5: Sufrió una rotación: de -90° alrededor del eje X_4 , Fig. 34.

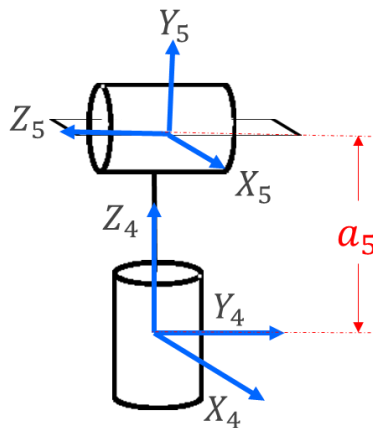


Fig. 34. Representación gráfica de la transformación homogénea de los marcos 4 – 5.

La transformación total para el sistema 4T_5 es la siguiente:

$${}^4T_5 = T(z_4, \theta_1)T(z_4, a_5)T(x_4, -90) = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & -c\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 5})$$

Eslabón 5: No sufrió ninguna rotación, Fig. 35.

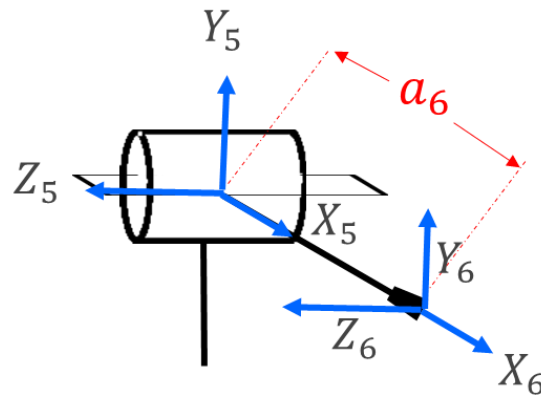


Fig. 35. Representación gráfica de la transformación homogénea de los marcos 5 – 6.

La transformación total, que representa el sistema *Tilt* 5T_6 , es la siguiente:

$${}^5T_6 = T(z_5, \theta_2)T(x_5, a_6) = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & a_6c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & a_6s\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 6})$$

Eslabones 1, 2 y 3:

La transformación matricial total, que representa el sistema *Pan-Tilt* y efector final, de los marcos 4, 5 y 6, Fig. 36, es la siguiente:

$${}^4T_6 = {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 = \begin{bmatrix} c\theta_1c\theta_2 & -c\theta_1s\theta_2 & s\theta_1 & a_6c\theta_1c\theta_2 \\ s\theta_1c\theta_2 & -s\theta_1s\theta_2 & -c\theta_1 & a_6s\theta_1c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & a_4 + a_5 + a_6s\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 7})$$

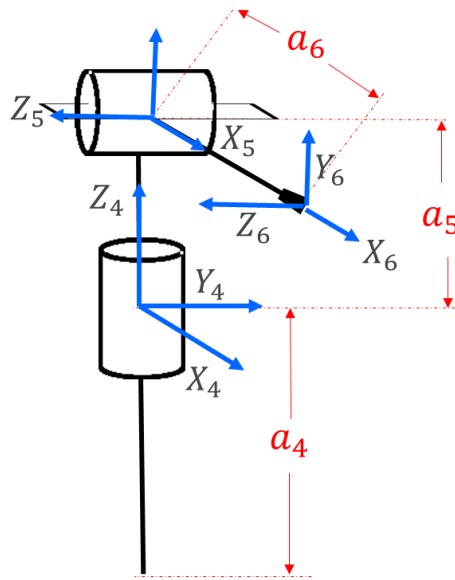


Fig. 36. Diagrama cinemático del sistema Pan-Tilt (2 GDL) y efector final - Marcos 4, 5 y 6.

Sistema completo

La transformación total, que finalmente da como resultado la posición en el sistema de referencia global de un punto, que se mide en el sistema de referencia local del efector final, se halla multiplicando todas las matrices de transformación y consecuentemente, se establece la ecuación en lazo cerrado del mecanismo:

$${}^0T_N = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_{N-1} \dots {}^{N-1}T_N$$

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} c\theta_1 c\theta_2 & -c\theta_1 s\theta_2 & s\theta_1 & a_3 + d_3 + a_6 c\theta_1 c\theta_2 \\ s\theta_1 c\theta_2 & -s\theta_1 s\theta_2 & -c\theta_1 & a_2 + d_2 + a_6 s\theta_1 c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & a_1 + d_1 + a_4 + a_5 + a_6 s\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 7})$$

De esta forma, la posición P_x, P_y, P_z del efector final estará dada por la última columna de la matriz anterior:

$$P_x = a_3 + d_3 + a_6 c\theta_1 c\theta_2 \quad (\text{Ec. 8})$$

$$P_y = a_2 + d_2 + a_6 s\theta_1 c\theta_2 \quad (\text{Ec. 9})$$

$$P_z = a_1 + d_1 + a_4 + a_5 + a_6 s\theta_2 \quad (\text{Ec. 10})$$

Finalmente, con la parte rotacional 0R_6 de la matriz 0T_6 es posible calcular los ángulos de Euler, que definen la orientación del efector final. Los ángulos de Euler están dados por la matriz:

$$R(\psi, \varphi, \theta) = \begin{bmatrix} c\varphi c\theta & s\varphi s\psi c\theta - c\psi s\theta & s\varphi c\psi c\theta + s\psi s\theta \\ c\varphi s\theta & s\varphi s\psi s\theta + c\psi c\theta & s\varphi c\psi s\theta - s\psi c\theta \\ -s\varphi & c\varphi s\psi & c\varphi c\psi \end{bmatrix}$$

Para el ángulo φ , igualando el elemento (3,1) de la matriz 0T_6 y el elemento (3,1) de la matriz $R(\psi, \varphi, \theta)$:

$$s\theta_2 = -s\varphi \quad (\text{Ec. 11})$$

$$\varphi = -\theta_2 \quad (\text{Ec. 12})$$

Para el ángulo θ , igualando el elemento (2,1) de la matriz 0T_6 y el elemento (2,1) de la matriz $R(\psi, \varphi, \theta)$:

$$s\theta_1 c\theta_2 = c\varphi s\theta \quad (\text{Ec. 13})$$

$$s\theta = \frac{s\theta_1 c\theta_2}{c\varphi} \quad (\text{Ec. 14})$$

Reemplazando el valor previamente calculado para el ángulo φ :

$$s\theta = \frac{s\theta_1 c\theta_2}{c(-\theta_2)} = \frac{s\theta_1 c\theta_2}{c(\theta_2)} = s\theta_1 \quad (\text{Ec. 15})$$

$$\theta = \theta_1 \quad (\text{Ec. 16})$$

A partir de las ecuaciones que se obtienen de la cinemática directa, se despejan las variables articulares, y se obtienen las ecuaciones para la cinemática inversa, obteniendo como resultado:

$$\theta_1 = \theta \quad (\text{Ec. 17})$$

$$\theta_2 = -\varphi \quad (\text{Ec. 18})$$

$$d_1 = P_z - a_1 - a_4 - a_5 - a_6 s\theta_2 \quad (\text{Ec. 19})$$

$$d_2 = P_y - a_2 - a_6 s\theta_1 c\theta_2 \quad (\text{Ec. 20})$$

$$d_3 = P_x - a_3 - a_6 c\theta_1 c\theta_2 \quad (\text{Ec. 21})$$

Utilizando las ecuaciones de la cinemática inversa es posible calcular los valores numéricos de las variables de articulación para que la pose del efector final del robot (pistola de lavado a alta presión) coincida con el vector normal de cada punto de la superficie de la fachada, como se muestra en la Fig. 37.

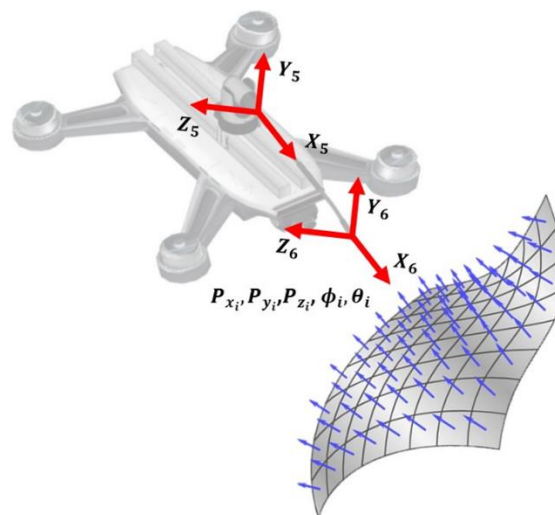


Fig. 37. Posición del efector final en función de un vector normal de la superficie de la fachada.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LA TRAYECTORIA

Para realizar una caracterización de tarea de limpieza a alta presión, es importante analizar la forma en la que los operadores de limpieza ejecutan las actividades, lo cual se analizó a través de observación directa y de videos en internet [29]. A partir de ello, se determinó que una trayectoria óptima para la limpieza de fachadas, es en forma de Zig-Zag, Fig. 37, ya que al aplicarla se genera una cobertura total de la superficie operacional. El barrido debería ser de arriba hacia abajo, teniendo en cuenta que la mayoría de técnicas de limpieza generan residuos secundarios.

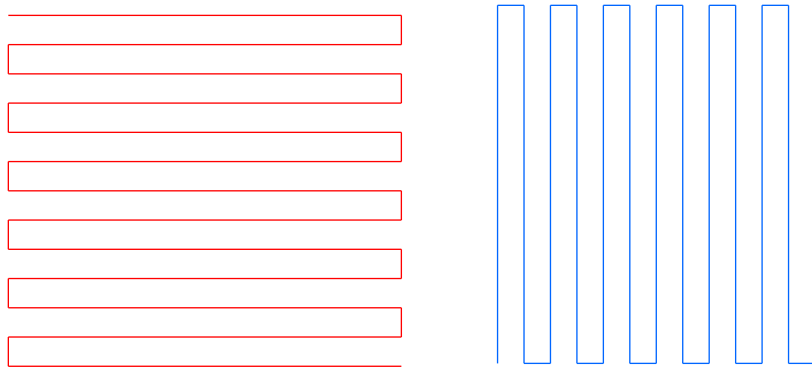


Fig. 38. Trayectorias para la limpieza de fachada.

La fachada del edificio es representada digitalmente por una superficie $S \in \mathbb{R}^3 = \{x, y, z\}$, como se muestra en la Fig. 39.

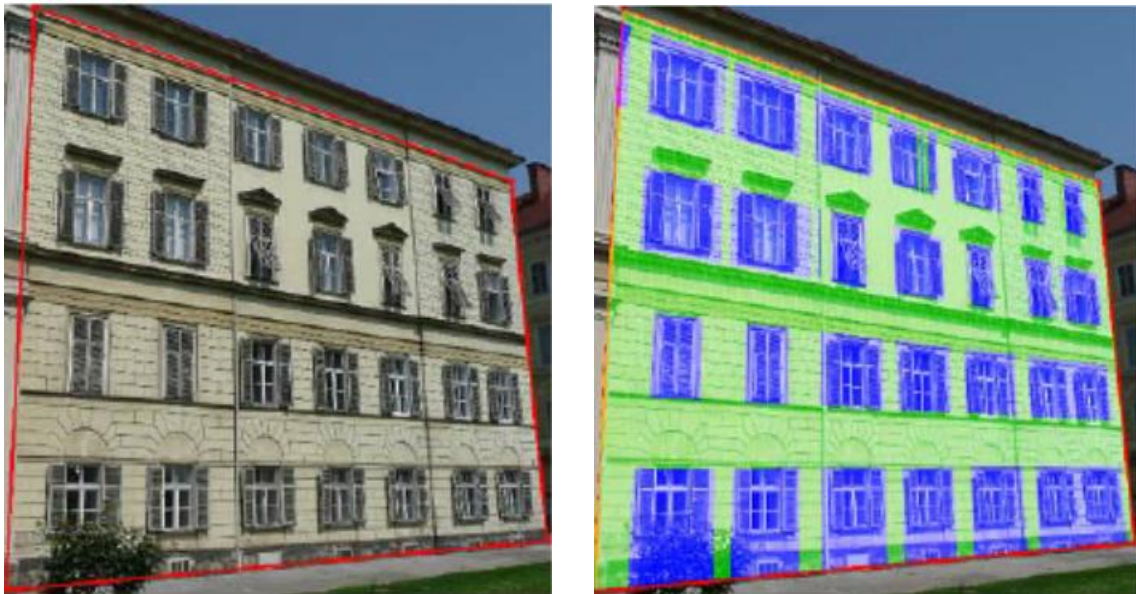


Fig. 39. Representación digital de un edificio.

Una región de la superficie $S \in \mathbb{R}^3$ se puede representar por una nube de puntos $P_i \in S$, donde el conjunto de $P_i = \{x_i, y_i, z_i\}$ forman una malla con un espaciamiento δ , que puede o no ser uniforme, Fig. 40.

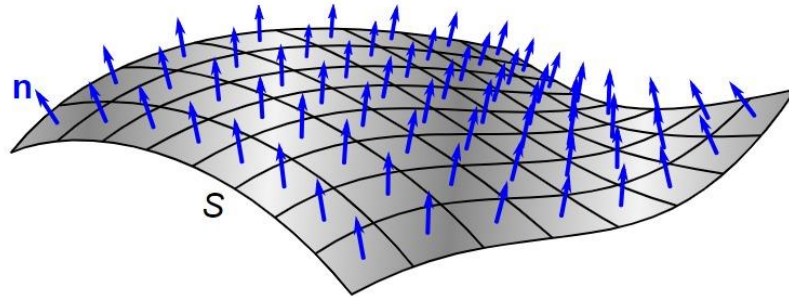


Fig. 40. Representación digital de una región de la superficie de la fachada.

Para cada elemento de la malla, se tiene un vector n normal a la superficie, Fig. 41.

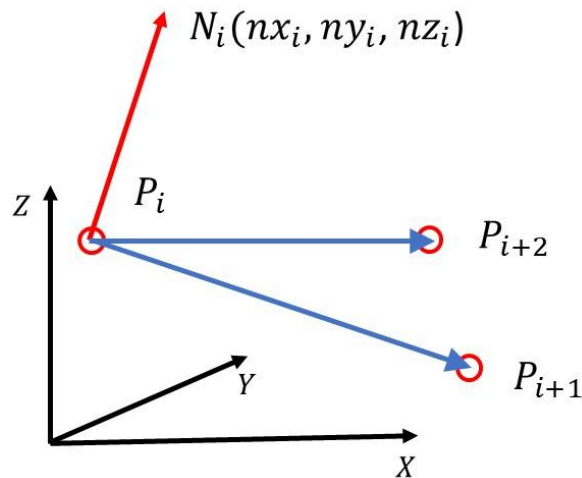


Fig. 41. Vector normal a la superficie de cada elemento de la malla

Este vector normal se puede definir por tres de los cuatro vértices de la malla, como se representa en la Fig. 42.

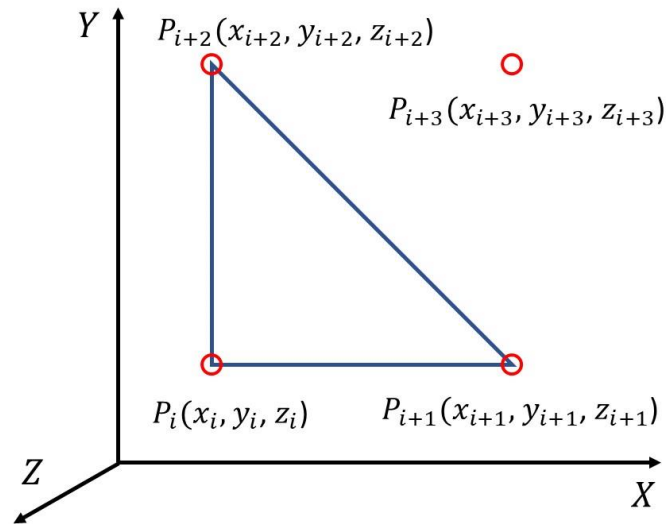


Fig. 42. Representación cuatro puntos que pertenecen a un elemento de la malla.

El vector normal N_i se puede calcular a partir del producto vectorial de los dos vectores $\overrightarrow{P_i P_{i+1}}$ y $\overrightarrow{P_i P_{i+2}}$:

$$N_i(nx_i, ny_i, nz_i) = \overrightarrow{P_i P_{i+1}} \times \overrightarrow{P_i P_{i+2}}$$

Donde:

$$\overrightarrow{P_i P_{i+1}} = P_{i+1} - P_i = [x_i - x_{i+1}, y_i - y_{i+1}, z_i - z_{i+1}]$$

$$\overrightarrow{P_i P_{i+2}} = P_{i+2} - P_i = [x_i - x_{i+2}, y_i - y_{i+2}, z_i - z_{i+2}]$$

La dirección del vector normal N_i puede representarse por medio de los ángulos ψ_i , ϕ_i , θ_i , definidos por las siguientes ecuaciones:

$$\psi_i = \cos^{-1} \frac{nx_i}{\|N_i\|}$$

$$\phi_i = \cos^{-1} \frac{ny_i}{\|N_i\|}$$

$$\theta_i = \cos^{-1} \frac{nz_i}{\|N_i\|}$$

Utilizando la convención de Euler, la matriz de rotación correspondiente es:

$$R(\psi, \varphi, \theta) = \begin{bmatrix} c\varphi c\theta & s\varphi s\psi c\theta - c\psi s\theta & s\varphi c\psi c\theta + s\psi s\theta \\ c\varphi s\theta & s\varphi s\psi s\theta + c\psi c\theta & s\varphi c\psi s\theta - s\psi c\theta \\ -s\varphi & c\varphi s\psi & c\varphi c\psi \end{bmatrix}$$

Las ecuaciones de la cinemática inversa, fueron evaluadas en el software MatLab, y se obtuvo la trayectoria que el dispositivo de limpieza debe seguir. Para garantizar una eficiente limpieza, se genera un barrido en forma de Zig-Zag desde la parte superior de la fachada hasta la base de la misma, cubriendo de forma total el área operacional objetivo.

En la Fig. 43, se observa la simulación en el software MatLab de los sistemas del componente mecánico del dispositivo (cartesiano y Pan-Tilt), a través de la representación de sus ejes obtenidos con las matrices de transformación homogénea y los parámetros de Denavit-Hartenberg. Así mismo, se representa la trayectoria en Zig-Zag propuesta, y su validación correspondiente. (código Matlab en anexo A).

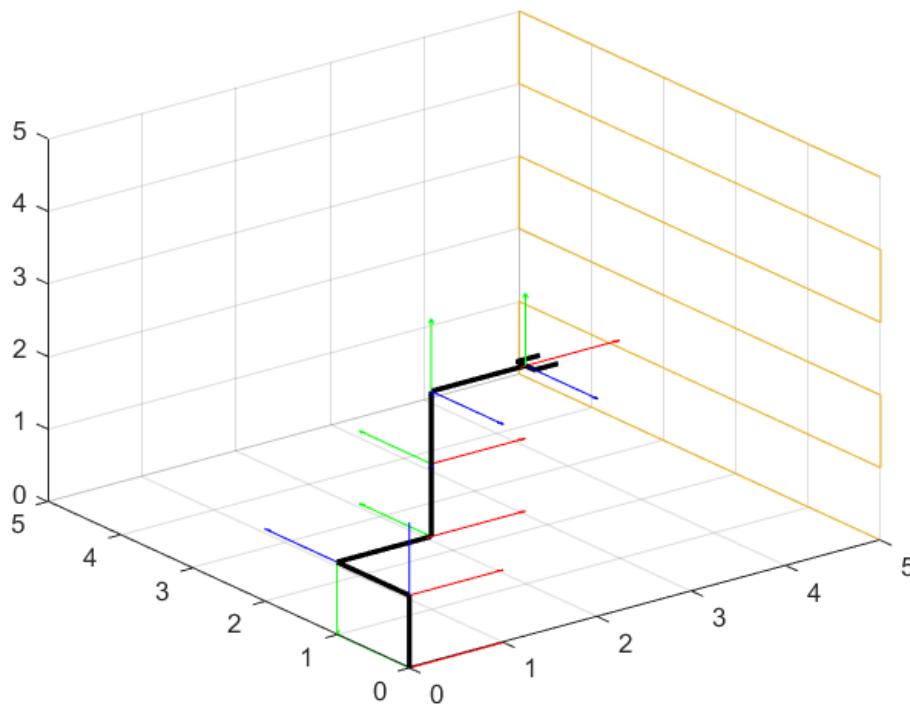


Fig. 43. Dispositivo siguiendo la trayectoria propuesta.

4.3. ANÁLISIS ESTÁTICO

El análisis estático de un robot o cualquier otra estructura mecánica se puede desarrollar mediante un diagrama de cuerpo libre y aplicando la tercera Ley de Newton. A continuación, se presenta el análisis estático del robot, considerando la movilidad y la amplitud de los grados de libertad del sistema Pan-Tilt.

Considerando la movilidad del sistema Pan-Tilt, y su rango de desplazamiento sobre el eje Z (profundidad), se presenta caso crítico para volcadura cuando el dispositivo base se localiza en el punto más lejano de la fachada y en la parte más alta de la estructura móvil, es decir, si se encuentra situado en la posición 0 en referencia al sistema tornillo-tuerca, ya que es cuando la fuerza de repulsión impacta directamente sobre el robot.

Las fuerzas de acción y reacción, y momentos del sistema estático se observan en la Fig. 44.

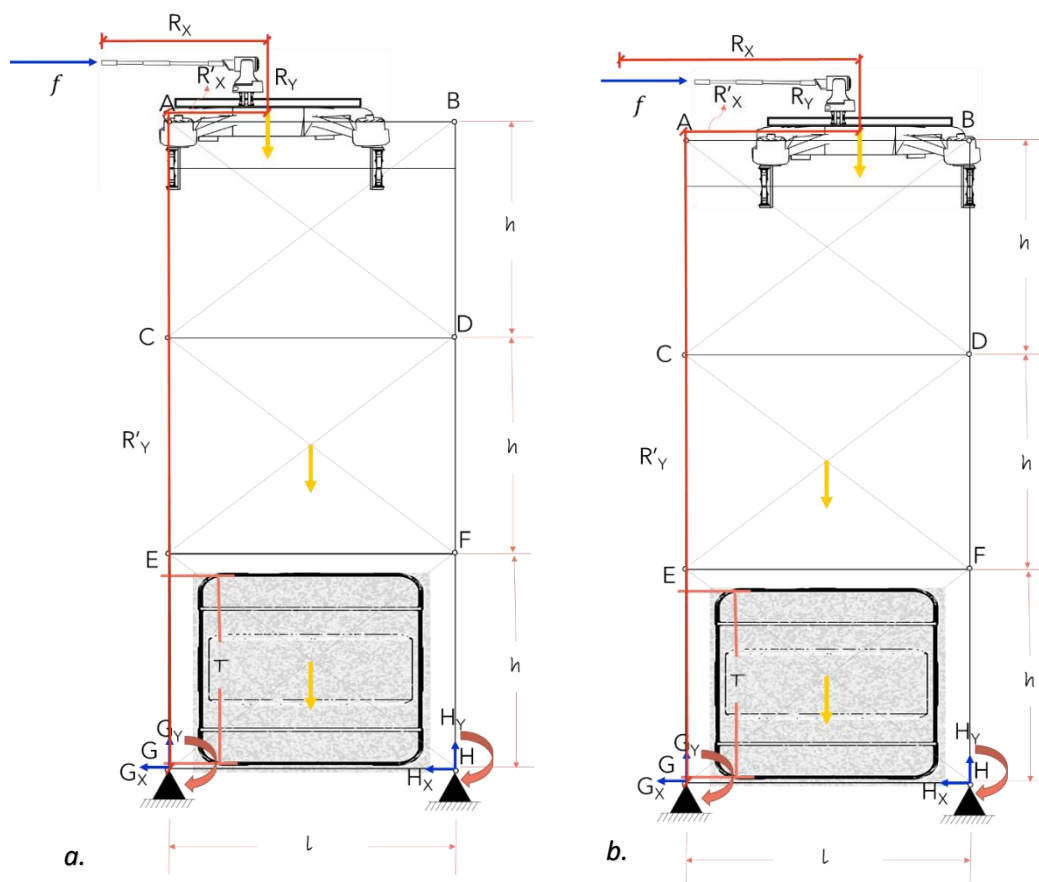


Fig. 44. Fuerzas de acción, reacción y momentos del dispositivo de limpieza: a. Dispositivo base más próximo a la fachada. b. Dispositivo base más alejado de la fachada.

De la Fig. 44, se obtienen las siguientes ecuaciones, donde se emplea la tercera Ley de Newton:

Sumatoria fuerzas eje x

$$\sum F_x = 0, \quad f - G_x - H_x = 0 \rightarrow G_x + H_x = f \quad (1)$$

(Ec. 22)

Sumatoria fuerzas eje y

$$\sum F_y = 0, \quad G_y + H_y - W_r - W_e - W_a = 0 \rightarrow G_y + H_y = W_a + W_e + W_r \quad (2)$$

(Ec. 23)

Donde G_y, H_y, G_x y H_x son las fuerzas de reacción, f es la fuerza de repulsión del chorro a presión, y W_a, W_e y W_r representan los pesos propios del tanque de agua, la estructura móvil y el dispositivo base junto con el sistema Pan-Tilt y el efector final; es decir el producto de su masa por la constante gravitacional.

Sumatoria momentos punto H

$$\sum M_H = 0, \quad W_r(l - R'_x) + W_e \frac{l}{2} + W_a \frac{l}{2} - G_y l - f(R'_y + R_y) = 0 \quad (Ec. 24)$$

$$G_y = \frac{1}{l} \left[W_r(l - R'_x) + \frac{l}{2}(W_e + W_a) - f(R'_y + R_y) \right] \quad (Ec. 25)$$

$$f(R'_y + R_y) > W_r(l - R'_x) + \frac{l}{2}(W_e + W_a) \quad (Ec. 26)$$

Donde l representa el ancho de la estructura móvil, R'_x y R'_y las fuerzas de reacción a R_x y R_y respectivamente.

Sumatoria momentos punto G

$$\sum M_G = 0, \quad -W_r R'_x - W_e \frac{l}{2} - W_a \frac{l}{2} + H_y l - f(R'_y + R_y) = 0 \quad (Ec. 27)$$

$$H_y = \frac{1}{l} \left[W_r R'_x + \frac{l}{2}(W_e + W_a) + f(R'_y + R_y) \right] \quad (Ec. 28)$$

Sumatoria momentos W_a

$$H_y \frac{l}{2} - H_x \frac{T}{2} - G_y \frac{l}{2} - G_x \frac{T}{2} - W_r \left(R'_x - \frac{l}{2} \right) - f \left(R'_y + R_y - \frac{T}{2} \right) = 0 \quad (\text{Ec. 29})$$

Donde T, simboliza la altura del tanque, es decir, la longitud que hay desde su base hasta su tapa.

Sustituyendo H_y y G_y

$$H_y \frac{l}{2} - H_x \frac{T}{2} - G_y \frac{l}{2} - G_x \frac{T}{2} - W_r \left(R'_x - \frac{l}{2} \right) - f \left(R'_y + R_y - \frac{T}{2} \right) = 0 \quad (\text{Ec. 30})$$

$$\begin{aligned} H_y \frac{l}{2} &= \frac{1}{l} \left[W_r R'_x + \frac{l}{2} (W_e + W_a) + f(R'_y + R_y) \right] \frac{l}{2} \\ &= \frac{1}{2} W_r R'_x + \frac{l}{4} (W_e + W_a) + \frac{1}{2} f(R'_y + R_y) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 31})$$

$$\begin{aligned} G_y \frac{l}{2} &= \frac{1}{l} \left[W_r (l - R'_x) + \frac{l}{2} (W_e + W_a) - f(R'_y + R_y) \right] \frac{l}{2} \\ &= \frac{1}{2} W_r (l - R'_x) + \frac{l}{4} (W_e + W_a) - \frac{1}{2} f(R'_y + R_y) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 32})$$

Por lo tanto

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} W_r R'_x + \frac{l}{4} (W_e + W_a) + \frac{1}{2} f(R'_y + R_y) - H_x \frac{T}{2} - \frac{1}{2} W_r (l - R'_x) - \frac{l}{4} (W_e + W_a) + \\ \frac{1}{2} f(R'_y + R_y) - G_x \frac{T}{2} - W_r \left(R'_x - \frac{l}{2} \right) - f \left(R'_y + R_y - \frac{T}{2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 33})$$

$$W_r R'_x + f(R'_y + R_y) - H_x \frac{T}{2} - \frac{1}{2} W_r l - G_x \frac{T}{2} - W_r \left(R'_x - \frac{l}{2} \right) - f \left(R'_y + R_y - \frac{T}{2} \right) = 0 \quad (\text{Ec. 34})$$

$$H_x \left(\frac{T}{2} \right) + G_x \left(\frac{T}{2} \right) = f \frac{T}{2} \quad (\text{Ec. 35})$$

$$H_x + G_x = f \quad (\text{Ec. 36})$$

Calculando

$$\begin{aligned}
 G_y + H_y &= \\
 \frac{1}{l} \left[W_r(l - R'_x) + \frac{l}{2}(W_e + W_a) - f(R'_y + R_y) \right] &+ \frac{1}{l} \left[W_r R'_x + \frac{l}{2}(W_e + W_a) + f(R'_y + R_y) \right] \\
 = \\
 W_r - W_r \frac{R'_x}{l} + \frac{W_e}{2} + \frac{W_a}{2} - \frac{f}{l}(R'_y + R_y) &+ \frac{W_r R'_x}{l} + \frac{W_e}{2} + \frac{W_a}{2} + \frac{f}{l}(R'_y + R_y) \\
 = W_r + W_e + W_a &
 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 37})$$

$$f(R'_y + R_y) > W_r(l - R'_x) + \frac{l}{2}(W_e + W_a) \quad (\text{Ec. 38})$$

$$f = \frac{W_r(l - R'_x) + \frac{l}{2}(W_e + W_a)}{R'_y + R_y} \quad (\text{Ec. 39})$$

Las fuerzas R'_x y R'_y permiten que el dispositivo de limpieza no se vuelque y se mantenga estable y en equilibrio estático, Fig. 45.

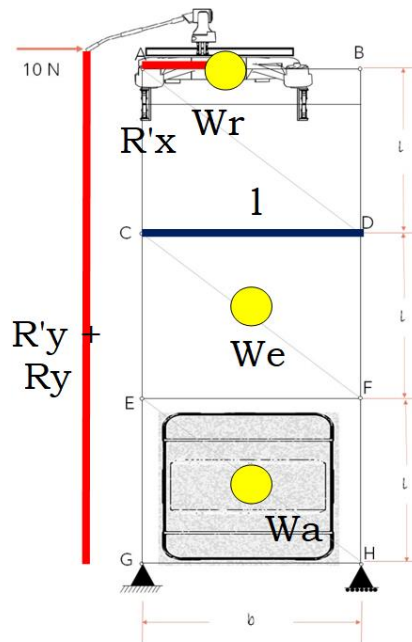


Fig. 45. Representación gráfica de las variables estáticas del robot.

CAPÍTULO 5. DISEÑO CAD

De la caracterización de la trayectoria de la tarea de limpieza, se obtuvieron los requerimientos fundamentales para dar inicio a la selección de los movimientos del robot. El primero, se refiere a su locomoción, la cual debe tener 3 GDL para poder cubrir eficientemente el área operacional, es decir, que proporcione una adaptabilidad a la superficie (entradas y salidas de la fachada) y maniobrabilidad tanto horizontal como vertical; y un segundo requerimiento, es la capacidad de posicionamiento de su efector final (para el presente caso, la pistola de hidrolavadora comercial), de forma que el chorro a alta presión quede perpendicular a cualquier punto de la superficie de la fachada, lo cual se consigue con un sistema rotacional de 2GDL.

Una vez establecidos los requerimientos fundamentales para la propuesta de diseño, se seleccionan los sistemas del robot partiendo del requerimiento de los tres grados de libertad correspondientes a su locomoción, teniendo para ello la mejor opción un sistema de configuración cartesiano.

Para el segundo requerimiento, se seleccionó un sistema Pan-Tilt con el propósito de dotar al efector final (pistola de hidrolavadora comercial) movilidad en dos ejes. Esto le brinda la capacidad de posicionamiento al efector final (para el presente caso, la pistola de hidrolavadora comercial), de forma que el chorro a alta presión quede perpendicular a cualquier punto de la superficie de la fachada, lo cual se consigue con un sistema rotacional de 2GDL.

DISEÑO CAD

Para definir el modelo CAD de la propuesta, Fig. 46, se consideraron parámetros como: locomoción, adaptabilidad a la superficie, trayectorias del efector final, maniobrabilidad horizontal y vertical, facilidad de montaje, peso y tipo de control.

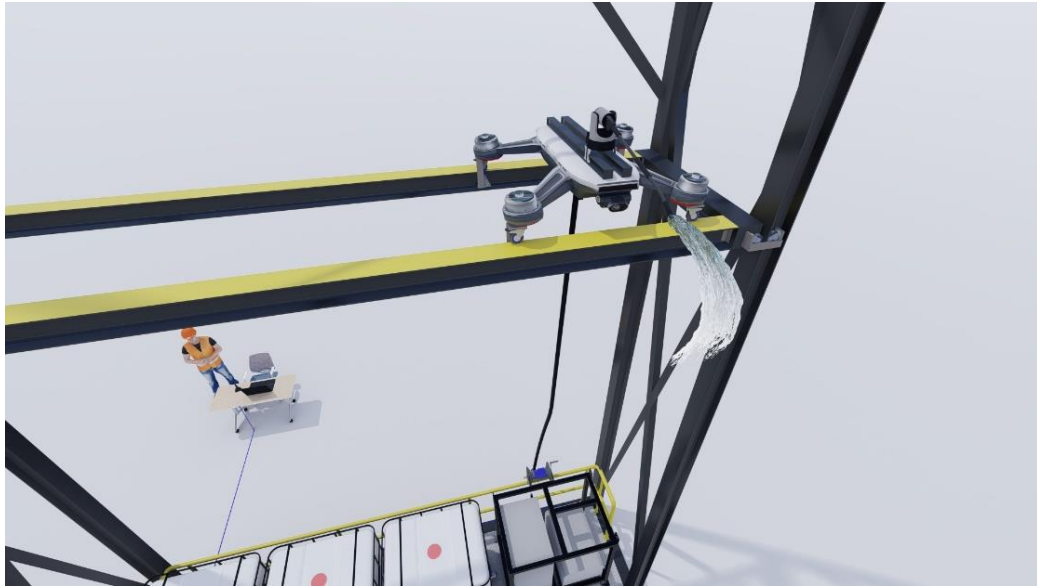


Fig. 46. Diseño CAD del dispositivo propuesto: Acoplamiento de la estructura y plataforma móvil, el dispositivo base, sistema Pan-Tilt y efector final.

Las necesidades que debe cubrir el robot se enfocan: en el alcance a todos los puntos de la superficie de la fachada considerando los diferentes perfiles (concavidades); el seguimiento de la trayectoria de limpieza requerida, mediante el sistema de configuración cartesiano y el sistema Pan-Tilt; el alcance de las posiciones y velocidades orientadas; y la eficiencia y eficacia de la tarea de limpieza.

Teniendo como base los requerimientos de diseño, los análisis realizados en los modelos cinemático y estático, y una vez elegida la trayectoria del robot, se modela el diseño CAD final del robot en los softwares AUTOCAD y SketchUp. Este diseño comprende el modelado de la estructura móvil, el dispositivo base, el sistema Pan-Tilt y efector final.

La estructura móvil y el dispositivo base, Fig. 47, forman en conjunto un robot de 5 GDL dispuestos por 3 articulaciones prismáticas y 2 rotacionales, generando una solución novedosa y eficiente dentro de la robótica de servicio, para la limpieza de superficies verticales y fachadas en estructuras ingenieriles como edificios y rascacielos.

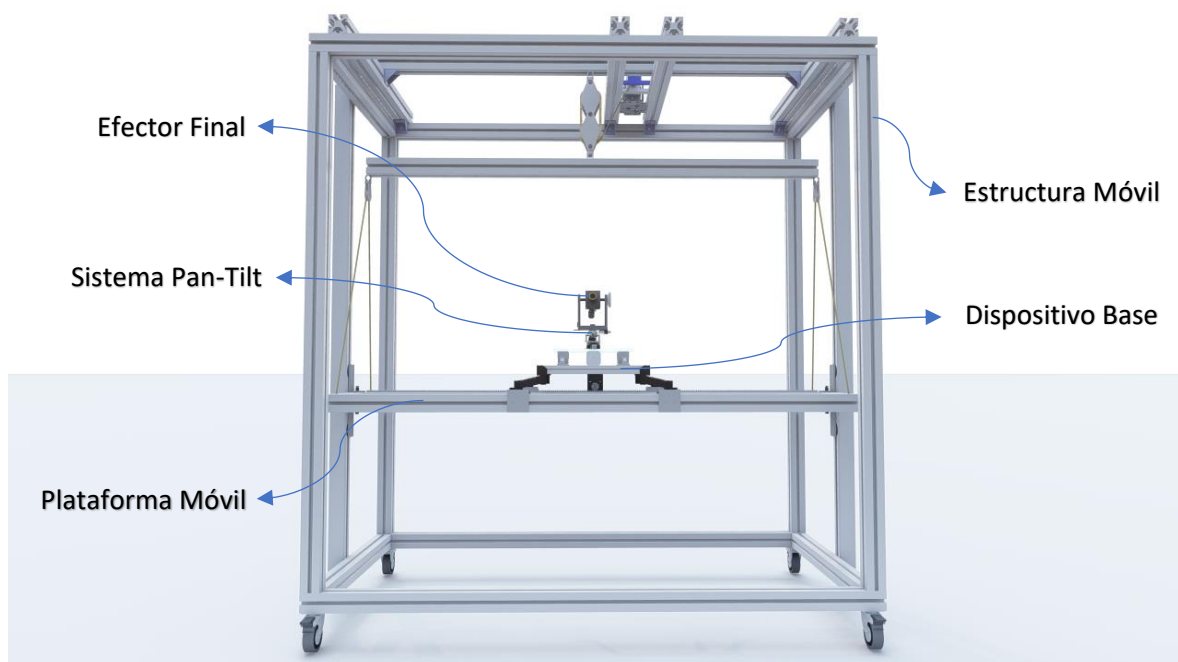


Fig. 47. Diseño CAD del dispositivo completo.

El sistema Pan-Tilt tiene acoplado el efector final (pistola de hidrolavadora), y en conjunto están sobrepuestos en una placa de acrílico, elementos que son accionados mediante el sistema tornillo-tuerca, para su desplazamiento a lo largo del eje de profundidad sobre el eje Z, Fig. 48.



Fig. 48. Sistema tornillo-tuerca.

El dispositivo base, se encuentra habilitado para desplazarse de manera horizontal sobre la plataforma móvil, gracias al sistema de corredera, Fig. 49.

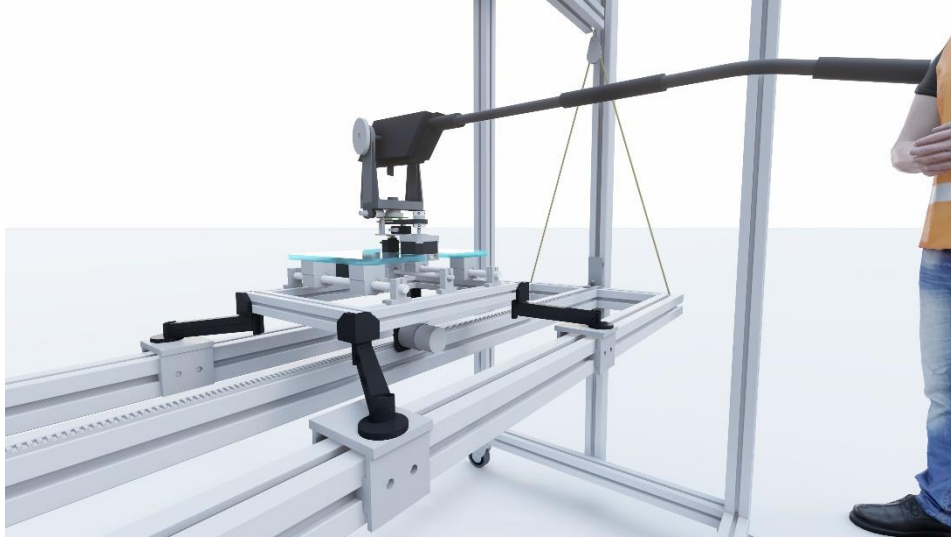


Fig. 49. Sistema de corredera.

Podría eventualmente acoplarse una cámara al dispositivo base, con el fin de proporcionar una visualización en tiempo real del espacio operacional.

Sobre la base de la estructura móvil, estarán dispuestos tanques que contendrán el líquido necesario para llevar a cabo la limpieza (p. ej, agua, materiales abrasivos, químicos, etc.), y al mismo tiempo darán estabilidad y equilibrio, por lo que su peso representará una carga muerta a toda la estructura.

La estructura móvil, Fig. 50, tendrá en su cuatro bases, ruedas que permitan su desplazamiento, y a su vez, un sistema de frenado. En su interior, contiene la plataforma móvil, con posibilidad de moverse de manera vertical a través de un sistema de poleas dispuesto en la parte superior de la misma.

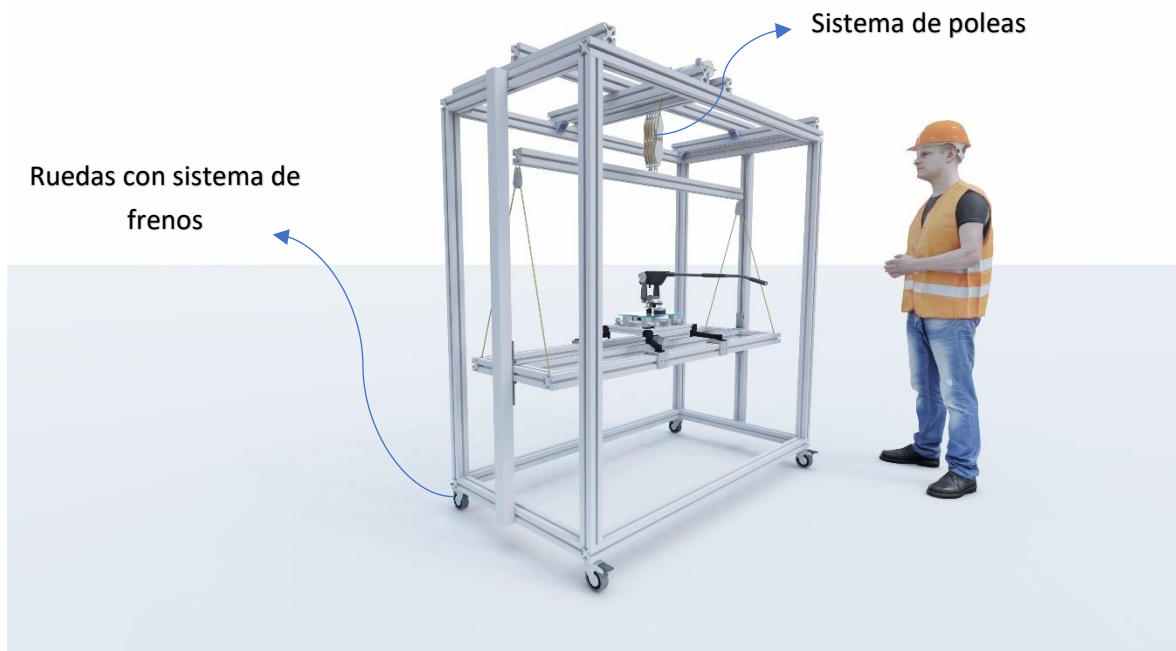


Fig. 50. Estructura móvil con ruedas y sistema de frenado incorporado, y el sistema de poleas.

La solución que se propone y representa a través de este diseño CAD, ejemplifica la modernización de las tareas de limpieza manuales que se aplican a las fachadas de edificaciones, donde las personas subidas en andamios lavan a mano la sección vertical alcanzable, para luego tener que trasladar el mismo andamio de forma lateral y poder lograr su aproximación a la sección contigua. Esto se repite las veces que sean necesarias, hasta alcanzar toda el área objetivo de limpieza del edificio.

Esta práctica es laboriosa y tardada, y dado este panorama, en un esfuerzo por la reducción de estos componentes, y en aras de generar competitividad en la industria, se requiere un avance tecnológico para tal fin, y aun mas importante, lograr la seguridad de los operarios, pues las alturas, las corrientes de aire a las cuales están expuestos, sin lugar a duda ejercen una fuerza aerodinámica significativa sobre ellos, lo que los expone a una vulnerabilidad continua durante el desarrollo de sus actividades.

Aunque se han descrito en la técnica varios dispositivos automáticos de lavado de fachadas, pocos de tales dispositivos han demostrado ser aplicables a cualquier tipo de material, lo que generan una limitante o aplicabilidad solo a superficies regulares como el vidrio. En segundo lugar, muchos incluyen elaborados aparatos mecánicos de recolección de agua y eliminación de líquidos, lo que agrega peso y costo al dispositivo en general. Finalmente, existen otros desarrollos robóticos para limpiar o inspeccionar en lugares de difícil acceso para una persona, la mayoría de

ellos son autopropulsados por lo que su estabilidad se ve afectada ante agentes ambientales como viento, precipitación y, formas y condiciones cambiantes de la superficie. Por ejemplo, las superficies que incluyen curvas, salientes y entrantes, inclinaciones considerables, escalones o espacios, pueden hacer que los robots no puedan continuar su trayectoria, ya que la mayoría tienen un sistema de adhesión por ventosa, y otras soluciones robóticas convencionales con sistemas adaptivos a dichas irregularidades, se vuelven significativamente menos estables, es decir, más propensos a perder su orientación preferida en relación con la superficie, a medida que la atraviesan.

El concepto propuesto en el presente trabajo, está diseñado para limpiar superficies verticales de cualquier tipo de material que pueden incluir irregularidades, y con la capacidad de acceder a todos puntos de la superficie sin importar su geometría. Acepta cualquier tipo de técnica de limpieza, pues posee la ventaja de ser modular, es decir, se puede acoplar el efector final deseado (p. ej. pistola de hidrolavadora, de pintura, escaner, etc); y finalmente, y no menos importante, es que tiene el concepto de escalabilidad, es decir, se puede dimensionar dependiendo de la envergadura del edificio a intervenir.

En la Fig. 51, se muestra el dispositivo base descansando sobre el sistema piñón cremallera, el cual le permite su desplazamiento horizontal sobre la plataforma móvil. Esta última se encuentra suspendida en sus extremos laterales y es guiada a través del sistema de corredera de forma vertical.

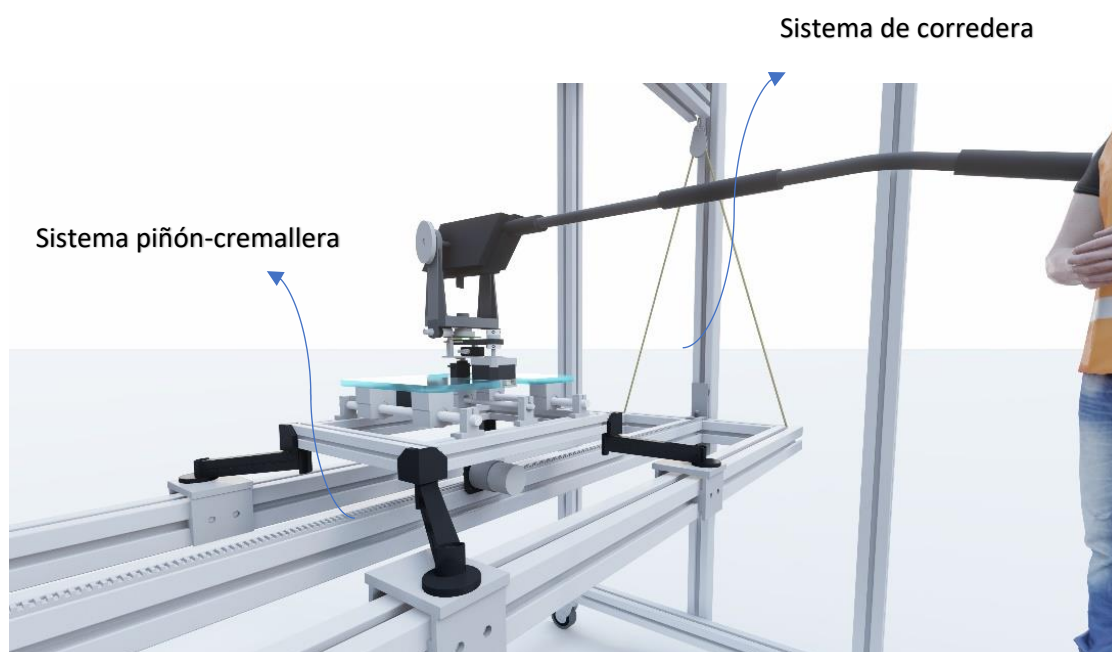


Fig. 51. Vistas isométricas del sistema Pan-Tilt acoplado al efector final, acoplados al dispositivo base y plataforma móvil.

En la Fig. 52 una placa de acrílico color azul, elemento que sostiene el sistema Pan-Tilt y el efector final. Esta placa se encuentra habilitada para moverse linealmente sobre el eje Z, gracias al sistema tornillo-tuerca situado en su parte inferior.

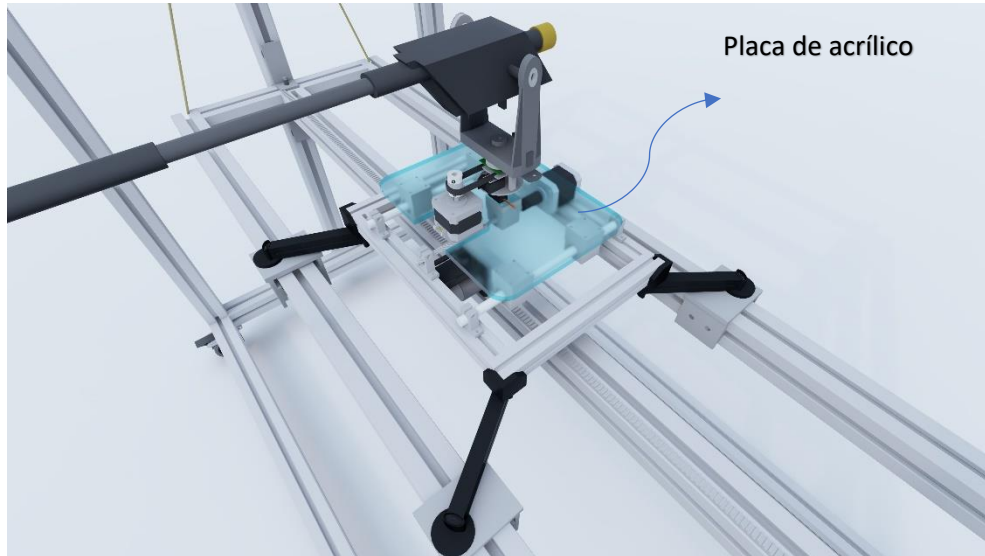


Fig. 52. Vista isométrica de la placa de acrílico, el sistema Pan-Tilt y efector final.

La vista superior del dispositivo de limpieza, Fig. 53, exhibe el motor que acciona el sistema de poleas, que permite el desplazamiento vertical de la plataforma móvil.

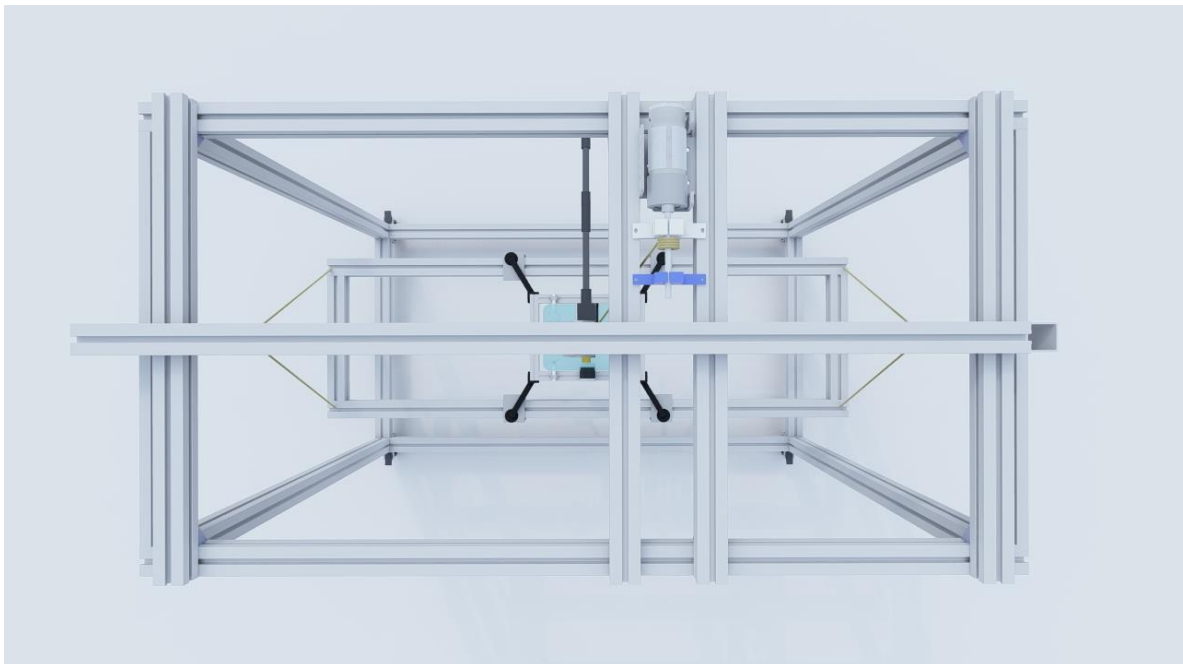


Fig. 53. Vista superior de diseño CAD - Dispositivo de limpieza.

Una animación del robot ejecutando tareas de limpieza en una fachada, se muestra en la Fig. 54. Aquí se evidencia el concepto de escalabilidad, y del potencial que representa esta invención tecnológica.



Fig. 54. Animación del dispositivo de asistencia, desarrollando tarea de limpieza en fachada de edificio.

Teniendo en cuenta que una de las características más relevantes del concepto propuesto, es su capacidad de ser modular, es decir, poder adaptar otras herramientas para su funcionalidad, como se expone en las Fig. 61 y 62. Este es un claro ejemplo de adaptabilidad del dispositivo frente a otros efectores finales, como es el caso del pacómetro, herramienta utilizada en el argot de ingeniería para determinar el grosor de un vidrio, o de un elemento constructivo como una estructura de hormigón armado.

En la Fig. 55, se presenta un diseño CAD, con las mismas dimensiones estructurales y mecánicas del dispositivo de limpieza, con una única modificación y es el efector final, para el presente caso se dispone un pacómetro, ejemplificando la versatilidad y potenciales funciones que puede desempeñar este concepto tecnológico.



Fig. 55. Vista frontal de diseño CAD, del dispositivo con un pacómetro acoplado como efector final - Concepto modular.

La locomoción y trayectorias propuestas en este trabajo, son adaptables tanto a tareas de limpieza, como también a las de inspección, pintura, aplicación de impermeabilizantes, entre otros. Mediante la Fig. 56 se ilustra de forma real las amplias posibilidades que tiene este dispositivo, para el caso particular, el acople de un pacómetro, herramienta que se aplica como medidor de recubrimiento, lo que permite localizar las barras de armadura de una estructura y precisar el espesor del recubrimiento de hormigón, datos importantes e imprescindibles a la hora de iniciar proyectos de rehabilitación y remodelación de edificios, o inclusive como base para justificar una demolición, y con ello poder iniciar una nueva construcción.



Fig. 56. Vista general de la aplicabilidad del dispositivo propuesto, utilizando el pacómetro como efector final.

CAPÍTULO 6. CONSTRUCCIÓN PROTOTIPO DE LABORATORIO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

6.1. CONSTRUCCIÓN PROTOTIPO DE LABORATORIO

En este capítulo se presenta el proceso de construcción del prototipo de laboratorio de 5GDL, basado en una configuración cartesiana y un sistema tipo Pan-Tilt. En base al diseño conceptual del robot, en donde se analizó la cinemática y estática, se obtuvieron los parámetros necesarios para la materialización del mismo. De la misma forma, se relacionan los componentes seleccionados para llevar a cabo el proceso de fabricación del dispositivo de asistencia para limpieza de fachadas.

Durante el proceso, se consideraron los siguientes requisitos para construir un prototipo del robot:

- Medios para moverse en el suelo
- Adaptabilidad a la superficie de la fachada
- Trayectorias en Zig-Zag del efector final
- Maniobrabilidad horizontal y vertical
- Facilidad de montaje
- Peso
- Tipo de actuadores

El proceso constructivo y de ensamble de piezas utilizadas para la fabricación del prototipo fue realizado en el laboratorio de Mecatrónica del Centro de Investigación de Ciencias Aplicadas y Tecnología Avanzada CICATA del IPN.

La estructura móvil del robot está construida en perfil estructural de aluminio con ranura en T de 40x40 mm, y sus principales uniones se hacen mediante sujetadores de aluminio para construir un marco móvil, Fig. 57.



a.

b.

c.

Fig. 57. Estructura móvil: a. Corte de perfiles. b. Ensamble del marco. c. Sujetadores standar para las uniones principales.

En cada extremo de la base de la estructura móvil, van acopladas cuatro ruedas de goma de 3", cada una de ellas montadas en una placa giratoria con freno, Fig. 58. Estas ruedas tienen propiedades termoplásticas, llantas de polipropileno, bujes reforzados y una capacidad de carga de hasta 75 kg cada una.



Fig. 58. Acople de las ruedas a la plataforma móvil.

El dispositivo base, está conectado a la plataforma móvil a través de correderas, Fig. 59, las cuales están elaboradas de perfil de aluminio 6063T5, tienen un acabado anodizado natural mate, y están hechas de pads de UHMW material antifricción, ideal para trabajo en seco.



Fig. 59. Acoplamiento de las correderas y la plataforma móvil.

Dentro de la estructura móvil, una plataforma móvil construida con un perfil estructural de aluminio con ranura en T estándar de 40x40 mm se mueve a lo largo del eje vertical gracias a una matriz de poleas múltiples, Fig. 60.

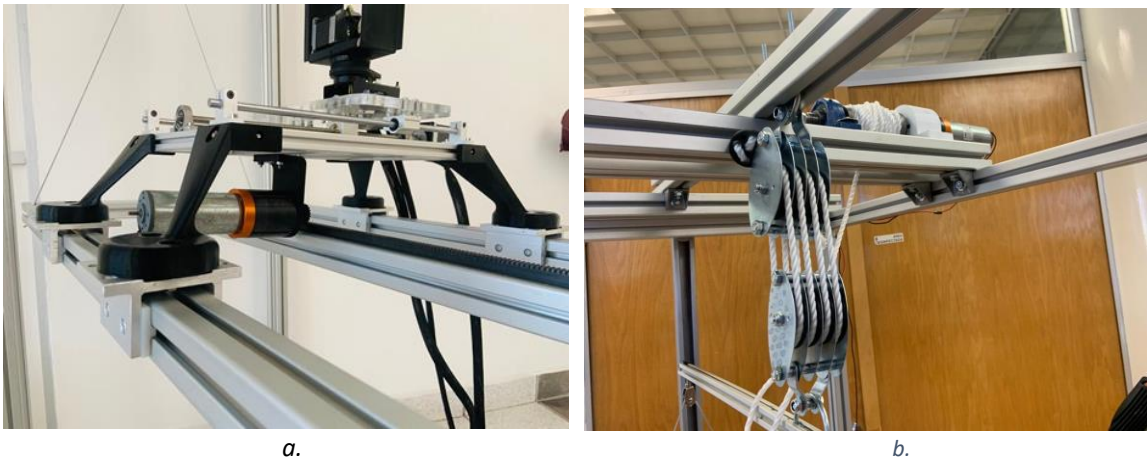


Fig. 60. a. Plataforma móvil, con el dispositivo base acoplado. b. Sistema de poleas – movimiento vertical.

El sistema Pan-Tilt se encuentra montado sobre una placa cuadrada de acrílico, la cual fue barrenada o empotrada al sistema tornillo-tuerca, permitiendo su desplazamiento a lo largo del eje Z. Esto proporciona una adaptabilidad precisa frente a las irregularidades o diferentes perfiles que puedan presentar las fachadas. El sistema tornillo-tuerca está compuesto por: dos guías de eje de varilla de movimiento lineal de 400 mm, un tornillo de avance de 8 mm, cuatro soportes de eje SK8, cuatro rodamientos SCS8UU, dos acoplamientos de eje flexible KP08 y 2 acoplamientos de eje flexible, Fig. 61.



Fig. 61. a. Barrenado de la placa de acrílico. b. Placa y sistema tornillo tuerca. c. Placa empotrada.

Para el sistema vertical del robot, se utilizaron perfiles en U y carritos, estos últimos fabricados en acero galvanizado y conformados por cuadro ruedas unidas por ejes, que cuentan a su vez con rodamientos internos, con capacidad de carga de 350 Kg cada uno. Para fijar los perfiles en U a la plataforma móvil, elemento que finalmente va a deslizarse de forma vertical, se fabricaron unas platinas en L, como se muestra en las Fig. 62 y Fig. 63.



a.

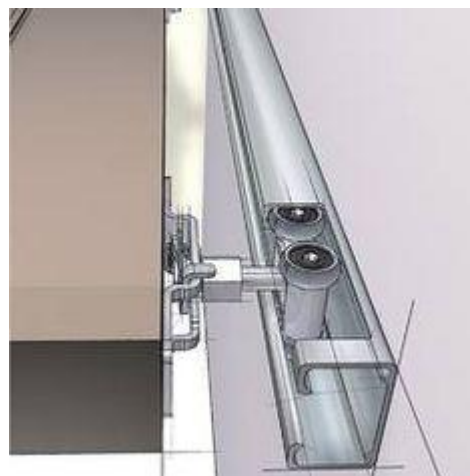
b.

c.

Fig. 62. Sistema de corredera: a. Barrenado del perfil en U; b. Ensamble de las placas en L; c. Acople de la plataforma móvil y sistema corredera.



a.



b.

Fig. 63. a. Carritos; b. Animación del sistema corredera.

Para adaptar los motores a los sistemas, se fabricaron soportes o bases para su acople y correcto funcionamiento. Estas piezas fueron fabricadas mediante impresión en 3D, con una densidad del 40%, Fig. 64.

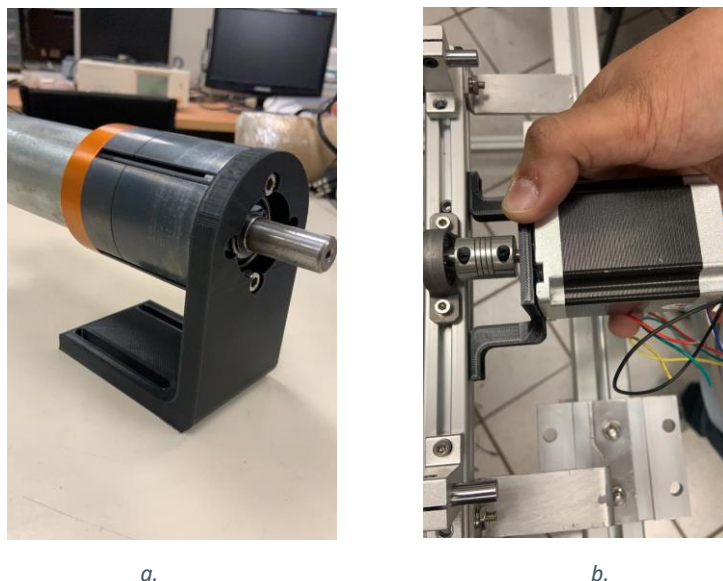


Fig. 64. Bases y motores acoplados. a. Motor Bernio MR 752; b. Motor Polulu 1472

En la Fig. 65 se presenta la adaptación del sistema piñón-cremallera, que debe ser perfecto para evitar pérdidas de fricción. El dispositivo base es construido en perfil de aluminio estructural con una ranura en T de 20x20 mm, se desplaza sobre el eje horizontal mediante el sistema de piñón y cremallera, ajustado longitudinalmente en relación con la plataforma. La cremallera está fabricada en acero de bajo carbono, tipo TR con ángulos de presión de 20°, con una longitud total de 1120 mm y un ancho de 12 mm. El engranaje recto utilizado en este sistema es de hierro fundido, lo que proporciona una alta resistencia y permite un diámetro de orificio más grande. Se eligió el sistema piñón-cremallera por su sencillez mecánica, suave transmisión, capacidad de carga y longitud ilimitada.



Fig. 65. Acople del motor y sistema Piñón-Cremallera - Movimiento horizontal.

Las patas que sostiene el dispositivo base, y que están acopladas a las correderas sobre la plataforma móvil, fueron diseñadas e impresas en 3D, con una densidad del 40% en una impresora Ender 3 V2, Fig. 66.



Fig. 66. Patas: a. Acople con el sistema de corredera. b. Acople con el dispositivo base.

En la Fig. 67, se ilustran el sistema Pan-Tilt acoplado a la placa de acrílico y al efector final (pistola de chorro a alta presión).

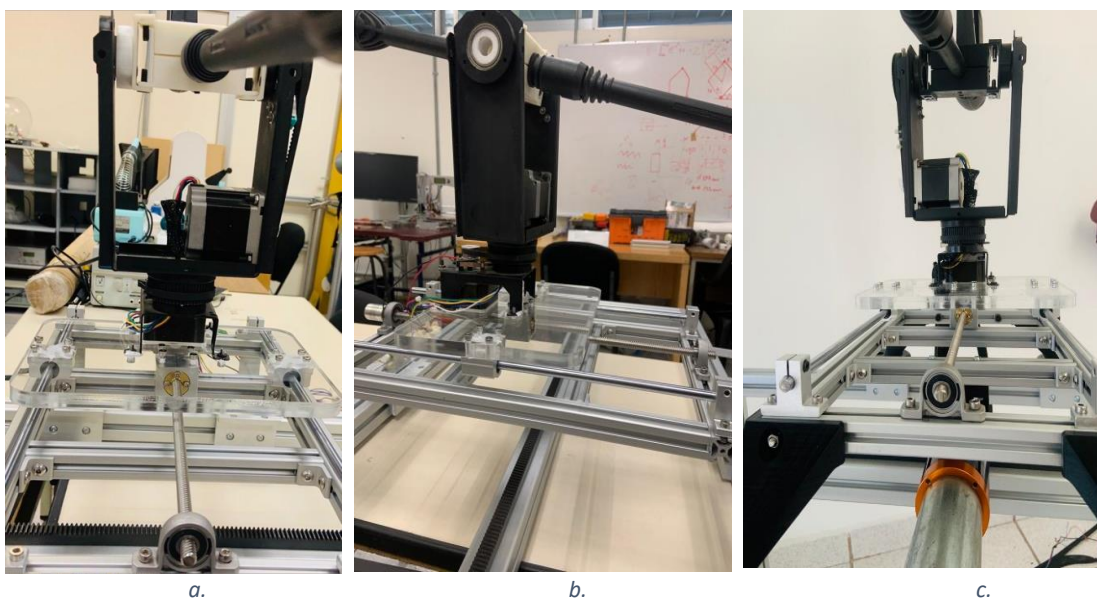


Fig. 67. Placa de acrílico: a. Acoplada al sistema tornillo-tuerca. b. Acoplada al sistema Pan-Tilt. c. Dispositivo base.

Los cables de alimentación eléctrica y monitoreo de señales del robot, se presentan en la Fig. 68.

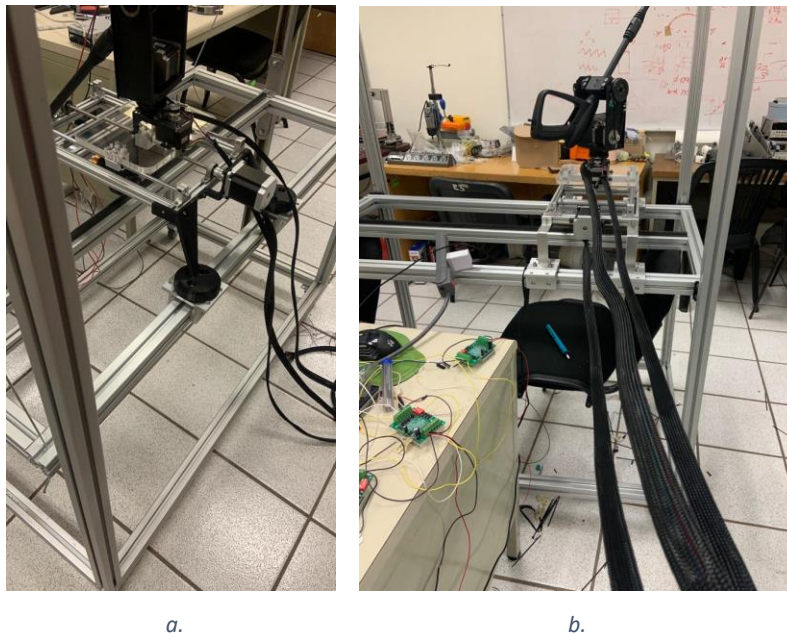


Fig. 68. a y b. Sistema de cableado.

El Pan-Tilt tiene dos movimientos de rotación, que permiten orientar el efector final de forma perpendicular a cualquier punto de la superficie de la fachada, aunque existan concavidades en la misma. El sistema Pan-Tilt está acoplado con una pistola de chorro de alta presión de una hidrolavadora comercial Fig. 69, que finalmente podrá alcanzar cualquier posición deseada, gracias a la configuración cartesiana implementada en el robot. y alcanzar cualquier orientación deseada para cubrir toda el área operativa a limpiar.

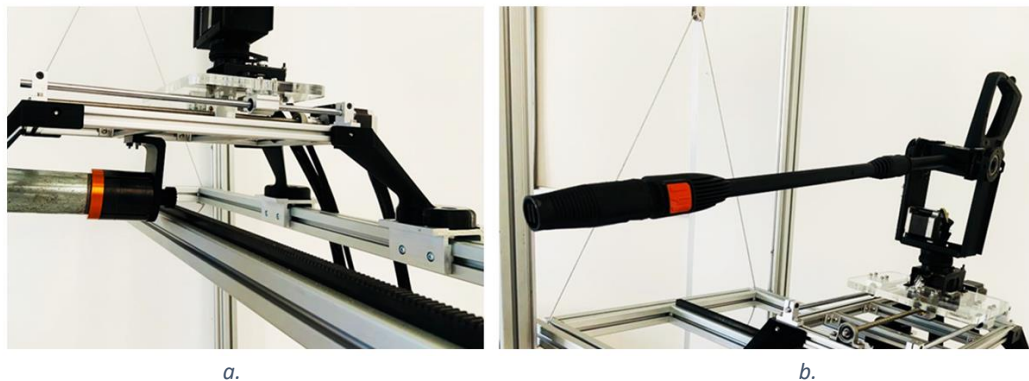


Fig. 69. a) Estructura móvil, b) Sistema lineal tornillo-tuerca, c) Placa de acrílico.

En la Fig. 70, se muestra el prototipo casi terminado, con su estructura móvil completa, ruedas con sistema de frenado, plataforma móvil acoplada al sistema Pan-Tilt y efector final.



Fig. 70. a) Sistema piñón-cremallera; b) Pan-Tilt y pistola de alta presión

6.2. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

El robot de limpieza de fachadas, tiene la capacidad mecánica para realizar los desplazamientos y posiciones requeridas dentro del área operacional dispuesta, y así mismo, de dar seguimiento a las trayectorias indicadas y seleccionadas para la realización de una eficaz y eficiente tarea de limpieza.

En la validación experimental se evidenciaron, las velocidades y capacidad de carga que posee el dispositivo, de acuerdo a los motores usados para tal fin. Cabe resaltar, que estas validaciones experimentales se desarrollaron en lazo abierto para cada uno de los sistemas que componen el dispositivo de 5 GDL.

Validación experimental del del sistema de configuración cartesiano

La caracterización se realiza mediante análisis de imágenes, tomando videos desde una posición “cero”, y desplazando las articulaciones prismáticas hasta sus límites de rango. La medición se realiza consecuentemente, y para lograr la movilidad de los tres movimientos que componen el sistema de configuración cartesiano (ejes X, Y y Z), se utilizaron tres motores de CD Bernio MR 752 1/36 de 24 volts, los cuales cuentan con una potencia de 240 watts, Fig. 71. Este actuador cuenta con una transmisión de engranajes planetarios que desarrollan un par-torsión nominal de 11 Nm, y un par-torsión máximo de 28 Nm.



Fig. 71. Motor Bernio MR 752 L63

Eje vertical: Su rango de movilidad se vio limitado por la altura de la estructura móvil y del dispositivo base acoplado al sistema Pan-Tilt y efector final, el polipasto y los perfiles que actúan como vigas empotradas a los perfiles “columnas”. Por ende, tiene un rango vertical de movimiento de 1.4m aproximadamente. Fig. 72.

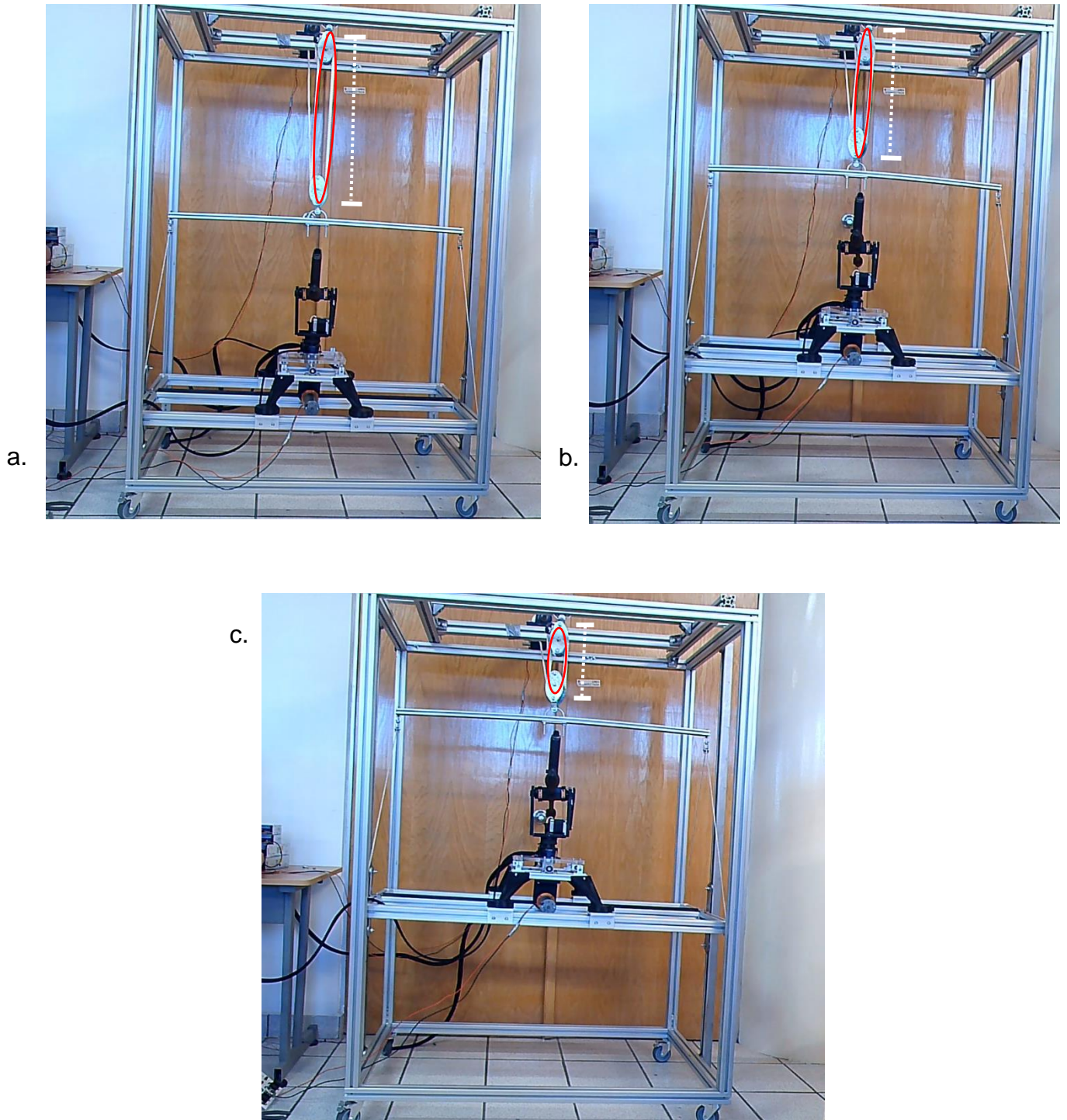


Fig. 72. Desplazamiento eje vertical. a. Posición inferior. b. Posición media. c. Posición superior.

Eje horizontal: Su rango de movilidad se vio limitado por la longitud de la estructura móvil y las piernas del dispositivo base. Por ende, tiene un rango horizontal de movimiento de 1m aproximadamente. Fig. 73.

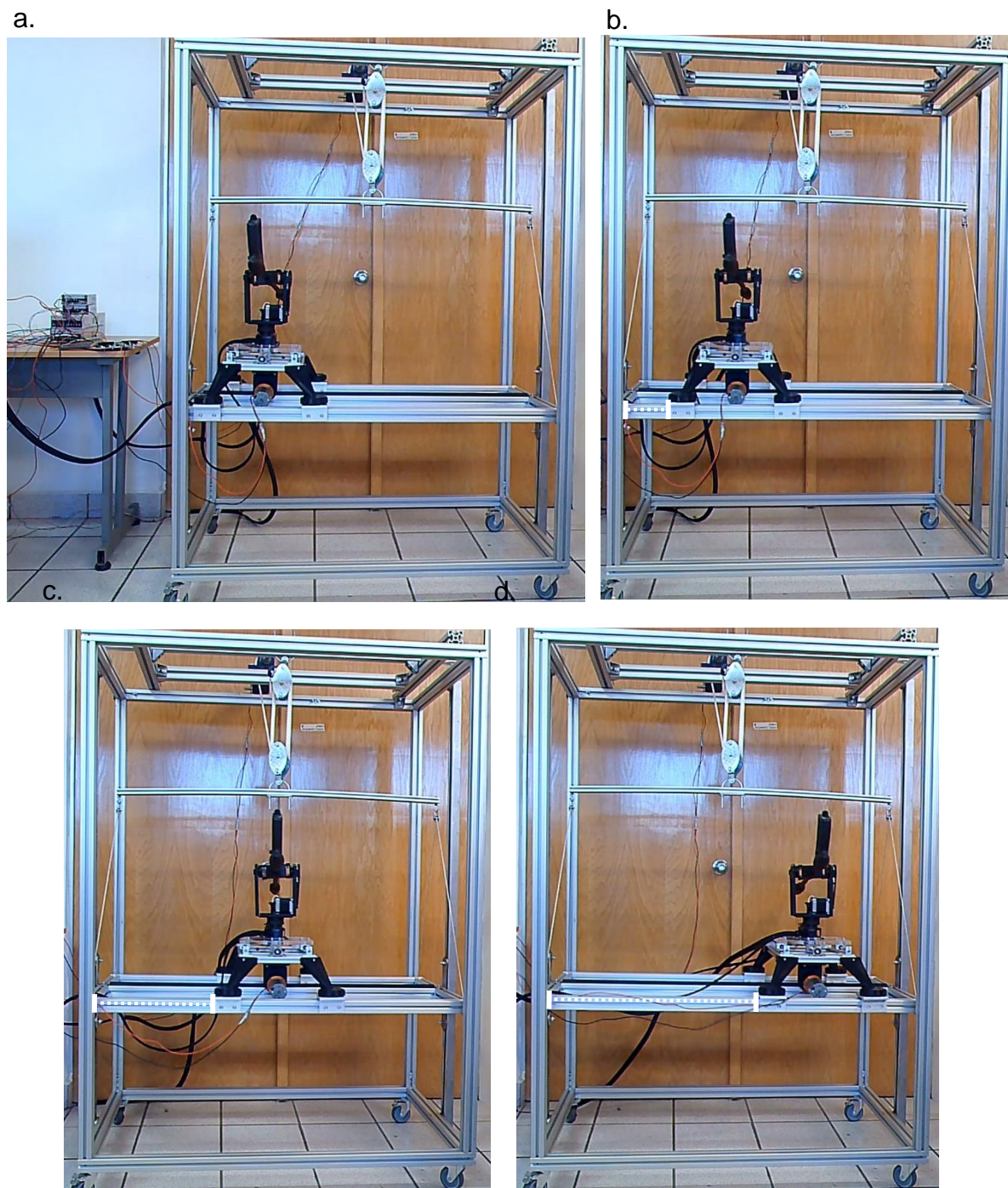
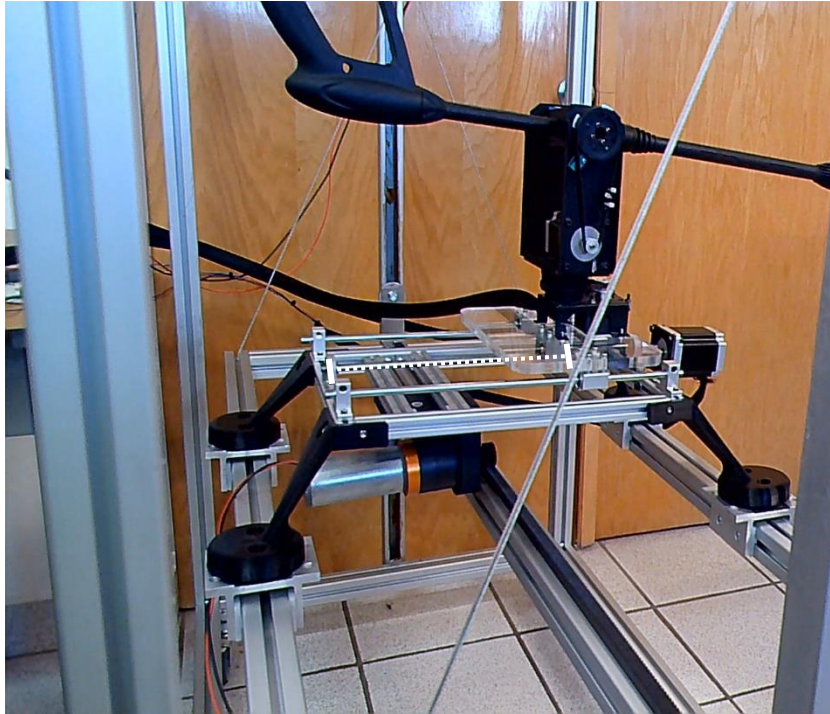


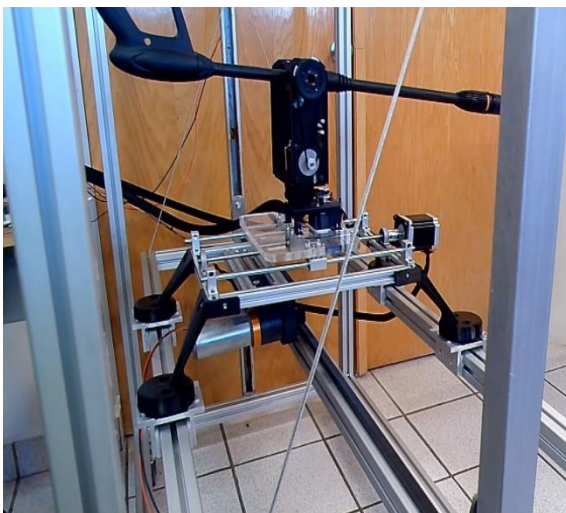
Fig. 73. Desplazamiento eje horizontal. Posiciones: a. Extremo izquierdo. b. Medio izquierdo. c. Mitad. d. Extremo derecho.

- Eje profundidad: Su rango de movilidad se vio limitado por la longitud del tornillo, es decir, el componente del mecanismo de desplazamiento seleccionado para el eje. Comercialmente se adquiere con una longitud de 40 cm. Fig. 74.

a.



b.



c.

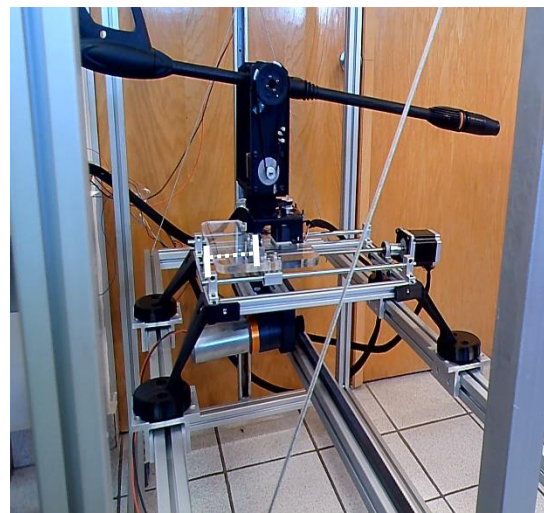


Fig. 74. Desplazamiento eje profundidad. Posiciones: a. Extremo derecha. b. Medio derecha. c. Medio izquierda.

Validación experimental del sistema Pan-Tilt

Se realiza la validación de este sistema, utilizando un actuador a pasos Pololu 1472 (NEMA23) Fig. 75, motor que cuenta con una resolución de 1.8° por paso completo, un consumo de 1 amper por bobina, y un torque máximo de 9 kg-cm.

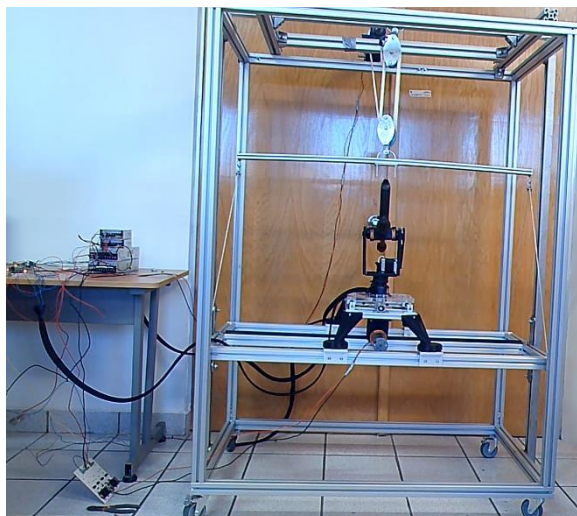


Fig. 75. Motor Pololu 1472.

Durante el desarrollo de la validación experimental del sistema Pan-Tilt se pudo visualizar que los valores propuestos para ambos desplazamientos angulares cambian un poco, debido a que la base de sistema tornillo-tuerca genera un obstáculo en la trayectoria del movimiento del “tilt”, y cuando se encuentra el dispositivo base en una posición extrema superior o inferior respecto a la verticalidad de la estructura móvil, de la misma forma se genera una obstrucción de movilidad por parte de los perfiles de las vigas de la bases.

De forma horizontal, se presenta las mismas limitantes, en relación a las columnas o perfiles verticales, por lo que el “pan” no puede alcanzar su máximo desplazamiento angular, con la excepción cuando se encuentra en posicionado en la mitad de la plataforma móvil. En teoría, se puede tener un rango de movilidad en el pan los 180° y el tilt 90° , Fig. 76 y 77.

a.



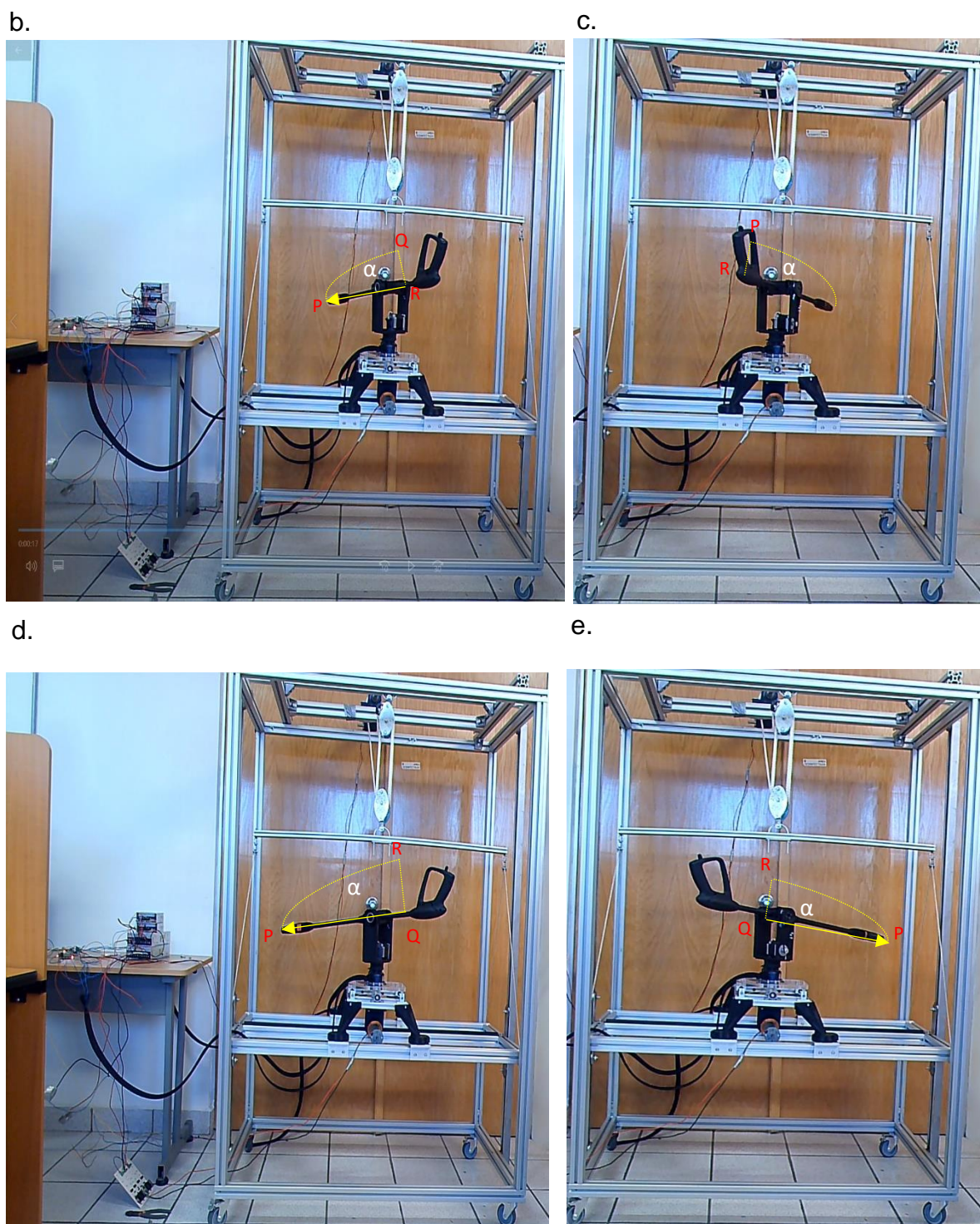


Fig. 76. a, b, c, d y e. Desplazamiento del Pan en diferentes posiciones angulares.

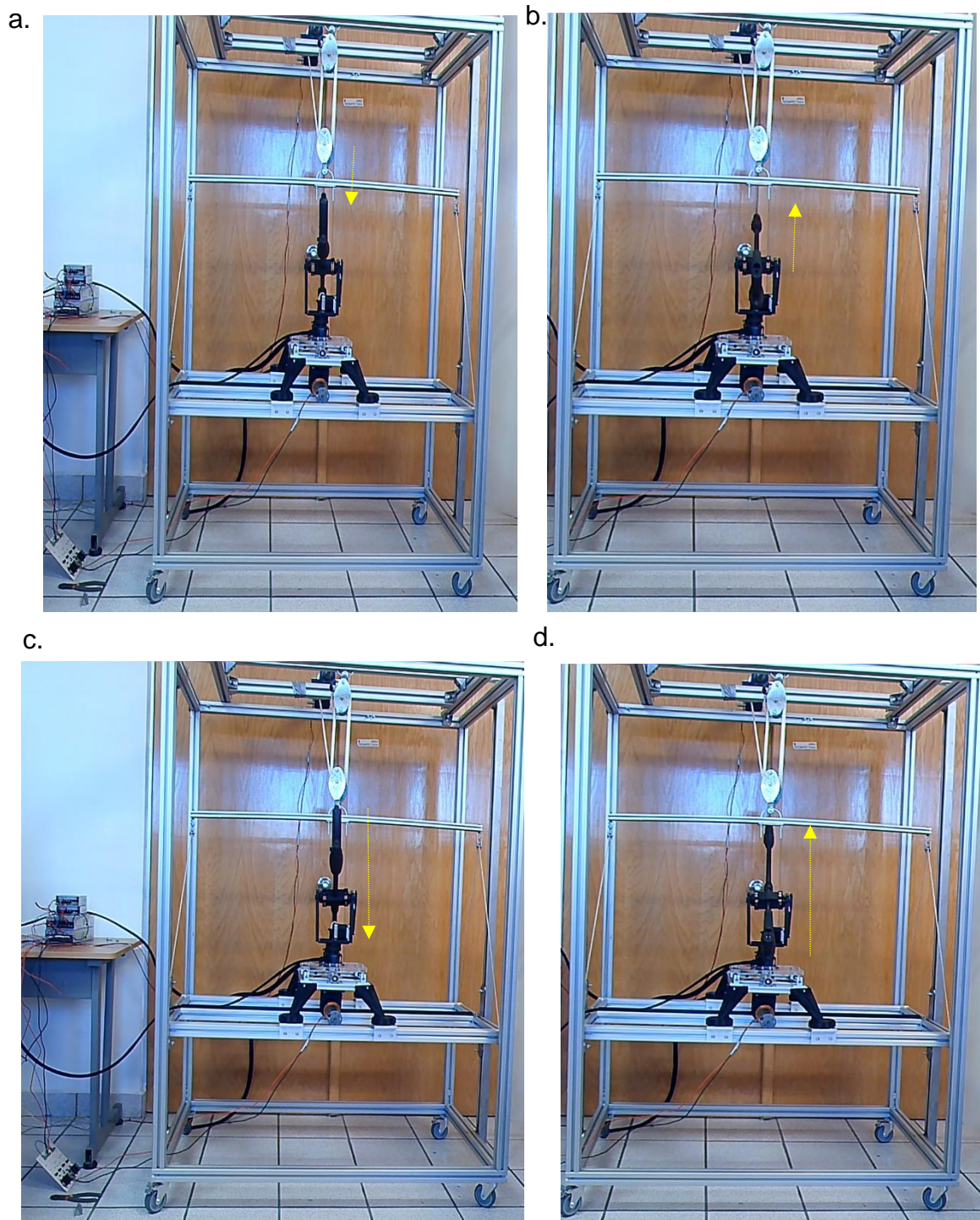


Fig. 77. a, b, c y d. Desplazamiento del Tilt en diferentes posiciones angulares.

CONCLUSIONES

- Se presentó el diseño conceptual del robot 5 DOF para tareas de servicio en superficies verticales, así como su análisis cinemático.
- Se realizó la construcción de un primer prototipo de laboratorio, capaz de asistir de forma semiautomática tareas de servicio en superficies verticales, de acuerdo a la caracterización de los métodos convencionales y en base a los requisitos técnicos obtenidos en el desarrollo de la investigación. Consecuentemente se validó el concepto, y cabe mencionar que su construcción permite una escalabilidad que aumenta fácilmente los desplazamientos verticales y horizontales, lo cual, proporciona una adaptación en forma dimensional a cualquier superficie, así como también a los perfiles irregulares habituales en los diseños arquitectónicos para el caso de fachadas.
- Basado en el análisis cinemático y un diseño CAD detallado, nuestro prototipo se encuentra actualmente en proceso de patente. Esta propuesta representa una innovación tecnológica en el mercado de los robots de limpieza que ofrece simplificación de la tarea, minimización de riesgos, así como costos operativos.

TRABAJOS FUTUROS

- Es posible integrar una cámara de video para monitorear la tarea de servicio en tiempo real, lo que genera una visibilidad del área operacional y permitir una mayor eficiencia en el desarrollo de la actividad.
- El control del dispositivo robótico donde están inmersos el hardware y los actuadores, se realizará de forma remota, de forma fácil y segura para el operador.

REFERENCIAS

- [1] P.A. RAMOS SÁNCHEZ, “LOS CENTROS HISTÓRICOS COMO ESPACIOS PARA EL DESARROLLO TERRITORIAL: NUEVAS PROPUESTAS DESDE UN ENFOQUE INTEGRAL”, DISPONIBLE EN: <HTTPS://WWW.UAEH.EDU.MX/SCIGE/BOLETIN/ICEA/N9/E6.HTML>, 2016.
- [2] V. DANNEMANN, “ TECNOLOGÍA ALEMANA “COME” ESMOG EN CIUDAD DE MÉXICO”, DISPONIBLE EN: <HTTPS://WWW.DW.COM/ES/TECNOLOG%C3%ADA-ALEMANA-COME-ESMOG-EN-CIUDAD-DE-M%C3%A9XICO/A-19009105>, 2016.
- [3] IBERTRAC, “DAÑOS EN LOS EDIFICIOS POR LAS PALOMAS”, DISPONIBLE EN: <HTTPS://WWW.IBERTRAC.COM/SERVICIOS-DE-ELIMINACION-DE-PLAGAS/PALOMAS/DANOS-LOS-EDIFICIOS-LAS-PALOMAS/>, 2017.
- [4] SALAMANCAALDIARTV.ES, “PEÑARANDA REFUERZA SU PLAN DE ACTUACIÓN PARA LUCHAR CONTRA LA PROLIFERACIÓN DE PALOMAS”. DISPONIBLE EN: <HTTPS://SALAMANCARTVALDIA.ES/NOTICIA/2022-03-15-PENARANDA-REFUERZA-SU-PLAN-DE-ACTUACION-PARA-LUCHAR-CONTRA-LA-PROLIFERACION-DE-PALOMAS-291887>, 2022.
- [5] C. IBAÑEZ, “SÍNDROME DEL EDIFICIO ENFERMO (SEE): LA MALDICIÓN DE LOS EDIFICIOS INTELIGENTES”. DISPONIBLE EN: HTTPS://WWW.MADRIMASD.ORG/BLOGS/SALUD_PUBLICA/2009/04/05/115850#:~:TEXT=L A%20OMS%2C%20EN%201982%2C%20DEFINI%C3%B3,LOS%20GASES%20Y%20VAPORES%20DE, 2009.
- [6] BEISSIERH, “DESINFECCIÓN, LIMPIEZA Y SANEAMIENTO”, DISPONIBLE EN: <HTTPS://WWW.BEISSIER.ES/ES/PROFESIONAL/GUIA-SOLUCIONES/REHABILITACION-FACHADAS/DESINFECTAR-FACHADA/COMO-SANEAR-Y-DESINFECTAR-UNA-FACHADA/ELIMINAR-MOHOS-EN-FACHADAS.HTML>.
- [7] V. PALOMO, “DESINFECCIÓN, LIMPIEZA Y SANEAMIENTO”, DISPONIBLE EN: <HTTPS://WWW.BEISSIER.ES/ES/PROFESIONAL/GUIA-SOLUCIONES/REHABILITACION-FACHADAS/DESINFECTAR-FACHADA/COMO-SANEAR-Y-DESINFECTAR-UNA-FACHADA/ELIMINAR-MOHOS-EN-FACHADAS.HTML>, 2019.
- [8] L. CARDONA, “18 EDIFICIOS HISTÓRICOS ANTES Y DESPUÉS DE LIMPIAR A FONDO SUS FACHADAS”, DISPONIBLE EN: <HTTPS://CASASINCREDIBLES.COM/?P=42121>.
- [9] S. MOSQUEDA, “LIMPIEZA Y CONSERVACIÓN DE FACHADAS PATRIMONIALES”, DISPONIBLE EN: <HTTPS://ARQUIPA.WORDPRESS.COM/2014/10/04/LIMPIEZA-Y-CONSERVACION-DE-FACHADAS-PATRIMONIALES/>, 2014.
- [10] C. OROZCO, “DESARROLLO DE UN ROBOT DE SERVICIO TELE OPERADO PARA ASISTIR EN TAREAS DE LIMPIEZA DE ALTA PRESIÓN”, TESIS DE MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA AVANZADA, IPN-CICATA UNIDAD QUERÉTARO, MAYO 2018.

- [10] MARTÍNEZ ESCALADA, “HIDROLAVADORAS A ALTA PRESIÓN: USOS Y BENEFICIOS”. DISPONIBLE EN: HTTPS://WWW.MARTINEZESCALADA.COM.AR/NOTICIAS/10_HIDROLAVADORAS-DE-ALTA-PRESION.
- [11] KÄRCHER, “LIMPIEZA E HIGIENE EN TIEMPOS DEL CORONAVIRUS”. DISPONIBLE EN: <HTTPS://WWW.KAERCHER.COM/CO/INSIDE-KAERCHER/LIMPIEZA-E-HIGIENE-EN-TIEMPOS-DEL-CORONAVIRUS/LIMPIADORA-DE-ALTA-PRESION-DE-AGUA-CALIENTE-PARA-LIMPIAR-Y-DESINFECTAR-GRANDES-SUPERFICIES.HTML>, 2021.
- [12] M. CAMINITI, “LIMPIEZA CRIOGÉNICA VS. MÉTODOS ALTERNATIVOS DE LIMPIEZA”, DISPONIBLE EN: <HTTPS://BLOG-MX.COLDJET.COM/LIMPIEZA-CRIOGENICA-VS-OTROS-METODOS>, 2019.
- [13] CLASF. “LIMPIEZA DE FACHADAS, BUCARAMANGA”. DISPONIBLE EN: <HTTPS://WWW.CLASF.CO/LIMPIEZA-DE-FACHADAS-EN-BUCARAMANGA-4399510/>
- [14] SINDICAL.CL. “LIMPIADOR DE VIDRIOS EN ALTURA: -LO QUE PASÓ HOY FUE POR FATIGA DE MATERIAL-” <HTTPS://SINDICAL.CL/LIMPIADOR-DE-VIDRIOS-EN-ALTURA-LO-QUE-PASO-HOY-FUE-POR-FATIGA-DE-MATERIAL/>, 2014.
- [15] WIKILIBROS, “ROBÓTICA/CONFIGURACIONES DE UN ROBOT - CONFIGURACIÓN CARTESIANA”. DISPONIBLE EN: HTTPS://ES.WIKIBOOKS.ORG/WIKI/ROB%C3%B3TICA/CONFIGURACIONES_DE_UN_ROBOT, 2019.
- [16] J. ROJAS, I. MAHLAX, G. MUÑOZ, D. CASTRO, “DISEÑO DE UN SISTEMA ROBÓTICO CARTESIANO PARA APLICACIONES INDUSTRIALES”, 2003.
- [17] A. BARRIENTOS. FUNDAMENTOS DE ROBÓTICA. ESPAÑA. MCGRAW HILL, 1997.
- [18] IFR. “ROBOTS DE SERVICIO”. DISPONIBLE EN: <HTTPS://IFR.ORG/SERVICE-ROBOTS>, 2020.
- [19] IFR. “EXECUTIVE SUMMARY WORLD ROBOTICS 2020 SERVICE ROBOTS”. DISPONIBLE EN: HTTPS://IFR.ORG/IMG/WORLDRobotics/EXECUTIVE_SUMMARY_WR_2020_SERVICE_ROBOTS.PDF, 2020.
- [20] IFR PRESS CONFERENCE - 24TH SEPTEMBER 2020 FRANKFURT. DISPONIBLE EN: HTTPS://IFR.ORG/DOWNLOADS/PRESS2018/PRESENTATION_WR_2020.PDF.
- [21] X. SANDOVAL, M. GARCÍA, J. ZAVALA, E. CASTILLO “HEX-PIDERIX: A SIX-LEGGED WALKING CLIMBING ROBOT TO PERFORM INSPECTION TASKS ON VERTICAL SURFACES”, NATURE INSPIRED MOBILE ROBOTICS, EDITORIAL: WORLD SCIENTIFIC, 2013.

- [22] J. FRANCO, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA LA LOCOMOCIÓN EN SUPERFICIE VERTICAL DE UN ROBOT HEXÁPODO”, TESIS DE MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA AVANZADA, IPN-CICATA UNIDAD QUERÉTARO, JUNIO 2015.
- [23] E. OROZCO, “DESARROLLO DE UN ROBOT DE SERVICIO TELE OPERADO PARA ASISTIR EN TAREAS DE LIMPIEZA DE ALTA PRESIÓN”. TESIS DE MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA AVANZADA, IPN-CICATA QUERÉTARO, AGOSTO 2018.
- [24] S. MINMOON, JAEMYUNGHUH, D. SEUNGHOOONLEE, CH. SOOHAN, “VERTICAL MOTION CONTROL OF BUILDING FAÇADE MAINTENANCE ROBOT WITH BUILT-IN GUIDE RAIL”, 2015.
- [25] S. NANSAI, R MOHAN, “A SURVEY OF WALL CLIMBING ROBOTS: RECENT ADVANCES AND CHALLENGES”, 2016.
- [26] ZHANG, H.; ZHANG, J.; ZONG, G. “REQUIREMENTS OF GLASS CLEANING AND DEVELOPMENT OF CLIMBING ROBOT SYSTEMS.” IN PROCEEDINGS OF THE 2004 INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT MECHATRONICS AND AUTOMATION, CHENGDU, CHINA, 26–31 AUGUST 2004; PP. 101–106.
- [27] KAWASAKI, S.; KIKUCHI, K. “DEVELOPMENT OF A SMALL LEGGED WALL CLIMBING ROBOT WITH PASSIVE SUCTION CUPS.”, IN PROCEEDINGS OF THE 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON DESIGN ENGINEERING AND SCIENCE—ICDES, PILSEN, CZECH REPUBLIC, 31 AUGUST–3 SEPTEMBER 2014; PP. 112–116.
- [28] WANG, Y.; LIU, S.; XU, D.; ZHAO, Y.; HAO, S.; GAO, X. “DEVELOPMENT AND APPLICATION OF WALL-CLIMBING ROBOTS.”, IN PROCEEDINGS OF THE 1999 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, DETROIT, AL, USA, 10–15 MAY 1999; VOLUME 2, PP. 1207–1212.
- [29] GAO, X.; KIKUCHI, K. “STUDY ON A KIND OF WALL CLEANING ROBOT.”, IN PROCEEDINGS OF THE IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND BIOMIMETICS, ROBIO 2004, SHENYANG, CHINA, 22–26 AUGUST 2004; PP. 391–394.
- [30] XU, Z.; MA, P. “ A WALL-CLIMBING ROBOT FOR LABELLING SCALE OF OIL TANK’S VOLUME. “, ROBOTICA 2002, 20, 209–212.
- [31] ZHANG, H.; ZHANG, J.; LIU, R.; ZONG, G. “MECHANICAL DESIGN AND DYNAMICS OF AN AUTONOMOUS CLIMBING ROBOT FOR ELLIPTIC HALF-SHELL CLEANING”. INT. J. ADV. ROBOT. SYST. 2007, 4, 437–446.
- [32] KIM, H.; KIM, D.; YANG, H.; PUERRO.; SEO, K.; CHANG, D.; KIM, J. UN ROBOT TREPADOR DE PAREDES CON SISTEMA DE RUEDA DE ORUGA AL VACÍO OPERADO POR VÁLVULA MECÁNICA. EN ACTAS DE LA 9ª CONFERENCIA INTERNACIONAL SOBRE ROBOTS QUE ESCALAN Y CAMINAN, BRUSELAS, BÉLGICA, 12–14 DE SEPTIEMBRE DE 2006; PÁGS. 28–33.
- [33] ROY, RK UN MANUAL BÁSICO SOBRE EL MÉTODO TAGUCHI; SOCIEDAD DE INGENIEROS DE MANUFACTURA: DEARBORN, MI, EE. UU., 2010. [GOOGLE SCHOLAR]

- [34] KIM, H.; KIM, D.; YANG, H.; PUERRO.; SEO, K.; CHANG, D.; KIM, J. DESARROLLO DE UN ROBOT TREPAMUROS UTILIZANDO UN MECANISMO DE RUEDAS CON ORUGAS. J. MEC. CIENCIA TECNOLOGÍA 2008, 22 , 1490–1498. [GOOGLE ACADÉMICO] [CROSSREF]
- [35] KIM, H.; SEO, K.; PUERRO.; KIM, J.; KIM, H. DESARROLLO DE UN ROBOT TREPADOR DE PAREDES DE VARIOS CUERPOS CON MECANISMO DE RUEDA SOBRE ORUGAS. EN ACTAS DE LA 13.ª CONFERENCIA INTERNACIONAL SOBRE ROBOTS PARA ESCALAR Y CAMINAR (CLAWAR), NAGOYA, JAPÓN, 31 DE AGOSTO A 3 DE SEPTIEMBRE DE 2010; PÁGS. 439–446.
- [36] FUNATSU, M.; KAWASAKI, Y.; KAWASAKI, S.; KIKUCHII, K. “DEVELOPMENT OF CM-SCALE WALL CLIMBING HEXAPODROBOT WITH CLAWS. “, IN PROCEEDINGS OF THE 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON DESIGN ENGINEERING AND SCIENCE—ICDES, PILSEN, CZECH REPUBLIC, 31 AUGUST–3 SEPTEMBER 2014; PP. 101–106.
- [37] L. TIANJIAN, X. YUNYUAN, L. JIANXING, (2015), PATENTE CHINA NO. 104983369B. DISPONIBLE EN: <HTTPS://PATENTS.GOOGLE.COM/PATENT/CN104983369B/EN>.
- [38] W. LUDAN, CH. SHENG, Z. JIANWEI, Y. CHONG, T. LIN, (2009), PATENTE CHINA NO. 101554892B. DISPONIBLE EN: <HTTPS://PATENTS.GOOGLE.COM/PATENT/CN101554892B/EN?OQ=ROBOT+CLEANING+VERTICAL+FACADE>.
- [39] A. IBRAHIM, (2014), PATENTE DE E.E.U.U. NO. 8661598B2. DISPONIBLE EN: <HTTPS://PATENTIMAGES.STORAGE.GOOGLEAPIS.COM/CF/2E/19/5725A8EACE423C/US8661598.PDF>.
- [40] W. SIMONETTE, (2014), PATENTE DE E.E.U.U. NO. 8790468B2, DISPONIBLE EN: <HTTPS://PATENTIMAGES.STORAGE.GOOGLEAPIS.COM/39/C8/97/5AE9D9C21E05A6/US8790468.PDF>.

ANEXOS

ANEXO A. PROGRAMAS DE MATLAB

A continuación, se presentan los códigos del software en referencia, que se usaron para validar los conceptos matemáticos presentados durante el desarrollo del proyecto.

Análisis Cinemático

- Matrices de Transformación Homogénea

```
clear, clc

syms a1 a2 a3 d1 d2 d3 a4 a5 a6 th1 th2

A01 = [ 1 0 0      0
        0 1 0      0
        0 0 1 a1 + d1
        0 0 0      1 ];
A12 = [ 1, 0, 0, 0
        0, 0, 1, a2 + d2
        0, -1, 0, 0
        0, 0, 0, 1 ];
A23 = [ 0, 0, 1, a3 + d3
        -1, 0, 0, 0
        0, -1, 0, 0
        0, 0, 0, 1 ];

A03 = A01*A12*A23

A45 = [ 1 0 0 0
        0 1 0 0
        0 0 1 a4
        0 0 0 1 ];

A56 = [ cos(th1), 0, sin(th1), 0
        sin(th1), 0, -cos(th1), 0
              0, 1, 0, a5
              0, 0, 0, 1 ];

A67 = [ cos(th2), -sin(th2), 0, a6*cos(th2)
        sin(th2), cos(th2), 0, a6*sin(th2)
              0, 0, 1, 0
              0, 0, 0, 1 ];

A47 = A45*A56*A67

A34 = [ 0 0 1 0
```

```

0    -1    0    0
1     0    0    0
0     0    0    1 ]

```

```
A07 = A03*A34*A47
```

▪ Ejes Sistema de Configuración Cartesiano

```
% Modelo Cartesiano
```

```
clear, clc
```

```
% Limpieza de variables
```

```
a1 = 1; a2 = 1; a3 = 1;
```

```
X0 = [ 1 0 0 1 ]; Y0 = [ 0 1 0 1 ]; Z0 = [ 0 0 1 1 ]; O0 = [ 0 0 0 1 ];
```

```
h = 0.25;
```

```
PU = [ 0 0 0 0 ]; PV = [ h/2 h/2 -h/2 -h/2 ]; PW = [ h 0 0 h ];
```

```
a = ones(1,length(PU)); puntosB = [ PU ; PV ; PW ; a ];
```

```
d1 = linspace(0, 1,20);
```

```
d2 = linspace(0, 1,20);
```

```
d3 = linspace(0, 1,20);
```

```
for i = 1 : length(d1)
```

```

A01 = [ 1 0 0      0
        0 1 0      0
        0 0 1 a1 + d1(i)
        0 0 0      1 ];

```

```
% Transformación de 0 a 1
```

```

A12 = [ 1, 0, 0, 0
        0, 0, 1, a2 + d2(i)
        0, -1, 0, 0
        0, 0, 0, 1 ];

```

```
% Transformación de 1 a 2
```

```

A23 = [ 0, 0, 1, a3 + d3(i)
        -1, 0, 0, 0
        0, -1, 0, 0
        0, 0, 0, 1 ];

```

```
A02 = A01*A12;
```

```
A03 = A01*A12*A23;
```

```
X1 = A01*X0'; Y1 = A01*Y0'; Z1 = A01*Z0'; O1 = A01*O0';
```

```
X2 = A02*X0'; Y2 = A02*Y0'; Z2 = A02*Z0'; O2 = A02*O0';
```

```
X3 = A03*X0'; Y3 = A03*Y0'; Z3 = A03*Z0'; O3 = A03*O0';
```

```
plot3(0,0,0); hold on; axis([0 5 0 5 0 5]); grid
```

```
quiver3(O0(1),O0(2),O0(3),X0(1)-O0(1),X0(2)-O0(2),X0(3)-O0(3),1,'r');
```

```
quiver3(O0(1),O0(2),O0(3),Y0(1)-O0(1),Y0(2)-O0(2),Y0(3)-O0(3),1,'g');
```

```
quiver3(O0(1),O0(2),O0(3),Z0(1)-O0(1),Z0(2)-O0(2),Z0(3)-O0(3),1,'b');
```

```

% Marco de referencia 0

quiver3(O1(1),O1(2),O1(3),X1(1)-O1(1),X1(2)-O1(2),X1(3)-O1(3),1,'r');
quiver3(O1(1),O1(2),O1(3),Y1(1)-O1(1),Y1(2)-O1(2),Y1(3)-O1(3),1,'g');
quiver3(O1(1),O1(2),O1(3),Z1(1)-O1(1),Z1(2)-O1(2),Z1(3)-O1(3),1,'b');
% Marco de referencia 1

quiver3(O2(1),O2(2),O2(3),X2(1)-O2(1),X2(2)-O2(2),X2(3)-O2(3),1,'r');
quiver3(O2(1),O2(2),O2(3),Y2(1)-O2(1),Y2(2)-O2(2),Y2(3)-O2(3),1,'g');
quiver3(O2(1),O2(2),O2(3),Z2(1)-O2(1),Z2(2)-O2(2),Z2(3)-O2(3),1,'b');
% Marco de referencia 2

quiver3(O3(1),O3(2),O3(3),X3(1)-O3(1),X3(2)-O3(2),X3(3)-O3(3),1,'r');
quiver3(O3(1),O3(2),O3(3),Y3(1)-O3(1),Y3(2)-O3(2),Y3(3)-O3(3),1,'g');
quiver3(O3(1),O3(2),O3(3),Z3(1)-O3(1),Z3(2)-O3(2),Z3(3)-O3(3),1,'b');
% Marco de referencia 3

puntosA = A03*puntosB;
TX = puntosA(1,:); TY = puntosA(2,:); TZ = puntosA(3,:);
% Puntos de la herramienta respecto al marco 0

plot3(TX,TY,TZ,'color','black','LineWidth',2);

line([O0(1) O1(1)],[O0(2) O1(2)],[O0(3)
O1(3)],'color','black','LineWidth',2);
line([O1(1) O2(1)],[O1(2) O2(2)],[O1(3)
O2(3)],'color','black','LineWidth',2);
line([O2(1) O3(1)],[O2(2) O3(2)],[O2(3)
O3(3)],'color','black','LineWidth',2);

drawnow
hold off

end

```

▪ Ejes Sistema Pan-Tilt

```

% Modelo Pan tilt

clear, clc
% Limpieza de variables

a4 = 1; a5 = 1; a6 = 1;

X4 = [ 1 0 0 1 ]; Y4 = [ 0 1 0 1 ]; Z4 = [ 0 0 1 1 ]; O4 = [ 0 0 0 1 ];

h = 0.25;
PV = [ 0 0 0 0 ]; PW = [ h/2 h/2 -h/2 -h/2 ]; PU = [ h 0 0 h ];
a = ones(1,length(PU)); puntosB = [ PU ; PV ; PW ; a ];

th1 = linspace(0, 0,20);
th2 = linspace(0, 0,20);

for i = 1 : length(th1)

```



```

A45 = [ 1 0 0 0
        0 1 0 0
        0 0 1 a4
        0 0 0 1 ];
% Transformación de 4 a 5

A56 = [ cosd(th1(i)), 0, sind(th1(i)), 0
        sind(th1(i)), 0, -cosd(th1(i)), 0
        0, 1, 0, a5
        0, 0, 0, 1 ];
% Transformación de 5 a 6

A67 = [ cosd(th2(i)), -sind(th2(i)), 0, a6*cosd(th2(i))
        sind(th2(i)), cosd(th2(i)), 0, a6*sind(th2(i))
        0, 0, 1, 0
        0, 0, 0, 1 ];
% Transformación de 6 a 7

A46 = A45*A56;
A47 = A45*A56*A67;

X5 = A45*X4'; Y5 = A45*Y4'; Z5 = A45*Z4'; O5 = A45*O4';
X6 = A46*X4'; Y6 = A46*Y4'; Z6 = A46*Z4'; O6 = A46*O4';
X7 = A47*X4'; Y7 = A47*Y4'; Z7 = A47*Z4'; O7 = A47*O4';

plot3(0,0,0); hold on; axis([-2 5 -2 5 -2 5]); grid

quiver3(O4(1),O4(2),O4(3),X4(1)-O4(1),X4(2)-O4(2),X4(3)-O4(3),1,'r');
quiver3(O4(1),O4(2),O4(3),Y4(1)-O4(1),Y4(2)-O4(2),Y4(3)-O4(3),1,'g');
quiver3(O4(1),O4(2),O4(3),Z4(1)-O4(1),Z4(2)-O4(2),Z4(3)-O4(3),1,'b');
% Marco de referencia 4

quiver3(O5(1),O5(2),O5(3),X5(1)-O5(1),X5(2)-O5(2),X5(3)-O5(3),1,'r');
quiver3(O5(1),O5(2),O5(3),Y5(1)-O5(1),Y5(2)-O5(2),Y5(3)-O5(3),1,'g');
quiver3(O5(1),O5(2),O5(3),Z5(1)-O5(1),Z5(2)-O5(2),Z5(3)-O5(3),1,'b');
% Marco de referencia 5

quiver3(O6(1),O6(2),O6(3),X6(1)-O6(1),X6(2)-O6(2),X6(3)-O6(3),1,'r');
quiver3(O6(1),O6(2),O6(3),Y6(1)-O6(1),Y6(2)-O6(2),Y6(3)-O6(3),1,'g');
quiver3(O6(1),O6(2),O6(3),Z6(1)-O6(1),Z6(2)-O6(2),Z6(3)-O6(3),1,'b');
% Marco de referencia 6

quiver3(O7(1),O7(2),O7(3),X7(1)-O7(1),X7(2)-O7(2),X7(3)-O7(3),1,'r');
quiver3(O7(1),O7(2),O7(3),Y7(1)-O7(1),Y7(2)-O7(2),Y7(3)-O7(3),1,'g');
quiver3(O7(1),O7(2),O7(3),Z7(1)-O7(1),Z7(2)-O7(2),Z7(3)-O7(3),1,'b');
% Marco de referencia 6

puntosA = A47*puntosB;
TX = puntosA(1,:); TY = puntosA(2,:); TZ = puntosA(3,:);
% Puntos de la herramienta respecto al marco 0

plot3(TX,TY,TZ,'color','black','LineWidth',2);

line([O4(1) O5(1)], [O4(2) O5(2)], [O4(3)
O5(3)], 'color','black','LineWidth',2);

```

```

    line([O5(1) O6(1)], [O5(2) O6(2)], [O5(3)
O6(3)], 'color', 'black', 'LineWidth', 2);
    line([O6(1) O7(1)], [O6(2) O7(2)], [O6(3)
O7(3)], 'color', 'black', 'LineWidth', 2);

    drawnow
    hold off

end

```

- Sistema Completo de Ejes del Dispositivo

```

clear, clc
% Limpieza de variables

a1 = 1; a2 = 1; a3 = 1;
a4 = 1; a5 = 1; a6 = 1;

X0 = [ 1 0 0 1 ]; Y0 = [ 0 1 0 1 ]; Z0 = [ 0 0 1 1 ]; O0 = [ 0 0 0 1 ];

h = 0.25;
PV = [ 0 0 0 0 ]; PW = [ h/2 h/2 -h/2 -h/2 ]; PU = [ h 0 0 h ];
a = ones(1, length(PU)); puntosB = [ PU ; PV ; PW ; a ];

d1 = linspace(0, 0, 20);
d2 = linspace(0, 0, 20);
d3 = linspace(0, 0, 20);
th1 = linspace(0, 0, 20);
th2 = linspace(0, 0, 20);

for i = 1 : length(d1)

    A01 = [ 1 0 0          0
           0 1 0          0
           0 0 1 a1 + d1(i)
           0 0 0          1 ];
    % Transformación de 0 a 1
    A12 = [ 1, 0, 0, 0
           0, 0, 1, a2 + d2(i)
           0, -1, 0, 0
           0, 0, 0, 1 ];
    % Transformación de 1 a 2
    A23 = [ 0, 0, 1, a3 + d3(i)
           -1, 0, 0, 0
           0, -1, 0, 0
           0, 0, 0, 1 ];
    % Transformación de 2 a 3
    A34 = [ 0 0 1 0
           0 -1 0 0
           1 0 0 0
           0 0 0 1 ];
    % Transformación de 3 a 4
    A45 = [ 1 0 0 0
           0 1 0 0

```

```

    0 0 1 a4
    0 0 0 1 ];
% Transformación de 4 a 5
A56 = [ cosd(th1(i)), 0, sind(th1(i)), 0
        sind(th1(i)), 0, -cosd(th1(i)), 0
        0, 1, 0, a5
        0, 0, 0, 1 ];
% Transformación de 5 a 6
A67 = [ cosd(th2(i)), -sind(th2(i)), 0, a6*cosd(th2(i))
        sind(th2(i)), cosd(th2(i)), 0, a6*sind(th2(i))
        0, 0, 1, 0
        0, 0, 0, 1 ];
% Transformación de 6 a 7

A02 = A01*A12;
A03 = A01*A12*A23;
A04 = A01*A12*A23*A34;
A05 = A01*A12*A23*A34*A45;
A06 = A01*A12*A23*A34*A45*A56;
A07 = A01*A12*A23*A34*A45*A56*A67;

X1 = A01*X0'; Y1 = A01*Y0'; Z1 = A01*Z0'; O1 = A01*O0';
X2 = A02*X0'; Y2 = A02*Y0'; Z2 = A02*Z0'; O2 = A02*O0';
X3 = A03*X0'; Y3 = A03*Y0'; Z3 = A03*Z0'; O3 = A03*O0';
X4 = A04*X0'; Y4 = A04*Y0'; Z4 = A04*Z0'; O4 = A04*O0';
X5 = A05*X0'; Y5 = A05*Y0'; Z5 = A05*Z0'; O5 = A05*O0';
X6 = A06*X0'; Y6 = A06*Y0'; Z6 = A06*Z0'; O6 = A06*O0';
X7 = A07*X0'; Y7 = A07*Y0'; Z7 = A07*Z0'; O7 = A07*O0';

puntosA = A07*puntosB;
TX = puntosA(1,:); TY = puntosA(2,:); TZ = puntosA(3,:);
% Puntos de la herramienta respecto al marco 0

plot3(0,0,0); hold on; axis([0 5 0 5 0 5]); grid

plot3(TX, TY, TZ, 'color', 'black', 'LineWidth', 2);

quiver3(O0(1), O0(2), O0(3), X0(1)-O0(1), X0(2)-O0(2), X0(3)-O0(3), 1, 'r');
quiver3(O0(1), O0(2), O0(3), Y0(1)-O0(1), Y0(2)-O0(2), Y0(3)-O0(3), 1, 'g');
quiver3(O0(1), O0(2), O0(3), Z0(1)-O0(1), Z0(2)-O0(2), Z0(3)-O0(3), 1, 'b');
% Marco de referencia 0

quiver3(O1(1), O1(2), O1(3), X1(1)-O1(1), X1(2)-O1(2), X1(3)-O1(3), 1, 'r');
quiver3(O1(1), O1(2), O1(3), Y1(1)-O1(1), Y1(2)-O1(2), Y1(3)-O1(3), 1, 'g');
quiver3(O1(1), O1(2), O1(3), Z1(1)-O1(1), Z1(2)-O1(2), Z1(3)-O1(3), 1, 'b');
% Marco de referencia 1

quiver3(O2(1), O2(2), O2(3), X2(1)-O2(1), X2(2)-O2(2), X2(3)-O2(3), 1, 'r');
quiver3(O2(1), O2(2), O2(3), Y2(1)-O2(1), Y2(2)-O2(2), Y2(3)-O2(3), 1, 'g');
quiver3(O2(1), O2(2), O2(3), Z2(1)-O2(1), Z2(2)-O2(2), Z2(3)-O2(3), 1, 'b');
% Marco de referencia 2

%quiver3(O3(1), O3(2), O3(3), X3(1)-O3(1), X3(2)-O3(2), X3(3)-
O3(3), 1, 'r');
%quiver3(O3(1), O3(2), O3(3), Y3(1)-O3(1), Y3(2)-O3(2), Y3(3)-
O3(3), 1, 'g');

```

```

    %quiver3(O3(1),O3(2),O3(3),Z3(1)-O3(1),Z3(2)-O3(2),Z3(3)-
O3(3),1,'b');
    % Marco de referencia 3

    quiver3(O4(1),O4(2),O4(3),X4(1)-O4(1),X4(2)-O4(2),X4(3)-O4(3),1,'r');
    quiver3(O4(1),O4(2),O4(3),Y4(1)-O4(1),Y4(2)-O4(2),Y4(3)-O4(3),1,'g');
    quiver3(O4(1),O4(2),O4(3),Z4(1)-O4(1),Z4(2)-O4(2),Z4(3)-O4(3),1,'b');
    % Marco de referencia 4

    quiver3(O5(1),O5(2),O5(3),X5(1)-O5(1),X5(2)-O5(2),X5(3)-O5(3),1,'r');
    quiver3(O5(1),O5(2),O5(3),Y5(1)-O5(1),Y5(2)-O5(2),Y5(3)-O5(3),1,'g');
    quiver3(O5(1),O5(2),O5(3),Z5(1)-O5(1),Z5(2)-O5(2),Z5(3)-O5(3),1,'b');
    % Marco de referencia 5

    quiver3(O6(1),O6(2),O6(3),X6(1)-O6(1),X6(2)-O6(2),X6(3)-O6(3),1,'r');
    quiver3(O6(1),O6(2),O6(3),Y6(1)-O6(1),Y6(2)-O6(2),Y6(3)-O6(3),1,'g');
    quiver3(O6(1),O6(2),O6(3),Z6(1)-O6(1),Z6(2)-O6(2),Z6(3)-O6(3),1,'b');
    % Marco de referencia 6

    quiver3(O7(1),O7(2),O7(3),X7(1)-O7(1),X7(2)-O7(2),X7(3)-O7(3),1,'r');
    quiver3(O7(1),O7(2),O7(3),Y7(1)-O7(1),Y7(2)-O7(2),Y7(3)-O7(3),1,'g');
    quiver3(O7(1),O7(2),O7(3),Z7(1)-O7(1),Z7(2)-O7(2),Z7(3)-O7(3),1,'b');
    % Marco de referencia 7

    line([O0(1) O1(1)], [O0(2) O1(2)], [O0(3)
O1(3)], 'color', 'black', 'LineWidth', 2);
    line([O1(1) O2(1)], [O1(2) O2(2)], [O1(3)
O2(3)], 'color', 'black', 'LineWidth', 2);
    line([O2(1) O3(1)], [O2(2) O3(2)], [O2(3)
O3(3)], 'color', 'black', 'LineWidth', 2);
    line([O3(1) O4(1)], [O3(2) O4(2)], [O3(3)
O4(3)], 'color', 'black', 'LineWidth', 2);
    line([O4(1) O5(1)], [O4(2) O5(2)], [O4(3)
O5(3)], 'color', 'black', 'LineWidth', 2);
    line([O5(1) O6(1)], [O5(2) O6(2)], [O5(3)
O6(3)], 'color', 'black', 'LineWidth', 2);
    line([O6(1) O7(1)], [O6(2) O7(2)], [O6(3)
O7(3)], 'color', 'black', 'LineWidth', 2);

    drawnow
    hold off

end

```

- Trayectoria en Zig-Zag

```

clear
D=5;
c=0;
i=100;
while (i>1)
    for j=0:D:100
        c=c+1;
        x(c)=j; y(c)=i;
    end
    i=i-1;
end

```

```

        plot(x,y);
        axis([-10,110,-10,110]);
        hold on
        pause(0.1);
    end
    i=i-D;
    for j=100:-D:0
        c=c+1;
        x(c)=j; y(c)=i;
        plot(x,y);
        axis([-10,110,-10,110]);
        hold on
        pause(0.1);
    end
    i=i-D;
end
end

```

- Robot siguiendo la trayectoria en Zig-Zag

```

clc; clear all;
a1 = 1; a2 = 1; a3 = 1;
a4 = 1; a5 = 1; a6 = 1;
D=0.2;
c=0;
i=3;
while (i>1)
    for j=0:D:3
        c=c+1;
        x(c)=i+2; y(c)=j; z(c)=4;
        plot3(z,y,x,'r-');
        axis([0,10,0,10,0,10]);
        hold on
        pause(0.01);
    end
    i=i-D
    for j=3:-D:0
        c=c+1;
        x(c)=i+2; y(c)=j; z(c)=4;
        plot3(z,y,x,'r-');
        axis([0,10,0,10,0,10]);
        hold on
        pause(0.01);
    end
    i=i-D
end

hold on;
%axis manual
%ax = gca;%axes('XLim', [0 5], 'YLim', [0 5], 'ZLim', [0 5],
'Position',[0.1300 0.1100 0.7750 0.8150], 'CameraPosition', [-32.5257 -
43.6012 38.6410]);
%h2 = hgtransform('Parent',ax);
%hold on

```

```

X0 = [ 1 0 0 1 ]; Y0 = [ 0 1 0 1 ]; Z0 = [ 0 0 1 1 ]; O0 = [ 0 0 0 1 ];

h = 0.25;
PV = [ 0 0 0 0 ]; PW = [ h/2 h/2 -h/2 -h/2 ]; PU = [ h 0 0 h ];
a = ones(1,length(PU)); puntosB = [ PU ; PV ; PW ; a ];

th1 = linspace(0, 0, c);
th2 = linspace(0, 0, c);
d1 = x-a1-a4-a5-a6.*sin(th1);
d2 = y-a2-a6*sin(th1).*cos(th2);
d3 = z-a3-a6*cos(th1).*cos(th2);

for i = 1 : c
    clf;
    plot3(z,y,x,'r-'); hold on;
    A01 = [ 1 0 0 0
            0 1 0 0
            0 0 1 a1 + d1(i)
            0 0 0 1 ];
    % Transformación de 0 a 1
    A12 = [ 1, 0, 0, 0
            0, 0, 1, a2 + d2(i)
            0, -1, 0, 0
            0, 0, 0, 1 ];
    % Transformación de 1 a 2
    A23 = [ 0, 0, 1, a3 + d3(i)
            -1, 0, 0, 0
            0, -1, 0, 0
            0, 0, 0, 1 ];
    % Transformación de 2 a 3
    A34 = [ 0 0 1 0
            0 -1 0 0
            1 0 0 0
            0 0 0 1 ];
    % Transformación de 3 a 4
    A45 = [ 1 0 0 0
            0 1 0 0
            0 0 1 a4
            0 0 0 1 ];
    % Transformación de 4 a 5
    A56 = [ cosd(th1(i)), 0, sind(th1(i)), 0
            sind(th1(i)), 0, -cosd(th1(i)), 0
            0, 1, 0, a5
            0, 0, 0, 1 ];
    % Transformación de 5 a 6
    A67 = [ cosd(th2(i)), -sind(th2(i)), 0, a6*cosd(th2(i))
            sind(th2(i)), cosd(th2(i)), 0, a6*sind(th2(i))
            0, 0, 1, 0
            0, 0, 0, 1 ];
    % Transformación de 6 a 7

    A02 = A01*A12;
    A03 = A01*A12*A23;
    A04 = A01*A12*A23*A34;
    A05 = A01*A12*A23*A34*A45;
    A06 = A01*A12*A23*A34*A45*A56;

```

```

A07 = A01*A12*A23*A34*A45*A56*A67;

X1 = A01*X0'; Y1 = A01*Y0'; Z1 = A01*Z0'; O1 = A01*O0';
X2 = A02*X0'; Y2 = A02*Y0'; Z2 = A02*Z0'; O2 = A02*O0';
X3 = A03*X0'; Y3 = A03*Y0'; Z3 = A03*Z0'; O3 = A03*O0';
X4 = A04*X0'; Y4 = A04*Y0'; Z4 = A04*Z0'; O4 = A04*O0';
X5 = A05*X0'; Y5 = A05*Y0'; Z5 = A05*Z0'; O5 = A05*O0';
X6 = A06*X0'; Y6 = A06*Y0'; Z6 = A06*Z0'; O6 = A06*O0';
X7 = A07*X0'; Y7 = A07*Y0'; Z7 = A07*Z0'; O7 = A07*O0';

puntosA = A07*puntosB;
TX = puntosA(1,:); TY = puntosA(2,:); TZ = puntosA(3,:);
% Puntos de la herramienta respecto al marco 0

plot3(0,0,0); hold on; axis([0 10 0 10 0 10]); grid

robot(20) = plot3(TX,TY,TZ, 'color','black','LineWidth',2);

robot(21) = quiver3(O0(1),O0(2),O0(3),X0(1)-O0(1),X0(2)-O0(2),X0(3)-
O0(3),1,'r');
robot(22) = quiver3(O0(1),O0(2),O0(3),Y0(1)-O0(1),Y0(2)-O0(2),Y0(3)-
O0(3),1,'g');
robot(23) = quiver3(O0(1),O0(2),O0(3),Z0(1)-O0(1),Z0(2)-O0(2),Z0(3)-
O0(3),1,'b');
% Marco de referencia 0

robot(24) = quiver3(O1(1),O1(2),O1(3),X1(1)-O1(1),X1(2)-O1(2),X1(3)-
O1(3),1,'r');
robot(25) = quiver3(O1(1),O1(2),O1(3),Y1(1)-O1(1),Y1(2)-O1(2),Y1(3)-
O1(3),1,'g');
robot(26) = quiver3(O1(1),O1(2),O1(3),Z1(1)-O1(1),Z1(2)-O1(2),Z1(3)-
O1(3),1,'b');
% Marco de referencia 1

robot(27) = quiver3(O2(1),O2(2),O2(3),X2(1)-O2(1),X2(2)-O2(2),X2(3)-
O2(3),1,'r');
robot(28) = quiver3(O2(1),O2(2),O2(3),Y2(1)-O2(1),Y2(2)-O2(2),Y2(3)-
O2(3),1,'g');
robot(29) = quiver3(O2(1),O2(2),O2(3),Z2(1)-O2(1),Z2(2)-O2(2),Z2(3)-
O2(3),1,'b');
% Marco de referencia 2

%quiver3(O3(1),O3(2),O3(3),X3(1)-O3(1),X3(2)-O3(2),X3(3)-
O3(3),1,'r');
%quiver3(O3(1),O3(2),O3(3),Y3(1)-O3(1),Y3(2)-O3(2),Y3(3)-
O3(3),1,'g');
%quiver3(O3(1),O3(2),O3(3),Z3(1)-O3(1),Z3(2)-O3(2),Z3(3)-
O3(3),1,'b');
% Marco de referencia 3

robot(8) = quiver3(O4(1),O4(2),O4(3),X4(1)-O4(1),X4(2)-O4(2),X4(3)-
O4(3),1,'r');
robot(9) = quiver3(O4(1),O4(2),O4(3),Y4(1)-O4(1),Y4(2)-O4(2),Y4(3)-
O4(3),1,'g');
robot(10) = quiver3(O4(1),O4(2),O4(3),Z4(1)-O4(1),Z4(2)-O4(2),Z4(3)-
O4(3),1,'b');
% Marco de referencia 4

```

```

    robot(11) = quiver3(O5(1),O5(2),O5(3),X5(1)-O5(1),X5(2)-O5(2),X5(3)-
O5(3),1,'r');
    robot(12) = quiver3(O5(1),O5(2),O5(3),Y5(1)-O5(1),Y5(2)-O5(2),Y5(3)-
O5(3),1,'g');
    robot(13) = quiver3(O5(1),O5(2),O5(3),Z5(1)-O5(1),Z5(2)-O5(2),Z5(3)-
O5(3),1,'b');
    % Marco de referencia 5

    robot(14) = quiver3(O6(1),O6(2),O6(3),X6(1)-O6(1),X6(2)-O6(2),X6(3)-
O6(3),1,'r');
    robot(15) = quiver3(O6(1),O6(2),O6(3),Y6(1)-O6(1),Y6(2)-O6(2),Y6(3)-
O6(3),1,'g');
    robot(16) = quiver3(O6(1),O6(2),O6(3),Z6(1)-O6(1),Z6(2)-O6(2),Z6(3)-
O6(3),1,'b');
    % Marco de referencia 6

    robot(17) = quiver3(O7(1),O7(2),O7(3),X7(1)-O7(1),X7(2)-O7(2),X7(3)-
O7(3),1,'r');
    robot(18) = quiver3(O7(1),O7(2),O7(3),Y7(1)-O7(1),Y7(2)-O7(2),Y7(3)-
O7(3),1,'g');
    robot(19) = quiver3(O7(1),O7(2),O7(3),Z7(1)-O7(1),Z7(2)-O7(2),Z7(3)-
O7(3),1,'b');
    % Marco de referencia 7

    robot(1) = line([O0(1) O1(1)], [O0(2) O1(2)], [O0(3)
O1(3)], 'color','black', 'LineWidth', 2);
    robot(2) = line([O1(1) O2(1)], [O1(2) O2(2)], [O1(3)
O2(3)], 'color','black', 'LineWidth', 2);
    robot(3) = line([O2(1) O3(1)], [O2(2) O3(2)], [O2(3)
O3(3)], 'color','black', 'LineWidth', 2);
    robot(4) = line([O3(1) O4(1)], [O3(2) O4(2)], [O3(3)
O4(3)], 'color','black', 'LineWidth', 2);
    robot(5) = line([O4(1) O5(1)], [O4(2) O5(2)], [O4(3)
O5(3)], 'color','black', 'LineWidth', 2);
    robot(6) = line([O5(1) O6(1)], [O5(2) O6(2)], [O5(3)
O6(3)], 'color','black', 'LineWidth', 2);
    robot(7) = line([O6(1) O7(1)], [O6(2) O7(2)], [O6(3)
O7(3)], 'color','black', 'LineWidth', 2);

    drawnow
    pause(0.01);
end
%set(robot, 'Parent', h2)
%set(gcf, 'Render', 'opengl')
xlabel('Eje x')
ylabel('Eje y')
zlabel('Eje z')

```

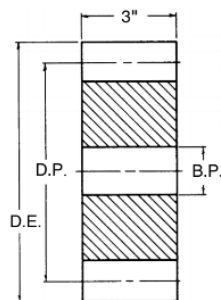

ANEXO B. ESPECIFICACIONES DE MATERIALES COMERCIALES UTILIZADOS

▪ Propuesta eje X (materiales, dimensiones, elementos)

Se propone un desplazamiento sobre el eje x, a través del mecanismo piñón-cremallera, fabricada ésta última en acero de bajo carbón, tipo TR dispuesta con ángulos de presión de 20° y con una longitud total de 112 cm de longitud, y de ancho 50 cm. El engrane recto utilizado es de acero tipo sencillo, de hierro fundido que proporciona una gran fuerza y permite un mayor diámetro de barreno. Este mecanismo estará empotrado a un perfil de aluminio tipo Bosch 40x40 light, que estará posicionado longitudinalmente en relación a la plataforma móvil, lo que permitirá generar movimientos horizontales, y con ello, el seguimiento de la trayectoria tipo zigzag propuesta. Cabe mencionar, que los sujetadores utilizados para unir los perfiles de aluminio, son de tipo estándar.

Se toma este sistema, por su simplicidad mecánica, transmisión suave, capacidad de carga y sin límite de longitud.

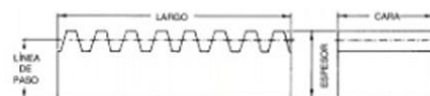
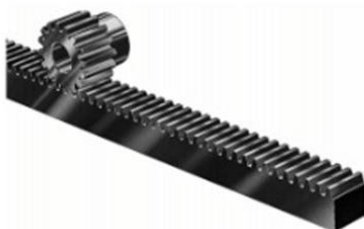
TIPO DE ENGRANE



Tipo A



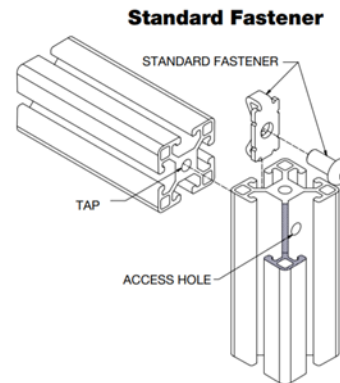
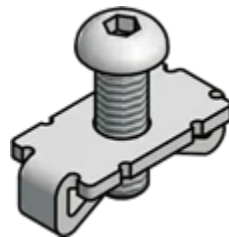
TIPO DE CREMALLERA



**Ancho de Cara Amplio
Acero — Ángulo de Presión de 20°**

Número de Parte	Paso	Ancho de Cara (Pulgadas)	Espesor Total (Pulgadas)	Línea de Paso	Peso Aprox. Lb/Pz.
R2020x6	20	1/2	1/2	.450	2.5

TIPO DE SUJETADOR – UNIONES PERFILES DE ALUMINIO



1) Propuesta Eje Y (materiales, dimensiones, elementos)

El desplazamiento sobre el eje vertical se generará a través del sistema de deslizamiento corredizo empleando carritos metálicos.

Estos carritos estarán acoplado a su vez, sobre perfiles tipo U colocados verticalmente en relación a la estructura móvil, la cual está construida con perfiles de aluminio estructural de 40x40 con ranura en T, ideal para sistemas de deslizamiento lineales, es funcional, versátil, durable y estéticamente visible. Dentro de otras ventajas que ofrece la fabricación de estructuras en aluminio en comparación a construcciones tradicionales en acero, podemos enumerar las siguientes:

- Tiempos de desarrollo extremadamente cortos desde el diseño hasta la fabricación.
- No requiere soldadura, pulido o pintura.
- Elimina costosos procesos de fabricación en acero.
- Flexibilidad para modificar las estructuras con base a los cambios en los requerimientos.
- Mucho más ligero, por ende, requieren motores y mecanismos más pequeños.

2) Propuesta Eje Z (materiales, dimensiones, elementos)

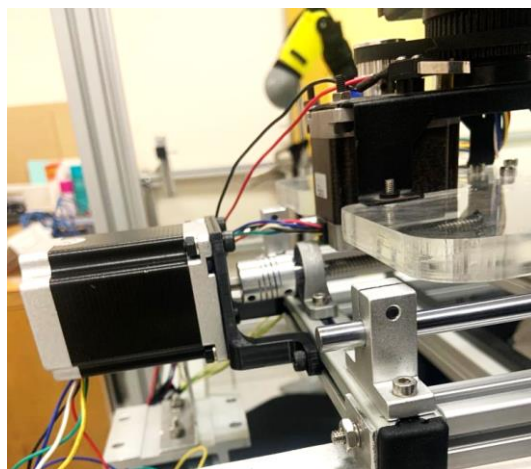
El sistema Pan-Tilt, estará acoplado a un sistema de rodamiento lineal, con un actuador lineal mecánico tipo Acme con pocas pérdidas por fricción, lo que se traduce en una eficiencia mecánica en comparación con otras alternativas, y el cual puede alcanzar una eficiencia buena. La falta de fricción de deslizamiento entre la tuerca y el tornillo permite una larga vida útil del conjunto del husillo, la reducción de los tiempos entre mantenimiento y sustitución de piezas y a la disminución de las necesidades de lubricación. Esto, combinado con la mejora del rendimiento global y la reducción del consumo energético pueden permitir compensar los mayores costes de adquisición de este tipo de actuador.

El sistema de rodamiento estará compuesto de 2 guías de eje de barra de movimiento lineal de 15.748 in y tornillo de plomo de 0.315 in y 4 soportes de eje SK8 y 4 rodamientos SCS8UU y 2 acoplamientos de eje flexible KP08 y 2 piezas de acoplamiento de eje flexible.



ACTUADORES

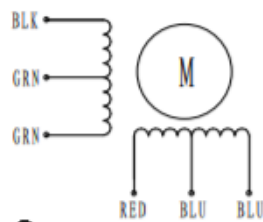
- Datasheet Pololu 1472 (NEMA23)



HIGH TORQUE HYBRID STEPPING MOTOR SPECIFICATIONS

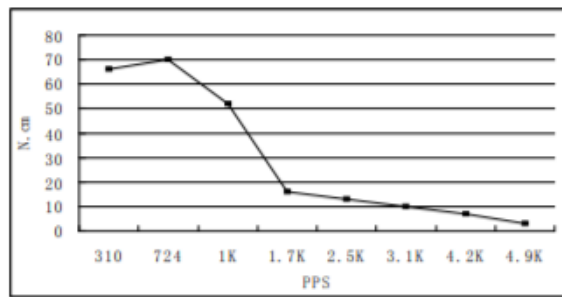
General specifications		Electrical specifications	
Step Angle (°)	1.8	Rated Voltage (V)	7.4
Temperature Rise (°C)	80 Max (rated current, 2 phase on)	Rated Current (A)	1
Ambient Temperature (°C)	-20 ~ +50	Resistance Per Phase (±10% Ω)	7.4 (25°C)
Number of Phase	2	Inductance Per Phase (±20% mH)	10
Insulation Resistance (MΩ)	100 Min (500VDC)	Holding Torque (N.cm)	90
Insulation Class	Class B		
Max. radial force (N)	28 (20mm from the flange)		
Max. axial force (N)	10		

● Wiring Diagram :

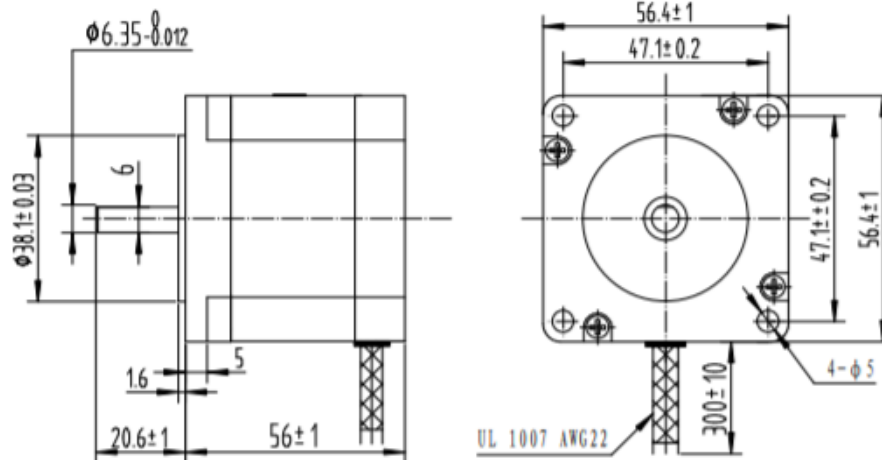


● Pull out torque curve :

VOLTAGE: 30VAC, CONSTANT CURRENT: 1A, HALF STEP





● Dimensions:
(unit=mm)



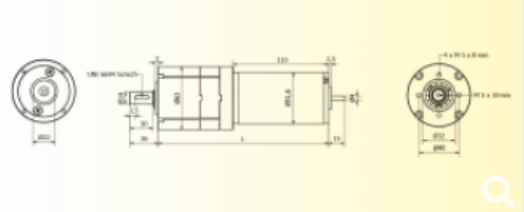

REV	REVISIONS	DESCRIPTION	BY	DATE	SY57STH56-1006A	TECHNICAL CONDITIONS
DRAW	2013/06/12				CHANGZHOU SONGYANG MACHINERY & ELECTRONICS NEW TECHNIC INSTITUTE	080056087
CHECK						
APPROVE						

- Datasheet CD Bernio MR 752 L63 1/36


BERNIO ELETTROMECCANICA S.N.C.


Company
Products
Examples of productions
Contacts
Search products

GEAR MOTOR MR 752 L 63

TYPE	RATIO	L	*R.P.M. no load	*R.P.M. S 1	S1 torque	*R.P.M. S2	S2 torque	Max torque	I max
		mm	min-1	min-1	Nm	min-1	Nm	Nm	24 Vdc
MR 752 L 63 1/4	4	166	760	660	0,5	450	1,3	3	14,5
MR 752 L 63 1/6	6	166	500	440	0,7	310	2	5	14,5
MR 752 L 63 1/16	16	186	185	165	1,7	115	4,8	12,2	14,5
MR 752 L 63 1/24	24	186	120	105	2,5	75	7,2	18,7	14,5
MR 752 L 63 1/36	36	186	80	70	4	55	11	28	14,5
MR 752 L 63 1/64	64	206	45	36	6	26	17	43	14,5
MR 752 L 63 1/96	96	206	30	25	9	18	25	63	14,5
MR 752 L 63 1/144	144	206	20	18	12	12	36	95	14,5
MR 752 L 63 1/216	216	206	13	11	8	8	54	120	12,5

Length "L" of the gearmotor as a function of reduction and output number of revolution with the standard motor 752 L 60 output W 3200 Rpm loadness, 12 or 24 Vdc. Starting current 14,5 A. (28A x 12Vdc)

Drivingshaft supported by self lubricating bushings. Output shaft supported by two coupled screened bearings. The motor and the reduction gear are both thrated for corrosion strength. The motor has an electrical suppressor system for the CE standard. Connecting 2 wire 0,75 x 250 mm.

*The rotation speed can change of $\pm 10\%$.

The S1 load test was made using a (2,4 A) current in the air with an increase of temperature of 70° C. The S2 test was made using a (6 A) current in the air with a 50% timing 5' with an increase of temperature of 80° C max. The starting current is I max and cannot be maintained for more than 2".

Max forces which may act on the output shaft: Axial 300 N, Radial 400 N on the extremity of output shaft.

It is possible to apply an encoder.
Possibility to apply other motor.

ANEXO C. PARTICIPACIÓN EN EL CONGRESO RAAD 2022



31ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS IN ALPE-ADRIA-DANUBE REGION (RAAD2022)

Instituto Politécnico Nacional
CICATA-Unidad Querétaro, México

*“A robot for facade cleaning based on a Cartesian configuration:
kinematic analysis and prototype construction”*

Innovative robots

García-Rodríguez, G.M and Castillo-Castañeda E.

ginnagarcia89@hotmail.com , ecastilloca@ipn.mx
(+57) 3212945884 (+52) 4423391549

RESUMEN DEL ARTÍCULO

A robot for facade cleaning based on a Cartesian configuration: kinematic analysis and prototype construction

García-Rodríguez, G.M. and Castillo-Castañeda, E.

Instituto Politécnico Nacional, CICATA-Unidad Querétaro, México
ginnagarcia89@hotmail.com, ecastilloca@ipn.mx

Abstract. Despite advances in service robotics and automation, building facade cleaning continues to be performed manually by specialized technicians operating from complex scaffoldings. This form of cleaning, in addition to be inefficient, is expensive and dangerous for cleaning personnel who must work under the risk of falls from considerable height and exposed to toxic substances that are often required for cleaning. This work presents a robotic device with 5 degrees of freedom based on a Cartesian configuration and a pan-tilt type system; the latter allows directing a high-pressure jet of some specific substance to clean the facade. The robotic device is placed in front of the facade and an operator directs the cleaning from the ground in a teleoperated way. In a first stage, the cleaning substance can be water supplied by a high-pressure washer. The kinematic analysis of the robot is presented, as well as a prototype construction.

Keywords: Cartesian type robot, facade cleaning, service robot, high-pressure washer.