

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

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

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA
AVANZADA**

**DESARROLLO DE UN ROBOT DE SERVICIO TELE-
OPERADO PARA ASISTIR EN TAREAS DE
LIMPIEZA A ALTA PRESIÓN**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN TECNOLOGÍA AVANZADA**

**PRESENTA:
ING. ERNESTO CHRISTIAN OROZCO MAGDALENO**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. EDUARDO CASTILLO CASTAÑEDA**



Santiago de Querétaro, Qro., Agosto 2018



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Querétaro, Qro. siendo las 16:50 horas del día 23 del mes de Mayo del 2018 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-IPN-QRO para examinar la tesis titulada:

“DESARROLLO DE UN ROBOT DE SERVICIO TELE-OPERADO PARA ASISTIR EN TAREAS DE LIMPIEZA A ALTA PRESIÓN”

Presentada por el alumno:

OROZCO	MAGDALENO	ERNESTO CHRISTIAN
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)

Con registro:

B	1	6	1	2	4	0
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

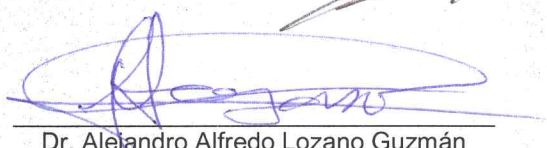
MESTRÍA EN TECNOLOGÍA AVANZADA

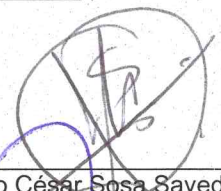
Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

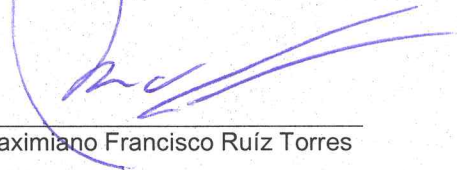
Director(a) de tesis


Dr. Eduardo Castillo Castañeda


Dr. Alejandro Alfredo Lozano Guzmán

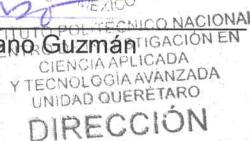

Dr. Julio César Sosa Savedra


Dra. Xochitl Yamile Sandoval Castro


M. en C. Maximiano Francisco Ruíz Torres

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


Dr. Alejandro Alfredo Lozano Guzmán





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 25 del mes de mayo del año 2018, el que suscribe **Ernesto Christian Orozco Magdaleno** alumno del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada, con número de registro B161240, adscrito al **Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Querétaro**, manifiesta que es el autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Eduardo Castillo Castañeda** y cede los derechos del trabajo titulado **“Desarrollo de un robot de servicio tele-operado para asistir en tareas de limpieza a alta presión”**, 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 expreso del (de la) autor(a) y/o director(es) del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones: ecastilloca@ipn.mx y chriztian_orz@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ing. Ernesto Christian Orozco Magdaleno

“¿Y los pilotos? ¿Y los diversos equipos de salvamento? ¿Y los que luchan contra el agua y el fuego? (...) No hay tales personas -dijo. Esas cosas las hacen los robots...”

-Stanislaw Lem

Fábulas de los robots, 1981

Dedicatorias

Con todo mi amor y respeto a mis padres Gregorio Orozco Cuevas y Ma. Bertha Magdaleno Martínez (q.e.p.d.), por todo su amor, comprensión y apoyo que siempre me han brindado, todo lo que soy se lo debo a ustedes, muchas gracias por ser un ejemplo de vida para mí.

A mi hermano Gregorio Orozco Magdaleno y mi cuñada María de los Ángeles López Torres, por todo su apoyo y ánimos que me dan, los quiero, respeto y admiro mucho, son grandes seres humanos.

A mi sobrino Alejandro que tanto amo...

Agradecimientos

A mi padre por todo su apoyo y confianza que ha tenido conmigo a lo largo de toda mi vida, por ser el mejor padre que pude haber tenido, y, por la única verdadera herencia que me ha dado... los valores y la educación.

A mi madre (q.e.p.d.) por siempre motivarme a seguir adelante y nunca tirar la toalla, por hacerme un hombre de bien... por todo su cariño y comprensión.

A mi hermano que siempre me ha apoyado incondicionalmente, por sus consejos y regaños. A mi cuñada Ángeles por siempre recibirme y apoyarme cada vez que tengo un proyecto nuevo por sus tierras. Y como olvidar a mi niño Alejandro... mi sobrino que tanto quiero.

A pichito, mi hermano del alma, que bajo cualquier circunstancia me apoya y jamás ha dejado de creer en mi... gracias por tu amistad.

Al Dr. Eduardo Castillo Castañeda por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto, por su asesoría durante el desarrollo, y por ser un ejemplo profesional y de persona a seguir.

A los miembros de mi comité tutorial por sus recomendaciones.

Al M.C. Fabio Abel Aguirre Cerrillo por abrirme las puertas a la investigación, por motivarme a nunca conformarme y siempre seguir adelante. Gracias.

A los profesores Marco Ceccarelli y Giuseppe Carbone por permitirme realizar una estancia de movilidad académica en Cassino, Italia.

Al glorioso Instituto Politécnico Nacional y al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, a sus directivos y administrativos por la orientación y facilidades.

Al CONACYT por su apoyo económico durante mis estudios y mi estancia en el extranjero.

A todos los profesores que he tenido a lo largo de mi vida, desde mi infancia hasta el día de hoy, gracias.

A mis amigos Alfredo, Jacobo y Enrique por todo su apoyo y consejos, gracias.

A mis compañeros y amigos, que a lo largo de estos dos años de trabajo siempre conté con ellos y siempre me brindaron el mejor de sus consejos:

Iván, Gilberto, Raymundo, Michelle, Araceli, Christian, Grecia.

¡Gracias infinitas a todos!

Este documento presenta el desarrollo de un robot de servicio tele-operado para asistir al personal que realiza tareas de limpieza a alta presión; 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*. El análisis estático del robot se realiza bajo la tercera ley de Newton, para obtener la masa mínima requerida para que el robot móvil no vuelque por acción de la fuerza de repulsión del chorro de agua a alta presión. El modelo dinámico del sistema *pan-tilt* se obtiene mediante la formulación de Newton-Euler a partir del análisis de las fuerzas internas y externas que interactúan durante la tarea de limpieza, el cual permite obtener el par-torsión mínimo requerido en los actuadores. Mediante una simulación en SolidWorks se valida, a nivel software, el modelo dinámico propuesto. Se presenta el modelo cinemático de la base móvil para que el robot pueda desarrollar giros de 90° con la tracción diferencial, a partir de una trayectoria propuesta. Un análisis de resistencia a la rodadura es desarrollado para obtener el par-torsión mínimo requerido para que la base móvil pueda desplazarse libremente sobre superficies lodosas.

Se presenta la construcción del prototipo a partir de un diseño CAD propuesto. Se desarrolla la validación del prototipo a partir de cuatro evaluaciones experimentales principales: validación de movilidad del sistema *pan-tilt*, del modelo cinemático de la base móvil, del modelo dinámico del sistema *pan-tilt*; y la obtención de las características operativas del robot a partir del desarrollo una tarea de limpieza a alta presión.

Palabras clave: Robot de servicio, base móvil, *pan-tilt*, limpieza, alta presión, análisis estático, Newton-Euler.

Abstract

This document presents the development of a tele-operated service robot to assist high pressure cleaning tasks staff; it consists in a mobile base with three wheels, with differential traction locomotion, and a *pan-tilt* system of two degrees of freedom, sited over the mobile base. Inside the mobile base there is a commercial water-jet cleaning machine, also the electric, electronic, traction and control system of the robot. A water-jet gun is mounted on the pan-tilt system as robot's end effector, which is manipulated remotely via, as the mobile base too, through a commercial *gamepad*; this let an easy-way user operation without necessity of path programming or the necessity of a minimum robotics knowledge.

The robot's operation mode let a free displacement of the mobile base when the *pan-tilt* system is stopped, by the same way, the *pan-tilt* system has a free manipulation when the mobile base is static. This let to separate robot's mechanical analysis in a static analysis for the mobile base and a dynamic analysis for *pan-tilt* system. Robot's static analysis is carried out by Newton's third law, to obtain the minimum robot's mass required to do not overturn by the repulsion force action of water-jet. *Pan-tilt's* system dynamic model is obtained by Newton-Euler formulation from internal and external forces analysis that actuate during the high-pressure cleaning task, which let to obtain the minimum actuator's torque. Proposed dynamic model is validated, at software level, by using SolidWorks. Mobile base's kinematic model is presented to let turns of 90° to the robot with a differential traction, from a proposed path. A rolling resistance analysis is realized to obtain the minimum mobile base's torque for displacing over mud surfaces.

The prototype's construction is presented and manufactured from a proposed CAD design. Prototype's validation is developed by four main experimental evaluation: validation of the *pan-tilt* system mobility, mobile base's kinematic's, *pan-tilt* system's dynamic model; and the obtainment of the main operative characteristics of the robot by developing a high-pressure cleaning task.

Key words: Service robot, mobile base, *pan-tilt*, cleaning, high pressure, static analysis, Newton-Euler.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Hipótesis.....	4
1.5 Metodología.....	4
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	6
2.1 Robots de servicio	6
2.2 Limpieza a alta presión.....	8
2.3 Prototipos desarrollados	9
2.4 Caracterización de una tarea de limpieza	13
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO.....	17
3.1 Robots móviles	17
3.1.1 Vehículos con ruedas.....	18
3.1.2 Tipos de locomoción en RMR.....	20
3.2 Modelo cinemático de un RMR	21
3.3 Resistencia a la rodadura	22
3.4 Diagrama de cuerpo libre	23
3.5 Convención de Denavit-Hartenberg.....	23
3.6 Análisis dinámico de un robot.....	25
3.6.1 Formulación de Newton-Euler	26
3.6.2 Algoritmo recursivo de Newton-Euler	26
3.7 Control de velocidad de un motor de CD.....	28

CAPÍTULO 4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ROBOT	30
4.1. Requerimientos de diseño.....	30
4.2 Modelo conceptual	31
4.3 Modelo cinemático de la base móvil	32
4.4 Análisis de rodadura de la base móvil	38
4.5 Análisis estático del robot	39
4.6 Modelo geométrico directo del sistema <i>pan-tilt</i>	45
4.7 Análisis dinámico del sistema <i>pan-tilt</i>	46
4.7.1 Simulación en SolidWorks	49
4.8 Diseño CAD	50
4.9 Selección de componentes.....	53
4.10 Construcción del robot	57
4.11 Diseño del control.....	60
4.11.1 Control de la base móvil.....	62
4.11.2 Control del sistema <i>pan-tilt</i>	63
4.11.3 Control del hidrolavado	64
CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL	66
5.1 Validación de movilidad del sistema <i>pan-tilt</i>	66
5.2 Validación del modelo cinemático de la base móvil	68
5.3 Validación del modelo dinámico del sistema <i>pan-tilt</i>	69
5.4 Validación del prototipo en funcionamiento	70
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	73
TRABAJO FUTURO	74
OTROS PRODUCTOS	75
REFERENCIAS	76
ANEXO A.....	80
ANEXO B.....	81
ANEXO C.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Limpieza en lugares insalubres: a) corral de puercos [3], b) limpieza con chorros de agua a alta presión en la industria [4].	2
Figura 1.2. Robots de servicio para limpieza a alta presión: a) ALTO MULTICLEANER 7-53 [5], b) COMBIJET RE1000 [6].	2
Figura 1.3. Metodología para el desarrollo del proyecto.	5
Figura 2.1. Robots de servicio [8].	6
Figura 2.2. Ventas obtenidas de las principales aplicaciones de robots de servicio profesional con proyecciones al año 2020 [8].	7
Figura 2.3. Ventas obtenidas de otras aplicaciones (primera parte) de robots de servicio profesional con proyecciones al año 2020 [8].	7
Figura 2.4. Ventas obtenidas de otras aplicaciones (segunda parte) de robots de servicio profesional con proyecciones al año 2020 [8].	8
Figura 2.5. Limpieza a alta presión [13].	8
Figura 2.6. Prototipos nivel laboratorio para limpieza a alta presión: a) IPCR [17], b) robot de avance de tornillo [18].	9
Figura 2.7. Robots comerciales para limpieza a alta presión: a) M3 Cleaning Robot [19], b) M4 Vacuum [19], c) Combijet RJE1000 [20], d) Dron de limpieza [21].	10
Figura 2.8. Robot lava-depósitos de Dugar [22].	11
Figura 2.9. Patentes de robots de limpieza a alta presión: a) patente: US 9,114,440 B1, b) patente: WO 2014/207274 A1, c) patente: US 6,215,268 B1, d) patente: US 6,565,668 B1....	12
Figura 2.10. Tareas de limpieza a caracterizar: a) limpieza en depuradora de aguas residuales (tarea 1), b) limpieza de demostración de hidrolavadora Karcher (tarea 2), c) limpieza vertical de columna en fabrica (tarea 3), d) limpieza horizontal de columna en fabrica (tarea 3).	14
Figura 2.11. Trayectorias de posición angular de las tareas de limpieza: a) tarea 1, b) tarea 2, c) tarea 3, d) tarea 4, e) todas las tareas.	16
Figura 2.12. Ángulo de apertura del efector final del robot Nilfisk Alto.	16
Figura 3.1. Tipos de locomoción terrestre de robots móviles: a) tipo oruga [40], b) con ruedas [40], c) con patas [40].	18
Figura 3.2. Manipuladores móviles: a) robot <i>Little Helper</i> [45], b) robot para ensamble/desensamble [46], c) robot RB-1 [47].	19

Figura 3.3. Tipos de locomoción de robots móviles con ruedas [35]: a) ackerman, b) triciclo clásico, c) tracción diferencial, d) <i>skid steer</i> , e) tracción síncrona, f) tracción omnidireccional.	20
Figura 3.4. Movimiento de una rueda en el plano [50].	21
Figura 3.5. Rodadura de una rueda sobre una superficie deformable.	22
Figura 3.6. Definición de los parámetros de un eslabón [53].	24
Figura 3.7. Pulso PWM para el control de un motor de CD [60].	29
Figura 4.1. Modelo conceptual del robot de servicio propuesto.	31
Figura 4.2. Ángulos de giro del sistema <i>pan-tilt</i>	32
Figura 4.3. Soporte de tipo trípode.	32
Figura 4.4. Diagrama esquemático de un robot móvil de tres ruedas con tracción diferencial.	33
Figura 4.5. Trayectoria ha desarrollar.	37
Figura 4.6. Perfiles de velocidad angular para desarrollar la trayectoria propuesta.	37
Figura 4.7. Diagrama de cuerpo libre para el análisis de resistencia a la rodadura del robot.	38
Figura 4.8. Posición crítica para volcadura en reacción a una fuerza externa de repulsión: a) <i>Pitch</i> 0° y <i>Yaw</i> 0°, b) <i>Pitch</i> 0° y <i>Yaw</i> 180°.	40
Figura 4.9. Diagrama de cuerpo libre de la estructura general del robot móvil.	40
Figura 4.10. Fuerzas de acción y reacción en el sistema <i>tilt</i>	41
Figura 4.11. Fuerzas de acción y reacción en el sistema <i>pan</i>	41
Figura 4.12. Fuerzas de acción, reacción y momentos en la estructura que eleva el <i>pan-tilt</i>	41
Figura 4.13. Fuerzas de acción, reacción y momentos en la base móvil, parte superior.	42
Figura 4.14. Fuerzas de acción, reacción y momentos en la base móvil, parte inferior.	42
Figura 4.15. Asignación de sistema de coordenadas: a) Diagrama cinemático, b) Diagrama dl modelo conceptual.	45
Figura 4.16. Espacio de trabajo del sistema <i>pan-tilt</i> para un giro de 0° a 180° en <i>Yaw</i> y de -25° a 65° en <i>Pitch</i>	46
Figura 4.17. Trayectoria de la pistola de chorros de agua a alta presión.	47
Figura 4.18. Posiciones angulares del <i>pan-tilt</i> para la trayectoria de limpieza.	48
Figura 4.19. Gráfica del par torsional requerido en <i>tilt</i> para realizar la trayectoria de trabajo.	48
Figura 4.20. Gráfica del par torsional requerido en <i>pan</i> para realizar la tarea de limpieza.	49
Figura 4.21. Gráfica del par-torsión requerido en <i>tilt</i> para realizar la trayectoria de trabajo.	49
Figura 4.22. Gráfica del par torsional requerido en <i>pan</i> para realizar la trayectoria de trabajo.	50

Figura 4.23. Vista isométrica del diseño CAD de la base móvil.....	50
Figura 4.24. Vista isométrica del diseño CAD del sistema <i>pan-tilt</i>	51
Figura 4.25. Vista isométrica del diseño CAD del sistema <i>pan-tilt</i> con la pistola de alta presión acoplada.....	51
Figura 4.26. Vista isométrica frontal del modelo CAD del robot.	52
Figura 4.27. Vista isométrica trasera del modelo CAD del robot.	52
Figura 4.28. Diagrama general de control del robot.....	53
Figura 4.29. <i>Gamepad</i> MEGAFIRE.....	53
Figura 4.30. Raspberry Pi 3 modelo B.	54
Figura 4.31. Tarjetas de control de velocidad de motores de CD.	54
Figura 4.32. Motor Bernio MR 752 L63 1/36.	55
Figura 4.33. Controlador Pololu A4988.....	55
Figura 4.34. Pololu 1472.	55
Figura 4.35. Control de hidrolavado: a) módulo de dos relevadores, b) electroválvula.	56
Figura 4.36. Hidrolavadora PW1300SW.....	56
Figura 4.37. Estructura principal del robot.....	57
Figura 4.38. Integración del sistema.....	57
Figura 4.39. Cuadro de energía: a) vista frontal, b) vista trasera.	58
Figura 4.40. Parte frontal del robot.....	58
Figura 4.41. Parte trasera del robot.....	59
Figura 4.42. Suspensión de rodaja.....	59
Figura 4.43. Prueba preliminar del sistema con limpieza a alta presión.	60
Figura 4.44. Diagrama de flujo del control de la base móvil.	60
Figura 4.45. Diagrama general de control del robot.....	61
Figura 4.45. Interruptores de posición en el sistema <i>pan-tilt</i> : a) en <i>tilt</i> , b) en <i>pan</i>	61
Figura 4.47. Diagrama de flujo del control de la base móvil.	63
Figura 4.48. Diagrama de flujo del control del sistema <i>pan-tilt</i>	64
Figura 4.49. Diagrama de flujo del control de hidrolavado.....	65
Figura 5.1. Desplazamiento del sistema <i>tilt</i>	67
Figura 5.2. Desplazamiento del sistema <i>pan</i>	67
Figura 5.3. Desplazamiento de la base móvil.....	68

Figura 5.4. Área sucia a limpiar.	70
Figura 5.5. Área limpiada.	71
Figura 5.6. Histogramas del área a limpiar: a) antes de ser limpiada, b) después de ser limpiada.	71

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

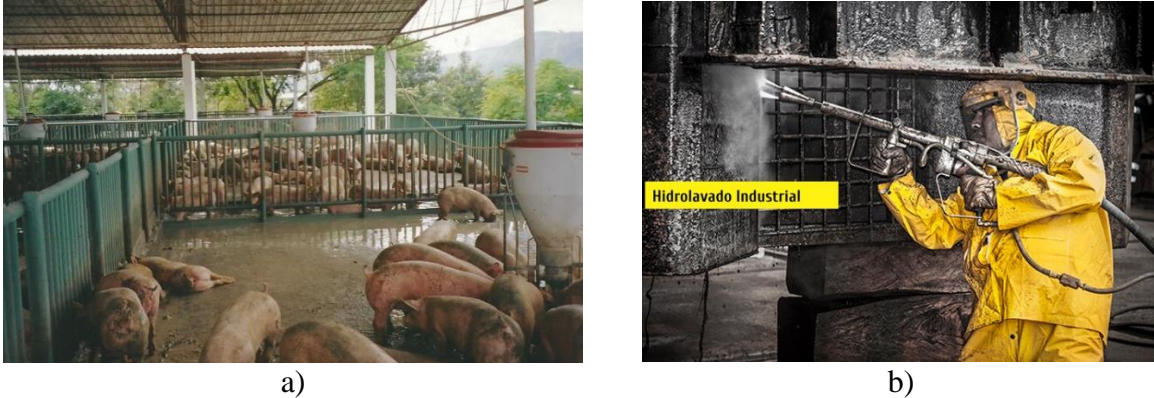
En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de alta presión basado en un robot de servicio tele-operado para asistir en tareas de limpieza a alta presión. Su desarrollo se muestra a lo largo de seis capítulos. El primer capítulo da a conocer los antecedentes del proyecto, justificación, objetivo general y específicos, así como la hipótesis y metodología. El segundo capítulo incluye el estado del arte de los robots de servicio, las investigaciones y prototipos de laboratorio, patentes, y productos comerciales para realizar limpieza a alta presión; se caracteriza la tarea de limpieza a desarrollar. El tercer capítulo define los conceptos y herramientas teóricas para el desarrollo de los análisis propuestos. El cuarto capítulo describe el diseño y construcción del robot, el análisis cinemático, estático y dinámico del robot; se incluye también la selección de los componentes. En el quinto capítulo se desarrolla la validación experimental del robot. El último capítulo presenta las conclusiones del proyecto.

1.1 Antecedentes

La Organización Mundial de la Salud, OMS, en un estudio presentado en el año 2016 estimó que en el año 2012 perdieron la vida 12.6 millones de personas por vivir o trabajar en ambientes insalubres, casi una cuarta parte del total mundial de muertes. Esto indica que una de las causas principales de muerte a nivel mundial se encuentra relacionada con la exposición a lugares o ambientes insalubres o poco saludables, como es el caso de las personas que se dedican a realizar tareas de limpieza a alta presión [1]. Una condición insalubre se define como toda aquella condición perjudicial para el ser humano, por lo que, los lugares con condiciones insalubres son aquellos que cuentan con condiciones que perjudican la salud del ser humano [1].

En la actualidad el lavado con chorros de agua a alta presión se realiza principalmente en lugares con condiciones insalubres y riesgosas para la salud del ser humano, como las áreas contaminadas con agentes físicos, químicos y biológicos en las industrias, o la suciedad existente en los establos de animales en una granja [2], ver figura 1.1a [3]. Estas tareas de limpieza a alta presión o hidrolavado se desarrollan con el mismo modus operandi, es decir, el personal se ubica dentro del área a limpiar (lugar en condiciones insalubres) y con ayuda de una pistola o manguera a alta presión limpian el área, teniendo como protección sólo un overol y una careta o mascarilla, figura 1.1b [4]. Estas escasas medidas de protección permiten que el personal esté en contacto directo con la suciedad y los agentes insalubres (físicos, químicos o

biológicos) del lugar, haciendo que se enfermen y contraigan infecciones estomacales, en las vías respiratorias y/o en los ojos. Lo anterior da como resultado una mala calidad de vida al personal de limpieza.



a) b)
Figura 1.1. Limpieza en lugares insalubres: a) corral de puercos [3], b) limpieza con chorros de agua a alta presión en la industria [4].

Debido a lo anterior se han desarrollado diferentes robots de servicio para asistir en las tareas de limpieza a alta presión, con configuraciones muy sencillas o muy complejas, como el robot ALTO MULTICLEANER 7-53 de la compañía Nilfisk, ver figura 1.2a [5]. Este robot tiene una morfología o arquitectura compleja, con 4 grados de libertad, y es programado para desarrollar una rutina de limpieza automática, por lo que su control se vuelve complejo para el operador. Lo anterior implica la necesidad de personal con un mínimo de conocimiento para programar las trayectorias a seguir, la velocidad y el área de desplazamiento del robot, para así poder operarlo de manera correcta. Por otro lado, el robot COMBIJET RJE 1000, figura 1.2b, de la compañía Combijet, cuenta con un solo grado de libertad, lo cual lo vuelve muy sencillo de manipular, pero con una alta restricción de movilidad para limpiar.



a) b)
Figura 1.2. Robots de servicio para limpieza a alta presión: a) ALTO MULTICLEANER 7-53 [5], b) COMBIJET RE1000 [6].

A pesar de que estos robots desarrollan rutinas de limpieza automáticas, es necesario introducir al robot dentro del área a realizar la limpieza, por lo que el personal asistido por el robot no queda exento de entrar en contacto con la zona contaminada. La solución a este problema es el desarrollo de un robot de servicio tele-operado con una morfología simple, que le permita al personal asistido una interacción y un control sencillo e intuitivo, por lo que no es necesario que el usuario tenga conocimientos especializados en robótica o control para poder operar el robot.

1.2 Justificación

La robótica de servicios profesionales ha tenido un gran avance los últimos años, desarrollando investigación y prototipado para solucionar problemas y mejorar aspectos de la vida cotidiana del ser humano [6]. En especial, los robots de limpieza profesional han tenido una gran aceptación e impacto en la industria (ganadera, portuaria, química, etc.), dónde han podido reducir tiempos de limpieza y mejorar la calidad laboral de las personas que realizan estas actividades. La limpieza con chorros de agua (combinados con materiales abrasivos y detergentes químicos) a alta presión es la solución más utilizada en la industria para limpiar zonas muy sucias e insalubres. Es por esto, que se han desarrollado diferentes investigaciones y prototipados a nivel laboratorio y comercial, dónde la mayoría de los prototipos cuentan con uno, o más de tres grados de libertad, y una arquitectura muy simple o muy compleja, según sea el caso. Además, la mayoría de ellos son de limpieza automática, es decir, necesitan ser programados para ejecutar las trayectorias de limpieza cada vez que sean utilizados, generando que el personal de limpieza que es asistido por el robot tenga un conocimiento mínimo para poder manipular emplear esta tecnología.

Es por lo anterior que este proyecto plantea el desarrollo de un robot de servicio tele-operado para asistir en tareas de limpieza a alta presión, considerando que su estructura mecánica se basa en un una base móvil con tres ruedas, y un sistema *pan-tilt* de dos grados de libertad montado sobre la base. De esta manera se obtiene una arquitectura sencilla, funcional, y fácil de operar. La caracterización de una tarea de limpieza permite obtener los parámetros de diseño del robot. Un análisis cinemático a la base móvil proporciona las curvas de velocidad para que el robot pueda girar a través de una tracción diferencial. Mediante un análisis estático, utilizando la tercera ley de Newton, se obtienen las masas mínimas para que la fuerza de repulsión no vuelque al robot. La formulación dinámica de Newton-Euler permite obtener el par-torsión de los actuadores para poder manipular el chorro de agua a alta presión. La construcción del prototipo se desarrolla considerando los resultados obtenidos de los análisis anteriores. La validación del prototipo se realiza utilizando un *gamepad* alámbrico a distancia para comprobar la movilidad del robot y su simpleza de uso.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un robot de servicio para asistir a las personas en la limpieza de lugares con condiciones insalubres y por lo tanto riesgosas para los seres humanos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar tarea de limpieza; determinar las trayectorias de posición angular; la velocidad y aceleración angular, y las fuerzas que actúan al realizar estas tareas.
- Diseñar un robot según los requerimientos del objetivo específico anterior.
- Fabricar y acondicionar el robot para un área de trabajo adaptada a la tarea especificada.

1.4 Hipótesis

- El robot es capaz de limpiar a alta presión un área emulando las trayectorias que realiza una persona durante una tarea de limpieza a alta presión.

1.5 Metodología

La metodología, figura 1.3, que se utiliza para el desarrollo de este proyecto cuenta con cuatro etapas principales:

1. Caracterización de una tarea de limpieza a alta presión, que comprende el análisis de videos de personas desarrollando una tarea de limpieza con chorros de agua. Se realiza un análisis de imágenes a los fotogramas que comprenden cada uno de los videos para obtener las trayectorias de posición generadas, la velocidad a la que se desplazan y la fuerza de repulsión generada durante la tarea. Obteniendo los parámetros principales de diseño.
2. Diseño del robot, que comprende el modelado CAD de una base móvil con tres ruedas (dos actuadas) y de un sistema *pan-tilt* sobre ella. El modelado cinemático de la base móvil, mediante el análisis de un sistema no holonómico, permite obtener las curvas de velocidad de cada actuador de la base para desarrollar trayectorias curvas, y poder girar

por medio de una tracción diferencial. Un análisis de resistencia a la rodadura, mediante un diagrama de cuerpo libre, es necesario para poder obtener el par-torsión mínimo requerido para que la base móvil se puede desplazar sobre una superficie. El análisis estático del robot mediante un diagrama de cuerpo libre y la tercera ley de Newton permite obtener las masas mínimas para que el robot no sea volcado por la fuerza de repulsión en el momento de desarrollar la tarea de limpieza. Con el modelo dinámico, mediante la formulación de Newton-Euler, se obtiene el par-torsión mínimo requerido de los actuadores para que el sistema *pan-tilt* pueda funcionar de manera adecuada.

3. Fabricación del robot, que comprende la adquisición de materiales para la construcción mecánica, adquisición de la electrónica, actuadores e hidrolavadora, así, como la fabricación de tarjetas de potencia para los actuadores. Al fabricar la base móvil y el sistema *pan-tilt* es posible realizar pruebas preliminares de movilidad por separado. Una vez validada la movilidad se ensamblan ambas partes y programan para finalizar el prototipo.
4. Validación experimental, la cual se encuentra compuesta por cuatro etapas. La validación de movilidad del sistema *pan-tilt* permite determinar si el chorro de agua es capaz de llegar a todos los puntos del espacio de trabajo del sistema *pan-tilt*. La validación del modelo cinemático de la base móvil permite determinar si el robot es capaz de seguir la trayectoria de giro preprogramada. La validación de modelo dinámico del sistema *pan-tilt* permite determinar, mediante el consumo de corriente la constante del motor, si el par-torsión mínimo requerido es correcto. Por último, la validación de la tarea de limpieza permite conocer la eficiencia de lavado de una superficie en específico, pudiendo obtener datos de especificación del robot.

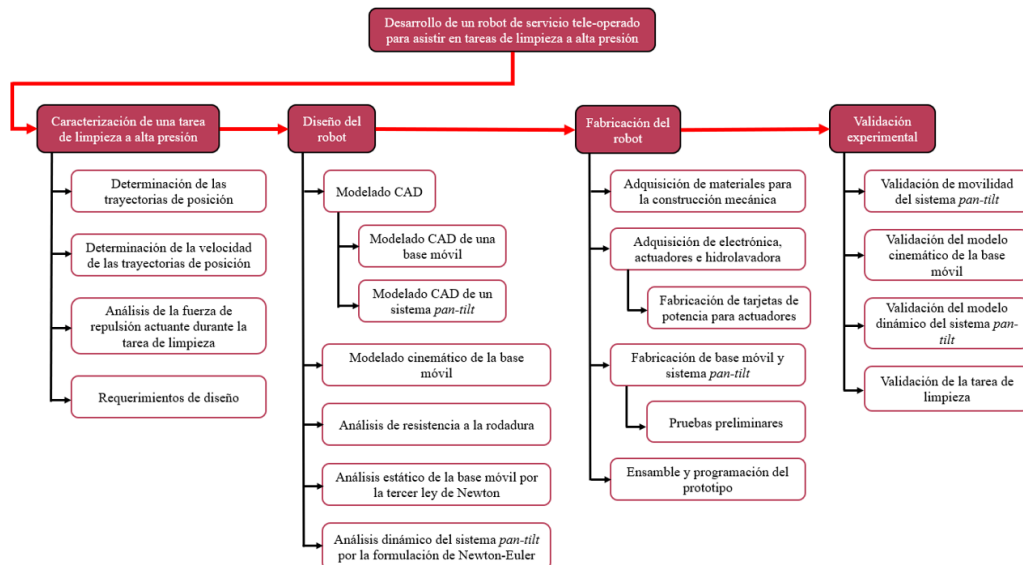


Figura 1.3. Metodología para el desarrollo del proyecto.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

A lo largo de este capítulo se describe el desarrollo existente y esperado en un futuro cercano de los robots de servicio, así como las investigaciones y prototipos que existen actualmente a nivel laboratorio, comercial y de patente. Así mismo, se desarrolla la caracterización de una tarea de limpieza a alta presión.

2.1 Robots de servicio

Un robot de servicio se define como un robot que opera de forma parcial o totalmente autónoma, para realizar servicios útiles para el bienestar de los seres humanos y del equipamiento, excluyendo operaciones de manufactura [7]. De esta manera, existen dos tipos de robots de servicio: doméstico y profesional. Los robots de servicio doméstico se enfocan principalmente en la asistencia al hogar, educación y cuidado de personas. Los robots de servicio profesional se enfocan en áreas como: limpieza profesional, campo o agricultura, milicia, inspección, y construcción [8]. En la figura 2.1 se muestran ambos tipos de robots de servicio.

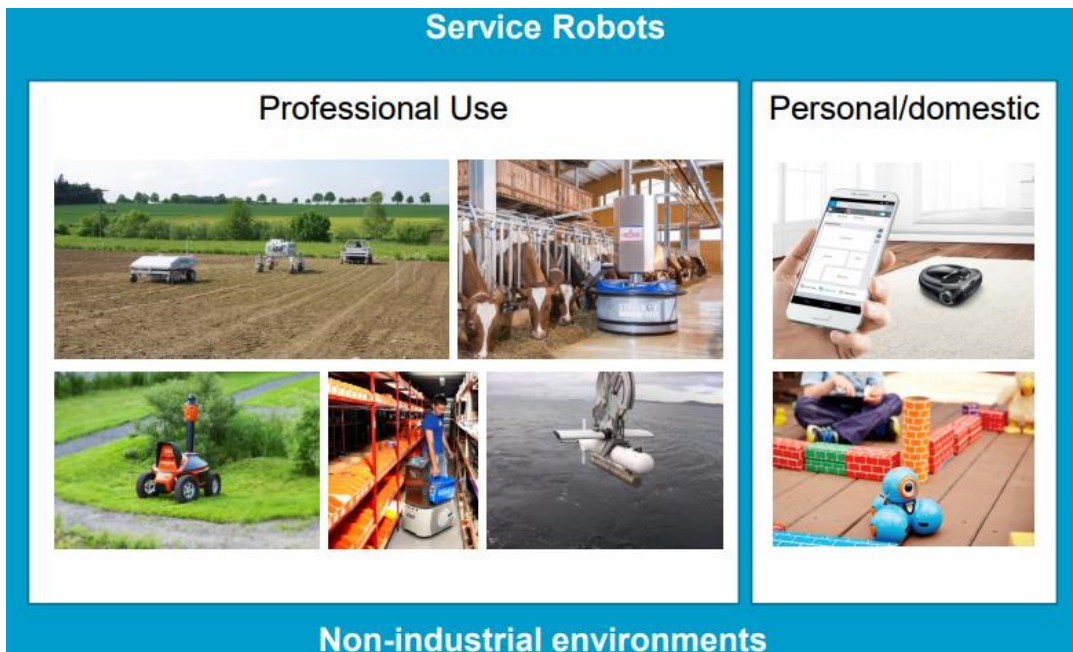


Figura 2.1. Robots de servicio [8].

Los desarrollos principales de la robótica de servicios se encuentran en las aplicaciones de logística, campo y defensa. Estas áreas han tenido un gran avance los últimos años, teniendo grandes ventas y proyecciones estimadas para el año 2020, figura 2.2. Los demás desarrollos se encuentran en las áreas de: relaciones públicas, exosqueletos, medicina, construcción, limpieza, inspección, etc. (figura 2.3). La aplicación con mayor desarrollo y ventas esperadas para el año 2020, teniendo un incremento de más del 800%, es la limpieza profesional, figura 2.4.

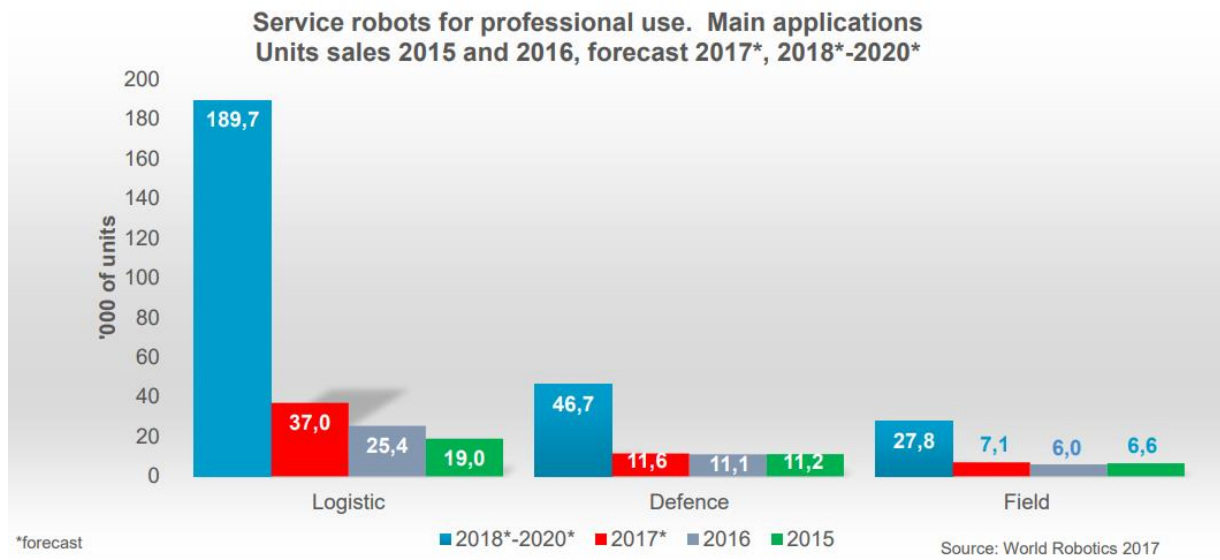


Figura 2.2. Ventas obtenidas de las principales aplicaciones de robots de servicio profesional con proyecciones al año 2020 [8].

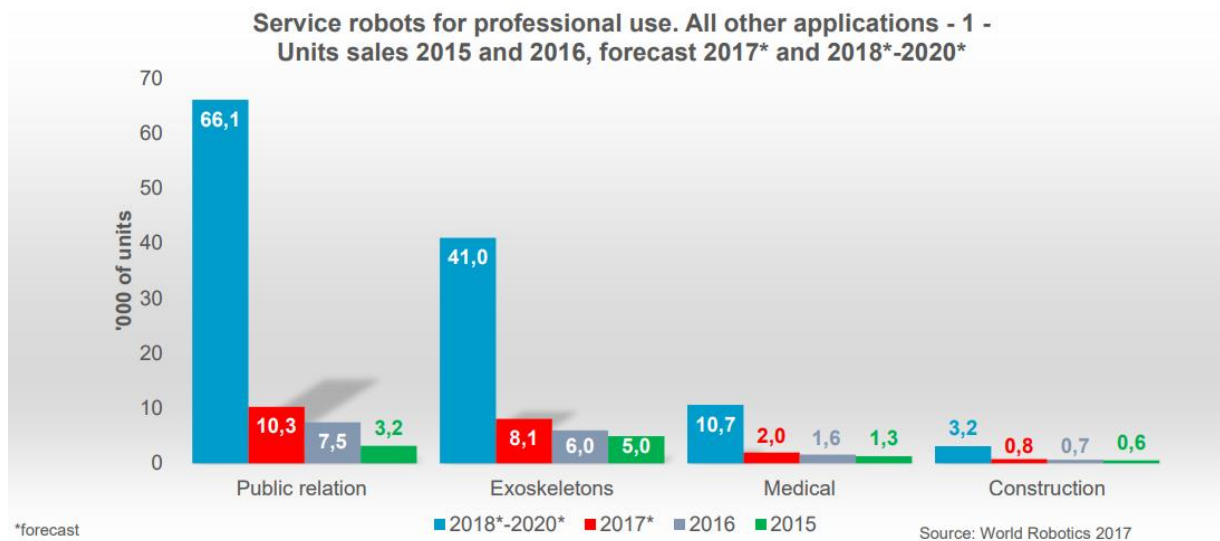


Figura 2.3. Ventas obtenidas de otras aplicaciones (primera parte) de robots de servicio profesional con proyecciones al año 2020 [8].

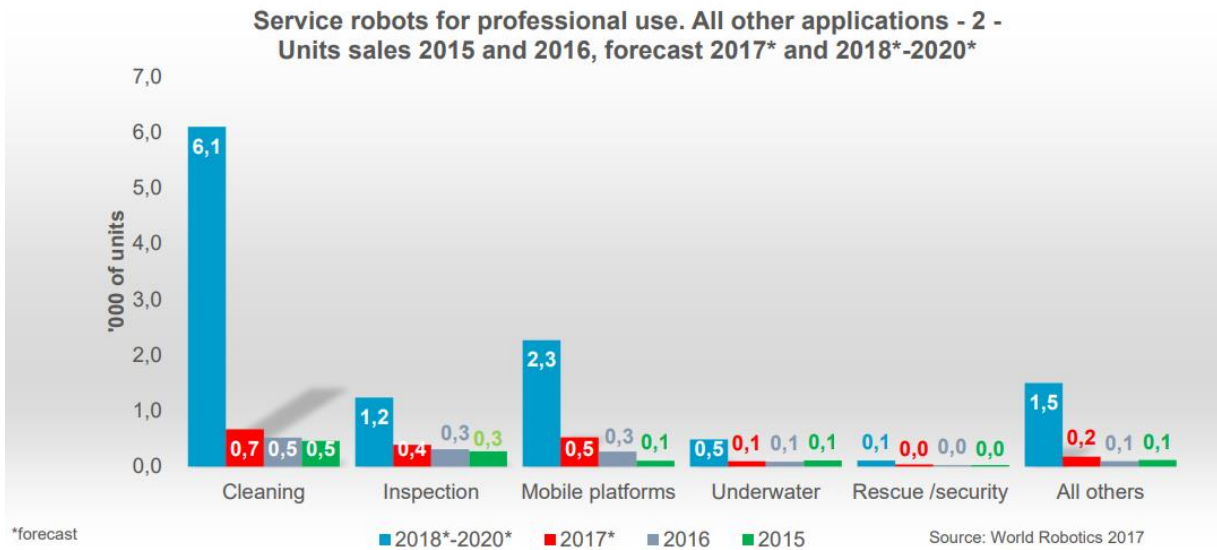


Figura 2.4. Ventas obtenidas de otras aplicaciones (segunda parte) de robots de servicio profesional con proyecciones al año 2020 [8].

2.2 Limpieza a alta presión

La limpieza profesional se puede desarrollar bajo diferentes métodos, como la aplicación de agentes químicos o solventes en áreas u objetos a limpiar, la micro-vibración para retirar el óxido de piezas metálicas, el uso de vapor seco u ondas de ultrasonido para áreas u objetos delicados. Uno de los métodos o aplicaciones más utilizados dentro de la limpieza profesional es la limpieza a alta presión. La limpieza a alta presión es conocida también como hidrolavado, y consta de limpiar un área en específico mediante el impacto de chorros de agua a alta presión, figura 2.5. Se considera agua a alta presión a partir de 70 bar [9-12]. Actualmente existen diferentes desarrollos en esta área.



Figura 2.5. Limpieza a alta presión [13].

2.3 Prototipos desarrollados

Los desarrollos existentes se pueden encontrar en investigaciones y prototipos de nivel laboratorio, comercial y patentes. A nivel laboratorio existen diferentes investigaciones para calcular la efectividad de la limpieza con chorros de agua a alta presión con máquinas de *water-jet* para diferentes tipos de superficies y suciedad, como la investigación presentada en [14], donde realizan diferentes pruebas con una máquina de tres grados de libertad para limpiar y remover la pintura de grafitis sin utilizar ningún tipo de químico o material abrasivo. En [15] y [16] se presenta mayor información numérica respecto a este tipo de limpieza, arrojando datos sobre la efectividad de la limpieza con respecto a la presión, ángulo de impacto y distancia utilizada. En cuanto a prototipos se tienen propuestas como el IPCR (in-pipe cleaning robot) presentado en [17] para realizar tareas de limpieza con agua a alta presión dentro de tuberías. El IPCR cuenta con un cuerpo de prisma triangular con una rueda en el extremo de cada superficie lateral del prisma, figura 2.6a. Las ruedas cuentan con un sistema de resorte para poder ajustarse al diámetro de la tubería, de 1200 a 1500 milímetros. En [18] se presenta un robot, desarrollado por la Universidad Marítima de Korea, para la rehabilitación de tuberías mediante chorros de agua a alta presión, figura 2.6b. Este robot cuenta con un cuerpo seccionado en dos partes y unido por una articulación cardan para poder girar en tuberías con uniones de 90°. Cuenta con dos pares de ruedas en cada sección de su cuerpo, las cuales, junto con la unión cardan, le permiten realizar avances en forma de espiral o de tornillo al interior de la tubería.

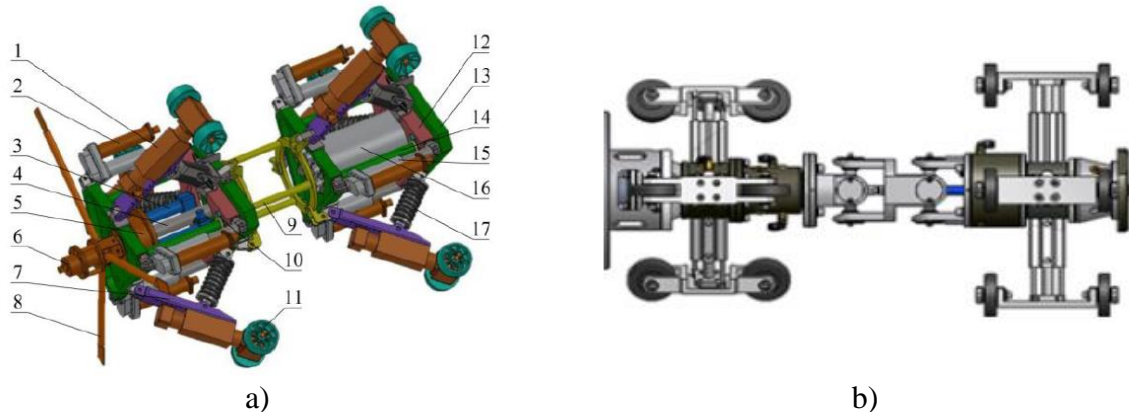
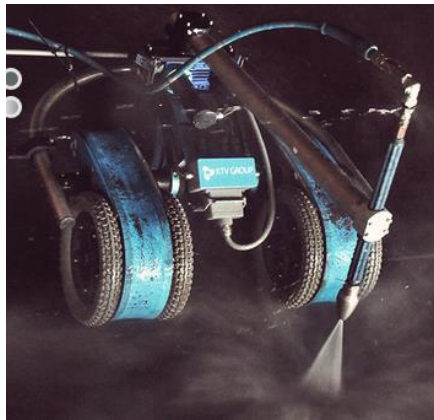


Figura 2.6. Prototipos nivel laboratorio para limpieza a alta presión: a) IPCR [17], b) robot de avance de tornillo [18].

A nivel comercial existen diferentes alternativas y opciones para distintas aplicaciones o ambientes de limpieza industrial. La compañía noruega KTV Group cuenta con dos opciones para el lavado de cascos de buques, el M3 Cleaning Robot y el M4 Vacuum [19]. El M3 Cleaning Robot, figura 2.7a, cuenta con una capacidad máxima de 500 bar de presión de salida, así como la capacidad de adherencia en lugares metálicos verticales debido a que cuenta con dos cintas magnéticas que lo permiten. El M4 Vacuum, figura 2.7b, tiene una capacidad de 3000

bar de presión de salida, cuenta con la misma adherencia que el M3 Cleaning robot, además de un sistema de vacío para succionar el agua sucia durante la tarea de limpieza, ambos robots cuentan con un grado de libertad [19]. La compañía Combijet cuenta con un robot similar a los anteriores, el Combijet RJE100, un robot de limpieza con una base móvil de tres ruedas y un grado de libertad para realizar limpieza a alta presión, figura 2.7c [20]. La empresa Aeronos desarrolla drones para limpieza industrial, figura 2.7d [21]. Estos drones cuentan con una pistola de chorros de agua que está conectada a una hidrolavadora industrial. Dentro de sus principales especificaciones es que pueden realizar limpieza de manera totalmente autónoma o tele-operada. Así mismo cuentan con algoritmos de estabilidad, y un control redundante para mejorar la experiencia y no perder el control en caso de un accidente [21]. Por otro lado, existe también el robot lava-depósitos de Dugar, figura 2.8 [22]. Este robot cuenta con sistema de engranajes en el efector final que le permite realizar un giro de 360° a sus dos boquillas, formando un espacio de trabajo esférico. Este robot ha sido diseñado para la limpieza al interior de depósitos plásticos [22].



a)



b)



c)



d)

Figura 2.7. Robots comerciales para limpieza a alta presión: a) M3 Cleaning Robot [19], b) M4 Vacuum [19], c) Combijet RJE1000 [20], d) Dron de limpieza [21].



Figura 2.8. Robot lava-depósitos de Dugar [22].

En cuanto a patentes, existen diferentes documentos que protegen desde la arquitectura del robot hasta su control o la invención completa, como la patente americana US 9,114,440 B1, “*Outdoor home cleaning robot – system and method*”, protege un método de limpieza y mantenimiento autónomo de una variedad predeterminada de objetos ubicados en un área prescrita, ya sea en interiores o exteriores, utilizando un robot, figura 2.9a, que comprende software o firmware, en el que el robot utiliza baterías para generar electricidad, dispensadores que contienen líquidos para limpiar la variedad de objetos, sensores para reconocer e identificar la variedad de objetos que se deben limpiar o mantener, y motores del conductor para mover un brazo multi-articulado y permitir que el robot se mueva a través de un área prescrita [23].

Por otro lado, la patente internacional WO 2014/207274 A1, “*Cleaning robot for refrigerated chambers and trailers*”, protege a un robot de limpieza, figura 2.9b, para las paredes y techos de un recinto, el cual comprende de un carro móvil para desplazarse a lo largo de dicho recinto, y de un mecanismo hidráulico articulado fijado a dicho carro móvil; dotado de un cabezal de limpieza, el cual puede acceder a la superficie de las paredes y techos a limpiar [24]. La patente americana US 6,215,268 B1, “*Washing robot system for works*”, protege un Sistema robótico de lavado para trabajos, figura 2.9c, el cual comprende de una sala de lavado para evitar que la solución de lavado se extienda mientras se lava una obra e impedir que un trabajador se acerque a ella, de un robot industrial para lavar un área predeterminada formada en la sala de lavado, donde dicha sala de lavado comprende además de un sensor de seguridad para detectar una abertura de alguna de las puertas de la sala de lavado cuando el robot industrial está operando el lavado; cuenta también con un mecanismo de para suministrar la solución de lavado y el aire a una pistola montada en el robot industrial, así como un sistema para transportar el trabajo a la sala de lavado [25].

La patente US 6,565,668 B1, “*Method and device for the cleaning of animal stalls*”, protege un método para limpiar establos de animales por medio de un dispositivo de limpieza automático, figura 2.9d, que tiene un brazo de limpieza móvil, caracterizado porque dicho método comprende los pasos de: colocar el dispositivo en una posición de estacionamiento en la que el brazo de limpieza del dispositivo puede alcanzar una primera jaula a limpiar, para ser limpiada por movimiento del brazo que tiene al menos una boquilla para un fluido de limpieza a alta presión; limpiar dicho primer establo mediante controles de funcionamiento manual para el movimiento del dispositivo, el brazo de limpieza, y el fluido de limpieza a alta presión; además cuenta con la ventaja de programar los ciclos de limpieza mediante grabación de los movimientos, y de ser almacenados en una memoria proporcionada en una unidad de control en dispositivo de limpieza [26].

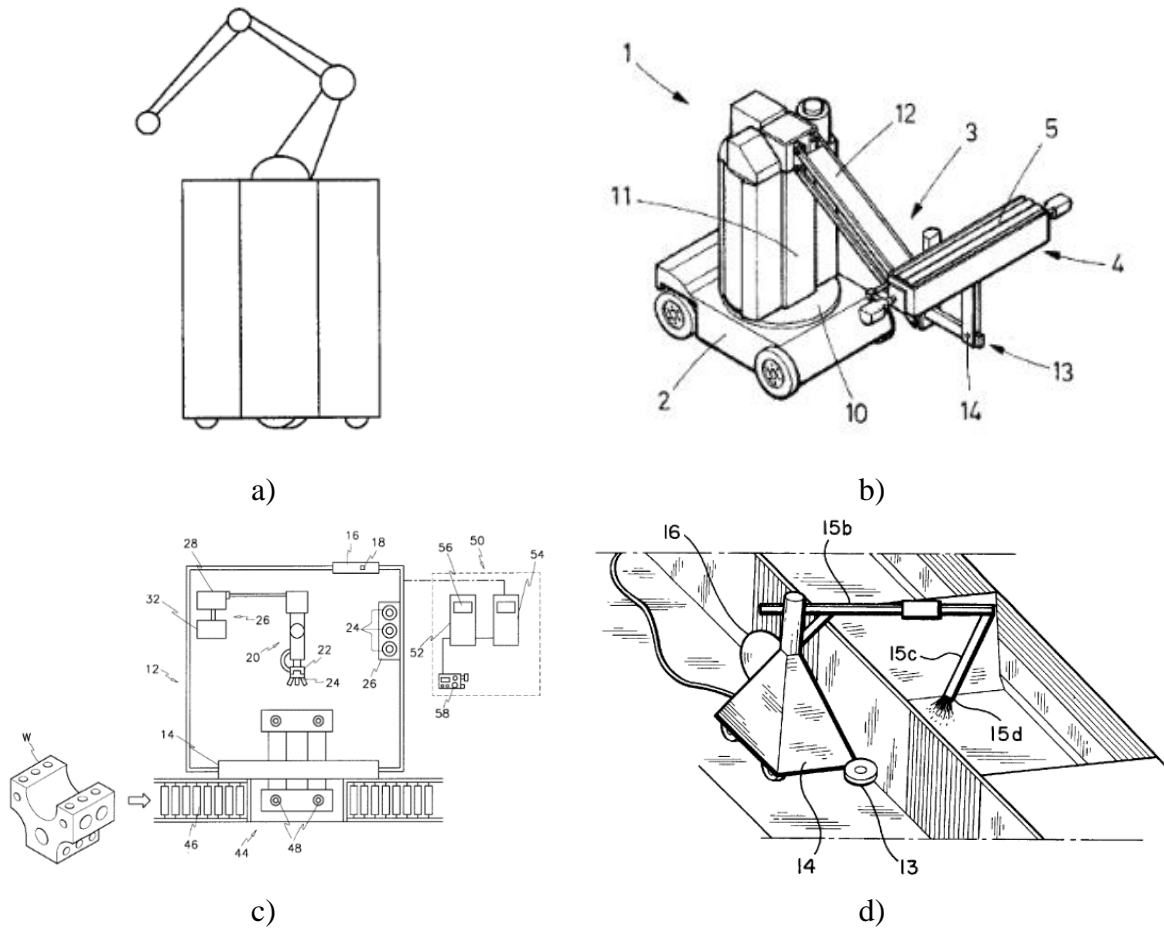


Figura 2.9. Patentes de robots de limpieza a alta presión: a) patente: US 9,114,440 B1, b) patente: WO 2014/207274 A1, c) patente: US 6,215,268 B1, d) patente: US 6,565,668 B1.

2.4 Caracterización de una tarea de limpieza

Para realizar la caracterización de una tarea de limpieza a alta presión es necesario analizar el modo en el que el personal de limpieza desarrolla esta actividad, para ello se obtienen diferentes videos de internet para ser analizados y obtener las trayectorias de posición angular, la velocidad y aceleración angular, y la fuerza que interactúa durante la limpieza. Los videos a analizar son de empresas especializadas que desarrollan limpieza a alta presión en estaciones depuradoras de aguas residuales [27], marcas comerciales de máquinas de hidrolavado [28], así como de limpieza a estructuras dentro de fábricas [29].

La caracterización de una tarea de limpieza a alta presión se realiza mediante la técnica de análisis de imágenes, para ello es necesario primero descomponer los videos en fotogramas y obtener los parámetros de velocidad y fotogramas totales del video. Se crean una nueva imagen de cada tarea de limpieza a partir de los fotogramas obtenidos de cada video, esto para recrear la tarea de limpieza en una sola imagen. Las nuevas imágenes creadas se procesan mediante un software para obtener el desplazamiento angular en cada instante de la tarea de limpieza. De esta manera se obtienen las trayectorias de posición angular década una de las tareas, sus parámetros de velocidad y aceleración angular, así como de fuerza, se obtienen a partir de ecuaciones planteadas.

Con la herramienta “*extract all frames*” del software IrfanView se obtienen los *frames* o fotogramas que integran a cada uno de los videos, así como la cantidad de fotogramas por segundo a los que se reproduce cada uno [30]. Debido a que cada video se encuentra compuesto de más de seiscientos fotogramas, se extraen sólo los fotogramas necesarios para recrear la trayectoria de la tarea de limpieza, tabla 2.1. Estos fotogramas seleccionados se unen en una sola imagen con la herramienta “*Z project*” del software ImageJ [31], figura 2.10. Con la herramienta “*angle*” se obtiene el ángulo α de apertura, del punto Q al punto R respecto al punto P , de cada una de las trayectorias de la figura 2.10.

Tabla 2.1. Datos de las tareas de limpieza a alta presión.

Tarea de limpieza	Fotogramas utilizados	Velocidad del video (fps)
Tarea 1 [27]	8	30
Tarea 2 [28]	33	30
Tarea 3 [29]	50	25
Tarea 4 [29]	8	25

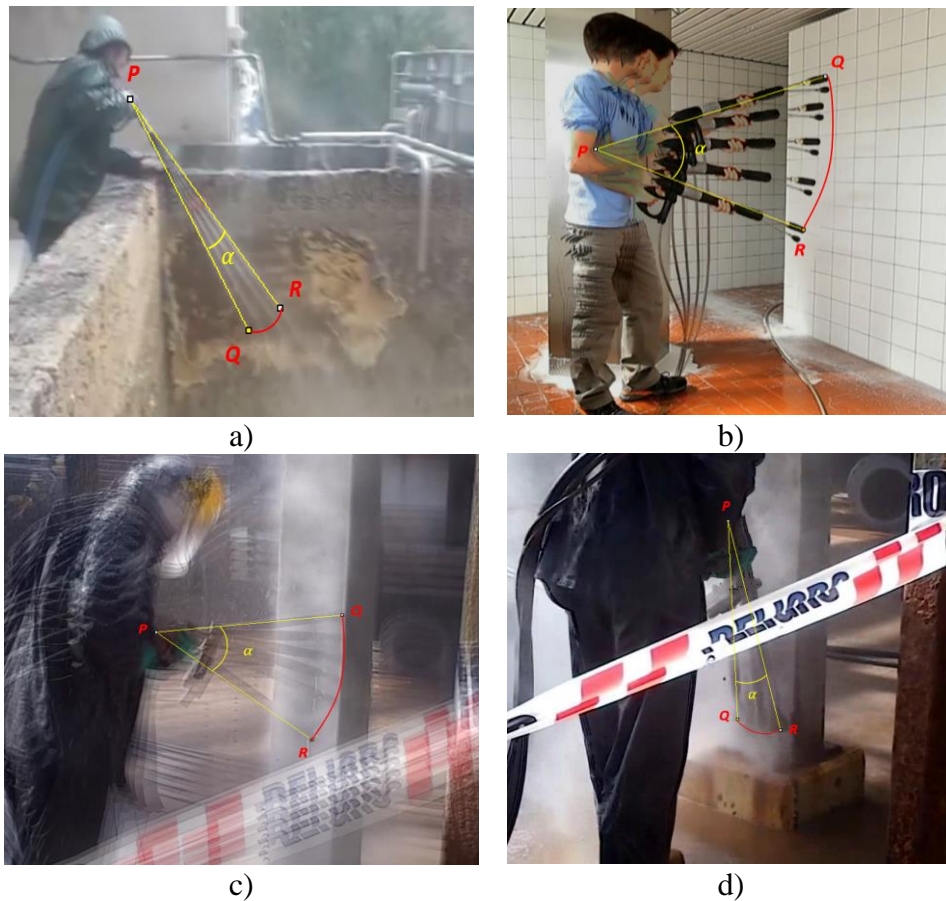


Figura 2.10. Tareas de limpieza a caracterizar: a) limpieza en depuradora de aguas residuales (tarea 1), b) limpieza de demostración de hidrolavadora Karcher (tarea 2), c) limpieza vertical de columna en fabrica (tarea 3), d) limpieza horizontal de columna en fabrica (tarea 3).

La velocidad angular, aceleración angular, aceleración tangencial, y fuerza de cada una de las tareas de la figura anterior se obtienen con las ecuaciones 2.1 a 2.4 [32, 33], respectivamente.

$$\omega = \frac{\alpha}{t} \quad (2.1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_i - \omega_f}{t_i - t_f} \quad (2.2)$$

$$a_t = \frac{\omega_i - \omega_f}{t_i - t_f} r \quad (2.3)$$

$$F = ma_t \tag{2.4}$$

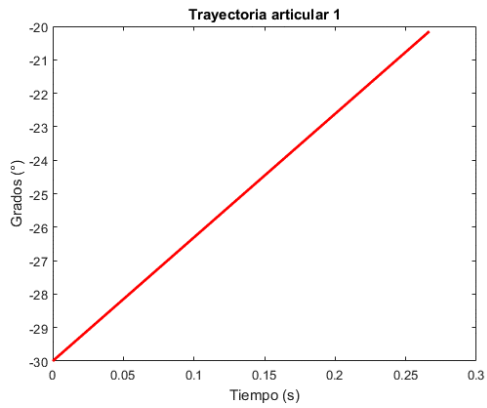
donde ω es la velocidad angular, α es el ángulo de apertura, t es el tiempo que dura la tarea de limpieza, $\dot{\omega}$ es la aceleración angular, ω_i es la velocidad angular inicial (cero en este caso), ω_f es la velocidad angular final (ω), t_i es el tiempo de inicio de la tarea de limpieza (cero en este caso), t_f es el tiempo de fin de la tarea de limpieza (t), a_t es la aceleración tangencial de la tarea, r es el radio de curvatura que es equivalente a la longitud de la pistola de alta presión (0.5 m en promedio), m es la masa de la pistola (0.6 kg en promedio). El tiempo de la tarea de limpieza se obtiene con la ecuación 2.5.

$$t = \frac{\text{fotogramas utilizados}}{\text{fps}} \tag{2.5}$$

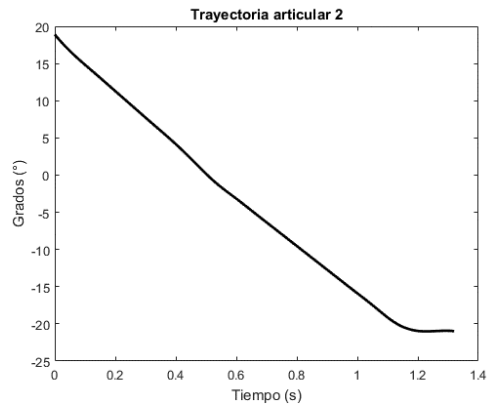
Los parámetros de cada tarea de limpieza se muestran en la tabla 2.2, la fuerza mostrada no considera la fuerza de repulsión del chorro de agua, esta fuerza se considera en el análisis estático del robot en el capítulo 4. Las trayectorias de posición se obtienen a partir de los ángulos de apertura y el tiempo transcurrido en cada tarea de limpieza, figura 2.11. En base a las trayectorias y ángulos de apertura obtenidos, y comparándolos con los parámetros de los robots comerciales, como el Nilfisk Alto, figura 2.12, que cuenta con un ángulo de apertura en su efector final de 90° [34], se define que el sistema pan-tilt a utilizar tiene un ángulo de apertura de 180° en su ángulo *Yaw* y un ángulo de apertura de 90° en *Pitch*.

Tabla 2.2. Parámetros de las tareas de limpieza a alta presión.

Tarea de limpieza	α (°)	Velocidad (°/s)	Aceleración angular (°/s ²)	Aceleración tangencial (m/s ²)	Fuerza (N)
Tarea 1	9.85	36.93	138.51	69.25	41.55
Tarea 2	41.98	31.80	24.09	12.04	7.22
Tarea 3	43.71	26.22	15.73	7.86	4.27
Tarea 4	11.7	43.87	164.53	82.26	49.35



a)



b)

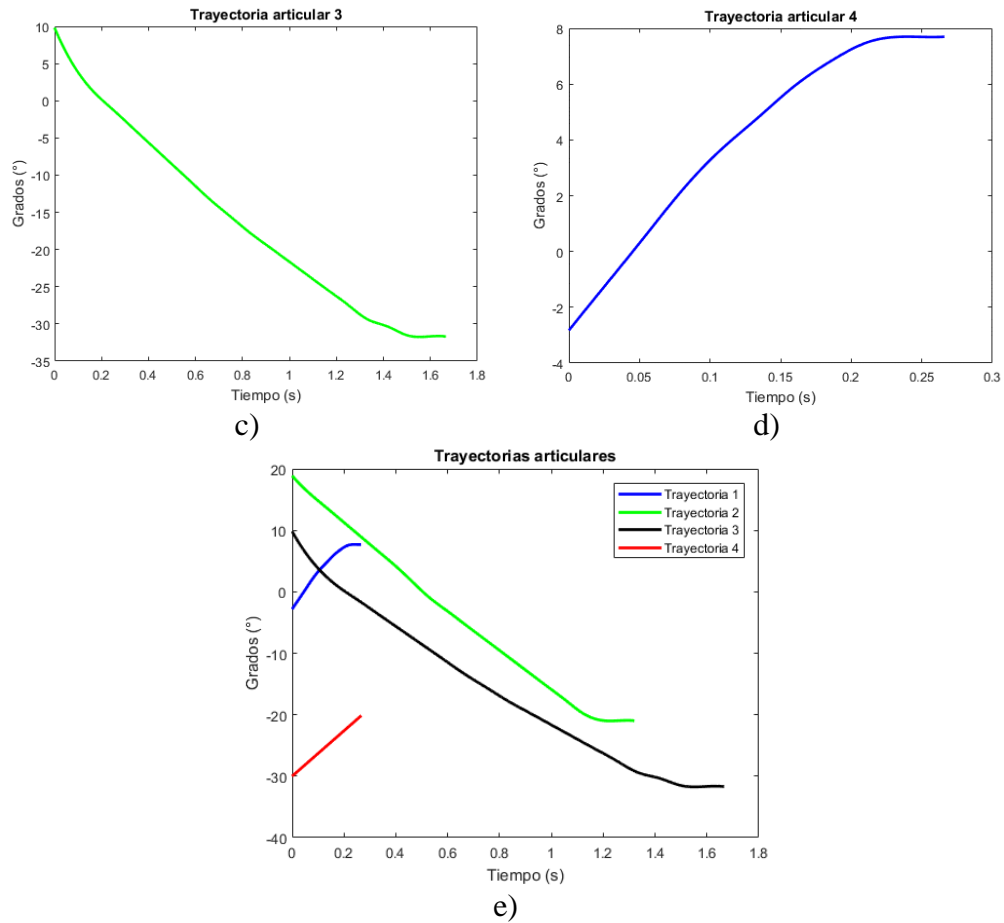


Figura 2.11. Trayectorias de posición angular de las tareas de limpieza: a) tarea 1, b) tarea 2, c) tarea 3, d) tarea 4, e) todas las tareas.

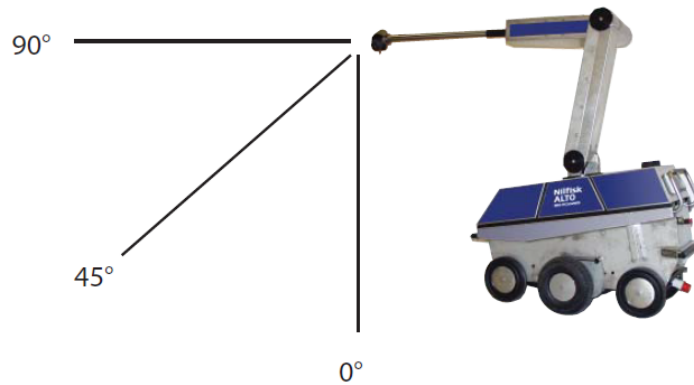


Figura 2.12. Ángulo de apertura del efector final del robot Nilfisk Alto.

CAPÍTULO 3.

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se definen los conceptos básicos acerca de los robots móviles con ruedas; se presentan las herramientas teóricas para realizar el modelado cinemático de un robot con ruedas, y el análisis de resistencia a la rodadura; se incluye el concepto de un diagrama de cuerpo libre para el análisis vectorial de una estructura, así como la convención de Denavit-Hartenberg, y la teoría para realizar el análisis dinámico de un robot a partir de la formulación de Newton-Euler. Por último, se describe el control de velocidad para un motor de corriente directa.

3.1 Robots móviles

El desarrollo de robots móviles responde a la necesidad de ampliar o mejorar el campo de aplicación de la robótica, restringido inicialmente al alcance de una estructura mecánica anclada desde uno de sus extremos [35]. Existen diversos avances en los últimos años, tanto en el diseño de locomoción como en el sistema de control, esto último da origen a tres principales grupos en los que se pueden clasificar los robots móviles [36]:

- Robots de funcionamiento repetitivo, estos trabajan realizando tareas invariantes y repetitivas con una limitada percepción de las variables del entorno, este tipo de robots son relativamente rápidos y de alta repetitividad. Esta clase de robots pretende ahorrar costos en mano de obra, mejorar la productividad y realizar tareas peligrosas para trabajadores humanos [37].
- Robots tele-operados, diseñados para ser manipulados por un operador con cierto grado de automatización, es decir, el operador cierra un bucle de control. En robots tele-operados con sistema de manipulación se emplean brazos y manos antropomórficas con sistemas automáticos que facilitan el sistema de manipulación por parte del operador. Este tipo de robots es usado para realizar tareas a distancia donde el acceso es difícil o en ambientes contaminantes o peligrosos [36].
- Robots autónomos o inteligentes, son máquinas capaces de percibir y analizar información del entorno para la toma de decisiones, pueden trabajar en entornos poco estructurados y dinámicos. En los últimos años se han hecho importantes esfuerzos en la aplicación de técnicas de inteligencia artificial empleando diferentes técnicas que su

única limitación es la capacidad de procesamiento requerida para el tratamiento de la información en tiempo real [35].

Los robots móviles terrestres también pueden ser clasificados en base a su tipo de locomoción, de tipo oruga, con ruedas, y con patas. Cada uno de los tipos de locomoción cuenta con ventajas y desventajas dependiendo del tipo de terreno por el que se desplace. Los robots de tipo oruga, figura 3.1a, tienen unida la rueda delantera con la rueda trasera y su ventaja principal es que brindan una mayor adherencia al terreno y ofrecen una mayor adaptabilidad a terrenos irregulares; su desventaja principal es que no pueden realizar trayectorias curvas debido a la naturaleza de su tracción [38].

Los robots con ruedas, figura 3.1b, cuentan con ruedas en su sistema de tracción, y su principal ventaja es la facilidad de construcción y programación que tienen, además que puede desplazarse a velocidades mayores que con orugas o patas. Su principal desventaja es que no pueden pasar por encima de obstáculos o de un tamaño superior al radio de sus ruedas [39].

Por otro lado, los robots con patas, figura 3.1c, son el resultado del enfoque bio-inspirado que ha tomado el desarrollo en la robótica, este tipo de locomoción tiene como ventaja la adaptabilidad al desplazarse en terrenos irregulares; según el número de patas que tiene el robot, se puede denominar bípedo, cuadrúpedo, hexápodo u octópodo. Cada pata del robot puede contar diferentes grados de libertad, aumentando la complejidad de la programación de la rutina de desplazamiento [40].

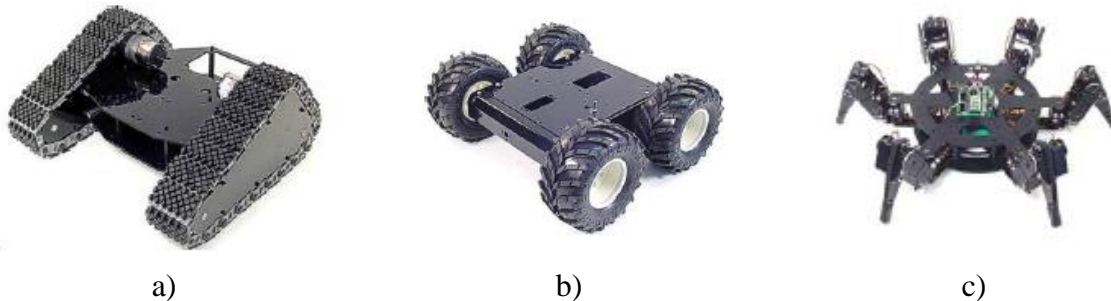


Figura 3.1. Tipos de locomoción terrestre de robots móviles: a) tipo oruga [40], b) con ruedas [40], c) con patas [40].

3.1.1 Vehículos con ruedas

Los vehículos con ruedas resultan la solución más simple y eficiente para conseguir la movilidad necesaria en terrenos suficientemente duros y libres de obstáculos, pudiendo obtener velocidades relativamente altas. Como limitación más significativa se tiene el deslizamiento en la impulsión, este debido a la fricción existente entre el terreno y las ruedas [35]. Además, los

robots móviles con ruedas (RMR) presentan problemas cuando las ruedas no pueden salvar o sobrepasar grandes obstáculos, por lo cual se debe considerar el radio de las llantas en el diseño del robot [41]. Sin embargo, las necesidades actuales en la robótica industrial y de servicios, han permitido el surgimiento o desarrollo de nuevos robots móviles con ruedas que incorporan un brazo manipulador en su parte superior, conocidos como *manipuladores móviles*. Esto les permite trabajar en diferentes aplicaciones, como soldar, pintar, limpiar a alta presión, o inspeccionar en lugares de difícil acceso [42-44]. El desarrollo de este tipo de robots se presenta a nivel laboratorio y comercial.

A nivel laboratorio se cuenta con el robot “*Little Helper*”, figura 3.2a, de la universidad de Aalborg, el cual cuenta con una plataforma móvil con un manipulador serial de seis grados de libertad, un sistema sensorial de visión, así como un sistema multi herramienta para cambiar el efector final del manipulador dependiendo de la tarea a realizar [45]. El concepto de este robot es poder desarrollar o ayudar en diferentes tareas dentro de la industria. Por otro lado, se presenta en [46] la plataforma móvil Pioneer P3-DX con un brazo manipulador de cinco grados de libertad, figura 3.2b, para desarrollar tareas de ensamble y desensamble en una línea mecatrónica de producción, tele-operado por *Wi-Fi* a través de una interfaz gráfica en LabVIEW.

A nivel comercial se encuentra el robot “RB-1”, figura 3.2c, un robot manipulador autónomo para el desarrollo de aplicaciones dentro de casa. Este robot cuenta con una base móvil circular y un manipulador de 12 grados de libertad, así como un sensor RGBD en su base para la detección de objetos y su profundidad, y una interfaz HMI para su control [47].

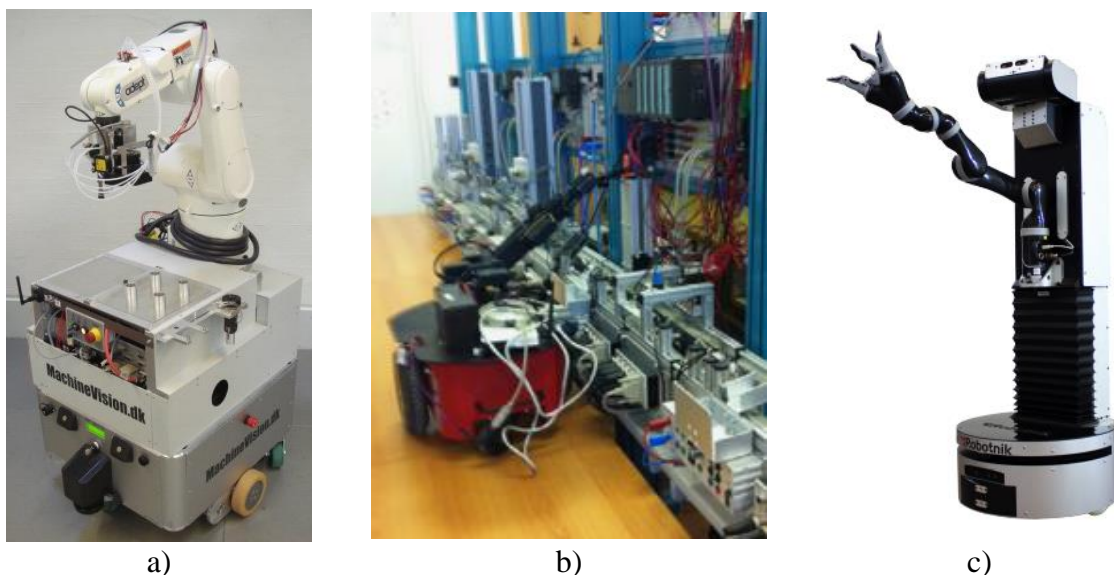


Figura 3.2. Manipuladores móviles: a) robot *Little Helper* [45], b) robot para ensamble/desensamble [46], c) robot RB-1 [47].

3.1.2 Tipos de locomoción en RMR

Los RMR emplean diferentes tipos de locomoción que les permiten tener ciertas características y propiedades diferentes respecto a la eficiencia energética, dimensiones, cargas útiles y maniobrabilidad. Existen seis configuraciones básicas diferentes de locomoción para RMR [35, 48]. La configuración Ackerman es la más utilizada en vehículos de cuatro ruedas convencionales, figura 3.3a. Las ruedas delanteras de manera paralela y simultánea a través de un eje que conecta ambas ruedas, mientras que las ruedas traseras son actuadas [49]. El triciclo clásico es un sistema de locomoción que cuenta con tres ruedas posicionadas en forma triangular, figura 3.3b. La rueda delantera sirve tanto para la tracción como para el direccionamiento del robot. El eje trasero, que cuenta con dos ruedas laterales, es pasivo y sus ruedas se mueven libremente [50]. La tracción diferencial direcciona al robot a través de la diferencia de velocidades de las ruedas laterales, las cuales se encargan de dar la tracción necesaria para mover al robot, figura 3.3c. Adicionalmente existen una o más ruedas de soporte (pasivas) con movimiento libre [35]. La locomoción *skid steer* cuenta con varias ruedas en cada lado del vehículo que actúan de forma simultánea, figura 3.3d. El movimiento es el resultado de combinar las velocidades de las ruedas izquierdas con las ruedas derechas [51]. La tracción síncrona consiste en la actuación simultánea de todas las ruedas, que giran de forma síncrona, figura 3.3e. La transmisión se consigue mediante coronas de engranajes o con bandas concéntricas [35]. Por último, la tracción omnidireccional emplea ruedas espaciales, tales como las denominadas “ruedas suecas”, que permiten conseguir el movimiento omnidireccional de un vehículo [35].

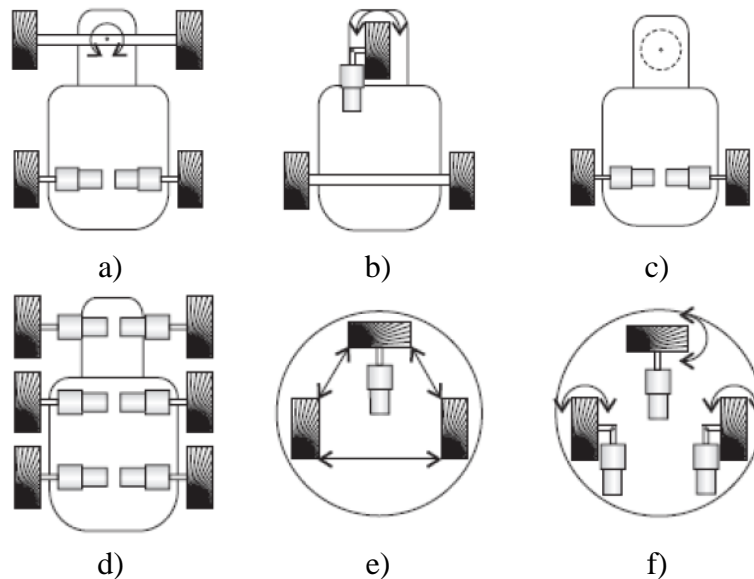


Figura 3.3. Tipos de locomoción de robots móviles con ruedas [35]: a) ackerman, b) triciclo clásico, c) tracción diferencial, d) *skid steer*, e) tracción síncrona, f) tracción omnidireccional.

3.2 Modelo cinemático de un RMR

El modelado cinemático de un robot permite la configuración del robot en su área de trabajo, relacionando sus parámetros geométricos y las restricciones impuestas en sus trayectorias. En el caso de un robot móvil con ruedas, el modelado cinemático permite conocer las curvas de velocidad para que la base móvil pueda seguir una trayectoria a partir de conocer la velocidad angular deseada del robot. Para realizar el modelado cinemático de un RMR se tienen diferentes consideraciones y restricciones que tomar, ya que por naturaleza los RMR son sistemas no holónomos [50].

Los sistemas no holónomos dependen de la velocidad. Además, para que una restricción sea no holónoma se exige que no sea integrable; es decir, que no se deduzca por derivación total con respecto al tiempo de una holónoma. En el caso de los robots móviles existen numerosas relaciones no holónomas entre las coordenadas en el espacio de los actuadores y las coordenadas en el espacio cartesiano. El claro ejemplo de esto es el estudio del movimiento de la rueda en el plano, como se muestra en la figura 3.4, en donde se muestran restricciones no holónomas [35, 50].

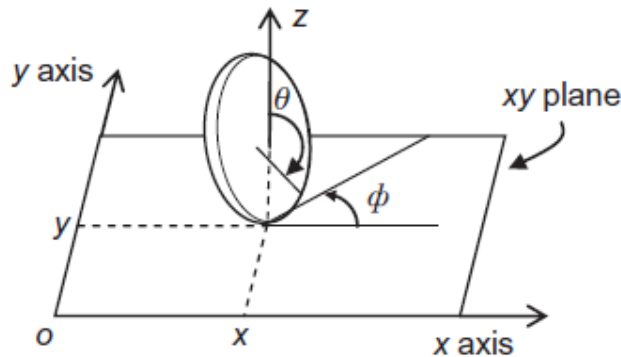


Figura 3.4. Movimiento de una rueda en el plano [50].

Si se considera el movimiento de la rueda de forma que el diámetro correspondiente al punto de contacto con el suelo está siempre en posición vertical, pueden emplearse cuatro coordenadas para especificar completamente la posición y orientación de la rueda: las coordenadas (x, y) del punto de contacto, el ángulo θ entre la vertical y un radio de referencia, el cual indica cuanto ha girado la rueda, y el ángulo de orientación ϕ de la rueda [35]. La condición de rodadura sin deslizamiento introduce dos restricciones, ya que el espacio que el punto de contacto recorre sobre el borde de la rueda es igual al que recorre en el plano. Por consiguiente, proyectando la velocidad del punto de contacto en el plano, paralela y perpendicularmente a la rueda, se obtiene:

$$-x \sin \phi + y \cos \phi = \theta r \quad (3.1)$$

$$x \cos \phi + y \sin \phi = 0 \quad (3.2)$$

Ambas restricciones no son integrables, no se pueden obtener como las derivadas de dos condiciones holónomas. Por tanto, no se pueden obtener relaciones funcionales entre las variables (x, y, θ, ϕ) a partir de las expresiones anteriores. Considerando valores de inicio $(x_0, y_0, \theta_0, \phi_0)$, haciendo rodar la rueda sin deslizar y girándola alrededor del eje vertical, es posible llegar a cualquier otra configuración final con valores $(x_f, y_f, \theta_f, \phi_f)$; lo cual implica que no existe una relación funcional entre estos valores. Sin embargo, las direcciones de movimiento deben satisfacer las ecuaciones anteriores y, por tanto, el camino no puede ser cualquiera [35].

3.3 Resistencia a la rodadura

Cuando una rueda gira sobre una superficie flexible, encuentra una resistencia al movimiento, debido a que la superficie inmediatamente adelante se está deformando. A este fenómeno se le denomina resistencia a la rodadura. En la figura 3.5 se muestra una rueda con una carga vertical W y una fuerza P horizontal que causa que el centro de la rueda pueda moverse con una velocidad constante.

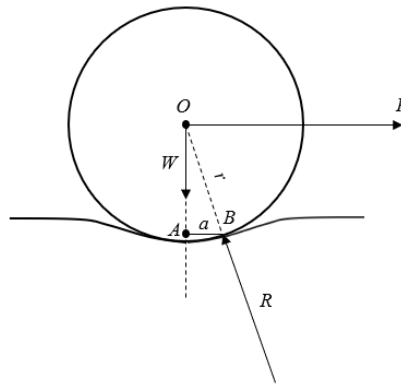


Figura 3.5. Rodadura de una rueda sobre una superficie deformable.

Ya que la superficie sobre la cual gira la rueda se deforma bajo la rueda, la presión entre la rueda y la superficie se distribuye sobre el área de contacto. La presión resultante o de reacción de la superficie en la rueda pasa a través del punto B en el área de contacto, como se muestra en la figura 3.5. Debido a que la velocidad de la rueda es constante, las tres fuerzas que actúan sobre ella están en equilibrio, por lo tanto, la reacción R de la superficie en la rueda, debe pasar a través del centro de la rueda, O . Lo anterior genera los siguientes momentos en B .

$$\sum M_B = W \times AB - P \times OA = 0 \quad (3.3)$$

Dado que la deformación suele ser pequeña, OA es aproximadamente iguala a r , el radio de la ruda. De esta manera, se puede obtener el valor de P como:

$$P = \frac{Wa}{r} \quad (3.4)$$

Por lo tanto, la fuerza P es igual a la componente horizontal de la reacción R y es llamada fricción de rodadura o resistencia a la rodadura; la distancia a es llamada coeficiente de resistencia a la rodadura. Debido a que a es una cantidad cercana y no un número puro, no es verdaderamente un coeficiente, por lo que Coulomb asume que el coeficiente de resistencia a la rodadura es independiente del radio de la rueda. De acuerdo con Coulomb y Goodman en [52], los coeficientes de resistencia a la rodadura según el tipo de rueda y superficie se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Coeficientes de resistencia a la rodadura.

	a (pulgadas)
Acero en acero	0.007 a 0.015
Acero en madera	0.06 a 0.10
Acero en suelo blando	3.0 a 5.0
Ruedas neumáticas en suelo firme	0.02 a 0.022
Ruedas neumáticas en suelo lodoso	0.04 a 0.06
Rueda de caucho sólido en suelo firme	0.04
Rueda de caucho sólido en suelo lodoso	0.09 a 0.11

3.4 Diagrama de cuerpo libre

Los métodos de análisis mecánico vectorial se aplican a un sistema de fuerzas que actúan sobre una partícula. Un gran número de problemas que tratan de estructuras pueden reducirse a problemas concernientes al equilibrio de una partícula. Esto se hace escogiendo una partícula significativa y dibujando un diagrama separado que muestra a ésta y a todas las fuerzas que actúan sobre ella. A este diagrama se le conoce como diagrama de cuerpo libre [32].

3.5 Convención de Denavit-Hartenberg

La convención de Denavit-Hartenberg es un método sistemático que permite describir la estructura cinemática de una cadena articulada constituida por articulaciones con un solo grado de libertad. La aplicación de este método requiere de la descripción geométrica de los eslabones, desde el eslabón base hasta el efector final; para ello se considera que un eslabón i tiene una articulación i en su extremo proximal, y una articulación $i+1$ en su extremo distal, como se

muestra en la figura 3.6 [53]. De acuerdo con Denavit y Hartenberg, se requiere de la especificación de cuatro parámetros, figura 3.6, los cuales se describen en la tabla 3.2.

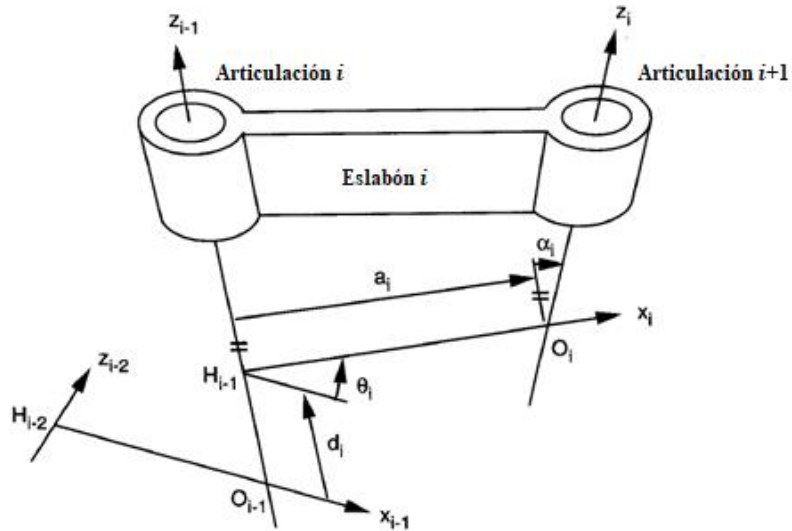


Figura 3.6. Definición de los parámetros de un eslabón [53].

Tabla 3.2. Definición de los parámetros de Denavit-Hartenberg.

Parámetro	Definición
a_i	Distancia entre dos ejes de articulaciones adyacentes
d_i	Distancia de traslación entre dos normales incidentes de un eje de articulación
α_i	Ángulo de giro entre dos ejes de articulación adyacente
θ_i	Ángulo de articulación entre dos normales incidentes de un eje de articulación

Cada uno de los parámetros de Denavit-Hartenberg se puede tratar como una matriz de transformación homogénea, a lo cual, el parámetro a_i corresponde a la matriz de traslación sobre el eje x ; d_i corresponde a la matriz de traslación sobre el eje z ; α_i corresponde a la matriz de rotación sobre el eje x ; y θ_i a la matriz de rotación sobre el eje z . De esta manera, al multiplicar las cuatro matrices de transformación homogénea se obtiene

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

El procedimiento para asignar sistemas de coordenadas a los eslabones de una cadena cinemática abierta, cuyo eslabón base y efector final se denotan como 0 y n , respectivamente, consiste en [53]:

1. Numerar los eslabones, iniciando de la base, y articulaciones secuencialmente. La base se numera como eslabón 0 y el último eslabón es el efector final. Excepto para la base y efector final, cada eslabón contiene dos articulaciones. La articulación i conecta con el eslabón i y con el eslabón $i-1$.
2. Dibujar las normales comunes cada dos ejes de articulaciones adyacentes. Excepto para los ejes de la primer y última articulación. Cada eje de articulación debe tener dos normales comunes incidentes, una con el eje de articulación $i-1$, y otra con el eje de articulación $i+1$.
3. Establecer el sistema coordenado base, donde el eje z_0 se encuentre alineado con el eje de la primera articulación, el eje x_0 es perpendicular al eje z_0 , y el eje y_0 es determinado por la regla de la mano derecha.
4. Establecer el sistema coordenado n , donde el eje x_n es perpendicular al eje de la última articulación. El eje z_n usualmente se establece en dirección del eje del efector final.
5. Adjuntar el sistema coordenado cartesiano al final distal de todos los demás eslabones de la siguiente manera:
 - 5.1. El eje z_i se alinea con eje $i+1$ de la articulación.
 - 5.2. El eje x_i se define a lo largo de la normal común entre los ejes de las articulaciones i e $i+1$, con dirección del eje de la articulación i a la articulación $i+1$. Si los ejes de las articulaciones son paralelos, el eje x_i puede ser definir de manera perpendicular a cualquiera de los dos ejes de articulación.
 - 5.3. El eje y_i se define de acuerdo con la regla de la mano derecha.
6. Determinar los parámetros del eslabón y las variables de las articulaciones, a_i , α_i , θ_i y d_i .

3.6 Análisis dinámico de un robot

La dinámica es la rama de la física que estudia la relación que existe entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y el movimiento que en éste se origina [54, 55]. El análisis dinámico de un robot se puede estudiar desde dos perspectivas diferentes, el problema dinámico directo y el problema dinámico inverso.

El problema dinámico directo permite calcular como se moverá el robot bajo la aplicación de un conjunto de momentos de torsión de articulación, lo cual permite conocer la respuesta de

robot en posición, velocidad y aceleración. Por otro lado, el problema dinámico inverso permite encontrar el vector requerido de momentos de torsión de articulación para que este puede seguir una trayectoria en posición, velocidad y aceleración.

Los métodos más utilizados para obtener el modelo dinámico de un robot son: la formulación de Newton-Euler y la formulación de Euler-Lagrange [56]. Ambas formulaciones producen conjuntos de ecuaciones equivalentes, la evaluación de ambos conjuntos produce el mismo resultado numérico a pesar de que la deducción de las ecuaciones de movimiento se realiza de distinta manera [55]. La formulación de Newton-Euler plantea las ecuaciones de movimiento de los eslabones del robot a partir de las fuerzas y pares que se aplican sobre ellos, mientras que la formulación de Euler-Lagrange determina las ecuaciones a partir de la diferencia entre la energía cinética y potencial del robot.

3.6.1 Formulación de Newton-Euler

La formulación de Newton-Euler considera que, en cada instante, el movimiento de n cuerpo se compone de la traslación de su centro de masa y de la rotación alrededor de este punto [57, 55]. La fuerza resultante que produce la traslación del cuerpo se calcula mediante la segunda ley de Newton, mientras que el par que produce la rotación del cuerpo se calcula mediante la ecuación de Euler [55, 58, 59]:

$$F = ma \quad (3.6)$$

$$N = I\dot{\omega} + \omega \times I\omega \quad (3.7)$$

donde a es la aceleración lineal del centro de masa del cuerpo, I es su tensor de inercia con respecto a un sistema de coordenadas, cuyo origen coincide con el centro de masa del cuerpo, $\dot{\omega}$ es su aceleración angular y ω su velocidad angular.

3.6.2 Algoritmo recursivo de Newton-Euler

El algoritmo recursivo de Newton-Euler (ARNE) se utiliza para calcular las fuerzas y/o pares de los actuadores de un robot que son necesarios para producir un conjunto de trayectorias articulares deseadas. Cada trayectoria articular está definida por una función de posición angular, $\theta(t)$, una función de velocidad angular, $\dot{\theta}(t)$, y una función de aceleración angular, $\ddot{\theta}(t)$.

El algoritmo se divide en dos partes, un cálculo progresivo y un cálculo regresivo. El cálculo progresivo permite calcular la velocidad y aceleración de cada eslabón a partir de la velocidad y aceleración del eslabón anterior. El cálculo regresivo permite obtener la fuerza o par requerido para que el actuador pueda producir el movimiento de cada eslabón, a partir de la fuerza y el par que actúan en el eslabón adyacente. El ARNE está compuesto por las siguientes ecuaciones [58]:

Iteraciones salientes:

$${}^{i+1}w_{i+1} = {}^{i+1}_i R^i w_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (3.8)$$

$${}^{i+1}\dot{w}_{i+1} = {}^{i+1}_i R^i \dot{w}_i + {}^{i+1}_i R^i w_i \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (3.9)$$

$${}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = {}^{i+1}_i R \left[{}^i \dot{w}_i \times {}^i P_{i+1} + {}^i w_i \times \left({}^i w_i \times {}^i P_{i+1} \right) + {}^i \dot{v}_i \right] \quad (3.10)$$

$${}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} = {}^{i+1}\dot{w}_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}} + {}^{i+1}w_{i+1} \times \left({}^{i+1}w_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}} \right) + {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} \quad (3.11)$$

$${}^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1} + {}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} \quad (3.12)$$

$${}^{i+1}N_{i+1} = C_{i+1} I_{i+1} {}^{i+1}\dot{w}_{i+1} + {}^{i+1}w_{i+1} \times C_{i+1} I_{i+1} {}^{i+1}w_{i+1} \quad (3.13)$$

Iteraciones entrantes:

$${}^i f_i = {}_{i+1} R^{i+1} f_{i+1} + {}^i F_i \quad (3.14)$$

$${}^i n_i = {}^i N_i + {}_{i+1} R^{i+1} n_{i+1} + {}^i P_{C_i} \times {}^i F_i + {}^i P_{i+1} \times {}_{i+1} R^{i+1} f_{i+1} \quad (3.15)$$

A partir de las iteraciones entrantes se define al par requerido como:

$$\tau_i = {}^i n_i^T {}^i \hat{Z}_1 \quad (3.16)$$

En la tabla 3.3 se proporciona una breve descripción de los términos que conforman las ecuaciones 3.8 a 3.16. Los parámetros se expresan con respecto al sistema de coordenadas que indica el superíndice.

Tabla 3.3. Descripción de los parámetros del ARNE.

Parámetro	Descripción
${}^{i+1}\omega_{i+1}$	Velocidad angular del eslabón $i+1$ expresada en el sistema de coordenadas $i+1$.
${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1}$	Aceleración angular del eslabón $i+1$ expresada en el sistema de coordenadas $i+1$.
${}^{i+1}\dot{v}_{i+1}$	Aceleración lineal del origen del sistema de coordenadas $i+1$ expresada en el sistema de coordenadas $i+1$; este sistema de coordenada se encuentra adjunto al eslabón $i+1$.
${}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}}$	Aceleración del centro de masa del eslabón $i+1$ expresada en el sistema de coordenadas $i+1$.
${}^{i+1}F_{i+1}$	Fuerza que produce la aceleración del centro de masa del eslabón $i+1$ expresada en el sistema de coordenadas $i+1$.
${}^{i+1}N_{i+1}$	Par que producen la aceleración y velocidad angular del eslabón $i+1$ expresado en el sistema de coordenadas $i+1$.
${}^i f_i$	Fuerza que el eslabón $i-1$ ejerce sobre el eslabón i expresada en el sistema de coordenadas i .
${}^i n_i$	Par que el eslabón $i-1$ ejerce sobre el eslabón i expresado en el sistema de coordenadas i .
${}^{i+1}{}_i R$	Matriz de rotación que describe la orientación del sistema de coordenadas i relativa al sistema de coordenadas $i+1$.
${}^{i+1}Z_{i+1}$	Vector Z del sistema de coordenadas $i+1$ expresado en el sistema de coordenadas $i+1$.
${}^i O_{i+1}$	Vector de posición del origen del sistema de coordenadas $i+1$ relativo al sistema de coordenadas i .
${}^{i+1}C_{i+1}$	Valor de posición del centro de masa del eslabón $i+1$ expresado en el sistema de coordenadas $i+1$.
${}^{C_{i+1}}I_{i+1}$	Tensor de inercia del eslabón $i+1$ con respecto a un sistema de coordenadas adjunto al centro de masa del eslabón, cuya orientación es igual a la orientación del sistema de coordenadas $i+1$.
$\dot{\theta}_{i+1}$	Velocidad angular de la articulación $i+1$.
$\ddot{\theta}_{i+1}$	Aceleración angular de la articulación $i+1$.
τ_i	Par requerido en la articulación i .

3.7 Control de velocidad de un motor de CD

El método más común de control de velocidad de un motor de corriente directa (CD) se conoce como PWM (*Pulse-Width Modulation*) o modulación por ancho de pulso. La regulación por ancho de pulso se basa en el suministro de corriente directa de alimentación en forma de una onda cuadrada, la energía que recibe el motor disminuye de manera proporcional a la relación entre la parte alta (tiempo con energía) y la parte en baja (tiempo sin energía) del ciclo

de la onda cuadrada, figura 3.7. Controlando esta relación se logra variar la velocidad del motor de una manera bastante aceptable [60].

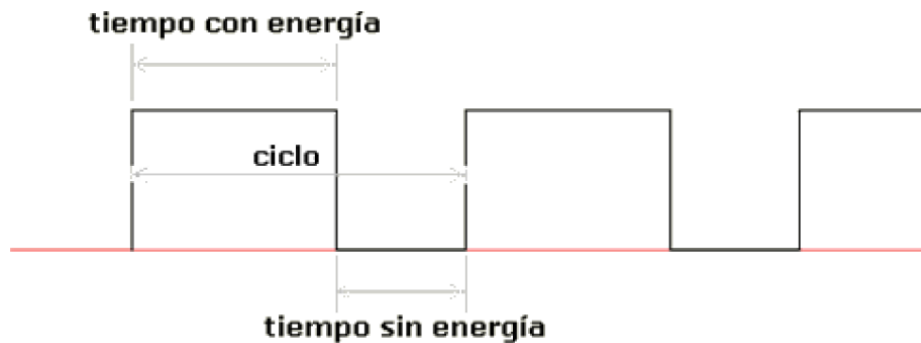


Figura 3.7. Pulso PWM para el control de un motor de CD [60].

A nivel de electrónica, para desarrollar el control de velocidad de motores de CD de potencia, se requiere de una tarjeta con tres etapas principales: acoplamiento de señal, *switch* amplificador y puente H, figura 3.8. La etapa de acoplamiento permite acoplar la señal digital de control (PWM) con la carga, regularmente con el uso de un optoacoplador ya que este permite realizar el acoplamiento mediante la luz emitida por un diodo LED que satura un componente optoelectrónico, regularmente un fototransistor; de esta manera se mantienen aisladas las etapas de control y carga. La etapa de amplificación o *switch* amplificador permite, mediante un transistor, controlar el voltaje nominal de la carga, en este caso, el voltaje nominal de los motores. El puente H permite realizar el control del sentido de giro del motor de CD, así como poder soportar el consumo de potencia requerido por el motor.

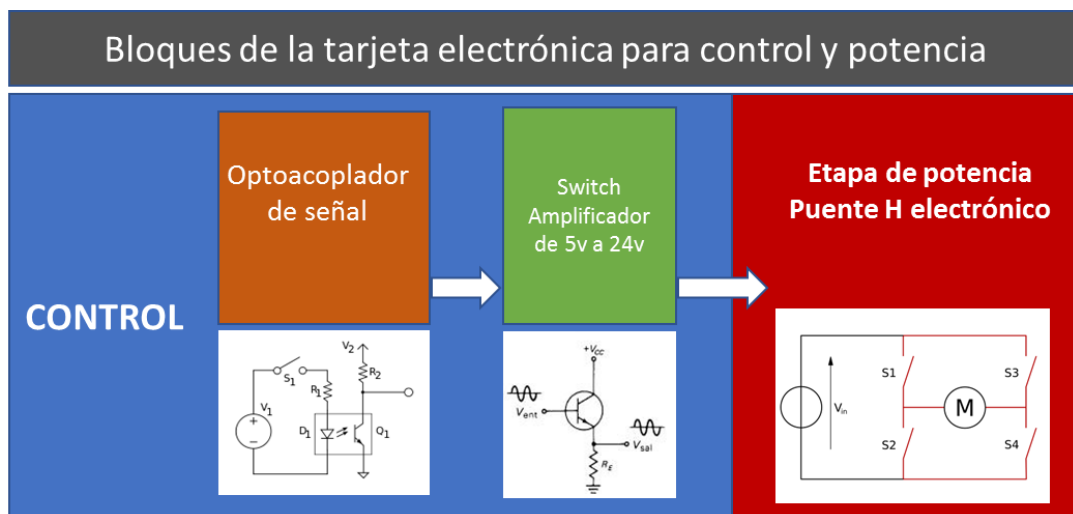


Figura 3.8. Bloques de una tarjeta de control de velocidad para motores de CD de potencia.

CAPÍTULO 4.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ROBOT

A lo largo de este capítulo se presenta el diseño y construcción del prototipo robótico para asistir en tareas de limpieza a alta presión en base a los requerimientos de diseño. Se realiza un modelo conceptual del robot para ser analizado cinemática, estática y dinámicamente, para obtener la masa mínima requerida del robot y el par-torsión mínimo requerido de sus actuadores. Con base a estos análisis se desarrolla el diseño CAD de una base móvil con un sistema *pan-tilt* sobre de ella. Se presenta también la selección de componentes y fabricación del robot, así como el diseño del control.

4.1. Requerimientos de diseño.

De la caracterización de la tarea de limpieza a alta presión se obtiene que las trayectorias a reproducir se componen básicamente de trayectorias articulares o movimientos sobre el eje horizontal y vertical con diferentes grados de apertura, por lo que, para cumplir con estas trayectorias y los objetivos particulares del proyecto, los requerimientos fundamentales de diseño del robot son:

- Sistema mecánico sencillo y con el menor número de grados de libertad que pueda desarrollar las trayectorias angulares de una tarea de limpieza a alta presión.
- Base móvil simple con tres ruedas.
- Tele-operación con *gamepad*.
- Presión mínima de trabajo de 1000 PSI.
- Construcción robusta.
- Peso mínimo que garantice que el robot no vuelque por acción de la fuerza de repulsión.

4.2 Modelo conceptual

El modelo conceptual del robot propuesto en este proyecto cuenta con una base móvil de tres ruedas, con tracción diferencial, y un sistema *pan-tilt* montado en su parte superior, figura 4.1. Este diseño es propuesto para poder montar o posicionar la pistola de agua a alta presión como efector final en el sistema de dos grados de libertad; lo cual permite tener un espacio de trabajo esférico del robot, el cual estará limitado por las restricciones mecánicas del ensamble y construcción del robot. El modelo propone operar el sistema *pan-tilt* mientras que la base móvil permanece estática, y operar la base móvil mientras que el sistema *pan-tilt* permanece estático.

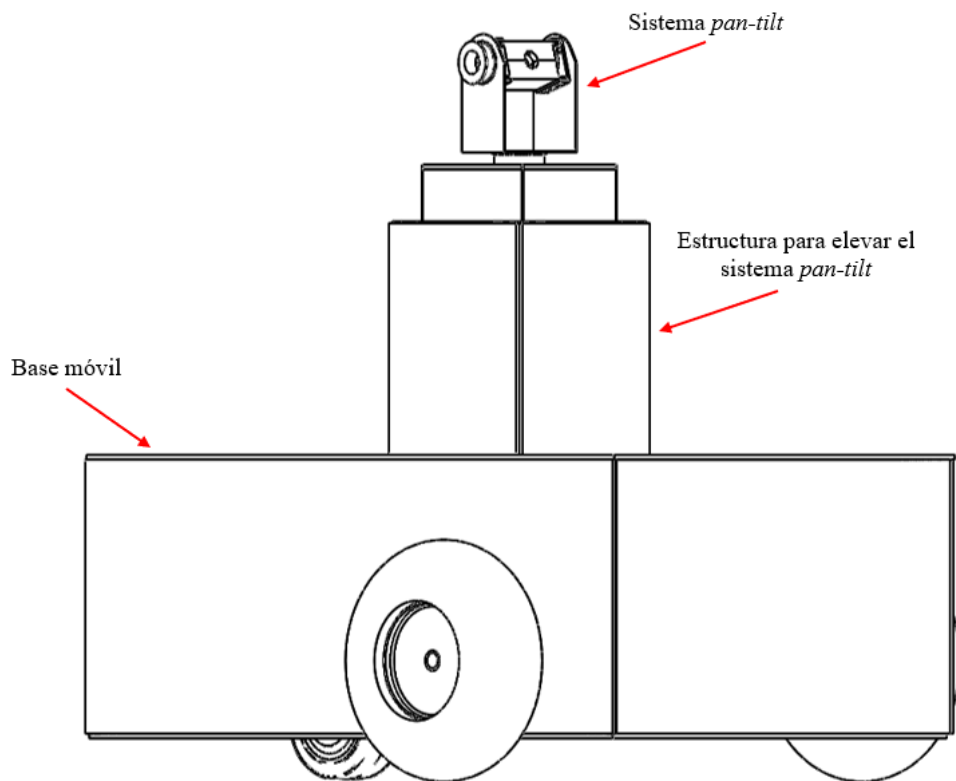


Figura 4.1. Modelo conceptual del robot de servicio propuesto.

La configuración propuesta delimita la movilidad del sistema *pan-tilt* a un giro de 180° en el ángulo *Yaw* y un giro de 90° en el ángulo *Pitch*, figura 4.2 [61]. El sistema *pan-tilt* se posiciona en medio de la base móvil, ya que de acuerdo con [62] y [63], si el centro de gravedad de un robot móvil con tres ruedas se posiciona en el centro del triángulo formado por el contacto de las tres ruedas con el suelo, se garantiza la estabilidad estática del robot, mediante un soporte de tipo trípode, figura 4.3.

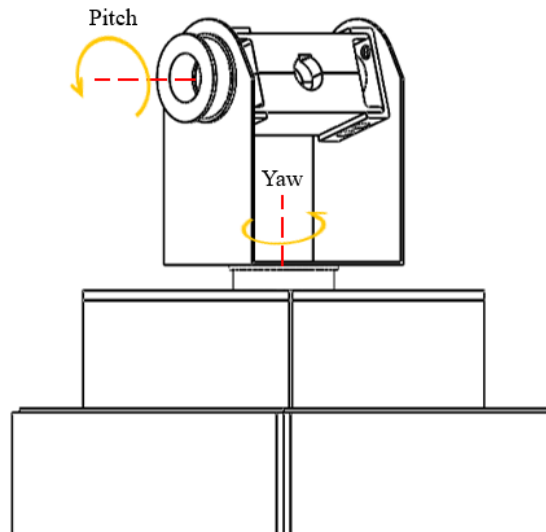


Figura 4.2. Ángulos de giro del sistema *pan-tilt*.

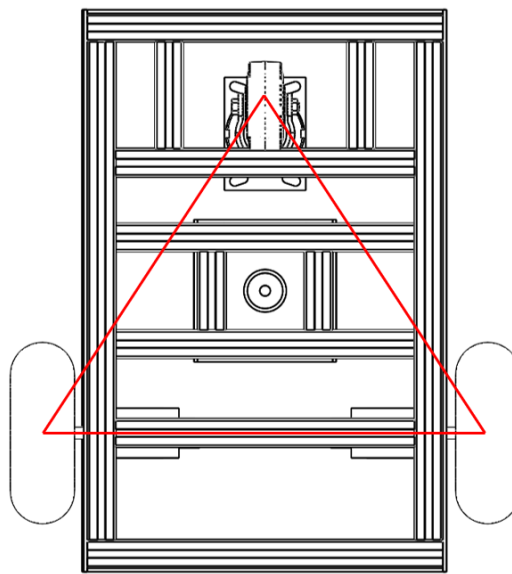


Figura 4.3. Soporte de tipo trípode.

4.3 Modelo cinemático de la base móvil

El modelo cinemático de la base móvil del robot permite conocer las curvas de velocidad para que éste pueda seguir una trayectoria a partir de conocer la velocidad angular deseada. A continuación, se presenta el desarrollo del modelo cinemático de la base móvil propuesta, constituida por tres ruedas con tracción diferencial, figura 4.4. Para este modelo se considera que:

- Las ruedas giran sin derrapar.
- El eje guía es perpendicular al plano xy .
- El punto Q coincide con el centro de gravedad del robot.

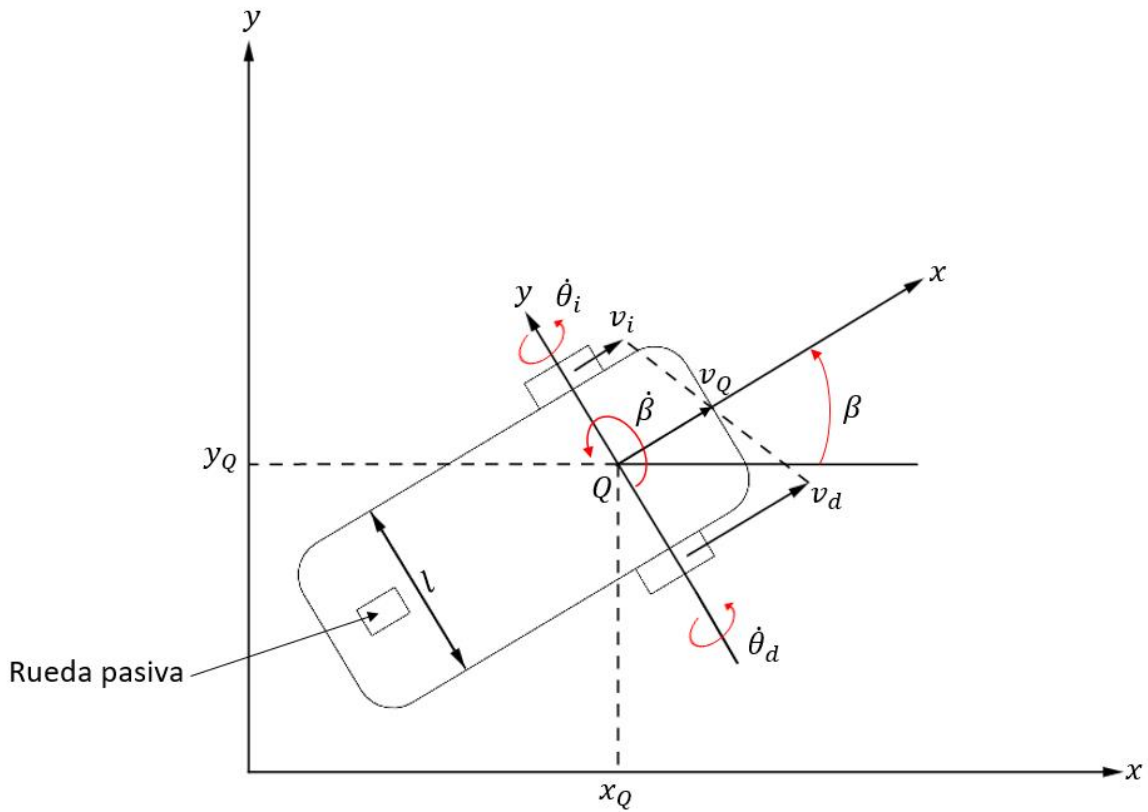


Figura 4.4. Diagrama esquemático de un robot móvil de tres ruedas con tracción diferencial.

La posición y orientación del robot, así como su velocidad están definidas por los vectores de las ecuaciones 4.1 y 4.2, respectivamente.

$$p = \begin{bmatrix} x_Q \\ y_Q \\ \beta \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\dot{p} = \begin{bmatrix} \dot{x}_Q \\ \dot{y}_Q \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

donde x_Q y y_Q son las componentes cartesianas del punto Q , y β es el ángulo de giro del desplazamiento angular del robot para trazar una trayectoria curva [50, 64]. El vector \dot{p} es la derivada respecto al tiempo del vector p , de esta manera, \dot{x}_Q y \dot{y}_Q son las componentes cartesianas de la velocidad lineal del punto Q , y $\dot{\beta}$ es la velocidad angular a la que se desplaza el robot. Siendo v_i y v_d la velocidad lineal de la rueda izquierda y derecha, respectivamente, y v_Q la velocidad lineal del punto Q , se obtiene de la figura 4.4 que:

$$v_d = v_Q + \frac{1}{2}l\dot{\beta} \quad (4.3)$$

$$v_i = v_Q - \frac{1}{2}l\dot{\beta} \quad (4.4)$$

donde l es el radio de giro del robot.

Sumando y restando las ecuaciones anteriores para conocer la velocidad diferencial [50, 65], se obtiene:

$$v_Q = \frac{1}{2}(v_d + v_i) \quad (4.5)$$

$$l\dot{\beta} = v_d - v_i \quad (4.6)$$

La velocidad v_Q se puede representar en sus componentes cartesianas como:

$$\dot{x}_Q = v_Q \cos(\beta) \quad (4.7)$$

$$\dot{y}_Q = v_Q \sin(\beta) \quad (4.8)$$

Sustituyendo la ecuación 4.5 en las ecuaciones 4.7 y 4.8, se obtiene:

$$\dot{x}_Q = \frac{1}{2}(v_d \cos(\beta) + v_i \cos(\beta)) \quad (4.9)$$

$$\dot{y}_Q = \frac{1}{2}(v_d \sin(\beta) + v_i \sin(\beta)) \quad (4.10)$$

Considerando la relación entre velocidad lineal y velocidad angular, v_i y v_d se pueden representar como:

$$v_d = r\dot{\theta}_d \quad (4.11)$$

$$v_i = r\dot{\theta}_i \quad (4.12)$$

donde r es el radio de la rueda y $\dot{\theta}_d$ y $\dot{\theta}_i$ son las velocidades angulares de las ruedas derecha e izquierda, respectivamente.

Por lo tanto, las ecuaciones 4.9 y 4.10 se pueden representar como:

$$\dot{x}_Q = \frac{r}{2}(\dot{\theta}_d \cos(\beta) + \dot{\theta}_i \cos(\beta)) \quad (4.13)$$

$$\dot{y}_Q = \frac{r}{2}(\dot{\theta}_d \sin(\beta) + \dot{\theta}_i \sin(\beta)) \quad (4.14)$$

La velocidad angular de giro de la base móvil se encuentra relacionada al radio de giro de las ruedas y a la distancia entre ambas, se obtiene:

$$\dot{\beta} = \frac{r}{l}(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}_i) \quad (4.15)$$

Sustituyendo las ecuaciones 4.13, 4.14 y 4.15 en el vector de la ecuación 4.2:

$$\dot{p} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \beta \\ \frac{r}{2} \sin \beta \\ \frac{r}{l} \end{bmatrix} \dot{\theta}_d + \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \beta \\ \frac{r}{2} \sin \beta \\ -\frac{r}{l} \end{bmatrix} \dot{\theta}_i \quad (4.16)$$

Para despejar las velocidades angulares de la ecuación anterior se considera que la ecuación está conformada por la multiplicación de una matriz y un vector [50], como se muestra en la ecuación 4.17.

$$\dot{p} = J\dot{q} \quad (4.17)$$

Por lo tanto:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_Q \\ \dot{y}_Q \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \beta & \frac{r}{2} \cos \beta \\ \frac{r}{2} \sin \beta & \frac{r}{2} \sin \beta \\ \frac{r}{l} & -\frac{r}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_d \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Debido a que la matriz J no es una matriz cuadrada, y no se puede obtener su matriz inversa, se realiza el siguiente procedimiento. La velocidad lineal de Q se puede expresar de la siguiente manera:

$$v_Q = \dot{x}_Q \cos \beta + \dot{y}_Q \sin \beta \quad (4.19)$$

Por lo que la velocidad lineal de cada rueda se puede definir como:

$$v_d = v_Q + \frac{1}{2} l \dot{\beta} \quad (4.20)$$

$$v_i = v_Q - \frac{1}{2} l \dot{\beta} \quad (4.21)$$

De esta manera, sustituyendo las ecuaciones 4.11, 4.12 y 4.19 en las ecuaciones 4.20 y 4.21, se obtiene:

$$r \dot{\theta}_d = \dot{x}_Q \cos(\beta) + \dot{y}_Q \sin(\beta) + \frac{1}{2} l \dot{\beta} \quad (4.22)$$

$$r \dot{\theta}_i = \dot{x}_Q \cos(\beta) + \dot{y}_Q \sin(\beta) - \frac{1}{2} l \dot{\beta} \quad (4.23)$$

Así, con las ecuaciones anteriores se puede plantear el siguiente arreglo para la solución al problema cinemático:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_d \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \sin(\beta) & \frac{1}{2} l \\ \cos(\beta) & \sin(\beta) & -\frac{1}{2} l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_Q \\ \dot{y}_Q \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Considerando la ecuación anterior, la solución al problema cinemático de la base móvil propuesta, de tres ruedas con tracción diferencial, se encuentra definida por las ecuaciones 4.25 y 4.26.

$$\dot{\theta}_d = \frac{1}{r} \left(\dot{x}_Q \cos(\beta) + \dot{y}_Q \sin(\beta) + \frac{1}{2} l \dot{\beta} \right) \quad (4.25)$$

$$\dot{\theta}_i = \frac{1}{r} \left(\dot{x}_Q \cos(\beta) + \dot{y}_Q \sin(\beta) - \frac{1}{2} l \dot{\beta} \right) \quad (4.26)$$

Estas ecuaciones, 4.25 y 4.26, son evaluadas para obtener los perfiles de velocidad angular para que el robot pueda realizar un giro a través de una trayectoria de un cuarto de circunferencia, considerando una β de 90° , una r de 127 mm ($5''$), y una longitud l de 400mm. De esta manera el robot podrá realizar giros para trasladarse y cambiar su orientación. La trayectoria ha desarrollar por el robot se muestra en la figura 4.5. En la figura 4.6 se muestra el perfil de velocidad angular obtenido para cada una de las ruedas.

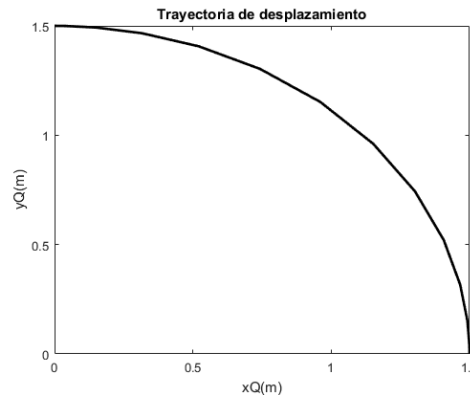


Figura 4.5. Trayectoria ha desarrollar.

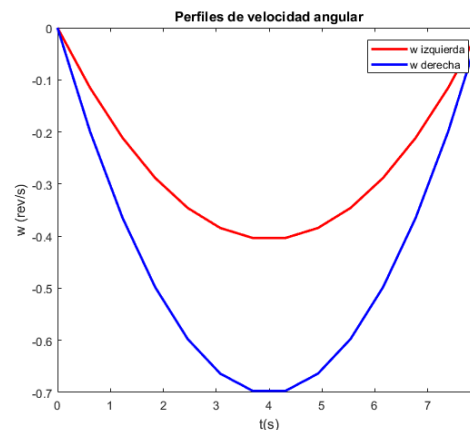


Figura 4.6. Perfiles de velocidad angular para desarrollar la trayectoria propuesta.

4.4 Análisis de rodadura de la base móvil

Este análisis permite conocer el par torsión mínimo para que el robot de servicio propuesto pueda desplazarse por una superficie con ciertas características, esto a partir del análisis de un diagrama de cuerpo libre. A continuación, se presenta el diagrama de cuerpo libre, figura 4.7, para desarrollar el análisis de resistencia a la rodadura que asegure que el robot puede desplazarse sobre una superficie lodosa, considerando el uso de llantas neumáticas y una masa máxima de 50 kg. Se considera una rampa de 15° para que el robot sea capaz de sobrepasar pequeños obstáculos.

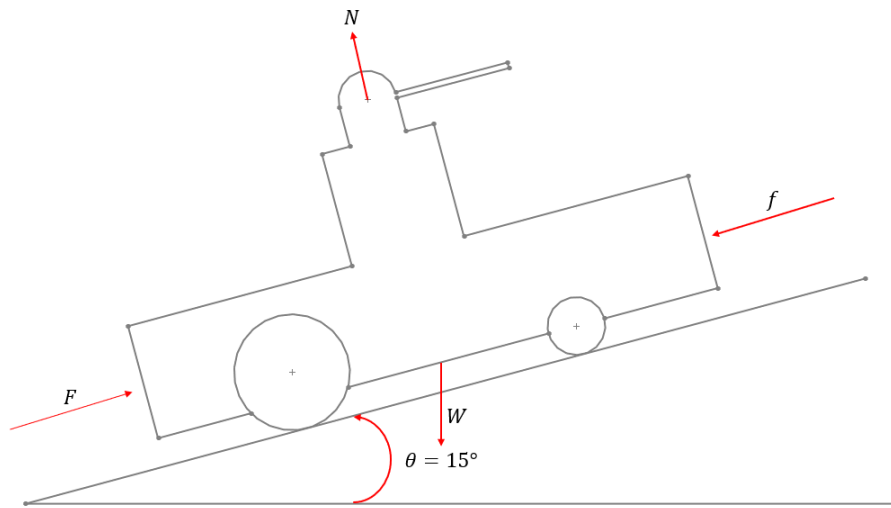


Figura 4.7. Diagrama de cuerpo libre para el análisis de resistencia a la rodadura del robot.

A partir del diagrama de cuerpo libre anterior se obtienen la ecuación 4.27.

$$\sum F_x = F - f - W \sin(\theta) = 0 \quad (4.27)$$

donde F es la fuerza mínima requerida para que el robot se mueva del reposo, f es el rozamiento de rodamiento, y W es el peso del robot.

El rozamiento de rodamiento o resistencia a la rodadura (f) para una superficie con pendiente está dada por [65, 66]:

$$f = \frac{W \cos(\theta) a}{r} \quad (4.28)$$

donde a es el coeficiente de resistencia a la rodadura, y r es el radio de la rueda.

Para llantas neumáticas sobre una superficie lodosa el coeficiente de resistencia a la rodadura (a) tiene un valor de 0.1524 cm, como se muestra en la tabla 3.1. Por lo que sustituyendo valores en 4.28, se obtiene que el valor de f es:

$$f = \frac{(50\text{kg})(9.81 \frac{m}{s^2}) \cos(15^\circ)(1.524 \times 10^{-3} m)}{0.127m} = 5.66854 N \quad (4.29)$$

Por lo tanto:

$$F = 5.854N + 50\text{kg}(9.81 \frac{m}{s^2}) \sin(15^\circ) = 132.63 N \quad (4.30)$$

De esta manera se obtiene el torque con la ecuación 4.31:

$$\tau = (F)(r) = (132.63N)(0.127m) = 16.8448 Nm \quad (4.31)$$

Considerando que la base móvil tiene dos ruedas actuadas, cada una deberá tener un par-torsión mínimo de 8.5 Nm.

4.5 Análisis estático del robot

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. Este análisis permite observar las fuerzas y momentos que se generan en el robot cuando se encuentra estático y sometido a una fuerza externa de repulsión [56, 57, 68]. A continuación, se presenta el análisis estático de la base móvil del modelo conceptual propuesto, el cual permite conocer la masa mínima requerida para que el robot no vuelque por acción de la fuerza repulsión del chorro de agua a alta presión.

Considerando la movilidad y la amplitud de los grados de libertad del sistema *pan-tilt*, el caso crítico para volcadura es cuando *Pitch* se encuentra en 0° y *Yaw* en 0° o 180° , figura 4.8, ya que es cuando la fuerza externa de repulsión impacta directamente sobre el robot sin la descomposición de la fuerza en diferentes ejes. La pistola de agua a alta presión se muestra posicionada en el sistema *pan-tilt*, figura 4.8. Se emplea un diagrama de cuerpo libre, donde el centro de masa de la pistola se posiciona en el centro del eje de rotación del ángulo *Pitch*, permitiendo que no se generen momentos por acción del centro de gravedad. En el diagrama de cuerpo libre se observa de manera general cómo se encuentran distribuidas las fuerzas de acción y reacción del robot móvil, y cómo actúa la fuerza externa de repulsión, figura 4.9.

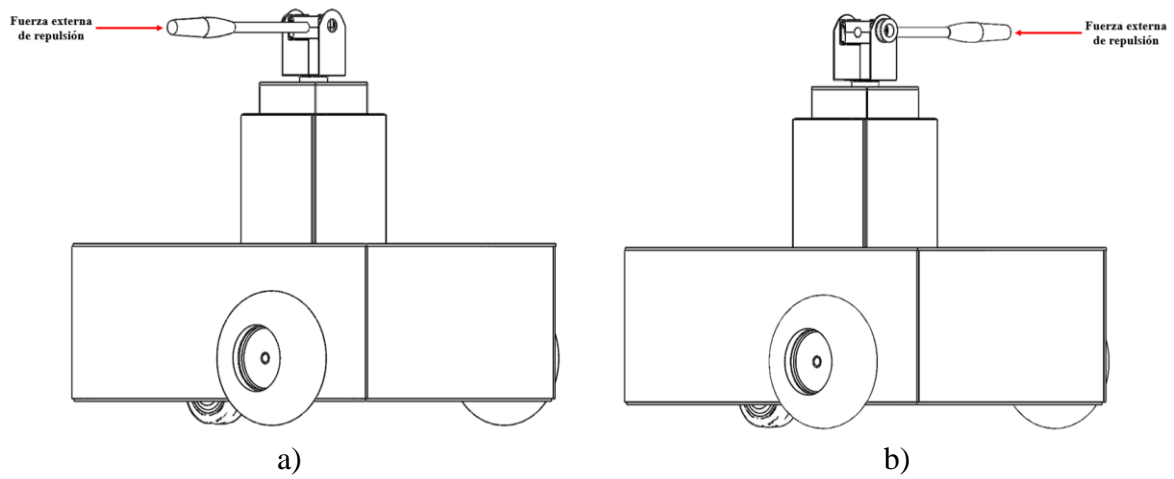


Figura 4.8. Posición crítica para volcadura en reacción a una fuerza externa de repulsión: a) $Pitch\ 0^\circ$ y $Yaw\ 0^\circ$, b) $Pitch\ 0^\circ$ y $Yaw\ 180^\circ$.

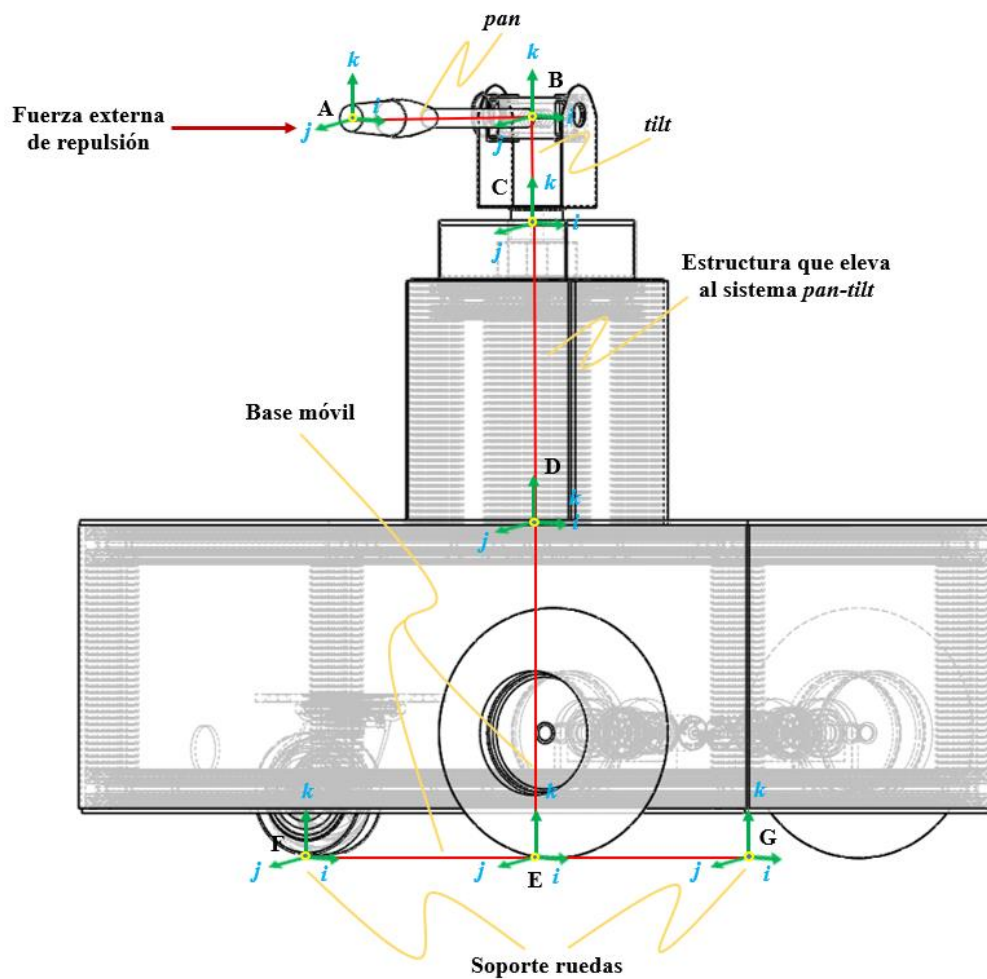


Figura 4.9. Diagrama de cuerpo libre de la estructura general del robot móvil.

Las fuerzas de acción y reacción, y momentos de cada parte del sistema estático se observan en las figuras 4.10 a 4.14.

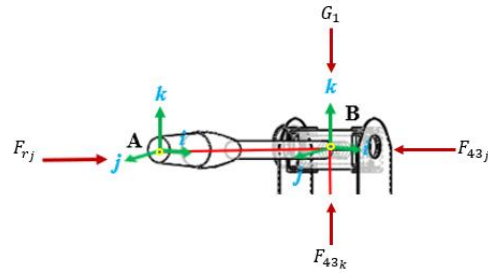


Figura 4.10. Fuerzas de acción y reacción en el sistema *tilt*.

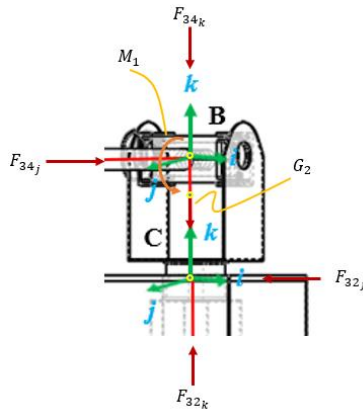


Figura 4.11. Fuerzas de acción y reacción en el sistema *pan*.

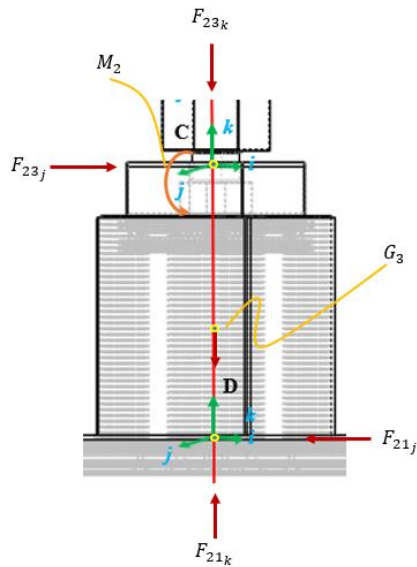


Figura 4.12. Fuerzas de acción, reacción y momentos en la estructura que eleva el *pan-tilt*.

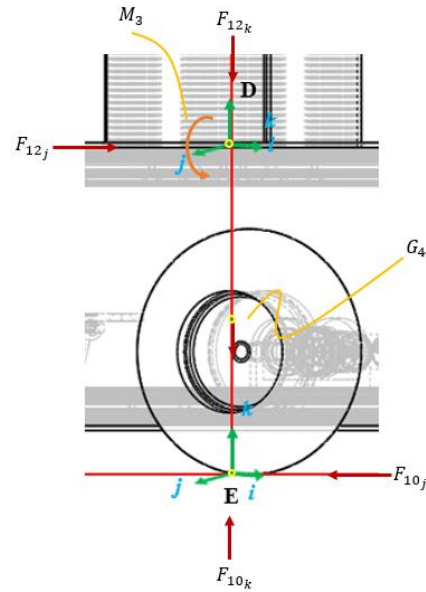


Figura 4.13. Fuerzas de acción, reacción y momentos en la base móvil, parte superior.

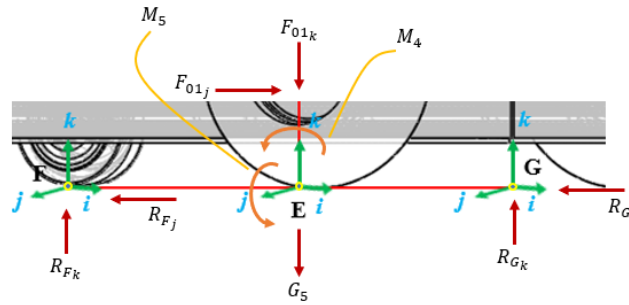


Figura 4.14. Fuerzas de acción, reacción y momentos en la base móvil, parte inferior.

De la figura 4.10 se obtienen las ecuaciones 4.32 a 4.35, donde se emplea la tercera ley de Newton:

$$\sum F_i = 0 \quad (4.32)$$

$$\sum F_j = F_{43j} - F_{rj} = 0 \quad (4.33)$$

$$\sum F_k = F_{43k} - G_1 = 0 \quad (4.34)$$

$$\sum M = 0 \quad (4.35)$$

donde F_{43j} y F_{43k} son las fuerzas de reacción a F_{rj} y G_1 respectivamente. G_1 , así como todas las fuerzas G , es el peso propio de pieza o parte analizada, es decir, el producto de su masa por la constante gravitacional.

Las ecuaciones 4.36 a 4.39 se obtienen de la figura 4.11:

$$\sum F_i = 0 \quad (4.36)$$

$$\sum F_j = F_{32j} - F_{34j} = 0 \quad (4.37)$$

$$\sum F_k = F_{32k} - F_{34k} - G_2 = 0 \quad (4.38)$$

$$\sum M = M_1 - F_{34j}BC = 0 \quad (4.39)$$

donde BC es la distancia del punto B al punto C .

Del análisis de la figura 4.12, se obtienen las ecuaciones 4.40 a 4.43:

$$\sum F_i = 0 \quad (4.40)$$

$$\sum F_j = F_{21j} - F_{23j} = 0 \quad (4.41)$$

$$\sum F_k = F_{21k} - F_{23k} - G_3 = 0 \quad (4.42)$$

$$\sum M = M_2 - F_{23j}CD = 0 \quad (4.43)$$

donde CD es la distancia del punto C al punto D .

De la figura 4.13, se obtienen las ecuaciones 4.44 a 4.47:

$$\sum F_i = 0 \quad (4.44)$$

$$\sum F_j = F_{10j} - F_{12j} = 0 \quad (4.45)$$

$$\sum F_k = F_{10k} - F_{12k} - G_4 = 0 \quad (4.46)$$

$$\sum M = M_3 - F_{12j}DE = 0 \quad (4.47)$$

donde DE es la distancia del punto D al punto E .

Por último, de la figura 4.14 se obtienen las ecuaciones 4.48 a 4.52:

$$\sum F_i = 0 \quad (4.48)$$

$$\sum F_j = R_{Fj} + R_{Gj} - F_{01j} = 0 \quad (4.49)$$

$$\sum F_k = R_{Fk} + R_{Gk} - F_{01k} - G_5 = 0 \quad (4.50)$$

$$\sum M_k = M_4 + R_{Gk}FG - G_5FE = 0 \quad (4.51)$$

$$\sum M_j = M_5 + R_{Gj}FG = 0 \quad (4.52)$$

donde las fuerzas R_F y R_G permiten que la base móvil no vuelque y se mantenga en equilibrio estático. En base a estas fuerzas se determina la masa final del parte inferior de la base móvil. La parte inferior de la base móvil se comporta como una viga doblemente empotrada.

Considerando los datos propuestos de dimensión y pesos de la tabla 4.1 se desarrollan las ecuaciones 4.32 a 4.52, obteniendo los datos de la tabla 4.2.

Tabla 4.1. Datos de dimensiones y pesos del robot móvil.

Longitud	(m)	Peso	(N)
AB	0.6	G_1	8.0442
BC	0.135	G_2	6.8670
CD	.27	G_3	29.43
DE	0.35	G_4	
FG	0.52	G_5	

Tabla 4.2. Datos de las fuerzas de reacción y momentos obtenidos.

Fuerza	(N)	Fuerza	(N)	Fuerza	(N)	Fuerza	(N)	Fuerza	(N)
F_{43j}	10	F_{34k}	-8.04	F_{21k}	30.60	F_{10k}	-10.98	F_{01k}	10.98
F_{43k}	8.04	M_1	-1.35	M_2	2.7	M_3	-3.5	R_{Fk}	25.11
F_{32j}	-10	F_{23j}	10	F_{12j}	-10	F_{01j}	10	R_{Gk}	25.11
F_{34j}	-10	F_{21j}	10	F_{10j}	-10	R_{Fj}	5	M_4	-2.85
F_{32k}	-1.17	F_{23k}	1.17	F_{12k}	30.60	R_{Gj}	5	M_5	-2.6

De esta manera se puede observar, en base a las ecuaciones 4.53 y 4.54, que el peso de la base móvil total es mayor a la fuerza que reacciona en el eje j , por lo que la fuerza no puede volcar al robot móvil.

$$\sum F_{BMj} = |F_{10j} + R_{Fj} + R_{Gj}| = 20 \quad (4.53)$$

$$\sum G_{BM} = |G_4 + G_5| = 58.86 \quad (4.54)$$

4.6 Modelo geométrico directo del sistema *pan-tilt*

Se desarrolla el modelo geométrico directo (MGD) del sistema *pan-tilt* para obtener la trayectoria cartesiana en base a los valores articulares propuestos de apertura en *Pitch* y *Yaw*. Mediante la convención de Denavit-Hartenberg descrita en el capítulo anterior, se obtienen los parámetros del sistema *pan-tilt* de la tabla 4.3, basados en la asignación de ejes de coordenadas de la figura 4.15.

Tabla 4.1. Parámetros de Denavit-Hartenberg del sistema *pan-tilt*.

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	0	0	l_1	0
2	90	0	l_2	θ_1
3	0	l_3	0	θ_2

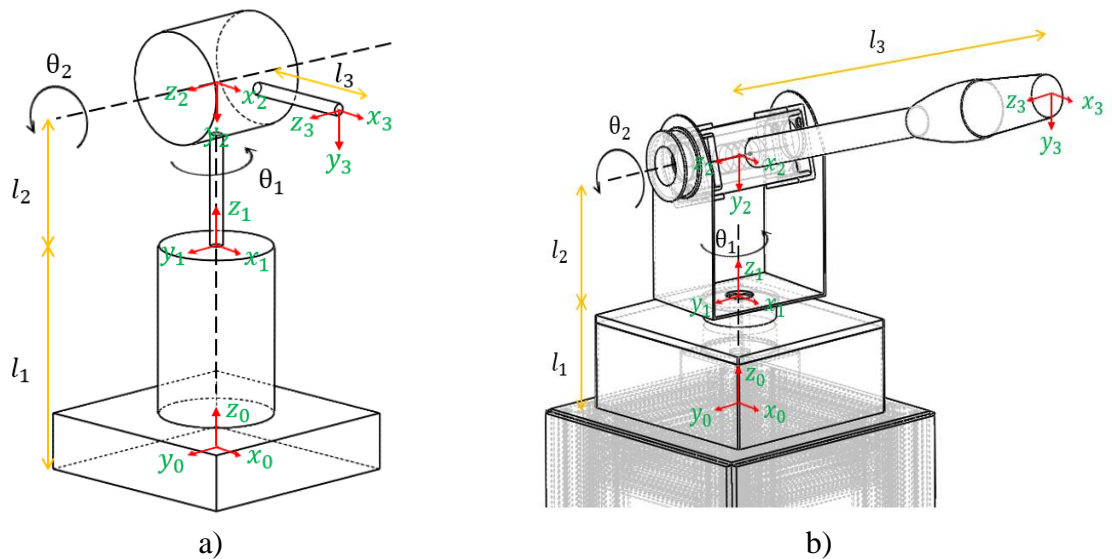


Figura 4.15. Asignación de sistema de coordenadas: a) Diagrama cinemático, b) Diagrama del modelo conceptual.

En la expresión 4.55 se muestra la matriz de transformación homogénea obtenida con los parámetros de Denavit-Hartenberg del sistema *pan-tilt*.

$${}^1A_3 = \begin{bmatrix} C\theta_2 C\theta_3 & -C\theta_2 S\theta_3 & S\theta_2 & a_3 C\theta_2 C\theta_3 \\ C\theta_3 S\theta_2 & -S\theta_2 S\theta_3 & -C\theta_2 & a_3 C\theta_3 S\theta_2 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & d_1 + d_2 + a_3 S\theta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

Empleando el vector de puntos de la matriz anterior, se obtiene el espacio de trabajo del sistema *pan-tilt* con base en los ángulos de apertura definidos, figura 4.16. De esta manera, el robot cuenta con un espacio de trabajo de un cuarto de esfera, el cual se puede desplazar o mover a cualquier parte que la base móvil y las dimensiones del robot le permitan.

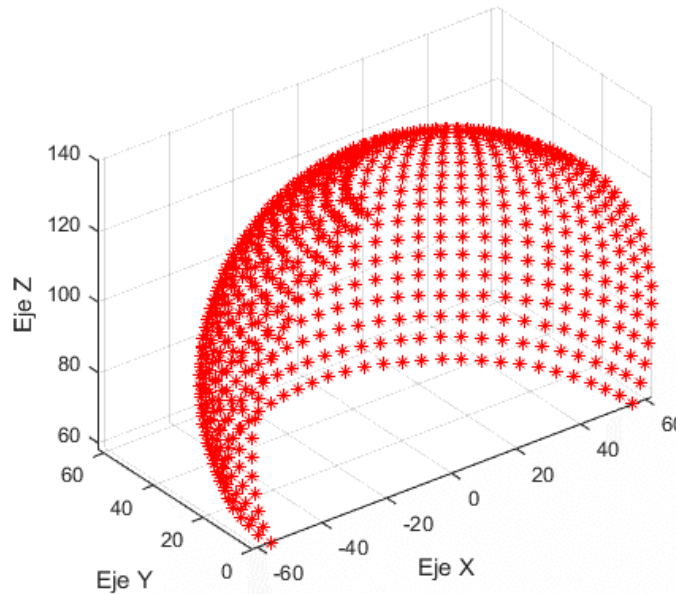


Figura 4.16. Espacio de trabajo del sistema *pan-tilt* para un giro de 0° a 180° en *Yaw* y de -25° a 65° en *Pitch*.

4.7 Análisis dinámico del sistema *pan-tilt*

El análisis dinámico del sistema *pan-tilt* se desarrolla mediante la formulación dinámica iterativa de Newton-Euler, presentada en el capítulo anterior, donde se definen las iteraciones salientes; posiciones, velocidades y aceleraciones angulares y lineales, y las fuerzas internas que interactúan en el sistema *pan-tilt*. Así como las iteraciones entrantes, la fuerza externa de repulsión y los pares torsionales.

La trayectoria que sigue la pistola de limpieza para este análisis, figura 4.17, esta compuesta por un movimiento de 0° a 180° de θ_1 con un valor fijo de 65° en θ_2 , línea roja superior; por un movimiento de 65° a 25° de θ_2 con un valor fijo de 180° en θ_1 , línea azul izquierda; por un movimiento de 180° a 0° de θ_1 con un valor fijo de 25° en θ_2 , línea roja inferior; y por un movimiento de 25° a 65° de θ_2 con un valor fijo de 0° en θ_1 , línea azul derecha. Esta trayectoria permite conocer el par-torsión mínimo requerido en las articulaciones del sistema *pan-tilt* cuando sigue la circunferencia de su espacio de trabajo, combinando giros en *Pitch* y *Yaw*.

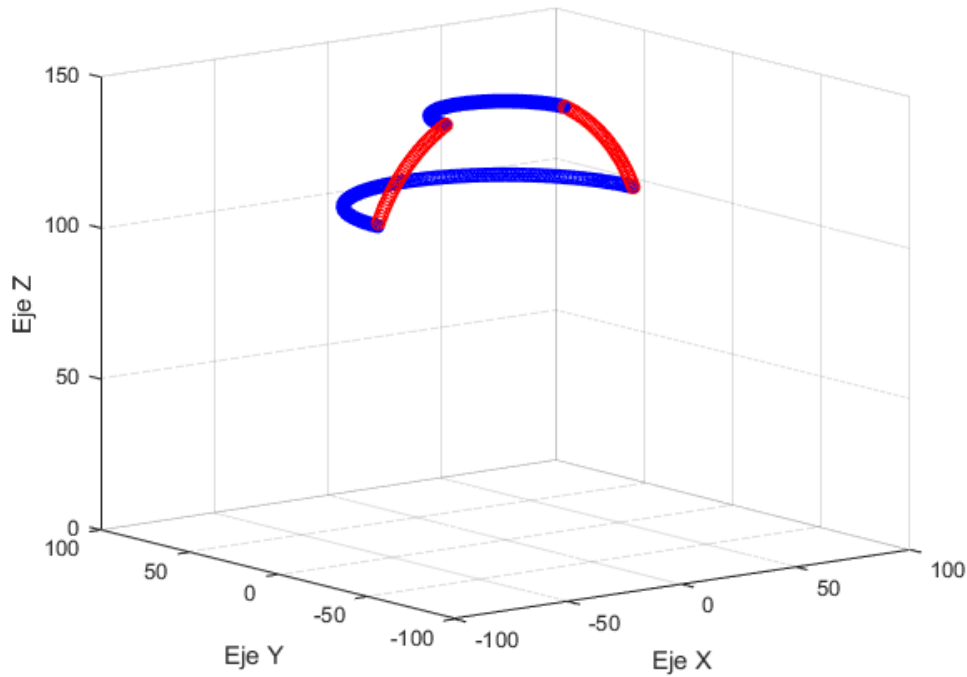


Figura 4.17. Trayectoria de la pistola de chorros de agua a alta presión.

Se desarrollan las ecuaciones 3.8 a 3.16, presentadas en el capítulo anterior, mediante el uso de MATLAB para la trayectoria de la figura anterior, utilizando las masas, centros de masas y tensores de inercia obtenidos de SolidWorks, tabla 4.2 y 4.3 respectivamente, para las posiciones angulares de la figura 4.18, y, considerando una velocidad angular de $10^\circ/s$ y una aceleración angular igual a cero. El resultado del análisis dinámico inverso se muestra en las figuras 4.19 y 4.20. En la figura 4.19 se presenta el resultado del sistema *tilt*, en donde se puede observar que debido a que la trayectoria no parte de una posición en reposo, se requiere de un par torsional inicial de 827 N-mm. Se aprecia también que existe un incremento en el par torsional en los instantes en que el motor cambia de posición angular. En la figura 4.20 se presenta el resultado del sistema *pan*, en donde se puede observar que el par torsional requerido en esta articulación, para esta trayectoria, es prácticamente nulo, esto debido a que las fuerzas actúan mayormente de manera axial y no radial, a diferencia del sistema *tilt*.

Tabla 4.2. Centros de masa del sistema *pan-tilt*.

Eslabón	Masa (g)	Centro de masa (x, y, z) (mm)
<i>Pan</i>	700	(0.00, 0.00, 39.5)
<i>Tilt</i>	820	(-235.14, 0.00, 0.00)

Tabla 4.3. Tensores de inercia del sistema *pan-tilt*

Eslabón	Ixx (gmm ²)	Iyy (gmm ²)	Izz (gmm ²)	-Ixy (gmm ²)	-Ixz (gmm ²)	-Iyz (gmm ²)
<i>Pan</i>	2369613.61	1293023.87	1649864.98	0.00	0.00	0.00
<i>Tilt</i>	84904.15	9473962.70	9473894.41	-4.94	276.55	2.50

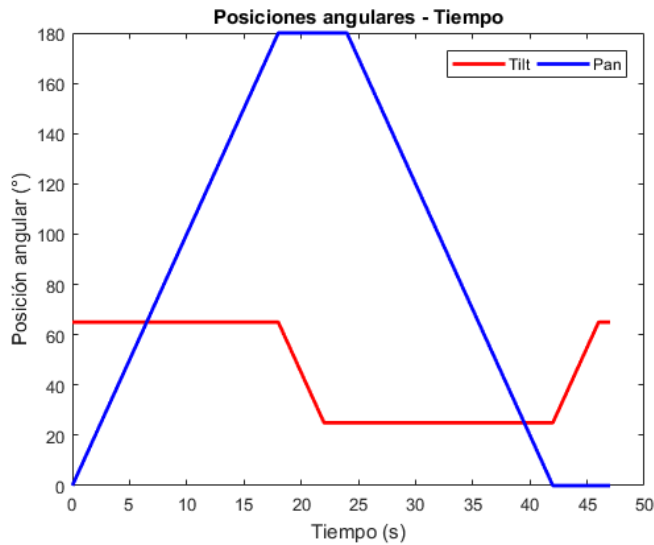


Figura 4.18. Posiciones angulares del *pan-tilt* para la trayectoria de limpieza

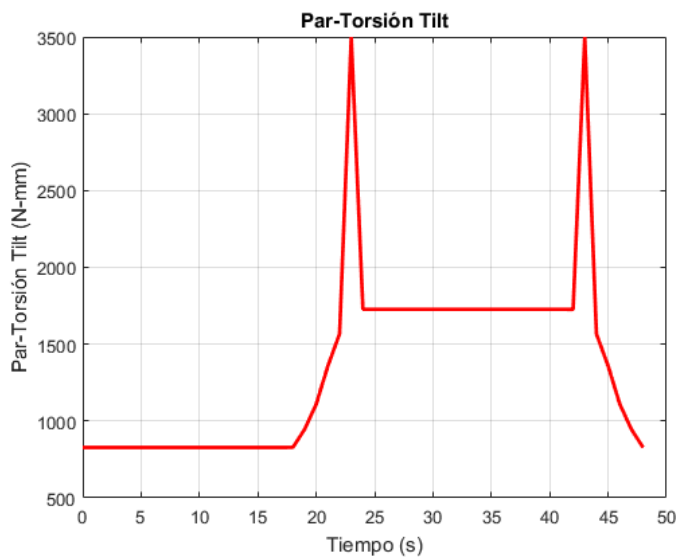


Figura 4.19. Gráfica del par torsional requerido en *tilt* para realizar la trayectoria de trabajo.

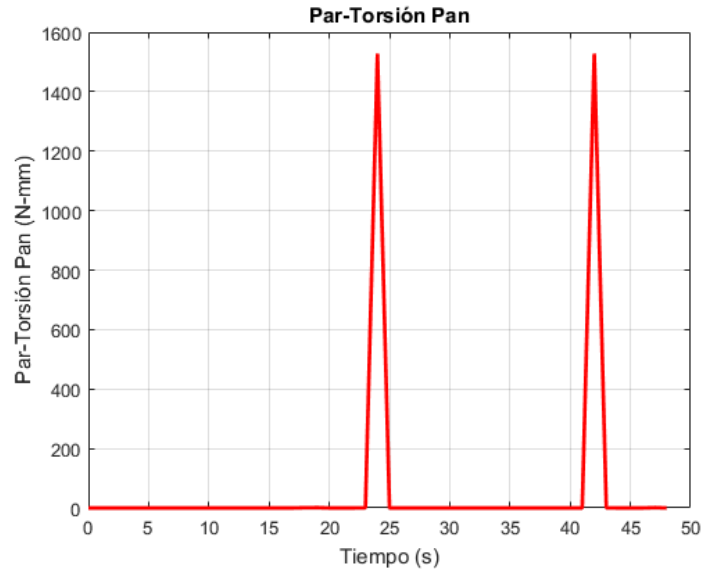


Figura 4.20. Gráfica del par torsional requerido en *pan* para realizar la tarea de limpieza.

4.7.1 Simulación en SolidWorks

Mediante un análisis de movimiento en SolidWorks se logra simular el comportamiento de los actuadores del sistema *pan-tilt* al aplicar una fuerza constante de 10 N, con dirección entrante, en la punta de la herramienta de trabajo. Los resultados de esta simulación se muestran en las figuras 4.21 y 4.22. Se puede apreciar que los resultados obtenidos de la simulación concuerdan con los obtenidos con el modelo dinámico inverso desarrollado.

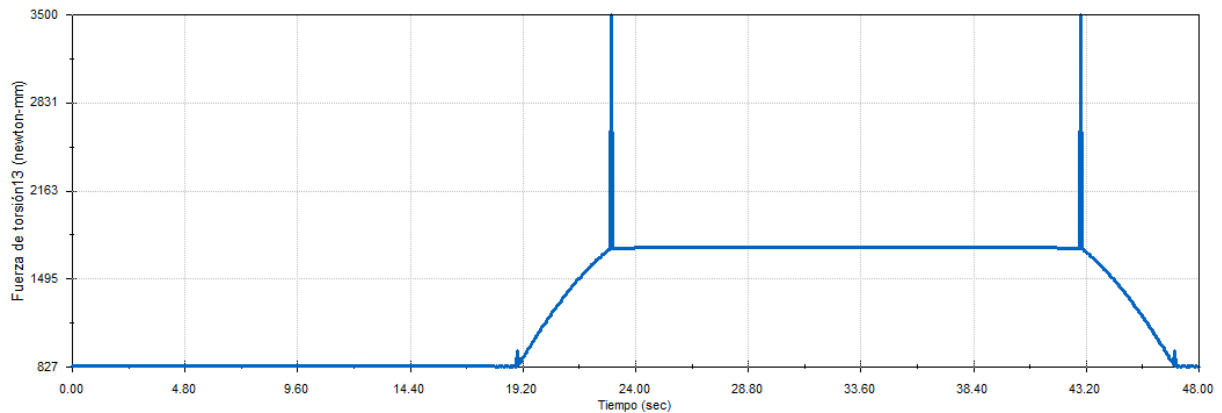


Figura 4.21. Gráfica del par-torsión requerido en *tilt* para realizar la trayectoria de trabajo.

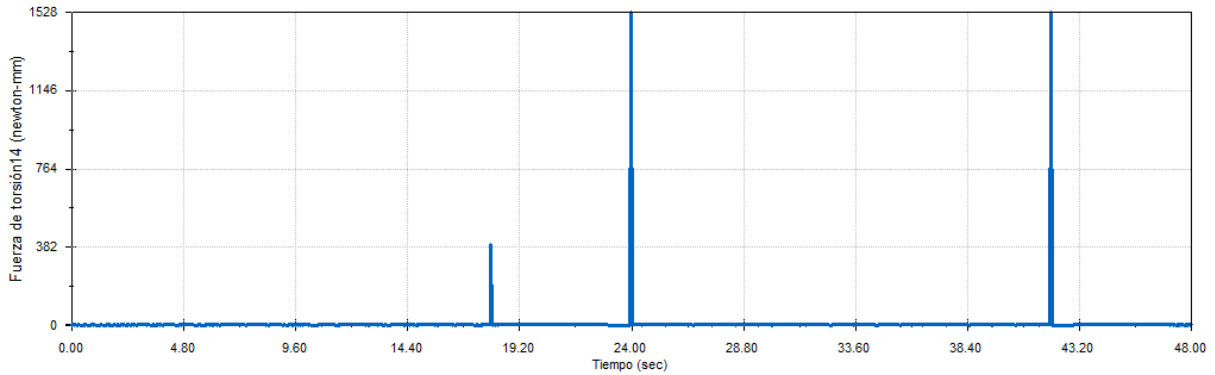


Figura 4.22. Gráfica del par torsional requerido en *pan* para realizar la trayectoria de trabajo.

4.8 Diseño CAD

A partir de los requerimientos de diseño anteriores, y de los análisis realizados en el modelo conceptual propuesto se modela el diseño CAD final del robot en SolidWorks. Este diseño comprende el modelado CAD de una base móvil, figura 4.23, y un sistema *pan-tilt*, figura 4.24. El diseño de la base móvil cuenta con las dimensiones internas suficientes para almacenar una hidrolavadora, el sistema eléctrico, el sistema electrónico de potencia, y el sistema de control del robot. El diseño del sistema *pan-tilt* considera un sistema de dos piezas en *tilt* para poder acoplar la pistola de chorros de agua a alta presión, en la figura 4.25 se muestra este acoplamiento. El robot cuenta con dos ruedas neumáticas actuadas de 10", y una rueda loca o rodaja de 4" como soporte.

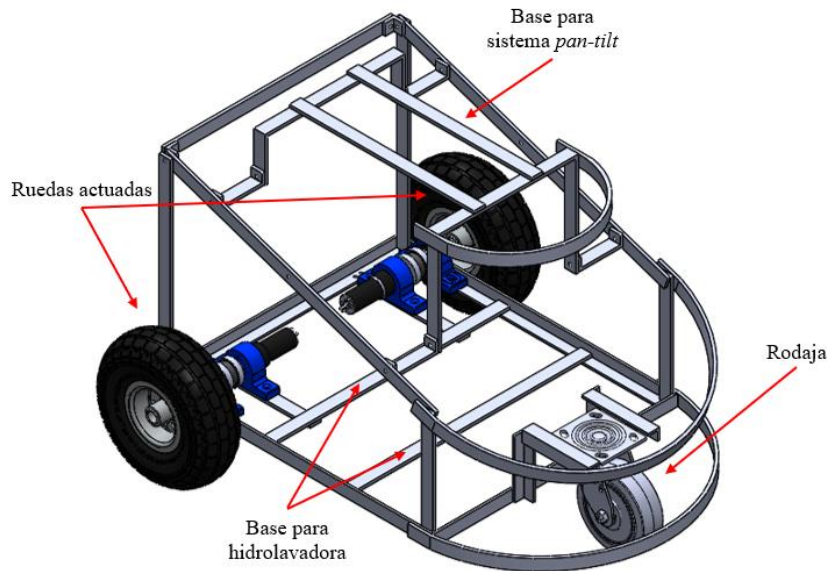


Figura 4.23. Vista isométrica del diseño CAD de la base móvil.

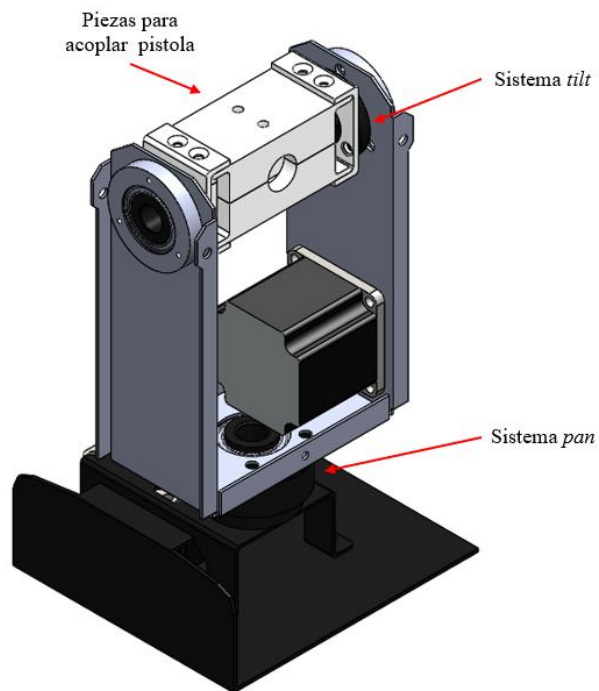


Figura 4.24. Vista isométrica del diseño CAD del sistema *pan-tilt*.

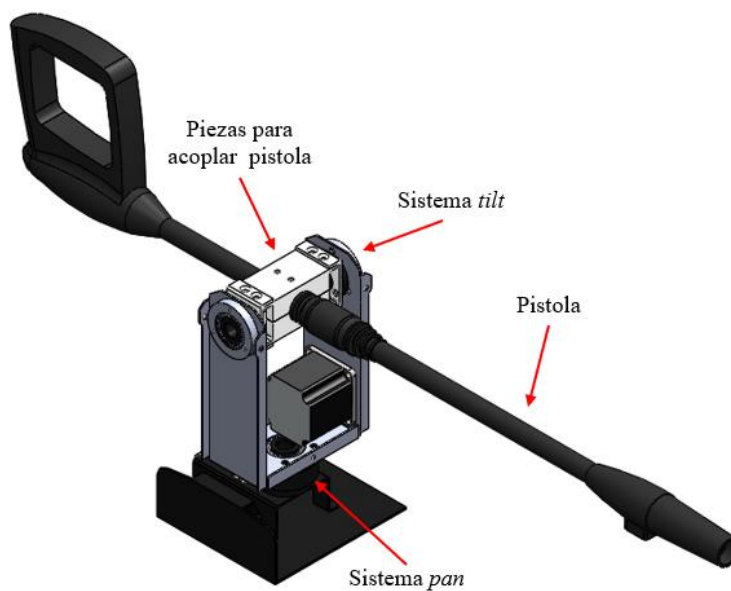


Figura 4.25. Vista isométrica del diseño CAD del sistema *pan-tilt* con la pistola de alta presión acoplada.

La integración de ambos diseños para el modelo final del robot se muestra en las figuras 4.26 y 4.27. Mediante el modelo CAD final se verifica la movilidad del sistema *pan-tilt*, en base a los ángulos de apertura propuestos para *Pitch* y *Yaw*.

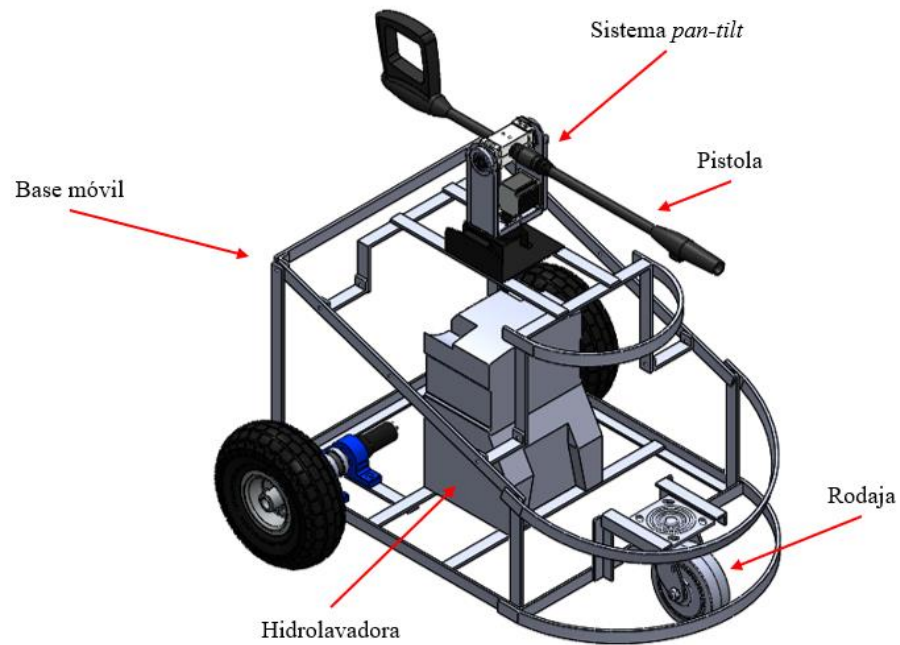


Figura 4.26. Vista isométrica frontal del modelo CAD del robot.

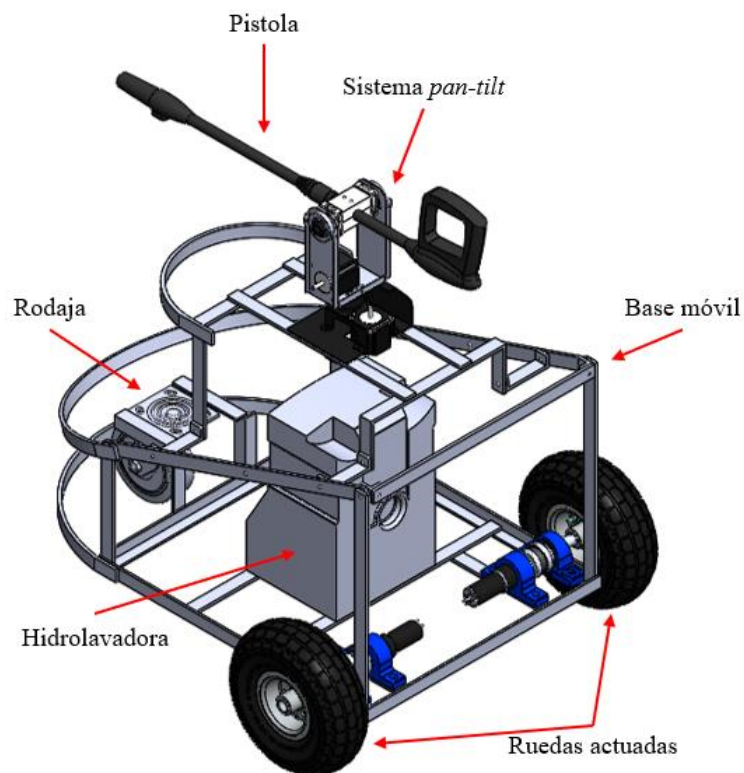


Figura 4.27. Vista isométrica trasera del modelo CAD del robot.

4.9 Selección de componentes

La selección de los componentes se desarrolla a partir de las alternativas de componentes comerciales que satisfagan las condiciones del diagrama general de control del robot, figura 4.28. A continuación se describe cada etapa del diagrama y el componente seleccionado en cada una de ellas.

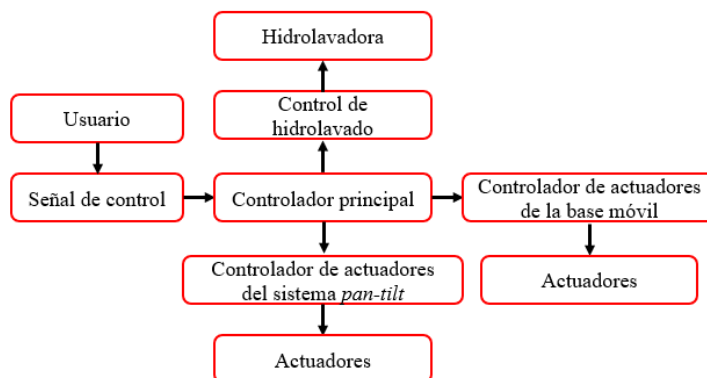


Figura 4.28. Diagrama general de control del robot.

- **Señal de control:** Se utiliza un *gamepad* MEGAFIRE, figura 4.29, para que el usuario proporcione la señal de control de entrada al controlador principal; cuenta con 14 botones para desarrollar diferentes configuraciones y comandos, así como con dos palancas o *joysticks* que se pueden utilizar como salidas digitales o análogas del *gamepad*. El *gamepad* cuenta con cable USB para conectarse al controlador principal.



Figura 4.29. *Gamepad* MEGAFIRE.

- **Controlador principal:** El controlador principal del robot es computadora de placa reducida Raspberry Pi 3 modelo B, figura 4.30. Esta tarjeta cuenta con un procesador Quad Core de 1.2 GHz de 64 bits, 1GB de memoria AM, 4 puertos USB 2.0, 40 pines de conexión GPIO, salida HDMI, Bluetooth 4.1, conexión *Wi-Fi*, puerto microSD para almacenar el sistema operativo y los archivos generados. Esta tarjeta puede trabajar con Windows IoT, Raspbian, ROS, y demás sistemas operativos basados en Linux.

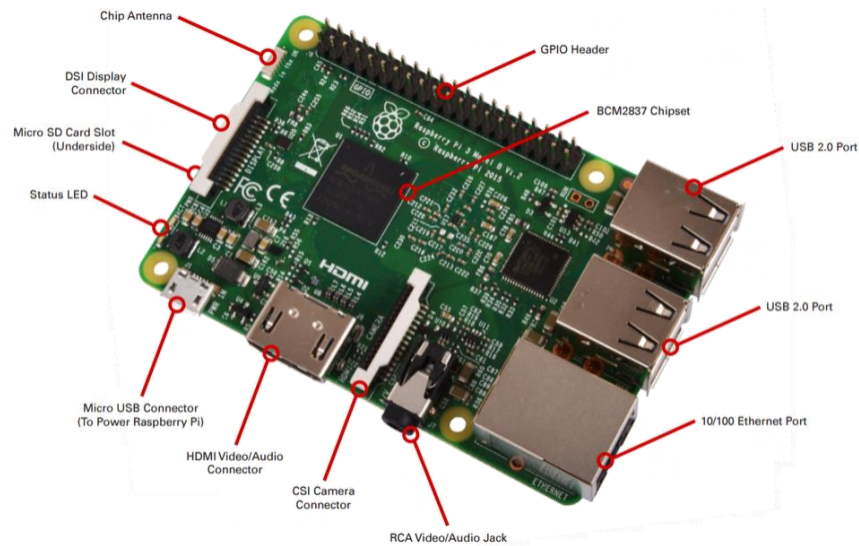


Figura 4.30. Raspberry Pi 3 modelo B.

- **Controlador de actuadores de la base móvil:** El control de los actuadores de la base móvil se realiza a través de dos tarjetas de control de velocidad de motores de CD de potencia desarrolladas en CICATA-IPN unidad Querétaro, figura 4.31.

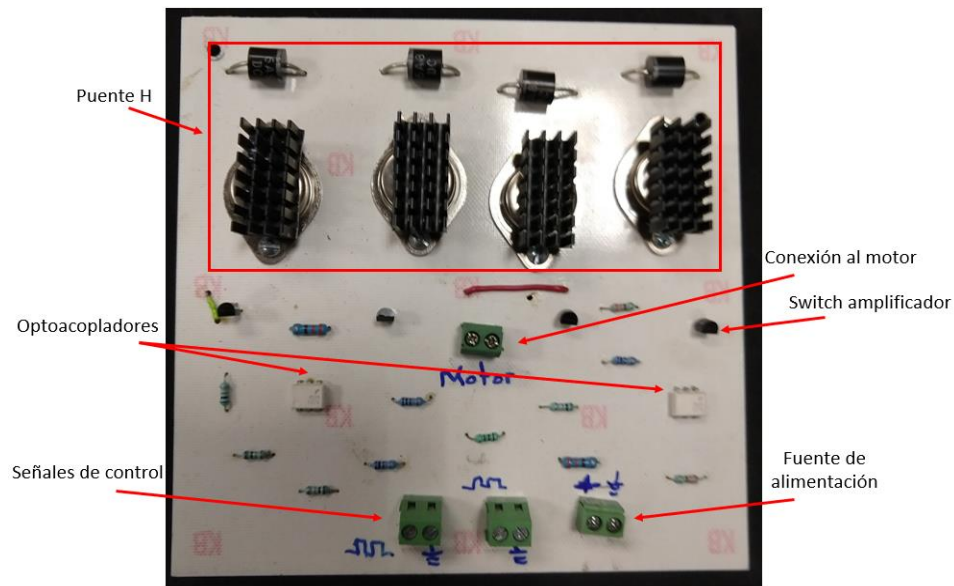


Figura 4.31. Tarjetas de control de velocidad de motores de CD.

- **Actuadores de la base móvil:** Se utilizan dos motores de CD Bernio MR 752 L63 1/36 de 24 volts y una potencia de 240 watts, figura 4.32. 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.

- **Control de hidrolavado:** El control de hidrolavado se encuentra a cargo de un módulo de dos relevadores y una electroválvula, figura 4.35. El módulo de relevadores permite accionar la hidrolavadora y la electroválvula, mientras que la electroválvula permite o restringe el paso del agua a la hidrolavadora. El módulo de relevadores funciona con 5 volts y puede soportar corriente alterna y directa. La electroválvula tiene un diámetro de $\frac{1}{2}$ de pulgada; su bobina opera a 12 volts de corriente directa.



a)



b)

Figura 4.35. Control de hidrolavado: a) módulo de dos relevadores, b) electroválvula.

- **Hidrolavadora:** Se utiliza la hidrolavadora PW1300SW de Black and Decker, figura 4.36, con una presión de salida de 1450 PSI, un caudal de 5 litros por minuto, y una fuerza de retroceso de 10 N.



Figura 4.36. Hidrolavadora PW1300SW.

4.10 Construcción del robot

El cuadro principal del robot se realiza en acero negro para obtener rigidez en el sistema, posteriormente toda la construcción del prototipo se desarrolla con solera de aluminio 1100, figura 4.37. Las uniones principales del robot se realizan con soldadura, el resto de ellas (uniones de aluminio) con tornillería. En la figura 4.38 se muestra una integración del sistema. El robot cuenta con un cuadro de energía, donde se alimenta y distribuye corriente alterna a todo el robot, figura 4.39.



Figura 4.37. Estructura principal del robot.

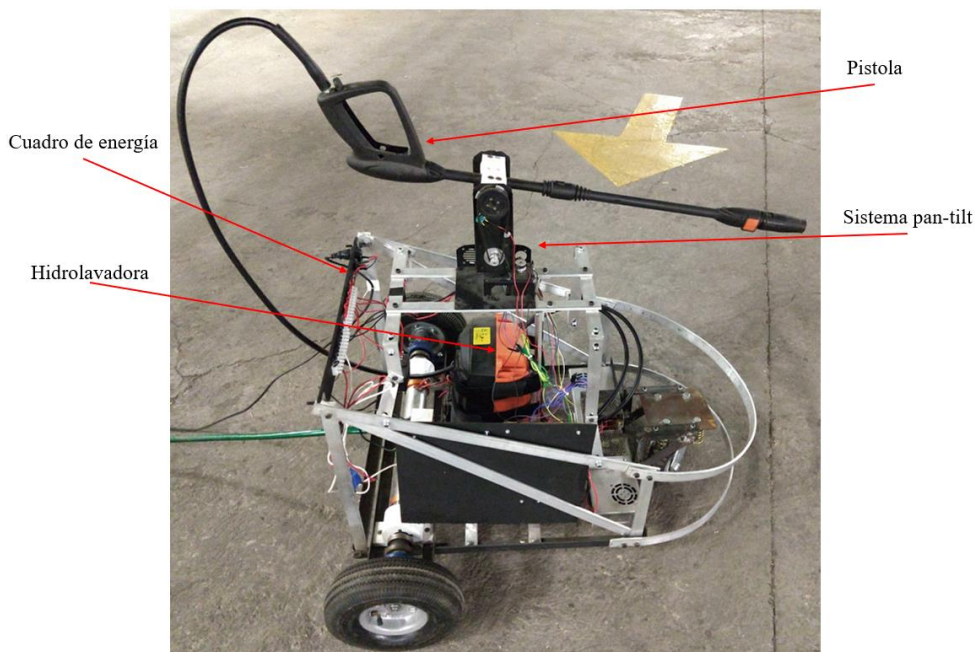
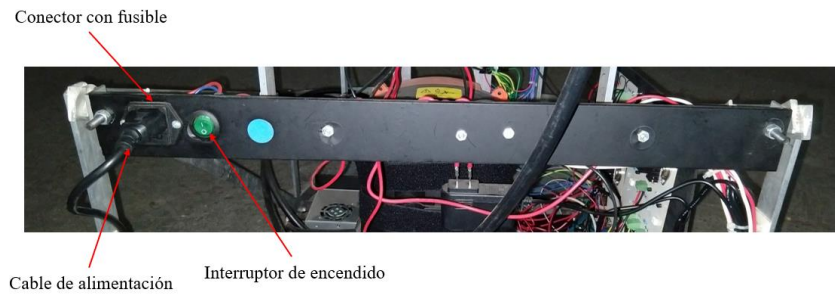
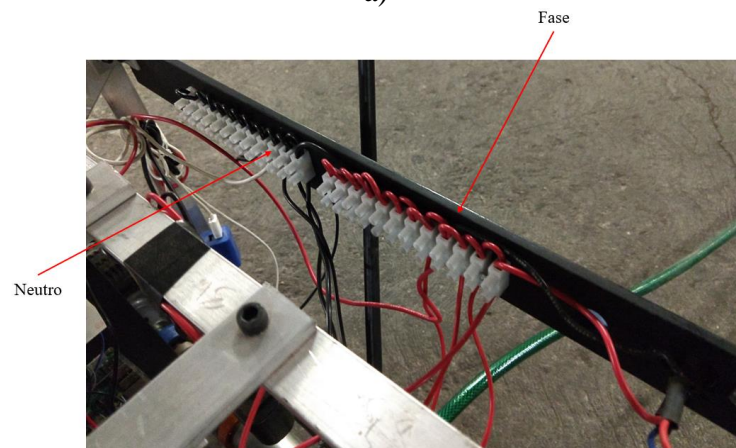


Figura 4.38. Integración del sistema.



a)



b)

Figura 4.39. Cuadro de energía: a) vista frontal, b) vista trasera.

El montaje de las fuentes se realiza en la parte frontal del robot, junto a la rodaja o rueda loca, figura 4.40. En la parte trasera se encuentran los motores de CD con su sistema de tracción, figura 4.41.

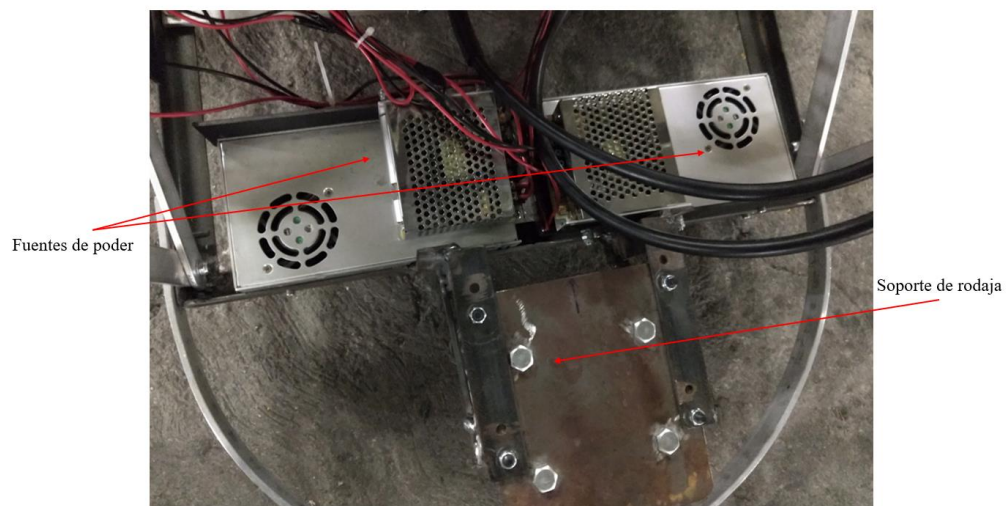
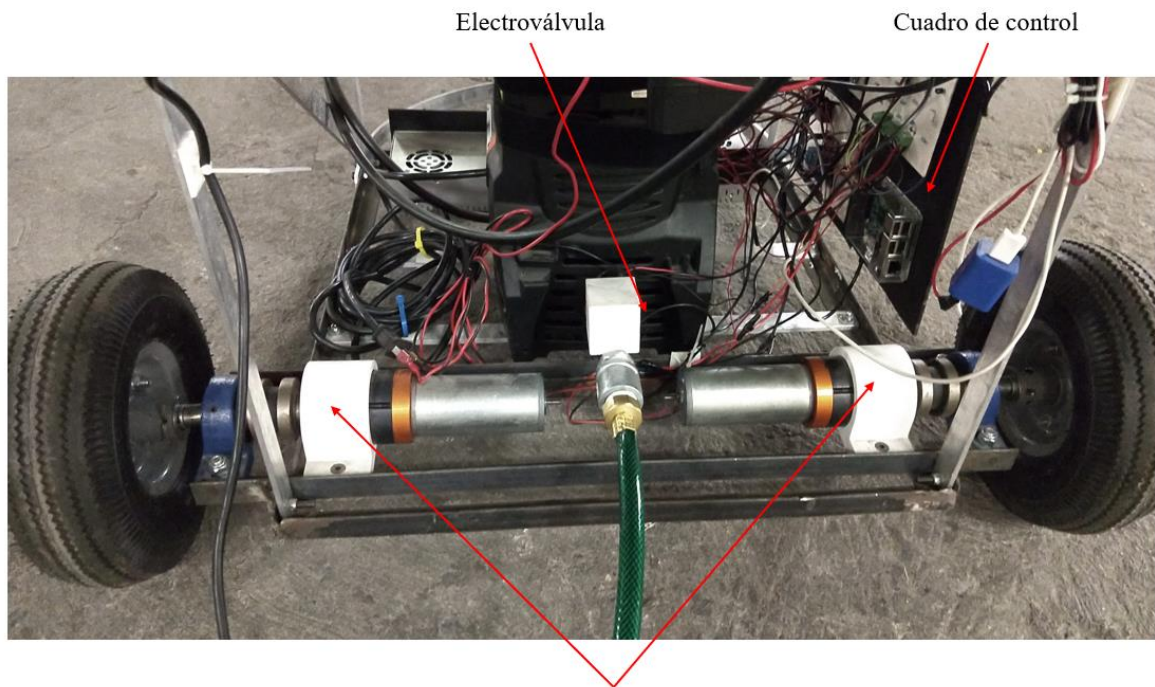


Figura 4.40. Parte frontal del robot.



Motores de DC con sistema de tracción
Figura 4.41. Parte trasera del robot.

En la rodaja se implementa un sistema de suspensión basado en cuatro resortes para darle mayor flexibilidad y soporte a la rodaja en terrenos irregulares, figura 4.42. Una vez construido el robot se procede a realizar pruebas preliminares para determinar que el sistema funciona correctamente, figura 4.43.

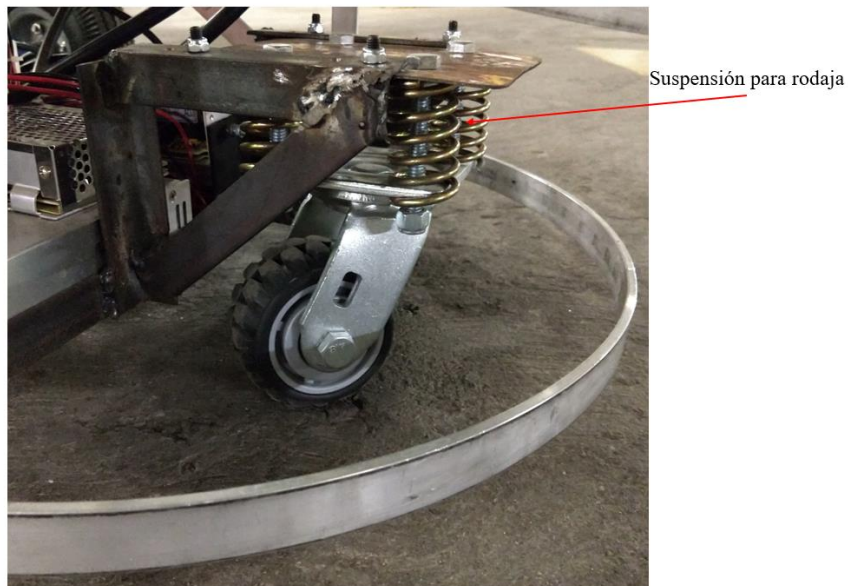


Figura 4.42. Suspensión de rodaja.



Figura 4.43. Prueba preliminar del sistema con limpieza a alta presión.

4.11 Diseño del control

El control del robot se encuentra dividido en tres etapas principales: control de la base móvil, control del sistema *pan-tilt*, y control del hidrolavado. Ya que el control de tele-operación del robot se desarrolla a través de un *gamepad*, en la figura 4.44 se muestra la distribución de sus botones.

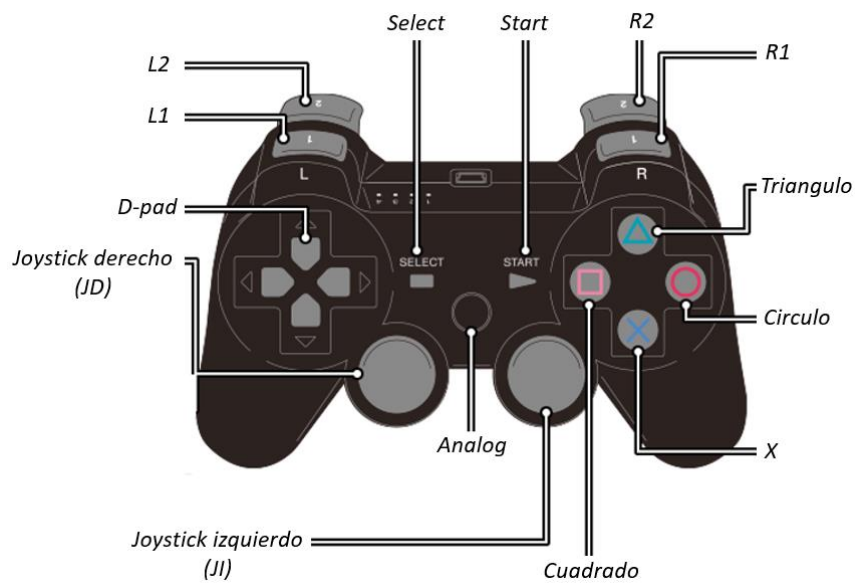


Figura 4.44. Diagrama de flujo del control de la base móvil.

El diagrama de flujo general para controlar el robo se muestra en la figura 4.45. Para iniciar el robot es necesario presionar el botón *Start*. Una vez que inicia el robot, el sistema *pan-tilt* busca su posición cero a partir de girar, primero, el sistema *tilt* hasta presionar un interruptor de posición, y segundo, de girar el sistema *pan* hasta presionar un segundo interruptor de posición. Los interruptores de posición del sistema *pan-tilt* se muestran en la figura 4.46. Una vez que el sistema *pan-tilt* se encuentra en su posición cero se puede iniciar con las tareas de limpieza. Para finalizar con la tele-operación del robot es necesario presionar el botón *Select*.

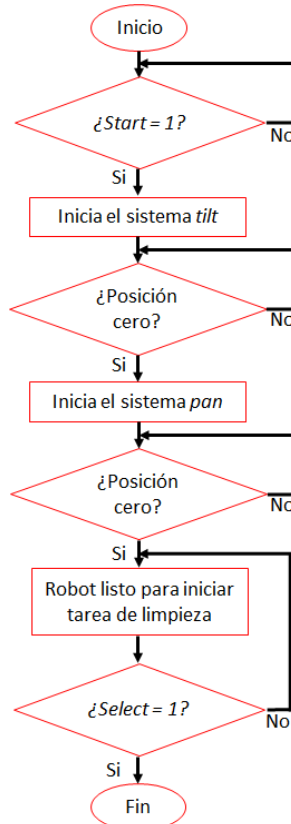


Figura 4.45. Diagrama general de control del robot.

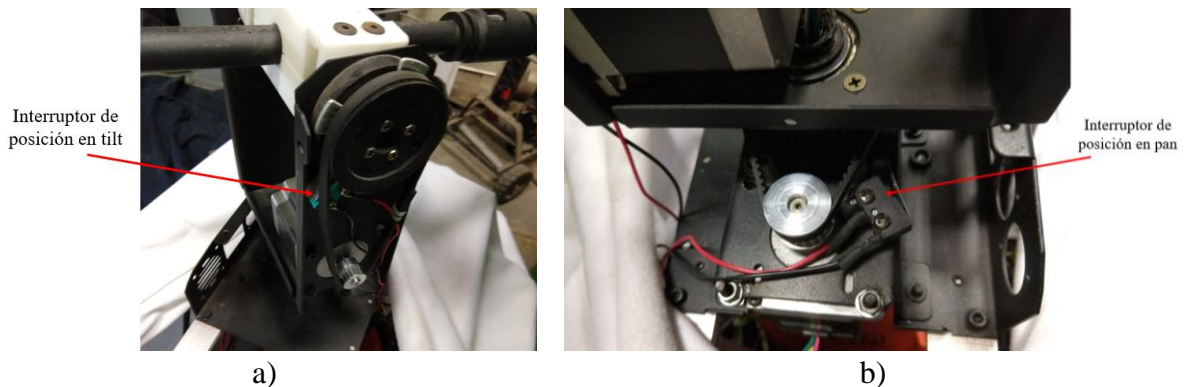
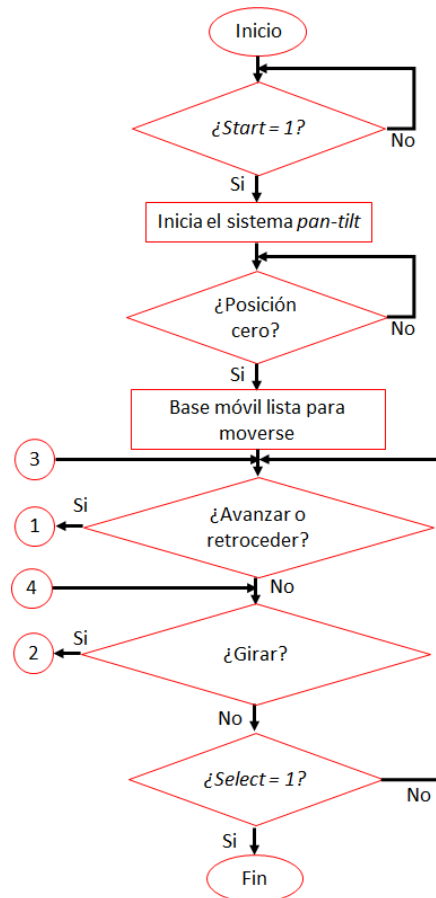


Figura 4.45. Interruptores de posición en el sistema *pan-tilt*: a) en *tilt*, b) en *pan*.

4.11.1 Control de la base móvil

Al iniciar el robot, y una vez que el sistema *pan-tilt* se encuentra en su posición cero, se puede desplazar la base móvil hacia adelante, atrás, o bien, girarla hacia la derecha o a la izquierda. Para desplazar la base móvil hacia adelante o atrás, sólo basta con mover el *joystick* derecho (*JD*) del *gamepad* hacia adelante o atrás, respectivamente, y presionar simultáneamente el botón *L2*. El botón *L2* funciona como un modo de seguridad para no permitir que el sistema *pan-tilt* y la base móvil funcionen al mismo tiempo, esto debido al modo de operación propuesto. Al mover el *joystick* hacia adelante, el *gamepad* envía una señal al controlador, donde su componente en “*x*” tiene un valor igual a uno; cuando se mueve hacia atrás se genera un valor de “*x*” igual a menos uno. De igual manera, si se desea girar al robot hacia la derecha o izquierda, se mueve el *joystick* derecho del *gamepad* hacia la derecha o izquierda, respectivamente, y se presiona simultáneamente *L2*. Esto produce un valor en la componente “*y*” de uno y menos uno, respectivamente, del *joystick* derecho. Cuando el *joystick* derecho se encuentra sin moverse, sus componentes “*x*” y “*y*” se encuentran en cero; de igual manera cuando *L2* se mantiene sin ser presionado se mantiene en cero, de lo contrario envía una señal de un uno lógico. En la figura 4.47 se muestra el diagrama de flujo del control de la base móvil.



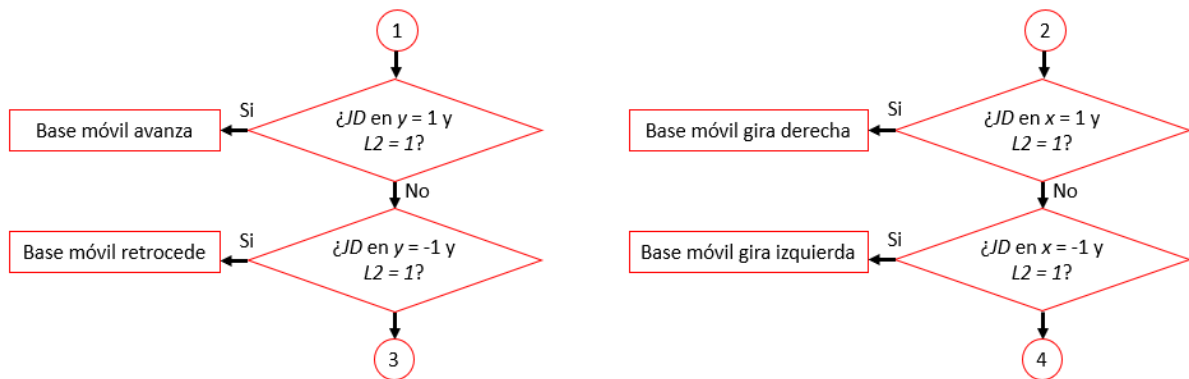
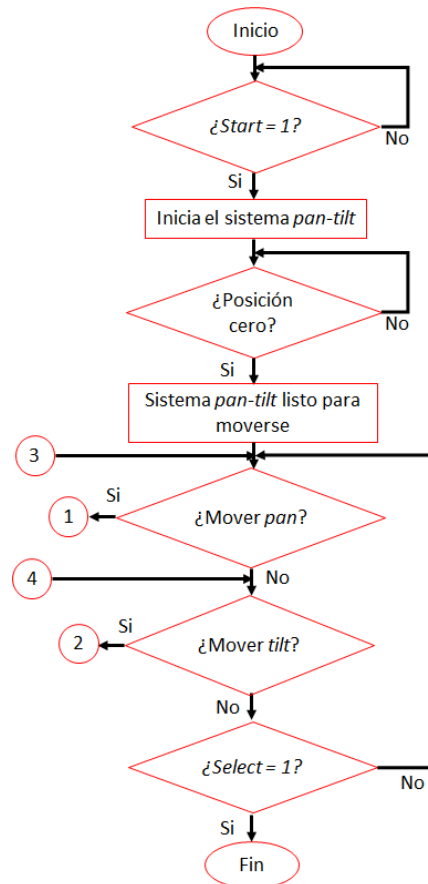


Figura 4.47. Diagrama de flujo del control de la base móvil.

4.11.2 Control del sistema *pan-tilt*

Para mover al sistema *pan-tilt* a lo largo de sus ángulos de apertura es necesario mover el *joystick* izquierdo (*J1*) del gamepad hacia la derecha o izquierda, y, hacia arriba o abajo. En la figura 4.48 se muestra el diagrama de flujo del control del sistema *pan-tilt*.



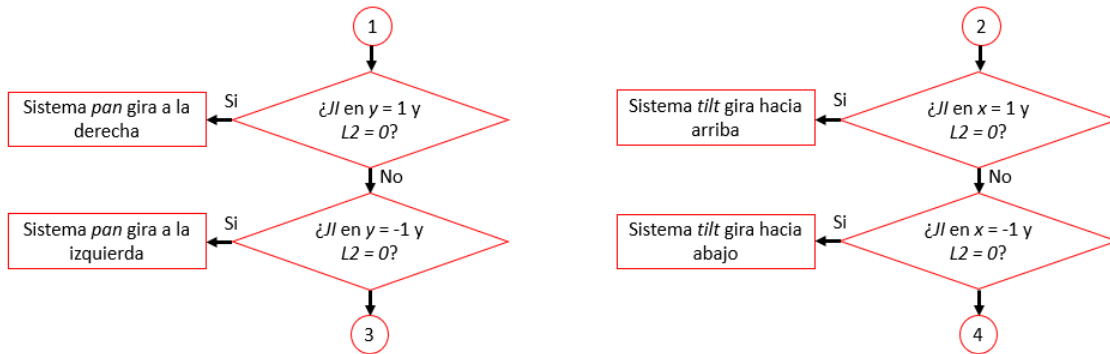
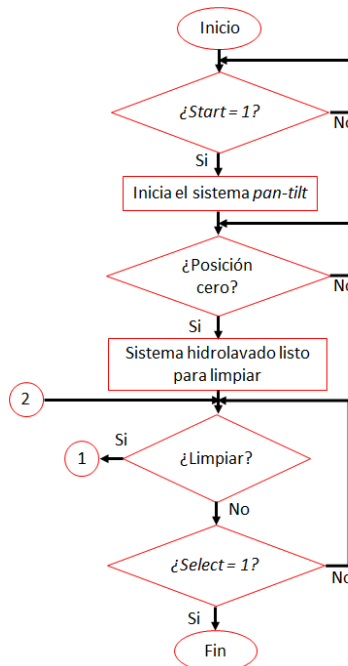


Figura 4.48. Diagrama de flujo del control del sistema *pan-tilt*.

Al mover el *joystick* hacia adelante el gamepad envía una señal al controlador, donde su componente en “y” tiene un valor igual a uno, desplazando al sistema *tilt* hacia arriba; cuando se mueve hacia abajo se genera un valor de “y” igual a menos uno, desplazando a *tilt* hacia abajo. De igual manera, si se desea girar al sistema *pan* hacia la derecha o izquierda, se mueve el *joystick* izquierdo del *gamepad* hacia la derecha e izquierda, respectivamente. Esto produce un valor en su componente “x” de uno y menos uno, respectivamente. Cuando el *joystick* se encuentra sin moverse, sus componentes “x” y “y” se encuentran en cero.

4.11.3 Control del hidrolavado

El diagrama de flujo del control del hidrolavado se muestra en la figura 4.49.



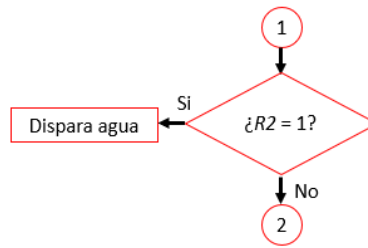


Figura 4.49. Diagrama de flujo del control de hidrolavado.

El disparo de chorro de agua alta presión se realiza al presionar el botón *R2* del *gamepad*, el cual genera una señal con un valor igual a uno, permitiendo la salida del agua; de otra manera, cuando el botón *R2* no se encuentra presionado, se genera una señal con un valor igual a cero, negando la salida de agua a alta presión.

CAPÍTULO 5.

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta la validación experimental del robot de limpieza a alta presión desarrollado, donde se valida la movilidad de sistema *pan-tilt*, el modelo cinemático desarrollado para la base móvil, el modelo dinámico planteado para el sistema *pan-tilt*, y el funcionamiento del robot durante una tarea de limpieza a alta presión. A partir de estas validaciones se obtienen las características principales de funcionamiento del robot.

5.1 Validación de movilidad del sistema *pan-tilt*

La validación de movilidad del sistema *pan-tilt*, al igual que la caracterización de una tarea de limpieza a alta presión, se realiza mediante la técnica de análisis de imágenes. Para ello es necesario tomar un video del sistema *tilt* y un video del sistema *pan* girando desde su posición cero hasta su posición final. Los videos se realizan posicionando un láser de luz verde sobre la punta de la pistola para observar el desplazamiento que genera el punto laser sobre una superficie.

Los videos se descomponen en fotogramas para crear una nueva imagen con el desplazamiento de cada sistema. Esto se realiza con la herramienta “*extract all frames*” del software IrfanView. Debido a que cada video cuenta con más de cincuenta fotogramas, se extraen sólo los fotogramas necesarios para recrear la movilidad de cada uno de los sistemas en una sola imagen. Estos fotogramas seleccionados se unen en una sola imagen con la herramienta “*Z project*” del software ImageJ. Las nuevas imágenes creadas se procesan mediante la herramienta “*angle*” de ImageJ para obtener el ángulo α de apertura del sistema *tilt* y del sistema *pan*, del punto Q al punto R respecto al punto P , de las figuras 5.1 y 5.2.

Los resultados de esta validación experimental se presentan en la tabla 5.1, en donde se observa que el sistema *tilt* no alcanza los 90° propuestos para *Pitch*, esto debido al posicionamiento mecánico del interruptor de posición, ya que si a la pistola se le permite seguir bajando colisionaría con la estructura de la base móvil. Por otro lado, el sistema *pan* prácticamente cuenta con los 180° propuestos para *Yaw*.

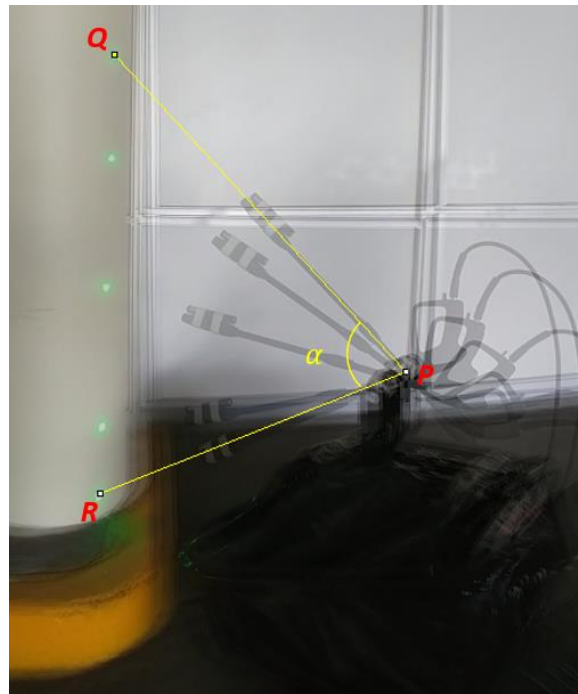


Figura 5.1. Desplazamiento del sistema *tilt*.

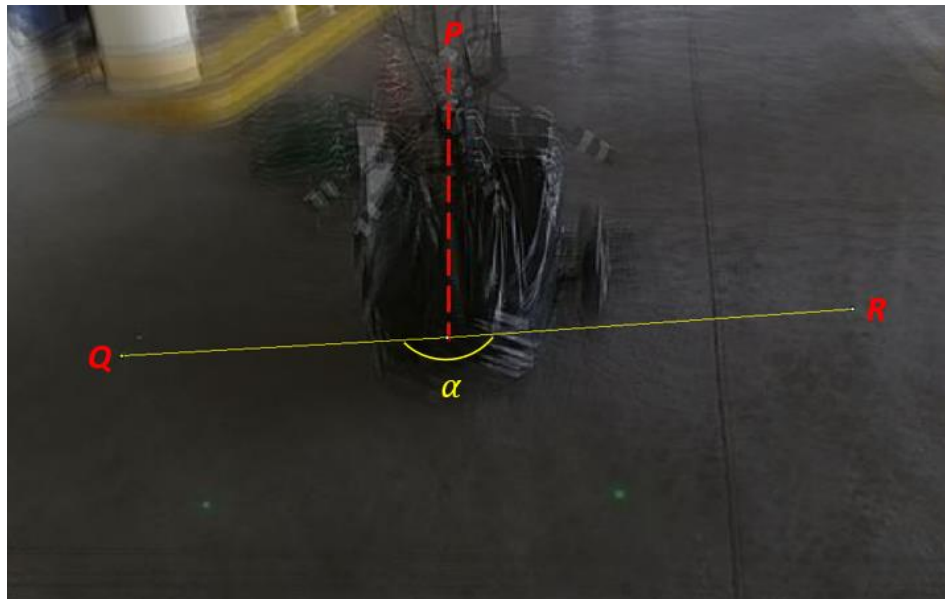


Figura 5.2. Desplazamiento del sistema *pan*.

Tabla 5.1. Resultados experimentales obtenidos respecto a los valores propuestos para la movilidad del sistema *pan-tilt*.

Ángulo	Apertura propuesta	Apertura obtenida
<i>Pitch</i>	90°	69.98°
<i>Yaw</i>	180°	179.22°

5.2 Validación del modelo cinemático de la base móvil

La validación del modelo cinemático de la base móvil se realiza, al igual que la validación anterior, mediante la técnica de análisis de imágenes. Para ello se toma un video de la base móvil desarrollando la trayectoria propuesta de un cuarto de circunferencia para girar 90° , mediante el uso de su tracción diferencial. El video se realiza posicionando un láser de luz verde en medio del sistema de tracción para observar el desplazamiento que genera el punto laser sobre el suelo.

El video se descompone en fotogramas para crear una nueva imagen con el desplazamiento del robot. Debido a que el video cuenta con más de cincuenta fotogramas, se extraen sólo los fotogramas necesarios para recrear el desplazamiento de la base móvil en una sola imagen. Estos fotogramas seleccionados se unen en una sola imagen. La nueva imagen creada se procesa para obtener el ángulo α de apertura del desplazamiento, del punto Q al punto R respecto al punto P , de la figura 5.3.

El resultado de esta validación experimental se presenta en la tabla 5.2, en donde se observa que la base móvil prácticamente alcanza el giro de 90° mediante la trayectoria de un cuarto de circunferencia propuesta.



Figura 5.3. Desplazamiento de la base móvil.

Tabla 5.2. Resultados experimentales obtenidos respecto a los valores propuestos para el desplazamiento de la base móvil.

Desplazamiento angular propuesto	Desplazamiento angular obtenido
90°	88.707°

5.3 Validación del modelo dinámico del sistema *pan-tilt*

La validación del modelo dinámico del sistema *pan-tilt* se realiza adaptando un dinamómetro mecánico al cople del eje de rotación de cada motor del sistema; se realiza de esta manera debido a que no se cuenta con datos de la relación de transmisión interna del motor, y de la constante de torque para realizar un cálculo en base al consumo de corriente. Debido a que el dinamómetro debe permanecer fijo y la carrera del resorte es pequeña, se gira sólo 24° el sistema *tilt* y 16° el sistema *pan*. Se utiliza una precarga de 4 Newton en el dinamómetro para eliminar algún error de lectura por la posición de este. El experimento se realiza girando el sistema *pan-tilt* durante una tarea de limpieza a alta presión. Se obtienen los resultados de la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Datos obtenidos del experimento.

Sistema	Desplazamiento angular (°)	Lectura del dinamómetro (N)
<i>Tilt</i>	24	8.5
<i>Pan</i>	16	12.5

Utilizando las ecuaciones 5.1 y 5.2 se obtiene el torque desarrollado por el motor y por la transmisión; considerando una relación de transmisión en el sistema *tilt* de 4 y una relación de 4.5 en el sistema *pan*. El diámetro de los coples de los motores es de 0.01836 m. Los resultados experimentales se muestran en la tabla 5.4.

$$d = \theta r \tag{5.1}$$

$$\tau = Fd \tag{5.2}$$

donde d es el desplazamiento lineal respecto a un desplazamiento angular, θ es el desplazamiento angular, r es el radio del eje de giro (el radio del cople), τ es el torque desarrollado, y F es la fuerza desarrollado en Newton.

Tabla 5.4. Resultados experimentales del torque del sistema *pan-tilt*.

Sistema	Torque calculado (Nm)	Torque Simulado (Nm)	Torque en el actuador (Nm)	Torque en la transmisión (Nm)
<i>Tilt</i>	3.488	3.5	0.9914	3.9656
<i>Pan</i>	1.512	1.528	1.2484	5.6181

En los resultados de la tabla anterior se puede observar que el torque en la transmisión del sistema *tilt* es un poco mayor que el calculado y el simulado, esto se debe al ensamble mecánico y el maquinado de las piezas que lo constituyen. En cuanto al sistema *Pan* se puede observar que el torque en su transmisión es más de tres veces mayor que el calculado y el simulado, esto debido principalmente a las imperfecciones en el ensamble mecánico; aunque se puede observar

también que el torque desarrollado en esta parte del robot es aproximadamente la suma de los torques calculados en ambos sistemas, es decir, que cumple con la propagación de fuerzas del sistema.

5.4 Validación del prototipo en funcionamiento

La validación del prototipo en funcionamiento se lleva a cabo mediante la limpieza de un área sucia, esto, para obtener las características principales del robot como: el porcentaje de limpieza y la velocidad de limpiado. Para ello se procede a limpiar una tela tipo licra color blanco, con un área de 0.84 m^2 , ensuciada con lodo. Se toma una fotografía antes de limpiar, figura 5.4, y una después de limpiar, figura 5.5, y mediante un análisis de imágenes se procede a comparar ambas áreas (sucia y limpia).

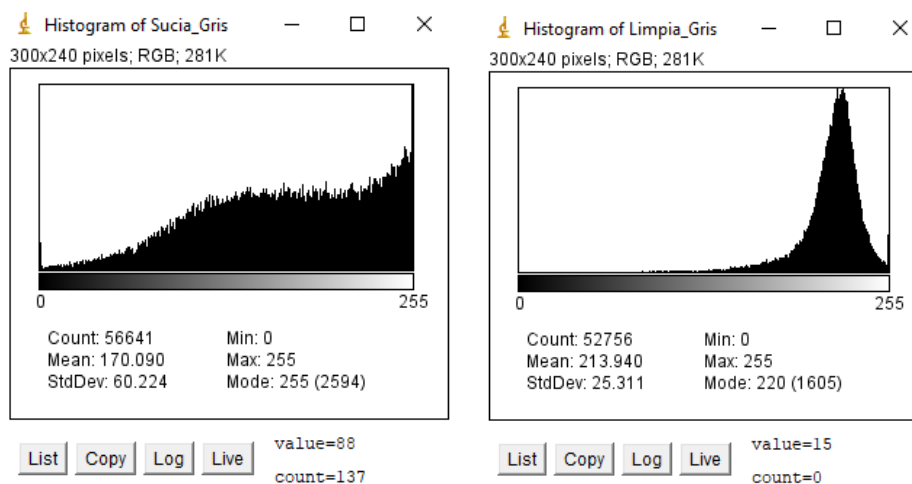
Para analizar las imágenes es necesario convertirlas a escala de grises para poder compararlas. Con la herramienta “*Polygon sections*” de ImageJ se selecciona el área a analizar mediante un recuadro amarillo, como se muestra en las figuras 5.4 y 5.5. Utilizando la herramienta “*Histogram*” se obtiene el histograma de cada una de las imágenes, figura 5.6.



Figura 5.4. Área sucia a limpiar.



Figura 5.5. Área limpiada.



a)

b)

Figura 5.6. Histogramas del área a limpiar: a) antes de ser limpiada, b) después de ser limpiada.

En los histogramas de la figura 5.6 se puede observar que para alcanzar el color blanco puro se necesita una saturación de 255 en la escala de grises. El valor *Mean* de los histogramas es el valor promedio de los valores de la sección a analizada, por lo que se puede observar que

el área sucia cuenta con un valor de 170.090, y el área ya limpiada cuenta con un valor de 213.940. De esta manera, considerando que 170.090 es el valor de suciedad, 213.940 ese valor de la limpieza desarrollada, y que 255 es el valor de limpieza total, se obtiene un porcentaje de limpieza del área del 51.6429%. El tiempo de la limpieza desarrollada en la tela tipo licra es de 3 minutos y 36 segundos. Con los datos se obtienen las características de la tabla 5.5, características principales del robot.

Tabla 5.5. Características obtenidas de la tarea de limpieza realizada.

Característica	Unidad de medida
Velocidad de limpieza	0.003 m ² /segundo
Porcentaje de limpieza	51.649%
Presión de limpieza	1450 PSI

Los datos de la tabla 5.5 representan las características obtenidas del robot para la limpieza de una tela tipo licra blanca ensuciada de lodo; estas características pueden variar respecto a la superficie a limpiar, el operador del robot y las condiciones de suciedad.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones del proyecto.

- Se diseñó, fabricó y controló un primer prototipo de un robot de servicio tele-operado para asistir tareas de limpieza a alta presión, en base a los requisitos de diseño obtenidos de la caracterización de una tarea de limpieza industrial.
- La caracterización de una tarea de limpieza profesional a alta presión, a través de un análisis de imágenes, permitió obtener los ángulos de apertura de las trayectorias articulares y así definir los movimientos que debería seguir el robot durante la tarea.
- Se obtuvo un prototipo constituido por una base móvil de tres ruedas, con locomoción de tracción diferencial, y un sistema *pan-tilt*, de dos grados de libertad; capaz de reproducir las trayectorias articulares que realiza una persona al desarrollar una tarea de limpieza industrial a alta presión.
- El robot permite realizar limpieza con chorros de agua a 1450 PSI, presión superior a los 1000 PSI para ser considerada alta presión; con un espacio de trabajo en el sistema *pan-tilt* de un cuarto de esfera, pudiéndose desplazar a cualquier lugar que a base móvil se lo permita.
- La tele-operación del robot mediante un *gamepad* comercial resultó una manera sencilla y exitosa de operar o manipular al robot vía remota.
- El robot es capaz de realizar limpieza a alta presión de manera exitosa sin sufrir alguna pérdida de señal o calentamiento en sus actuadores y sistemas eléctrico y electrónico.

TRABAJO FUTURO

Para un trabajo futuro se realizan las siguientes consideraciones.

- Realizar el diseño y desarrollo de una cubierta que proteja al robot en su totalidad para que pueda ser introducido en cualquier ambiente, de esta manera también será sencillo limpiarlo de cualquier suciedad que se le adhiera.
- Con el fin de llegar a una comercialización, se propone considerar un diseño industrial del robot.
- Para brindar mayor autonomía al robot, se plantea como trabajo futuro el uso de baterías en vez de fuentes ya que de esta manera no será necesario el uso de un cable para desplazarse.
- En este trabajo se presenta un primer prototipo de laboratorio de un robot de limpieza profesional, por tanto, se recomienda una manufactura con mayor precisión y mejores materiales que le darán al robot mayor rigidez y robustez para ser introducido en prácticamente cualquier lugar.
- Se propone el diseño y desarrollo de una suspensión para las ruedas traseras, para mejorar la estabilidad de la rodadura en terrenos difíciles.

OTROS PRODUCTOS

- Artículo: “Análisis dinámico y estático de un robot móvil sometido a una fuerza externa de repulsión”, presentado en el 16° Congreso Nacional de Mecatrónica, y publicado en la revista Innovaciones en Mecatrónica por la Asociación Mexicana de Mecatrónica. Anexo A.
- Artículo: “Experiences for a user-friendly operation of Cassino Hexapod III”, presentado en el 27th International Conference on Robotics in Alpe – Adria – Danube. Producto derivado de una estancia académica en el LaRM (Laboratorio de Robótica y Mecatrónica) de la Universidad de Cassino en Italia. Anexo B.
- Artículo: “Experiences on a hybrid locomotion approach to overcome obstacles with Casino Hexapod III”, aceptado en The 2nd IFToMM ITALY Conference. Producto derivado de una estancia académica en el LaRM (Laboratorio de Robótica y Mecatrónica) de la Universidad de Cassino en Italia. Anexo C.

REFERENCIAS

- [1] OMS, "Cada año mueren 12.6 millones de personas a causa de la insalubridad del medio ambiente", 2016, disponible en: <http://who.int/mediacentre/news/releases/2016/deaths-attributable-to-unhealthy-environments/es>.
- [2] MADERPLAST, "Porcicultura, jaulas y corrales", 2016, disponible en: <http://www.maderplast.co/index.php/49-porcicultura-jaulas-corrales-parideras-porcinas-corrall-preceba-ceba-engorde-cerdos>.
- [3] RECOVERY, "Hidrolavado industrial", 2018, disponible en: <http://recoverychile.cl/project/hidrolavado-industrial-2/>
- [4] NILFISK, "Multicleaner 7-53", 2016, disponible en: http://webparts.nilfisk-advance.com/pdf/107309941_MULTICLEANER_EN.pdf.
- [5] COMBIJET, "Combijet RJE100", disponible en: <http://www.combijet.com/Assets/Images/uploadedContent/CMS/productsImages/combijetije1000cleaningrobottechnicaldata1444314823.pdf>.
- [6] IFR, "World robotics 2017 service robots", 2017, disponible en: https://ifr.org/downloads/press/Executive_Summary_WR_Service_Robots_2017_1.pdf
- [7] HAEGELE M., Introduction into Service Robots, World Robotics 2016 Service Robots, pp. 8-17, 2017.
- [8] IFR, "Why service robots boom worldwide", Brussels, 2017. Recuperado de: https://ifr.org/downloads/press/Presentation_PC_11_Oct_2017.pdf.
- [9] LEMASA, "Prácticas Recomendadas en la Utilización de Hidrojet a Alta Presión", Brasil, 2016. Recuperado de: <http://www.lemasa.com.br>.
- [10] ENFENCO, "Sistemas de Limpieza con Agua a Presión", Colombia, 2016. Recuperado de: <http://www.enefenco.co>.
- [11] KARCHER, "Hidrolavadora de Alta Presión", 2016. Recuperado de: <https://www.kaercher.com/mx/home-garden/hidrolavadoras-de-alta-presion>.
- [12] MAKITA, "Alta Presión para una Limpieza Eficaz", 2016. Recuperado de: <http://www.makita.es/lijsten/custom/Catalog/folleto-hidrolimpiadoras.pdf>.
- [13] HIDROLIMPIEZA, "Hidrolimpieza Industrial", 2017. Recuperado de: <http://www.hidrolimpieza.mx>.
- [14] N. Careddu & O. Akkoyun, "An investigation on the efficiency of water-jet technology for graffiti cleaning", Journal of cultural heritage 19, pp. 426-434, Elsevier, 2016.
- [15] P. Sanmartín, F. Cappitelli, et al, "Current methods of graffiti removal: A review", Construction and building material 71, pp. 363-374, Elsevier, 2014.

-
- [16] A. Guha, R. M. Barron, et al, "An experimental and numerical study of water jet cleaning process", Journal of materials processing technology, pp. 610-618, Elsevier, 2011.
- [17] G. Feng, Z. Li, et al, "Effect of high pressure water jet cleaning device on the motion stability of an in-pipe cleaning robot", International conference on robotics and biomimetics Qingdao, IEEE, 2016.
- [18] H. Kang & J. Oh, "Water cleaning motion of the in-pipe robot with screw drive inside the water pipes", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, pp. 894-901, 2012.
- [19] KTV GROUP, "Revolutionizing cleaning robots", KTV GROUP, Norway, 2013.
- [20] Combijet, "Combijet RJE100", disponible en: <http://www.combijet.com/Assets/Images/uploadedContent/CMS/productsImages/combijet/rje1000cleaningrobottechnicadata1444314823.pdf>.
- [21] AERONES, "Cleaning drone", 2018, disponible: https://www.aerones.com/eng/drones/cleaning_drone.
- [22] DUGAR, "Lavadepósitos automático mod. robot móvil", 2018, disponible: <http://www.dugarsl.com/producto/lavadepositos-automatico-mod-robot-movil>.
- [23] M. A. Colucci, "Outdoor home cleaning robot – system and method", U.S. 9,114,440 B1, Agosto, 2015.
- [24] S. G. Pons, "Cleaning robot for refrigerated chambers and trailers", WO 2014/207274 A1, Diciembre, 2014.
- [25] S. P. Choi, "Washing robot system for works", U.S. 6,215,268 B1, Abril, 2001.
- [26] J. Sadenberg, "Method and device for the cleaning of animal stalls", U.S. 6,565,668 B1, Mayo, 2003.
- [27] SEYMA, "Limpieza de depuradoras con equipos alta presión y gran caudal", 2016, recuperado de: <http://www.seyma.eu>.
- [28] KARCHER, "Karcher set de espuma Inno Foam para limpieza con alta presión", 2014, recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=o4lixrSajPw>.
- [29] FALCH, "Cómo limpiar encofrados con agua a presión", 2015, recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=i0i9SuC-hUQ>.
- [30] IrfanView, "¿Can IrfanView save a frame from avi/mpg?", 2008, recuperado de: <https://irfanview-forum.de/showthread.php?t=1974>.
- [31] ImageJ, "Z-functions", 2016, recuperado de: <https://imagej.net/Z-functions>.
- [32] F. P. Beer, E. R. Johnston, et al, "Mecánica vectorial para ingenieros Estática", 8va edición, Mc Graw Hill, México, 2007.
- [33] F. P. Beer, E. R. Johnston, et al, "Mecánica vectorial para ingenieros Dinámica", 9na edición, Mc Graw Hill, México, 2010.
- [34] NILFISK, "Operating instructions Multicleaner 7-53", 2016, recuperado de: https://www.koalaproducs.nl/downloads/dl/file/id/184/instructielijst_multicleaner.pdf
- [35] A. Ollero, "Robótica Manipuladores y Robots Móviles", Marcombo, España, 1ra. Edición, 2001.
-

- [36] J. F. Acuña, “Diseño e implementación de un algoritmo para la locomoción en superficie vertical de un robot hexápodo”, Tesis de M.T.A., Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada de IPN, Querétaro, Mexico, 2015.
- [37] G. Beekman, “Introducción a la computación”, Pearson Educación, 1999.
- [38] L. E. S. Guzmán, et al, “Flotilla de robots para trabajos en robótica cooperativa”, 2014.
- [39] F. M. Ramírez, “Control embebido de un vehículo guiado automáticamente mediante redes neuronales artificiales”, Tesis de maestría, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2004.
- [40] N. H. Reder, “Robot hexápodo basado en 68HC11”, 2012, recuperado de: http://webpersonal.uma.es/~iherrero/index.php?option=com_content&view=article&id=51:hexapodo&catid=40:oldpfc&Itemid=66.
- [41] E. R. Ramos-Silvestre, R. Morales-Guerrero, et al, “Modelado, simulación y construcción de un robot móvil de ruedas tipo diferencial”, *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, Vol. 4, pp.762-771, septiembre, 2010.
- [42] Friis D. “Industrial Robots – Definition and Classification”, *World Robotics 2016 Industrial Robots*, pp. 25-34, 2017.
- [43] Haegele M. “Introduction into Service Robots”, *World Robotics 2016 Service Robots*, pp. 8-17, 2017.
- [44] Datta S. et al. “Development of autonomous mobile robot with manipulators for manufacturing environment”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, No. 38, pp. 536-542, 2007.
- [45] Hvilshøj M. & Bøgh S. “Little Helper – An Autonomous Industrial Manipulator Concept”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Intech, Vol. 8, No. 2, pp. 1-11, 2011.
- [46] Minca E. et al. “Modelling and Control of an Assembly/Disassembly Mechatronics Line Served by Mobile Robot with Manipulator”, *Control Engineering Practice*, Elsevier, No. 31, pp. 50-62, 2014.
- [47] Robotnik, “RB-1”, 2017, recuperado de: http://www.robotnik.es/web/wp-content/uploads/2014/06/RB-1_Datasheet_e.pdf.
- [48] J. Pérez-Serrano, “Diseño y construcción de un robot móvil con dos motores independientes y una rueda libre”, Tesina de Especialidad, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del IPN, 2010.
- [49] M. A. Sotelo, “Lateral control for autonomous steering of ackerman-like vehicles”, *Robotics and autonomous systems*, pp. 223-233, 2003.
- [50] S. G. Tzafestas, “Introduction to mobile robot control”, Elsevier, 2014.
- [51] I. Salgado, D. Cruz-Ortiz, et al, “Output feedback of a skid-stered mobile robot based on the super-twisting algorithm”, *Control engineering practice*, pp. 193-203, 2017.
- [52] F. B. Seely & N. E. Ensign, “Analytical mechanics for engineers”, John Wiley & Sons Inc., New York, 1921.
- [53] Tsai L. “Robot Analysis”, John Wiley & Sons, Inc., USA, 1ra. Edición, 1999.

-
- [54] R. Jazar, "Theory of applied robotics: Kinematics, dynamics, and control", 1ra. Edición, Springer, 2010.
- [55] C. A. Matilde Domínguez, "Obtención del modelo dinámico inverso de un robot bípedo de 12 grados de libertad mediante el algoritmo recursivo de Newton-Euler", Tesis de M.T.A., Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada de IPN, Querétaro, Mexico, 2017.
- [56] Marghitu D. B. "Mechanisms and Robots Analysis with MATLAB®", Springer, Inglaterra, 1ra. Edición, 2009.
- [57] M. Ardemá, "Newton-Euler dynamics", Springer, 2005.
- [58] J. J. Craig, "Robótica", 3ra. Edición, Prentice Hall, 2006.
- [59] T. R. Kurfess, "Robotics and automation handbook", CRC Press, 2005.
- [60] F. Monasterio-Huelin, "Motor DC, etapa de potencia y PWM", Universidad Politécnica de Madrid, 2016.
- [61] Barrientos A. et al. "Fundamentos de Robótica", Mc Graw Hill, España, 1ra. Edición, 1997.
- [62] Yun X. "Stability Analysis of the Internal Dynamics of a Wheeled Mobile Robot", Journal of Robotic Systems. Calhoun, Vol. 14, No. 10, pp. 697-709, 1997.
- [63] Goris K. "Autonomous Mobile Robot Mechanical Design". Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Bruselas, 2005.
- [64] D. Huang, J Zhai, et al, "Disturbance observer-based robust control for trajectory tracking of wheeled mobile robots", Neurocomputing, pp. 74-79, 2016.
- [65] L. Xin, Q. Wang, et al, "Robust adaptive tracking control of wheeled mobile robot", Robotics and autonomous systems, pp. 36-48, 016.
- [66] J. Juárez-Palafox, D. Muro-Maldonado, et al, "Construcción de un robot móvil", Tesis de Licenciatura, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del IPN, 2005.
- [67] R. Shah, Sozcelik, et al, "Design of a highly maneuverable mobile robot", Procedia Computer Science, pp. 170-175, 2012.
- [68] E. C. Orozco-Magdaleno, E. Castillo-Castañeda, et al, "Análisis dinámico y estático de un robot móvil sometido a una fuerza externa de repulsión", Innovaciones en mecatrónica, pp. 67-80, Asociación Mexicana de Mecatrónica, 2017.

Resumen del artículo publicado en Innovaciones en Mecatrónica, ISBN 978-607-9394-11-0.

Análisis dinámico y estático de un robot móvil sometido a una fuerza externa de repulsión

Orozco Magdaleno Ernesto Christian, Castillo Castañeda Eduardo, Mecalco Gutiérrez María Erika, Chaparro Rico Betsy Dayana Marcela, Jiménez Díaz Gilberto.

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Querétaro, Instituto Politécnico Nacional, CICATA-IPN-QRO

Resumen

El análisis de las fuerzas que actúan en un robot es fundamental para su correcto diseño mecánico, y posterior puesta en funcionamiento. En este artículo se presenta el análisis dinámico y estático de un robot móvil, compuesto de una base móvil y un sistema pan-tilt montado sobre él, que se encuentra sometido a una fuerza externa de repulsión. El modelo dinámico del sistema se obtiene mediante la formulación de Newton-Euler a partir del análisis de las fuerzas internas y externas que actúan en él, considerando que la base móvil se encuentra estática y el sistema pan-tilt en movimiento, soportando la fuerza externa de repulsión. El equilibrio estático del robot se obtiene bajo el principio de D'Alembert, permitiendo que el robot no volqué por acción de la fuerza externa. Una simulación en SolidWorks permite validar el análisis dinámico propuesto. Los análisis y simulaciones presentados en este artículo son válidos para la configuración y modo de operación del robot móvil propuesto.

Palabras clave: Robot móvil, análisis estático, análisis dinámico, fuerza externa, fuerza de repulsión.

Resumen del artículo presentado en el 27th International Conference on Robotics in Alpe – Adria – Danube.

Experiences for a User-Friendly Operation of Cassino Hexapod III

Ernesto Christian Orozco Magdaleno¹, Daniele Cafolla², Marco Ceccarelli³, Eduardo Castillo Castañeda¹, Giuseppe Carbone²

¹Research Center in Applied Science and Advanced Technology (CICATA-IPN-QRO), National Polytechnic Institute, Queretaro, Mexico, eorozcom1600@alumno.ipn.mx

²CESTER (Research Centre for Industrial Robot Simulation and Testing), Technical University of Cluj-Napoca, Cluj-Napoca, Romania, contact@danielecafolla.eu

³LARM (Laboratory of Robotics and Mechatronics), University of Cassino and South Latium, Italy, giuseppe.carbone@unicas.it

Abstract. This paper describes a hybrid omniwheeled-legged hexapod robot, named as Cassino Hexapod III, which has been designed and built at LARM in Cassino. Direct and inverse kinematics are outlined and implemented in a proper Arduino code for achieving a user interface with an Android application, which can manage robot operation in a simple user-friendly manner. Laboratory experiences have been carried out to demonstrate the suitable operation modes of Cassino Hexapod III in terms of wheeled and legged gaits. Specific attention is addressed to the use of omniwheels for achieving complex turning paths.

Keywords: Hexapod Walking Robots, Experimental Robotics, Design, Tests.

Resumen del artículo aceptado en The 2nd IFToMM ITALY Conference.

Experiences on a Hybrid Locomotion Approach to Overcome Obstacles with Casino Hexapod III

Ernesto Christian Orozco Magdaleno¹, Giuseppe Carbone², Eduardo Castillo Castañeda¹ and Marco Ceccarelli²

¹ National Polytechnic Institute, e-mail : eorozcom1600@alumno.ipn.mx, ecastilloca@ipn.mx

² University of Cassino and South Latium, e-mail: giuseppe.carbone@unicas.it, ceccarelli@unicas.it

Abstract. This paper describes the Cassino Hexapod III, a hybrid omniwheeled-legged hexapod robot, which has been designed and built at LARM in Cassino. Inverse kinematics is outlined to simulate the hybrid locomotion of the robot in MATLAB environment. Namely, four different paths are simulated as a strategy for overcoming small obstacles. The implementation of the proposed path planning is achieved by using an Arduino script in combination with a specifically developed Android interface. Experimental tests are carried out to demonstrate the engineering feasibility and effectiveness of the proposed paths for overcoming obstacles with Cassino Hexapod III.

Keywords: Hexapod Walking Robots, Experimental Robotics, Hybrid Locomotion, Tests.