



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA
MECÁNICO PARA UN ROBOT MANIPULADOR MÓVIL EN
EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN “TELE – OPERACIÓN
BILATERAL CORPORATIVO DE MÚLTIPLES
MANIPULADORES MÓVILES” APROBADO POR EL
CONSORCIO ECUATORIANO PARA EL DESARROLLO DE
INTERNET AVANZADO – CEDIA”**

AUTORES: RENATTO SEBASTIÁN ROBAYO MOYA

DIEGO ANDRÉS PAZMIÑO JÁCOME

DIRECTOR: ING. OSCAR ARTEAGA

LATACUNGA

2017



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA MECÁNICO PARA UN ROBOT MANIPULADOR MÓVIL EN EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN “TELE – OPERACIÓN BILATERAL CORPORATIVO DE MÚLTIPLES MANIPULADORES MÓVILES” APROBADO POR EL CONSORCIO ECUATORIANO PARA EL DESARROLLO DE INTERNET AVANZADO – CEDIA**” realizado por los señores **Renatto Sebastián Robayo Moya** y **Diego Andrés Pazmiño Jácome**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **Renatto Sebastián Robayo Moya** y **Diego Andrés Pazmiño Jácome** para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, 23 de Enero del 2017

ING OSCAR BLADIMIR ARTEAGA LÓPEZ

DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Renatto Sebastián Robayo Moya** y **Diego Andrés Pazmiño Jácome**, con cédula de identidad N° 1803105228 y 1804618831, declaramos que este trabajo de titulación **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA MECÁNICO PARA UN ROBOT MANIPULADOR MÓVIL EN EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN “TELE – OPERACIÓN BILATERAL CORPORATIVO DE MÚLTIPLES MANIPULADORES MÓVILES” APROBADO POR EL CONSORCIO ECUATORIANO PARA EL DESARROLLO DE INTERNET AVANZADO – CEDIA”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 23 de Enero del 2017

Renatto Sebastián Robayo Moya
C.C.: 1803105228

Diego Andrés Pazmiño Jácome
C.C.: 1804618831



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Renatto Sebastián Robayo Moya** y **Diego Andrés Pazmiño Jácome**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA MECÁNICO PARA UN ROBOT MANIPULADOR MÓVIL EN EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN “TELE – OPERACIÓN BILATERAL CORPORATIVO DE MÚLTIPLES MANIPULADORES MÓVILES” APROBADO POR EL CONSORCIO ECUATORIANO PARA EL DESARROLLO DE INTERNET AVANZADO – CEDIA**” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Latacunga, 23 de Enero del 2017

Renatto Sebastián Robayo Moya
C.C.: 1803105228

Diego Andrés Pazmiño Jácome
C.C.: 1804618831

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi madre, Martha y a mi padre, Pedro, por el apoyo diario e infalible a lo largo de toda mi formación académica, por el aliento y la comprensión en las adversidades, gracias a ello, y a su enorme ejemplo de vida culmino esta etapa para continuar en el proyecto que me he planteado. A mi hermana, Adry por ser la guía que siempre se puso en mi lugar, mi maestra desde mis primeras letras. Finalmente al ser más importante que llego a mi vida, mi hija, Dome tu eres la razón de este, y todos mis proyectos.

Sebastián

AGRADECIMIENTO

En primer lugar mi agradecimiento a Dios por cada día de vida y por las bendiciones que ha derramado en cada paso.

A la universidad de las fuerzas armadas ESPE- Latacunga y a todos los docentes que han sido parte de mi formación profesional, por su noble y sacrificada labor al impartir su conocimiento.

Mi eterno agradecimiento a mis padres al estar día a día luchando por entregarme a la sociedad como una persona de bien, gracias a ello he aprendido a luchar y perseverar por un objetivo, no me alcanzaría la vida para corresponder su apoyo.

Agradezco a toda mi familia amigos y quienes de una u otra manera estuvieron para brindarme un consejo o una palabra de apoyo.

Razones suficientes que han permitido culminar con esta etapa de mi vida, con el compromiso de seguir adelante y aprovechar de la mejor manera los conocimientos adquiridos en el presente trabajo

Sebastián

DEDICATORIA

*Dedico este y todos mis logros a Dios,
Que siempre está conmigo llevándome de su mano.*

*Dedico mi esfuerzo y sacrificio a mis padres,
quienes con su voluntad y cariño han
Invertido sus fuerzas, paciencia y tiempo en mí.*

*Dedico de manera especial este trabajo a mis dos pilares fundamentales
Mis pequeños hijos Pablo Andrés y Paula Camila
que son el motor de mi vida.*

Diego

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme fuerza para continuar día a día en este proceso de mi vida. Debo agradecer de manera especial y con todo mi amor a mis padres Tere y Willy que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano en cada momento gracias por su apoyo, consejos, comprensión, amor y sobre todo su paciencia.

A mi compañero de tesis Sebastián por su amistad.

Agradezco de manera especial al Ingeniero Oscar Arteaga, y al Doctor Víctor Andaluz, por su colaboración en el desarrollo de este proyecto de tesis, y a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

A todas las personas que formaron parte de mi vida en el transcurso de esta maravillosa experiencia.

Diego

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA	i
CERTIFICACIÓN	ii
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTO	viii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xvii
RESUMEN	xviii
ABSTRACT	ix
PRESENTACIÓN	xx

CAPÍTULO I

1. FUNDAMENTO TEÓRICO	1
1.1. Definición del problema de investigación	1
1.2. Objetivo General	1
1.3. Objetivos Específicos	1
1.4. Hipótesis	2
1.5. Variables de la Investigación.....	2
1.6. Generalidades	2
1.6.1. Robótica.....	2
1.6.2. Locomoción	5
1.6.3. Manipuladores	7
1.6.4. Plataformas Móviles.....	7
1.6.5. Brazos Robóticos.....	10

1.6.6. Configuraciones Robots Industriales	11
1.6.7. Manipulador Móvil.....	15
1.6.8. Tipos de Manipulador Móvil	17

CAPÍTULO II

2. DISEÑO, MODELAMIENTO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES.....	21
2.1. Parámetros de diseño del brazo manipulador	21
2.1.1. Configuración del brazo	21
2.1.2. Capacidad de carga.....	21
2.1.3. Grados de libertad	21
2.1.4. Velocidad	21
2.1.5. Alcance máximo	22
2.2. Geometría de la Estructura	22
2.3. Cálculo de cargas.....	22
2.3.1. Cargas en brazo robótico.....	22
2.3.2. Velocidad y aceleración en el extremo operativo del brazo	34
2.4. Diseño del brazo manipulador	35
2.4.1. Selección de actuadores.....	35
2.4.2. Transmisiones	37
2.4.3. Modelado de Frames:.....	38
2.4.4. Modelado Gripper.	42
2.4.5. Ensamble.....	44
2.6. Selección de materiales del brazo.....	48
2.6.1. Parámetros de diseño de la plataforma	50
2.6.2. Capacidad de carga.....	50
2.6.3. Velocidad	50
2.6.4. Configuración.....	50

2.7. Selección de materiales de la plataforma.....	52
2.8. Cálculo de cargas en la plataforma.....	53
2.9. Análisis cinemático y cinético de la plataforma	54
2.10. Análisis de esfuerzos en la plataforma	63
2.10.1. Análisis Estructural	63
2.11. Modelado y Ensamblaje de la plataforma.....	65
2.11.1. Estructura de la Plataforma móvil.....	65
2.11.2. Diseño de Componentes	66
2.11.3. Ensamble Plataforma	67

CAPÍTULO III

3. CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DEL DISEÑO.....	69
3.1. Construcción estructural Plataforma	69
3.2. Construcción elementos de Transmisión	71
3.2.1. Manzanas y Poleas	72
3.2.2. Ejes.....	72
3.3. Ensamblaje.....	73
3.3.1. Sistema de Transmisión	73
3.3.2. Ejes y Rodamientos.....	73
3.3.3. Ruedas	74
3.3.4. Compartimento de Batería, Computador y tarjeta de control.....	74
3.3.5. Paredes y revestimiento	75
3.3.6. Brazo	76
3.3.7. Construcción Frames.....	76
3.3.8. Eslabones.....	76
3.3.9. Ensamble Brazo	77
3.3.10. Gripper	77

3.3.11. Ensamblaje Robot Manipulador	78
3.4 Pruebas y resultados.....	79
3.4.1. Capacidad máxima del brazo robótico al levantar objetos.....	79
3.4.2. Sujeción de objetos	81
3.4.3. Repetitividad del Brazo	83
3.4.4. Velocidad de la plataforma móvil	85
3.4.5. Maniobrabilidad	86
3.4.6. Seguimiento de ruta.....	87
3.4.7. Autonomía	89
3.5. Alcances y Limitaciones	90

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	91
4.1. Conclusiones.....	91
4.2. Recomendaciones	92
Referencias Bibliográficas.....	93
ANEXOS	95

ANEXO A. Tablas

ANEXO B. Planos

ANEXO C. Informes análisis de Esfuerzo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Spirit Rover – NASA.....	3
Figura 2. Robot aéreo Rotacional Sky Sapience HoverMast-120	4
Figura 3. Vehículo Aéreo no Tripulado B-2A, USAF	4
Figura 4. Seaorbiter Vessel.....	5
Figura 5. Ez-robot Wowwe Roboquad.....	6
Figura 6. iRobot Loj 330	6
Figura 7. Robotnik Summit-x.....	7
Figura 8. Robot Industrial KUKA	7
Figura 9. Robot Pioneer	9
Figura 10. Robot SR1.....	9
Figura 11. Robot Cuatriciclo.....	10
Figura 12 Configuración Cartesiana.....	11
Figura 13. Configuración Cilíndrica	12
Figura 14. Configuración Polar.....	12
Figura 15 Configuración Scara.....	13
Figura 16 Brazo robótico articulado KUKA KrR 6-2 Robotis.....	13
Figura 17. Brazo robótico articulado Robotis.....	14
Figura 18 Robot Paralelo Adept Quattro s650H.....	14
Figura 19. Robot Kuka	15
Figura 20. Manipulador Móvil Humanoide PAL – Robotics	16
Figura 21 Manipulador Omnidireccional. XWam-Robotnik.....	17
Figura 22 Manipulador Móvil Humanoide Cognitive Service Robot.....	18
Figura 23 Manipulador Móvil Humanoide Meka M1	19
Figura 24. Manipulador Móvil Bidireccional Home Exploring (HERB)	19
Figura 25. Manipulador Móvil Omnidireccional Brazo KUKA youBot	20
Figura 26. Esquema elementos y articulaciones de un robot.....	22
Figura 27 Articulación Muñeca y gripper del brazo	23
Figura 28. Radio de giro muñeca	24
Figura 29 Motor de rotación en la articulación de la muñeca	25
Figura 30 Motor en la articulación de la muñeca.....	25
Figura 31 Motor en articulación del codo	26
Figura 32. Radio de giro articulación del codo	26

Figura 33. Motor en la Articulación del hombro	27
Figura 34. Radio de giro en la Articulación del hombro	28
Figura 35 Motor en la articulación base del brazo	29
Figura 36 Radio de giro en la articulación del hombro	29
Figura 37 Gripper sistema de tornillo	30
Figura 38. Análisis de fuerza gripper	31
Figura 39. Esquema mecanismo	32
Figura 40. Diagrama de fuerzas gripper	33
Figura 41. Brazo extendido posición inicial	34
Figura 42. Brazo extendido posición final	34
Figura 43. Ubicación Motores	36
Figura 44. Frame FRP54-A110	38
Figura 45 Articulación Motor Base	39
Figura 46. Articulación Codo	40
Figura 47. Articulación Muñeca	41
Figura 48. Articulación Gripper	41
Figura 49 Base gripper; Figura 50. Acople 1	42
Figura 51 Acople 2; Figura 52 Acople 3	42
Figura 53 Tuerca Gripper; Figura 54 Pinza	42
Figura 55 Tornillo Sinfin	43
Figura 56 Ensamble Gripper dos dedos	43
Figura 57 Ensamble Gripper tres dedos	43
Figura 58 Ensamble Final Brazo Robótico	44
Figura 59 Fuerzas aplicadas en el brazo robótico	45
Figura 60 Fuerzas aplicadas en el Gripper	45
Figura 61 Mallado brazo robótico fuerzas aplicadas	46
Figura 62. Análisis estático, tensión brazo robótico	46
Figura 63. Análisis de desplazamiento brazo robótico	47
Figura 64. Factor de seguridad brazo robótico	48
Figura 65. Geometría Plataforma	51
Figura 66. Sistema de transmisión polea – banda	54
Figura 67. Sistema de Transmisión Polea-eje-chumacera	58
Figura 68. Sistema de transmisión eje y accesorios	59
Figura 69. Diagrama de fuerzas actuando sobre el eje	59

Figura 70. Diagrama de fuerzas resultantes actuando sobre el eje de rotación	61
Figura 71. Diagrama de fuerzas y momentos del eje de rotación	61
Figura 72. Diagrama de fuerzas y momentos del eje de rotación	62
Figura 73. Mallado estructura.....	63
Figura 74. Fuerzas aplicadas en estructura	64
Figura 75. Análisis de tensión estructura	64
Figura 76. Desplazamiento de tensión estructura	65
Figura 77. Factor de seguridad estructura	65
Figura 78. Estructura plataforma móvil.....	66
Figura 79. Eje motor.....	66
Figura 80. Eje de la rueda	67
Figura 81. Tensor	67
Figura 82. Plataforma Móvil.....	68
Figura 83. Molde de hierro, perfil de aluminio	69
Figura 84. Proceso de soldadura	69
Figura 85. Estructuras laterales plataforma.....	70
Figura 86. Unión de perfiles transversales	70
Figura 87. Conformación de la estructura	71
Figura 88. Base Inferior	71
Figura 89. Manzanas.....	72
Figura 90. Polea	72
Figura 91. Ejes	73
Figura 92. Ensamble eje-polea.....	73
Figura 93. Rodamientos y ejes.....	74
Figura 94. Ruedas.....	74
Figura 95. Implementación Compartimentos.....	75
Figura 96. Revestimiento de la Plataforma	75
Figura 97. Frames	76
Figura 98. Eslabones	77
Figura 99. Brazo.....	77
Figura 100. Partes Gripper.....	78
Figura 101. Gripper de tres pinzas	78
Figura 102. Manipulador Móvil	79
Figura 103. Prueba de velocidad.....	85

Figura 104. Pruebas Obstáculos	87
Figura 105. Pruebas seguimiento de ruta	88
Figura 106. Pruebas de autonomía	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Características marcas de actuadores	37
Tabla 2	Características técnicas motores requeridos.....	36
Tabla 3	Características Técnicas Mecánicas Aluminio 6061-T6	49
Tabla 4	Comparación características del material y requeridas	49
Tabla 5	Características Perfil Aluminio 6061-T6	49
Tabla 6	Características perfiles de la estructura	52
Tabla 7	Pruebas de Capacidad del brazo	80
Tabla 8	Tabla de Pruebas de manipulación del gripper.	82
Tabla 9	Tabla de Repetitividad.....	83
Tabla 10	Tabla de Velocidad.....	86
Tabla 11	Tabla de Maniobrabilidad.	87
Tabla 12	Tabla de Seguimiento de ruta.	89
Tabla 13	Tabla de pruebas de Autonomía del robot.	89
Tabla 14	Especificaciones Motor DYNAMIXEL PRO L42-10-S300-R1	93
Tabla 15	Especificaciones Motor DYNAMIXEL PRO L54-50-S500R	93
Tabla 16	Especificaciones Motor DYNAMIXEL PRO L54-30-S500R	93

RESUMEN

El presente trabajo presenta la construcción mecánica de un robot manipulador móvil robusto de 9 grados de libertad GDL, 3 de la plataforma móvil y 6 del brazo robótico. Para el diseño mecánico se consideró la configuración morfológica del robot, el peso, las propiedades físicas de los materiales, y el análisis de los esfuerzos a los que estará expuesto cada parte del robot; mientras que para las instalaciones electrónicas se consideró la unidad de control, comunicación, potencia, y acoplamiento de sensores con el fin de implementar conexiones de control autónomo y/o tele-operado de manera coordinada y cooperativa

PALABRAS CLAVE:

- **ROBÓTICA**
- **BRAZO ROBÓTICO**
- **ROBOT MÓVIL**

ABSTRACT

This paper describes the mechanical construction of a mobile robot manipulator 9 degrees of freedom DOF, 3 of robust mobile platform and 6 of robotic arm. For mechanical design of robot morphological configuration, weight, physical properties of materials, and analysis efforts which each party is exposed robot considered; while for the electric control unit design , communication , power and docking sensors are considered in order to allow applications to implement autonomous control algorithms or telecommunications operated in a coordinated and cooperative manner

KEYWORDS:

- **ROBOTIC**
- **ROBOTIC ARM**
- **MOBIL ROBOT**

PRESENTACIÓN

La robótica es un área que integra principalmente cuatro ingenierías, tales como: i) Mecánica comprende el diseño mecánico, el análisis estático y dinámico del sistema, lo cual permite diseñar elementos estructurales para luego acoplarlos entre sí, además de formar mecanismos y garantizar un funcionamiento adecuado durante la generación de movimientos de una máquina o robot.; ii) Electrónica integra dispositivos que permiten al robot transmitir la información programada, regulando y coordinando impulsos eléctricos para que el robot realice las acciones requeridas; iii) Control representa una parte elemental en el funcionamiento ya que este coordina y a la vez sincroniza, los movimientos y actividades que realiza el sistema. El controlador debe ser capaz de mover automáticamente o usar teleoperación.; y iv) Informática proporciona algoritmos que sistematizan las acciones del robot y originan programas que coordinan la mecánica en los movimientos del mecanismo, permitiendo obtener un cierto grado de inteligencia en el sistema, lo cual origina que el robot tenga, autonomía, adaptabilidad, capacidad interpretativa y correctiva. (Segway, 2002).

Actualmente, existe un gran interés en la comunidad científica de construir nuevos robots los mismos que pueden ser controlados de forma autónoma o tele-operada, ya sea para aplicaciones industriales como ensamble de componentes, producción de dispositivos en tecnología avanzada, áreas de la salud, para estudios científicos a través del espacio, o para robótica de servicio, como asistencia en el hogar, solución de tareas en el orden doméstico y en un ámbito importante como es el apoyo a personas de capacidades limitadas (Barrientos, 2007).

En este contexto la robótica móvil es un área de investigación que ha generado increíbles avances tecnológicos en temas relacionados a la navegación autónoma, la percepción, la reactividad, la obtención de mapas, la evasión de obstáculos y la auto-localización, han sido temas de investigación durante los últimos años, con aplicaciones a nivel de la robótica industrial como de servicio ya sea en el área militar y entornos de seguridad, agricultura de precisión. (Mott, 2006).

Por otra parte dentro de la manufactura de robots podemos obtener diversas maneras de optimizar el peso del sistema tales como:

i) Selección de Materiales.- Existen nuevos materiales para la manufactura de máquinas cuya composición se basa en plásticos, fibras, aluminos livianos, y hasta materiales de reciclaje; los cuales se caracterizan por ser resistentes y de gran dureza aptos para aplicaciones como la aeronáutica en donde podemos distinguir la ligereza y dinámica que debe poseer un material para lograr un mayor desempeño lo que se ve reflejado en su eficiencia, es notable la disminución del esfuerzo que realizan sus actuadores.

ii) Diseño Modular: Se basa en la modulación de espacios permitiendo optimizar el tiempo de construcción debido a que son desmontables, transportables y reorganizables implementando múltiples funcionalidades (Craig, 2006).

iii) Simulación Dinámica.- Permite prever el comportamiento de las relaciones o estructuras que generan el mecanismo, los resultados y las consecuencias inesperadas que puede ocurrir a través del tiempo [9] iv) Análisis de elementos finitos.- Optimiza y valida el diseño lo cual permite una rápida resolución, para garantizar la calidad, el rendimiento y la seguridad del producto. (Khatib, 1987)

Adicionalmente el diseño mecánico de la estructura puede minimizar la energía requerida en el sistema de control tomando en cuenta los puntos más críticos del diseño mecánico, en el brazo existen las articulaciones, los elementos de sujeción, y el extremo operativo, mientras que en la plataforma se encuentran los ejes, los puntos de unión (Andaluz, Switching Control Signal for Bilateral Tele-Operation of a, 2011).

Por otro lado, desde el punto de vista del diseño electrónico la unidad de control de un manipulador móvil puede ser i) Descentralizada; Un sistema distribuido se define como una serie de computadoras separadas físicamente y conectadas entre sí por una red de comunicaciones distribuida ii) Centralizada se produce cuando el control es realizado en una localización central, usando terminales conectados a una computadora central. La computadora en sí misma puede controlar todos los periféricos, ofrece mayor seguridad sobre los sistemas

descentralizados porque todo el procesamiento es controlado en una localización central directamente.

El capítulo I contiene información detallada acerca de las características y configuraciones del proyecto dentro de la clasificación de la robótica, así como también las diversas aplicaciones en las que se puede involucrar el manipulador móvil.

En el capítulo II se detalla el diseño de los diferentes elementos mecánicos del manipulador móvil, adicionalmente se encuentra la selección de los materiales idóneos para su construcción, y el ensamble de los mismos apoyado por el diseño asistido por computador

Finalmente contiene cada una de las etapas de construcción por las que atravesó la fabricación del manipulador móvil.

En el Capítulo III se encuentra definidas las pruebas que ratifican al proyecto y garantizan su correcto funcionamiento conforme a los requerimientos, validando de esta manera la hipótesis planteada.

CAPÍTULO I

1. FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1. Definición del problema de investigación

Durante mucho tiempo se han ido desarrollando varios prototipos de robots para que sean capaces de suplantar varias tareas que deberíamos realizar los seres humanos, las cuales involucran cierto grado de peligrosidad que afectarían su integridad física. Existen factores que dificultan la capacidad de acceder a un medio ya sea por seguridad o por el tipo de terreno, por lo tanto aparece la complejidad de obtener una estructura mecánica que permita acceder y brindar estabilidad y robustez al sistema.

1.2. Objetivo General

DISEÑAR Y CONSTRUIR DE UN SISTEMA MECANICO PARA UN ROBOT MANIPULADOR MÓVIL EN EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN “TELE – OPERACIÓN BILATERAL CORPORATIVO DE MULTIPLES MANIPULADORES MÓVILES” APROBADO POR EL CONSORCIO ECUATORIANO PARA EL DESARROLLO DE INTERNET AVANZADO – CEDIA

1.3. Objetivos Específicos

Diseñar un brazo y una plataforma móvil que posibilite la locomoción y manipulación de un robot manipulador móvil que garantice la estabilidad y confiabilidad en su desempeño

a. Realizar la simulación del sistema estructural que permita seleccionar los materiales y accesorios adecuados para la aprobación del diseño.

b. Construir los distintos elementos diseñados para la estructura y realizar el montaje del sistema el cual garantice exactitud y robustez en el desarrollo de actividades

Realizar evaluaciones experimentales en entornos parcialmente estructurados ejecutando actividades de traslación y manipulación de objetos.

1.4. Hipótesis

¿El diseño de un sistema estructural para un robot manipulador móvil remoto garantiza el eficiente desempeño en todos los movimientos realizados por el robot?

1.5. Variables de la Investigación

- a. Variable Independiente: Robot Manipulador Móvil
- b. Variable Dependiente: Proporciona al operador acceder a lugares y realizar tareas que no están al alcance del mismo.

1.6. Generalidades

Realizar tareas complementarias de forma simultánea es de suma importancia para la robótica cuando se pretende reducir el tiempo de un objetivo común. La investigación referente al aporte de la robótica en el desarrollo de la tecnología comprende desde los ambientes industriales con entornos dispuestos para su aplicación, así como; para robots autónomos que se desenvuelven en ambientes naturales o de riesgo para el ser humano.

1.6.1. Robótica

La robótica es una ciencia o rama de la tecnología, que estudia el diseño y construcción de máquinas capaces de desempeñar tareas realizadas por el ser humano o que requieren del uso de inteligencia. (Robotica, 2016)

La robótica ha capturado la atención del planeta debido a que ha solucionado grandes dificultades para la humanidad, brindando accesibilidad a múltiples limitaciones que ha experimentado la humanidad. Por ejemplo en el ámbito espacial y geográfico se ha logrado encontrar solución para navegación como en el caso de accidentes nucleares, búsqueda de naufragos, exploración de volcanes y viajes a través del espacio. En este contexto podemos destacar el desarrollo del robot

aeroespacial Spirit Rover creado por la Nasa y concebido para investigar superficies y características planetarias que determinen la probabilidad de vida que puede existir en otros planetas.

La robótica está transformando la manera de vivir y trabajar de la humanidad, expandiendo los límites experimentales de las personales.



Figura 1. Spirit Rover – NASA

Fuente: (NASA, 2015)

Dentro de la robótica podemos encontrar múltiples áreas de trabajo siendo un campo muy importante la exploración donde podemos distinguir los robots móviles se clasifican en guiados y no guiados. El vehículo guiado está restringido a un conjunto de trayectorias predefinidas en su área de trabajo. Los vehículos no-guiados no están restringidos a una trayectoria predefinida. A este tipo de robots no-guiados pertenecen los robots acuáticos, los del espacio aéreo y los terrestres.

a. Robótica aérea

En el campo de los robots aéreos autónomos o UAV podemos encontrar rotativas y de ala fija. Tienen un gran potencial para la exploración de lugares de difícil acceso o peligrosos para los humanos, búsqueda de personas o daños específicos en edificios semicolapsados, puentes debilitados o túneles.



Figura 2. Robot aéreo Rotacional Sky Sapience HoverMast-120

Fuente: (Skysapience, 2015)

El caso del SkySapience es un dron que es resultado de varias innovaciones en la robótica aérea y que se ha destacado por el reconocimiento de terrenos desde altura, aplicaciones como búsqueda de personas en áreas boscosas, cartografía de zonas de difícil acceso, identificación de estructuras o patrones de terreno específicos, al igual que en la búsqueda de objetos o personas en lugares cerrados y exploración al interior de edificaciones. Gracias a la versatilidad y libertad de movimientos de estos robots muchas más aplicaciones pueden ser formuladas.

Mientras que en estudios para robótica aérea de ala fija se desarrollan proyectos para la seguridad y eficiencia en los vuelos tripulados, como es el caso del B 2A de la USAF el cual ha sido concebido para transporte eficiente y ligero, en este podemos destacar la fase de vuelo crucero, tanto en vuelo lateral como en vuelo longitudinal.



Figura 3. Vehículo Aéreo no Tripulado B-2A, USAF

Fuente: (Castillo, 2014)

b. Robótica acuática

Dentro de la robótica acuática se han generado varios proyectos que abarcan soluciones importantes para la humanidad, estos comprenden robots de vigilancia marítima, así como también robots encargados de limpieza de agua en caso de derrames de petróleo, los cuales son capaces de recoger y transportar piezas flotantes en el agua, y hasta pequeños submarinos no tripulados que se utilizan para operaciones submarinas, peligrosas y de difícil acceso para los seres humanos. El Seaorbiter Vessel es un robot destacado en las actividades de investigación submarina. Se ha diseñado para vigilancia dentro de los océanos y también para investigaciones marinas en donde se destaca su gran capacidad para desplazarse y soportar altas presiones en la profundidad y mantener un control en tiempo real.

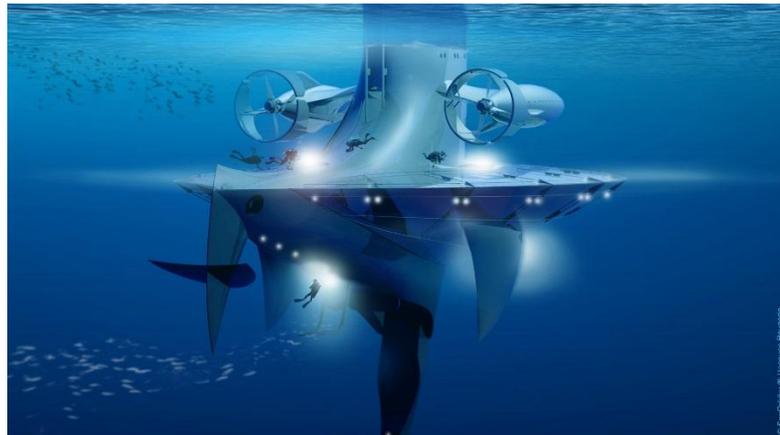


Figura 4. Seaorbiter Vessel

Fuente: (Prigg, 2014)

c. Robótica terrestre

Los robots terrestres han sido clasificados por su sistema de movimiento en robot con ruedas, con patas o con rieles. Así cada robot desarrolla diferentes tareas de acuerdo a su capacidad.

1.6.2. Locomoción

La elección de una configuración específica para el desplazamiento del robot depende de características de las funciones y los lugares de desempeño, tales como el tipo de terreno, la velocidad y el nivel de obstáculos que se encuentren.

a. Locomoción mediante patas

Tienen la ventaja de permitir locomoción en terrenos difíciles evitar obstáculos y omnidireccionalidad, pero su desventaja es requerir un consumo de energía mayor que con ruedas. Además que el problema de planificación y control es más complejo que un robot de ruedas u orugas



Figura 5. Ez-robot Wowwe Roboquad

Fuente: (robot, 2014)

b. Pistas de deslizamiento

Son vehículos tipo oruga en los que tanto la tracción como el direccionamiento se consiguen mediante bandas de tracción o pistas de deslizamiento, este tiene desventajas como una reducción de velocidad en comparación al uso de ruedas y un gasto mayor de energía ya que en la rotación existe mucho rozamiento entre el suelo y las pistas de deslizamiento. Una solución a este problema es buscar que el polígono de sustentación sea lo más pequeño posible procurando no perder estabilidad.



Figura 6. iRobot Loj 330

Fuente: (irobot, 2014)

c. Locomoción mediante ruedas

Similar al sistema de dirección de cualquier automóvil de cuatro ruedas. Normalmente los vehículos robóticos desarrollados con esta configuración resultan de la modificación o adaptación de vehículos convencionales



Figura 7. Robotnik Summit-x

Fuente: (irobot, 2014)

1.6.3. Manipuladores

Es un robot manipulador reprogramable multifuncional diseñado para mover materiales, piezas o dispositivos especializados a través de movimientos programados variables para la realización de una diversidad de tareas (Schlussel, 1985).



Figura 8. Robot Industrial KUKA

Fuente: (KUKA, 2016)

1.6.4. Plataformas Móviles

La plataforma debe cumplir con la función del desplazamiento, debe llevar al manipulador a la posición que se asigna. Por lo tanto, tiene que trazar el camino, que lleve a la plataforma móvil a la postura que permita cumplir con la tarea. Además de proporcionar movimiento, la plataforma debe de contar con espacio para la batería que le proporcionará el voltaje de alimentación, también espacio para colocar todos los componentes que controlan el sistema.

El sistema del brazo manipulador, debe posicionar al órgano terminal, en cualquier lugar de su espacio de trabajo. Conjuntamente el manipulador, tiene que orientar al órgano terminal, para que realice la tarea que se le asigne, es decir, tiene que describir una trayectoria, que lleve cada objeto de una posición inicial a una posición final, permitiendo realizar la tarea establecida.

Finalmente el efector final, debe cumplir con la función de agarrar y soltar al objeto. Lo anterior es propio de la tarea a realizar, es decir, si la tarea es diferente a recoger un objeto, se tendrá que utilizar otro tipo de extremo operativo.

a. PLATAFORMAS MÓVILES UNICICLO

Están constituidos básicamente por una estructura mecánica que consta de dos ruedas fijas convencionales sobre el mismo eje, controladas de manera independiente y una rueda loca, que le da estabilidad pero no dirección, permitiéndole navegar a través de un determinado ambiente de trabajo de forma autónoma.

Dicha autonomía se refiere a la capacidad de percibir, planificar y actuar sin la intervención del operador humano para alcanzar determinados objetivos.

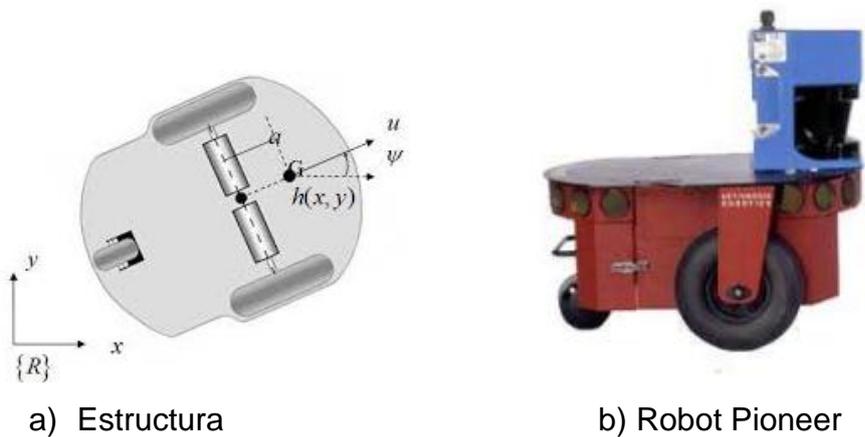


Figura 9. Robot Pioneer

Fuente: (Pioneer, 2015)

b. Triciclo

Está formado por dos ruedas convencionales fijas que van sobre un mismo eje y una rueda convencional centrada orientable que concentra las funciones de tracción-dirección. Este tipo de configuración es óptima en la industria para el transporte de cargas pesadas a baja velocidad.

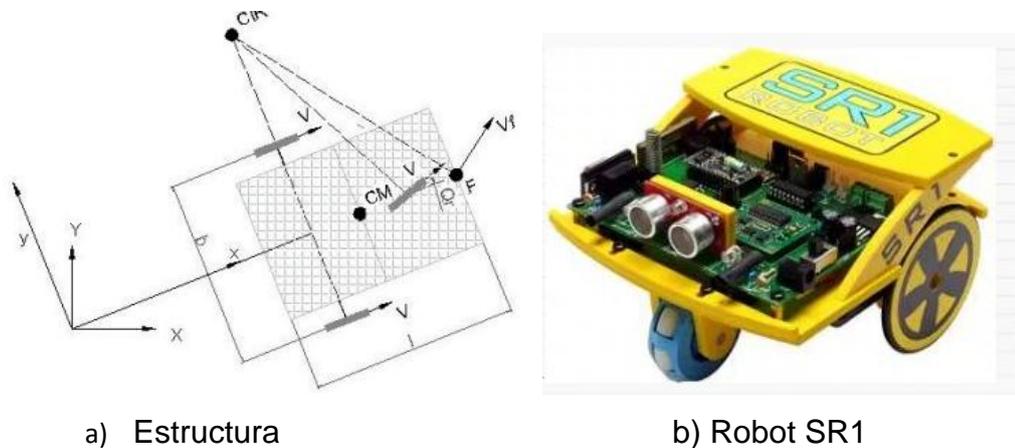


Figura 10. Robot SR1

Fuente: (Superrobotica, 2015)

c. Cuatriciclo

Es utilizado en vehículos de cuatro ruedas convencionales, el sistema se basa en dos ruedas traseras tractoras que se montan de forma paralela en el chasis principal del vehículo, mientras que las ruedas delanteras están

diseñadas para el direccionamiento, y se utilizan para seguir la trayectoria del robot.

Este modelo es también conocido como modelo Ackerman como se observa en la figura 11. La rueda delantera interior gira un ángulo ligeramente superior a la rueda exterior, de tal forma que los ejes de prolongación de las ruedas delanteras se acortan en el centro instantáneo de rotación.

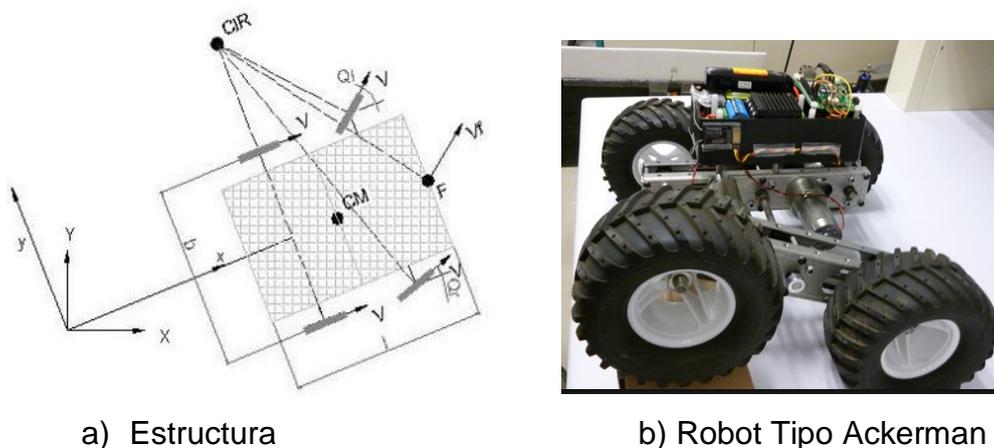


Figura 11. Robot Cuatriciclo

Fuente: (Robotnik, 2015)

1.6.5. Brazos Robóticos

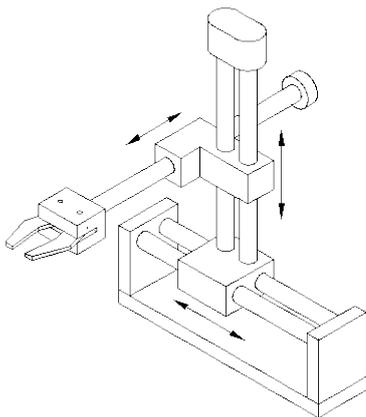
Son robots que están presentes en cualquier parte de nuestra vida desde la industria, hasta la medicina. El brazo robótico trata de imitar la gran versatilidad del brazo humano el cual consta diferentes partes como son el hombro, codo, muñeca, articulaciones que se desarrollan con mecanismos para unir eslabones o partes fijas, sistema que está debidamente controlado por su respectivo algoritmo, llegando incluso a realizar movimientos complejos. El brazo robótico es de gran importancia en la industria no solo por su eficacia al realizar trabajos, sino también sustituye la intervención de un operario garantizando y optimizando así la mejora de tiempos y de calidad en los productos.

1.6.6. Configuraciones Robots Industriales

Existen diferentes configuraciones de robots industriales las cuales vienen dadas por las diferentes formas físicas que puede tener el brazo robótico así como también el volumen de trabajo el cual nos indica las dimensiones de los elementos del manipulador, junto con los grados de libertad. Para poder determinar este parámetro, por lo general el fabricante indica un plano con los límites del movimiento que tiene cada una de las articulaciones del robot.

a. Configuración Cartesiana

Usado para trabajos de tomar y colocar, como operaciones de ensamblado, manipulación de máquinas herramientas y soldadura por arco. Es un robot cuyo brazo tiene tres articulaciones prismáticas, cuyos ejes son coincidentes con los ejes cartesianos.



a) Configuración



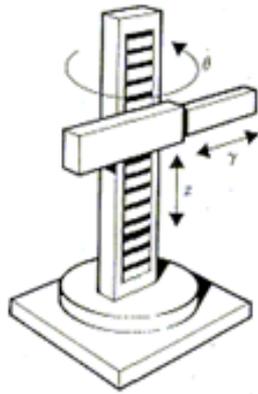
b) Robot Cartesiano

Figura 12 Configuración Cartesiana

Fuente: (Robotica, 2016)

b. Configuración Cilíndrica

Es un robot cuyos ejes forman un sistema de coordenadas cilíndricas, se basa en una columna vertical que gira sobre la base.



a) Configuración



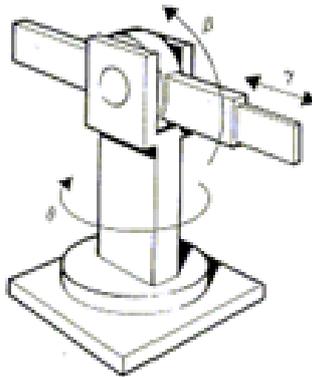
b) Robot Cilíndrico

Figura 13. Configuración Cilíndrica

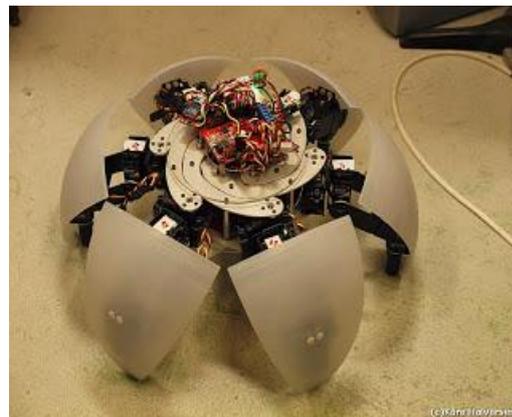
Fuente: (Robotica, 2016)

c. Configuración Polar

Tiene tres grados de libertad con movimientos de rotación y uno lineal, utiliza la interpolación por articulación para sus dos primeros movimientos y la lineal para movimientos de extensión. Es usado en la manipulación en máquinas herramientas, soldadura por punto, fundición a presión, soldadura por gas y por arco.



a) Configuración



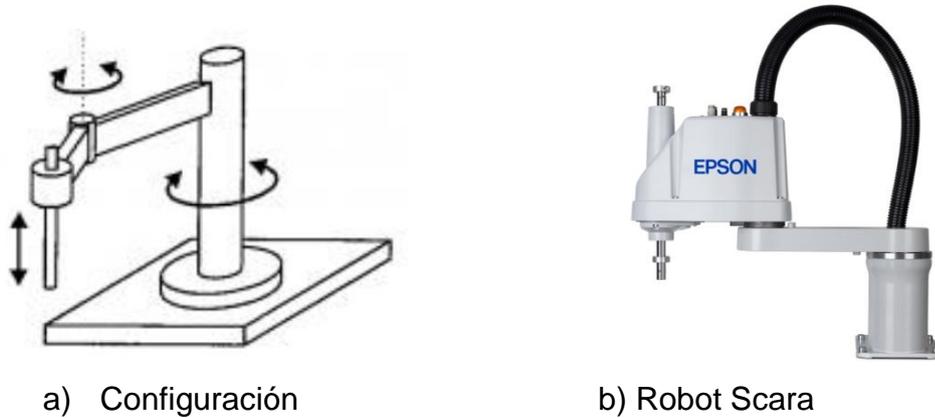
b) Robot Polar

Figura 14. Configuración Polar

Fuente: (Robotnik, 2015)

d. Configuración Scara

Es un robot que tiene dos articulaciones rotatorias paralelas para proporcionar elasticidad en un plano. Usado en la operación de ensamblado y manipulación de máquinas herramientas.



a) Configuración

b) Robot Scara

Figura 15 Configuración Scara

Fuente: (Robotica, 2016)

e. Configuración Articulada

Usado para operaciones de ensamblaje, fundición a presión, máquinas de desbarbado, soldadura a gas, soldadura por arco, y pintado en spray. Dentro de estos podemos destacar al robot de la marca KUKA figura 16a, que es un robot cuyo brazo tiene como mínimo tres articulaciones rotatorias y está concebido para tareas dentro de la industria como son el ensamblaje pintura y soldadura.



Figura 16 Brazo robótico articulado KUKA KrR 6-2 Robotis

Fuente: (KUKA, 2016)



Figura 17. Brazo robótico articulado Robotis

Fuente: (Robotis, 2016)

f. Configuración Paralela

Uno de los usos es la plataforma móvil que manipula las cabinas de los simuladores de vuelo. Es un robot cuyos brazos tienen articulaciones prismáticas o rotatorias concurrentes. Dentro de ellos se encuentra el robot paralelo Adept de la figura 18, concebido para simulaciones tanto aéreas como terrestres, debido a que puede imitar y generar varios movimientos



Figura 18 Robot Paralelo Adept Quattro s650H

Fuente: (Adept, 2015)

g. Configuración Antropomórfica

Este tipo de robot se asemeja al brazo humano, pues cuenta con dos componentes rectos y dos articulaciones que se asemejan al codo y al hombro. Todo esto se encuentra sobre una base giratoria.

Dentro de estos se destaca el manipulador de la marca KUKA, que ha desarrollado manipuladores de base fija para la industria, son aptos para tareas de ensamble, soldadura y pintura, están instalados en gran parte dentro de la producción automotriz lo cual ha innovado y optimizado considerablemente su producción



Figura 19. Robot Kuka

Fuente: (KUKA, 2016)

1.6.7. Manipulador Móvil

Estos sistemas armonizan las ventajas de las plataformas móviles y los brazos robóticos manipuladores, por lo cual mejoran el rango de capacidad de trabajo dentro de este tipo de robots ya que su funcionamiento combina una plataforma móvil que amplía el área de trabajo, mientras que el brazo opera normalmente como en cualquier base uniforme. Esto hace que disminuya sus desventajas ya que un brazo normalmente se ve limitado por el área de trabajo.

Los grados de libertad extra son otro punto a favor de la plataforma móvil entregando al usuario más opciones y más destreza en sus movimientos. Sin embargo, el funcionamiento y estabilidad de este sistema se torna un poco más complejo debido a los muchos grados de libertad y al medio de trabajo no estructurado.



Figura 20. Manipulador Móvil Humanoide PAL – Robotics

Fuente: (PAL, 2016)

Los manipuladores móviles se han desarrollado en múltiples áreas, como ejemplos podemos destacar la exploración del espacio, las operaciones militares, la atención domiciliaria y el cuidado en la salud, como es el caso de los manipuladores humanoides PAL, concebido para ambientes domésticos, aptos para la manipulación de objetos, son desarrollados para la atención de personas con limitaciones, pueden manipular y transportar objetos que requiera una persona limitada de caminar

En el ámbito industrial, la aplicación de los manipuladores móviles ha sido limitada, a pesar de que las necesidades de automatización inteligente y flexible, se ha encontrado limitaciones como son el control de múltiples grados de libertad y el desplazamiento por ambientes no estructurados.

Un Manipulador Móvil, es un sistema mecánicamente unido que comprende de una plataforma encargada del desplazamiento, y un brazo manipulador montado en ella adaptado para la manipulación. Está sujeto a sus restricciones cinemáticas, y a los grados de libertad.

El manipulador móvil está formado por tres partes o subsistemas como se puede ver en la figura 21: la plataforma móvil, el brazo manipulador y el efector final



Figura 21 Manipulador Omnidireccional. XWam-Robotnik

Fuente: (Robotis, 2016)

1.6.8. Tipos de Manipulador Móvil

El manipulador móvil puede contener un robot de tipo humanoide o simplemente un brazo manipulador. Por otra parte se lo puede clasificar en base a la plataforma móvil, esta puede ser unidireccional, bidireccional, omnidireccional, diferencial o de otro tipo de locomoción.

a. Manipulador Móvil Humanoide:

La parte del manipulador es humanoide, como el caso del robot Cognitive service Robot el cual se compone de dos brazos de siete grados de libertad (GDL), equipado con un gripper de dos dedos y una cabeza con movimiento en el eje horizontal y en el eje vertical.

Desarrollado para tareas de manipulación móvil en interiores o ambientes domésticos donde se destaca la capacidad de servir la vajilla tareas de limpieza y manipulación de objetos en el hogar. Como se indica en la figura 22.



Figura 22 Manipulador Móvil Humanoide Cognitive Service Robot

Fuente: (robot, 2014)

El manipulador móvil Meka M11 en la Figura 23, es un robot humanoide que cuenta con dos brazos que pueden ser utilizados en ambientes estructurados. Cuenta con un resorte pasivo permitiendo, que los brazos se encuentren suspendidos cuando no se encuentre energizado. Cada brazo cuenta con cuatro GDL. Cada muñeca tiene dos GDL de alto torque, que le permite manipular cualquier tipo de objetos, y su gripper de un GDL.

La movilidad del robot tiene una espina telescópica. La locomoción la realiza mediante una plataforma móvil omnidireccional, lo que permite que pueda trabajar en cualquier espacio. De igual forma la cabeza tiene movimiento en el eje horizontal y el vertical, además de una infinidad de sensores: cámaras en la cabeza, escáner láser en los hombros, cámara en los antebrazos, sensores de presión en el gripper.

Adicionalmente la plataforma cuenta con un escáner láser el cual le permite obtener mayor información del entorno en el que se encuentra y realizar comparaciones mediante patrones de matrices para funciones como reconocimiento de objetos.



Figura 23 Manipulador Móvil Humanoide Meka M1

Fuente: (Kwc, 2011)

b. Manipulador móvil brazo manipulador

El manipulador móvil con un brazo manipulador de la marca Herb como podemos ver en la figura 24, consiste de una plataforma móvil bidireccional con dos ruedas, está formado por una cadena serial de cinco GDL y un gripper de 2 dedos paralelos, integrado a la plataforma se encuentra su computadora y la alimentación, además, la comunicación se hace vía inalámbrica.



Figura 24. Manipulador Móvil Bidireccional Home Exploring (HERB)

Fuente: (Herb, 2015)

Como una evolución de los manipuladores móviles podemos destacar al KUKA omnidireccional como se puede ver en la figura 25, desarrollado para aplicaciones domésticas, de salud y educación, no posee sensores, pero su control se lleva a cabo de forma inalámbrica, debido a su tipo de locomoción permite un desplazamiento con mayor facilidad optimizando energía e incrementando su eficiencia y su capacidad de movilizarse en ambientes no estructurados.



Figura 25. Manipulador Móvil Omnidireccional Brazo KUKA youBot

Fuente: (KUKA, 2016)

CAPÍTULO II

2. DISEÑO, MODELAMIENTO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

En el presente capítulo se detalla las fases del diseño y construcción del manipulador móvil, se realiza el cálculo y el análisis de los esfuerzos en cada uno de los segmentos tanto en la plataforma como en el brazo, con esto se proyecta un correcto desempeño del manipulador que está compuesto principalmente de un brazo con un efector final y una plataforma encargada del transporte y control del manipulador.

2.1. Parámetros de diseño del brazo manipulador

Se considera los aspectos más importantes que caracterizan al brazo para su aplicación y en base a ello desarrollar el posterior diseño.

2.1.1. Configuración del brazo

Se selecciona una configuración antropomórfica, debido a que este nos permite tener una mejor orientación en su extremo operativo con facilidad para moverse en trayectorias complejas, sus articulaciones poseen un movimiento rotacional y varios angulares.

2.1.2. Capacidad de carga.

La capacidad de carga que se proyecta para el manipulador es de 0,5 kilogramos, peso que se pueda transportar o levantar.

2.1.3. Grados de libertad

Para posicionar y orientar un objeto en el espacio se necesita de seis grados de libertad, tres para definir la posición y tres para definir la orientación.

2.1.4. Velocidad

La velocidad alcanzable por el TCP (punto de referencia de la herramienta) al no requerir velocidades altas, su velocidad aproximada sería de 0.8 m/s ya que su principal función es trasladar objetos cuidadosamente.

Adicionalmente se especifica en la herramienta final, que la apertura o cierre del gripper debe realizarse en 5 segundos durante todo su recorrido.

2.1.5. Alcance máximo

Se considera la distancia que el brazo puede lograr desde su base, para nuestro caso el alcance máximo se proyecta para 75 cm.

2.2. Geometría de la Estructura

La estructura del brazo está compuesto por una serie eslabones conectados mediante articulaciones. En el presente proyecto las articulaciones son de giro en todas las articulaciones como se presenta a continuación en un esquema en la Figura 26.

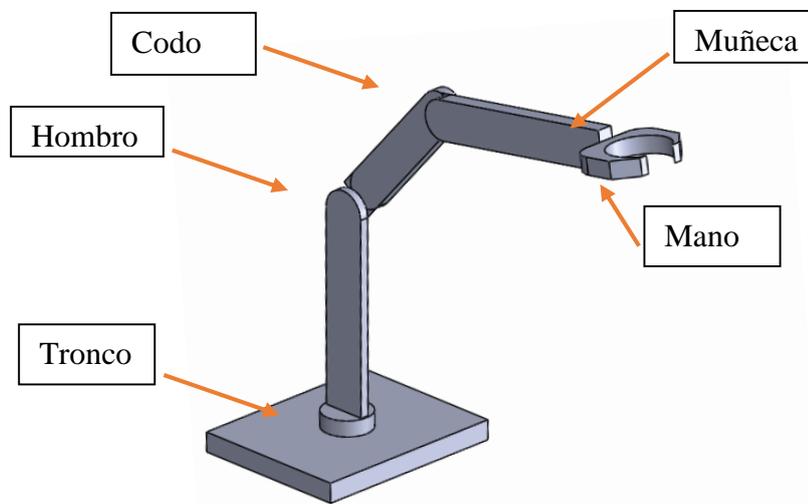


Figura 26. Esquema elementos y articulaciones de un robot

En la configuración del brazo robótico se utilizan diferentes componentes tales como motores, articulaciones, frames, eslabones y extremo operativo que ayuda al brazo para sujetar objetos.

2.3. Cálculo de cargas

Para el diseño de la estructura del brazo y la plataforma móvil es necesario considerar las cargas a las que cada uno de los elementos va a estar expuesto, para ello se realizó los cálculos detallados a continuación.

2.3.1. Cargas en brazo robótico

a) Motor axial muñeca

Para encontrar el motor idóneo en cada una de las articulaciones del brazo, se realiza el cálculo requerido en cada actuador. Para el efecto aplicamos el principio:

$$T = F \cdot d$$

A partir de la ecuación podemos ir aplicando para cada articulación según la distancia que separa de cada articulación analizada:

Muñeca:

ω_{mg} : Peso motor gripper

d_{mg} : Longitud motor gripper

ω_{ac} : Peso acople motor

d_{ac} : Distancia acople motor

ω_{gr} : Peso gripper

d_{pb} : Distancia al centro de gravedad del gripper

ω_{cu} : Peso de la carga útil

P_b : Punto de posicionamiento

T_{m1} : Torque motor uno

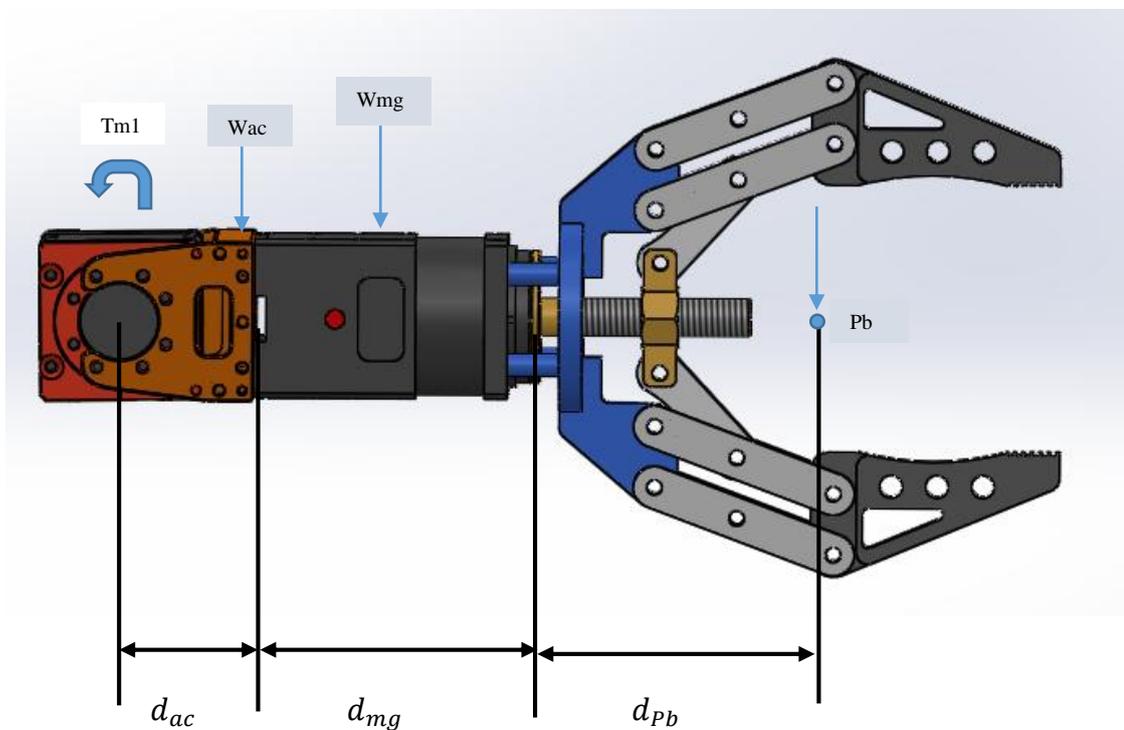


Figura 27 Articulación Muñeca y gripper del brazo

$$T_{m1} = \omega_{ac} \left(\frac{d_{ac}}{2} \right) + \omega_{mg} \left(d_{ac} + \frac{d_{mg}}{2} \right) + \omega_{gr} (d_{ac} + d_{mg} + d_{pb})$$

$$+ \omega_{cu} (d_{ac} + d_{mg} + d_{pb})$$

$$T_{m1} = 0,6N \left(\frac{0,035}{2} \right) m + 2,55N \left(0,035 + \frac{0,072}{2} \right) m$$

$$+ 2,25N(0,035 + 0,072 + 0,069)m$$

$$+ 500N(0,035 + 0,072 + 0,069)m$$

$$T_{m1} = 1,48 Nm$$

Velocidad:

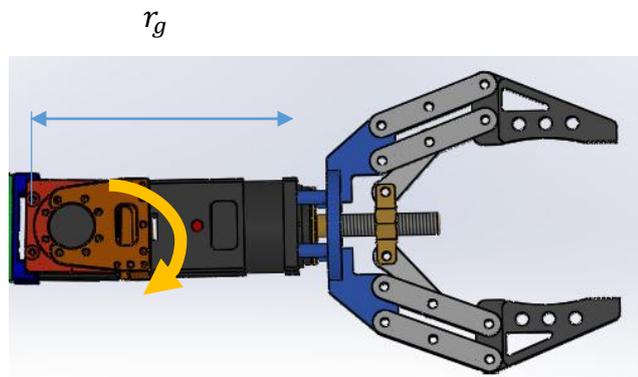


Figura 28. Radio de giro muñeca

$$v = \omega \cdot r_{giro}$$

$$\omega = v / r_{giro}$$

$$\omega = \frac{0,5m/s}{0,13 m}$$

$$\omega = 3,8\pi rad/s = 12 rad/s = 36 rpm$$

- Potencia

$$P = T\omega$$

$$P = 1,48Nm(12rad/s)$$

$$P = 17,8W$$

b) Motor de Rotación en la muñeca:

ω_{m1} : Peso motor uno

d_{m1} : Longitud motor uno

T_{m2} : Torque motor dos

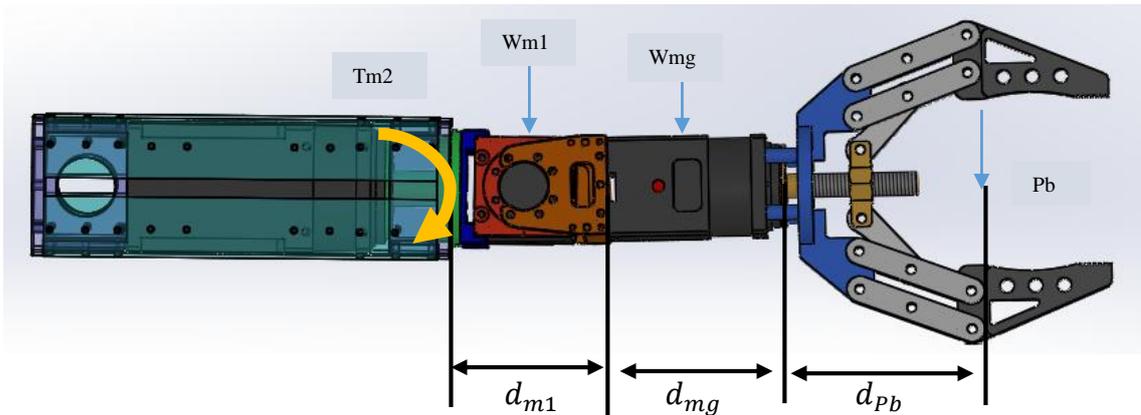


Figura 29 Motor de rotación en la articulación de la muñeca

$$T_{m2} = \omega_{m1}(d_{m1}) + \omega_{mg} \left(d_{m1} + \frac{d_{mg}}{2} \right) + \omega_{gr}(d_{m1} + d_{mg} + d_{pb}) + \omega_{cu}(d_{m1} + d_{mg} + d_{pb})$$

$$T_{m2} = 0,32N(0,095m) + 2,5N(0,091 + 0,036)m + 2,25N(0,23)m + 0,5N(0,23)m$$

$$T_{m2} = 2,33Nm$$

Velocidad:

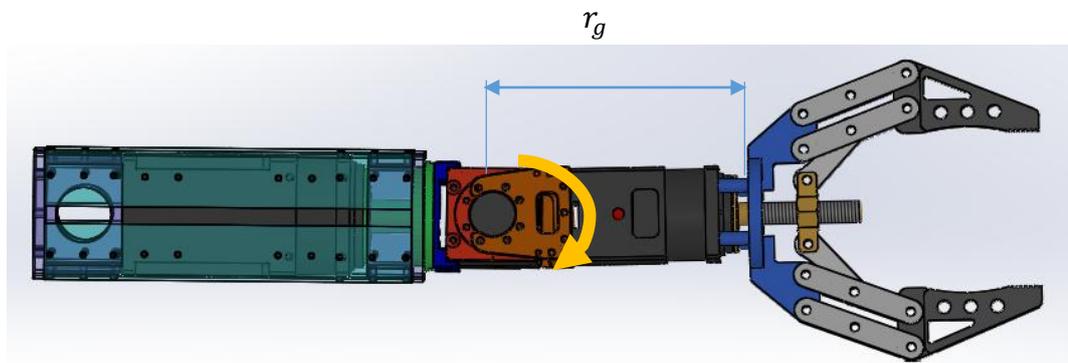


Figura 30 Motor en la articulación de la muñeca

$$v = \omega \cdot r_{giro}$$

$$\omega = v / r_{giro}$$

$$\omega = \frac{0,5m/s}{0,176m}$$

$$\omega = 1,42\pi\text{rad/s} = 8,92\text{rad/s} = 27\text{rpm}$$

- Potencia

$$P = T\omega$$

$$P = 2,33\text{Nm}(8,92\text{rad/s})$$

$$P = 20,8\text{W}$$

c) Motor en la articulación del codo:

ω_{eb} : Peso eslabón b

d_{eb} : Longitud eslabón b

T_{m3} : Torque motor 3

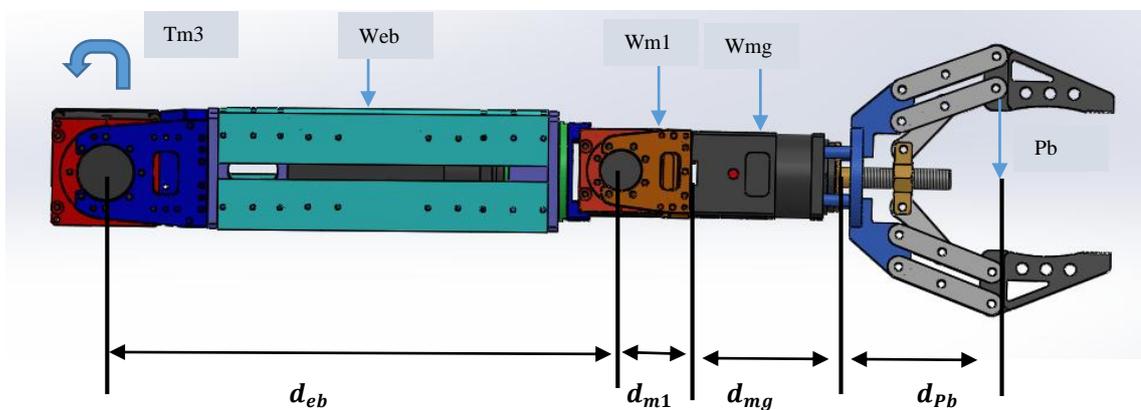


Figura 31 Motor en articulación del codo

$$T_{m3} = \omega_{eb} \left(\frac{d_{eb}}{2} \right) + (\omega_g + \omega_{m1})(d_{eb}) + \omega_{mg} \left(d_{eb} + \frac{d_{mg}}{2} \right) + \omega_{gr}(d_{eb} + d_{mg} + d_{pb})$$

$$+ \omega_{cu}(d_{eb} + d_m + d_{pb})$$

$$T_{m3} = 0,34\text{N} \left(\frac{0,26\text{m}}{2} \right) + (0,6 + 0,26)0,026\text{m} + 0,26\text{N}(0,026\text{m} + 0,036\text{cm})$$

$$+ 0,23\text{N}(0,4\text{m}) + 0,5\text{N}(0,4\text{m})$$

$$T_{m3} = 6,27\text{ Nm}$$

- Velocidad

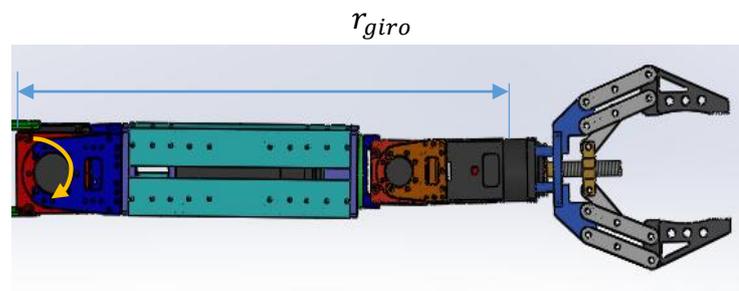


Figura 32. Radio de giro articulación del codo

$$v = \omega \cdot r_{giro}$$

$$\omega = v / r_{giro}$$

$$\omega = \frac{0,5 \text{ m/s}}{0,4 \text{ m}}$$

$$\omega = 1,25\pi \text{ rad/s} = 3,92 \text{ rad/s} = 11,9 \text{ rpm}$$

- Potencia

$$P = T\omega$$

$$P = 6,27 \text{ Nm}(3,92 \text{ rad/s})$$

$$P = 24,62 \text{ W}$$

d) Motor en la articulación del hombro:

ω_{ea} : Peso eslabón a

d_{ea} : Longitud eslabon a

T_{m4} : Torque motor cuatro

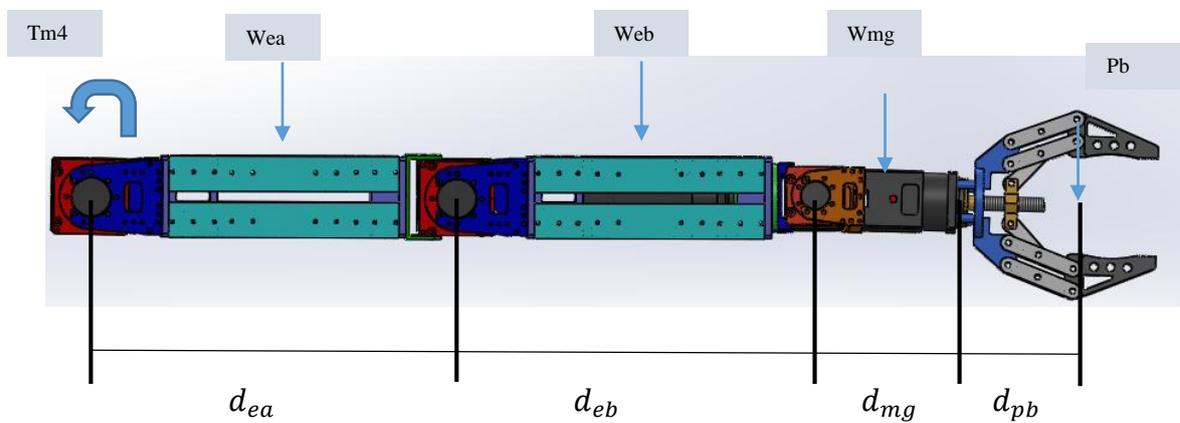


Figura 33. Motor en la Articulación del hombro

$$\begin{aligned}
 T_{m4} = & \omega_{ea} \left(\frac{d_{ea}}{2} \right) + (\omega_{m3})(d_{ea}) + \omega_{eb} \left(d_{ea} + \frac{d_{eb}}{2} \right) + (\omega_{m2} + \omega_{m1})(d_{ea} + d_{eb}) \\
 & + \omega_{mg} \left(d_{ea} + d_{eb} + \frac{d_{mg}}{2} \right) + \omega_{gr}(d_{ea} + d_{eb} + d_{mg} + d_{pb}) \\
 & + \omega_{cu}(d_{ea} + d_{eb} + d_m + d_{pb})
 \end{aligned}$$

$$T_{m4} = 0,34N \left(\frac{0,26m}{2} \right) + (0,66N)0,26m + 0,34N(0,26m + 0,13m) + 0,8N(0,52m) \\ + 0,26N(0,58m) + 0,23N(0,69m) + 0,5N(0,76m)$$

$$T_{m4} = 14,60 Nm$$

- **Velocidad**

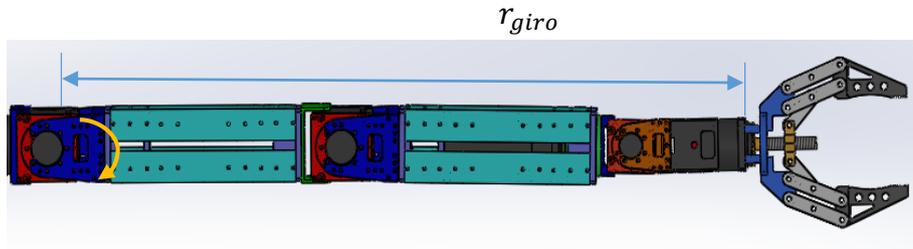


Figura 34. Radio de giro en la Articulación del hombro

$$v = \omega \cdot r_{giro}$$

$$\omega = v / r_{giro}$$

$$\omega = \frac{1m/s}{0,85 m}$$

$$\omega = 1.17\pi rad/s = 3.6 rad/s = 11,1 rpm$$

- **Potencia**

$$P = T\omega$$

$$P = 14,6Nm(3,6rad/s)$$

$$P = 52,5W$$

e) Motor en la articulación base:

ω_{m3} : Peso motor base

d_{m3} : Longitud acople motor hombro

T_{m5} : Torque motor cinco

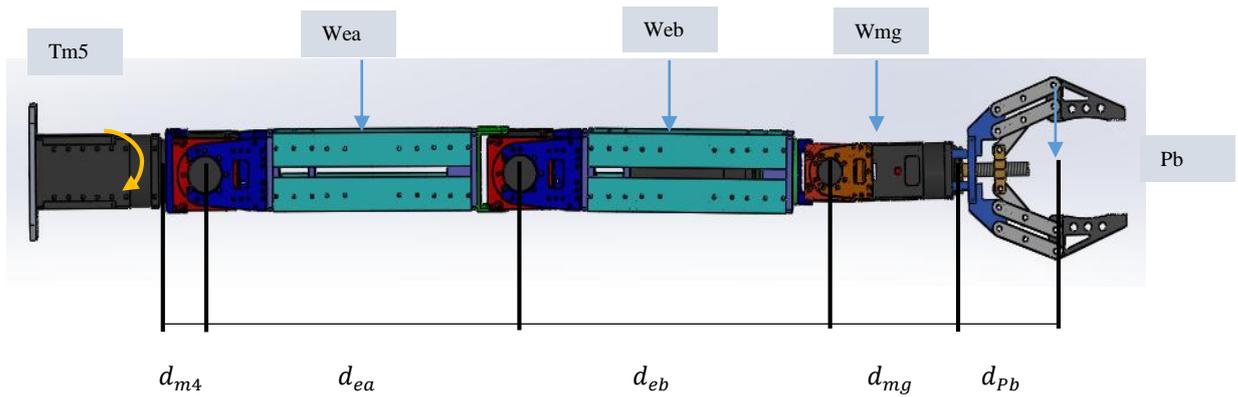


Figura 35 Motor en la articulación base del brazo

$$T_{m5} = \omega_{m4} \left(\frac{d_{m4}}{2} \right) + \omega_{ea} \left(\frac{d_{ea}}{2} \right) + (\omega_{m3})(d_{ea}) + \omega_{eb} \left(d_{ea} + \frac{d_{eb}}{2} \right) + (\omega_{m2} + \omega_{m1})(d_{ea} + d_{eb}) + \omega_{mg} \left(d_{ea} + d_{eb} + \frac{d_{mg}}{2} \right) + \omega_{gr}(d_{ea} + d_{eb} + d_{mg} + d_{pb}) + \omega_{cu}(d_{ea} + d_{eb} + d_{mg} + d_{pb})$$

$$T_{m5} = 0,66N \left(\frac{0,35m}{2} \right) + (0,66N)(0,26m) + 0,34N(0,26m + 0,13m) + 0,86N(0,52m) + 0,26N(0,58m) + 0,23N(0,69m) + 0,5N(0,76m)$$

$$T_{m5} = 14,70 \text{ Nm}$$

- **Velocidad**

Al requerimiento más alto de velocidad de 1m/s en el extremo operativo se calcula la velocidad angular para el motor 5 con un radio de giro determinado por la longitud del brazo

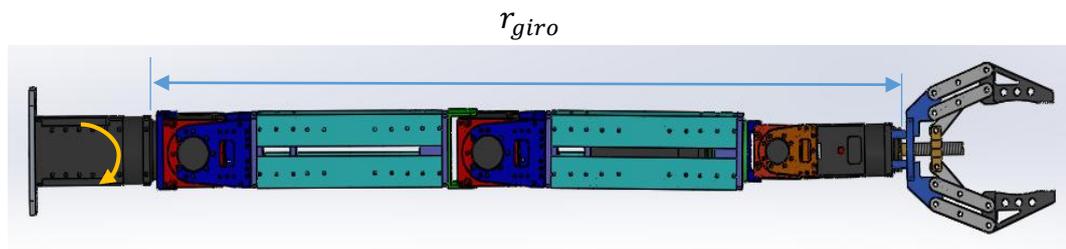


Figura 36 Radio de giro en la articulación del hombro

$$r_{giro}: 1.1m$$

$$v = \omega \cdot r_{giro}$$

$$\omega = v / r_{giro}$$

$$\omega = \frac{1m/s}{1,10 \text{ m}}$$

$$\omega = 0,9\pi rad/s = 2,85 rad/s$$

- **Potencia**

$$P = T\omega$$

$$P = 14,7Nm(2,85rad/s)$$

$$P = 42W$$

f) Tornillo Gripper

Para el análisis del sistema de tornillo se realiza el estudio de la fuerza que se transmite a partir de la rotación del motor hacia los dedos del gripper los cuales se cierran o dan apertura para sujetar un objeto. Para el efecto hemos realizado primeramente el análisis en el sistema de tornillo de potencia el cual transmite la fuerza necesaria hacia el sistema de sujeción.

Para el caso primero se encuentra la fuerza de rozamiento que existe entre el objeto y el gripper, donde:

μ : Coeficiente de fricción aluminio y plástico: 0,35 (Fórmulas de Ingeniería, Diaz, 2016)

F_r : Fuerza de rozamiento

F_{ap} : Fuerza de apriete

N : Normal

W_o : Peso del objeto=5N

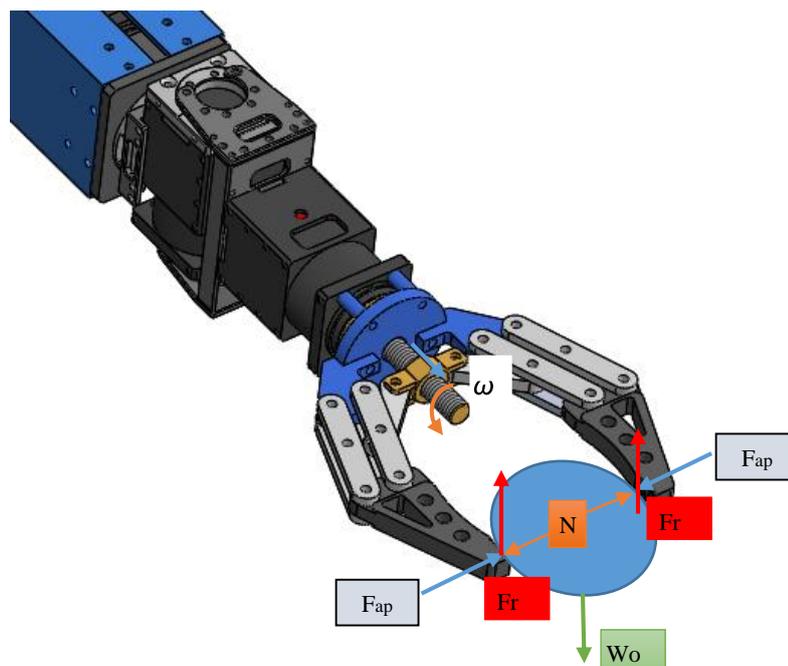


Figura 37 Gripper sistema de tornillo

$$F_r \geq W_o$$

$$F_r = \mu N \geq W_o$$

$$N = F_{ap}$$

$$F_{ap} \geq \frac{W_o}{\mu}$$

$$F_{ap} = \frac{5N}{0,35}$$

$$F_{ap} = 14,28N$$

Considerando que la fuerza debe mantenerse para cualquier magnitud de apertura, se realiza el análisis de fuerza ejercida en un tiempo de 1,75s que tarda en abrir o cerrar el gripper.

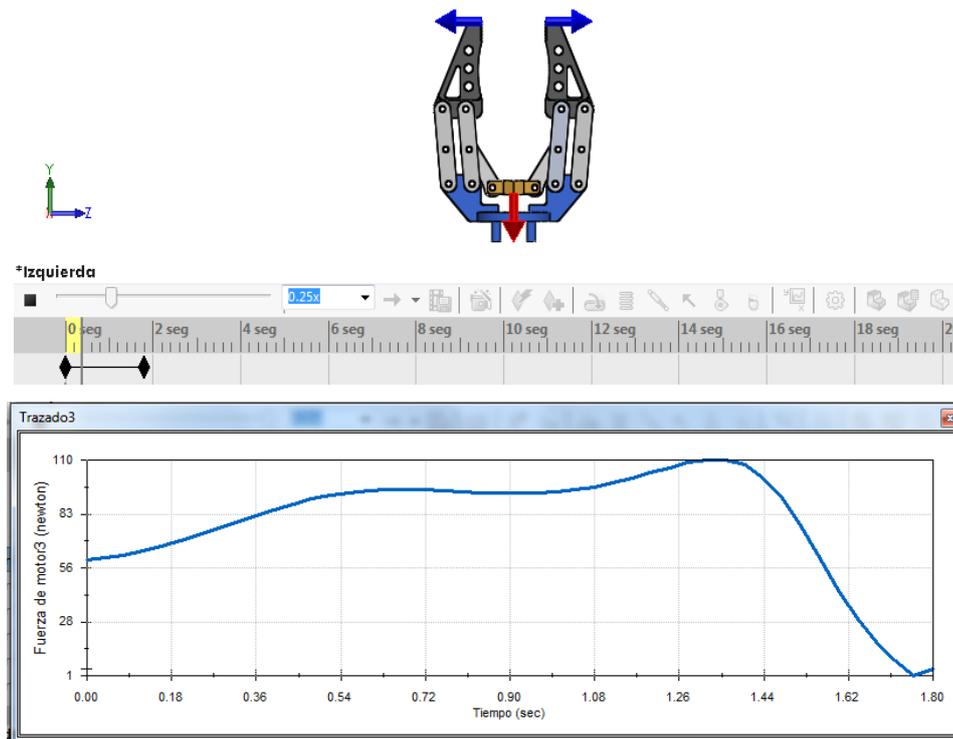


Figura 38. Análisis de fuerza gripper

De la gráfica podemos concluir que la mayor fuerza que se requiere para sujetar 0,5Kg durante 1,75s es de 110N.

F_T : Fuerza para desplazar la tuerca en el tornillo = 110N

- **Tornillo de potencia:**

En la figura se representa un esquema del mecanismo de tornillo de potencia bajo la base de apoyo de la carga (FT)

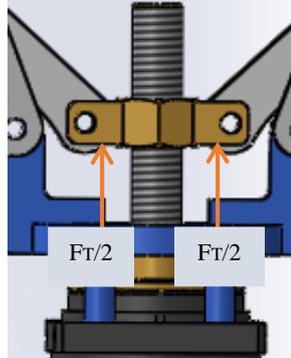


Figura 39. Esquema mecanismo

Para encontrar el par torsional (T_M) necesario para subir una carga de valor (FT), usando un tornillo de potencia de rosca cuadrada

p : el paso o avance del tornillo

$$T_M = \frac{F_T D_P}{2} \left[\frac{L + \pi f D_P}{\pi D_P - f L} \right]$$

Donde:

D_P : Diámetro primitivo del tornillo M10: 8,16mm

L : Avance del tornillo: 1,5mm

f : Coeficiente de fricción entre la tuerca y el tornillo: 0,74

F_s : Factor de seguridad: 1,5

F_{ap} : Fuerza de apriete: 170,57

$$T_M = \frac{110N(8,16mm)}{2} \left[\frac{1,5mm + \pi 0,74(8,16mm)}{\pi 8,16mm - 0,74(1,5mm)} \right]$$

$$T_M = 374,59Nmm = 0,37Nm$$

$$T_M = 0,37Nm(F_s)$$

$$T_M = 0,56Nm = 4,96 \text{ lbf.in}$$

Para encontrar la potencia necesaria en el motor es necesario encontrar la velocidad requerida en el tornillo.

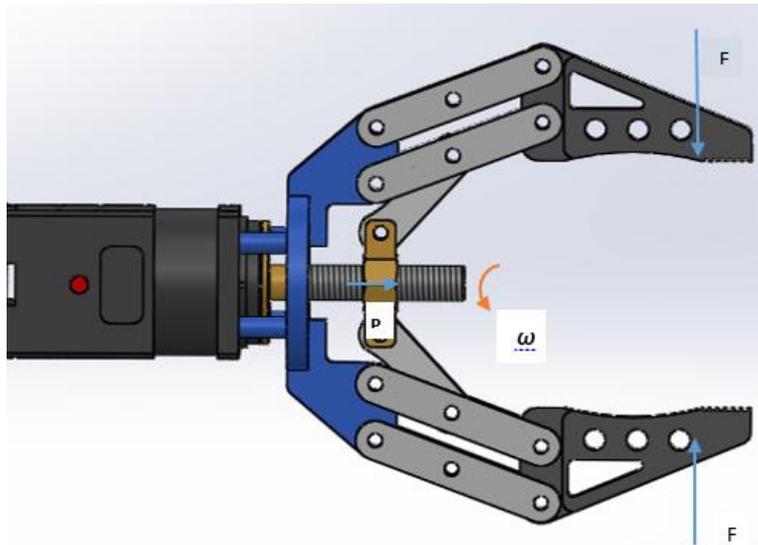


Figura 40. Diagrama de fuerzas grípper

Para calcular la velocidad angular de giro del motor partimos de los requerimientos, en el que la tuerca debe desplazarse por el tornillo 12mm en un tiempo de 20 segundos para cerrar completamente el grípper.

n : Velocidad angular del motor del grípper

Dis : Distancia recorrida por la tuerca=12mm

Dist=12mm

t = 20s

V =0.6 mm/s

Como el tornillo tiene un paso de 1.5 mm, quiere decir que al dar un giro recorre 1,5 mm:

$$n = 0,6 \frac{mm}{s} \cdot \frac{1rev}{1,5mm} \cdot 60s$$

$$n = 24rpm$$

Con la velocidad angular se puede calcular la potencia necesaria en el motor por medio de la siguiente ecuación.

$$P = T_M \cdot n / 6300$$

$$P = 4,96lb.in(24rpm) / 6300$$

$$P = 0,018HP = 13,4w$$

2.3.2. Velocidad y aceleración en el extremo operativo del brazo

Al requerimiento en la posición más crítica del brazo se calcula la velocidad y aceleración máxima que pueda alcanzar el extremo operativo por lo tanto se procede calculando la velocidad angular para el motor 5 con un radio dado por la longitud total del brazo



Figura 41. Brazo extendido posición inicial

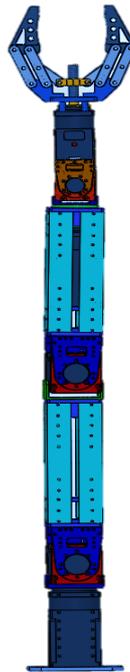


Figura 42. Brazo extendido posición final

w_{max} : Velocidad angular maxima del motor = 1,25rad/s

r_g : radio de giro del brazo = 0.75m

m_b : Masa del brazo = 3,76Kg

Con la fórmula de velocidad angular se puede obtener el tiempo en el que tarda alcanzar desde una posición horizontal a un ángulo recto.

$$\omega = 1,25rad/s$$

$$\bar{\omega} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1}$$

$$\bar{\omega} = \frac{\pi/2 - 0}{t_2 - t_1}$$

$$\Delta t = \frac{\pi/2}{\frac{1,25rad}{s}}$$

$$\Delta t = 1,26s$$

Posteriormente se puede encontrar la aceleración angular considerando que parte del reposo.

$$\bar{\alpha} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{1.25rad/s}{1.26s}$$

$$\bar{\alpha} = 0,99 \frac{rad}{s^2}$$

Finalmente encontramos la inercia por medio de la ecuación dada, para posteriormente hallar el momento que se produce en el brazo.

$$I = Mr_g^2$$

$$I = (3,76Kg)(0.75m)^2$$

$$I = 2,12KgNm^2$$

$$M = I\alpha$$

$$M = (2,12Kg m^2) 0,89 \frac{rad}{s^2}$$

$$M = 1,88 \frac{Kgm^2}{s^2} = 18,8Nm$$

2.4. Diseño del brazo manipulador

2.4.1. Selección de actuadores

Con los valores calculados en la sección 2.3 se selecciona los motores para cada articulación. Como sistema de accionamiento se ha determinado utilizar actuadores eléctricos debido a la precisión y facilidad en el control de movimiento. Se han seleccionado en base a la torque, velocidad, potencia requerida, así como también el peso el costo y las facilidades en el control. En la tabla 1 se puede diferenciar las características que poseen cada uno de los actuadores en las marcas de mayor aceptación en el mercado, tomando como referencia el motor con mayor capacidad que necesita el sistema, el cual se

acerca a un valor de 30 watts de potencia que es el de mayor aplicación en el brazo.

Tabla 1

Características en marcas de actuadores

	Dynamixel L54-30-S500R1	Hyteck HS-M7990TH	TowerPro MG959 Servo
Potencia	30 w	27w	23 w
Voltaje	24 v	7,4 V	6v
Velocidad	28,7 rpm	58,8 rpm	71rpm
Torque	4,3 Nm	4,31 Nm	3 Nm
Peso	612 g	80g	490g
Precio	\$ 800	\$200	\$39
Control	Autocontrol	Requiere controlador	Requiere controlador

Fuente: (servodatabase, 2009)

Por lo tanto, ha prevalecido la marca Dynamixel debido a que integran sistemas de autocontrol, medida de posición, velocidad y frenos, características técnicas que se puede aplicar en cada articulación. A pesar de ser una de los mas costosos del mercado, brinda un torque óptimo para los parámetros requeridos, aunque el peso es el más alto, facilita sobremanera el control.

Mediante el cálculo de torque y velocidad en cada articulación se encuentra la potencia que cada uno de los actuadores necesita, por medio de los cálculos efectuados en el inciso 2.3. Por lo tanto se selecciona los motores con las potencias calculadas, los cuales se detallan a continuación en la figura 43:

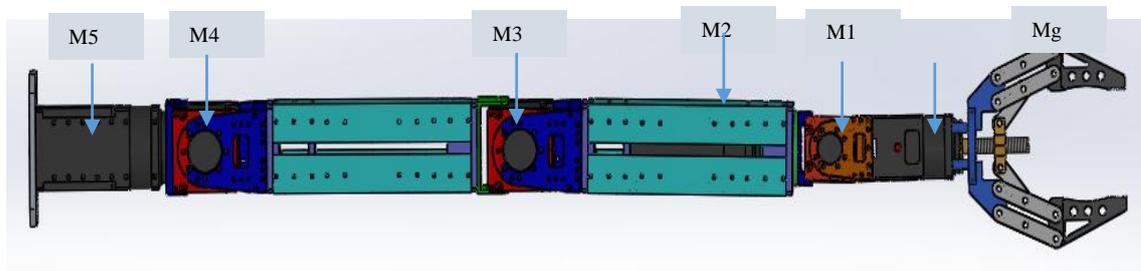


Figura 43. Ubicación Motores

Tabla 2**Características técnicas motores requeridos**

Motor	Potencia W	Torque Nm	RPM
M1	18,3	1,5	36
M2	20,8	5,4	27
M3	24,6	6,27	11,9
M4	53	14,6	11,2
M5	42	14,7	8,6
Mg	0,55	0,06	8,6

Con las características definidas para cada articulación se verificó las potencias establecidas de los motores

Se utilizaron 3 modelos:

- DYNAMIXEL PRO L54-50-S500R
- DYNAMIXEL PRO L54-30-S500R
- DYNAMIXEL PRO L42-10-S300-R1

Las características de cada motor se detallan en las tablas de especificaciones de motores en la sección anexos.

Por lo tanto se seleccionó:

Para M1 se selecciona el motor DYNAMIXEL PRO L54-30-S500R

Para M2 se selecciona el motor DYNAMIXEL PRO L54-30-S500R

Para M3 se selecciona el motor DYNAMIXEL PRO L54-30-S500R

Para M4 se selecciona el motor DYNAMIXEL PRO L54-50-S500R

Para M5 se selecciona el motor DYNAMIXEL PRO L54-50-S500R

Para Mg se selecciona el motor DYNAMIXEL PRO L42-10-S300-R1

2.4.2. Transmisiones

- **Accionamiento directo**

En el brazo robótico se transmite los movimientos por el accionamiento directo, el eje del actuador se conecta directamente a la articulación, sin utilización de reductores intermedios, ya que éstos introducen defectos negativos como juego angular, rozamiento, que impiden alcanzar la precisión y velocidad requeridas. Por lo tanto al emplear un actuador de torque elevado se recurrió al

accionamiento directo debido a que su posicionamiento es rápido y preciso, de esta manera se evita rozamientos de transmisiones y reductores de la misma manera existe mayor control del sistema y se simplifica el sistema mecánico.

2.4.3. Modelado de Frames:

Para conformar la estructura del brazo robótico se emplea acoples o placas llamadas frames los cuales sujetan y forman la unión de elementos del brazo para de esta forma generar las respectivas articulaciones. Para ello se realizó inicialmente una documentación de los diseños existentes en la marca robotis como se observa en el capítulo I y se los rediseño con las medidas necesarias para el presente proyecto tomando en cuenta las magnitudes físicas requeridas desde lo motores.

Se inició el diseño con el motor base de la estructura cuyo movimiento proporciona rotación al brazo, lo cual requiere de un acople necesario para unirse al siguiente motor como se ve en la figura 44. El diseño del acople cuenta con los espacios y orificios necesarios para la inserción de pernos y otros elementos de ajuste, de la misma manera existen agujeros realizados con el fin de optimizar el material y disminuir el peso total que soportara la estructura.

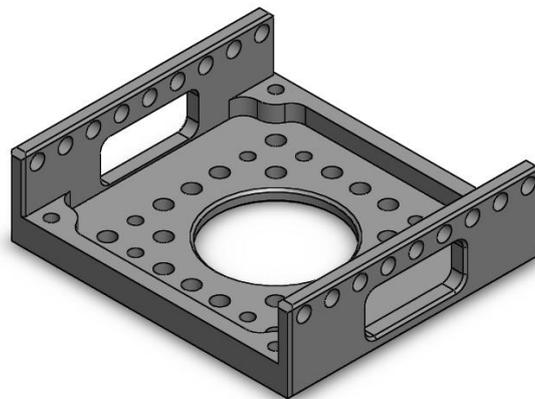
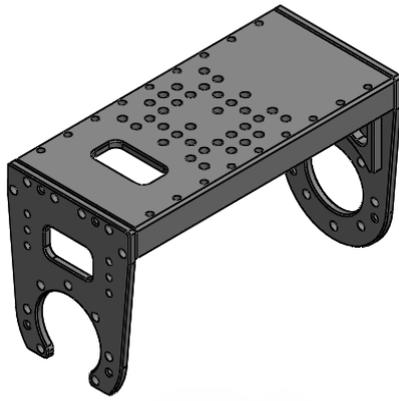
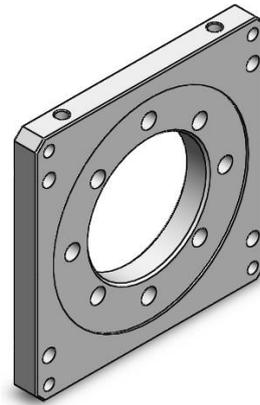


Figura 44. Frame FRP54-A110

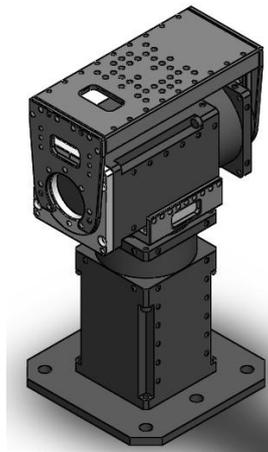
Una vez fijado el motor base se necesitó de un acople que conecte al siguiente motor realizando una comparación el brazo humano representaría el hombro, esta articulación permite desplazar a la estructura en dirección vertical, como se ve en la figura 45 para eso se requirió de dos acoples adicionales



a) Frame Frp 54H001



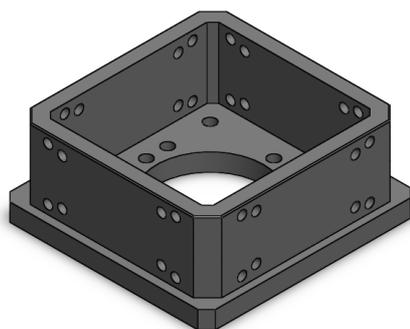
b) Frame Frp 54A110



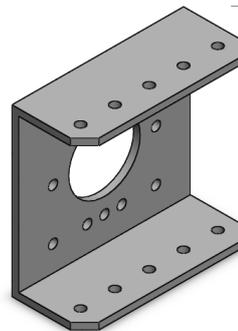
c) Acople motor base

Figura 45 Articulación Motor Base

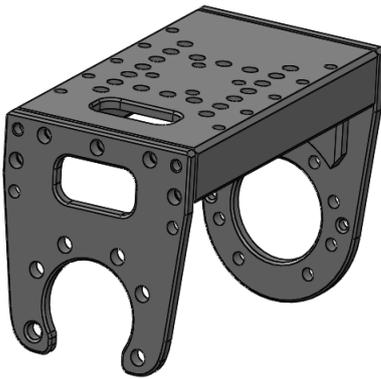
En la segunda articulación se requiere de otro acople que conecte el eslabón inferior del brazo con el siguiente motor como se ve en la figura 48 y posteriormente con el eslabón superior que conecta el codo con la muñeca. Por la parte superior del mismo motor se conecta el siguiente Frame para completar la articulación del codo e incluir la parte final del brazo como se indica en la figura 46.



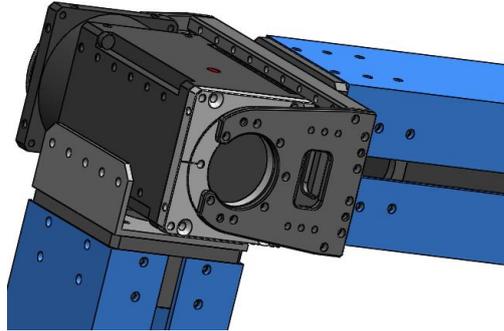
a) Frame Frp54 A13



b) Frame FRP 54 H210



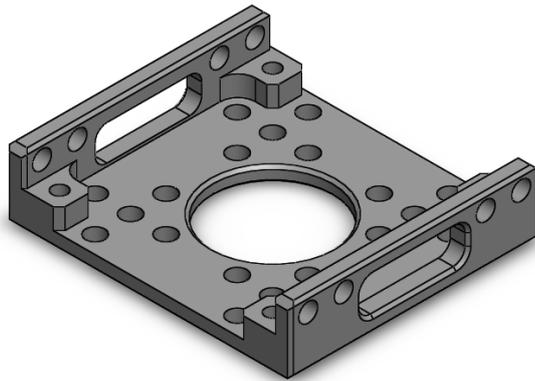
c) Frame Frp54-I110



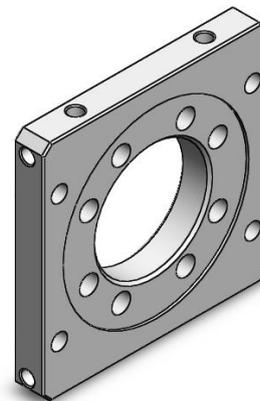
d) Acolpes en motor

Figura 46. Articulación Codo

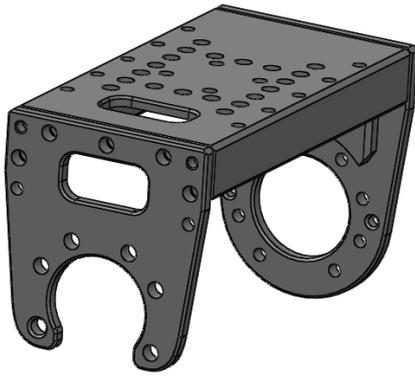
Al ser un brazo antropomórfico la tercera articulación representa la muñeca del brazo de un humano, para lo cual esta integra dos motores en la rotación y orientación, movimientos que requieren de frames que fijen a los motores como se ve en la figura 47.



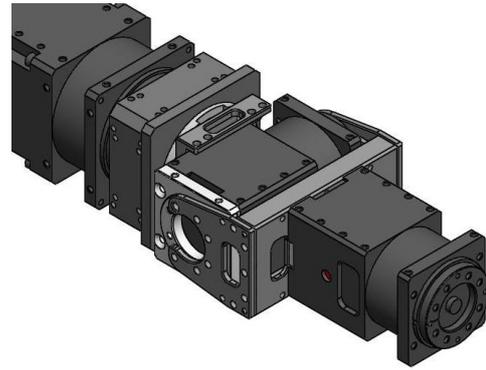
a) Frame Frp54 H002



b) Frame Frp54-I110



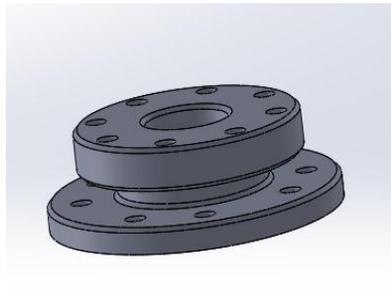
c) Frame FRP54-A110



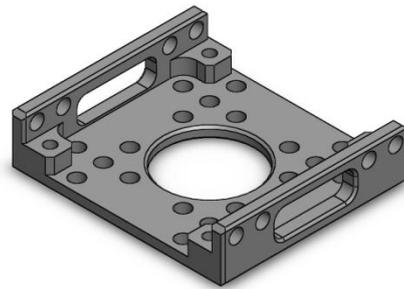
d) Acoples motor muñeca

Figura 47. Articulación Muñeca

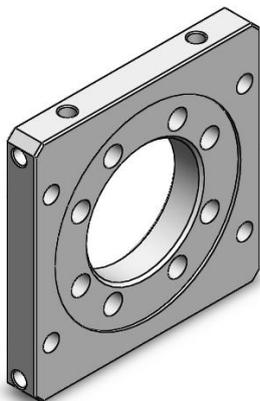
Finalmente para la implementación del gripper o efector final se necesita de un acople que conecte al motor de la muñeca con el actuador del gripper o la herramienta necesaria, como se muestra en la figura 48.



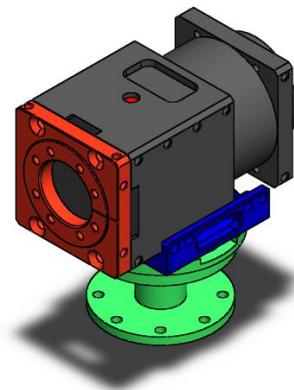
a) Acople circular motor Frame FRP54-T110



b) Base motor muñeca



c) Acople motor muñeca



d) Articulación muñeca

Figura 48. Articulación Gripper

2.4.4. Modelado Gripper.

Se modelo los elementos que conforman el efector final inicialmente de dos dedos.

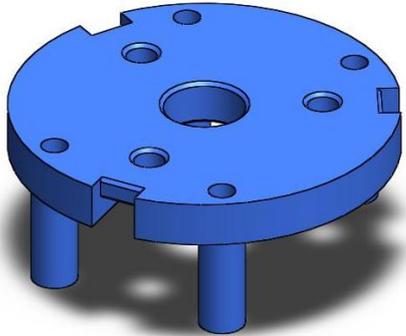


Figura 49 Base gripper

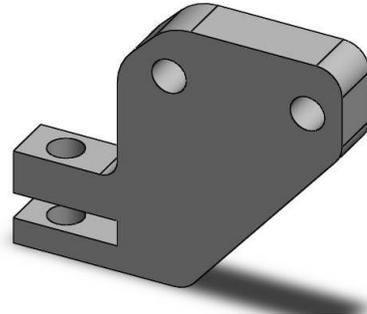


Figura 50. Acople 1

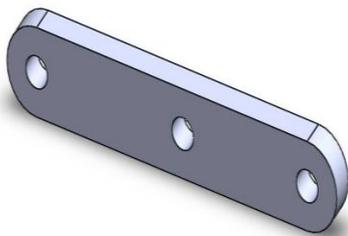


Figura 51 Acople 2

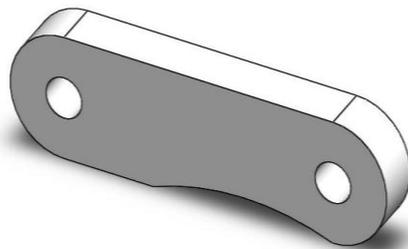


Figura 52 Acople 3

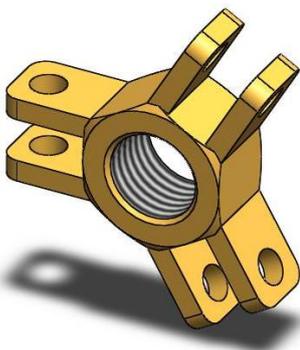


Figura 53 Tuerca Gripper

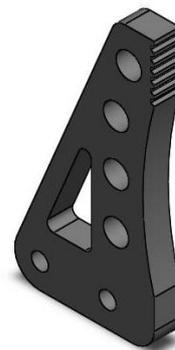


Figura 54 Pinza

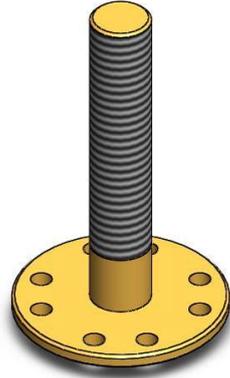


Figura 55 Tornillo Sinfin

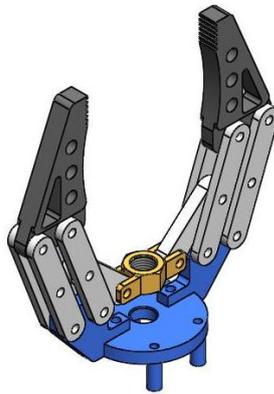


Figura 56 Ensamble Gripper dos dedos

Adicionalmente se realizó la construcción del gripper de tres dedos, basado en una estructura similar con los mismos elementos.

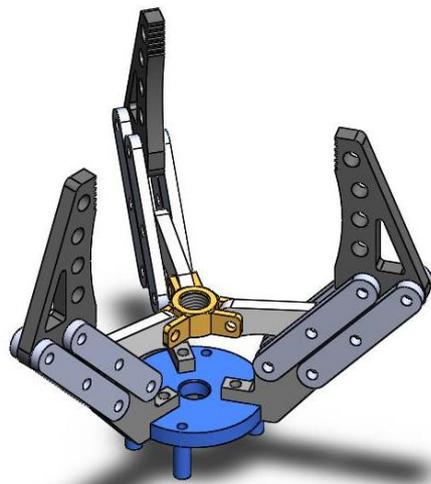


Figura 57 Ensamble Gripper tres dedos

2.4.5. Ensamble

En el ajuste de todas las piezas se necesita realizar un formato independiente con el fin de integrar todas las partes diseñadas que se va a necesitar para construir la estructura final, adicionalmente se requiere considerar todos los movimientos que va realizar cada elemento del brazo así como relaciones de posición y referencias entre los componentes

Finalmente se conformó el sistema de manipulación uniendo todos los elementos para obtener el brazo robótico

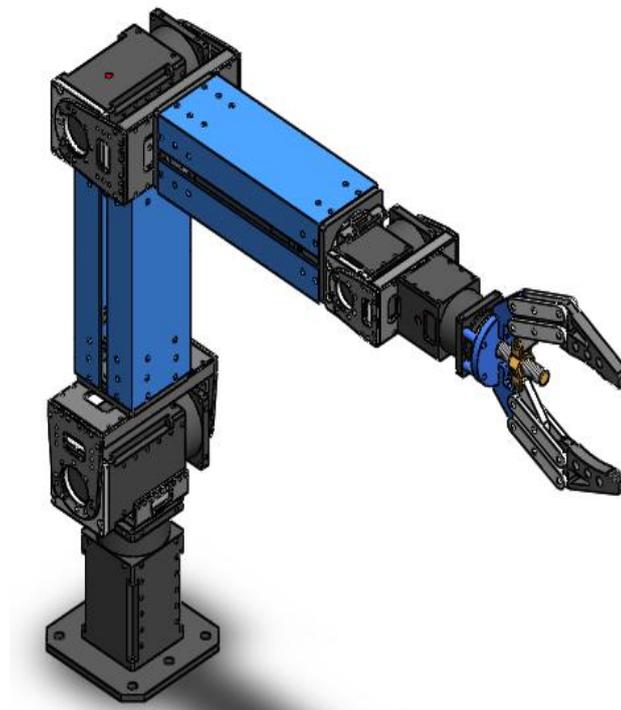


Figura 58 Ensamble Final Brazo Robótico

2.5. Análisis de esfuerzos en el brazo

A través de la simulación y el cálculo que se realiza para determinar de manera real el comportamiento del brazo robótico y cómo se comporta al ser sometido a un tipo de esfuerzo, se aplica una fuerza real y un par a cada parte y articulaciones.

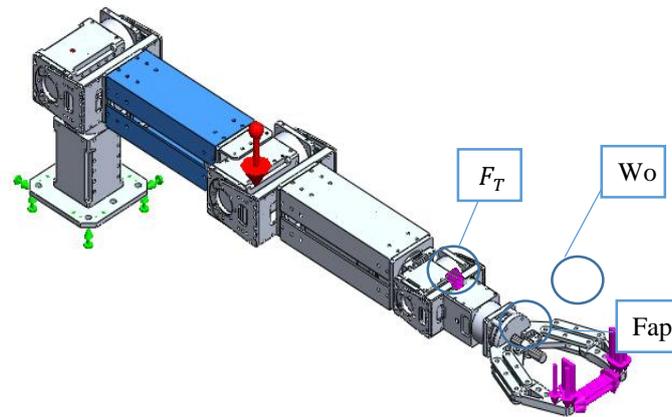


Figura 59 Fuerzas aplicadas en el brazo robótico

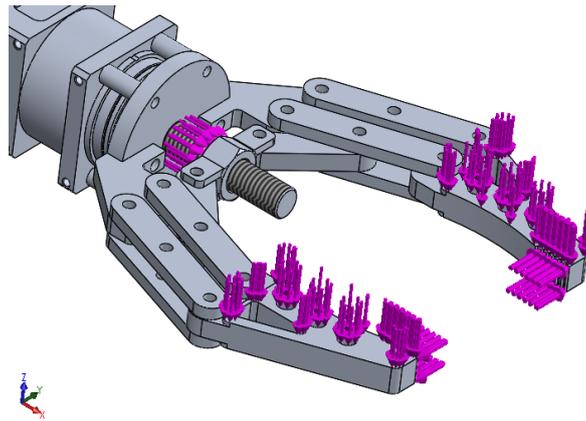


Figura 60 Fuerzas aplicadas en el Gripper

La fuerza y el par se utilizan para hacer el análisis de elementos finitos, para realizar el análisis de elementos finitos es necesario subdividir cada modelo en partes pequeñas de forma sencilla, lo cual permite obtener un diseño mallado, la precisión depende de la calidad de la malla, cuanto más delgada mayor es la precisión como se muestra en la figura 61.

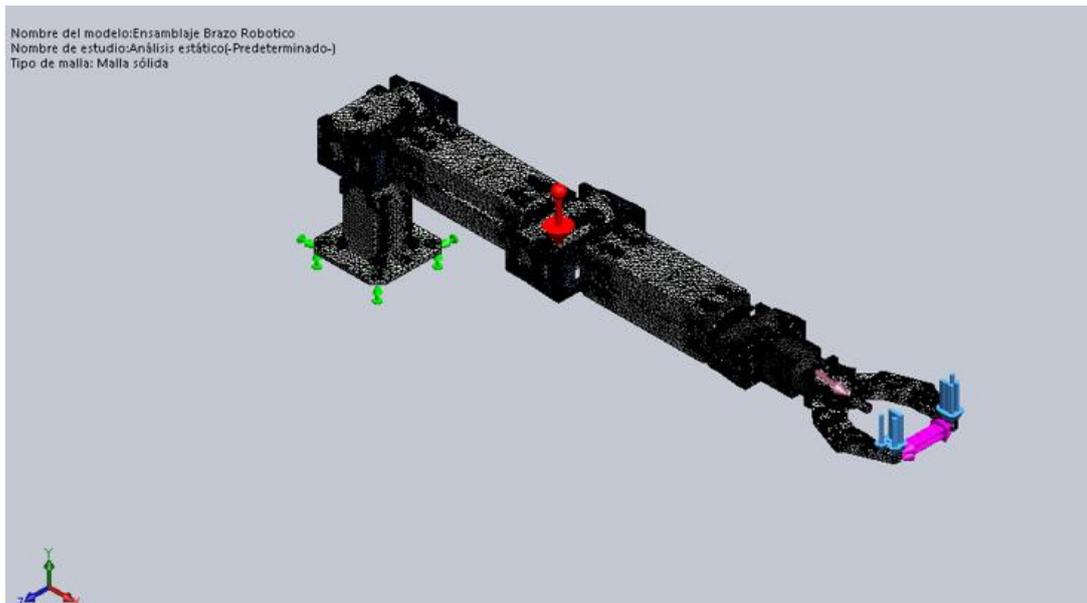


Figura 61 Mallado brazo robótico fuerzas aplicadas

Para realizar el estudio se requiere aplicar distintos tipos de análisis, de esta manera se garantiza la confiabilidad del brazo robótico lo cual ayuda a identificar si el modelo cumplirá con los requisitos para los que será fabricado, inicialmente se desarrolla un análisis estático aplicando una fuerza axial que indica el nivel de tensión el cual puede soportar el sistema, como se muestra en la Figura 62, como indicador tenemos el criterio de falla elástico de Von Mises el cual propone que un material dúctil sufre un fallo elástico cuando la energía de distorsión rebasa cierto valor, que en este caso es $6.287e07$

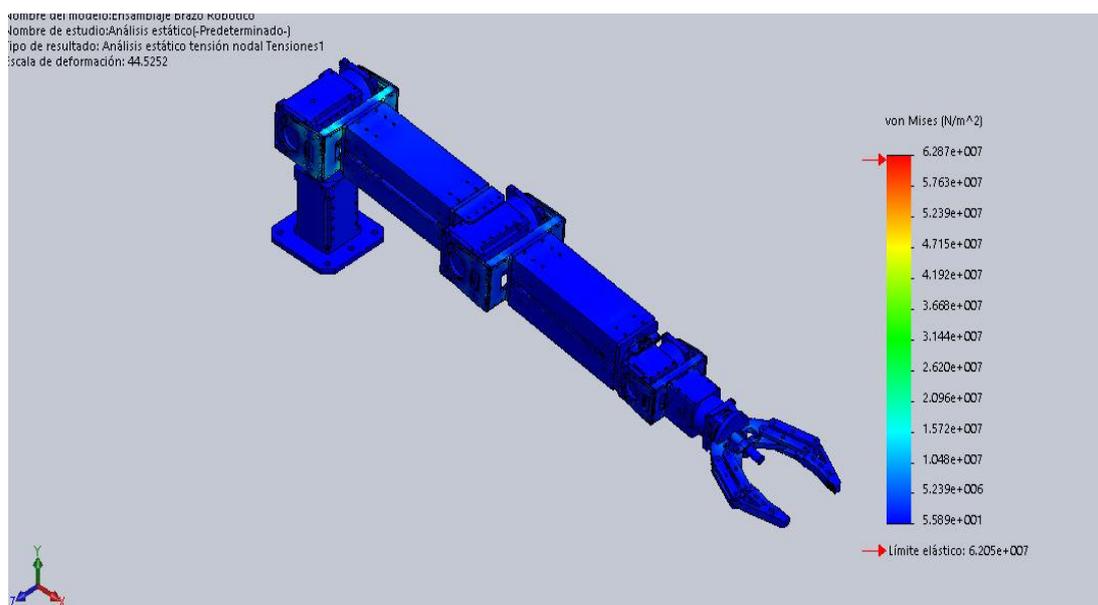


Figura 62. Análisis estático, tensión brazo robótico

Por otra parte para el estudio de deformación se evalúa la respuesta del diseño en base a la aplicación de cargas cíclicas las cuales actúan hasta el límite elástico que permite el material, por lo tanto asegura que la geometría permanezca en el rango de elasticidad lineal durante las pruebas, es decir una vez eliminada la carga, el componente vuelve a su forma original.

Como resultado la figura 63, muestra los niveles de deformación del material identificados en un rango de 0 a 1.83mm con una gama de colores de rojo hasta azul respectivamente, siendo el rojo el punto más crítico donde está concentrado el mayor esfuerzo.

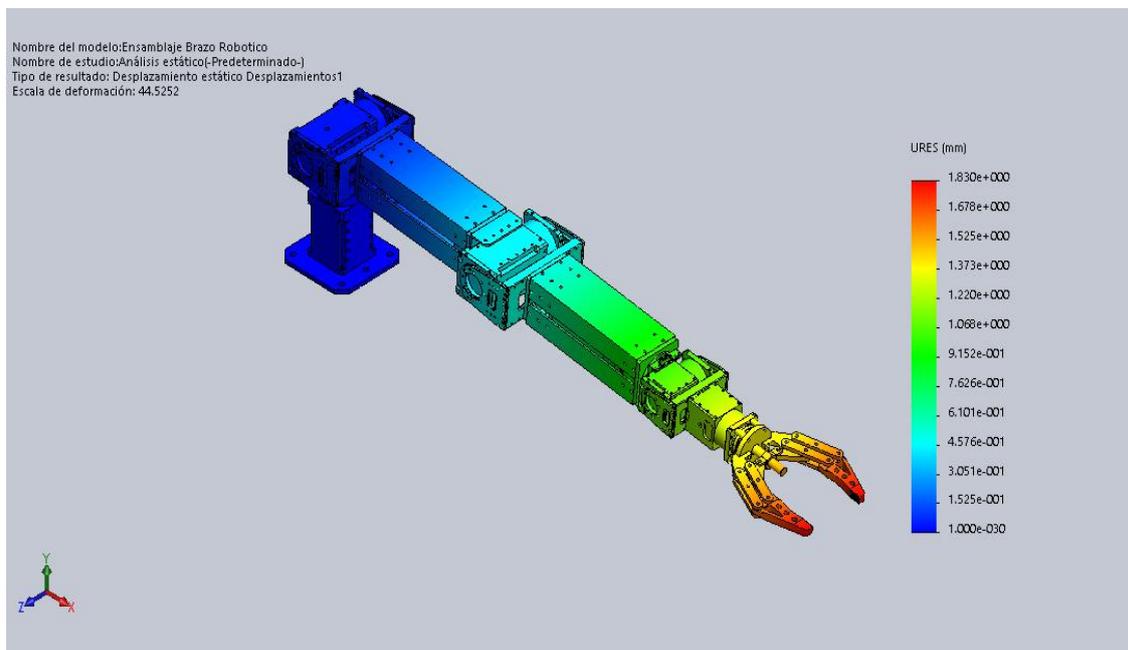


Figura 63. Análisis de desplazamiento brazo robótico

El factor de seguridad es el coeficiente entre el valor calculado de la capacidad máxima de un sistema y el valor real esperado, la figura 64, muestra un factor de seguridad superior a 1.0 esto significa que el material que se encuentra en esa ubicación está por encima del factor de seguridad lo cual indica que el material el esfuerzo al que será sometido, los criterios de falla normalmente predicen el fallo de una material que está sujeto a múltiples tensiones, la comprobación del factor de seguridad evalúa la seguridad del modelo

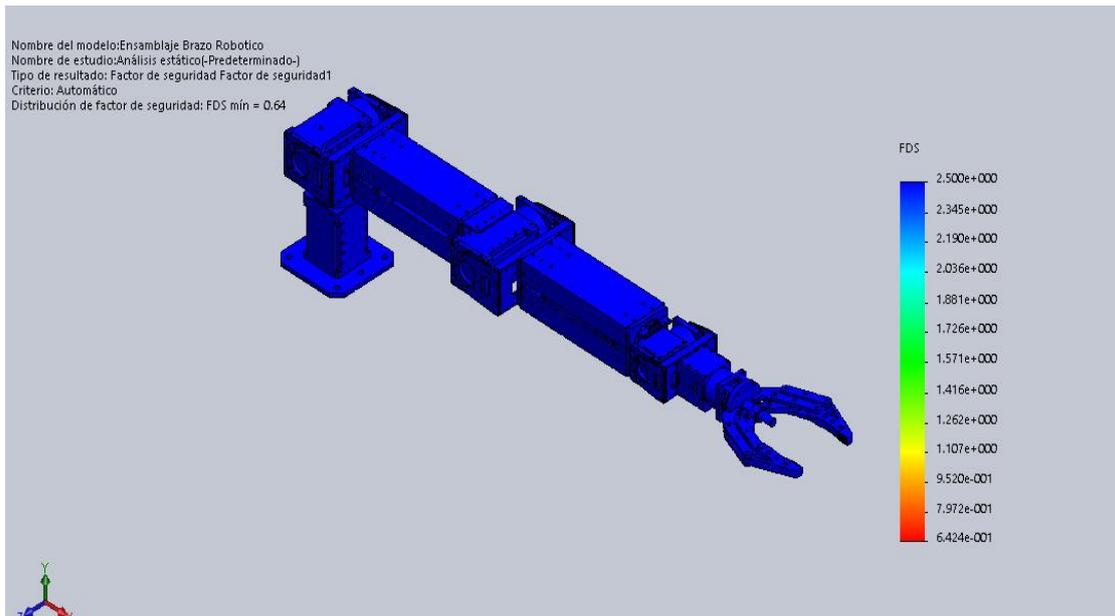


Figura 64. Factor de seguridad brazo robótico

2.6. Selección de materiales del brazo

Mediante al análisis de las propiedades físicas y mecánicas de diferentes materiales utilizados para la fabricación de componentes estructurales livianos, la comparación del valor de la relación peso/resistencia de materiales metálicos, no metálicos y compuestos, proporcionado por el análisis de esfuerzos y deformación

Para evaluar las propiedades de los materiales que más se adaptan a los requerimientos comparamos las diferentes características técnicas, en la selección final del material para la fabricación del brazo robótico en la etapa de construcción se evaluara la disponibilidad en el mercado, facilidad de adquisición y costo de cada una

Para la fabricación de los componentes del brazo robótico se escogió el aluminio 6061T6 que es una aleación de aluminio endurecido que contiene como principales elementos aluminio, magnesio y silicio, tratada térmicamente y envejecida artificialmente.

Tabla 3

Características Técnicas Mecánicas Aluminio 6061-T6

Resistencia a la fluencia	255 MPa (37 KSI)
Resistencia máxima	290 MPa (42 KSI)
Elongación	12% (en 50mm, espesor 1.6mm)
Módulo de elasticidad	69 GPa (10000 KSI)

Fuente: (Sumitec, 2015)

Se obtuvo los valores máximos de los esfuerzos en el brazo, los cuales se utilizaron para comparar con los esfuerzos máximos del aluminio 6061T6.

Tabla 4

Comparación características del material y requeridas en el brazo

Punto de esfuerzo máximo en el Brazo	Resistencia máxima del aluminio 6061T6	Observación
62,9 MPa	290Mpa	El material puede soportar los esfuerzos existentes en el brazo

Como se observa en la Tabla 4 el esfuerzo máximo que resiste el material es 48.9 MPa, valor que se encuentra dentro del rango de resistencia máxima del aluminio 6061T6 por lo tanto se puede seleccionar los perfiles disponibles comercialmente los cuales se detallan a continuación en la tabla 5

Tabla 5

Características Perfil Aluminio 6061-T6

ORDEN	FORMA	DENOMINACION	PESO	MEDIDAS
1		Transportador	0.72kg/m	60.20x25.40mm

Fuente: (CEDAL, 2015)

Como se puede observar este perfil nos permite componer los eslabones del brazo uniendo dos elementos de forma frontal y creando un espacio interno disponible para los actuadores y cables necesarios para el control

2.6.1. Parámetros de diseño de la plataforma

Los parámetros fundamentales para la construcción de la plataforma es que esté compuesta por una estructura compacta y resistente la cual permita soportar y transportar todos los elementos que integran el manipulador móvil. De la misma manera que la plataforma brinde estabilidad y confiabilidad en los movimientos realizados. Para ello se analizó los siguientes aspectos

2.6.2. Capacidad de carga

Capacidad máxima de carga de la plataforma móvil está determinada por el peso total del manipulador, adicionalmente los componentes internos que son los dispositivos eléctricos y de control. Para que finalmente en conjunto el sistema se capaz de sujetar una carga adicional de 0,5 kg.

2.6.3. Velocidad

La velocidad se encuentra dentro de los parámetros normales ya que su objetivo es transportar objetos en condiciones preestablecidas, por lo tanto se puede trabajar con una velocidad media aproximada de 0.8 m/s

2.6.4. Configuración

La configuración mecánica de la plataforma está determinada por el volumen interior que debe abarcar a los diferentes elementos internos que el manipulador requiere.

a. Medio de desplazamiento

Para el presente proyecto se estableció como medio de desplazamiento las ruedas, ya que son más fáciles de controlar (cada rueda posee 1 grado de libertad y como máximo el robot suele tener sólo 2 grados), son más robustos (menos partes móviles). Adicionalmente se distinguen por ser más rápidos, energéticamente más eficientes y admiten mayores cargas

b. Plataforma cuadríciclo.

El sistema se basa en cuatro ruedas tractoras que se montan de forma paralela en el chasis principal, se utilizan para seguir la trayectoria del robot y brindan un mayor contacto con la superficie de tal manera que se genere movimiento en cada una de las cuatro llantas.

2.6.5. Geometría de la estructura de la plataforma

La estructura mecánica de la plataforma es la encargada de delimitar el espacio interno y de la misma manera soportar el total de las cargas distribuidas en los diferentes segmentos para el efecto se ha dimensionado un espacio disponible para los elementos mecánicos internos como son los ejes, los soportes o chumaceras, poleas y bandas de transmisión, de la misma manera la plataforma abarca los elementos de control como son los actuadores, computadoras, fuentes y tarjetas.

En el diseño geométrico del chasis se considera la resistencia y estabilidad de la estructura para lo cual la plataforma debe estar apoyada sobre cuatro ruedas, por lo tanto se seleccionó el chasis sobre un prisma hexagonal no uniforme debido a que se requiere la estabilidad de la plataforma y por otra parte los segmentos inclinados en las esquinas para optimizar el peso y evitar que obstáculos en la superficie, detengan el movimiento, como se muestra en la figura 65.

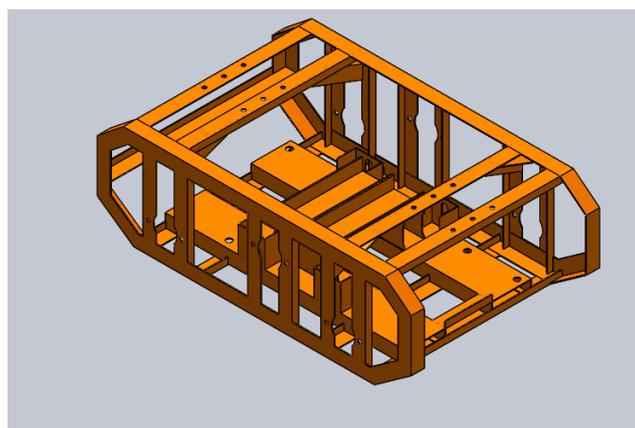


Figura 65 Geometría Plataforma

Por lo tanto con el objeto de maximizar el volumen y facilitar el desplazamiento se estructura una plataforma prismática con un volumen

aproximado para los elementos internos y cuyo dimensionamiento se detalla en el largo, ancho y profundidad de 600 X 360 X 200 mm respectivamente.

Es importante también considerar los espacios existentes entre las partes estáticas y en movimiento para que los actuadores y el sistema de transmisión tengan libertad para girar por lo tanto se estableció una distancia de 30 mm entre la banda y la estructura lateral de la carrocería. De la misma manera se registra para el acople de fijación de motores y chumaceras que se encuentran en el centro de la plataforma, dejando las baterías y computadora a los extremos frontal y posterior de la estructura, dando apertura a la ventilación que refrigera los elementos internos, esto permite obtener un diseño funcional óptimo en diversos escenarios.

Además la estructura brinda la posibilidad de acoplar otro brazo robótico para trabajar de forma cooperativa según sea la tarea para la el cual sea programado

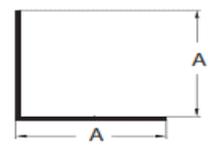
2.7. Selección de materiales de la plataforma

Con el análisis previo en la sección anterior se recurrió al mismo material para estructurar el chasis o alma de la plataforma el cual debe caracterizarse por ser una estructura rígida, liviana y estable se

Por lo tanto se hizo un análisis de los perfiles adecuados y disponibles comercialmente cuyas características se los detalla en la tabla 5

Tabla 6

Características perfiles de la estructura

ORD	CANT.	IMAGEN	DESCRIPCIÓN	PESO	DIMENSIO N
1	5		Ángulos de aletas iguales	0.213 kg/m	25.40 mm (Lado A)
2	5		Ángulos de aletas desiguales	0.139 Kg/m	25x12.70mm
3	2		Canales sin Aleta	0.56 kg/m	76.20x25.40 mm

Fuente: (CEDAL, 2015)

Como se puede observar en la tabla 6 el inciso número uno es un perfil liviano que nos permite tener una mayor firmeza en la estructura y sus aletas proporcionadas facilita para practicar una mejor soldadura, por ende este perfil delimitara toda la parte externa de la estructura.

Por otro lado para reforzar las paredes verticales de la estructura es necesario un perfil inferior en peso y dimensión de su silueta para lo cual se recurre al perfil dos de la tabla 6

Mientras que para la base inferior de la estructura, la cual soportara todos los elementos internos, deberá tener una mayor densidad del material y una longitud disponible para asentar los componentes, razón por la cual se estableció el perfil número tres de la tabla 6

2.8. Cálculo de cargas en la plataforma

Se procede a registrar los datos obtenidos de la plataforma para realizar los respectivos cálculos de las fuerzas a las que están sometidos cada uno de los miembros estructurales y componentes de transmisión.

El peso total se consideró al sumar cada una de las partes que involucran el sistema como es la plataforma y sus elementos, el brazo, el gripper, la carga que sujetara y un diez por ciento de componentes extras que puede afectar el sistema como detalla en W_T

Donde:

W_p peso de la plataforma= 30Kg

W_b Peso del brazo= 4,5Kg

W_g peso del gripper=0,5 Kg

W_c peso carga=0,5 Kg

W_s peso sensor=0,5 Kg

W_T peso total

$$W_T = W_p + W_b + W_g + W_c + W_s + 10\%W_T$$

$$W_T = 40Kg = 400N$$

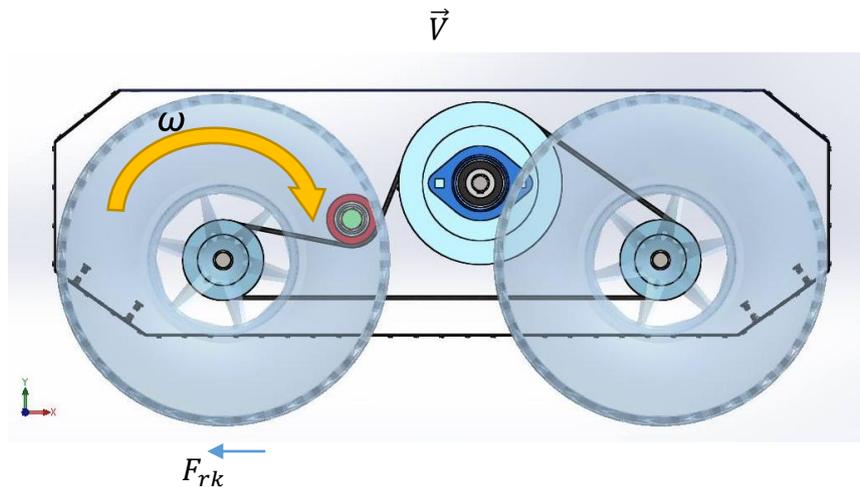


Figura 66. Sistema de transmisión polea – banda

2.9. Análisis cinemático y cinético de la plataforma

- **Selección Motor**

Para encontrar el motor requerido para la plataforma debemos calcular previamente la potencia y la relación de transmisión.

$$Pot_{req} = F \cdot \vec{V}$$

$$Pot_{req} = 320N \cdot (0,8m/s)$$

$$Pot_{req} = 255w$$

$$\frac{Pot_{req}}{i_{real}} = Pot_{mot}$$

$$Pot_{mot} = 255(2,14)$$

$$Pot_{mot} = 515W$$

Con la potencia obtenida se puede seleccionar un motor que permita mover todo el sistema, por lo tanto se propuso el motor: DYNAMIXEL PRO H54 -200 – S500R (2 motores de 200 W cada uno) que está disponible comercialmente, el cual entrega un torque alto y que permitiría el movimiento para todo el Sistema, lo cual será sometido a comprobación. Por medio del principio de potencia
Donde:

P_{motor} = Potencia máxima de motores

ω_{motor} = Velocidad angular del motor

T_{motor} = Torque del motor

P_{M1} = Potencia de operación del motor 1

$$P_{motores} = 2 * 200 W = 400 W$$

$$\omega_{motor} = 27.9 \frac{rev}{min} * \frac{2 * \pi * rad}{1 rev} * \frac{1 min}{60 s} = 2.92 \frac{rad}{s}$$

$$T_{motor} = 44.2 N * m$$

$$P_{M1} = \omega * T_{motor} = 2.92 \frac{rad}{s} * 44.2 N * m = 129.15 W$$

$$P_{total} = 2 * P_{M1} = 2 * 129.2 W = 258.3 W$$

De esta manera encontramos la potencia total máxima que los motores pueden generar, lo cual sería válido para la potencia necesaria que genera el movimiento en la plataforma

- **Velocidad Requerida**

La velocidad que se requiere en el sistema no puede estar en un rango alto ya que es un robot que necesita de un alto índice de precisión y seguridad en cada uno de sus movimientos. Por lo tanto se calcula la velocidad ideal

Donde;

$\vec{V}_{requerida}$ = Velocidad lineal requerida

\vec{V}_{ideal} = Velocidad ideal

$$\vec{V}_{requerida} = 0.8 m/s$$

$$\vec{V}_{ideal} = \frac{P_{total}}{F_{rk}} = \frac{258.3 W}{320 N} = 0.807 m/s$$

$$\vec{V}_{requerida} = \frac{\omega_{requerida} * \phi_{llanta}}{2}$$

$$\omega_{requerida} = \frac{2\vec{V}_{requerida}}{\phi_{llanta}}$$

- **Diámetro de la llanta**

Para encontrar el diámetro de la llanta por medio de la ecuación donde,

ϕ_{llanta} = Diámetro de la llanta

$$\phi_{llanta} = \frac{2V_{req}}{\omega_{mot}}$$

Asumo diámetro de llantas 26cm

$$\omega_{req} = \frac{V_{req}}{\phi_{llanta}/2}$$

$$\omega_{req} = \frac{0,8m/s}{0,13m}$$

$$\omega_{req} = 6,15rad/s$$

- **Relación de transmisión**

Es necesario tener un índice que especifique la diferencia en la velocidad angular que se requiere y la que genera el motor donde

i = relación de transmisión

$$i = \frac{\omega_{req}}{\omega_{mot}}$$

$$i = \frac{(6,15rad/s)}{2,92rad/s}$$

$$i = 2,08$$

Por lo tanto sería necesario la implementación de un sistema de transmisión que nos entregue la velocidad requerida para el tipo de llanta que se necesita en el sistema el cual de 10 pulgadas

- **Selección de poleas**

Para obtener una relación ideal que suministre la velocidad requerida se modifica hasta encontrar los diámetros exactos de las poleas de transmisión entre el eje del motor y el eje de las ruedas, al haber obtenido las relaciones

Donde;

- N_1 = Eje Motriz

N_2 = Eje Conducido

Al multiplicar esta relación por la velocidad angular del motor resulta la velocidad angular real.

Resultando por medio de la ecuación de velocidad lineal

Donde;

i_{real} = Relación de transmisión de operación

ω_{real} = Velocidad angular plataforma

$$i_{real} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$i_{real} = \frac{30}{14}$$

$$i_{real} = 2.14$$

De donde podemos encontrar la velocidad angular real.

$$i_{real} = \frac{\omega_{real}}{\omega_{motor}}$$

$$\therefore \omega_{real} = \omega_{motor} \cdot i_{real}$$

$$\omega_{real} = (27.9)2.14$$

$$\omega_{real} = 59.71 \text{ rpm}$$

$$\omega_{real} = 6.25 \text{ rad/s}$$

Luego se halla la velocidad lineal con el diámetro de la llanta

$$\omega_{real} = \frac{2\vec{V}}{\phi_{llanta}}$$

$$\vec{V} = \frac{\omega_{real} \cdot \phi_{llanta}}{2}$$

$$\vec{V} = \frac{(6.25)(0.26)}{2}$$

$$\vec{V} = 0.812 \text{ m/s}$$

$$0.812 \text{ m/s} \geq 0.8 \text{ m/s} \therefore \text{Cumple}$$

Para verificar que la potencia del motor se encuentre dentro de los valores de operación calculamos con la velocidad real

$$P_{real} = F_{rk} * \vec{V} = 320 [N] * 0.812 \text{ m/s} = 259.84 \text{ W}$$

$$P_{real} < P_{motor}$$

$$259.84 \text{ W} < 400 \text{ W} \therefore \text{Si cumple}$$

Por lo tanto la velocidad calculada con el sistema de transmisión si cumple la velocidad final lineal requerida para el sistema manipulador móvil.

• **Calculo de ejes**

Para el diseño de eje es necesario considerar las fuerzas tangenciales, cortantes y rotacionales a las que estará expuesto el eje, dentro de estas se consideran la tensión con las que conectara la banda al eje, así como también el peso total del sistema el cual afectara al eje apoyado en las chumaceras y a la rotación correspondiente de la llanta. De esta manera se realiza el análisis de esfuerzos

Donde;

ϕ_{polea} = Diámetro de la polea

$F_{tensión}$ = Fuerza de tensión ejercida por la banda

F_t = Fuerza Tangencial

FS = Factor de seguridad

T = Torque de salida

m = Masa total

$\phi_{polea} = 56.6 \text{ mm}$

$\phi_{llanta} = 260 \text{ mm}$

$F_{tensión} = 604.28 \text{ N}$

$T = 20.65 \text{ Nm}$

$m = 40 \text{ Kg}$

$FS = 3$

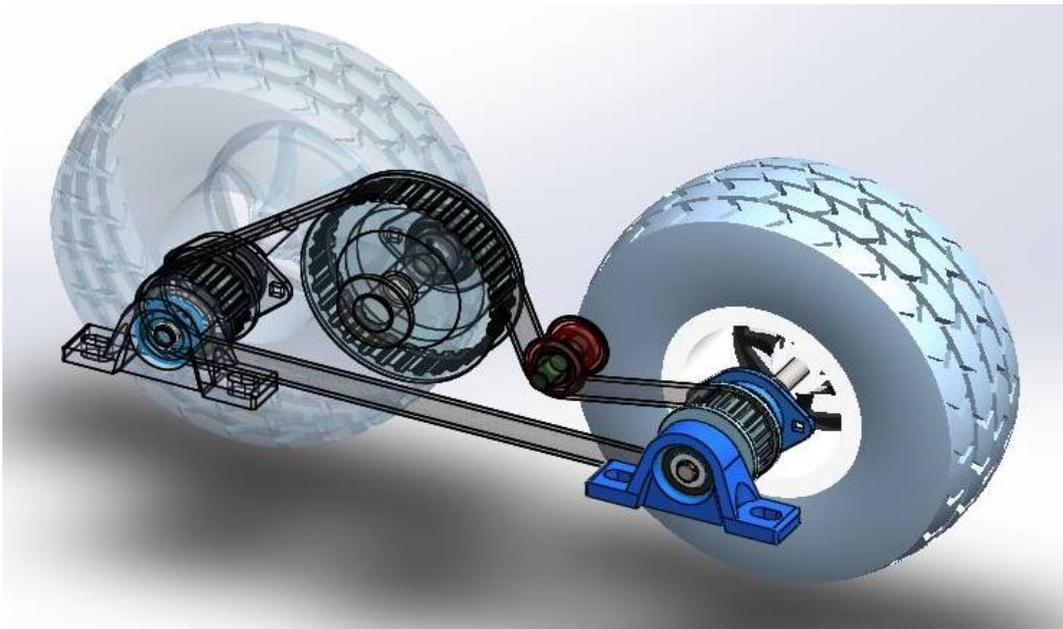


Figura 67 Sistema de Transmisión Polea-eje-chumacera

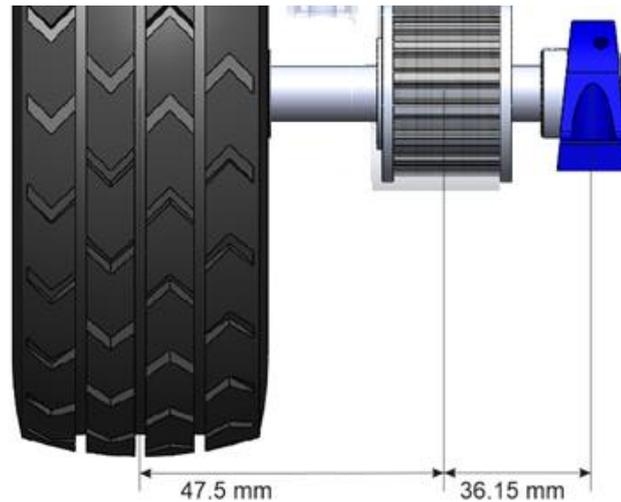


Figura 68 Sistema de transmisión eje y accesorios

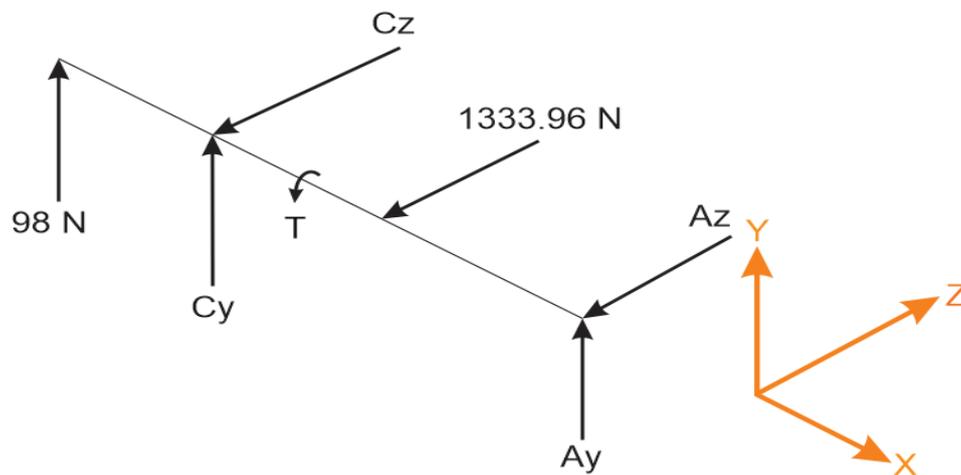


Figura 69. Diagrama de fuerzas actuando sobre el eje

Para ello se analizó las partes más críticas del sistema de transmisión como es el eje, en el podemos verificar todas las fuerzas que actúan como se ve en la Figura 70.

Para el cálculo de los esfuerzos máximos se requiere la fuerza total aplicada en el eje así como el peso distribuido en las cuatro ruedas.

Donde;

W = Peso total

$$F_t = \frac{T}{r}$$

$$F_t = \frac{20.65}{0.028}$$

$$F_t = 729.68$$

$$W = mg$$

$$W = 40(9.8)$$

$$W = 392 N$$

$$\frac{W}{4} = 98 N$$

Con estas consideraciones es posible calcular los esfuerzos en cada uno de las direcciones (x,y,z), para los ejes y; y z

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y + C_y + 98N = 0$$

En el eje z ()

$$\sum F_z = 0$$

$$A_z + C_z + 1333.96 N = 0$$

Con estas fuerzas y considerando las distancias, se calculan los momentos en y; y en el eje Z respectivamente

Donde

A_y = Reacción de A en Y

A_z = Reacción de A en Z

C_y = Reacción de C en Y

C_z = Reacción de C en Z

$$\sum M_{YY} = 0$$

$$1333.96(0.03615) + C_z(0.0723) = 0$$

$$C_y = -666.98 N$$

$$\sum M_{ZZ} = 0$$

$$98(0.1198) + C_y(0.0723) = 0$$

$$C_y = -666.98 N$$

$$A_y = 64.38 \text{ N}$$

$$A_z = -666.98 \text{ N}$$

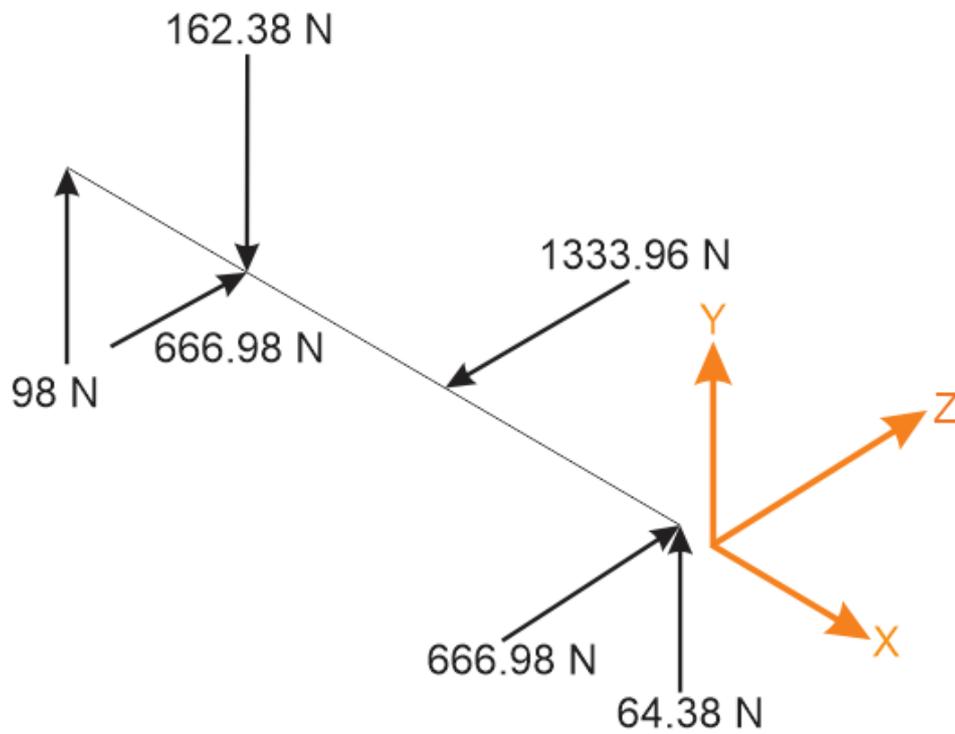


Figura 70. Diagrama de fuerzas resultantes actuando sobre el eje de rotación

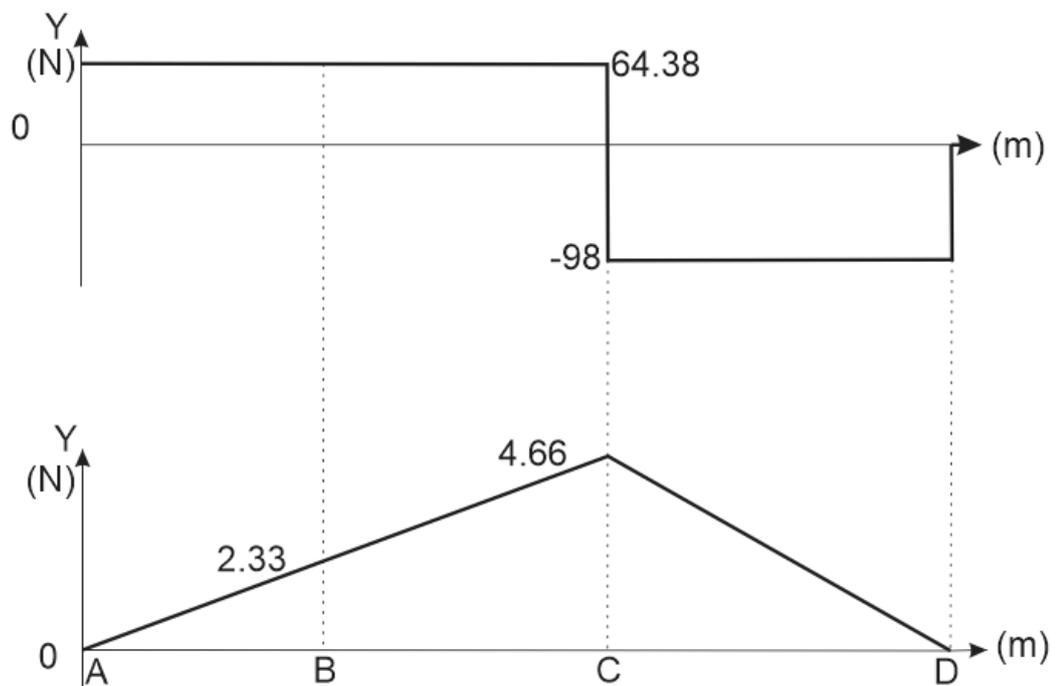


Figura 71. Diagrama de fuerzas y momentos del eje de rotación

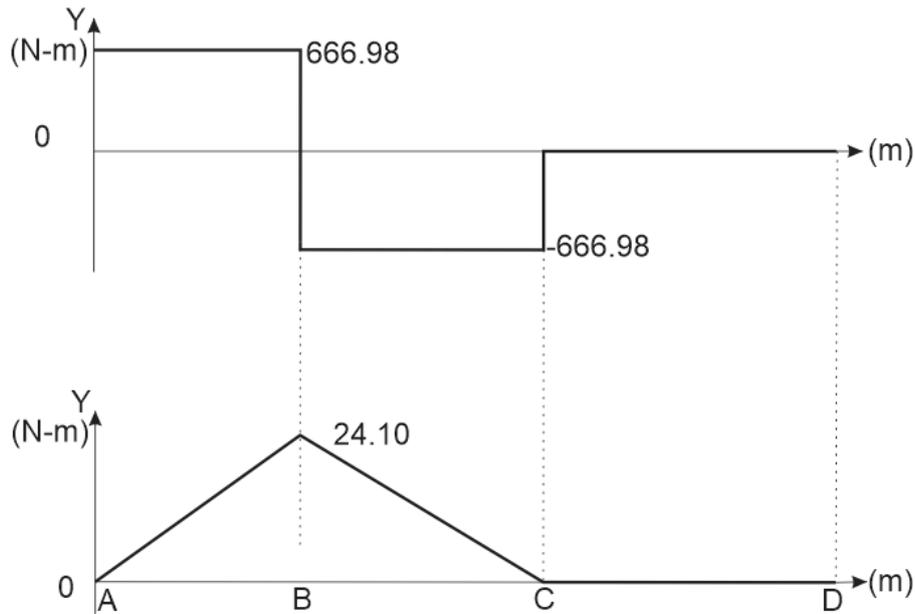


Figura 72 Diagrama de fuerzas y momentos del eje de rotación

Finalmente se calcularía el momento en el punto B donde;

M_B = Momento en B

$$M_B = \sqrt{(2.33)^2 + (24.10)^2}$$

$$M_B = 24.22 \text{ Nm}$$

Con lo que se pudo comprobar el diámetro necesario para el eje como se detalla a continuación, donde:

S_y = Resistencia a la fluencia Aluminio 6061T6 : 255MPa (Sumitec,2014)

\emptyset = Diámetro del eje

$S_y = 50 \text{ MPa}$

$$\emptyset = \left[\left(\frac{32F_s}{\pi S_y} \right) \left(M^2 + \frac{3}{4} T^2 \right)^{1/2} \right]^{1/3}$$

$$\emptyset = \left[\left(\frac{32(3)}{\pi 255(10^6)} \right) \left(24.22^2 + \frac{3}{4} (20.65)^2 \right)^{1/2} \right]^{1/3}$$

$$\emptyset = 0.0153 \text{ m} = 153 \text{ mm}$$

Con esto se concluye que el diámetro seleccionado para el eje es el adecuado y no sufrirá de ningún tipo de sobre cargas que colapsen el material,

respecto a las fuerzas a las que estará expuestas, consideradas en los cálculos, por lo tanto trabajara eficientemente y responderá a las necesidades del sistema.

2.10. Análisis de esfuerzos en la plataforma

2.10.1. Análisis Estructural

A través de la simulación que se realiza para determinar de forma real el comportamiento de la estructura la misma que es sometida a un tipo de esfuerzo, se aplica una fuerza real a cada parte. Las fuerzas se aplican donde tiende mayor probabilidad a fallar el material, para ello se considera inicialmente mallar el diseño y definir los puntos más críticos de la estructura, como se muestra en la figura 73.

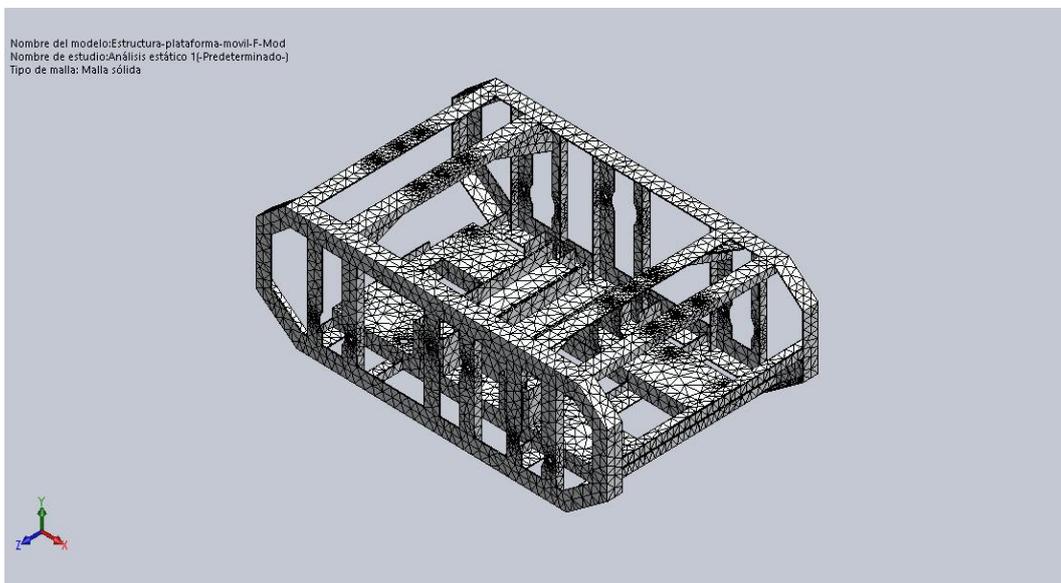


Figura 73. Mallado estructura

Se realiza el análisis de tensión por partes para individualizar los componentes de la estructura en elementos sólidos vacíos o de viga con lo cual se calcula las tensiones o deformaciones de la geometría como respuesta a fuerzas y presiones a las que es sometida, como se muestra en la figura 74.

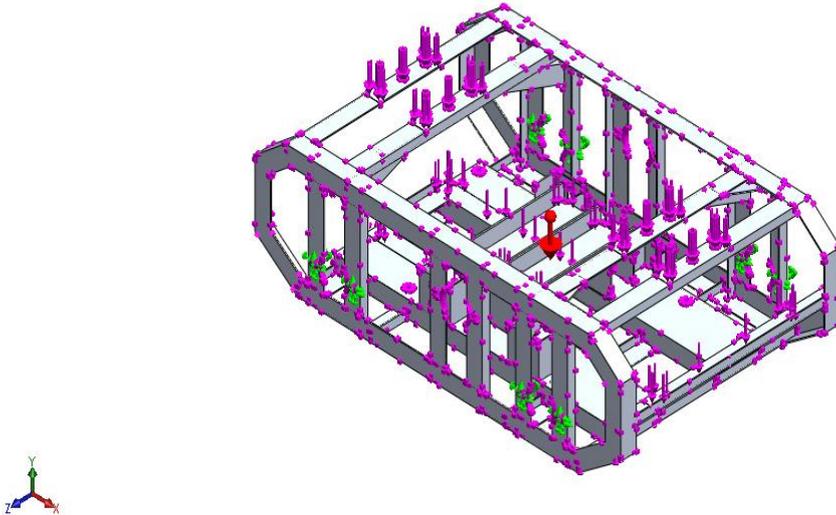


Figura 74 Fuerzas aplicadas en estructura

Como indicador tenemos el criterio de falla elástico de Von Mises que en este caso el extremo máximo sería el valor 59,23 MPa. De tal manera podemos comparar el valor máximo de resistencia con el valor de resistencia del perfil de aluminio 6061T6 que es 290 MPa. Como se observa en la Tabla 4 con lo que podemos garantizar la fiabilidad de la estructura.

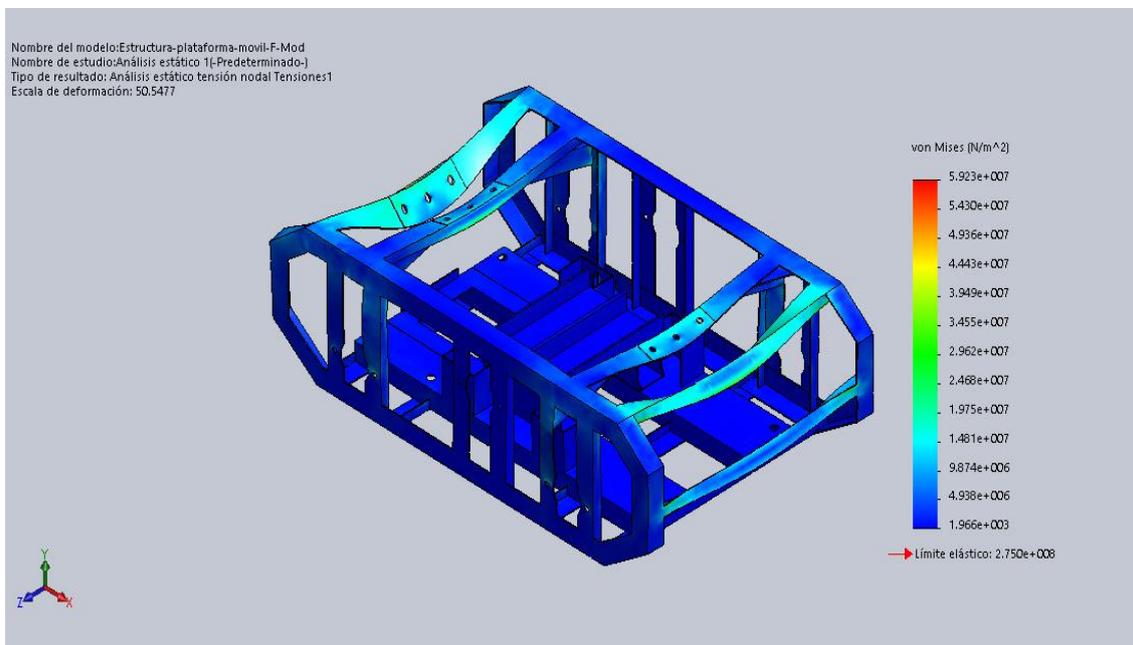


Figura 75. Análisis de tensión estructura

La figura 76, muestra el desplazamiento del material al aplicar una fuerza la misma que en la simulación muestra un color rojo lo que indica un máximo valor de 1.19mm la cual indica que los desplazamientos provocados son lo

suficientemente pequeños para no tener en cuenta la rigidez causada por la carga.

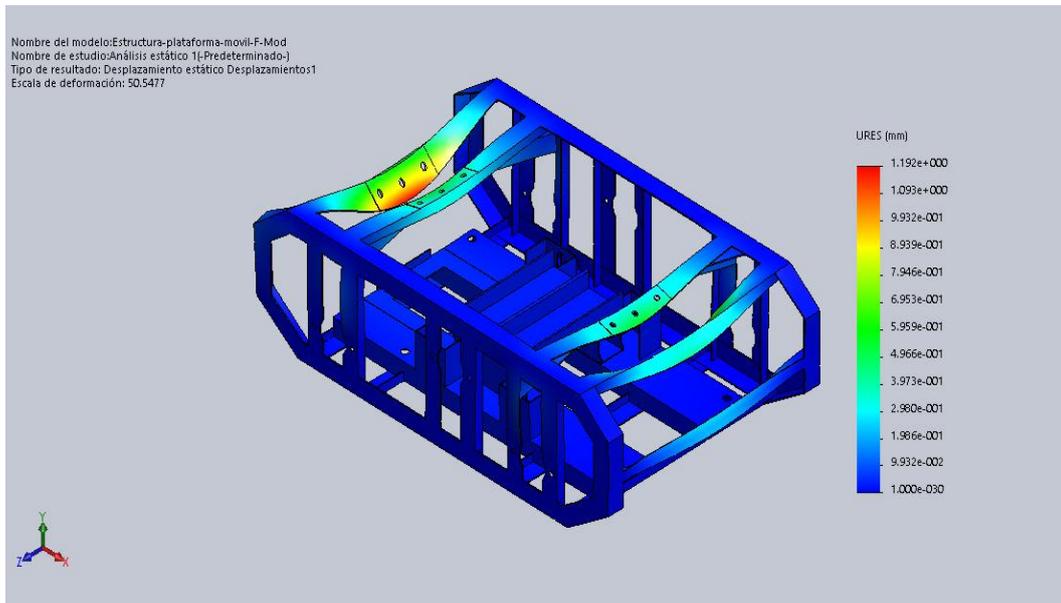


Figura 76 Desplazamiento de tensión estructura

El factor de seguridad que se toma en cuenta para la comprobación y validación de la estructura debe ser mayor que 1, como se muestra en la figura 77, la cual indica un valor de 2.55 en el punto más crítico, con lo que se comprueba que el material no va a fallar.

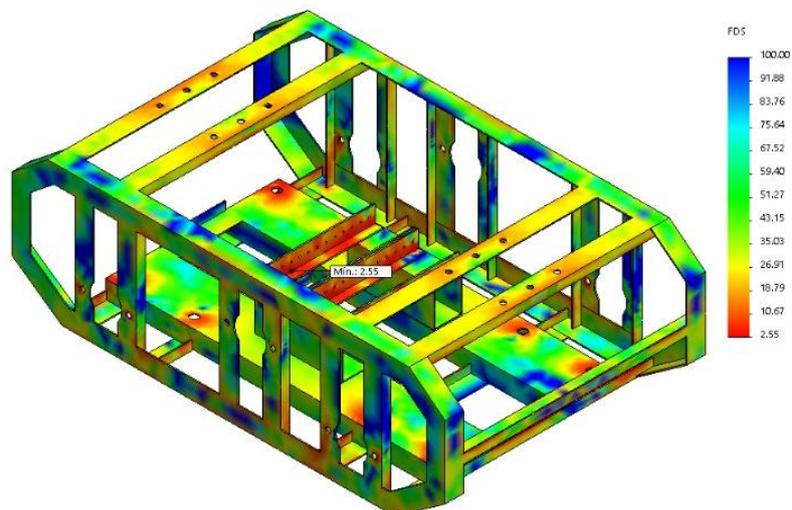


Figura 77 Factor de seguridad estructura

2.11. Modelado y Ensamblaje de la plataforma

2.11.1. Estructura de la Plataforma móvil

Para el diseño de la estructura de la plataforma móvil se considera algunos aspectos como: peso, distribución de elementos mecánicos, eléctricos y de

control, y una geometría apta para el movimiento. En el diseño geométrico del chasis se considera la resistencia y estabilidad de la estructura, por lo tanto la plataforma está dispuesta sobre un chasis prismático hexagonal que aporta estabilidad en el movimiento; contiene segmentos inclinados en los vértices para optimizar peso y sobrepasar obstáculos como se muestra en la figura 78.

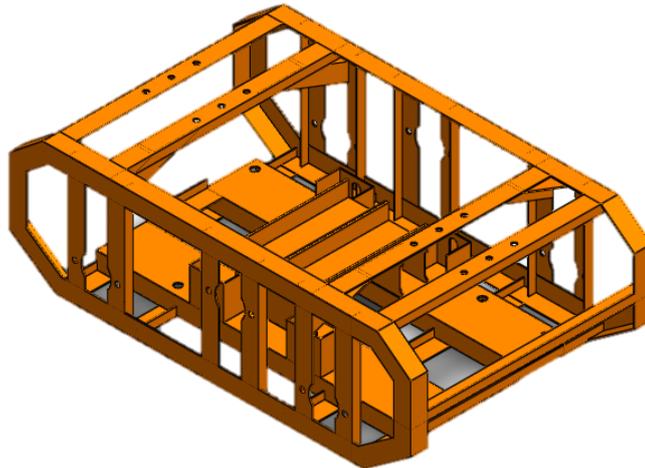


Figura 78 Estructura plataforma móvil

2.11.2. Diseño de Componentes

- **Ejes**

Para el diseño de eje es necesario considerar las fuerzas tangenciales, cortantes y rotacionales a las que estará expuesto el eje. La plataforma integra dos tipos de ejes.

Eje del motor.- es el eje principal que transmite el movimiento desde el actuador hacia la polea que está conectada en el extremo opuesto a una polea que engrana a la banda de transmisión

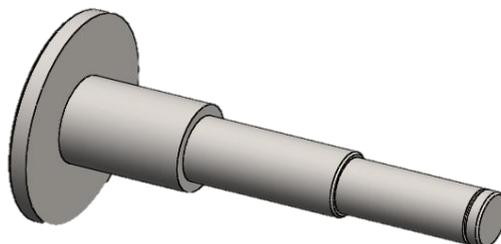


Figura 79 Eje motor

Eje de la rueda.- Presenta diversos diámetros ya que este atraviesa varios elementos mecánicos, en el extremo interno está sujetado a una chumacera de piso, luego encaja en la polea de transmisión, posteriormente atraviesa la

chumacera de pared y conecta en el extremo con el bocín que finalmente movilizara a la rueda.

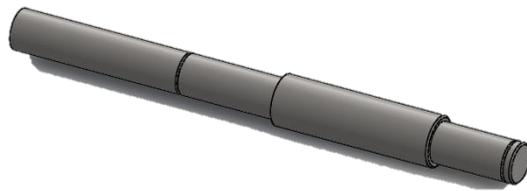


Figura 80 Eje de la rueda

Tensores.- Es un cilindro que se encarga de regular la tensión de la banda, Se considera las dimensiones de la banda y los rodamientos que estarán acoplados para sus diámetros internos y externos.



Figura 81 Tensor

Los elementos adicionales que se adquirió como las chumaceras bandas, y de control como tarjeta, conectores, computador, baterías; se los diseñó en base a modelos seleccionados en el mercado con las características requeridas.

2.11.3. Ensamble Plataforma

Finalmente se procede a realizar el ensamble de la estructura con todos los componentes que comprende la plataforma móvil, haciendo énfasis en la distribución de elementos con la que se diseñó la estructura, de esta manera se presenta la plataforma móvil otorgando la posibilidad de implementar un brazo adicional como se ve en la figura 82

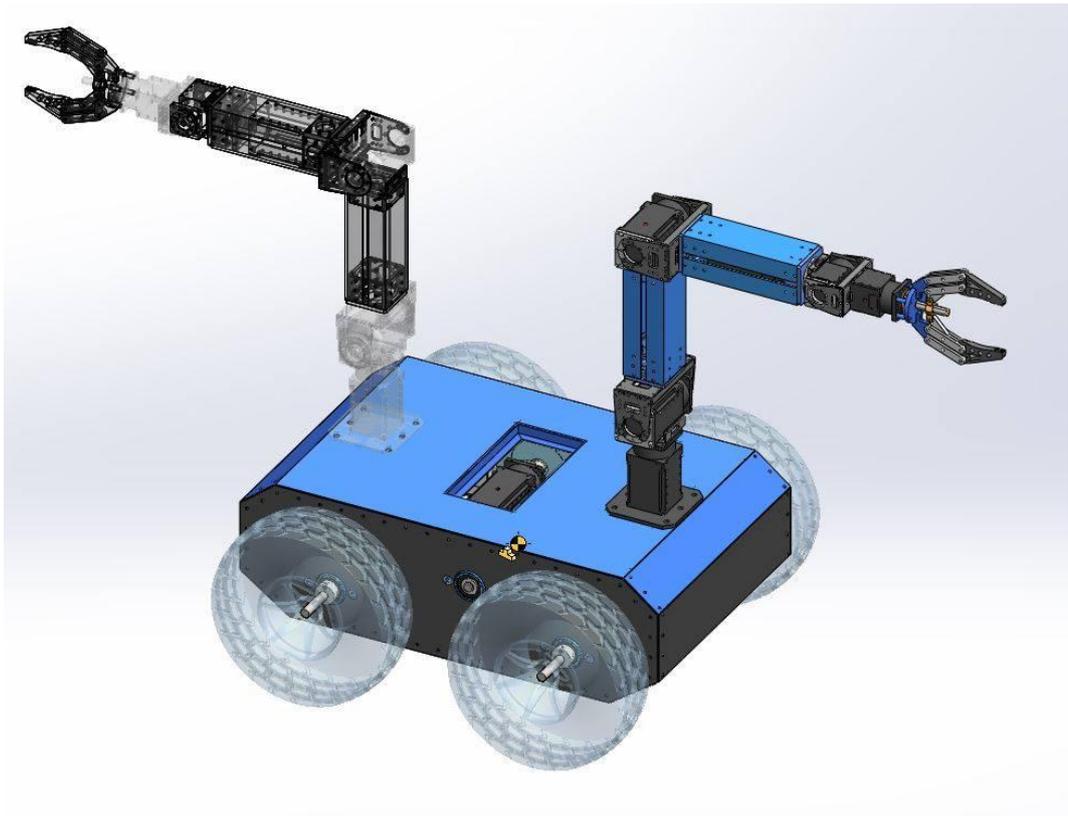


Figura 82 Plataforma Móvil

CAPÍTULO III

3. CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DEL DISEÑO

3.1. Construcción estructural Plataforma

Para la construcción se utilizó el aluminio 6061-T6 que se adquiere en perfiles de 6 metros, previamente se fabricó un molde de hierro con las medidas que tiene cada estructura lateral, para de esta manera realizar el corte del perfil de aluminio y posicionar los perfiles para una soldadura exacta. Adicionalmente protege al material al momento de soldar, no existe deformación, la figura 83 muestra el molde y el material cortado.



Figura 83. Molde de hierro, perfil de aluminio

Una vez conformadas las estructuras laterales de la plataforma fue sometido al proceso de soldadura, debido a la complejidad del tratamiento del aluminio se optó por la soldadura TIG.

La máquina requiere la calibración tanto en corriente como en voltaje para el material indicado, por otra parte es importante verificar todos los parámetros de seguridad para realizar la suelda, como muestra la figura 84.



Figura 84. Proceso de soldadura

Se obtiene como resultado una estructura fija y confiable, posteriormente se procede a los acabados para que presente una superficie lisa como se ve en la figura 85.

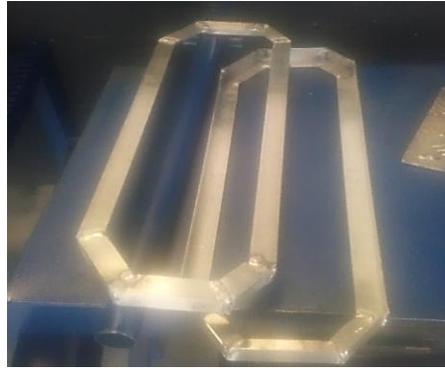


Figura 85. Estructuras laterales plataforma

Después de haber estructurado las paredes laterales de la plataforma, se conectó por medio de vigas transversales soldadas en los extremos superior e inferior, como se presenta en la figura 86.



Figura 86. Soldadura perfiles transversales

Como se presenta en el diseño, en las paredes laterales es necesario reforzar con platinas debido a que la mayor parte de fuerzas actuarán en sentido vertical, de esta manera se incrementa la resistencia de la estructura, posteriormente en este segmento se instalaran las chumaceras de pared, como se muestra en la figura 87.



Figura 87. Conformación de la estructura

Posteriormente en la base inferior de la plataforma se ubica perfiles de mayor longitud de forma transversal ya que sobre este irán implementados todos los componentes internos mecánicos y electrónicos de la plataforma, como se muestra en la figura 88.



Figura 88. Base Inferior

Una vez conformada la estructura se procedió con a la mecanización de los elementos internos de la plataforma con son los ejes de las ruedas, ejes de los motores, adicionalmente poleas y manzanas. Para el efecto se contó con ejes de aluminio estructural con sus respectivos diámetros y el maquinado se lo realizo con ayuda de máquinas de herramientas como torno, fresadora y taladro vertical industrial.

3.2. Construcción elementos de Transmisión

Una vez creados y diseñados cada uno de los componentes que integran las partes del manipulador móvil se procedió a mecanizarlos en máquinas herramientas como por ejemplo torno fresadora y CNC.

Dentro de la plataforma se presenta varios elementos que fueron construidos en el laboratorio de mecánica industrial.

3.2.1. Manzanas y Poleas

Por medio de las maquinas herramientas se mecanizo un eje de aluminio estructural, para conformar los elementos de la transmisión como son las manzanas.

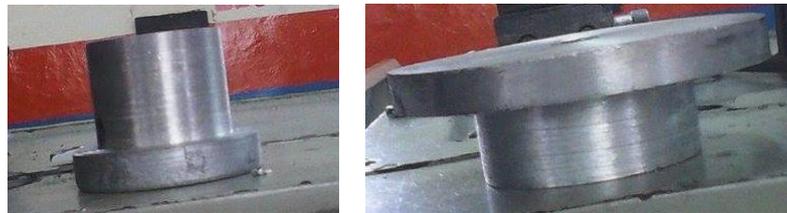


Figura 89. Manzanas

De la misma manera por medio del torno y la fresadora para la mecanización de las poleas, que posteriormente encajarán en la banda de transmisión.



Figura 90. Polea

3.2.2. Ejes

Para los ejes se realiza de la misma manera en base a las medidas diseñadas con el torno y el taladro para perforar en los puntos donde irán los pernos que unen al rotor del servo



Figura 91. Ejes

3.3. Ensamblaje

3.3.1. Sistema de Transmisión

Para el sistema de transmisión es necesario acoplar los distintos elementos, inicialmente se incorpora el eje en la polea y manzana, en forma concéntrica, se conforma un solo cuerpo rígido al atravesar un pasador que cruza los ejes centrales de los elementos que lo componen como se muestra en la figura 92 donde se perfora el orificio para el pasador.



Figura 92. Ensamble eje-polea

3.3.2. Ejes y Rodamientos

Posteriormente se procede a fijar el eje tanto en el lado interno como al externo. Por una parte conecta a una chumacera de piso que fija al eje por el un extremo, mientras que por el otro extremo encaja en una chumacera de pared la cual permite que el eje se soporte y conecte a la rueda. Ver figura 93

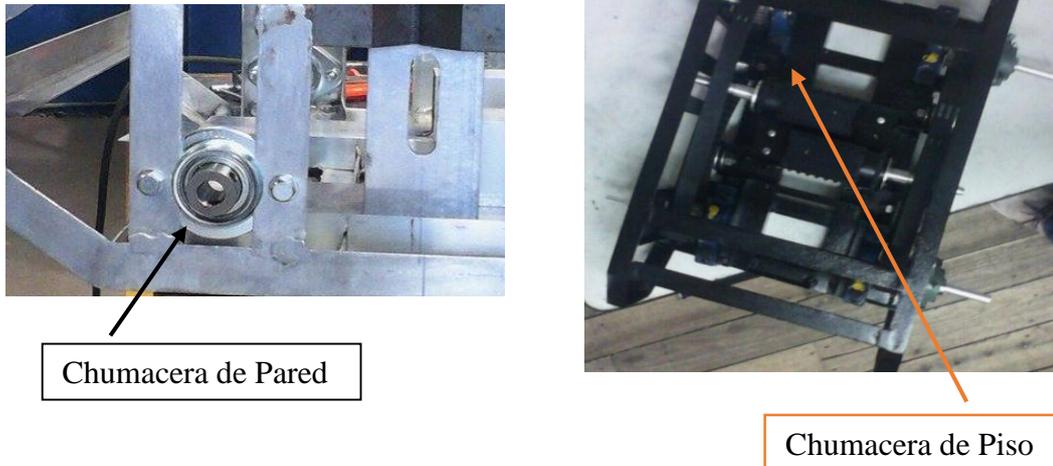


Figura 93. Rodamientos y ejes

3.3.3. Ruedas

Para la implementación de las ruedas en la plataforma se consideró unas cubiertas de poliuretano que brinden seguridad y firmeza en el desplazamiento del robot, por otra parte se encajó en el eje central de la rueda, y con la ayuda de un prisionero se fijó las ruedas en cada uno de los cuatro ejes como se observa en la figura 94.

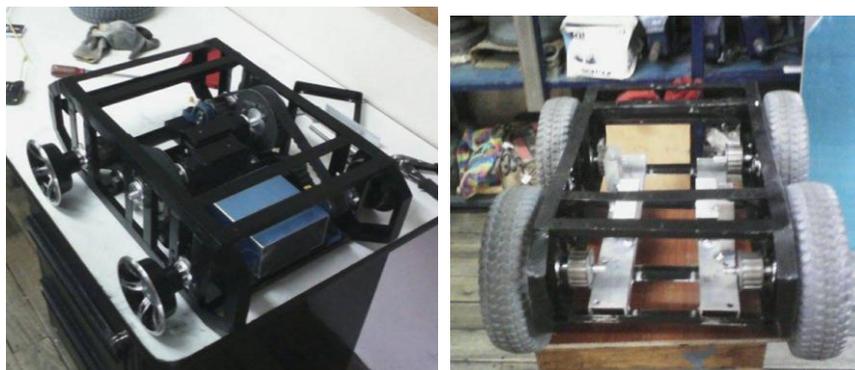


Figura 94. Ruedas

3.3.4. Compartimento de Batería, Computador y tarjeta de control.

Es muy importante que los dispositivos de control se encuentren en un lugar protegido y que permanezcan fijos durante el movimiento de la plataforma para lo cual se procedió a construir e instalar bases o compartimentos que sitúen a las baterías tarjetas y computador en un lugar seguro y estable.

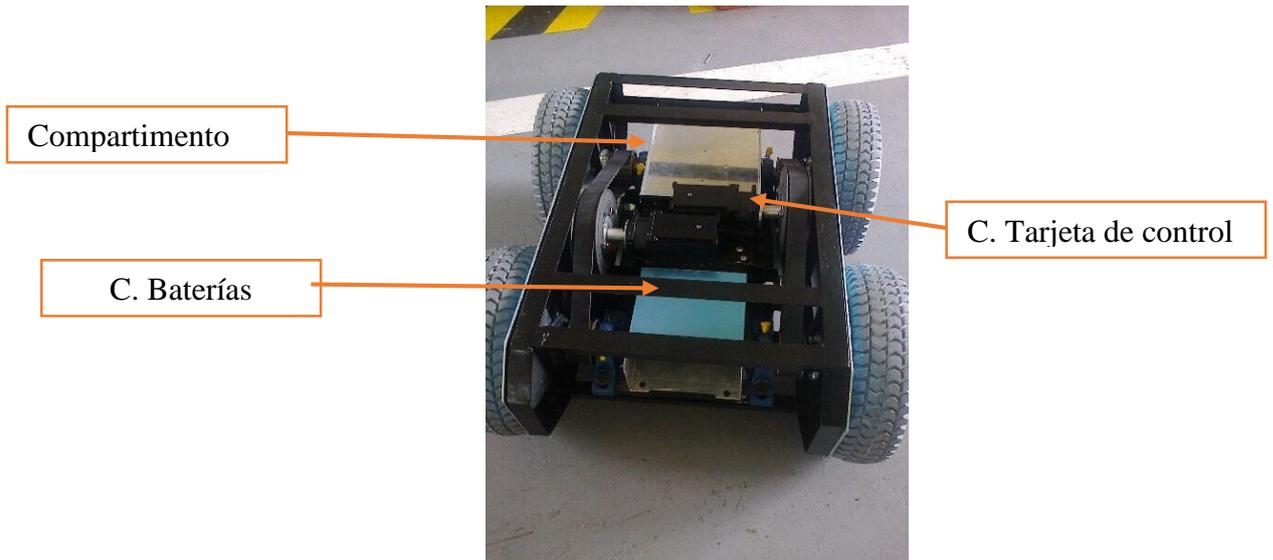


Figura 95. Implementación Compartimentos

3.3.5. Paredes y revestimiento

Para proteger los componentes internos de la estructura es necesario incorporar láminas de aluminio en la estructura por medio de remaches, para que resguarden los componentes internos de la plataforma tanto del polvo, de agua y demás agentes externos que amenazan la seguridad de los dispositivos electrónicos que controlan el robot. Para fines de ventilación se realizó ranuras para la apertura de aire que equilibre la temperatura del sistema.

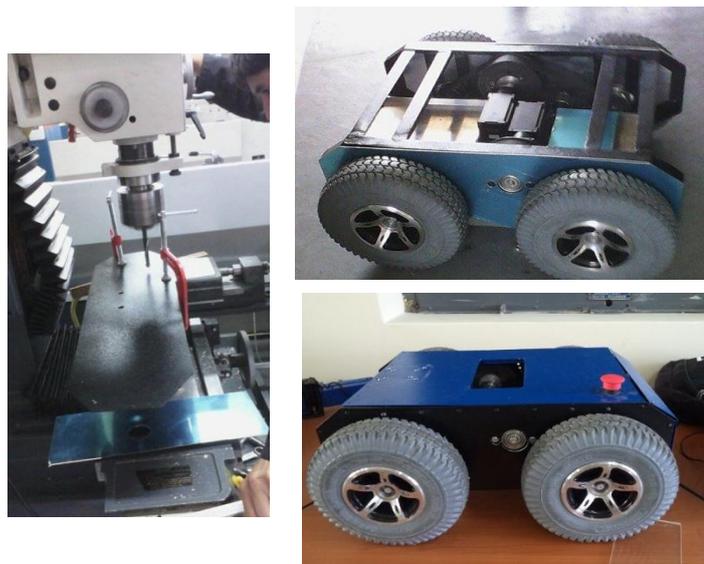


Figura 96. Revestimiento de la Plataforma

3.3.6. Brazo

Por otra parte en los elementos que constituyen el brazo se mecanizó acoples o frames que conectan a los motores con los eslabones los cuales estructuran y generan las distintas posiciones que puede adoptar el brazo

3.3.7. Construcción Frames

Para la construcción de frames se utilizó el diseño asistido por computadora y se modeló con las medidas requeridas para acoplar a cada uno de los motores por medio de pernos. Por otra parte para el modelado se aplicó de la misma manera los sistemas CAM, utilizando el aluminio 6061T6 como materia prima, para posteriormente mecanizarlo en una CNC y obtener los componentes con las medidas exactas.



Figura 97. Frames

3.3.8. Eslabones

Los eslabones fueron construidos mediante perfiles estructurales en el mismo material que se construyó los frames, con el afán de optimizar peso y maximizar su resistencia. Se encuentran perforados para sujetarse a los motores

y a los frames de tal manera mantenga su rigidez y sus movimientos sean óptimos.



Figura 98. Eslabones

3.3.9. Ensamble Brazo

La implementación del brazo se compone por la unión de cada uno de los eslabones que van conectados por una articulación, en la cual se encuentra un actuador que se encarga de generar un movimiento y permite realizar los distintos movimientos del brazo como se ve en la figura 99.



Figura 99. Brazo

3.3.10. Gripper

Para la construcción del gripper al igual que las otras partes del robot, primero se construyó cada uno de los elementos independientes, los eslabones que transmiten el movimiento hacia los dedos y se conectan como se puede observar en la figura 100.



Figura 100. Partes Gripper

Posteriormente se construyó una base para el tornillo de potencia, tuerca y se unió a los dedos formando un mecanismo de tornillo de potencia como se ve en la figura 97



Figura 101. Gripper de tres pinzas

3.3.11. Ensamblaje Robot Manipulador

Finalmente se completó el ensamble con cada uno de los elementos que conforman el robot manipulador móvil, fijando al brazo en la plataforma por medio de una base emperrada en la estructura, y en el extremo operativo del brazo, se instaló el gripper de tres dedos, que conecta a la muñeca del brazo por medio de pernos, dando una mayor operatividad en el robot como lo muestra la figura 102.



Figura 102. Manipulador Móvil

3.4 Pruebas y resultados

El propósito de desarrollar las pruebas de funcionamiento en el sistema mecánico, es evidenciar el desempeño del robot en circunstancias reales, exponiéndolo a condiciones habituales de trabajo y a fuerzas a las que está sometido, verificando de esta manera el funcionamiento del sistema

3.4.1. Capacidad máxima del brazo robótico al levantar objetos

El peso en kilogramos, que puede transportar el gripper del manipulador, con total operatividad, recibe el nombre de capacidad de carga. (ESPINOZA, M., 2010), de esta manera se probó levantar del piso a una superficie de 50 cm desde el piso. Con la aplicación de distintas cargas en el extremo operativo del brazo robótico se incrementa 100gr hasta alcanzar el peso máximo para el cual fue diseñado del cual se tiene como referencia 0.5kg, adicionalmente se consideró las posiciones más críticas a las que se puede posicionar al brazo como muestra la figuras de la tabla 7.

Tabla 7

Pruebas de Capacidad del brazo

Peso	Distancia vertical	Cumple	Fotografía
0.1 kg	50 cm	SI	
0.2 kg	50 cm	SI	
0.4 kg	50 cm	SI	
0.5 kg	50 cm	SI	

Continua →

<p>0.6 kg</p> <p>Botella 1l semi llena</p>	<p>50 cm</p>	<p>SI</p>	
<p>0.7 kg</p> <p>Botella 1l casi llena</p>	<p>50 cm</p>	<p>NO</p>	

Finalmente no se evidenció que su funcionamiento se altere en ninguna de las etapas de la prueba realizada excepto cuando se añadió 200 gramos adicionales a lo establecido, en donde la principal limitación fue la capacidad del motor ubicado en la última articulación del brazo o muñeca, el cual es de menor capacidad que los que se encuentran en las otras articulaciones. En cuanto a la estructura tanto del brazo como de la plataforma no se observó ninguna irregularidad en su desempeño.

3.4.2. Sujeción de objetos

Es importante asegurar que el efector final sujete objetos con diferentes geometrías y materiales. Para el efecto se consideró cuerpos cuya sección transversal no sobrepasen los 10 cm, que es la apertura máxima que presenta el gripper. Teniendo como situaciones extremas a una esfera como geometría y al plástico como material.

Tabla 8.

Tabla de Pruebas de manipulación del gripper.

Objeto	Material	Peso	Sección	Sujeta	Fotografía
Cubo	Plástico	50g	3 cm	Si	
	Madera	250g	5 cm	Si	
Cilindro	Plástico	50g	4 cm	Si	
	Lata	600g	4 cm	Si	

Continua 

Esfera	Plástico	25g	3 cm	Si	
Vaso	Plástico	100g	7cm	Si	

3.4.3. Repetitividad del Brazo

El sistema está orientada para alcanzar de manera efectiva una posición determinada en varias oportunidades bajo las mismas condiciones, en este caso hemos registrado una trayectoria en el control del brazo para alcanzar un punto en un tiempo fijo, reiterando la misma acción tantas veces como sea necesario para cumplir con el objetivo planteado, en esta prueba se ejecutó durante cinco oportunidades llegando a efectuarse satisfactoriamente.

Tabla 9

Tabla de Repetitividad.

Objetivo	Intento	Tiempo	Variación Pto Inicial	Fotografía
Punto 1	Primer	20 seg	0.0 mm	

Continua



Segundo 20 seg 0.1 mm



Tercero 20 seg 0.3 mm



Cuarto 20 seg 0.1 mm



Punto 2

Primer 30 seg 0.0 mm



Segundo 30 seg 0.1 mm



Continua →

Tercero	30 seg	0.0 mm	
Cuarto	30 seg	0.2 mm	

Tras las pruebas realizadas se pudo verificar el grado de exactitud en la repetición de los movimientos del manipulador al realizar una tarea programada.

3.4.4. Velocidad de la plataforma móvil

Para garantizar el desempeño mecánico se puso a prueba las velocidades críticas establecidas en los actuadores, se procedió a ir incrementando la velocidad en una misma distancia recorrida y con diferentes pesos hasta llegar a la velocidad establecida en los parámetros de diseño que es de 0.8 m/s.



Figura 103. Prueba de velocidad

Tabla 10**Tabla de Velocidad.**

Velocidad	Peso Total	Distancia	Tiempo
0,2 m/s	37,2Kg	5mts	25seg
0,2 m/s	37,4kg	5mts	25seg
0,2 m/s	37,5Kg	5mts	25seg
0,5 m/s	37,2Kg	5mts	10seg
0,5 m/s	37,4kg	5mts	10seg
0,5 m/s	37,5Kg	5mts	11seg
0,8 m/s	37,2Kg	5mts	6seg
0,8 m/s	37,4kg	5mts	7seg
0,8 m/s	37,5Kg	5mts	7seg

Obteniendo como resultado que el sistema está en la capacidad de ir variando su velocidad de acuerdo a la tarea que se asigne con ello también se pudo constatar un incremento en la temperatura en los actuadores, temperatura que se encuentra dentro de los rangos normales de funcionamiento.

3.4.5. Maniobrabilidad

El manipulador móvil bidireccional requiere tener un balance exacto en la orientación tanto de sus ejes como en las ruedas, lo cual se verifica en su correcto direccionamiento al cumplir una determinada trayectoria, para el efecto se hizo desarrollo las siguientes pruebas.

Para el efecto se colocó obstáculos en la superficie, presentando diferentes trayectorias a efectuar. Por medio del control de actuadores se programó al sistema con el fin de evadir los obstáculos en diferentes distancias y proporciones.

Como se puede evidenciar en la tabla 10 se distingue la variación en los tiempos debido a la complejidad de la trayectoria y a la respuesta que tiene el sistema ante los impedimentos dispuestos.

-Finalmente en un recorrido circular, se puso en marcha la plataforma, constatándose que no abandone la trayectoria durante el transcurso de la práctica, se comprobó que los resultados establecidos se han cumplido.

Tabla 11.

Tabla de Maniobrabilidad.

Ruta	Distancia	Tiempo	Numero de Obstáculos
Rectilinea	10 mts	15s	Uno
Curvilinea	10 mts	25s	Dos
Zigzag	10 mts	35s	Tres
Circular	5 mts	30s	Cuatro



Figura 104. Pruebas Obstáculos

3.4.6. Seguimiento de ruta

En el seguimiento de ruta se aplicaron pruebas tanto de velocidad como de dificultad de la trayectoria en diferentes condiciones y diferente velocidad como se ve en la figura 105. En las tabla 11 se detalla los resultados obtenidos



Figura 105. Pruebas seguimiento de ruta

-Se trazó una trayectoria recta entre dos puntos situados a la misma altura, con una longitud de 10mts., se alineó las ruedas en el punto inicial de la trayectoria, como se ve en la figura 105.

Posteriormente se puso en marcha el sistema a una velocidad constante de 0,8 m/s, se puede registrar la variación de la trayectoria, reiterándose de la misma manera en dirección inversa.

Luego con un incremento de velocidad se evidencio que la trayectoria se cumpla de la misma manera.

-En la siguiente instancia se trazó una trayectoria curvilínea entre dos puntos situados a la misma altura como se ve en la figura 105, se programó los motores para el efecto y se puso en funcionamiento de la misma manera a una velocidad constante.

Consecuentemente se pudo evidenciar un ligero retardo en cumplir el objetivo debido a la sincronización de los actuadores por cumplir el recorrido, pero sin ningún otro detalle por destacar.

Tabla 12

Tabla de Seguimiento de ruta.

Ruta	Peso Total	Velocidad	Distancia	Desviación
Recta	37,0kg	0,8 m/s	5 mts	0 cm
	37,5kg	0,5 m/s	5 mts	0 cm
Trayectoria con ángulos	37,0kg	0,8 m/s	14mts	1,0 cm
	37,5kg	0,5 m/s	14mts	1,2 cm
Curvilínea	37,0kg	0,8 m/s	7 mts	2,3 cm
	37,5kg	0,5 m/s	7 mts	3,0 cm

3.4.7. Autonomía

Se puede evaluar la autonomía del manipulador móvil por medio del tiempo que se mantenga en funcionamiento continuo para el caso se probó el traslado de objetos a distintas velocidades como se ve en la tabla 15. Es importante verificar que las baterías estén completamente cargadas y que sus componentes estén en constante uso.

Tabla 13.

Tabla de pruebas de Autonomía del robot.

Peso Total	Velocidad	Tiempo Autonomia
37.1 kg	0.5 m/s	1h15min
	0.8 m/s	59min
37.3 kg	0.5 m/s	1h10min
	0.8 m/s	52min
37.5 kg	0.5 m/s	59min
	0.8 m/s	45min

En conclusión podemos describir que el peso no altera mucho la autonomía del robot, lo que sí es un factor determinante en la autonomía es la velocidad con la que se accionan los motores



Figura 106. Pruebas de autonomía

3.5. Alcances y Limitaciones

- ✓ Un aspecto importante que caracteriza al manipulador móvil son los grados de libertad que posee, lo que facilita posicionar al efector final en diferentes circunstancias, en donde el acceso sea limitado.
- ✓ Una de las características que distingue el manipulador móvil es su peso ligero y su gran capacidad de desplazamiento con todas las facultades que tiene para sujetar y trasladar objetos de hasta 0,5Kg.
- ✓ En el sistema se identifica por su firmeza, debido al alcance máximo del torque en sus actuadores.
- ✓ El peso total del robot manipulador se encuentra entre los 37 Kg lo cual está dentro de los parámetros de diseño y para lo cual se programó la resistencia de sus miembros estructurales.
- ✓ El manipulador se limita en el desplazamiento de trayectorias irregulares o con obstáculos.
- ✓ El robot manipulador móvil funciona bajo los parámetros de programación definidos por el usuario y su desempeño es óptimo para las actividades propuestas.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Se desarrolló el diseño de un brazo y una plataforma móvil que posibilite la locomoción y manipulación de un robot manipulador móvil el cual garantiza la estabilidad y confiabilidad en su desempeño
- Se realizó la simulación del sistema estructural por medio del software SolidWorks 2016 que ha entregado como resultado el listado de materiales y se confirmó las características técnicas de los equipos a ser adquiridos para la construcción
- Se construyó los distintos elementos diseñados para la estructura del brazo y la plataforma, de la misma manera se realizó el montaje del sistema.
- Se realizó evaluaciones experimentales en entornos parcialmente estructurados ejecutando actividades de traslación y manipulación de objetos en distintas oportunidades.
- Se puede evidenciar que el diseño planteado responde satisfactoriamente a los parámetros requeridos en el proyecto de investigación, de tal manera que se ha reiterado por dos ocasiones el mismo diseño para lograr un trabajo corporativo entre tres manipuladores móviles

4.2. RECOMENDACIONES

- El diseño mecánico de la plataforma es un modelo que se encuentra apto para la implementación de un brazo robótico adicional, el cual se procederá a montar en el extremo opuesto donde se encuentran disponibles las adecuaciones necesarias para su instalación
- Se propone utilizar para trabajos posteriores como material alternativo a la fibra de carbono el cual presenta excelente relación del factor resistencia/peso además que tiene características anticorrosivas y de gran duración.
- Se plantea como un proyecto a futuro la incorporación de ruedas bidireccionales u otro medio de locomoción que permita al manipulador desenvolverse en medios no estructurados para las ruedas
- Se sugiere el montaje de otros extremos operativos que puedan ser más óptimo des gripper, ya que en su extremo final el brazo cuenta con la disponibilidad para acoplar otro tipo de herramienta que cumpla con las condiciones de peso establecido.

Referencias Bibliográficas:

- Addept. (2015). *vinnsaa*. Recuperado el 5 de marzo de 2016, de <http://vinssa.com/robot-paralelo-adept-quattro-s650h>
- Andaluz, V. (2011). Switching Control Signal for Bilateral Tele-Operation of a. *IEEE*.
- Andaluz, V. (2015). Passivity-based Visual Dynamic Feedback Control of Mobile Manipulators. *Journal of robotics*.
- Barrientos, A. (2007). *Fundamentos de robótica*„. España: McGraw-Hill.
- Bayle, B. (2003). Manipulability of wheeled mobile manipulators. *Citeserx*.
- Beer, F. (2005). *Mecánica de Materiales*„. México, D.F., México: Industria Editorial Mexicana.
- Castillo, R. (2014). *RuNuel*. Recuperado el 5 de Marzo de 2016, de <http://www.ru-nuel.com/2016/09/b-2-spirit-conoce-usted-el-caza-mas.html#.WEQXxly-O9E>
- CEDAL. (2015). Recuperado el 8 de agosto de 2015, de <http://www.cedal.com.ec>
- CHONG, N. (2000). Remote coordinated controls in multiple telerobot cooperation. *IEEE*.
- Cordova, J. (2005). Descripción de una plataforma móvil implementada para el estudio de técnicas inteligentes de navegación. *Universidad Tecnológica de Pereira*.
- Craig. (2006). *Robotica*. México, D.F., México: Pearson Educación.
- Deegan, R. (2008). *Mobile manipulators for assisted living in residential settings*. Massachusetts.
- Herb. (2015). *herb*. Recuperado el 5 de mayo de 2016, de <http://www.cmu.edu/herb-robot/>
- irobot. (2014). *irobot*. Recuperado el 3 de abril de 2016, de <http://www.irobot.com/For-the-Home/Outdoor-Maintenance/Looj.aspx>
- Khatib, O. (1987). Approach to Motion and Force Control of Robot Manipulators. *IEEE*.
- KUKA. (2016). *KUKA*. Recuperado el 4 de abril de 2016, de <http://www.kuka-robotics.com/es/>
- Kwc. (2011). *ros*. Recuperado el 3 de noviembre de 2015, de <http://www.ros.org/news/2011/02/robots-using-ros-mekas-m1-mobile-manipulation-platform.html>

- Lasnier, A. (2010). Hybrid sensorless bilateral teleoperation of two-wheel mobile manipulator. *IEEE*.
- Mott. (2006). *Diseño de elementos de maquinas*. México, D.F., México: Pearson Educacion.
- NASA. (Mayo de 2015). *Space*. Recuperado el 2 de marzo de 2016, de nssdc.gsfc.nasa.:
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=2003-027A>
- PAL. (2016). *PAL*. Recuperado el 14 de abril de 2016, de <http://pal-robotics.com/es/home/>
- Pioneer. (2015). *www.mobilerobots.com*. Recuperado el 12 de mayo de 2016, de <http://www.mobilerobots.com/ResearchRobots/P3AT.aspx>
- Prigg, M. (2014). *DailyMail*. Recuperado el 3 de marzo de 2016, de <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2568744/Floating-Bond-villain-lair-gets-ahead-construction-floating-lab-help-marine-biologists-unlock-secrets-worlds-oceans-set-start.html>
- robot, E. (2014). *ez robot*. Recuperado el 23 de febrero de 2016, de <https://www.ez-robot.com/Shop/AccessoriesDetails.aspx?productNumber=31>
- Robotica. (2016). *robotica.es/*. Recuperado el 14 de febrero de 2016, de <http://www.robotica.es/>
- Robotis. (2016). *Robotis*. Recuperado el 25 de enero de 2016, de <http://www.robotis.us/manipulator/>
- Robotnik. (2015). *www.robotnik.eu/manipulators/*. Recuperado el 6 de marzo de 2016, de <http://www.robotnik.eu/manipulators/>
- Segway. (2002). *Robotic Mobility Platforms*. Recuperado el 7 de abril de 2016
- Servodatabase(2009) ProductorServo. Recuperado el 5 de 1 de 2017, de servodatabase: <http://www.servodatabase.com/servo/hitec/hs-m7990th>
- Skysapience. (2015). *Skysapience*. Recuperado el 5 de Febrero de 2016, de http://defense-update.com/20120222_sky-sapience-introduces-hovermast-a-lightweight-autonomous-hovering-tethered-platform.html
- Sumitec. (2015). *Sumitec*. Recuperado el 25 de marzo de 2016, de <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AA%206061.pdf>
- Superrobotica. (2015). *superrobotica*. Recuperado el 22 de abril de 2016, de http://www.superrobotica.com/sr1_robot.htm

ANEXOS



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores: **Renatto Sebastián Robayo Moya** y **Diego Andrés Pazmiño Jácome**. En la ciudad de Latacunga, a los **29 días del mes de enero del 2017**.

Aprobado por:



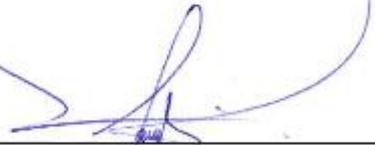
Ing. Oscar Arteaga

DIRECTOR DEL PROYECTO



Ing. Vicente Hallo

DIRECTOR DE CARRERA



Dr. Rodrigo Vaca

SECRETARIO ACADÉMICO