

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ciencias

Escuela Profesional de Física Aplicada

**“Implementación de un Brazo Robótico Móvil de tres
eslabones, aplicando la tecnología del Sistema
Electrónico de Hardware Libre”**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. Gustavo Leyva Espezúa

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

TACNA-PERÚ

2023



373

Acta de sustentación de tesis N° 339

En la ciudad de Tacna, en el auditorium de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, siendo las 17:10 horas del día 14 de noviembre de 2019, estando presente el Jurado calificador nominado por Resolución de Facultad N° 9565-2019-Faci-UNJBG, conformado por los siguientes docentes:


Dr. Roberto Encarnación Supo Hallasi	Presidente
Msc. Carlos Armando Polo Bravo	Secretario
Dr. Jesús Alfredo Chacaltana García	Miembro


Acto seguido, se dió lectura a la Resolución correspondiente, y del mismo modo se dió lectura al artículo 22 del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ciencias.

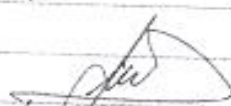
A continuación, el presidente del jurado invitó a el graduado: Gustavo Leyva Espeza, a exponer la tesis titulada: "Implementación de un brazo robótico móvil de tres eslabones, aplicando la tecnología del sistema electrónico de Hardware libre".

Siendo las 17:39 horas, el tesisista concluye su exposición, luego se procedió a la formulación de los preguntas por parte de los miembros del jurado calificador. Terminado este proceso, se invitó a que los miembros del jurado emitan su calificación de acuerdo a reglamento. El promedio de la calificación dió el siguiente resultado: Aprobado por unanimidad, con el calificativo de dieciséis (16), de acuerdo al Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ciencias.

Siendo las 18:10 horas, se dió por concluido el acto de sustentación de la tesis, firmando los señores miembros del jurado calificador, en señal de conformidad.


Dr. Roberto Supo Hallasi
Presidente


Msc. Carlos Polo Bravo
Secretario


Dr. Jesús Chacaltana García
Miembro

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Msc. Edith Paredes Choque, en mi condición de Asesora acreditada por la Resolución de Facultad N° 8743-2017-FACI-UN/JBG, del Bachiller Gustavo Leyva Espezúa quien sustentó la tesis titulada: Implementación de un brazo robótico móvil de tres eslabones, aplicando la tecnología del sistema electrónico de hardware libre, para obtener el título profesional de licenciado en Física.

Informo que, habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, y según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN; cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es de 6%.

Por lo que certifico la similitud de la escala de similitud de la tesis, la misma que está de acuerdo a la similitud baja: permitido; para continuar con los trámites correspondientes y proceder a su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado, para cumplir con los requisitos institucionales y continuar con los tramites conducentes a la obtención del título profesional.

Tacna, 03 de octubre del 2023



MSC. EDITH CARMEN PAREDES CHOQUE
ASESORA

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, a mis padres, Nicolás Leyva Laura y Yola Espezúa Condori, por su amor y apoyo incondicional, dándome las energías y motivación para lograr metas importantes en mi vida.

A mi asesora ing. Edith Paredes Choque por haberme brindado su confianza y apoyo para realizar este trabajo con mucha dedicación, enseñándome la importancia de presentar con mucha responsabilidad un trabajo de dedicación y al ing. Orlando Mariaca por sus consejos durante la dedicación de este trabajo y su gran amistad.

A la Dr. Liliana Rivas por la orientación y su confianza en los momentos más importantes de mi trabajo de tesis.

**A mis padres y mi abuela por darme el regalo más
hermoso de todos, la paz y la bondad.**

CONTENIDO

AGRADECIMIENTO.....	ii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xix
INTRODUCCION.....	1
CAPITULO I.....	3
PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION	3
1.1. Formulación del problema	3
1.2. Planteamiento del problema.....	4
1.3. Objetivos del proyecto	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Hipótesis.....	4
1.5. Justificación e importancia de la investigación.....	5
1.6. Variables de investigación	5
1.6.1. Identificación de las variables:.....	5
1.6.2. Caracterización de las variables.....	6

1.7. Limitaciones de la investigación.....	6
1.8. Descripción de las características de la investigación	7
CAPITULO II.....	8
MARCO TEORICO	8
2.1. Introducción a la robótica.....	8
2.2. Morfología del robot	8
2.2.1. Componentes de un brazo mecánico.....	8
2.2.2. Estructura anatómica de un brazo robótico.....	12
2.2.3. Tipos de articulaciones	13
2.3. Herramientas matemáticas para la localización espacial	21
2.3.1. Representación de la posición.....	22
2.3.2. Representación de la orientación	22
2.3.3. Sistema cartesiano de referencia.....	23
2.3.4. Sistemas polares de referencia	24
2.3.5. Coordenadas Cilíndricas	24
2.3.6. Coordenadas esféricas.....	25
2.3.7. Matrices de rotación.....	26
2.3.8. Matrices de transformación homogénea	30
2.4. Cinemática del robot	31
2.4.1. Cinemática directa	31

2.4.2. Cinemática Inversa.....	32
2.5. Dinámica del robot	34
2.7. Hardware libre.....	38
2.8. Programación de un robot	39
2.9. Robots móviles.....	40
2.9.1. Descripción de un robot móvil con ruedas	41
2.9.2. Tipos de ruedas	43
2.9.3. Configuración de robots móviles	46
2.10 Importancia en nuestra localidad	51
CAPITULO III	52
MATERIALES Y METODOS	52
3.1. Diagrama de procesos	52
3.1.1. Materiales para la etapa de movimiento	53
3.1.2. Materiales para la etapa de comunicación (Radio frecuencia receptor)	
.....	57
3.1.3. Materiales para la etapa de comunicación inalámbrica (Radio frecuencia	
emisor).....	57
3.2. Diagrama de procesos de actividades para la implementación.....	59
3.3. Descripción de los procesos de la construcción del brazo robótico.....	60
3.3.1. Método de recolección de datos-Análisis de la estructura.....	60
3.3.2. Montaje del esqueleto robótico.....	68

3.3.3. Montaje del área de trabajo para la ubicación de las coordenadas	72
3.4. Método para la programación del control brazo robótico	78
3.5. Elaboración del brazo robótico	82
3.6. Construcción del sistema mecánica del brazo robot	82
3.6.1. Construcción básica inicial	82
3.6.2. Diseño realizado por el software	83
3.6.3. Construcción	86
3.7. Sistema de control	91
3.8. Esquemático del conjunto de comunicación (Receptor)	94
3.9. Sistema de alimentación y potencia	95
3.10. Programación del modelado cinemático en el desplazamiento del brazo robótico	97
CAPITULO IV	99
RESULTADOS	99
4.1. Espacio de trabajo del manipulador de 3 eslabones	99
4.1.1. Bosquejo del algoritmo del manipulador robótico	108
4.1.2. Resultados experimentales de la implementación del prototipo	109
4.1.3. Resultados del desarrollo del algoritmo de programación del brazo robótico móvil de tres eslabones	114
4.1.4 Evaluación del funcionamiento del brazo robótico móvil de tres eslabones	116

4.2. Discusiones de los resultados.....	123
CAPITULO V	127
CONCLUSIONES.....	127
CAPITULO VI.....	129
SUGERENCIAS	129
BIBLIOGRAFÍA.....	131
ANEXO	134

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Descripción de la variable independiente	6
Tabla 2 Descripción de la variable dependiente.....	6
Tabla 3 Parámetros Denavit-Hartenberg del manipulador vertical de 3 g.d.l (antropomórfico).	101
Tabla 4 Parámetros Denavit-Hartenberg del robot con las medidas reales del brazo robot “Mearm”	101
Tabla 5 Funcionamiento del sistema de locomoción (chasis móvil).	117
Tabla 6 Gasto energético del prototipo robot.....	119
Tabla 7 Resultados experimentales de la cinemática inversa del movimiento del brazo robótico.	120
Tabla 8 Resultados experimentales de la cinemática directa del movimiento del brazo robótico.	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estructura mecánica del robot “PUMA”	9
Figura 2 Sistema de control de manejo en la robótica, lista de los componentes de los elementos del sistema de control.....	12
Figura 3 Comparación anatómica del cuerpo humano con la estructura robotizada del brazo robótico industrial.	13
Figura 4 Tipos de articulaciones, (1) Esférico, (2) Planar, (3) Tornillo, (4) Prismático, (5) Rotación, (6) Cilíndrico	15
Figura 5 Diferentes ejemplos de articulaciones de un robot, mostrando este ejemplo de articulación más empleada en la robótica a) lineal, b) rotacionales..	16
Figura 6 Diferentes espacios de giro de libertad de un brazo robotizado, es el eje de giro del eslabón.	17
Figura 7 Elementos estructurales de un robot industrial, es la pieza mecánica que une las articulaciones o grados de libertad de giro.	18
Figura 8 Punto terminal de un manipulador, comúnmente se denomina garra o pinza de agarre.	19
Figura 9 Configuraciones básicas de robots manipuladores industriales.....	21
Figura 10 Simbolización del vector en coordenadas cartesianas bidimensional..	23
Figura 11 Representación de un vector de posición en coordenadas polares bidimensionales.	24
Figura 12 Representación del vector de posición en coordenadas cilíndricas tridimensionales.	25

Figura 13 Representación de un vector de posición en coordenadas esféricas tridimensionales.....	26
Figura 14 Sistema de referencia OUV respecto a otro plano OXY	28
Figura 15 Ubicación de la estructura de referencia OUV hacia otro OXY en la superficie geométrica.....	29
Figura 16 Maquina robotizada planar de 2 grados de libertad, cinemática directa del robot.....	32
Figura 17 Organigrama de la relación de las cinemáticas directa e inversa.....	33
Figura 18 Maquina robotizada con 2 eslabones de la cinemática inversa, (a) robot planar codo abajo (b) robot planar de codo arriba.....	34
Figura 19 Modelo de eslabón con masa concentrada.....	36
Figura 20 Organigrama funcional del algoritmo de trayectorias.	37
Figura 21 Arduino Uno R3, modelo básico de entrenamiento.....	39
Figura 22 Métodos de programación de robots. Existen dos formas importantes	40
Figura 23 El plano de la posición del robot móvil.	42
Figura 24 Tipos de ruedas	44
Figura 25 Diferentes elementos de ruedas deslizantes.....	45
Figura 26 configuraciones para las maquinas robotizadas con ruedas.....	46
Figura 27 Ilustración de un robot omnidireccional con ruedas suecas.....	47
Figura 28 (a) se tiene el diagrama técnico de una maquina robotizada omnidireccional con llantas orientables centradas, (b) Robot Seekur	48
Figura 29 Uniciclo (a) esqueleto mecánico. (b) Maquina robotizada Pionner (ActiveMedia)	48

Figura 30 Triciclo. (a) esqueleto mecánico (b) maquina robotizada Neptune (Universidad Carnegie Mellon).....	49
Figura 31 Sistema de dirección Ackerman.....	50
Figura 32 Organigrama de la elaboración para la manipulación del manipulador móvil.....	52
Figura 33 Plataforma de hardware libre (Arduino mega 2560).	53
Figura 34 Izquierda, resistencias de precisión. Derecha, Pines de conexión.	54
Figura 35 Izquierda, condensadores electrolíticos. Derecha, condensadores cerámicos.....	54
Figura 36 Izquierda, Placas PCB. Derecha, leds de iluminación.....	54
Figura 37 Placas de triplay de madera para la base móvil.	55
Figura 38 chasis móvil del manipulador robótico para el desplazamiento.	55
Figura 39 Manipulador de 3 eslabones con la base móvil.	56
Figura 40 Izquierda, tarjeta de control para motores dc. Derecha, tarjeta de control para servomotores	56
Figura 41 Antena inalámbrica de comunicación NRF24L01.....	57
Figura 42 Control inalámbrico a distancia con la antena (NRF24L01).	58
Figura 43 Izquierda, pulsadores de contacto. Derecha, cable unipolar	58
Figura 44 Izquierda, porta pilas. Derecha, Arduino nano	58
Figura 45 Organigrama, para las etapas de la implementación del proyecto.	59
Figura 46 Robot antropomórfico que define el tipo de morfología.	61
Figura 47 Bosquejo del cuerpo libre en la estructura cinemática del robot antropomórfico.	62

Figura 48 Variables para el cálculo del modelo de cinemática inversa del robot “Mearm” (configuración antropomórfica).	63
Figura 49 Técnica geométrica del manipulador robótico “Mearm” de tres eslabones, configuración antropomórfica.	64
Figura 50 Método geométrico del modelo cinemático inverso.....	66
Figura 51 Distribución de las medidas del robot “Mearm”.....	69
Figura 52 Cinemática directa del robot utilizando el método geométrico.	70
Figura 53 Aspecto físico del prototipo comercial modelo Mearm de 4 g.d.l. como herramienta interactiva de desarrollo de educación e investigación.	71
Figura 54 Plano de trabajo en referencia a las posiciones de los servos.....	72
Figura 55 Diagrama de las articulaciones y sus movimientos en su área de trabajo.	73
Figura 56 Piezas diseñadas en 3D asistido por impresora láser (CNC).	75
Figura 57 Implementación final del diseño 3D en el software SketchUP.	76
Figura 58 Planos de la base móvil del brazo robótico.....	76
Figura 59 Soporte Inferior de la base utilizada para el acople de los motores DC.	77
Figura 60 Implementación de la base móvil del brazo robótico parte inferior. ...	77
Figura 61 Esquema general para realizar un algoritmo de acuerdo al diseño de un prototipo.	78
Figura 62 Organigrama para la elaboración del programa para la manipulación de la maquina robotizada.	80
Figura 63 Organigrama implementado del control de movimiento en Arduino. .	81

Figura 64 Prototipo del manipulador de 4 eslabones, visualizando sus eslabones rotacionales.....	83
Figura 65 Diseño del entorno mecánico de un servomotor SG90 del brazo robótico.	84
Figura 66 Modelamiento de los motores DC de 5v y los neumáticos de la base móvil del robot.	85
Figura 67 Vista frontal del programa SketchUP.	86
Figura 68 Izquierda, base rectangular con sus medidas respectivas. Derecha, soportes de madera para los motores.....	87
Figura 69 Elaboración de las bases para la plataforma móvil del brazo robótico.	88
Figura 70 Esqueleto experimental para arreglar el diseño el prototipo del robot.	89
Figura 71 La estructura prototipada del manipulador móvil.....	90
Figura 72 sistema electrónico del control electrónico para el manipulador móvil.	91
Figura 73 (a) Implementación del controlador L293D, (b) Implementación del controlador L298N.	92
Figura 74 Organigrama de la estructura de control del robot.....	93
Figura 75 Sistema de comunicación inalámbrica receptora del prototipo del robot.	94
Figura 76 Sistema de comunicación emisora del prototipo del robot.	95
Figura 77 El organigrama de la estructura para la alimentación del sistema electrónico y la alimentación de potencia en los mecanismos.	96

Figura 78 Organigrama de la implementación para el algoritmo para el control y autonomía.	97
Figura 79 Pasos en la búsqueda de los valores que determinan la posición del manipulador.	98
Figura 80 Espacio de trabajo del robot en 3D del brazo robot “Mearm” de tres eslabones realizado en el programa Matlab.	100
Figura 81 Zona de labor, visto desde la parte superior 2D y una recta definiendo la trayectoria de dos puntos en su espacio de trabajo.	106
Figura 82 Organigrama para el código de la cinemática inversa en el software Matlab y Arduino.	109
Figura 83 Sistema de control inalámbrico del manipulador robótico.	110
Figura 84 Articulaciones del manipulador robótico y la estructura mecánica del robot móvil.	112
Figura 85 Sistema de control del procesador del brazo robótico móvil.	114
Figura 86 Organigrama general para el manipulador del prototipo de la maquina robotizada.	115
Figura 87 Organigrama del control remoto emisor.	116
Figura 88 Desplazamiento de pruebas experimentales de la base móvil del brazo robótico.	118
Figura 89 Cuadro para la comparación en los puntos en el eje X para la precisión del efector final.	120
Figura 90 Cuadro de comparación de los puntos en el eje Y para la precisión del efector final.	121

Figura 91 Cuadro de comparación de las medidas en los ángulos de rotación de los dispositivos mecánicos.	122
Figura 92 Pruebas para las ubicaciones de las coordenadas en el área de trabajo del brazo robótico.	122

RESUMEN

Para elaborar el presente informe de tesis, se emplearon los fundamentos de la mecánica para el desarrollo del funcionamiento de la estructura antropomórfica (tipo de configuración), además de los fundamentos de los circuitos electrónicos y de programación. Esto permitió mecanizar los desplazamientos del esqueleto del robot obteniendo de esa forma una funcionalidad fiable.

La implementación del prototipo robot experimental es controlada a través del algoritmo de la cinemática directa e inversa desarrollado en el sistema electrónico (Arduino Mega 2560), con la configuración de la geometría cartesiana del brazo robot antropomórfico como modelo matemático para el control de la posición y orientación. El prototipo tiene un funcionamiento en el alcance del brazo hasta de 18 cm dentro del límite máximo de su área trabajo y con un consumo de 2 A de corriente por cada servomecanismo. El consumo lo realiza de acuerdo a la actividad programada.

Al prototipo se le construyó una base móvil para facilitar su desplazamiento global en el entorno de trabajo. Además, se ensambló una estructura de control de potencia, un microcontrolador y el circuito comunicador inalámbrica NRF24L01 para la evaluación del funcionamiento.

INTRODUCCION

En la actualidad la robótica se convirtió en la ciencia para el desarrollo de la tecnología que permite desarrollar diferentes áreas de trabajo optimizando costos de inversión, tiempo y mejorando la calidad del trabajo. Esta disciplina tuvo un origen de siglos pasados desarrollado inicialmente como arte y que a medida que se fue perfeccionando a partir de la utilidad y el impacto en la humanidad se convirtió en una ciencia moderna para desarrollar tecnología que reemplace la labor, la eficiencia y producción.

La robótica ha influido en la actualidad como una disciplina importante como herramienta y método de investigación en todas las demás áreas de estudio como, por ejemplo: educación, industria, medicina, agricultura y otras áreas de aplicación, siendo la disciplina que más revolución está generando por los resultados de los avances en cuanto al aprendizaje es la educación ya que se convierte como una herramienta interactiva e integral para desarrollar un mejor avance.

Existen dentro del área de la robótica el desarrollo de prototipos que sirven como un modelo para el desarrollo de futuras ideas para aplicaciones que se perfeccionen y sean utilitarios en su impacto como innovación, permitiendo desarrollar métodos de control que garanticen la funcionalidad a partir de un estudio avanzado en el diseño

mecánico, la programación para dicho control y la dinámica del movimiento de las articulaciones del prototipo robótico.

En la actualidad los prototipos de robótica orientados para desarrollar algoritmos de control que requieran un menor tiempo de proceso y consuman menos recursos a la hora de construir son muy limitados por su elevado costo y la complejidad que con lleva desarrollar el control para el estudiante o investigador, esta dificultad impide que el desarrollo a nivel local y mundial no sea muy progresivo en forma igualitaria, La finalidad del desarrollo del prototipo de brazo robótico móvil permitió desarrollar algoritmos de control avanzados a partir de nuevos métodos matemáticos que desarrollen la funcionalidad y la dinámica de control para labores de aplicación de estudio.

Haciendo un enfoque sobre el análisis de la cinemática cartesiana directa como modelo principal del dominio de robot antropomórfico se desarrolló dicho algoritmo del dominio cinemático tomando como modelo los parámetros (Denavit-Hartenberg) y que permitieron tener una mejor ubicación en el área de trabajo con una orientación y posición dentro de los límites establecidos de acuerdo a las medidas de la articulación del robot.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Formulación del problema

En la actualidad nuestra localidad de Tacna la producción en las diferentes áreas como la agricultura, pesquería, minería, educación y el comercio generan una mayor demanda de consumo por la forma utilitaria para el desarrollo, pero no se realizan estudios sobre los avances de las ciencias aplicadas en la disciplina de la manufactura y robótica para mejorar la calidad y el avance en la economía de la producción dificultando el desarrollo en las demás áreas.

La tecnología (robótica) actualmente en nuestra localidad tiene muy poco desarrollo hacia la educación, por la razón de no tener herramientas de tecnología para el aprendizaje que generen trabajos experimentales para generar nuevos conocimientos.

Por este motivo es que a nivel mundial se decidió desarrollar los prototipos experimentales como una herramienta innovadora para el desarrollo de las aplicaciones como investigación, pero el elevado costo que requiere adquirir como herramienta es muy costoso y consume muchos recursos para su elaboración.

1.2. Planteamiento del problema

¿El sistema electrónico de hardware libre, permitirá la implementación del brazo robótico móvil de tres eslabones para el desarrollo de trabajos experimentales de aplicación?

1.3. Objetivos del proyecto

1.3.1. Objetivo general

- Implementar un brazo robótico móvil de tres eslabones, aplicando la tecnología del sistema electrónico de hardware libre.

1.3.2. Objetivos específicos

- Implementar la cinemática directa e inversa cartesiana del brazo robótico móvil para desarrollar el algoritmo de control.
- Ensamblar el sistema mecánico y electrónico del brazo robótico móvil de tres eslabones.
- Caracterizar el funcionamiento del brazo robótico móvil de tres eslabones.

1.4. Hipótesis

Es posible ensamblar y evaluar el funcionamiento del brazo robótico móvil de tres eslabones aplicando la tecnología del sistema electrónico de hardware libre para el desarrollo de trabajos experimentales de aplicación.

1.5. Justificación e importancia de la investigación

Nuestra actualidad muestra las dificultades de no tener herramientas que ayuden a desarrollar trabajos experimentales en la robótica con la finalidad de producir tecnología en nuestra localidad, es que me veo obligado a desarrollar un prototipo de brazo robótico móvil.

Con la finalidad de desarrollar una herramienta de tecnología que pueda ser utilitaria en los trabajos de investigación para el desarrollo en las aplicaciones de educación, producción y pueda desarrollar nuevos métodos de desarrollo en otras áreas de investigación en la ciudad de Tacna.

Este prototipo de brazo robótico móvil de tres eslabones es fundamental como herramienta de tecnología para desarrollar nuevos métodos de trabajo experimental de aplicación.

1.6. Variables de investigación

1.6.1. Identificación de las variables:

Variable independiente

- Sistema electrónico de hardware libre.

Variable dependiente

- Implementación de un brazo robótico móvil de tres eslabones.

1.6.2. Caracterización de las variables

- **Variable independiente**

Tabla 1 Descripción de la variable independiente

Variable	Indicadores	Índices
Sistema electrónico de hardware libre	<ul style="list-style-type: none">• Los PWM del Arduino Mega 2560.	<ul style="list-style-type: none">• Tiempo (s)

- **Variable dependiente**

Tabla 2 Descripción de la variable dependiente

Variable	Indicadores	Índices
Implementación de un brazo robótico móvil de tres eslabones.	<ul style="list-style-type: none">• Dinámica• Desplazamiento• Giro• Potencia	<ul style="list-style-type: none">• Newton (N)• Metros (m.)• Ángulo en grados (°)• Watts (W)

1.7. Limitaciones de la investigación

- El proyecto estará limitado al uso del hardware libre con la finalidad de optimizar recursos de tecnología, programación y costos para trabajos experimentales de laboratorio.
- Solo se utilizará materiales del medio local por la fácil elaboración y el bajo

costo para la construcción, ante la ausencia de materiales adecuados para la robótica.

- Se presentó la limitación económica para adquirir materiales recomendados en la construcción de la base móvil, razón por la cual se utilizó materiales de bajo costo.

1.8. Descripción de las características de la investigación

- **Tipo de estudio:** Investigación tecnológica.
- **Nivel de investigación:** Investigación Aplicada, Experimental.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1. Introducción a la robótica

La robótica es la evolución de la tecnología convertida en el progreso de la humanidad para el desarrollo del futuro, con la finalidad de mejorar y perfeccionar las cualidades de producción, salud, educación y la economía. (Barrientos, 1997)

2.2. Morfología del robot

2.2.1. Componentes del brazo mecánico

Una maquina está compuesto por diferentes elementos mecánicos que, al estar armados, forman una estructura semejante a la anatomía musculo-esquelético del cuerpo humano en especial al brazo humano, esta composición de elementos está formado por un esqueleto mecanizado (prediseñada), transmisiones, actuadores, sensores, elementos terminales y controlador.

Las altas prestaciones que exigen al robot en las aplicaciones dentro de la industria han motivado desarrollar diferentes diseños para el ámbito de la producción, así como también mejorar sus procesos de ensamblaje adaptándolas a múltiples usos en aplicaciones específicas a nivel social.

La composición física de un robot industrial guarda cierta similitud como el brazo, codo, muñeca, etc. Y dentro del contexto se puede apreciar como un gran ejemplo al robot de configuración mecánica “PUMA” que fue una de las pioneras en desarrollar procesos de ensamblaje en la industrial y que actualmente es utilizado para desarrollar investigaciones tecnológicas en procesos y fue desarrollado por Victor Scheinman en la empresa pionera en robotica Unimation, como se aprecia en la siguiente Figura 1 se compara detalladamente las partes de una máquina y humano a partir de su brazo anatómico. (Guadalajara, 2018)

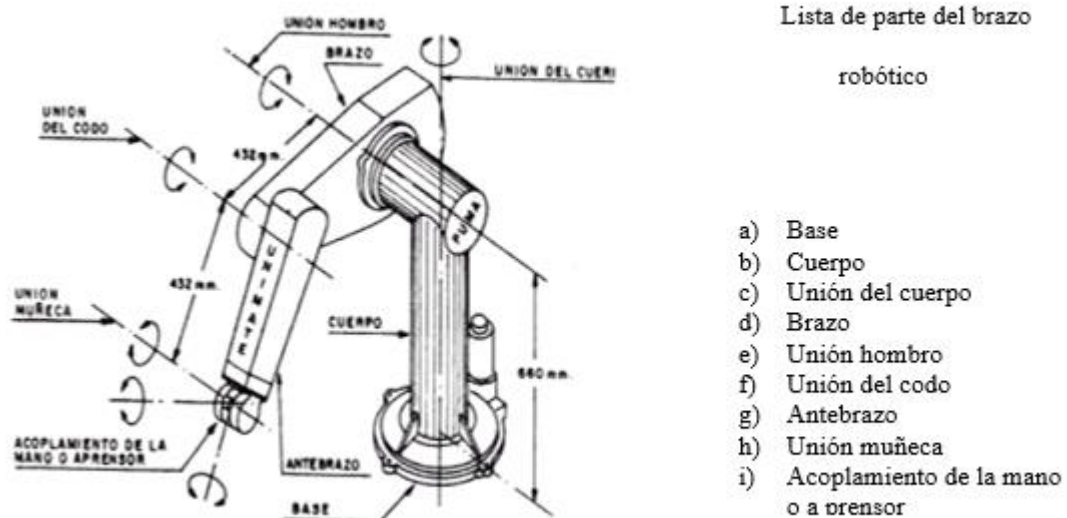


Figura 1 Estructura mecánica del robot “PUMA”

Fuente: recuperado del sitio web:(http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cy_r0204/cy_r_01/robotica/sistema/morfologia.htm, 2019)

- **Controlador**

El controlador cumple una función principal que es la de administrar, accionar y controlar toda la información proveniente de los autómatas-herramientas que forman todo el conjunto de trabajo optimizado a partir de la programación pre-elaborada para controlar los procesos realizados por las maquinas-herramientas, el controlador se clasifica por determinados niveles y tipos para llevar a cabo su labor y que mencionare a continuación:

- Controlador de posición: Este tipo de controlador interviene en la manipulación del punto de control llamado coordenada en la posición estática de la máquina.
- Controlador Cinemático: el ordenador se centra en medir la posición y la velocidad utilizando los métodos matemáticos, por ejemplo: El método de Denavit-Hartenberg.
- Controlador Dinámico: Este tipo de controlador se caracteriza por utilizar dos métodos, el primero se basa en el control cinemático a través del cálculo de la velocidad y la posición y el segundo utiliza los modelos dinámicos a través de las características físicas del modelo de la estructura físicas.
- Controlador Adaptativa: El controlador se caracteriza por tener cada una de las características anteriores en combinación con sus propiedades, además

esta se encargar de controlar las características del cambio en las diferentes posiciones del brazo robótico.

- **Dispositivos de entrada y salida**

Los instrumentos de entradas y salidas logran incluir y obtener diferentes acciones de datos con respecto al controlador de la máquina. Para enviar instrucciones al dispositivo del microcontrolador y otorgar a programas de control, normalmente se utiliza un computador adicional. Es fundamental esclarecer que no todas las maquinas tienen estos componentes que les permite las realizaciones de entradas y salidas.

Los más comunes son: Tecla, monitor y caja de comandos, en la figura 2 se tiene un controlador (computer module) que envía señales a los motores de cada uno de los ejes del robot y la caja de comandos (teach pendant) la cual sirve para enseñarle las posiciones al manipulador del robot. (Guadalajara, 2018)

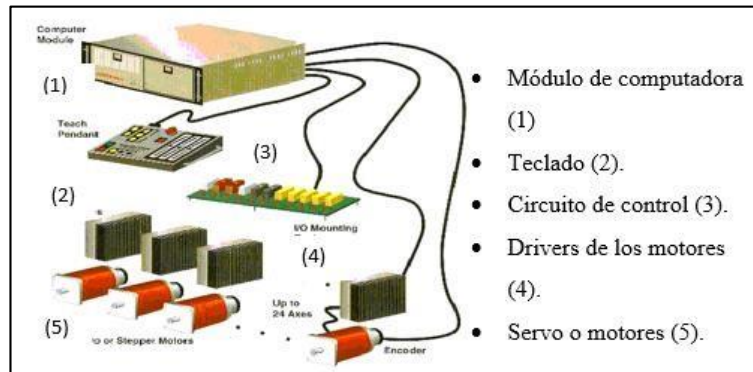


Figura 2 Sistema de control de manejo en la robotica, lista de los componentes de los elementos del sistema de control.

Fuente: Recuperado del sitio web:(http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/cyr_01/robotica/sistema/morfologia.htm, 2019)

2.2.2. Estructura anatómica de un brazo robótico

La formación de la estructura solida de la mayoría de estos robots industriales, tienen una semejanza con la estructura corporal superior del ser humano, por lo general para mencionar las partes elementales que componen el brazo robótico, es preferible usar términos semejantes como: cintura, hombro, brazo, codo, muñeca, etc. Que permita al especialista o estudiantes realizar una comparación para un reconocimiento y aprendizaje de dicho brazo robótico, en la mencionada figura 3 que se puede visualizar a continuación, se realiza una comparación de las estructuras anatómicas y mecánicas del hombre-robot, para aprender y reconocer sus elementos principales. (Guadalajara, 2018)

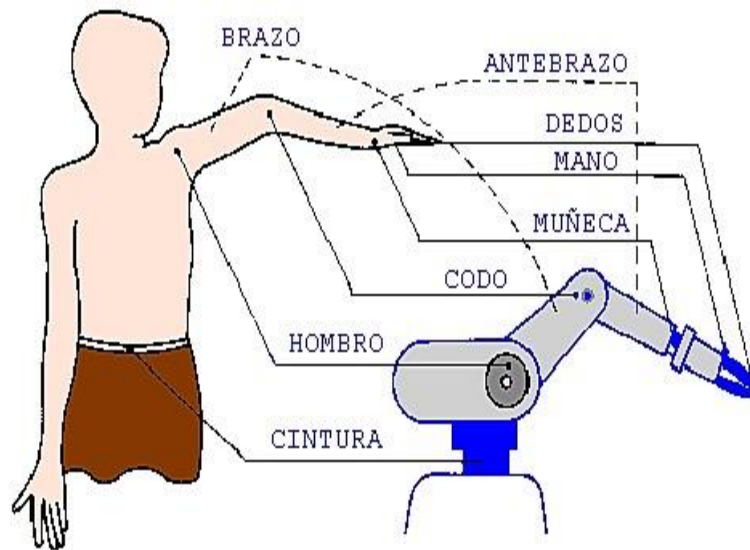


Figura 3 Comparación anatómica del cuerpo humano con la estructura robotizada del brazo robótico industrial.

Fuente: Recuperado del sitio web: (http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/cyr_01/robotica/sistema/morfologia.htm, 2019)

2.2.3. Tipos de articulaciones

Se hallan variados ejemplos de uniones. Mayormente son empleadas en la robotica son las siguientes:

- La articulación de rotación brinda un grado de libertad que se enfoca en el giro en los contornos del eje, Este tipo de articulación, es comúnmente empleada en el diseño.
- La articulación prismática se caracteriza por ser lineal en su desplazamiento

y consiste en un movimiento deslizante a través de la distancia del eje de la articulación mecánica, de esta forma este tipo de articulación es comúnmente empleada en configuraciones cartesianas.

- Esta configuración cilíndrica tiene dos características importantes que lo hacen muy utilitario para el diseño de brazos robóticos, es de carácter lineal y rotacional en torno a 360° alrededor del eje y se desliza en forma lineal, permitiendo tener un movimiento de mayor amplitud en torno a la base de su estructura.
- La articulación planar a diferencia de las anteriores, su único desplazamiento se da en forma lineal y que puede desplazarse en planos en 2 dimensiones.
- La articulación esférica, estas articulaciones combinan tres giros de 180° aproximadamente por cada dirección de rotación, mayormente no poco utilizadas en estructuras complejas para la robótica, pero tiene mayor amplitud de movimientos en un mismo punto.

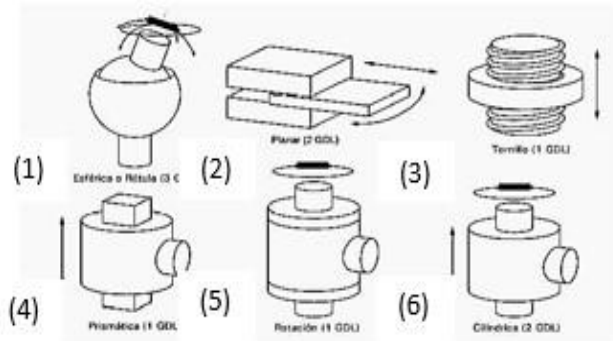


Figura 4 Tipos de articulaciones, (1) Esférico, (2) Planar, (3) Tornillo, (4) Prismático, (5) Rotación, (6) Cilíndrico

Fuente: Antonio Barrientos, 1997

Existen actualmente dos clases de articulaciones que pueden ser:

- Articulaciones Lineales en donde tienen las siguientes características, las cuales son deslizantes, desplazamiento o prismático, y si la unión mecánica se desplaza sobre un eje solidario al eslabón anterior.
- Articulaciones rotacionales en esta situación el eslabón gira alrededor del eje y que es antes a otro eslabón.

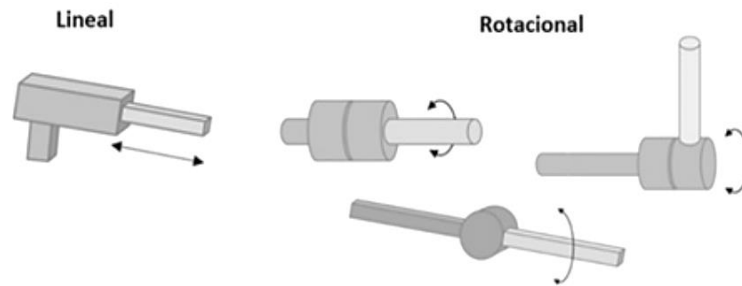


Figura 5 Diferentes ejemplos de articulaciones de un robot, mostrando este ejemplo de articulación más empleada en la robótica a) lineal, b) rotacionales

Fuente: Recuperado del sitio web:(http://roboticaymecatronica123.blogspot.com/2012/06/blog-post_6452.html, 2019)

2.2.3.1. Grados de libertad.

Son las coordenadas independientes de velocidades que ayudan a definir el estado cinemático de un mecanismo dentro de la robótica, comúnmente el par estructura-unión, posee solo un grado de rotación de libertad que es la vinculación o conexión sucesiva de posteriores eslabones-articulaciones.

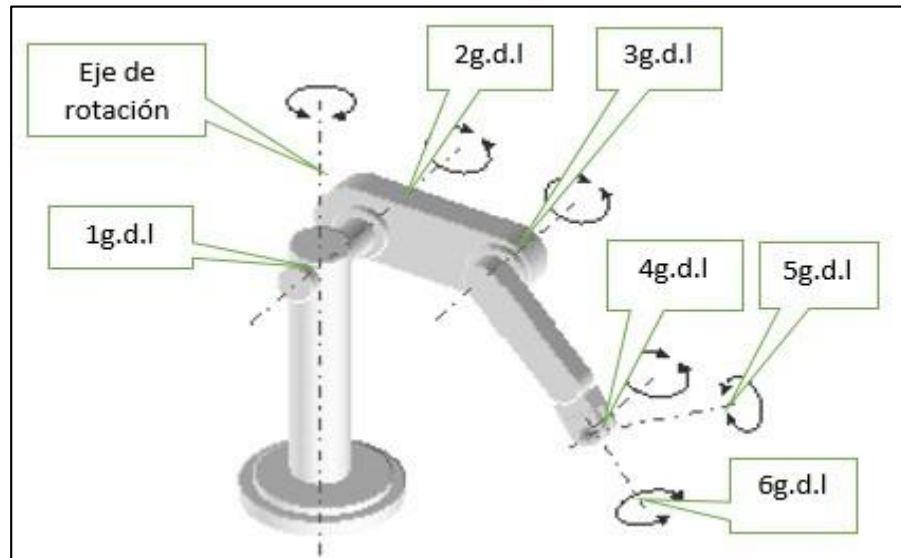


Figura 6 Diferentes espacios de giro de libertad de un brazo robotizado, es el eje de giro del eslabón.

Fuente: Recuperado del sitio web: (<https://freedomforlife.wordpress.com/grados-de-libertad/>, 2019)

Para la especificación del estado del brazo robótico y su posterior control es preciso determinar las características que definen el estado:

- El lugar del punto terminal relativo al plano de referencia (plano Cartesiano) para mostrar el efector final.
- El desplazamiento de los dispositivos mecánicos del Brazo robótica, en donde se aplican todas las fuerzas y los momentos de torque con referencia al sistema de referencia.

2.2.3.2. Eslabones.

Son cuerpos rígidos conectados unos con otros entre si a través de las articulaciones y tienen características importantes como son sus dimensiones, masas, tensor de inercia y centro de masa que tienen mucha relevancia al momento de diseñar o realizar el modelamiento de la estructura mecánica.

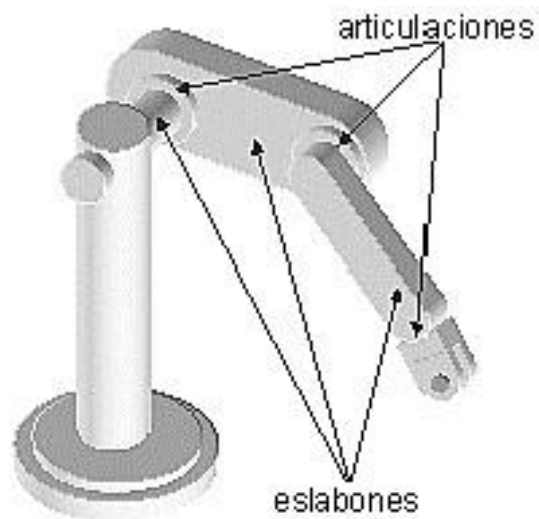


Figura 7 Elementos estructurales de un robot industrial, es la pieza mecánica que une las articulaciones o grados de libertad de giro.

Fuente: Recuperado del sitio web: (http://roboticaymeatronica123.blogspot.com/2012/06/blog-post_6452.html, 2019)

2.2.3.3. Cadenas cinemáticas

Es una secuencia de eslabones y articulaciones, si tienen orden, se les llama cadena cinemática; en donde están sucesivamente formado por eslabones y articulaciones, en donde se inicia a partir de una base y termina en el efector final de la cadena.

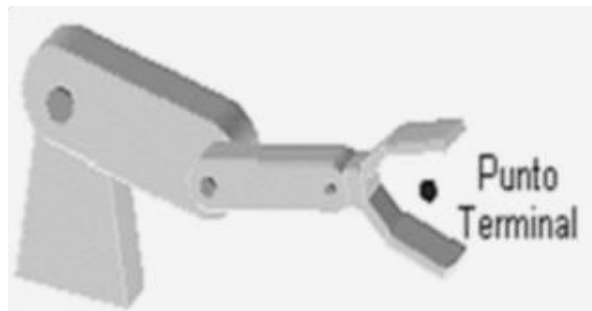


Figura 8 Punto terminal de un manipulador, comúnmente se denomina garra o pinza de agarre.

Fuente: Recuperado del sitio web:(http://roboticaymecatronica123.blogspot.com/2012/06/blog-post_6452.html, 2019)

2.2.3.4. Configuración cartesiana de robots manipuladores

Según la representación geométrica del plano donde se ubicará el sistema mecánico del robot y su efector final, puede ser clasificado de la siguiente manera:

- Robot cartesiano: Cuyo mecanismo se presenta en el plano cartesiano y su ubicación en el lugar se realiza a través de los dispositivos mecánicos lineales que se desplazan en la distancia del eje de la misma estructura.
- Robot Cilíndrico: Cuyas articulaciones están formadas por una rotacional y lineal, la rotacional cumple la función de ubicarse mediante ángulos las posiciones para las articulaciones lineales y estas a su vez generan sus desplazamientos en sus mismos ejes.
- Robot Polar: Se llaman Polar por que los movimientos de las articulaciones (ejes) conforman una estructura de configuración polar de referencia en su zona de labor.
- Robot Esférico: Se caracteriza por tener tres articulaciones rotacionales y en donde sus coordenadas dependen de los ángulos de giros para ubicar una coordenada en su espacio de trabajo.
- Robot Mixto: Poseen varios tipos de articulaciones de diferentes características, además poseen una combinación variada de las diferentes combinaciones anteriores.
- Robot paralelo: Poseen articulaciones prismáticas o rotacionales concurrentes en donde los ejes son las líneas de las coordenadas del sistema cartesiano.



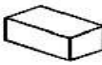





















Configuración geométrica	Estructura cinemática	Espacio de trabajo	Ejemplo
cartesianos  tipo cantiléver tipo pórtico			
cilíndrico 			
polar 			
esférico 			
SCARA 			
paralelo 			

Figura 9 Configuraciones básicas de robots manipuladores industriales.

Fuente: Recuperado del sitio web:(http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cy r_0708/archivos/_15/Te ma_5.4.htm, 2019)

2.3. Herramientas matemáticas para la localización espacial

La utilización de partes mecánicas implica la ubicación en el espacio geométrico del brazo robótico tanto de las piezas u objetos que se ubican dentro de este espacio, cuya ubicación es la coordenada puntual para el movimiento de la estructura, para

realizar un movimiento de ubicación se necesita de una herramienta (modelo matemático) para desarrollar cálculos en las diferentes coordenadas dentro del espacio geométrico del robot.

2.3.1. Representación de la posición

Es indispensable utilizar algunas herramientas matemáticas que nos permitan saber las relaciones espaciales del objeto y el brazo robótico en torno al espacio de trabajo para desarrollar dicho movimiento y que pueda recoger del entorno dicho objeto y posicionarlo en otro lugar.

A continuación, se presentan varios métodos y herramientas para la representación de la posición y orientación de un cuerpo rígido que nos servirán para establecer la ubicación del efector final de un robot, o cualquiera de sus articulaciones, respecto a un punto, generalmente la base del robot. (Barrientos,1997)

2.3.2. Representación de la orientación

Para determinar un lugar, solo es indispensable indicar sus tres coordenadas en el espacio y además indicar cuál es su orientación en el espacio. Por ejemplo, para un robot que se encarga de pintar un vehículo no basta con conocer su ubicación en el espacio, sino que es necesario también conocer la orientación de su extremo para que realice adecuadamente la operación. (Barrientos, 1997)

A continuación, se describirá los diferentes sistemas espaciales de coordenadas geométricas en el posicionamiento de la estructura solida en el lugar para la ubicación del brazo robótico.

2.3.3. Sistema cartesiano de referencia

Para esta situación en donde se trabaja con las coordenadas oxy con relación, una coordenada α estará representado por los componentes (x, y) correspondiente al plano oxy . Este punto tiene asociado un vector $p(x, y)$, que va desde el origen O del sistema OXY hasta el punto α , como puede observarse en la figura 10. (Barrientos, 1997)

- $P(x, y)$ = vector de coordenada cartesiana en el plano 2D.
- Y = eje y del plano bidimensional.
- X = eje x del plano bidimensional.

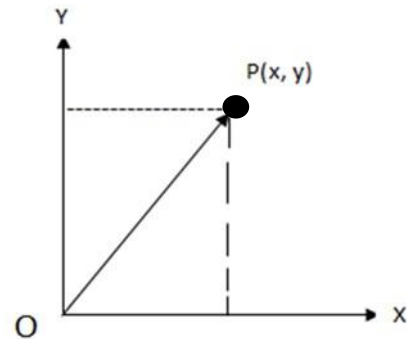


Figura 10 Simbolización del vector en coordenadas cartesianas bidimensional

2.3.4. Sistemas polares de referencia

Para un plano, es posible también caracterizar la localización de un punto o vector “p” respecto a un sistema de ejes cartesianos de referencia OXY utilizando las denominadas coordenadas polares $p(\rho, \Theta)$, en la figura 11 está la representación, ρ representa la distancia desde el origen O del sistema hasta el extremo del vector “p”, mientras que Θ es el ángulo que forma el vector “p” con el eje OX. (Barrientos, 1997)

$P(\rho, \Theta)$ = vector de posición en coordenadas polares bidimensional.

ρ = distancia del vector.

Θ = ángulo de posición.

Y = eje y del plano bidimensional.

X = eje x del plano bidimensional.

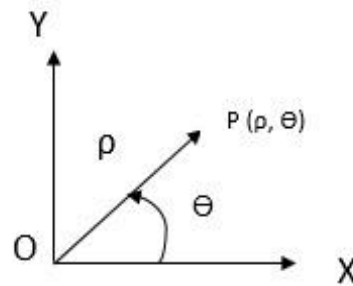


Figura 11 Representación de un vector de posición en coordenadas polares bidimensionales.

2.3.5. Coordenadas Cilíndricas

El plano cartesiano de los elementos geométricos cilíndricos, son muy utilitarias para aquellos casos que tienen simetría del tipo cilíndrica el área de trabajo de todo

el robot o acimutal. Esta versión es muy similar al plano de las coordenadas polares en referencia al sistema cartesiano, ya que, en la configuración física del robot, está conformada por dos articulaciones prismáticas y la base del robot por una articulación rotacional.

El punto P mencionado en la imagen representa a la coordenada (ρ, φ, z) donde:

- ρ = Es llamada la coordenada radial y se define a lo largo del elemento P hacia el elemento Z o también mencionada como una proyección del vector radio al plano xy.
- φ = Es llamada la coordenada azimutal, que se forma al estar abierta con respecto al eje x.
- Z = Se llama coordenada vertical o de altura tomada desde el punto P hasta el plano xy.

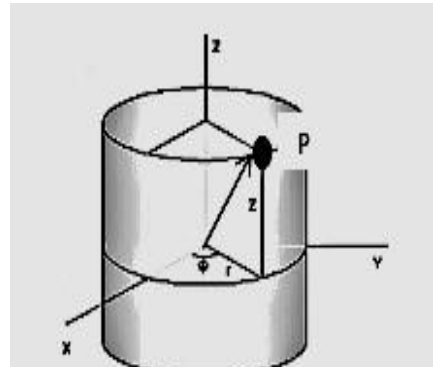


Figura 12 Representación del vector de posición en coordenadas cilíndricas tridimensionales.

Fuente: Aníbal O. Baturone, 2018

2.3.6. Coordenadas esféricas

Las coordenadas esféricas en comparación a las coordenadas polares tienen los mismos ángulos con respecto a los planos en 3 dimensiones en el empleo de los ángulos y las ubicaciones dentro del espacio de trabajo esférico.

P = La coordenada en el espacio esférico.

φ = Coordenada azimutal que forma con el eje Z para el punto.

θ = ángulo formado por el radio y el eje Z.

R = radio de la esfera.

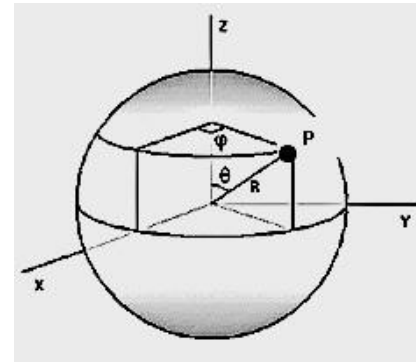


Figura 13 Representación de un vector de posición en coordenadas esféricas tridimensionales.

Fuente: Aníbal O. Baturone, 2018

2.3.7. Matrices de rotación

Estas matrices de rotación se caracterizan por ser representadas como objetos formados por filas y columnas $R^{3 \times 3}$ en donde su función principal es la de transformar los elementos del punto P a la coordenada relativa $\Sigma_0^0(x_0, y_0, z_0)$.

Para esta descripción vamos a suponer que tenemos en la superficie dos organizaciones de referencia oxy y ouv en común con el mismo punto de referencia O, entonces la composición oxy es la principal estructura de relación fijo y la organización ouv con el desplazamiento de apoyo al cuerpo sólido. Estos sistemas tienen vectores unitarios que nos ayudan a establecer una orientación, en primer

lugar, para el sistema oxy se tiene i_x, j_y y en segundo lugar el sistema ouv se tiene i_u, j_v .

Y el vector P del plano es expresado mediante los dos sistemas en relación con la localización en el lugar geométrico.

P_{xy} = vector de posición del sistema de referencia

P_x = vector unitario de posición del sistema XY

P_y = vector unitario de posición del sistema XY

i_x = vector unitario del eje X

i_j = vector unitario del eje Y

P_u = vector unitario de posición del sistema UV

P_v = vector unitario de posición del sistema UV

i_u = vector unitario del eje U

i_v = vector unitario del eje V

En la ecuación (2.1) y (2.2) se expresa el vector de posición con referencia a los dos sistemas de referencia OUV y OXY permitiendo expresarse en una matriz de posición como se muestra en la figura 14 se observa esta expresión en las composiciones solidarios.

$$P_{xy} = [P_x, P_y]^T = P_x \cdot i_x + P_y \cdot j_y \quad (2.1)$$

$$P_{xy} = [P_u, P_v]^T = P_u \cdot i_u + P_v \cdot j_v \quad (2.2)$$

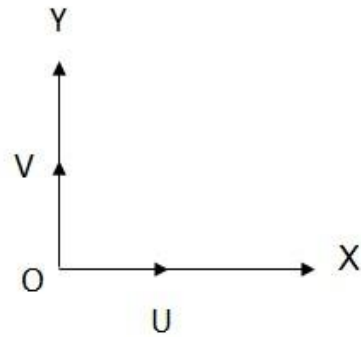


Figura 14 Sistema de referencia OUV respecto a otro plano OXY

Por lo general el sistema de rotación se expresa a través de una matriz de rotación donde se puede observar la orientación del objeto solidario a los sistemas de referencia oxy y ouv , En esta siguiente figura 15, se desarrolla un ejemplo de los dos sistemas de referencia, que son la base de posición y referencia para el objeto dentro del plano cartesiano.

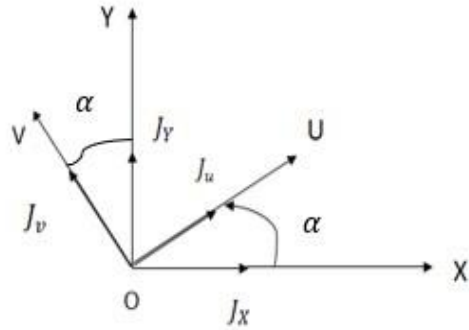


Figura 15 Ubicación de la estructura de referencia OUV hacia otro OXY en la superficie geométrica.

Para desarrollar unas transformaciones simples se puede llegar a una igualdad, como se describe en las ecuaciones (2.3) y (2.4) se expresa las matrices de los cosenos directores expresados según al ángulo de orientación en los sistemas de referencias anteriormente mencionados.

R = Matriz de rotación.

P_x = coordenada de ubicación en el eje x.

P_y = coordenada de ubicación en el eje y.

P_u = coordenada del vector unitario u.

P_v = coordenada del vector unitario v.

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \end{bmatrix}_{2 \times 1} = R \begin{bmatrix} P_u \\ P_v \end{bmatrix}_{2 \times 1} \quad (2.3)$$

$$R = \begin{vmatrix} i_x i_u & i_x i_v \\ i_y i_u & i_y i_v \end{vmatrix}_{2 \times 2} \quad (2.4)$$

Donde “R” es la llamada matriz de rotación que define la orientación OUV con respecto al sistema OXY, y que se utiliza en la modificación de las coordenadas de un vector en un sistema a las del otro. Es también posible corroborar que es una matriz orto-normal, tal que $R^{-1} = R^T$, como se menciona en la ecuación (2.5).

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}_{2 \times 2} \quad (2.5)$$

2.3.8. Matrices de transformación homogénea

La simbolización de las matrices de transformación homogénea de un objeto solido se realiza a través de $(n + 1)$ dimensiones, en donde el lugar n -dimensional se ubica simbolizado en coordenadas homogéneas por $(n + 1)$ dimensiones, de esta manera representar un vector dentro del sistema de referencia $p(x, y, z)$ será $p(w * x, w * y, w * z)$ donde w es un valor arbitrario, además mantiene en ambas situaciones las mismas dimensiones.

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix}_{4 \times 1} = \begin{bmatrix} aw \\ bw \\ cw \\ w \end{bmatrix}_{4 \times 1} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ 1 \end{bmatrix}_{4 \times 1} \quad (2.6)$$

Entonces a partir de lo anterior, surge las matrices de coordenadas homogéneas, la cual se representa como una matriz de transformación homogénea de dimensión 4×4 , que es un vector de coordenadas homogéneas transformada, tal como se representa en la ecuación (2.7).

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 3} = \text{Matriz de la transformación homogénea de rotación.}$$

$$T(d) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{3 \times 1} = \text{Matriz de transformación homogénea de traslación.}$$

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & w_{1 \times 1} \end{bmatrix}_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} \text{Rotacion} & \text{Traslacion} \\ \text{Perspectiva} & \text{escalado} \end{bmatrix}_{2 \times 2} \quad (2.7)$$

2.4. Cinemática del robot

El estudio de la cinemática permite conocer los movimientos de cada cuerpo que conforma dicha estructura del robot independientemente de las fuerzas que originan dichos movimientos en su propio entorno o sistema dimensional.

2.4.1. Cinemática directa

Es un modelo directo que expresa ampliamente el posicionamiento y la ubicación de toda la estructura geométrica del robot manipulador, en donde se definen como las ecuaciones permiten calcular las posiciones y orientaciones de la base de un brazo robótico. De igual forma también el robot tiene sus modelos

cinemáticos directos que permiten calcular sus posiciones y orientaciones, por ejemplo, veamos el caso de la máquina de 2g.d.l. (grados de libertad), como se manifiesta para las ecuaciones (2.8) y (2.9).

$$X=l_1.\cos q_1 + l_2 \cos (q_1 + q_2) \quad (2.8)$$

$$Y=l_2.\sin q_1+ l_2 \sin (q_1 + q_2) \quad (2.9)$$

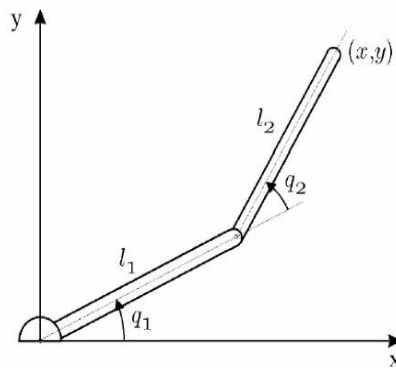


Figura 16 Máquina robotizada planar de 2 grados de libertad, cinemática directa del robot.

Fuente: Aníbal O. Baturone, 2007

2.4.2. Cinemática Inversa

Es considerado como el proceso inverso de la cinemática directa por el cual se obtiene un modelo caracterizado de acuerdo a la posición específica del efector final calculando a su vez los desplazamientos de los actuadores. El objetivo del problema de la cinemática inversa consiste en encontrar los valores que deben adoptar las

coordenadas articulares del robot $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]$ para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial, como se observa en la figura 17. (Barrientos, 1997)

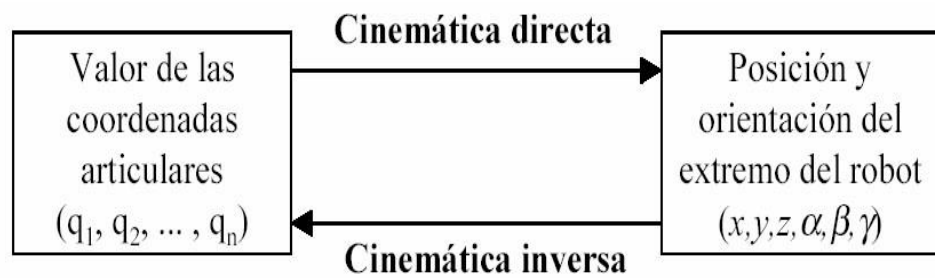


Figura 17 Organigrama de la relación de las cinemáticas directa e inversa.

Fuente: Antonio Barrientos, 1997

Además de considerar los puntos del actuador final, este sirve para ubicar los ángulos en dos formas de la posición de la articulación del brazo sea codo arriba o codo abajo, como apreciamos en la figura 18.

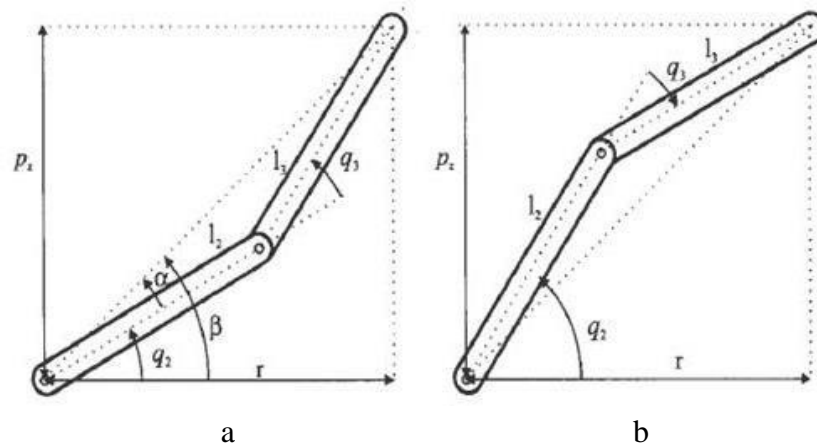


Figura 18 Máquina robotizada con 2 eslabones de la cinemática inversa, (a) robot planar codo abajo (b) robot planar de codo arriba.

Fuente: Antonio Barrientos, 1997

2.5. Dinámica del robot

Se enfoca en el estudio de las energías que originan el movimiento de las estructuras mecánicas del robot, como también en relación de la energía y el desplazamiento para cada uno de las piezas. Esta relación se logra construir mediante un modelo dinámico, donde se toman las siguientes características:

- La ubicación del robot definida por sus coordenadas en el espacio de trabajo de sus extremos o sus variables articulares, donde se tienen en cuenta sus velocidades.
- Estas energías que se ejercen en los dispositivos mecánicos y eslabones.

- Estos indicadores de las dimensiones o proporciones del brazo robótico como son: la longitud, masas e inercias de los elementos.

Para su debida adquisición del modelo dinámico del dispositivo mecánico o estructura, y en especial de la maquina robotizada, esta enfoca específicamente en establecer el equilibrio de energías empleando mediante la segunda ley de Newton o su equivalente para los desplazamientos rotacionales a través de la ley de Euler, a continuación, en las ecuaciones (2.10) y (2.11) se muestran las fuerzas establecidas en las articulaciones para el movimiento.

F= fuerza del cuerpo o articulación.

m= masa del eslabón o articulación.

V= velocidad de la articulación o eslabón.

T= torque del eslabón o articulación.

I= inercia del cuerpo.

W= trabajo del cuerpo.

$$\sum F = mV = \text{sumatoria de las fuerzas para el movimiento} \quad (2.10)$$

$$\sum T = Iw + w. (Iw) = \text{sumatoria del torque para el movimiento} \quad (2.11)$$

Partes:

- L = distancia del torque hasta el centro de la masa de la articulación.
- M = centro de masa de la articulación.
- θ = ángulo de giro con respecto de su eje de rotación.
- τ = Torque de rotación.

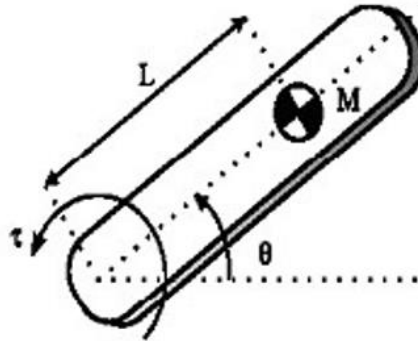


Figura 19 Modelo de eslabón con masa concentrada.

Fuente: Aníbal O. Baturone, 2007

2.6. Control cinemático

El objetivo fundamental de ambos modelos es el de poder establecer las adecuadas estrategias de control del robot que redunden en una mayor calidad de sus movimientos. (Barrientos, 1997)

El control cinemático permite establecer cuáles son los parámetros de trayectorias a lo largo del tiempo para obtener los objetivos trazados como son la (el punto del destino por el extremo final del robot, la trayectoria cartesiana, tiempo invertido por el usuario, etc.)

Estas trayectorias se seleccionarán atendiendo a las restricciones físicas propias de los accionamientos y a ciertos criterios de calidad de trayectorias, como suavidad o precisión de la misma como se puede observar en la figura 20 se detalla con claridad cada parte del diagrama de flujo. (Barrientos, 1997)

- Realizar la conversión de los detalles del desplazamiento a través de un algoritmo en el recorrido del plano cartesiano.
- Muestrear la trayectoria cartesiana para obtener una cierta cantidad de puntos que permitan muestrear las trayectorias en el plano cartesiano.
- Empleando la transformación homogénea inversa.
- Muestreo del recorrido articular para lograr referencias relativas con el control dinámico.

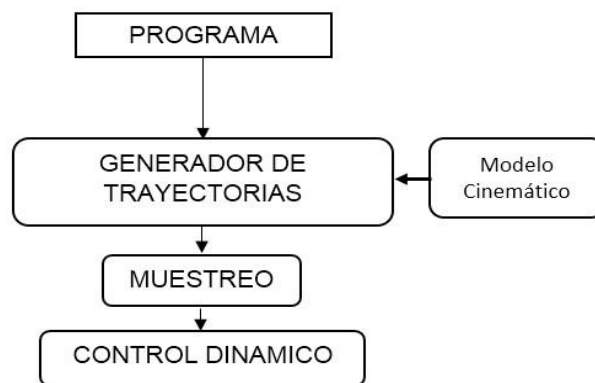


Figura 20 Organigrama funcional del algoritmo de trayectorias.

Fuente: Antonio Barrientos, 1997

2.7. Hardware libre

Es aquel hardware cuyo diseño es de libre restricción en su divulgación, comercialización y producción para el estudio, diseño, modificación, distribución, materialización y venta al público en general en su forma estándar para el conocimiento y aprendizaje del diseño que caracteriza al hardware. Un ejemplo de hardware libre es el Arduino, Raspberry pi, RepRap, etc. Estos entornos de desarrollo de licencia libre permiten a los diseñadores en tecnología poder rediseñar como crear nuevos métodos tecnológicos en las diferentes disciplinas de las ciencias aplicadas.

Otra de la replicación de hardware médico con código gratuito y abierto proporciona ahorros superiores al 90% del coste, lo que hace que el material médico y científico resulte mucho más accesible. (Banzi, 2005)

- **¿Qué es Arduino?**

Es una plataforma programable de procesamiento y control de datos, para el diseño de sistemas electrónicos de licencia libre, que se enfoca en la creación y mejoramiento de nuevas versiones en tecnologías digitales existentes o que están en desarrollo experimental. Arduino se puede utilizar para desarrollar elementos autónomos, conectándose a dispositivos e interactuar tanto con el hardware como con el software como se aprecia un modelo básico en la figura 21. (Banzi, 2005)



Figura 21 Arduino Uno R3, modelo básico de entrenamiento.

Fuente: Arduino, 2018

2.8. Programación de un robot

Un robot puede ser programado mediante dos formas, la primera de ellas se denomina guiado y la segunda es procedimiento textual, aunque en la actualidad hay robots que son programados por una conjugación de los dos métodos mencionados. (Barrientos, 1997)

Estos robots existentes, tienen una programación controlada, en donde la programación del robot se define, como el diseño de un controlador para controlar la conducta del robot y sus finalidades, además el realizar el proceso del diseño de su controlador se realiza utilizando los métodos anteriormente mencionados.

En la programación de un robot existen dos métodos muy importantes, que se muestran a continuación en un diagrama para ver las relevantes partes de una programación.

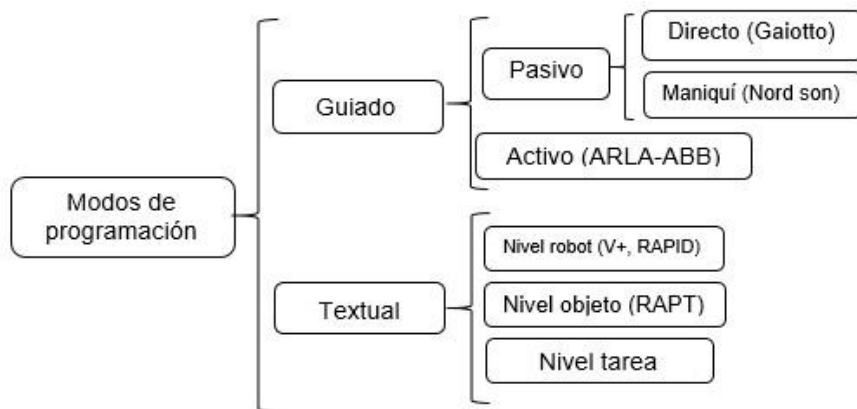


Figura 22 Métodos de programación de robots. Existen dos formas importantes

Fuente: Antonio Barrientos, 1997

2.9. Robots móviles

Los robots móviles se pueden definir como un sistema robotizado, que tiene las facultades de poder trabajar en ambientes amplios y de carecer de límites en su estructura mecánica, permitiéndoles trabajar con total libertad en áreas poco accesibles para el ser humano y en donde pueden realizar las tareas en forma autónoma o bajo el control de un operador humano.

2.9.1. Descripción de un robot móvil con ruedas

Las maquinas robotizadas terrestres se categorizan de acuerdo a la variante de estructura mecanizada que estas presentan como son: robots con patas, robots con orugas y robots con ruedas, donde la mayor parte de los trabajos de investigación se emplearon ampliamente las ruedas, porque este tipo de locomoción presenta mayor estabilidad a la hora de realizar acciones físicas de trabajo.

En esta parte de la definición del robot terrestre, se presentan diferentes características que conocer a fondo la locomoción del robot.

- Son más eficaces en el ahorro de energía, debido a que pueden desplazarse en una superficie liza y plana.
- Son muy requeridos en la industria por la velocidad de su producción y la robustez para el trabajo.
- Son muy prácticos para su construcción y requiere menor cantidad piezas y es muy económico para su implementación.
- El control de ruedas es más fácil de controlarlo.
- Presentan menos problemas de balance y equilibrio del cuerpo del robot a la hora de desplazarse.
- Presentan un bajo deterioro en el area de desplazamiento en semejanza con el beneficio de las orugas.

La localización de la maquina robotizada mostrada en la figura 23, se establece un sistema inercial arbitrario (I_1, I_2) que este fijo al plano de movimiento del robot móvil, mientras que el punto P es de referencia para el equilibrio del sistema mecánico del robot.

- I_1 = eje de referencia del plano bidimensional.
- I_2 = eje de referencia del plano bidimensional.
- x = coordenada del eje I_1 .
- y = coordenada del eje I_2 .
- P = punto de ubicación en el sistema de referencia.
- θ = ángulo de posición.
- X_m = eje del sistema de posición.
- Y_m = eje del sistema de posición.

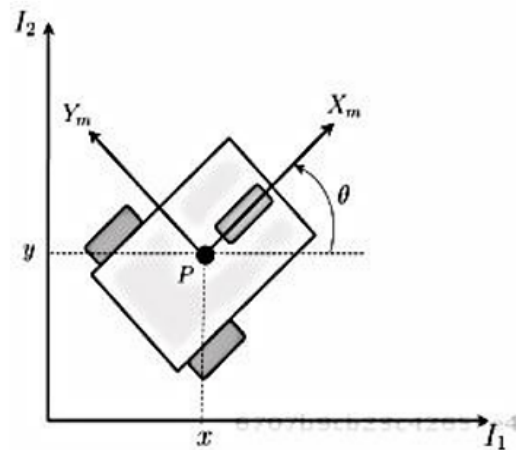


Figura 23 El plano de la posición del robot móvil.

Fuente: Fernando R. Cortez, 2014

En esta parte importante del plano de referencia del robot móvil, el punto (X_m, Y_m) se interpreta como la coordenada del equilibrio del robot móvil en referencia a la otra coordenada (x, y, θ).

En el plano (x, y) representa el punto P que se puede expresar como el vector:

$$\vec{OP} = x\vec{I}_1 + y\vec{I}_2 \quad (2.12)$$

Entonces el ángulo θ describe una orientación para el sistema (x_m, y_m) con respecto al sistema (I_1, I_2) , entonces por lo tanto la posición del robot puede ser determinada por la siguiente expresión.

$$\xi = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}_{3 \times 1} \quad (2.13)$$

Mientras la matriz de rotación que define a los dos sistemas esta dado por la siguiente ecuación.

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \sin\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (2.14)$$

2.9.2. Tipos de ruedas

Las maquinas robotizadas de ruedas emplean cuatro elementos de ruedas de locomoción que son los siguientes: omnidireccionales, usuales, tipo castor y ruedas locas, como manifiesto en la figura 24.



Figura 24 Tipos de ruedas

Fuente: Sotelo, V. R. B., Sánchez, J. R. G., & Ortigoza, R. S. (2007).

Las ruedas Omnidireccionales: Son los componentes principales para el desplazamiento del robot, cuyo desplazamiento se da sin la necesidad de rotar primero para ubicarse y cambiar de dirección, también el uso de estas ruedas permite encontrar la trayectoria deseada a través del desplazamiento y la rotación simultáneamente de esta forma podrá alcanzar el ángulo deseado en el plano indicado.

Las ruedas convencionales: Posibilitan el obtener movimientos omnidireccionales para cumplirse las posiciones del robot deseadas, además estas ruedas se clasifican de

acuerdo a la posición de los ejes de rotación respecto de la rueda, como manifiesto en la figura 25.

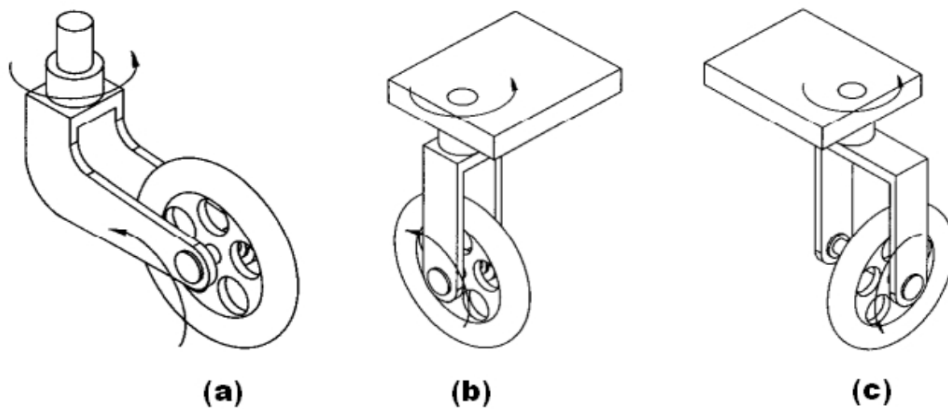


Figura 25 Diferentes elementos de ruedas deslizantes.

Fuente: Sotelo, V. R. B., Sánchez, J. R. G., & Ortigoza, R. S. (2007).

Las ruedas tipo Caster o giratorias: Es un tipo de rueda que permite una rodadura o desplazamiento del robot móvil en todas las direcciones posibles y que esta sujeta en la base de una plataforma para avanzar en toda dirección de desplazamiento.

Las ruedas de bolas: Es también llamada rueda-loca que sirve como un tercer punto de apoyo para la base del robot móvil de accionamiento diferencial y que evita que el robot este constantemente arrastrándose por el suelo.

2.9.3. Configuración de robots móviles

Actualmente existen una variada configuración cinemática para las maquinas robotizadas móviles con ruedas y partiendo de la aplicación que se les den hacia el enfoque, estas configuraciones se manifiestan de los siguientes tipos: Ackerman, triciclo clásico, tracción diferencial, skid steer, síncrona y tracción omnidireccional.

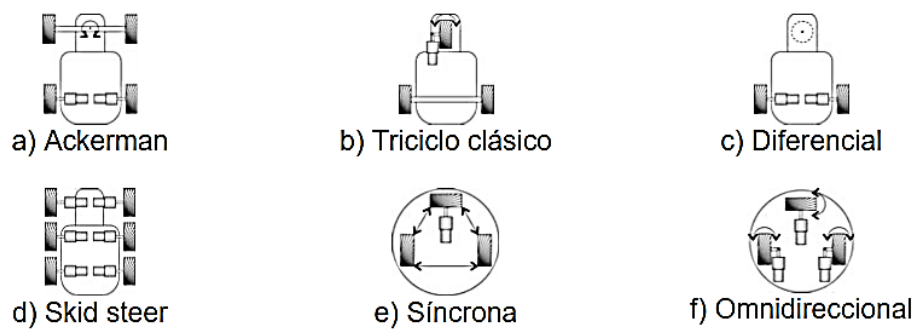


Figura 26 configuraciones para las maquinas robotizadas con ruedas.

Fuente: Sotelo, V. R. B., Sánchez, J. R. G., & Ortigoza, R. S. (2007).

Vayamos a la definición propia de cada tipo de locomoción estructural de los robots móviles.

- **Robots Móviles Omnidireccionales:** En esta clase de robot se tiene una libertad de rotación y movimientos sin las restricciones de reorientarse para avanzar en cualquier dirección posible, con esta característica tiene una mayor ventaja en las movilidades y desplazamientos en áreas cortas o grandes para desarrollar cualquier

trabajo.

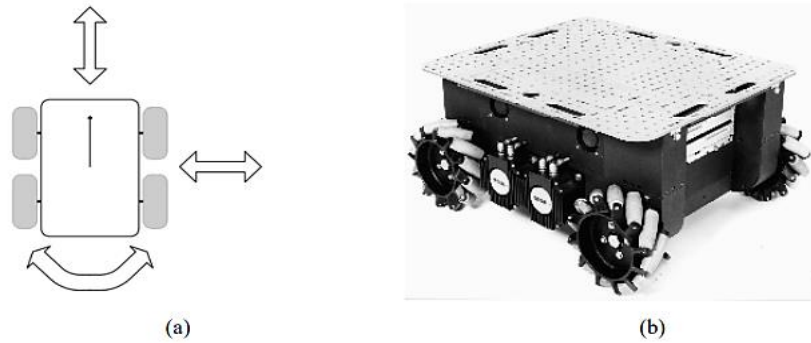


Figura 27 Ilustración de un robot omnidireccional con ruedas suecas.

Fuente: Bambino, I. (2008)

- Robots Móviles omnidireccionales con ruedas orientables centradas (síncronas):
Esta versión del robot puede realizar el cambio de su movimiento simplemente cambiando la orientación de las ruedas. Esta sincronización de movimientos se puede lograr mediante medios mecánicos, electrónicos, mediante señales de accionamiento simultaneas a partir de la electrónica.

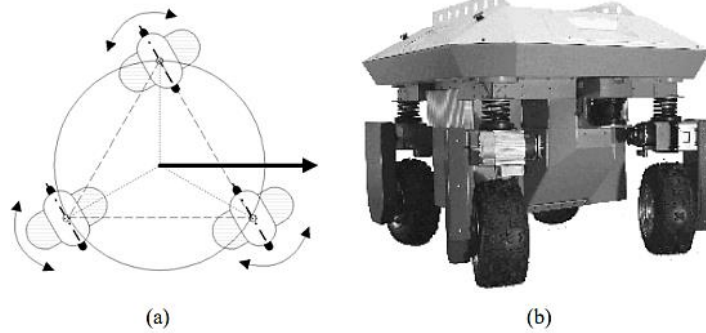


Figura 28 (a) se tiene el diagrama técnico de una maquina robotizada omnidireccional con llantas orientables centradas, (b) Robot Seekur

Fuente: Bambino, I. (2008)

- Robot Móvil Uniciclo: Es un robot de una estructura sencilla a la hora de realizar investigaciones de control, por su fácil implementación y su estabilidad, es un esqueleto mecánico que consta de dos llantas fijas posicionado sobre su mismo eje y tiene una llanta deslizante que le provee de estabilidad.

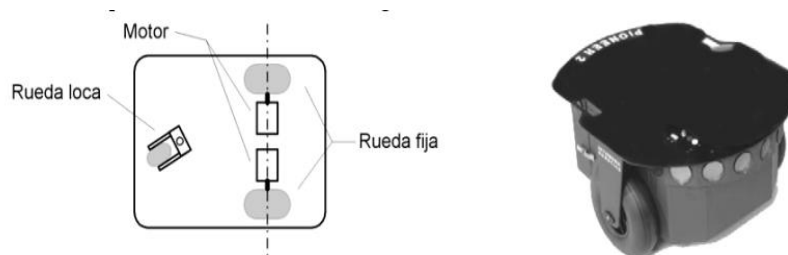


Figura 29 Uniciclo (a) esqueleto mecánico. (b) Maquina robotizada Pioneer (ActiveMedia)

Fuente: Bambino, I. (2008)

La organización de tracción-dirección asociados a la máquina robotizada permiten ser independiente las funciones de la velocidad lineal y la velocidad angular.

- Robot móvil triciclo clásico: El robot está conformado por dos llantas convencionales que están posicionadas sobre su mismo eje y una llanta convencional que posee las funciones de tracción y dirección, como se observa a continuación en la imagen (a) donde se puede observar el diagrama para esta configuración.

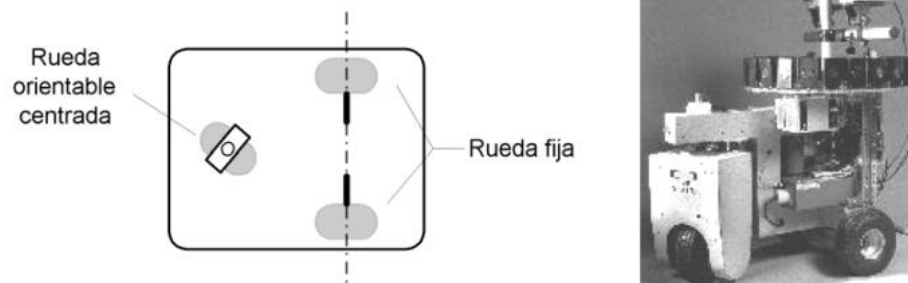


Figura 30 Triciclo. (a) esqueleto mecánico (b) máquina robotizada Neptune (Universidad Carnegie Mellon)

Fuente: Bambino, I. (2008)

En referencia al caso anterior del robot móvil, las estructuras mecánicas y electrónicas del control son sencillas y prácticas a la hora de realizar pruebas

experimentales de control. Además, esta configuración es ideal para aplicaciones industriales de carga, pero a baja velocidad.

- Robot móvil Cuatriciclo clásico: A diferencia del modelo de locomoción anterior este modelo presenta una estabilidad en las tracciones de las ruedas con respecto a su estabilidad a la hora del movimiento, de esta forma se puede estimar su posición a la hora del desplazamiento, esta configuración normalmente lo denominan (ACKERMAN) y se destacan por que poseen una mayor velocidad de desplazamiento y de desarrollar un monitoreo estable en áreas limitadas, además de presentar una locomoción más asequible para cualquier investigador.

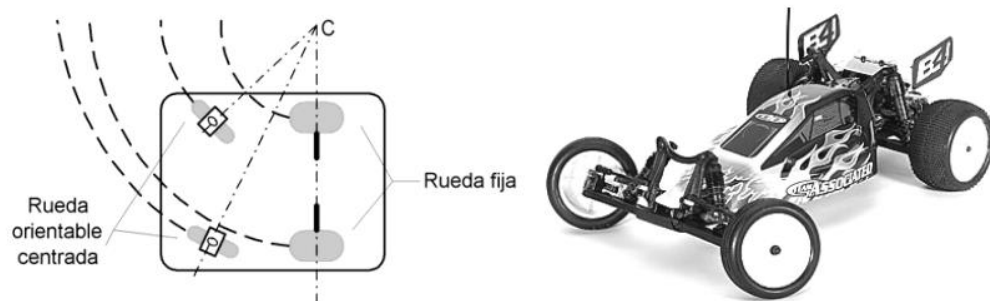


Figura 31 Sistema de dirección Ackerman

Fuente: Bambino, I. (2008)

2.10 Importancia en nuestra localidad

- En la actualidad la producción de los diferentes sectores de la industria en nuestra localidad está generando una mayor demanda con lo cual es necesario desarrollar herramientas de tecnología avanzada para lograr una mayor calidad y buena producción es por eso que la robótica es indispensable para el desarrollo.
- Desarrollar un prototipo de brazo robótico móvil permitiría tener una herramienta interactiva para mejorar la investigación y la educación en nuestra localidad.
- El prototipo de brazo robótico móvil permitiría tener una herramienta para desarrollar nuevos métodos de control para el desarrollo de algoritmos y tener investigaciones en temas de aplicaciones reales.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y METODOS

3.1. Diagrama de procesos

Como en cualquier trabajo de investigación realizado en la disciplina de la robotica, se desarrolla la elaboración y la manipulación de la maquina robotizada, definiendo primeramente a través de un diagrama el sistema electrónico del brazo robótico, este diagrama define claramente los subsistemas electrónicos que den control del brazo robótico, observemos en la figura 32.

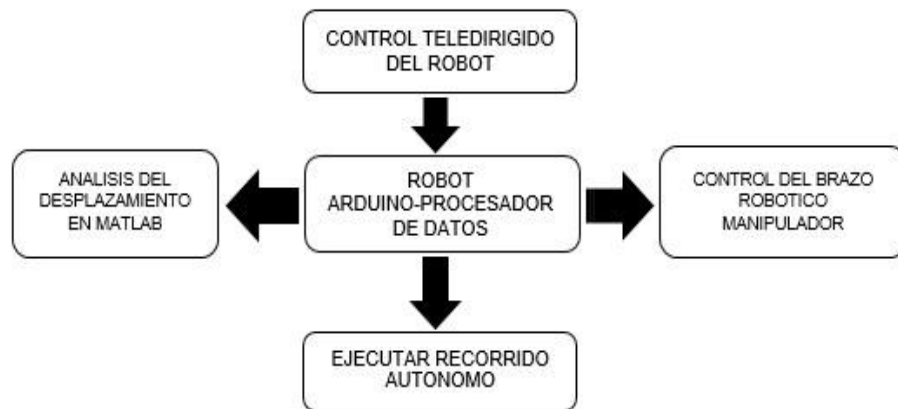


Figura 32 Organigrama de la elaboración para la manipulación del manipulador móvil.

Este esquema de procesos tiene como finalidad explicar la distribución del hardware sobre el control de las articulaciones a partir del procesador principal

(Arduino Mega 2560) que realiza la distribución de las tareas para el control de las articulaciones del robot, partiendo por los materiales para su construcción.

3.1.1. Materiales para la etapa de movimiento

En esta parte importante de la construcción primeramente se tiene que tomar en cuenta los materiales a utilizarse en la construcción del prototipo para el control del sistema general del robot mencionando las piezas más fundamentales para parte:

- *Procesador del sistema electrónico del robot.*



Figura 33 Plataforma de hardware libre (Arduino mega 2560).

- *Resistencias y pines*

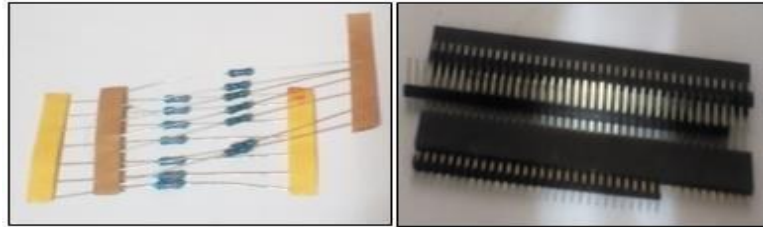


Figura 34 Izquierda, resistencias de precisión. Derecha, Pines de conexión.

- *Condensadores electrolíticos y cerámicos*

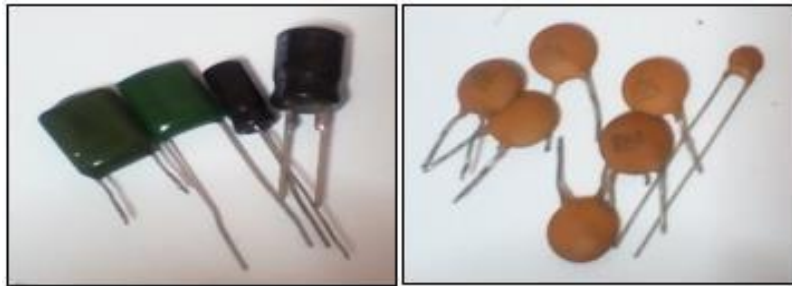


Figura 35 Izquierda, condensadores electrolíticos. Derecha, condensadores cerámicos

- *Placas PCB y leds de iluminación*

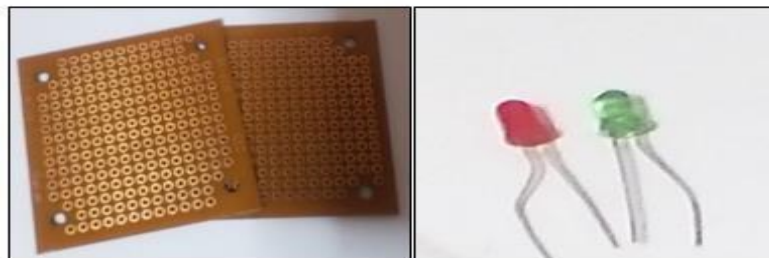


Figura 36 Izquierda, Placas PCB. Derecha, leds de iluminación

- *Placas de triplay de madera.*



Figura 37 Placas de triplay de madera para la base móvil.

- *Chasis móvil del manipulador robótico*

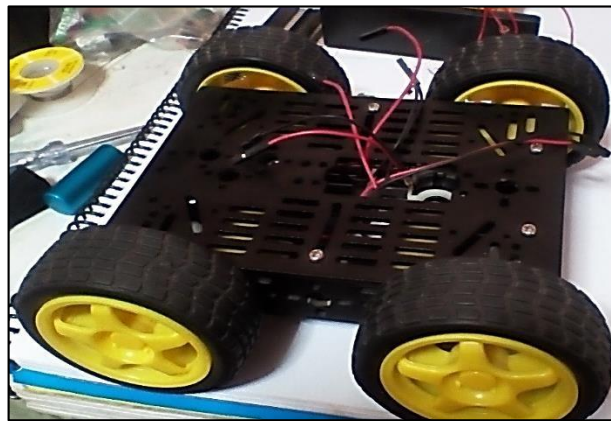


Figura 38 chasis móvil del manipulador robótico para el desplazamiento.

- *Manipulador de 3 eslabones con la base móvil*

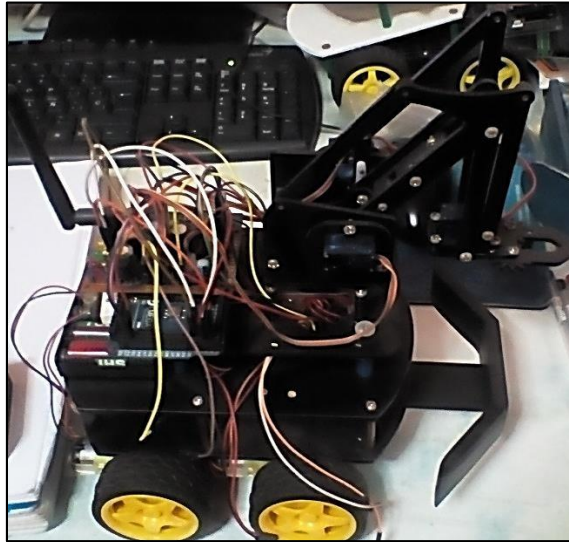


Figura 39 Manipulador de 3 eslabones con la base móvil.

- *Tarjeta de control de potencia*

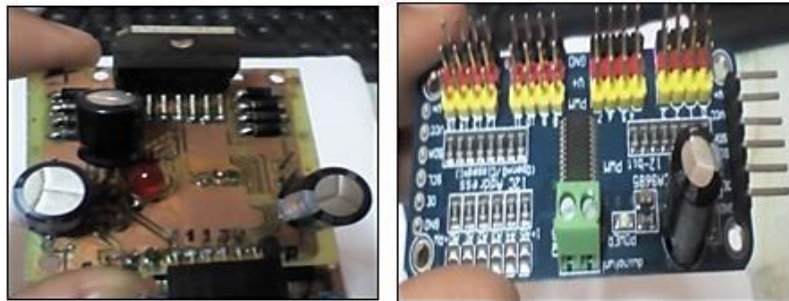


Figura 40 Izquierda, tarjeta de control para motores dc. Derecha, tarjeta de control para servomotores

3.1.2. Materiales para la etapa de comunicación (Radio frecuencia receptor)

La antena de comunicación empleada es ideal para dispositivos de radio control para el libre trabajo a campo abierto tiene un alcance hasta 1km de radio de comunicación además trabaja a una banda libre en comunicación abierta ideal para el manipulador teledirigido, como se observa en la figura 38 la antena tiene un chip controlador y una antena incorporada para que el nivel de frecuencia alcance más rápidamente.

- *Antena de comunicación (NRF24L01)*



Figura 41 Antena inalámbrica de comunicación NRF24L01.

3.1.3. Materiales para la etapa de comunicación inalámbrica (Radio frecuencia emisor)

A continuación, en la figura 39 se visualiza la fase del radio control terminado con todas las piezas montadas para realizar una comunicación ideal para el manejo inalámbrico a distancias con el prototipo de brazo robótico, además posee una antena NRF24L01 para la comunicación y tiene una alimentación de 9v para todo el sistema.

- *Control remoto a distancia con antena (NRF24L01)*



Figura 42 Control inalámbrico a distancia con la antena (NRF24L01).

- *Pulsadores y cables de conexión*

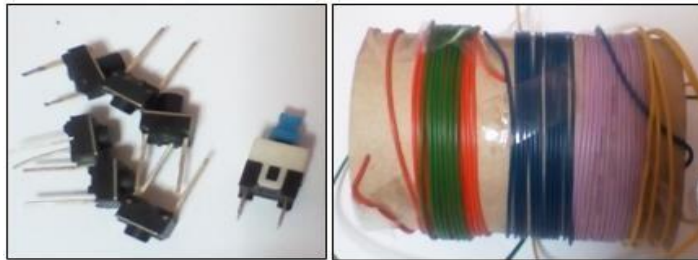


Figura 43 Izquierda, pulsadores de contacto. Derecha, cable unipolar

- *Porta pilas y el Arduino nano*

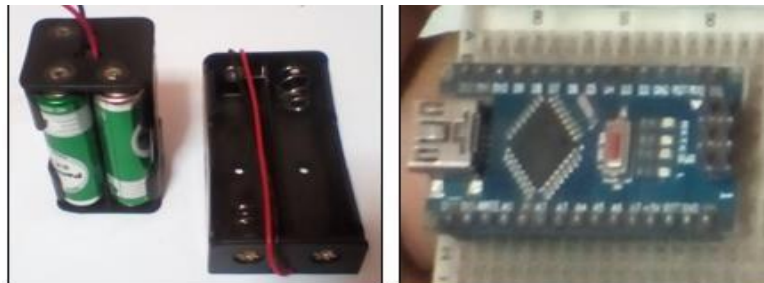


Figura 44 Izquierda, porta pilas. Derecha, Arduino nano

3.2. Diagrama de procesos de actividades para la implementación

Todos los procedimientos llevados a cabo para implementar se realizaron partiendo de un diseño estándar de la morfología del robot (antropomórfico). Este modelo Mearm que es un diseño mecánico que está habilitado como un modelo libre para la disponibilidad de los investigadores y programadores, además de disponer los planos para la implementación libre en el internet.

La estructura del brazo robótico es un modelo libre, pero exceptuando el diseño de la base móvil, que es un diseño propio del autor de este trabajo de investigación. En los procedimientos posteriores en el diagrama se muestra los pasos de implementación y las evaluaciones del rendimiento de cada uno de los dispositivos en el control de la figura 45.

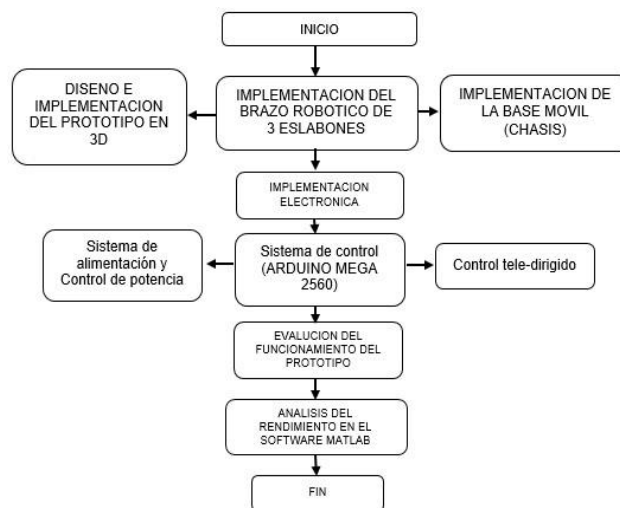


Figura 45 Organigrama, para las etapas de la implementación del proyecto.

3.3. Descripción de los procesos de la construcción del brazo robótico

Para realizar una implementación correcta en el prototipo se tiene que tomar los siguientes datos importantes para realizar una debida implementación:

- Montaje del prototipo robótico y definición de sus medidas de su estructura.
- Establecer las dimensiones del área de trabajo para desarrollar el modelo matemático que determine su desplazamiento coordinado.
- Programar el modelo matemático en el hardware libre.
- Desarrollo del análisis de la cinemática del robot en el software.

3.3.1. Método de recolección de datos-Análisis de la estructura

Para realizar una demostración práctica y experimental, este robot tiene una estructura antropomórfica cuya característica es de poseer articulaciones rotacionales a partir en la base móvil donde le permite tener una orientación y traslación a través del espacio geométrico como se observa en la figura 46. Esta parte es fundamental ya que el modelo “Mearm” está diseñado sobre dos eslabones en la base para lograr tener un mayor alcance del efector final sobre el borde de la línea del área de labor.



Figura 46 Robot antropomórfico que define el tipo de morfología.

Fuente: Fernando Reyes Cortés, 2015

Se analiza en 3D las articulaciones o eslabones del robot, comenzando del diagrama del cuerpo libre en un robot de 4 g.d.l. se toma como referencias las características físicas de los eslabones y la articulación completa del robot, mediante la dinámica de control se puede ubicar los puntos de estabilidad tomando como referencia la fuerza, velocidad, inercia y fuerzas adicionales que se aplican durante el trabajo del robot en el efector final (pinza de agarre).

Este método de análisis permite estudiar los fenómenos físicos que tiene la articulación del robot durante el área de labor en la figura 47 se menciona el bosquejo del análisis físico del robot.

El ángulo del efector final solo es una referencia, más no un ángulo principal para el modelo geométrico.

De esta forma se reduce el cálculo de 4 incógnitas a solo tres: q_1, q_2, q_3 esta estructura le permite tener al brazo robot antropomórfico mayor estabilidad para distribuir tanto las fuerzas que ejerce como los pesos que le son ejercidos para realizar pruebas experimentales en el laboratorio, a continuación hago mención en la figura 48 para visualizar el cálculo cinemático de la estructura.

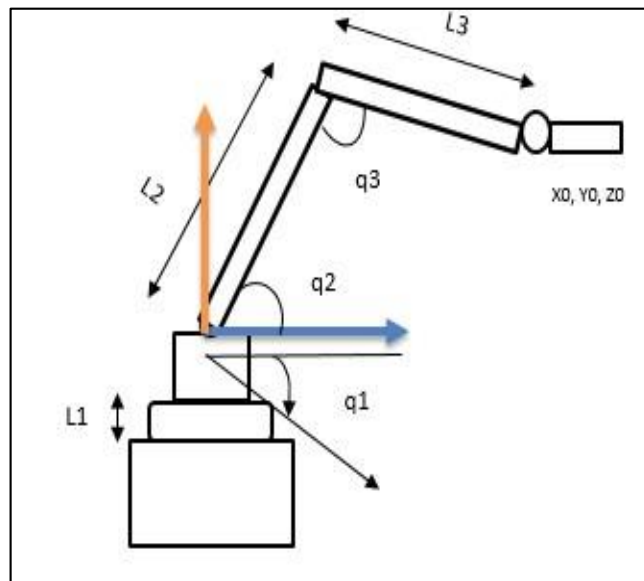


Figura 48 Variables para el cálculo del modelo de cinemática inversa del robot “Mearm” (configuración antropomórfica).

Entonces en la siguiente Figura 49 se muestra los principales triángulos formados a partir de los ejes de rotación de los servos permitiendo tener la formación de los tres principales ángulos q_1, q_2, q_3 .

Que nos permitirá obtener mediante procedimiento matemático los ángulos para el desplazamiento del brazo robótico y la composición para el modelo cinemático inverso a través del modelo geométrico espacial para cada eslabón de los dispositivos mecánicos del manipulador robótico.

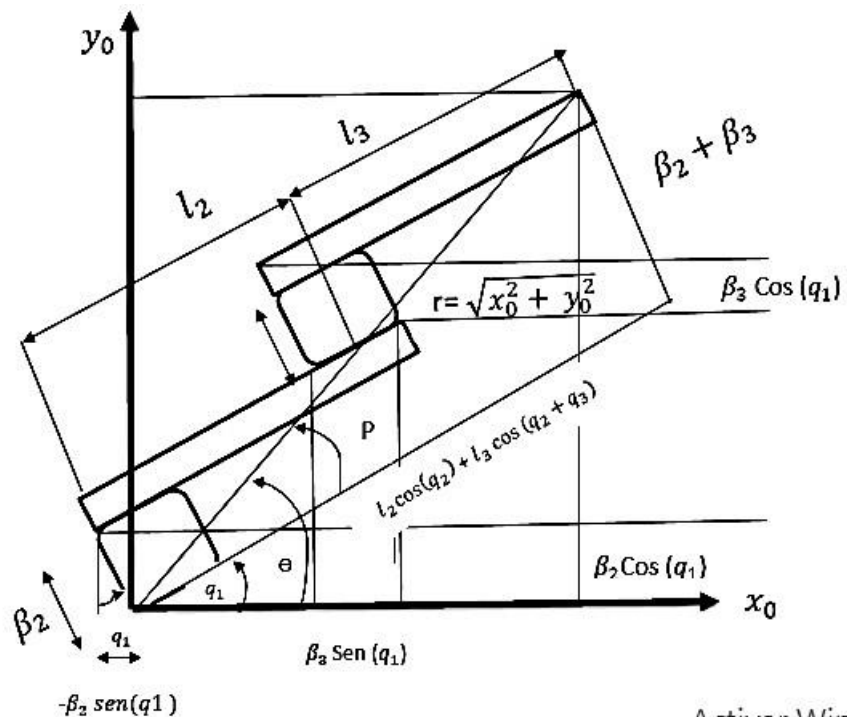


Figura 49 Técnica geométrica del manipulador robótico “Mearm” de tres eslabones, configuración antropomórfica.

A continuación, se realiza el procedimiento para encontrar los tres ángulos para el modelo cinemático inverso del robot.

$$\theta = \rho + q_1 \quad (3)$$

Del pequeño triángulo se obtiene los catetos para los valores del ρ :

$$\rho = \text{atan}\left(\frac{\beta_2 + \beta_3}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 - (\beta_2 + \beta_3)^2}}\right) \quad (3.1)$$

Reemplazando las variables por las ecuaciones (3) y (3.1) en (3.2):

$$q_1 = \theta - \rho \quad (3.2)$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{y_0}{x_0}\right) \quad (3.3)$$

Teniendo como resultado el primer ángulo de giro para la base.

$$q_1 = \text{atan}\left(\frac{y_0}{x_0}\right) - \text{atan}\left(\frac{\beta_2 + \beta_3}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 - (\beta_2 + \beta_3)^2}}\right) \quad (3.4)$$

La estructura geométrica del robot antropomórfico, le permite reconocer la orientación y posición en su sistema de referencia el desplazamiento y ubicación de posición dentro de su espacio de trabajo.

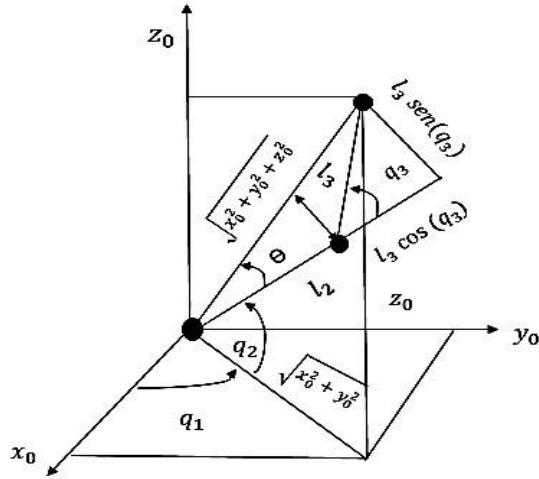


Figura 50 Método geométrico del modelo cinemático inverso.

Las ecuaciones (3.5) y (3.6) forman los triángulos para la ubicación de los demás ángulos.

$$r^2 = x_0^2 + y_0^2 \quad (3.5)$$

$$x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 = [l_2 + l_3 \cos(q_3)]^2 + l_3^2 \text{sen}^2(q_3) \quad (3.6)$$

$$x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 = l_2^2 + l_3^2 [\cos^2(q_3) + \text{sen}^2(q_3)] + 2l_2 l_3 \cos(q_3) \quad (3.7)$$

$$x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2l_2 l_3 \cos(q_3) \quad (3.8)$$

$$\cos(q_3) = \frac{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3} \quad (3.9)$$

$$\text{sen}(q_3) = \sqrt{1 - \left[\frac{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}{2l_2 l_3} \right]^2} \quad (3.10)$$

$$q_3 = \text{atan} \left(\frac{\sqrt{1 - \left[\frac{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}{2l_2 l_3} \right]^2}}{\frac{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3}} \right) \quad (3.11)$$

Ahora para encontrar el valor de q_2 : tomando la tangente de los ángulos $\theta + q_2$

$$\tan(\theta + q_2) = \frac{\tan(q_2) + \tan\theta}{1 - \tan(q_2)\tan\theta} = \frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \quad (3.12)$$

$$\tan(\theta) = \frac{l_3 \sin(q_3)}{l_2 + l_3 \sin(q_3)} \quad (3.13)$$

$$\tan(q_2) + \tan\theta = \frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} - \frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \tan(q_2)\tan(\theta) \quad (3.14)$$

$$\tan(q_2) \left[1 + \frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \tan(\theta) \right] = \frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} - \tan(\theta) \quad (3.15)$$

$$\tan(q_2) = \frac{\frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} - \tan\theta}{\left[1 + \frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \tan(\theta) \right]} = \frac{\frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} - \frac{l_3 \sin(q_3)}{l_2 + l_3 \cos(q_3)}}{1 + \frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \frac{l_3 \sin(q_3)}{l_2 + l_3 \cos(q_3)}} \quad (3.16)$$

$$\tan(q_2) = \frac{[l_2 + l_3 \cos(q_3)]z_0 - l_3 \sin(q_3) \sqrt{x_0^2 + y_0^2}}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2} [l_2 + l_3 \cos(q_3)] + z_0 l_3 \sin(q_3)} \quad (3.17)$$

Después de despejar las ecuaciones anteriores se obtienen los tres ángulos de giro, permitiendo utilizar estos datos en la programación, para la manipulación del brazo robótico antropomórfico.

q_1 = Angulo del primer eslabón con respecto a la base móvil.

q_2 = Angulo del segundo eslabón con respecto a la base móvil.

q_3 = Angulo del tercer eslabón con respecto a la base móvil.

$$q_1 = \text{atan} \left(\frac{y_0}{x_0} \right) - \text{atan} \left(\frac{\beta_2 + \beta_3}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 - (\beta_2 + \beta_3)^2}} \right) \quad (3.18)$$

$$q_2 = \text{atan} \left(\frac{[l_2 + l_3 \cos(q_3)]z_0 - l_3 \sin(q_3) \sqrt{x_0^2 + y_0^2}}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2} [l_2 + l_3 \cos(q_3)] + z_0 l_3 \sin(q_3)} \right) \quad (3.19)$$

$$q_3 = \text{atan} \left(\frac{\sqrt{(2l_2 l_3)^2 - [x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - l_2^2 - l_3^2]^2}}{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - l_2^2 - l_3^2} \right) \quad (3.20)$$

3.3.2. Montaje del esqueleto robótico

En el esqueleto cinemático robótico se tiene las siguientes medidas establecidas de cada articulación que son fundamentales para la implementación estas son las siguientes:

- Garra o pinza de agarre (Gripper Point): L3b=2cm.
- Hombro de pivote (Shoulder Pivot): L3a=2cm.
- Antebrazo (Forearm): L2=12cm.
- Parte superior del brazo (Upper Arm): L1=10cm.
- Base del brazo: B=6,5cm.

Esta estructura antropomórfica permite su configuración una mayor libertad del desplazamiento en su área de trabajo adecuándose a cualquier tipo de configuración matemática para los movimientos, en la actualidad este modelo antropomórfico es una estructura que dispone de mayor cantidad de grados de libertad para pruebas experimentales.

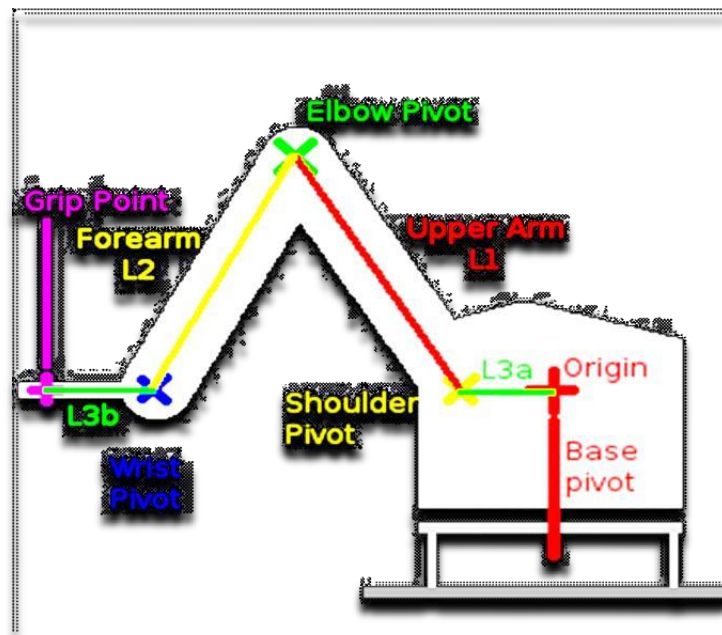


Figura 51 Distribución de las medidas del robot “MeArm”.

Fuente: Recuperado del sitio web:(<https://www.instructables.com/id/MeArmColor-Chip-Sorter/>, 2019)

En la siguiente figura 52 se tiene la configuración de la última coordenada que permitirá la ubicación en el área de trabajo mediante el cálculo geométrico, este punto P (X_0, Y_0, Z_0) nos indica la última posición de referencia que adoptará en el plano 3D, mediante el cual se podrá determinar los giros del manipulador robótico.

Es importante considerar que la gráfica señala las medidas a tomarse para la elaboración, construcción del brazo robótico y tener el modelo matemático definido.

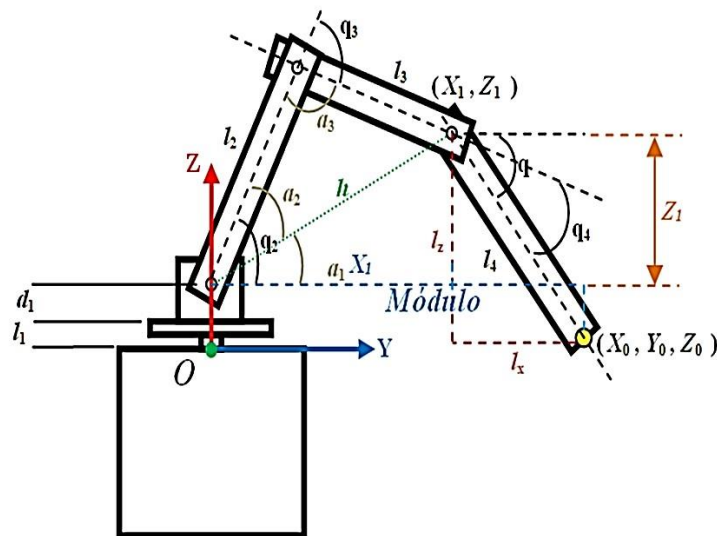


Figura 52 Cinemática directa del robot utilizando el método geométrico.

Fuente: Fernando Hermosilla, 2016

Este modelo implementado se llama “Mearm” es un módulo experimental de desarrollo educativo y de investigación con licencia libre para la finalidad de desarrollar una herramienta interactiva para lograr educar y formar investigadores en el área de la robótica. Además de ser un medio económico este prototipo está compuesto por 4 servomotores, una base rotacional, el codo, antebrazo y la muñeca (pinza de aguarre), posee una configuración antropomórfica que le permite desplazarse en forma continua bajo un ángulo de 180° y está diseñado de un material flexible (acrílico) para la movilidad de los dispositivos mecánicos, a continuación, visualizamos la figura 53, del acabado del prototipo del manipulador robótico.

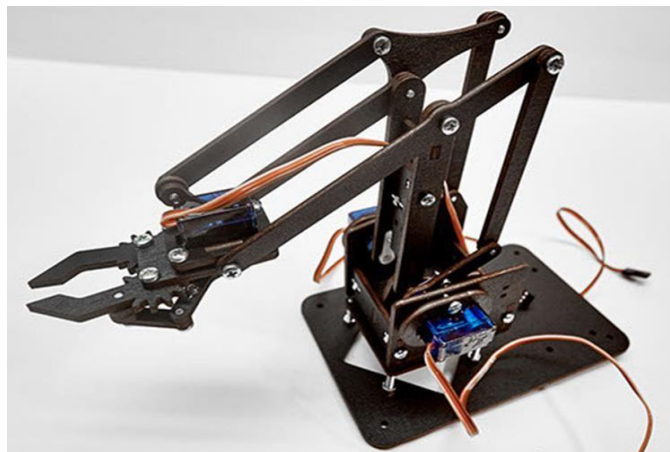


Figura 53 Aspecto físico del prototipo comercial modelo Mearm de 4 g.d.l. como herramienta interactiva de desarrollo de educación e investigación.

Fuente: Recuperado del sitio web:(<https://www.instructables.com/id/MeArmColor-Chip-Sorter/>, 2019)

3.3.3. Montaje del área de trabajo para la ubicación de las coordenadas

Para realizar las coordenadas de la programación en el prototipo primero se ensayó los movimientos a través de una hoja cuadriculada con una referencia exacta del desplazamiento del prototipo y de las articulaciones, este procedimiento ayudara a configurar mejor la programación en cuanto a las coordenadas de control y el desplazamiento, figura 54.

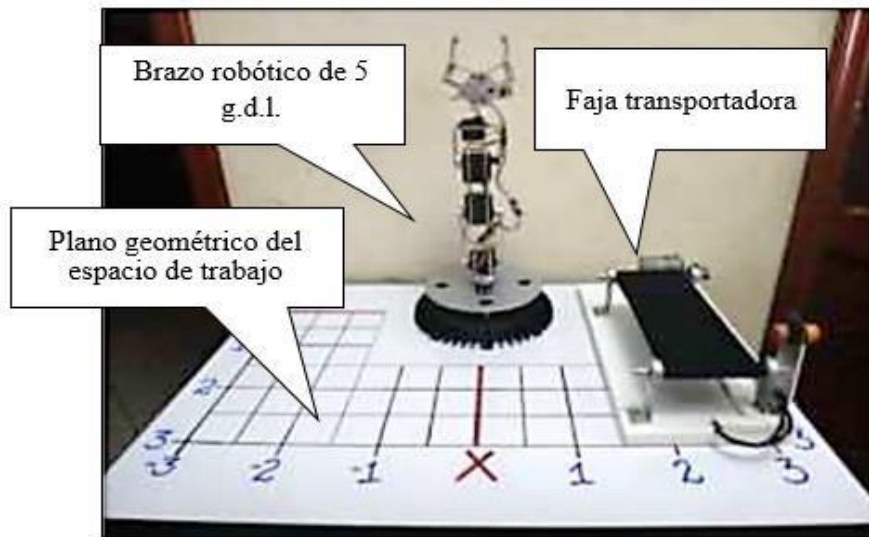


Figura 54 Plano de trabajo en referencia a las posiciones de los servos.

Fuente: Giovanni Salazar Patín, 2015

Contando con los ejes de giro ya definidos para el manipulador, se describió el área labor. Donde las delimitaciones del perímetro de la zona del movimiento de la

estructura mecánica del manipulador se establecen a partir del eslabón de rotación (q_1), mostrando en la figura 55.

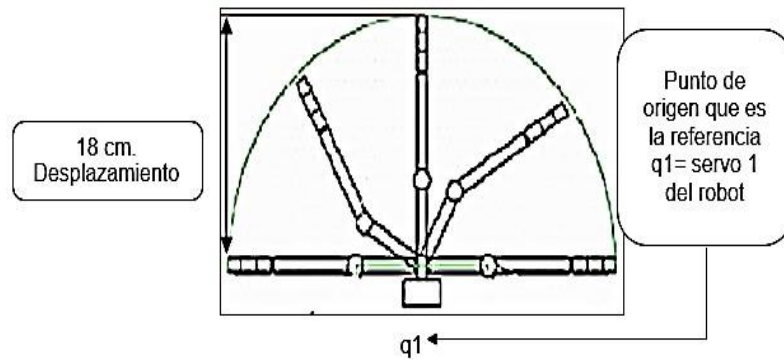


Figura 55 Diagrama de las articulaciones y sus movimientos en su área de trabajo.

Fuente: Giovanni Salazar Patín, 2015

3.3.4. Método del diseño de las piezas asistido por impresión laser

En la práctica del diseño por computadora tenemos dos maneras de elaborar las piezas mecánicas para el prototipo.

- Elaboración por corte laser (CNC).
- Elaboración de las piezas mediante impresión en 3D.

Se utilizó el método del corte por láser para el respectivo diseño de cada uno de las piezas del robot, así como también, pude seleccionar adecuadamente el tipo de material para su elaboración de las piezas, en el trabajo del prototipo del brazo robótico fue construido con material “blando” que es el acrílico que por razones de fácil corte y elaboración se optó este tipo de material.

En esta parte fundamental del trabajo se adquirió la compra del prototipo del brazo robótico por la fácil implementación y tiene un costo muy por debajo de cualquier módulo de laboratorio de robótica haciendo su fácil programación e investigación para futuros trabajos.

Un detalle importante es que el modelo “Mearm” tiene un diseño libre de construcción que se pueden adquirir y modificar de acuerdo al investigador utilizando sus planos a libre disposición y que serán mencionados en la bibliografía para poder descargar, como se observa en la figura 56. visualizo todas las piezas compuestas que conforman la estructura del manipulador.

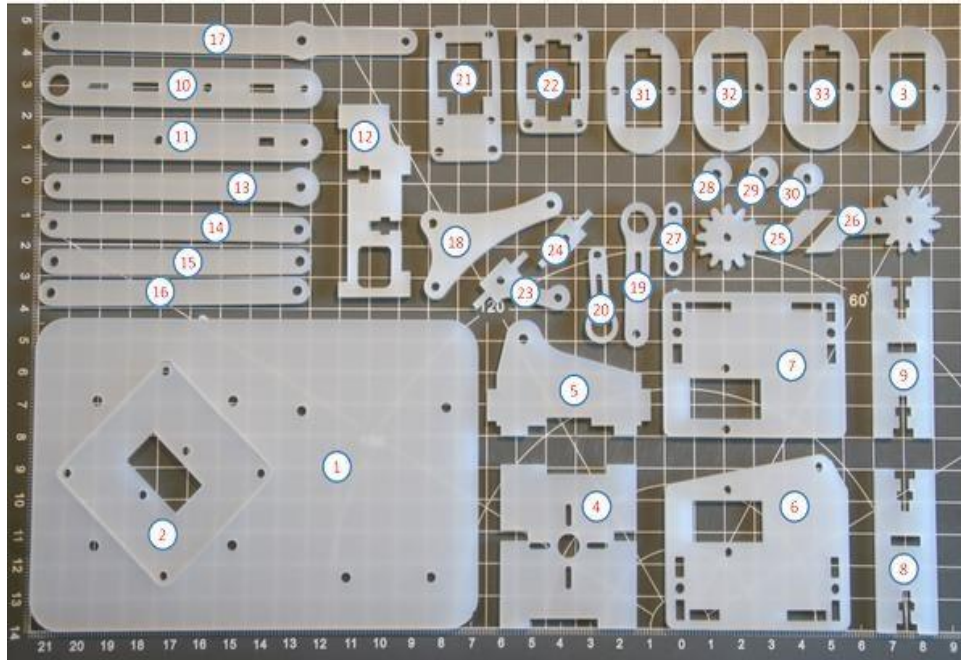


Figura 56 Piezas diseñadas en 3D asistido por impresora láser (CNC).

Fuente: *boxtec.ch*, 2018

El diseño presentado en la figura 57, se diseñó a medida de la base móvil del robot que es un complemento a este trabajo con la finalidad de dar una dinámica interesante para una aplicación como módulo de entrenamiento.

Además de tener otra base que es el punto inicial, por donde tiene el punto de origen del brazo robot en referencia a las coordenadas geométricas, esta articulación puede desplazarse a un Angulo máximo de 180°

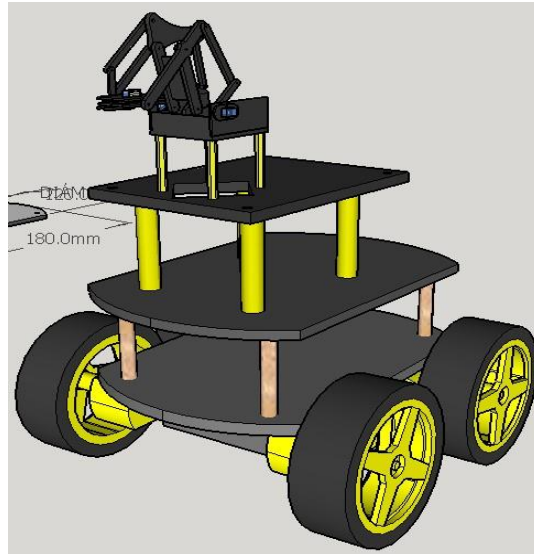


Figura 57 Implementación final del diseño 3D en el software SketchUP.

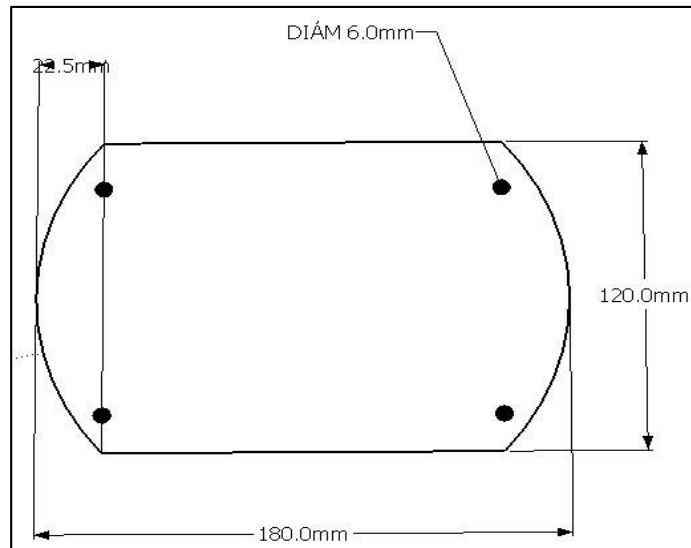


Figura 58 Planos de la base móvil del brazo robótico.

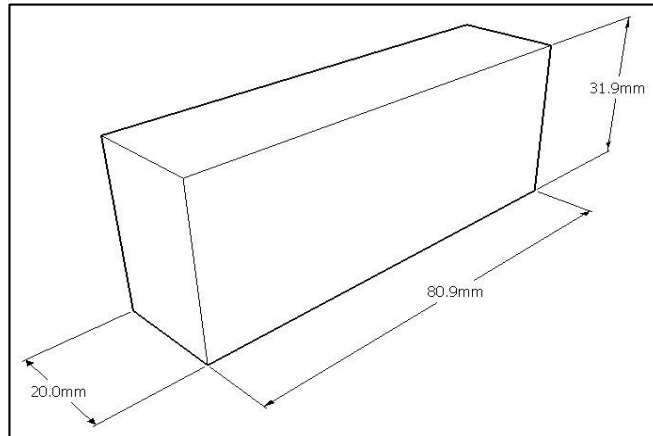


Figura 59 Soporte Inferior de la base utilizada para el acople de los motores DC.

En esta parte del diseño se elaboró con material de madera que ayuda a diseñar nuestras piezas del brazo robótico, con más detalles en su elaboración y todas las respectivas medidas de las piezas se encuentran en los anexos de este trabajo, ver figura 60.

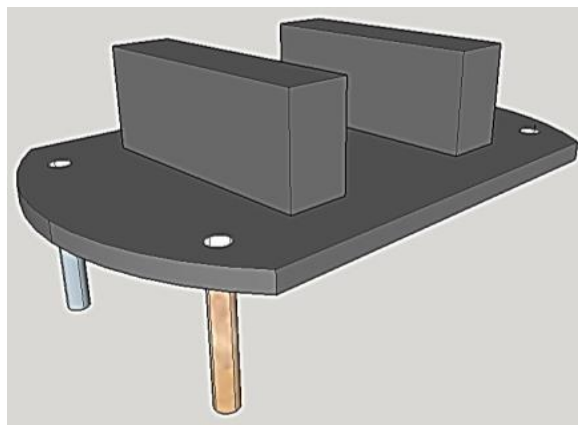


Figura 60 Implementación de la base móvil del brazo robótico parte inferior.

3.4. Método para la programación del control brazo robótico.

La cinemática inversa empleada en el desplazamiento del robot solo se centra en la movilidad de las articulaciones y el orden teledirigido hacia el robot tomando en cuenta la dinámica del robot y el control cinemático del prototipo, pero no enfocándose en la parte del control dinámico ya que el asunto se enfoca en el conocimiento del diseño exclusivo del prototipo propio, en el modelo del presente prototipo solo centro en implementar un modelo diseñado y en forma libre de su construcción.

Para lo cual si se requiere implementar un modelo nuevo se tiene que pasar por los siguientes pasos de estudio para perfeccionar la construcción y la programación correcta para un estudio mayor además de programar de acuerdo a las necesidades de la aplicación, ver figura 61.

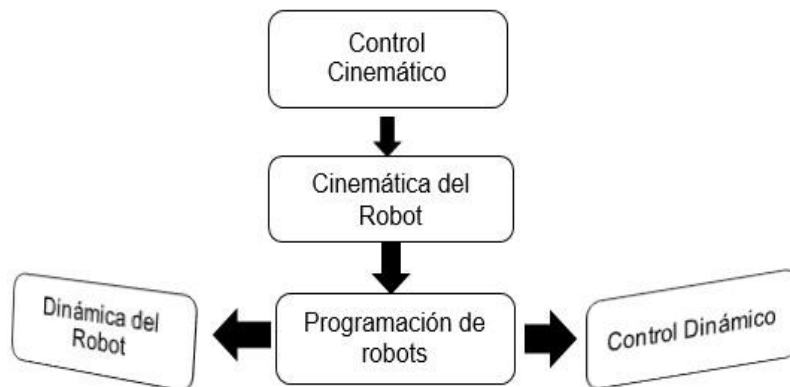


Figura 61 Esquema general para realizar un algoritmo de acuerdo al diseño de un prototipo.

La programación tiene dos tipos de desarrollo:

- Programación por guiado básico

Se utilizó el método de la programación por guiado básico para la configuración del método geométrico de las articulaciones y tener un cálculo de los puntos del desplazamiento en su entorno de trabajo definiendo trayectorias mediante el modelo cinemático inverso.

- Programación por guiado extendido

En el contexto de la programación se ejecuta mediante el mando para el control implementado en enviar coordenadas en tiempo real para la ubicación espacial del robot y tener un control completo del sistema, además de poder controlar directamente la energía y fuerzas de las articulaciones, estos métodos presentados son con referencia al control manual del robot y donde se pueden configurar y predeterminar una trayectoria definida sin la necesidad de controlarlo manualmente, cada coordenada en el espacio es interpretado por el procesador y esta ejecuta de manera secuencial cada proceso generando una programación básica del robot.

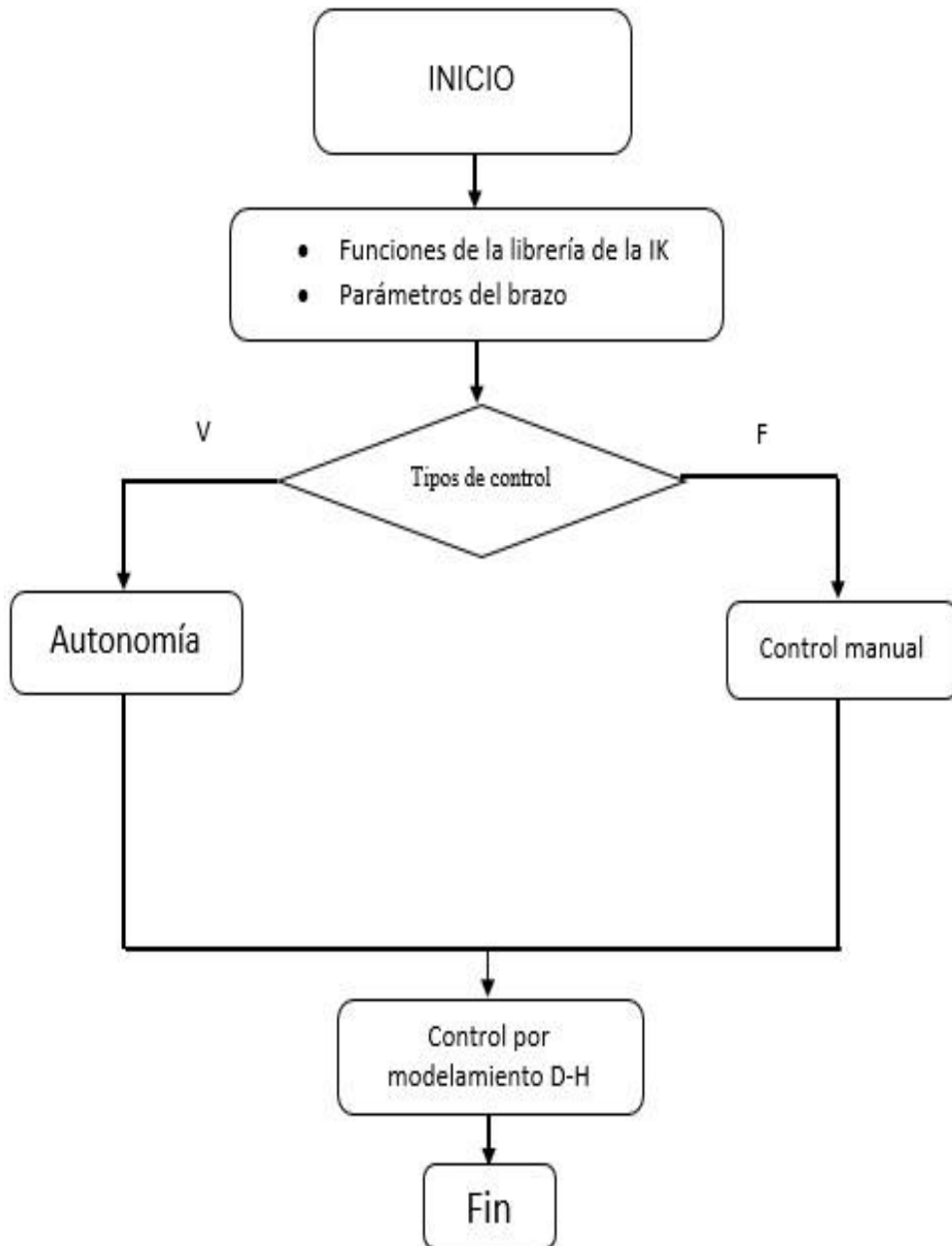


Figura 62 Organigrama para la elaboración del programa para la manipulación de la maquina robotizada.

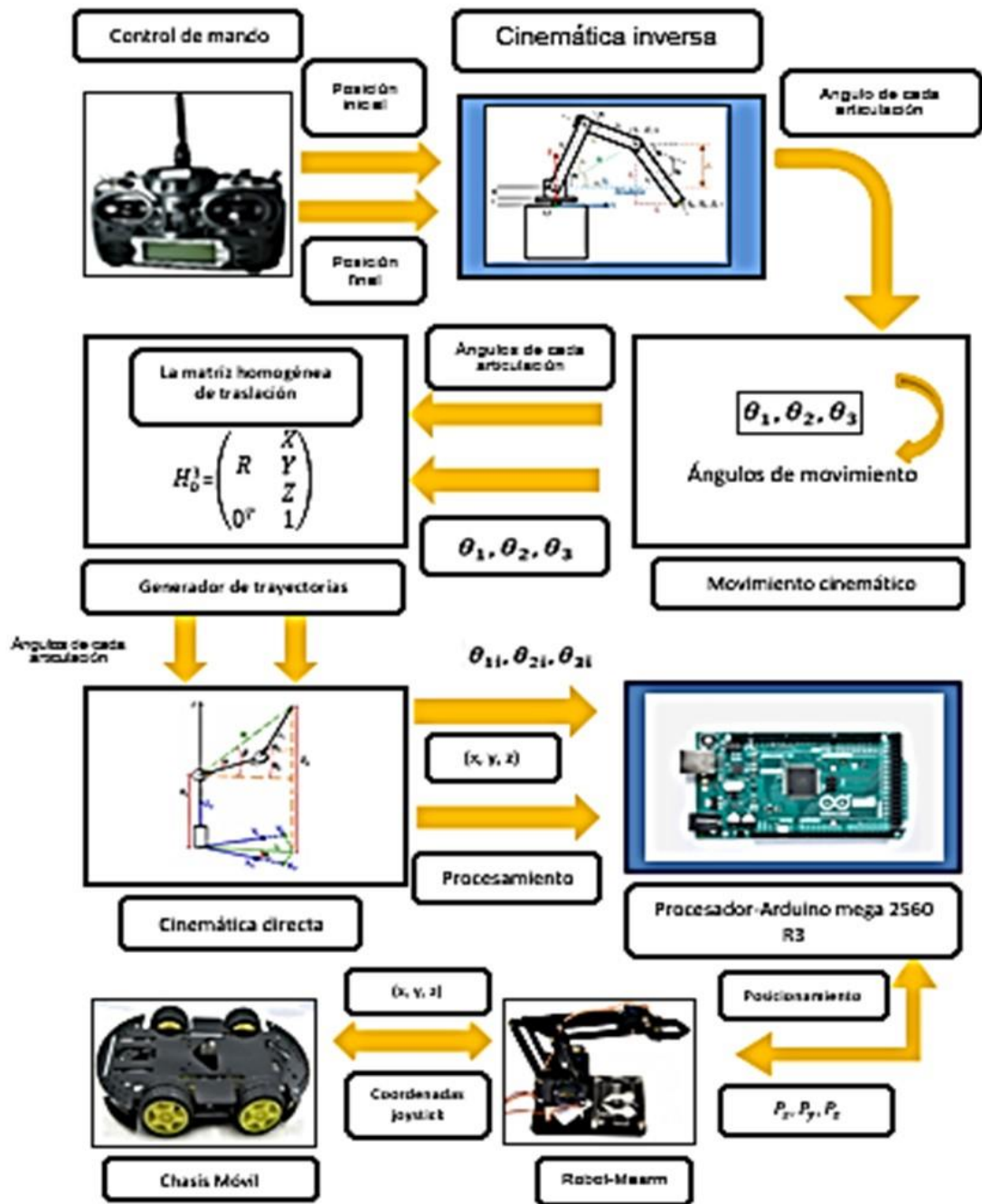


Figura 63 Organigramma implementado del control de movimiento en Arduino.

3.5. Elaboración del brazo robótico

Consiste en la elaboración brazo robot móvil, basado en la nueva tecnología de hardware libre Arduino Mega 2560. Para comenzar, se presenta el diseño de la parte mecánica del sistema robótico y posteriormente los pasos de la implementación del sistema electrónico empleando el hardware libre.

El esqueleto del proyecto está formado por los siguientes sistemas:

- Estructura mecánica del brazo robot.
- Estructura de control.
- Estructura para la comunicación.
- Estructura para el control de potencia / alimentación.

Modelo cinemático del brazo robótico utilizando el método geométrico y los parámetros Denavit-Hartenberg.

3.6. Construcción del sistema mecánica del brazo robot

3.6.1. Construcción básica inicial.

El sistema con lleva dos periodos. La primera etapa consiste en el diseño básico de la estructura mecánica donde se definen las características del manipulador, los eslabones o grados de libertad que se utilizaron, etc. Esta parte es fundamental ya que se toma como análisis la estructura antropomórfica suele ser la más avanzada por la facilidad que tiene al momento del desplazamiento e interacción con su entorno, se muestra las partes fundamentales que tiene el robot para analizar sus articulaciones con el modelo Denavit-Hartenberg.

Segundo, el robot antropomórfico tiene 4 grados de libertad (g.d.l.) tiene una pinza de agarre (actuador final), pero en la descripción de este informe de tesis solo nos centramos en las tres primeras articulaciones en analizar sus movimientos determinando solo 3 g.d.l. para poder realizar el diseño en 3D y realizar una simulación de todas las articulaciones, se muestra en la figura 64.

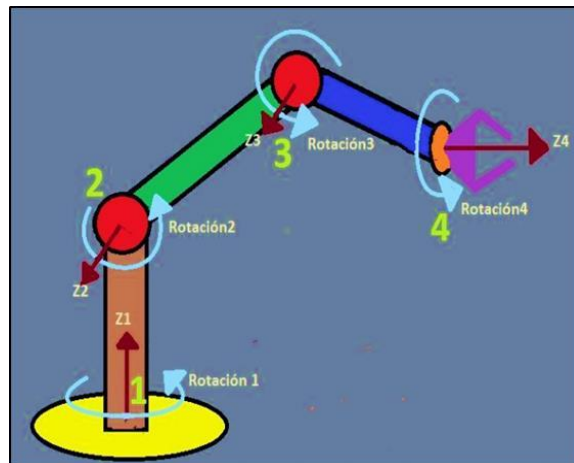


Figura 64 Prototipo del manipulador de 4 eslabones, visualizando sus eslabones rotacionales.

Fuente: Freddy M. Alonzo, 2014

3.6.2. Diseño realizado por el software

En el diseño en 3D de las piezas se realizó las medidas y detalles de los motores principales para el contorno de cada pieza que sirve como base en las uniones de las articulaciones, estas medidas fueron modelados en el software SketchUP versión 2015 ya que el programa me permite modelar adecuadamente

las partes internas como externas del brazo robot móvil, un ejemplo se muestra en la figura 65 y 66 donde tomamos las medidas extraídas de las hojas técnicas de cada motor y lo dimensionamos en el programa obteniendo el grafico ideal en su construcción.

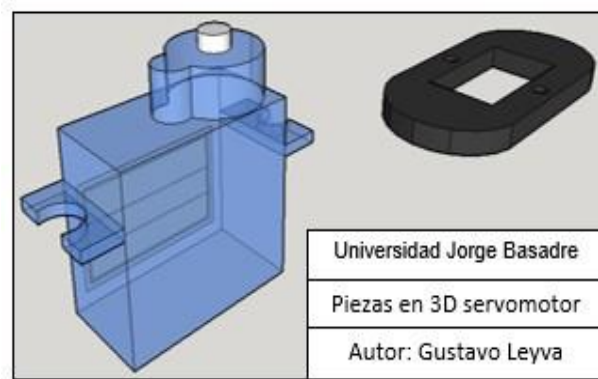


Figura 65 Diseño del entorno mecánico de un servomotor SG90 del brazo robótico.

Es fundamental tener en cuenta que las medidas establecidas están libres de licencias y que se puede modelar adecuadamente incluido las ruedas del robot para su modelado en 3D y estas se puedan visualizar para su construcción completa del sistema mecánico.

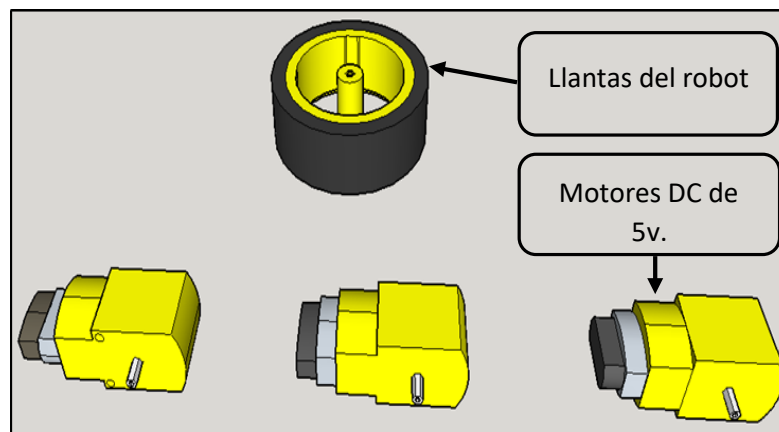


Figura 66 Modelamiento de los motores DC de 5v y los neumáticos de la base móvil del robot.

El software SketchUP se utiliza para realizar diseños en 3 dimensiones para poder modelar nuestro robot, se tuvo que tomar todas las medidas de la estructura mecánica desarrollando todos los parámetros tanto para el control como el diseño mismo, este programa es ideal para trabajos de ingeniería y arquitectura tiene un simulador de movimiento para las piezas y es muy ligero el programa, como se visualiza en la figura 67.

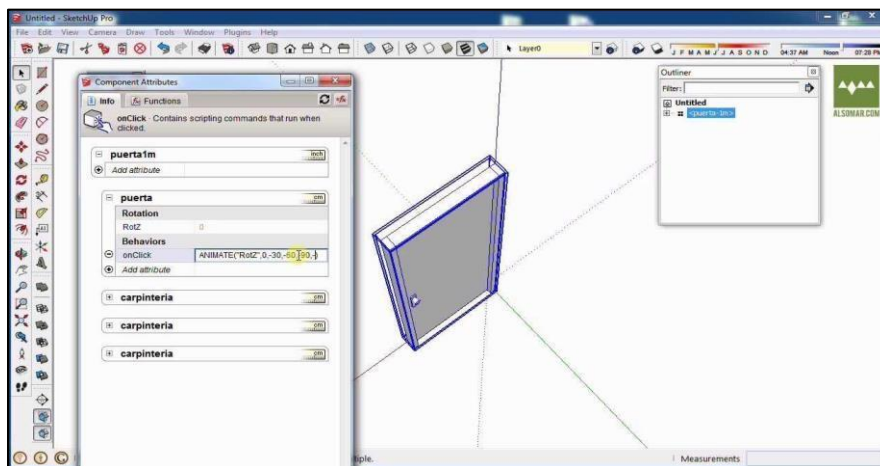


Figura 67 Vista frontal del programa SketchUP.

Fuente: Recuperado del sitio web: (<https://www.youtube.com/watch?v=UE8boTWPWY>, 2019)

Al final de la elaboración en 3D se obtiene como resultado el acabado del brazo robot móvil en la visualización y modelado del prototipo esta etapa servirá en el modelado matemático del brazo robótico y además de la simulación de la misma.

3.6.3. Construcción

En la implementación de la estructura del robot manipulador móvil, se empleo una base cuadrada con las siguientes medidas 12 cm alto, 18 cm de ancho y con un espesor de 2 cm, el material utilizado es el triplay de madera tipo “A” teniendo dos plataformas con dichas medidas elaboradas que se logran acoplar para formar la base del robot.

Las tres piezas son fundamentales para tener una mayor estabilidad al momento del desplazamiento del brazo robótico para el entorno de trabajo y permitiendo colocar por encima toda la estructura del brazo robótico sirviendo como soporte para el desplazamiento del robot.

En la descripción de la figura 68, tenemos las piezas fundamentales del prototipo móvil, a continuación, haremos una descripción de cada parte.

- Medidas del chasis móvil.
- Acoples inferiores del chasis móvil, para los motores con caja reductora.
- Medidas de cada acople (Bases o soportes de los motores).

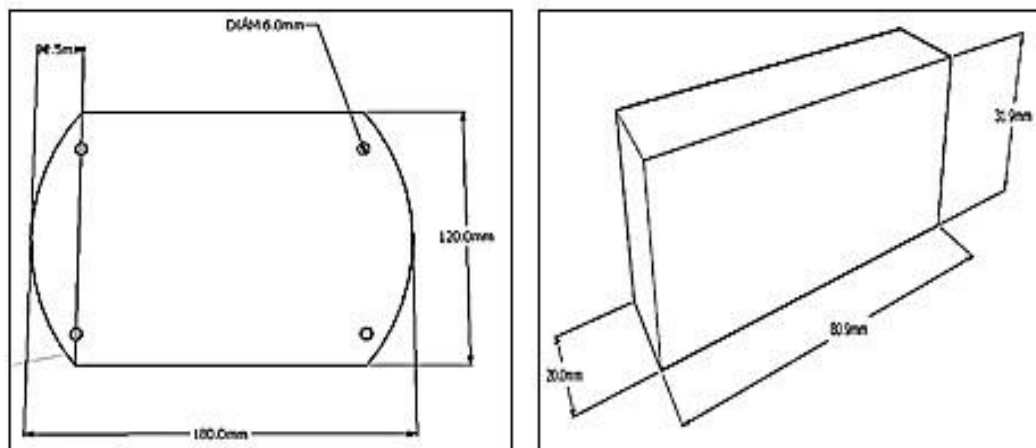


Figura 68 Izquierda, base rectangular con sus medidas respectivas. Derecha, soportes de madera para los motores.

Después del modelado en 3D se procede con la construcción del modelo físico tomando las medidas establecidas en el diseño con la finalidad de realizar los

cortes en el material de madera y darle una precisión en los bordes para tener un mejor acabado de la base móvil, figura 69.

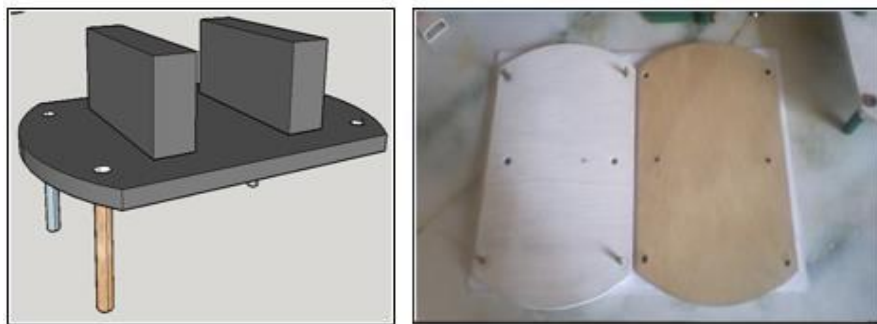


Figura 69 Elaboración de las bases para la plataforma móvil del brazo robótico.

Se realizan pruebas de construcción para ver el desplazamiento y eliminar errores de construcción que puedan impedir los desplazamientos de los actuadores del chasis móvil y poder mejorar el diseño sin presentar una complejidad mayor, además se realizan unas bases adicionales para el acople de los motores DC, estos materiales son prácticos de adquirirlos para las uniones de las superficies, estos materiales incluido las bases se pueden adquirir en cualquier taller de carpintería. La madera es uno de los materiales ideales en la robótica para diseñar prototipos y modelos diferentes.

También cada plataforma y las bases de los motores tienen orificios de 2mm aproximadamente para los tornillos de ajuste, Además, con mucha precisión se taladran los huecos en los lugares donde van fijos los motores y los acoples; 2 y 4 orificios respectivamente, donde se visualiza en la figura 70.

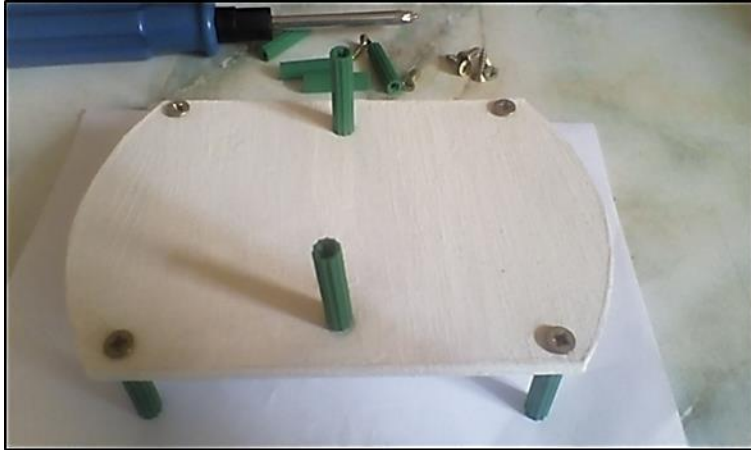


Figura 70 Esqueleto experimental para arreglar el diseño el prototipo del robot.

Puede verse en la figura 71 todo el prototipo de brazo robot teniendo un acabado como se mostró anteriormente en la parte del modelado 3D, con un base móvil con cuatro ruedas para su desplazamiento y en la parte superior de la misma se encuentra acoplado el manipulador de tres eslabones, en la parte posterior del manipulador se encuentra la tarjeta electrónica para el control de todo el sistema mecánico y en la parte inferior de la base móvil se encuentra el sistema electrónico controladora de potencia para el manejo de los servomecanismos y actuadores de movimiento.

Todo el mecanismo se realizó con acrílico y triplay de madera para la fácil construcción y elaboración además el peso de todo el prototipo es ligero ideal para realizar cualquier demostración teórica-practica.



Figura 71 La estructura prototipada del manipulador móvil.

El bosquejo completo del manipulador robótico se realizó en el programa SketchUP para poder previsualizar el acabado final de acuerdo con las medidas de los motores y mecanismos que se compraron y se tomaron sus dimensiones para ser acoplados.

El método por el diseño en 3D permite al creador o diseñador poder realizar mejores diseños de piezas a escala que le permiten tener un mejor acabado para el trabajo en el área de robótica además de poder simular los movimientos esta clase de trabajo ayuda en gran parte a concluir una parte importante en el trabajo de la robótica.

3.7. Sistema de control

Utilice la plataforma del Arduino Mega 2560, en el cual se enfoca en la manipulación de la maquina robotizada, como también en el procesamiento de la información de los sensores, también enviando caracteres de control a los actuadores debido a la ejecución del código de control, o por comandos de control desde el control de mando, utilizamos también el chip NRF24L01 como antena de comunicación con el sistema de control remoto para la comunicación en tiempo real y posee varias salidas la tarjeta de control para comunicarse con la estructura de control de potencia para la manipulación de actuadores para el desplazamiento, a su vez tiene una entrada de alimentación para que el circuito trabaje en forma natural y no tenga que ser sobre exigido con el consumo de motores ya que las alimentaciones son independientes, se visualiza en la figura 72.

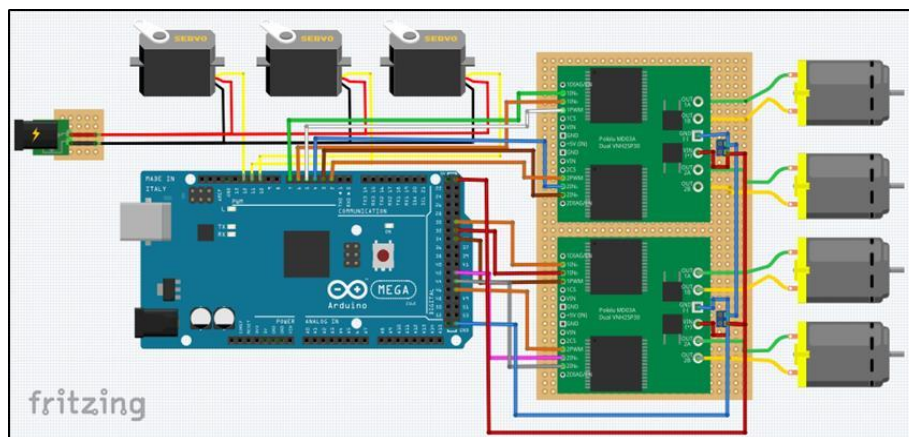


Figura 72 sistema electrónico del control electrónico para el manipulador móvil.

Pasamos a la parte física del sistema donde se decidió utilizar dos tipos de controladores L298N y L293D que facilitan la manipulación de los 4

actuadores DC (corriente continua) de 5v. Permitiendo controlar el desplazamiento de las cuatro direcciones del chasis móvil del robot y estos tienen la capacidad de controlar el consumo hasta 2 Amperios de corriente con lo cual puede soportar el peso que exige desplazar objetos a cortas distancias y consuman más corriente para dichas labores en las articulaciones del robot, el peso es de 9 gramos por objeto de esta manera el consumo es menor y puede desplazarse sin ningún problema, ver figura 73.

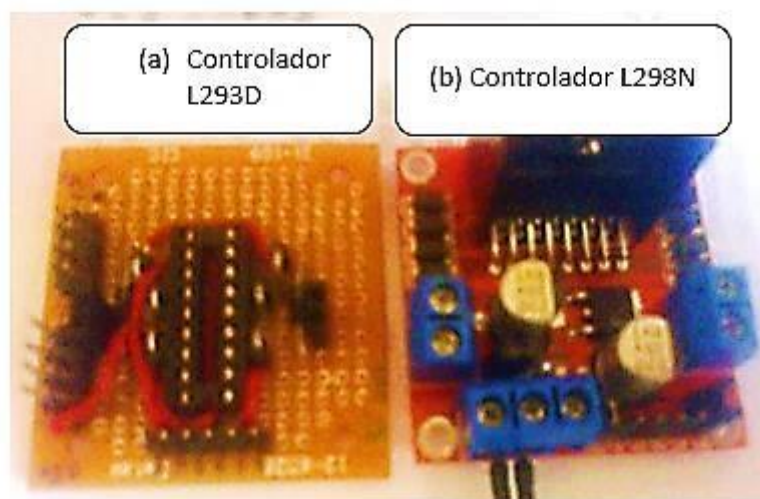


Figura 73 (a) Implementación del controlador L293D, (b) Implementación del controlador L298N.

- Organigrama de la estructura de control de potencia.

Esta parte es fundamental para la administración de la alimentación para los motores del esqueleto del robot móvil, el brazo robotico está compuesto por servo-

motores y motores DC en la parte del chasis móvil y del brazo robótico móvil, a continuación, se menciona los sistemas alimentados, visualizado en la figura 74.

- Sistema de alimentación del Arduino Mega 2560.
- Driver o controladores para los servomotores y motores de 5 voltios DC.
- Sistema de alimentación para el control de potencia de motores.
- Controlador principal Arduino Mega 2560.
- Servo-motores SG90 y motores con caja reductora de 5 voltios.

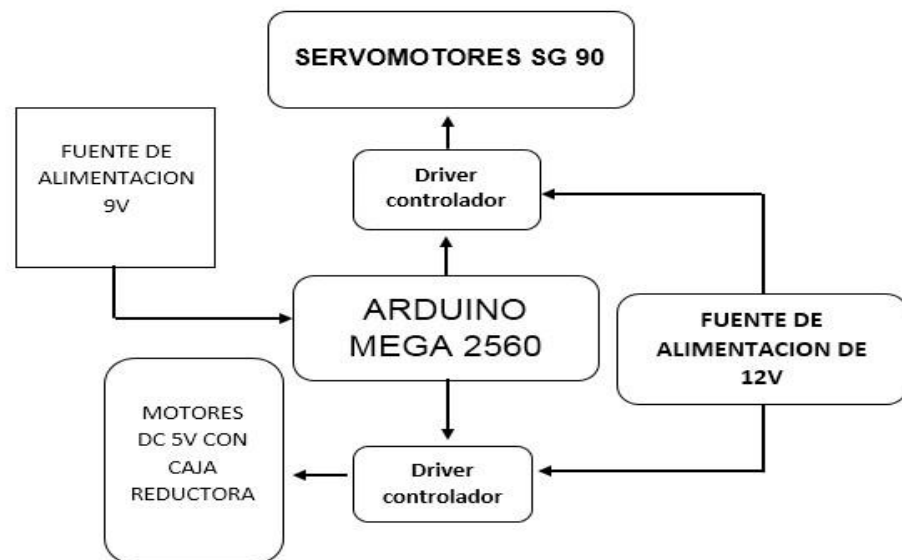


Figura 74 Organigrama de la estructura de control del robot.

3.8. Esquemático del conjunto de comunicación (Receptor)

Para la comunicación se utilizó el módulo NFR24L01 (es un dispositivo de comunicación que está compuesta por un emisor y un receptor) de 2.4GHz de frecuencia con la que alcanza su banda y tiene una utilidad científica, industrial, Medica donde tiene un consumo bajo en energía Tiene un circuito amplificador de fuerza, un circuito amplificador de bajo ruido, también tiene una antena emisora cuyo alcance es de 1000m de radio en campo de vista.

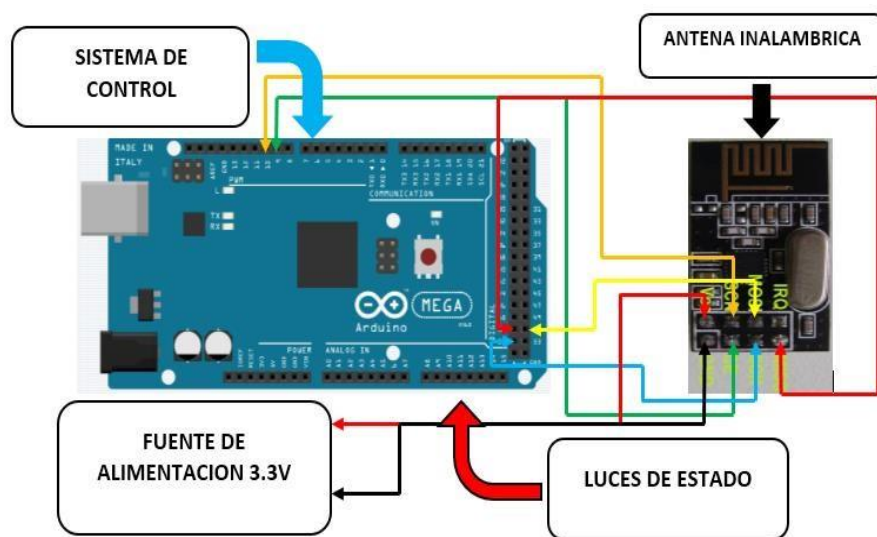


Figura 75 Sistema de comunicación inalámbrica receptora del prototipo del robot.

Esquema de conexión de la estructura de control inalámbrico (Emisor).

Esta estructura de control inalámbrico contiene la pantalla gráfica, que visualizara todos los datos enviados al receptor. Posee un Arduino nano que tiene como objetivo procesar los datos introducidos para enviarlos al receptor y además está compuesto de pulsadores. La configuración deseada también contiene dos

joysticks para el manejo de las coordenadas de control y por último una antena NRF24L01 para la comunicación con la estructura de control principal Del manipulador, se visualiza en la figura 76, los detalles de su conexión que forma todo el sistema del control remoto.

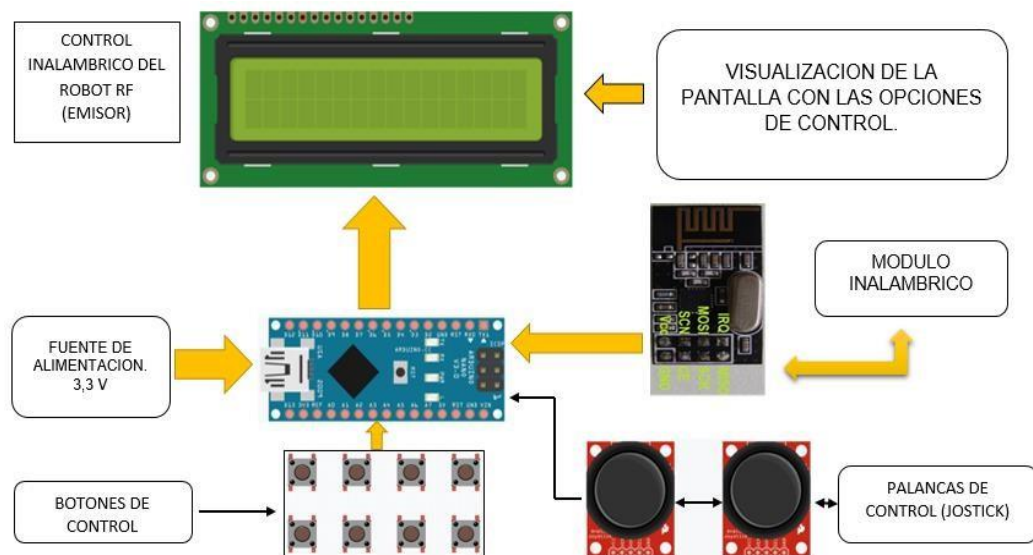


Figura 76 Sistema de comunicación emisora del prototipo del robot.

3.9. Sistema de alimentación y potencia

Para que el manipulador robótico funcione con su respectivo control y autonomía de aproximadamente una hora se optó por la implementación de la alimentación independiente para el consumo exclusivo de los motores y servomecanismos del prototipo del robot utilizando una fuente de litio recargable de 4.5v de 2 amperios, una batería de 7.5v de 200mA para alimentar los motores de 5v DC y una batería de 9v DC para el sistema de procesamiento (Arduino Mega

2560). Para mostrar el procedimiento se visualizará en la figura 77 el organigrama de la alimentación del sistema completo del prototipo del robot.

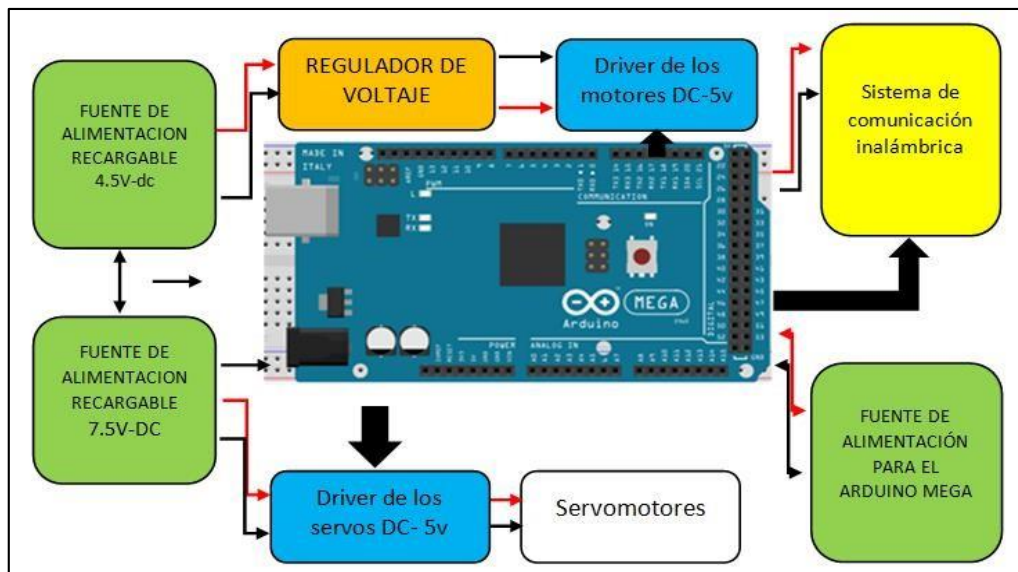


Figura 77 El organigrama de la estructura para la alimentación del sistema electrónico y la alimentación de potencia en los mecanismos.

Esta implementación de la estructura de la alimentación y manejo de los motores se muestra una línea negra que significa la tierra común de todo el circuito electrónico del sistema permitiendo que no ocurra una sobre carga de tensión en la alimentación de los controladores de motores permitiendo una mejor estabilidad en los mecanismos.

3.10. Programación del modelado cinemático en el desplazamiento del brazo robótico

El código del programa de la generación de trayectorias desarrollado en el software libre Arduino utilizando el lenguaje en C++ tiene como objetivo encontrar el recorrido más pequeño en distancia hacia los obstáculos para aterrizar a la meta asignado. Cuando se termina este proceso para el cálculo de trayectorias este programa muestra por la pantalla grafica la trayectoria generada y, asimismo, guardar los datos matemáticos del trayecto en un vector de programación, para transformarlos luego en las señales de control entendibles por el microcontrolador del manipulador para el rastreo del camino indicado, se visualiza en la figura 78.

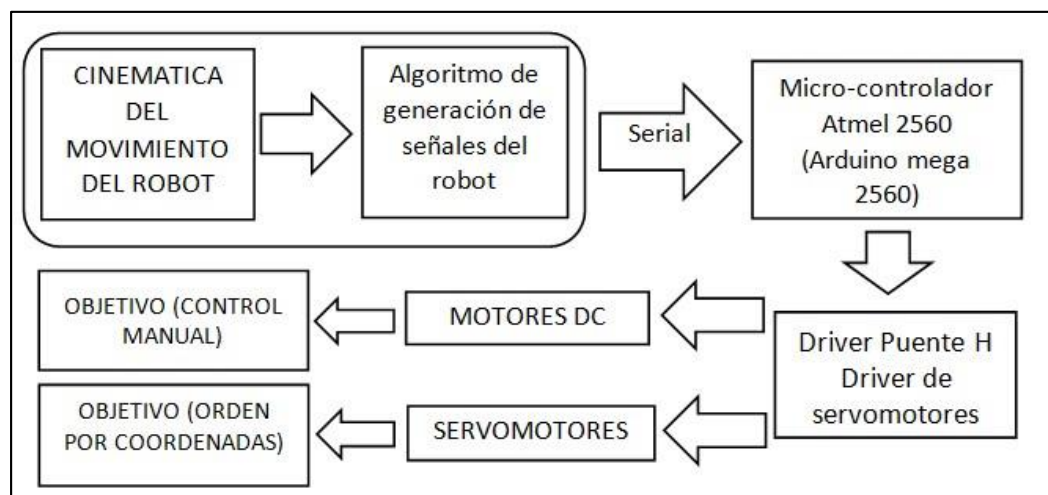


Figura 78 Organigrama de la implementación para el algoritmo para el control y autonomía.

El algoritmo generador de trayectorias consta de la cinemática inversa de la cual logra encontrar la solución del problema de la generación de trayectorias. Para

Llegar a los puntos establecidos se decide colocar en el espacio de trabajo los puntos de referencia a ubicar como se muestran en la figura 79, y se realiza la programación para luego comparar los movimientos en sus coordenadas. Cada punto en su espacio de trabajo representa a un recorrido o traslación del efector final o pinza de aguare.

Para el desarrollo del algoritmo primero se tiene que tomar en cuenta las medidas establecidas por las articulaciones luego se toma el modelo cinemático directo para desarrollar los elementos fijos en el area dentro del espacio de labor del brazo robótico y por ultimo crea los ángulos correspondientes para cada eslabón, en sentido contrario que vendría a ser la cinemática inversa parte del punto en el espacio ubicado para luego ubicar los ángulos de los mecanismos correspondientes donde se visualiza en la figura 76.



Figura 79 Pasos en la búsqueda de los valores que determinan la posición del manipulador.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Espacio de trabajo del manipulador de 3 eslabones

Al disponer el funcionamiento del prototipo, se observa que describe un campo espacial esférico de 18cm, y desde luego se genera un amplio lugar de labor para los movimientos del brazo robótico. formando un círculo cuyo radio es de 18 cm, también el brazo robótico tiene un alcance máximo de 18 cm de largo y un alto de 18 cm de acuerdo a su longitud que le permite realizar los trazos y puntos en su área de trabajo formando un cilindro con los puntos marcados alrededor de su eje de rotación este brazo robótico antropomórfico es la más ideal en trabajos que se requiere una mayor amplitud de alcance dentro de un espacio reducido o delimitado por la estructura base del manipulador, como se observa en la figura 80 las trayectorias de barrido tridimensional del desplazamiento del robot. Esta grafica es producto de una programación en Matlab tomando en consideración las cualidades físicas del manipulador robótico. Además, el trazo lo realiza utilizando el modelo cinemático en el movimiento, encontrando los puntos en el espacio o área de trabajo mas no por método de trazo, esta observación se hace solo para ver la eficiencia y la precisión del efector final o pinza de agarre.

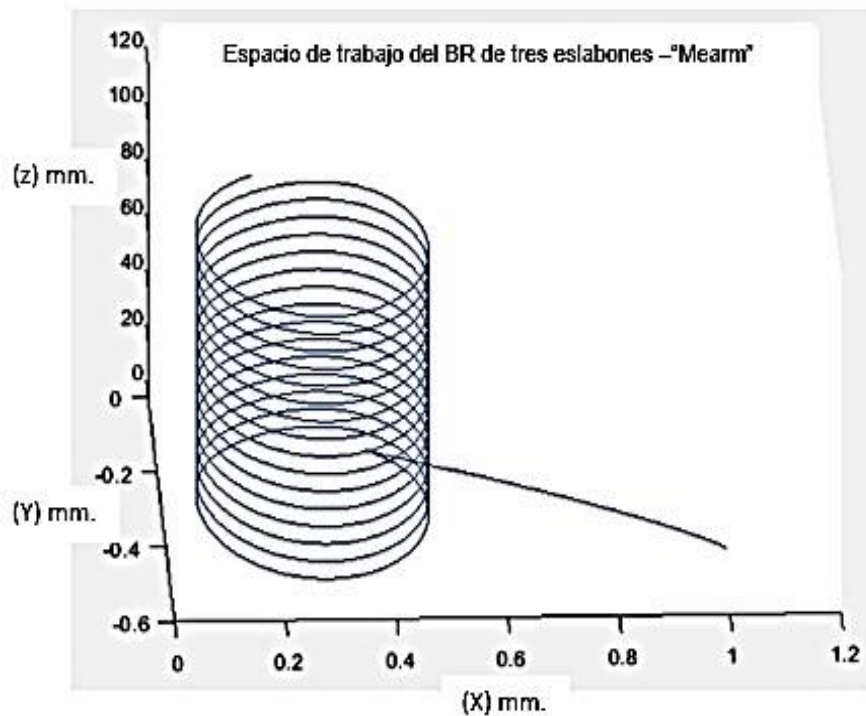


Figura 80 Espacio de trabajo del robot en 3D del brazo robot “Mearm” de tres eslabones realizado en el programa Matlab.

En la tabla 3, se desarrolló el modelo de la tabla Denavit- Hartenberg del manipulador antropomórfico de 3 eslabones, donde se parametrizo desde las 4 variables que se toma de las características físicas del robot, esto con la finalidad de desarrollar la matriz transformación Homogénea Denavit-Hartenberg que sirvió para desarrollar la técnica cinemático directo e inverso del brazo robótico en la tabla se tiene tres matrices donde cada uno representa a un eslabón de la articulación del manipulador.

Tabla 3 Parámetros Denavit-Hartenberg del manipulador vertical de 3 g.d.l (antropomórfico).

Eslabón	Li	α_i	di	θ_i
1 (H)	L1	$\pi/2$	L1+beta1	q1
2 (H)	L2	0	beta2	q2
3 (H)	L3	0	beta3	q3

La tabla 4 se muestra todas las características físicas del brazo robótico móvil permitiendo tener los parámetros ideales para la implementación de la matriz de transformaciones homogéneas Denavit-Hartenberg por cada eslabón para la programación del algoritmo en el hardware libre.

Tabla 4 Parámetros Denavit-Hartenberg del robot con las medidas reales del brazo robot “Mearm”

Eslabón	Li (cm)	α_i	Di(cm)	θ_i
1 (H)	6.5	90	0	Θ_1
2 (H)	6	0	12	Θ_2
3 (H)	12	45	0	Θ_3

Cada eslabón representa a una matriz de transformación homogénea tanto de orientación y también en la posición formando una matriz de 4x4 llamada matriz de conversión homogénea Denavit-Hartenberg para luego saber definir el modelo cinemático inverso y directo hacia los desplazamientos de los dispositivos

mecánicos, a continuación, hacemos una descripción de cada uno de las ecuaciones provenientes de la tabla Denavit-Hartenberg.

H_0^1 = Matriz de transformación Homogénea del primer eslabón en relación a la base fija.

H_1^2 = Matriz de transformación Homogénea del segundo eslabón con respecto al primer dispositivo mecánico.

H_2^3 = Matriz de transformación Homogénea del tercer eslabón con respecto al segundo eslabón.

H_{Rz0} = Matriz de transformación Homogénea de rotación en el eje z_0

H_{Tz0} = Matriz de transformación Homogénea de traslación en el eje z_0

H_{Tx0} = Matriz de transformación Homogénea de traslación en el eje x_0

H_{Rx0} = Matriz de transformación Homogénea de rotación en el eje x_0

H_{Rz1} = Matriz de transformación Homogénea de rotación en el eje z_1

H_{Tz1} = Matriz de transformación Homogénea de traslación en el eje z_1

H_{Tx1} = Matriz de transformación Homogénea de traslación en el eje x_1

H_{Rx1} = Matriz de transformación Homogénea de rotación en el eje x_1

H_{Rz2} = Matriz de transformación Homogénea de rotación en el eje z_2

H_{Tz2} = Matriz de transformación Homogénea de traslación en el eje z_2

H_{Tx2} = Matriz de transformación Homogénea de traslación en el eje x_2

H_{Rx2} = Matriz de transformación Homogénea de rotación en el eje x_2

$$H_0^1 = H_{Rz_0}(q_1)H_{Tz_0}(l_1 + \beta_1)H_{Tx_0}(0)H_{Rx_0}\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad (5)$$

$$H_0^1 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & 0 & \sin(q_1) & 0 \\ \sin(q_1) & 0 & -\cos(q_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 + \beta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4} \quad (5.1)$$

$$H_1^2 = H_{Rz_1}(q_2)H_{Tz_1}(\beta_2)H_{Tx_1}(l_2)H_{Rx_1}(0) \quad (5.2)$$

$$H_1^2 = \begin{bmatrix} \cos(q_2) & -\sin(q_2) & 0 & l_2 \cos(q_2) \\ \sin(q_2) & \cos(q_2) & 0 & l_2 \sin(q_2) \\ 0 & 0 & 1 & \beta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4} \quad (5.3)$$

$$H_2^3 = H_{Rz_2}(q_3)H_{Tz_2}(\beta_2)H_{Tx_2}(l_3)H_{Rx_2}(0) \quad (5.4)$$

$$H_2^3 = \begin{bmatrix} \cos(q_3) & -\sin(q_3) & 0 & l_3 \cos(q_3) \\ \sin(q_3) & \cos(q_3) & 0 & l_3 \sin(q_3) \\ 0 & 0 & 1 & \beta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4} \quad (5.5)$$

Entonces, esta matriz homogénea del manipulador antropomórfico de 3 grados de Libertad desplazándose en su área de trabajo es la ecuación 5.6 como se describió anteriormente Es la multiplicación de matrices homogéneas anteriormente mencionadas:

$$H_0^3 = H_0^1 H_1^2 H_2^3 \quad (5.6)$$

Esta ecuación nos permite definir con claridad el movimiento cinemático directo del robot antropomórfico y que permite encontrar el punto de ubicación del efector final (pinza de aguare) del robot como se menciona en la ecuación 5.8.

Ecuación 5.8: Esta ecuación describe el modelamiento matemático directo del manipulador para ubicar el origen de la ubicación en el área del trabajo del manipulador.

β_2 = Espesor del eslabón y la articulación del brazo robótico.

β_3 = Espesor de eslabón y la articulación del brazo robótico.

β_1 = Espesor del eslabón y la articulación del brazo robótico.

l_1 = distancia del primer dispositivo mecánico.

l_2 = distancia del segundo dispositivo mecánico.

l_3 = distancia del tercer dispositivo mecánico.

q_1 = Angulo del primer dispositivo mecánico con respecto a su base.

q_2 = Angulo del segundo eslabón con respecto a su base.

q_3 = Angulo del tercer eslabón con respecto a su base.

x_0 = Primer punto en el eje x en el plano cartesiano.

y_0 = Segundo punto en el eje y en el plano cartesiano.

z_0 = Tercer punto en el eje z en el plano cartesiano.

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} [\beta_2 + \beta_3] \sin q_1 + \cos q_1 [l_2 \cos q_2 + l_3 \cos(q_2 + q_3)] \\ -[\beta_2 + \beta_3] \cos q_1 + \sin q_1 [l_2 \cos q_2 + l_3 \cos(q_2 + q_3)] \\ l_1 + \beta_1 + l_2 \sin q_2 + l_3 \sin(q_2 + q_3) \end{bmatrix}_{3 \times 1} \quad (5.8)$$

Enseguida mostramos los resultados del area de labor del brazo robótico donde se utiliza un modelo cinemático directo e inverso empleado en la descripción de los puntos ubicados dentro del espacio de trabajo del brazo robótico además de poder realizar un trazo que denota la unión de dos puntos, esta área de trabajo tiene una forma esférica y tiene un pequeño espacio libre que simboliza la ubicación del origen del robot manipulador para tener una libertad de desplazamiento, a continuación, se describe con detalle la figura 81.

- La línea roja es el plano en 2D de los ejes de las coordenadas.
- La región sombreada expresa es el área de trabajo del brazo robótico.
- Los puntos azules y la línea azul es la trayectoria definida por el robot mediante el modelo cinemático directo e inverso.
- El área de trabajo tiene un diámetro de 36 cm y un radio de 18 cm como se observa en la figura.

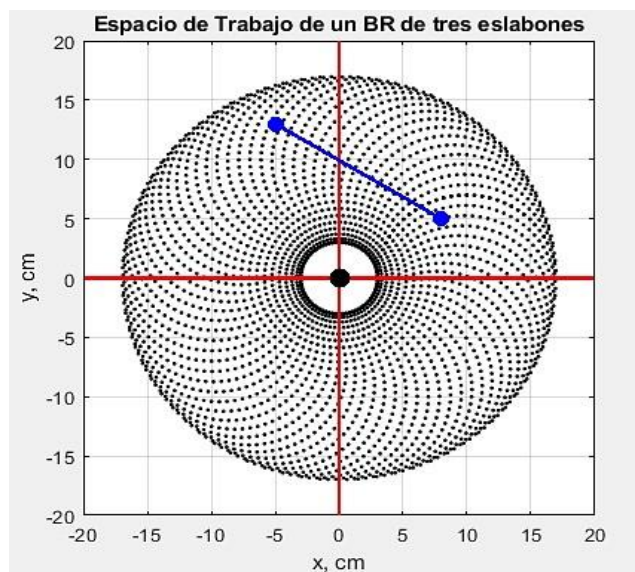


Figura 81 Zona de labor, visto desde la parte superior 2D y una recta definiendo la trayectoria de dos puntos en su espacio de trabajo.

Ahora para realizar la ubicación y posición del robot manipulador se utilizó la ecuación de la matriz de transformación Homogénea de rotación y translación para ubicar el lugar del dispositivo mecánico del manipulador en el plano tridimensional

permitiendo tener un desplazamiento coordinado para ver los resultados obtenidos se tuvo que utilizar las siguientes ecuaciones que están a continuación.

- Matrices de transformación homogénea de rotación

$$HR_x(\theta) = \begin{bmatrix} [1 & 0 & 0] \\ [0 & \cos \theta & -\sin \theta] \\ [0 & \sin \theta & \cos \theta] \\ [0 & 0 & 0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \\ [0] \\ 1 \end{bmatrix}_{2x2} = \text{Matriz de rotación eje x} \quad (5.9)$$

$$HR_y(\theta) = \begin{bmatrix} [\cos \theta & 0 & \sin \theta] \\ [0 & 1 & 0] \\ [-\sin \theta & 0 & \cos \theta] \\ [0 & 0 & 0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \\ [0] \\ 1 \end{bmatrix}_{2x2} = \text{Matriz de rotación eje y} \quad (5.10)$$

$$HR_z(\theta) = \begin{bmatrix} [\cos \theta & -\sin \theta & 0] \\ [\sin \theta & \cos \theta & 0] \\ [0 & 0 & 1] \\ [0 & 0 & 0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \\ [0] \\ 1 \end{bmatrix}_{2x2} = \text{Matriz de rotación eje z} \quad (5.11)$$

- Matrices de transformación homogénea de traslación.

$$HT_x(d) = \begin{bmatrix} [1 & 0 & 0] \\ [0 & 1 & 0] \\ [0 & 0 & 1] \\ [0 & 0 & 0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [d] \\ [0] \\ [0] \\ 1 \end{bmatrix}_{2x2} = \text{transformación homogénea del eje x} \quad (5.12)$$

$$HT_y(d) = \begin{bmatrix} [1 & 0 & 0] \\ [0 & 1 & 0] \\ [0 & 0 & 1] \\ [0 & 0 & 0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [0] \\ [d] \\ [0] \\ 1 \end{bmatrix}_{2x2} = \text{transformación homogénea del eje y} \quad (5.13)$$

$$HT_z(d) = \begin{bmatrix} [1 & 0 & 0] \\ [0 & 1 & 0] \\ [0 & 0 & 1] \\ [0 & 0 & 0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \\ [d] \\ 1 \end{bmatrix}_{2x2} = \text{transformación homogénea del eje z} \quad (5.14)$$

Al final de todas las ecuaciones empleadas para la orientación y traslación se forma una matriz de 4x4 que se le llama matriz T.H. (transformación homogénea) Denavit-Hartenberg y representa el desplazamiento del robot.

- Matriz de T.H. (transformación homogénea) Denavit-Hartenberg

R= Matriz de T.H. (transformación homogénea) de rotación.

$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{3 \times 1}$ = Matriz de transformación homogénea de traslación.

0^T = Matriz para la perspectiva.

1 = Escalado.

$$H = \begin{bmatrix} R & \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}_{2 \times 2} = \text{Matriz de transformación homogénea D-H} \quad (5.15)$$

4.1.1. Bosquejo del algoritmo del manipulador robótico

Al realizar el correcto ensamblado y montaje del prototipo de brazo robótico este prototipo experimental permitió la construcción del algoritmo de control donde tenemos los datos introducidos desde el control remoto que envía las coordenadas hacia el procesador principal que luego estas los procesa ejecutando el cálculo a través del modelo cinemático como algoritmo para encontrar la posición final del efector final o pinza de agarre y que está dentro del rango del área de trabajo del mismo brazo robótico, se visualiza en la figura 82.

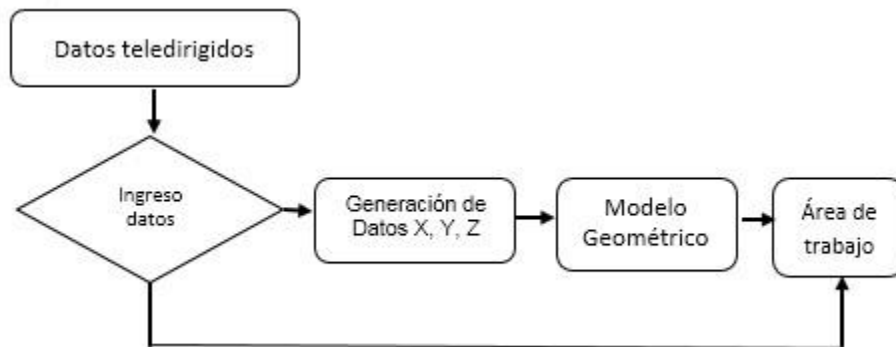


Figura 82 Organigrama para el código de la cinemática inversa en el software Matlab y Arduino.

4.1.2. Resultados experimentales de la implementación del prototipo

4.1.2.1. Ensamble final del control remoto (NRF24L01)

La estructura de control remoto tiene la capacidad de comunicarse a 1000 m de radio en operación con el sistema receptor por su parte ese circuito posee 4 canales de comunicación donde puede comunicarse con otras radios de su misma frecuencia y contiene más de 4 opciones de control para controlar al brazo robótico a continuación se hace una descripción detallada del circuito final en la figura 83.

- La antena inalámbrica-NRF24L01 es el punto de emisión de los datos a dirigir hacia el prototipo del robot.
- La pantalla de LCD visualiza las coordenadas que se introducen para el procesamiento.
- El Arduino nano permite procesar las coordenadas de control junto con el

controlador de la antena- NRF24L01.

- Los botones de control y los Joystick permiten configurar las opciones de las tareas.
- Su fuente de alimentación es de 9 voltios para el continuo funcionamiento a bajo consumo.
- La antena más el chip NRF24L01 está diseñado a bajo consumo y trabaja a 3.3 voltios cada chip de comunicación.
- La antena receptora tiene el mismo tipo de chip y puede recibir toda la información en paralelo permitiendo una rápida comunicación entre las dos.

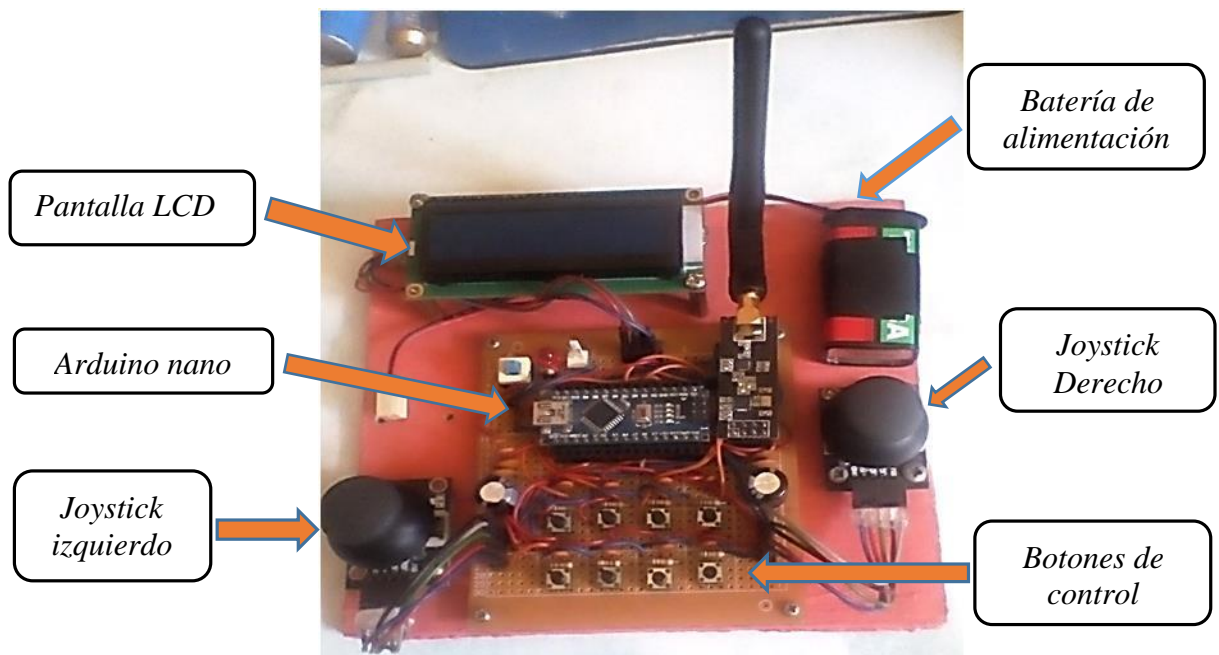


Figura 83 Sistema de control inalámbrico del manipulador robótico.

4.1.2.2. Ensamble final del prototipo del manipulador

En la elaboración de las articulaciones se empleó el material de acrílico para realizar un trabajo con mayor facilidad en la elaboración de las piezas permitiendo un acabado ideal en su aspecto físico, con respecto a la base móvil se diseñó de un material diferente llamado triplay de madera de 12 cm x 18 cm x 0.5 cm formando dos plataformas como una base fija y dos soportes en las ruedas permitiendo tener desplazamiento en el área de trabajo y se utilizó por su facilidad de trabajo en comparación con el acrílico ambos materiales son ideales para el prototipo además de poder realizar pruebas con mayor seguridad dentro del laboratorio.

Todas las dimensiones del prototipo están especificadas en la parte de anexos del presente trabajo, este brazo robótico se diseñó en base a la conformación antropomórfica de la maquina robotizada.

Esta descripción tiene las siguientes partes en la figura 84, se mencionan a continuación.

- Articulaciones del brazo robótico “Mearm”.
- Pinza de aguarre.
- Ruedas de movimiento de goma con caja reductora.
- Base frontal del robot.

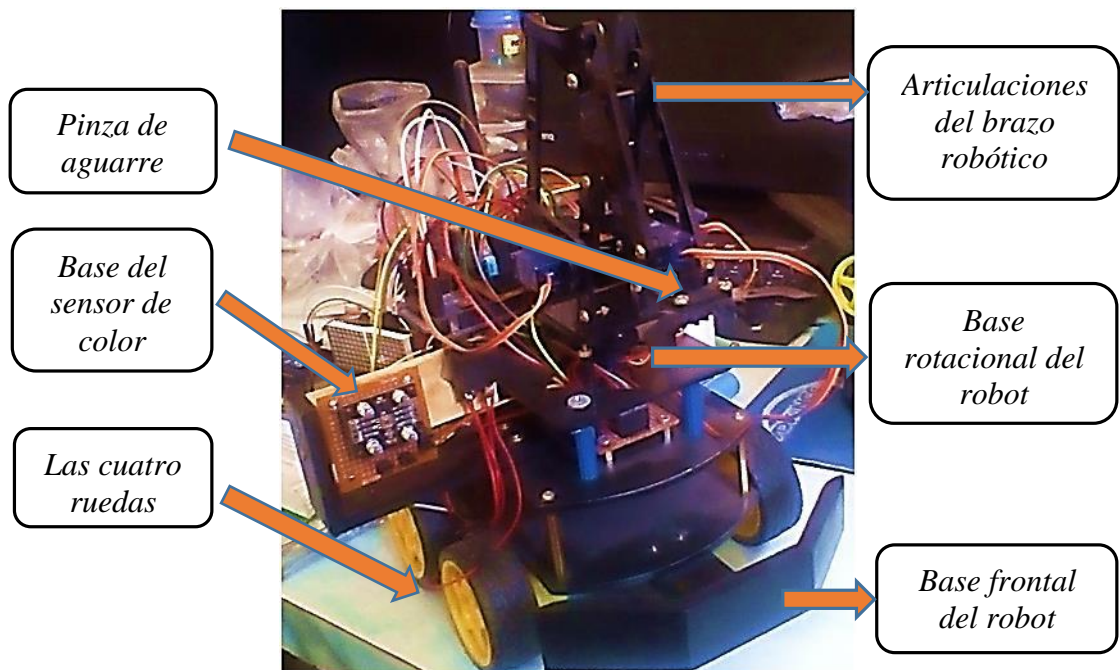


Figura 84 Articulaciones del manipulador robótico y la estructura mecánica del robot móvil.

4.1.2.3. Ensamble final del sistema de control del brazo robótico móvil.

La tarjeta electrónica acoplada en la parte central del brazo robótico se tuvo que ordenar las posiciones para que pueda ser conectado con las demás tarjetas electrónicas ubicándolo en la parte superior donde tenga una comunicación y fácil acople cercana al brazo robótico. La tarjeta contiene unos terminales de conexión de salida en la conexión de las tarjetas de control y posee unos terminales en la conexión con el chip NRF24L01 y condensadores electrolíticos donde pueda controlar los niveles de voltaje en la comunicación a continuación se hace una descripción de la figura 85.

- Antena NRF24L01 es la antena receptora del robot.
- La tarjeta prototipo contiene los componentes analógicos para una mejor resolución y tratamiento de las señales digitales de comunicación con el mando de control inalámbrico.
- Tiene salidas en los buses de comunicación para luego conectarse con el circuito de control de potencia para los actuadores y las entradas para la comunicación con los sensores del robot.
- El procesador principal del prototipo es el Arduino Mega 2560 permitiendo tener un control de todo el sistema de comunicación y procesamiento matemático.
- La estructura mecánica tiene una base móvil de cuatro grados de libertad para la estructura de tracción del móvil en la zona de labor y por último el brazo robótico acoplado que posee 4 grados de libertad, pero solo se hace referencia de estudio a los tres primeros grados de libertad, la pinza de agarre solo es una articulación de referencia para la aplicación dentro del trabajo.

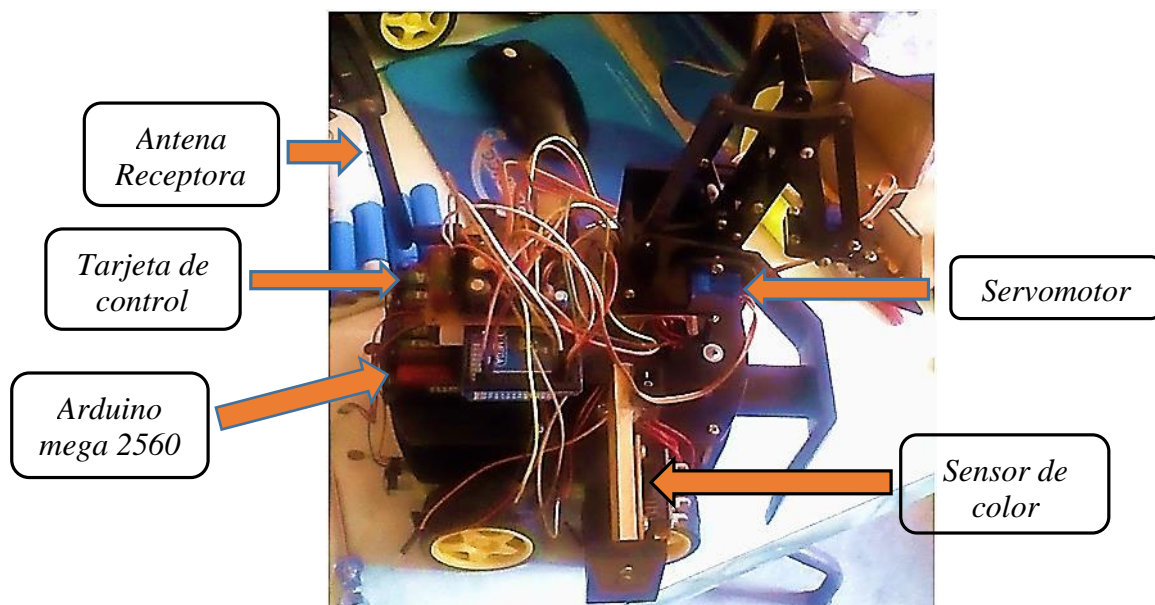


Figura 85 Sistema de control del procesador del brazo robótico móvil.

4.1.3. Resultados del desarrollo del algoritmo de programación del brazo robótico móvil de tres eslabones.

A continuación, se muestra el desarrollo del algoritmo para la programación del control final que se implementó en la construcción del brazo robótico móvil y que se explica en dos partes, la primera parte es el algoritmo principal para la programación del control inalámbrico del robot móvil permitiendo tener una comunicación del emisor hacia el receptor del procesador del robot móvil, Figura 86.

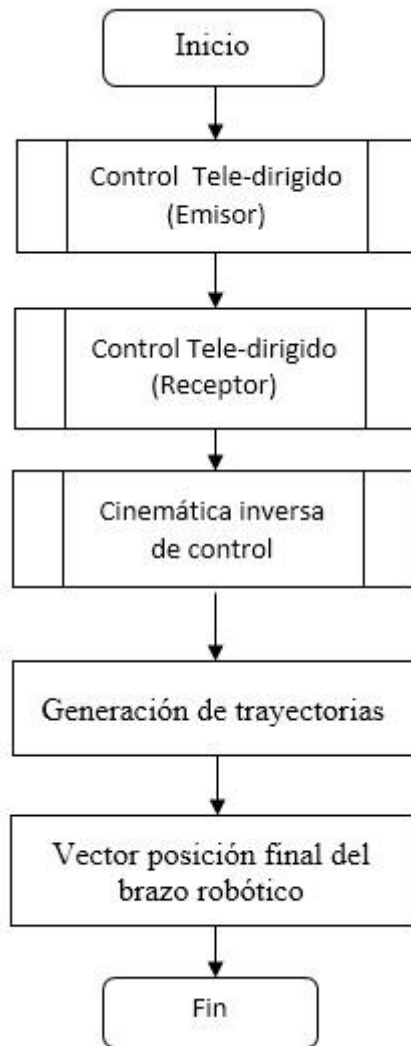


Figura 86 Organigrama general para el manipulador del prototipo de la maquina robotizada.

Visualizamos en la figura 87 el algoritmo controlador remoto la cual fue desarrolla exitosamente en la comunicación, esta tarjeta cuenta con un algoritmo que está configurado con 4 opciones de control mediante el

método del árbol para generar opciones de cambio en la comunicación teledirigida adecuadamente al robot.

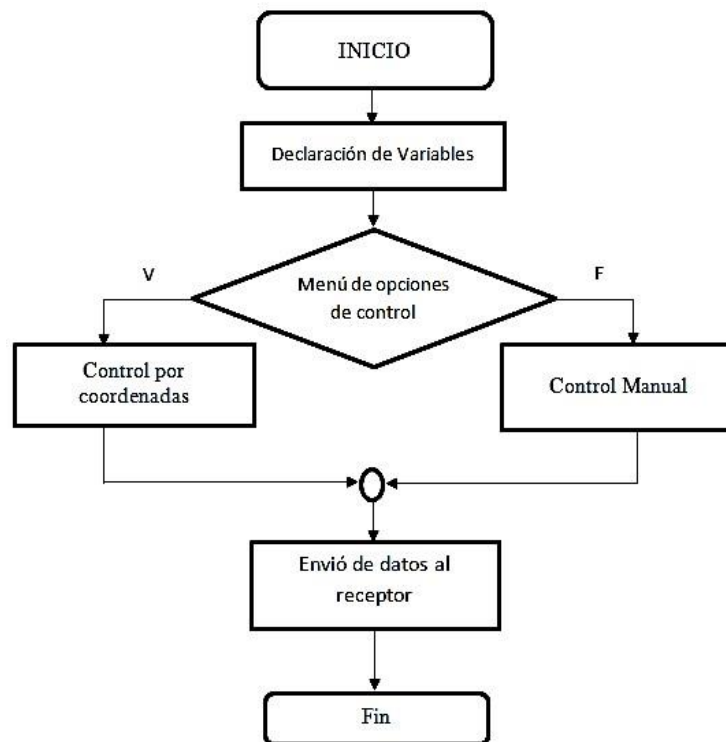


Figura 87 Organigrama del control remoto emisor.

4.1.4 Evaluación del funcionamiento del brazo robótico móvil de tres eslabones

Las pruebas de evaluación del funcionamiento del prototipo que se realizaron tienen por objetivo corroborar el correcto funcionamiento y concluir los resultados del proyecto.

4.1.4.1 Pruebas y resultados del chasis móvil del brazo robótico

Las pruebas que se realizaron son para corroborar el debido funcionamiento de la base móvil del manipulador y de la sección con ruedas con respecto a su espacio de trabajo o labor del manipulador, ya que el brazo robótico es un manipulador fijo en un solo punto de ubicación el chasis permite un mejor alcance y movilidad, para ello el consumo de cada uno de los motores es fundamental tener una referencia a la hora de realizar una labor experimental en el siguiente tabla 5 nos muestra los estados y la correcta maniobrabilidad de las respuestas ante las ordenes preestablecidas para el movimiento del brazo robótico en base al chasis móvil donde su desplazamiento es preciso dentro de un área de 25 cm el espacio hasta el área de desplazamiento del brazo robótico.

Tabla 5 *Funcionamiento del sistema de locomoción (chasis móvil).*

Movimiento	Motor M1-M2	Motor M3-M4	Funcionamiento
Avanzar	1	1	Correcto
Detener	0	0	Correcto
Vuelta hacia la izquierda	1	0	Correcto
Vuelta hacia la Derecha	0	1	Correcto

Mostraremos la figura 88 donde se muestran los resultados que se hicieron para la prueba del desplazamiento del chasis móvil, en la imagen el robot comienza su partida desde una distancia de 25 cm. de la base que pertenece a la zona de trabajo del brazo manipulador donde la base le permite tener una amplitud de trabajo por toda la sección teniendo como resultados las respuestas de los cuatro tipos de

desplazamientos del manipulador robótico, donde se visualiza en la tabla anterior de cálculos realizados.

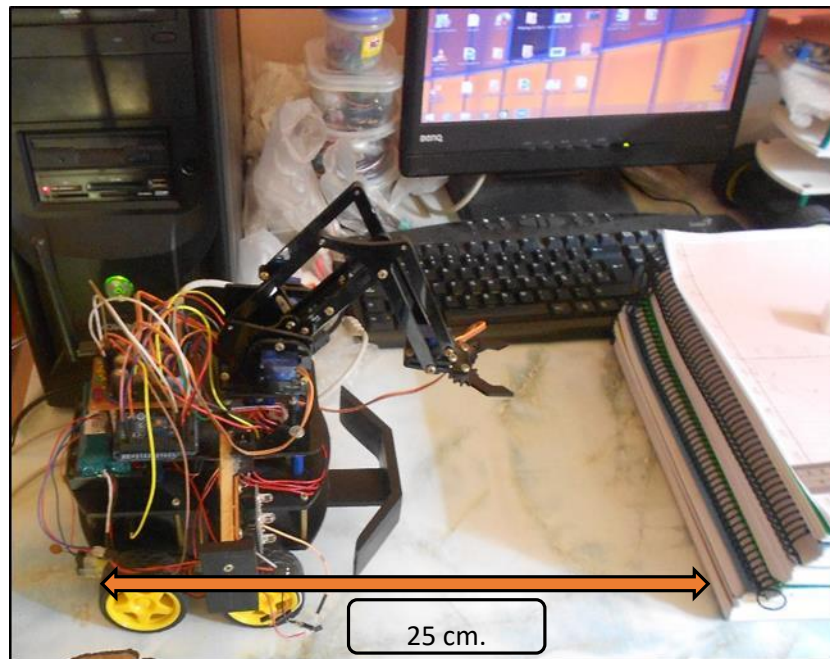


Figura 88 Desplazamiento de pruebas experimentales de la base móvil del brazo robótico.

4.1.4.2. Resultados del sistema de alimentación

Cada tarea programada por el algoritmo de control tiene que cumplirse por un determinado intervalo de tiempo, por lo tanto se requiere de una cantidad de fuerza para la labor en la siguiente tabla 6, visualizamos el consumo de energía general de la estructura del controlador remoto y el circuito controlador del brazo robot permitiendo saber cuánto es el consumo por minuto del brazo robótico ya que este

modelo donde se visualiza en la tabla 6 consume menos porción de lo normal a comparación de otros modelos.

Tabla 6 Gasto energético del prototipo robot.

Elementos	cantidad	consumo	Recorrer ruta
Motores	4	140 mA	560 mA
Puente H	1	50 mA	50 mA
Arduino Mega	1	50 mA	50mA
Arduino nano	1	50 mA	50 mA
servos	4	800 mA	1600 mA
Antena NRF	2	115 mA	230 mA
Total consumo	-	-	2540 mA

4.1.4.3 Pruebas y resultados del prototipo de brazo robótico

Se visualizan en la tabla 7 los resultados para la semejanza de las coordenadas utilizando cinemática inversa para la ubicación del punto en la zona de labor del brazo manipulador robótico, donde se muestran las coordenadas obtenidas de la manipulación del brazo robot experimentalmente en 5 pruebas diferentes.

Tabla 7 Resultados experimentales de la cinemática inversa del movimiento del brazo robótico.

TEORICAS			EXPERIMENTALES			%
$x_t(cm)$	$y_t(cm)$	$z_t(cm)$	$x_e(cm)$	$y_e(cm)$	$z_e(cm)$	Error
3.5	3.5	10.3	3.3	0	2.5	11.5
5.5	5.5	9.5	6.5	3.5	3	7.5
7.5	6.5	0	5	2.5	8	1.5
1.5	6.5	0	1	2.5	4.5	0.5
-5.5	5.5	1	-4.5	4.5	1.5	0.5

En esta parte del análisis de los resultados encontrados con respecto a la precisión tenemos el cuadro de comparación que identifica el porcentaje de precisión que posee la pinza o efector final con respecto al punto de ubicación dentro del espacio de trabajo donde se visualiza en las figuras 89 y 90.

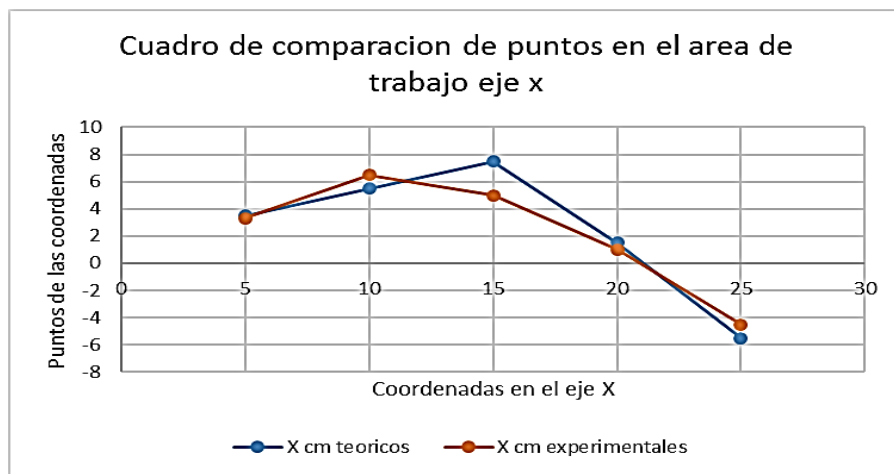


Figura 89 Cuadro para la comparación en los puntos en el eje X para la precisión del efector final.

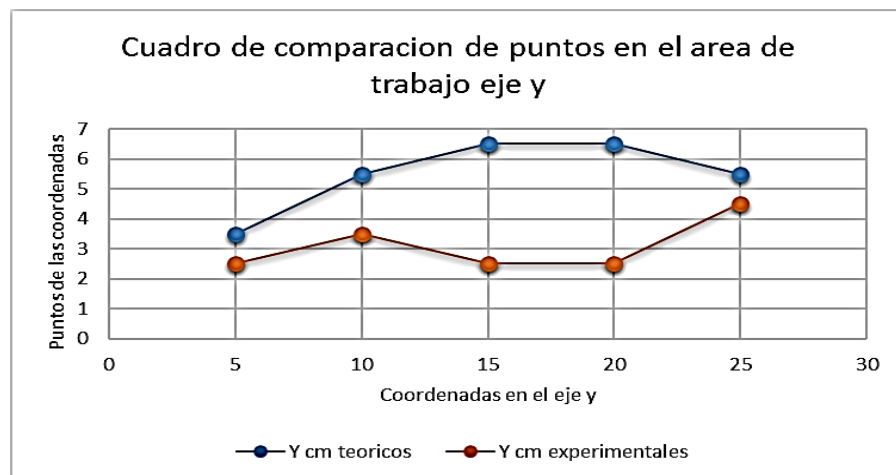


Figura 90 Cuadro de comparación de los puntos en el eje Y para la precisión del efector final.

En la tabla 8 se muestra las coordenadas obtenidas de la experimentación con el brazo robótico en su espacio de trabajo y se calculó utilizando un área milimétrica para determinar físicamente las coordenadas que determina su movimiento.

Tabla 8 Resultados experimentales de la cinemática directa del movimiento del brazo robótico.

Ángulos			Teóricos			Experimentales			%
θ_1	θ_2	θ_3	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Error
55	50	50	3.5	3.5	10.3	3.3	2.5	10.3	11.5
70	40	85	5.5	5.5	9.5	6.5	3.5	9	7.5
40	35	80	7.5	6.5	0	5	2.5	0	1.5
90	40	80	1.5	6.5	0	1	2,5	4,5	0.5
140	40	70	-5.5	5.5	1	-4.5	4.5	1.5	0.5

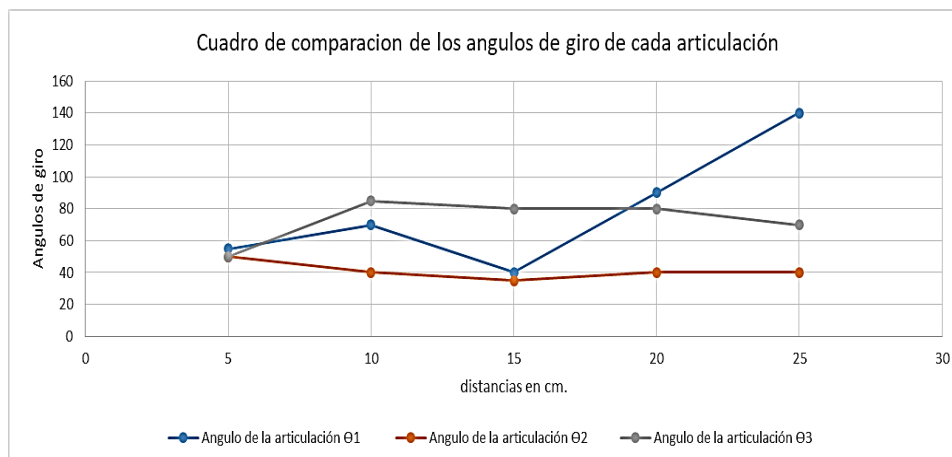


Figura 91 Cuadro de comparación de las medidas en los ángulos de rotación de los dispositivos mecánicos.

Se visualiza la figura 92 los pasos experimentales que se realizó para ubicar las coordenadas en el espacio de trabajo con respecto de la parte de la base del manipulador robótico.

Mostrando la facilidad con la que se desplaza en toda su área de trabajo.

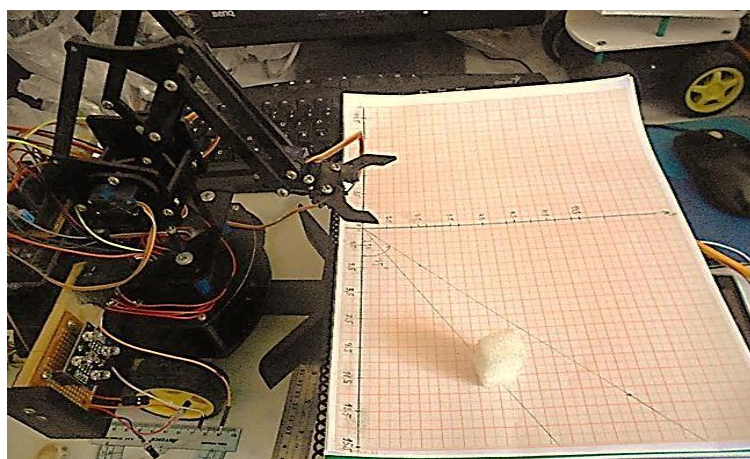


Figura 92 Pruebas para las ubicaciones de las coordenadas en el área de trabajo del brazo robótico.

4.2. Discusiones de los resultados

Los resultados confirman la capacidad empleada del Arduino mega 2560 para lograr el procesamiento del modelado de la cinemático inverso del brazo robot, a medida que se requiere realizar un trabajo más forzado el prototipo requería de mayor precisión puesto que se necesita del control PID para realizar procesos más complejos. Las características físicas tomadas dentro de la tabla Denavit-Hartenberg ayudan a tener una mayor precisión al coger un objeto dentro de su zona de labor del manipulador robótico.

En la estructura mecánica del manipulador robótico la configuración antropomórfica tiene una mejor coordinación en sus movimientos y mayor velocidad de respuesta al desplazamiento de toda la articulación. Si comparamos con otros modelos como por ejemplo el robot SCARA esta tiene un mayor rango del área de su trabajo hasta 36 cm de diámetro donde tiene un radio 18 cm donde tiene la comparación con el robot SCARA que es de 15 cm.

La caracterización del brazo robótico tiene una precisión del 5% para realizar los movimientos y mediante el análisis su área de trabajo es de 36 cm tomando como referencia la base del robot, ya que la zona del manipulador no es fija puesto que está unida a una base móvil que le permite desplazarse por un área uniforme, como un laboratorio para hacer pruebas experimentales.

Este prototipo de brazo robótico móvil tiene un consumo de 3 Amperios de corriente a diferencias de otros modelos que consumen entre 4 a 5 Amperios de corriente.

Posee una antena de comunicación inalámbrica con un alcance dentro de un área de 25 cm de largo permitiéndole comunicarse con facilidad para que pueda hacer pruebas experimentales en su entorno de trabajo. La antena NRF24L01 es asequible para esta clase de comunicaciones.

En el modelo dinámico mostramos el margen de error que es del 5% permitiendo que los servomotores tengan una precisión casi perfecta para ubicar los puntos en el área de trabajo en esta parte se pudo aplicar el método PID para analizar cuanta precisión tiene en estado de reposo y cuanto en esta activo en comparación de un modelo de robot SCARA que tiene un margen superior al 10% de precisión.

Para el sistema móvil del robot. Que es la estructura de locomoción del brazo robot antropomórfico se utilizó la clasificación Ackerman que está compuesto este diseño por cuatro ruedas y tiene una adecuada estabilidad permitiéndole tener un amplio espacio de movilidad y trabajo al brazo robótico por su parte el consumo de los cuatro motores y de todo el sistema de control de potencia es de 660mA. Considerando solo la plataforma del hardware de control y los actuadores (motores) que es la parte principal para el movimiento de la base.

Con respecto al robot antropomórfico este diseño mostro una mayor destreza al momento de trabajo dentro de su área de trabajo mejor que los robots de configuración cartesiana, cilíndrica, esférica y SCARA.

Durante el proceso e implementación se observó que los servomotores utilizados eran bastante ligeros para realizar cualquier movimiento pero tenían el inconveniente de no tener las medidas ideales para el acople con las articulaciones del robot es por eso que se tuvo que adaptar para que puedan trabajar con ese modelo de servomotores , mayormente los servo motores que se usan de mayor potencia para levantar objetos mucho más pesantes, pero solo se requería levantar objetos de 9 gramos de peso para realizar pruebas.

En la construcción del sistema de control del robot se colocó dos antenas (NRF24L01) para la comunicación entre los dispositivos y permitieran hacer una demostración práctica donde pueda hacer los cálculos respectivos de las coordenadas recibidas por parte del control emisor del robot que actúa a una frecuencia de 2,4 GHz dentro de la banda GFSK, que es una banda libre de licencia para la comunicación libre donde visualizamos en la figura 87 y 88 esta comunicación tuvo un inconveniente a la hora de enviar datos al procesador principal que es la velocidad con la que envía y teniendo alguna interferencia a la hora de reiniciar el proceso para evitar estos inconvenientes se colocó unos filtros (condensadores electrolíticos) para que no se corrompan las señales a la hora de

enviar datos , pero es más seguro programarlos internamente para asegurar su buena transmisión.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

- Se implementó el modelo de la cinemática directa e inversa de la maquina robotizada antropomórfico para tres grados de libertad obteniendo los tres ángulos de giro de las articulaciones (q_1, q_2, q_3) , se ubicó el punto (x_0, y_0, z_0) perteneciente al modelo de la cinemática directa que permite orientarse al efector final o pinza de aguarre, estos dos modelos fueron desarrollados por el método geométrico formando al final la tabla Denavit-Hartenberg donde se pudo desarrollar la matriz de transformación Homogénea Denavit-Hartenberg.
- Se ensambló el sistema mecánico y electrónico del brazo robótico móvil de tres eslabones, donde el funcionamiento del brazo robótico es aceptable; mostrando una resistencia a la hora de la experimentación pudiendo levantar una pieza de 9 gramos.
- Se caracterizó el funcionamiento del brazo robótico móvil teniendo como resultado la ubicación de la posición del efector final o pinza de agarre con una precisión del 5% del margen de su error dentro de una zona de labor de 36 cm de diámetro y 18 cm de radio en cuyo centro de la circunferencia del área de trabajo se ubica la base del brazo robótico y tiene una distancia de desplazamiento de 18 cm de largo para el alcance de las piezas con respecto al límite superior de su área de trabajo. Asimismo, los resultados del

desplazamiento del sistema de locomoción (chasis móvil) fueron ideales los motores de la parte delantera respondieron a las ordenes establecidas como “Adelante, Izquierda, Derecha y Atrás” los 4 motores DC consumen 2 A de corriente y 6 voltios.

CAPÍTULO VI

SUGERENCIAS

- Desarrollar nuevos sensores aplicados al prototipo experimental para ver la visualización y la ubicación mejor en respuesta a su área de trabajo permitiendo desarrollar y optimizar con garantía las ecuaciones desplazamiento en el brazo robótico móvil.
- Utilizar otro modelo de arduino más avanzado para procesar información como también recolectar información en tiempo real para luego enviarlo a otro ordenador esto con la finalidad de dar una nueva aplicación.
- En nuestro caso el prototipo experimental fue desarrollado con madera por el bajo costo y la fácil elaboración, que para fines del prototipo fue suficiente, pero para desarrollar otros modelos es necesario realizar otros tipos de configuraciones en sus articulaciones para mejorar e incluso diseñar otros modelos que permitan hacer otra clase de demostraciones. A futuro este módulo experimental, permitirá desarrollar nuevas técnicas y métodos de estudio para la investigación en el área industrial para la eficiencia en la producción.
- Realizar la dinámica de control para la estabilidad del prototipo del robot ya que al realizar pruebas esta tenga una mayor precisión al momento de la ubicación de los objetos en el lugar de labor.

- Realizar un algoritmo donde queda ubicado la cinemática de control ya que esta ayudaría a la optimización del programa consumiendo menos recursos al momento de compilar cada programa perteneciente al brazo robótico.

- Se recomienda que para fines de investigación más profunda en cuanto a la aplicación del robot antropomórfico dotarle de una cámara de video para el reconocimiento de piezas y la ubicación de su lugar en la zona de labor y ver las ventajas que tenga este para el procesamiento del algoritmo de control.

- Las ecuaciones (4.7) y (4.8) son bastante satisfactorias para el movimiento, pero no para la estabilidad sería interesante hacer el modelo dinámico para incluir algunas fuerzas externas al brazo robótico para ver su estabilidad al momento de coger piezas en su área de trabajo.

- Se recomienda recubrir los circuitos del prototipo de brazo robótico para tener una mayor garantía en su funcionamiento y pueda ser utilizado en otras aplicaciones de mayor exigencia.

BIBLIOGRAFÍA

Alonzo Freddy, M. (2014). *Diseño, Construcción y Control de un Brazo robótico*.

(Electrónico Pre-Grado), Universidad San Francisco de Quito, Quito.

Arduino. (26 de 12 de 2018). *Arduino*. Obtenido de Arduino.

Arduino. (12 de 12 de 2018). *Arduino*. Obtenido de Arduino.

Arduino. (26 de 12 de 2018). *Arduino*. Obtenido de Arduino.

Autodesk, I. (28 de 11 de 2018). *Instructables*. Obtenido de Instructables:

<https://www.instructables.com/id/MeArm-Color-Chip-Sorter/>

boxtec.ch. (12 de 12 de 2018). *Helve PIC32*. Obtenido de Helve PIC32.

Cristian Karl L.G. (2015). *Diseño e implementación de un sistema de control e interfaz para un brazo robótico de 5 g.l.d.* (Electrónico Pre-Grado), Pontificia Universidad Nacional del Perú, Lima.

Coursera. (26 de 12 de 2018). *Coursera*. Obtenido de Coursera.

Cortéz, F. R. (2015). *Arduino aplicaciones en robótica, mecatrónica e ingenierías*.

México: Alfaomega.

Cortéz, F. R. (2011). *Robotica control de robots manipuladores*. Mexico:

Alfaomega Grupo Editorial.

Cortéz, F. R. (2012). *Matlab Aplicado a Robotica y Mecatronica*. Mexico:

Alfaomega Grupo Editor.

Cortéz, F. R. (2013). *Mecatrónica control y Automatización*. México: Alfaomega Grupo Editor.

Coursera. (26 de 12 de 2018). *Coursera*. Obtenido de Coursera.

DFRobot. (12 de 12 de 2018). *DFRobot*. Obtenido de DFRobot.
edX. (26 de 12 de 2018). *edX*. Obtenido de edX.

Electrotec-Perú. (26 de 12 de 2018). *Electrotec*. Obtenido de Electrotec.

giltesa. (26 de 12 de 2018). *giltesa proyectos*. Obtenido de giltesa proyectos.

GitHub. (26 de 12 de 2018). *GitHub, Inc*. Obtenido de GitHub, Inc.

Guadalajara, U. d. (11 de 12 de 2018). <http://platea.pntic.mec.es/>. Obtenido de <http://platea.pntic.mec.es/>:
http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0708/archivos/_15/Tema_5.4.htm

Hackaday. (26 de 12 de 2018). *Hackaday.IO*. Obtenido de Hackaday.IO:
<https://hackaday.io/project/181-mearm-your-robot>

Hermosilla, D. M. (2016). Generación de trayectorias para el brazo robótico (ArmX). *Scielo*, p.3.

MakerBot. (26 de 12 de 2018). *Thingiverse*. Obtenido de Thingiverse.

Mechatronics, N. (26 de 12 de 2018). *Naylamp Mechatronics*. Obtenido de Naylamp Mechatronics.

NAYLAMP. (4 de 12 de 2018). *naylamp mechatronics*. obtenido de [naylamp mechatronics](#).

Piura, E. E. (26 de 12 de 2018). *ElectroPro*. Obtenido de [ElectroPro](#).

Project, D. (26 de 12 de 2018). *open source dronecode*. obtenido de [open source dronecode](#).

Robotica, W. d. (11 de 12 de 2018). *Wiki de Robotica*. Obtenido de Wiki de Robotica: <http://wiki.robotica.webs.upv.es/wiki-de-robotica/cinematica/>

S., D. M. (2014). *Cálculo y optimización del espacio de trabajo de un .* España: Pública de navarra, Pamplona.

Technology, M. I. (26 de 12 de 2018). *mitopencourseraware*. obtenido de [mitopencourseraware](#).

ANEXO

1.1. Código del control remoto inalámbrico del prototipo de brazo robótico móvil (Arduino nano).

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
#define CE_PIN 9
#define CSN_PIN 10
#define JOYSTICK_X A0
#define JOYSTICK_Y A1
#define JOYSTICK_A A2
#define JOYSTICK_B A3
const uint64_t pipe = 0xE8E8F0F0E1LL;
RF24 radio (CE_PIN, CSN_PIN);

int joystick [8];

const int buttonPin = 1; //3
const int buttonPin2= 2; //9
const int buttonPin3= 3; //10
const int buttonPin4= 4; //11
int upbut= 5;

int rightbut = 6;

int downbut = 7;

int leftbut = 8;

int chile;

int ecuador;

int peru;
```

```

int brasil;

byte estado=1;
void setup ()
{
  Serial.begin(9600);
  radio.begin();
  radio.openWritingPipe(pipe;
  lcd.init();

  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0,0);

  lcd.print(" Proyecto tesis"); //( " Proyecto tesis")
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("  UNJBG "); // ("  UNJBG ")
  delay(3000);
  lcd.clear();

  pinMode(buttonPin,INPUT);

  pinMode(buttonPin2,INPUT);
  pinMode(buttonPin3,INPUT);
  pinMode(buttonPin4,INPUT);
  digitalWrite(buttonPin, HIGH);
  digitalWrite(buttonPin2, HIGH);
  digitalWrite(buttonPin3, HIGH);
  digitalWrite(buttonPin4, HIGH);
  pinMode(upbut,INPUT);
  pinMode(rightbut,INPUT);
  pinMode(downbut,INPUT);
  pinMode(leftbut,INPUT);
  digitalWrite(upbut, HIGH);
  digitalWrite(rightbut, HIGH);
  digitalWrite(downbut, HIGH);

  digitalWrite(leftbut, HIGH);
}

void loop()
{
  if (estado == 1) {
  do {
    LCDmenu0();
  } while (estado == 1); lcd.clear();
}
}

```

```

if (estado == 2) {
do {
    LCDmenu1();
} while (estado == 2);
lcd.clear();
}
if (estado == 3) {
do {
    LCDmenu2();
} while (estado == 3);
    lcd.clear();
}
if (estado == 4) {
do {
LCDmenu4();
} while (estado == 4);
lcd.clear();
}
if (estado == 5) {
do {
} while (estado == 5);
lcd.clear();
}
if (estado == 6) {
do {
} while (estado == 6);
lcd.clear();
}
if (estado == 7) {
do {
} while (estado == 7);
lcd.clear();
}
    if (estado == 8) {
do {

```

```

} while (estado == 8);
lcd.clear();
}
if (estado == 9) {
do {
} while (estado == 9);
lcd.clear();
}
}
void LCDmenu0()
{
lcd.setCursor(2, 0);
lcd.print("Control Manual");      //("Control Manual")
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("1.");
lcd.setCursor(2, 1);
lcd.print("Autonomia");          // ("Autonomia")
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("2.");
if (digitalRead(buttonPin) == LOW)
{
estado = 2;
lcd.clear();
}
if (digitalRead(buttonPin2) == LOW)
{
estado= 3;
lcd.clear();
}
}
void LCDmenu1()
{
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("solo");                //("solo")
lcd.setCursor(0, 3);

```



```

lcd.setCursor(11, 1);
lcd.print("ATRAS");
delay(500);
if (digitalRead(buttonPin) == LOW)
{
estado = 7;
}
if (digitalRead(buttonPin2) == LOW)
{
estado = 8;
}
if (digitalRead(buttonPin3) == LOW)
{
estado = 9;
}
if (digitalRead(buttonPin4) == LOW)
{
estado = 1;
}
void LCDmenu4()
{
lcd.setCursor(2, 0);
lcd.print("imaginario");
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("1.");
lcd.setCursor(2, 1);
lcd.print("metas");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("2.");
if (digitalRead(buttonPin4) == LOW)
{
estado = 1;
}
}
joystick[0] = analogRead(JOYSTICK_X);

```

```

joystick[1] = analogRead(JOYSTICK_Y);
joystick[2] = analogRead(JOYSTICK_A);
joystick[3] = analogRead(JOYSTICK_B);
joystick[4] = digitalRead(upbut);
joystick[5] = digitalRead(rightbut);
joystick[6] = digitalRead(downbut);
joystick[7] = digitalRead(leftbut);
radio.write( joystick, sizeof(joystick) );

Serial.print("X = ");
Serial.print(analogRead(JOYSTICK_X));

Serial.print(" Y = ");
Serial.print(analogRead(JOYSTICK_Y));

Serial.print(" Ac = ");
Serial.print(analogRead(JOYSTICK_A));

Serial.print(" Bc ");
Serial.print(analogRead(JOYSTICK_B));

Serial.print(" Up = ");

Serial.print(digitalRead(upbut));

Serial.print(" Right = ");

Serial.print(digitalRead(rightbut));

Serial.print(" Down = ");

Serial.println(digitalRead(downbut));

Serial.print(" Left = ");

Serial.print(digitalRead(leftbut));
}

```

1.2. Cogido del Procesador del prototipo del brazo robótico receptor (Arduino Mega 2560).

```

#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
#include <Servo.h>

#define CE_PIN 9
#define CSN_PIN 10

const uint64_t pipe = 0xE8E8F0F0E1LL;

```

```

const int servo1 = 6;
const int servo2 = 7;
const int servo3 = 5;
const int servo4 = 4;

int joystickPanSpeed = 0;
int joystickTiltSpeed = 0;

int velocidad1 = 0;
int velocidad2 = 0;

int servo1val = 90;
int servo2val = 90;
int servo3val = 90;
int servo4val = 90;

int led = 22;
int led2 = 24;
int led3 = 26;
int led4 = 28;

Servo myservo1;
Servo myservo2;
Servo myservo3;
Servo myservo4;

RF24 radio(CE_PIN, CSN_PIN);

Int joystick[8];

byte IN1 = 2;
byte IN2 = 3;
byte IN3 = 8;
byte IN4 = 11;
byte IN5 = 12;
byte IN6 = 13;
byte IN7 = 23;
byte IN8 = 25;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  delay(1000);
}

```

```

myservo1.attach(servo1);
myservo2.attach(servo2);
myservo3.attach(servo3);
myservo4.attach(servo4);
myservo1.write(90);
myservo4.write(120);

Serial.println("Nrf24L01 Receiver Starting");
radio.begin();

radio.openReadingPipe(1, pipe);
radio.startListening();;

pinMode(led, OUTPUT);
pinMode(led2, OUTPUT);
pinMode(led3, OUTPUT);
pinMode(led4, OUTPUT);
pinMode(IN1, OUTPUT);
pinMode(IN2, OUTPUT);
pinMode(IN3, OUTPUT);
pinMode(IN4, OUTPUT);
pinMode(IN5, OUTPUT);
pinMode(IN6, OUTPUT);
pinMode(IN7, OUTPUT);
pinMode(IN8, OUTPUT);
}

void loop()
{
if ( radio.available() )
{
bool done = false;
while (!done)
{
radio.read( joystick, sizeof(joystick) );
joystickPanSpeed = (joystick[0] - 512) / 50;
joystickTiltSpeed = (joystick[1] - 512) / -50;
velocidad1 = (joystick[2] - 512) / 50;
velocidad2 = (joystick[3] - 512) / -50;
int upbut = joystick[4];

```

```

int rightbut = joystick[5];
int downbut = joystick[6];
int leftbut = joystick[7];

servo1val = constrain((servo1val + joystickPanSpeed ), 1, 180);
servo2val = constrain((servo2val + joystickTiltSpeed), 70, 180);
servo3val = constrain((servo3val + velocidad1 ), 50, 150);
servo4val = constrain((servo4val + velocidad2 ), 50, 150);
myservo1.write(servo1val);

myservo2.write(servo2val);
myservo3.write(servo3val);
myservo4.write(servo4val);

Parar();
digitalWrite(led, LOW);
digitalWrite(led2, LOW);
digitalWrite(led3, LOW);
digitalWrite(led4, LOW);
if (upbut == LOW)
{
digitalWrite(led, HIGH);
Frente();
}
else if (rightbut == LOW)
{
digitalWrite(led2, HIGH);
Detras();
}
else if (downbut == LOW)
{
digitalWrite(led3, HIGH);
Derecha();
}
else if (leftbut == LOW)
{
digitalWrite(led4, HIGH);

```

```

Izquierda());
}
Serial.print("X = ");
Serial.print(joystick[0]);
Serial.print(" Y = ");
Serial.print(joystick[1]);
Serial.print(" Ac = ");
Serial.print(joystick[2]);
Serial.print(" Bc = ");
Serial.print(joystick[3]);
Serial.print(" Up = ");
Serial.print(joystick[4]);
Serial.print(" Right = ");
Serial.print(joystick[5]);
Serial.print(" Down = ");
Serial.println(joystick[6]);
Serial.print(" Left = ");
Serial.print(joystick[7]);
delay(100);
}
}
else
{
Serial.println("No radio available");
}
}
void Parar()
{
analogWrite(IN3, 0);
analogWrite(IN4, 0);
analogWrite(IN1, 0);
analogWrite(IN2, 0);
analogWrite(IN7, 0);
analogWrite(IN8, 0);

```

```

    analogWrite(IN5, 0);
    analogWrite(IN6, 0);
}
void Derecha()
{
    analogWrite(IN3, 0); //250
    analogWrite(IN4, 0);
    analogWrite(IN1, 0); //250
    analogWrite(IN2, 250);
    analogWrite(IN7, 250); //250
    analogWrite(IN8, 0);
    analogWrite(IN5, 0); //250

    analogWrite(IN6, 0);
}
void Izquierda()
{
    analogWrite(IN3, 250);
    analogWrite(IN4, 0); //250
    analogWrite(IN1, 0);
    analogWrite(IN2, 0); //250
    analogWrite(IN7, 0);
    analogWrite(IN8, 0); //250
    analogWrite(IN5, 0);

    analogWrite(IN6, 250); //250
}
void Frente()
{
    analogWrite(IN3, 250);
    analogWrite(IN4, 0);
    analogWrite(IN1, 0);
    analogWrite(IN2, 250);
    analogWrite(IN7, 250);
    analogWrite(IN8, 0);
    analogWrite(IN5, 0);
    analogWrite(IN6, 250);
}
void Detras()
{
    analogWrite(IN3, 0);
    analogWrite(IN4, 250);

```

```
analogWrite(IN1, 250);  
analogWrite(IN2, 0);  
analogWrite(IN7, 0);  
analogWrite(IN8, 250);  
analogWrite(IN5, 250);  
analogWrite(IN6, 0);  
}
```