



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE MECATRÓNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO
COLABORATIVO EN LA MOVILIZACIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS
CONTROLADO MEDIANTE UNA APLICACIÓN MÓVIL**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTOR: ERICK PAUL CHANGOLUISA SIMBAÑA
TUTOR: LORENA ALEJANDRA FERNÁNDEZ YÁNEZ

Quito, Ecuador

2024

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Erick Paul Changoluisa Simbaña con documento de identificación N. 1726604349
manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la
Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera
total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 28 de febrero del 2024

Atentamente,



Erick Paul Changoluisa Simbaña

1726604349

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Erick Paul Changoluisa Simbaña, con documento de identificación No.- 1726604349, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Dispositivo Tecnológico: “Diseño y construcción de un prototipo de brazo robótico colaborativo en la movilización de circuitos impresos controlado mediante una aplicación móvil”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia a lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

Quito, 28 de febrero del 2024



Erick Paul Changoluisa Simbaña

1726604349

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Lorena Alejandra Fernández Yánez, con documento de identificación No. 1717366098, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO COLABORATIVO EN LA MOVILIZACIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS CONTROLADO MEDIANTE UNA APLICACIÓN MÓVIL”, realizado por Erick Paul Changoluisa Simbaña con documento de identificación No. 1726604349, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Dispositivo Tecnológico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 28 de febrero del 2024



Ing. Lorena Alejandra Fernández Yánez, MSc.

1717366098

DEDICATORIA

Este proyecto de titulación principalmente se lo dedico a Dios y la Virgen de Guadalupe porque han sido mis pilares desde que inicie mi formación académica y brindarme esa fortaleza para nunca rendirme. A mi madre Paulina que siempre me motivó y guio en cada etapa de mi vida dándome siempre aliento para nunca rendirme. A mi padre Rolando quien me apoyó en todo momento sin importar la circunstancia, quien me enseñó el trabajo duro y honesto para ser una gran persona y ser mi ejemplo. A mis hermanos Jacqueline y Diego que han sido mi ejemplo de superación, que nunca me dejaron solo y siempre me supieron dar consejos que me ayudarían a no rendirme y brindarme la mano cuando más lo he necesitado. A mis sobrinas Itzel, Lía y Thais que siempre están para sacarme una sonrisa con sus ocurrencias y darme ánimos cuando lo he necesitado. A mi tía Elenita que ha sido como mi mamá, siempre ha estado pendiente de mí y siempre se ha preocupado por mi bienestar. A mi hermana Mónica que desde el cielo sé que está feliz por verme logrando mis metas. Finalmente, a las amistades que he formado, por darme su apoyo y brindarme una mano cuando lo he necesitado, mil gracias.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, por enseñarme desde muy pequeño que debo prepararme académica, espiritual, sentimental y físicamente; después del principal agradecimiento a Dios y a la Virgen de Guadalupe es para ellos, les agradezco por la confianza, la paciencia, el apoyo y sobre todo el esfuerzo que han hecho no solo por mi sino por toda la familia durante todos estos años, pues este logro lo hemos conseguido juntos como familia.

Agradecer a personas que han sido muy importantes durante mi camino académico:

Mis hermanos, gracias por la confianza y el apoyo que han podido brindarme cuando he tenido problemas y darme consejos para salir adelante.

Mis sobrinas que con sus ocurrencias alegran mis días.

A mi familia de parte de padre y madre que han estado pendientes del proceso académico y brindándome palabras de aliento.

A mis amigos que mal o bien han podido estar ahí para brindarme su ayuda en cualquier situación.

A mi pareja Cathi que ha sido mi apoyo en toda circunstancia y en cada momento, nunca me ha dejado dar por vencido y siempre me ha brindado paz, paciencia y ánimo para seguir adelante.

Finalmente, a todos los docentes durante mi carrera por brindarme el apoyo y conocimiento adquirido.

Índice

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	2
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	3
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	4
DEDICATORIA	5
AGRADECIMIENTO	6
Índice	7
Índice de Tablas.....	10
Índice de Figuras	11
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
JUSTIFICACIÓN	16
OBJETIVOS	17
OBJETIVO GENERAL	17
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
METODOLOGÍA.....	17
CAPÍTULO I	19
MARCO TEÓRICO	19
1.1. Mecatrónica, Robótica y Automatización.....	19
1.2. Robots	20
1.2.1. Tipos de robots	21
1.2.2. Robots Manipuladores.....	21
1.2.3. Brazo robótico	21
1.2.4. Características brazo robótico	22
1.2.5. Área de trabajo	22
1.2.6. Grados de libertad del brazo robótico	23
1.3. Instrumentación mecánica	25
1.3.1. Software SolidWorks	25
1.3.2. Impresión 3D.....	27
1.3.3. EasyEDA.....	29
1.4. Instrumentación electrónica	29
1.4.1. Controladores	30

1.4.2. Arduino.....	30
1.4.3. Programación	31
1.4.4. Servomotores.....	31
1.4.5. Módulo bluetooth HC-05	32
CAPÍTULO II.....	34
DISEÑO DEL PROTOTIPO.....	34
2.1. Definición de la estructura	36
2.1.1. Caja de control	36
2.1.2. Base	36
2.1.3. Articulaciones.....	36
2.1.4. Eslabones.....	36
2.1.5. Actuadores.....	36
2.1.6. Herramienta Final.....	37
2.2. Diseño mecánico.....	37
2.2.1. Eslabón 0 o base del robot.....	38
2.2.2. Eslabón 1 o cintura del robot.....	39
2.2.3. Eslabón 2 o brazo	40
2.2.4. Eslabón 3 o antebrazo del robot	40
2.2.5. Eslabón 4 o muñeca del robot	41
2.2.6. Gripper	42
2.3. Selección de servomotores.....	42
2.3.1. Par máximo requerido	42
2.4. Cinemática	47
2.4.1. Método de Denavit-Hartenberg.....	47
2.4.2. Cinemática Directa	48
2.4.3. Cinemática inversa	51
2.4.4. Método Jacobiano	54
2.5. Análisis de Esfuerzo	58
2.6. Análisis de Tensión.....	59
2.7. Diseño electrónico	60
2.8. Esquema de conexión	61
2.9. Sistema de control (Programación).....	64
2.10. Aplicativo móvil	65
CAPÍTULO III	67
IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO	67

3.1. Fabricación.....	67
3.2. Impresión y ensamble de brazo robótico	67
3.3. Diseño y creación de PCB	68
3.4. Sistema electrónico y de control	69
3.5. Programación microcontrolador	71
3.6. Desarrollo del aplicativo móvil.....	73
3.6.1. Interfaz de usuario	75
CAPÍTULO IV	76
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	76
4.1. Pruebas y análisis.....	76
4.1.1. Pruebas de funcionamiento	77
4.1.2. Recolección de datos.....	77
4.1.3. Precisión y repetibilidad.....	78
4.2. Cálculo de costos	79
4.2.1. Elementos de fabricación	79
4.2.2. Mano de obra.....	81
4.2.3. Resumen de costos realizados	81
4.3. VAN Y TIR.....	82
CAPÍTULO V.....	84
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
5.1. Conclusiones	84
5.2. Recomendaciones	85
BIBLIOGRAFÍA	86
ANEXOS	92
Anexo A.....	92
Anexo B.....	94

Índice de Tablas

Tabla 1. Datos para cálculo de GDL.	25
Tabla 2 Obtención datos par pico y par nominal.....	45
Tabla 3. Datos obtenidos para la selección de servomotores. El autor.	45
Tabla 4. Características servomotores. El autor.	46
Tabla 5. Parámetros Denavit-Hartenberg para el brazo robótico.	47
Tabla 6. Recopilación de datos.....	78
Tabla 7. Precisión y repetibilidad del robot.....	79
Tabla 8. Costo de elementos utilizados para la construcción de prototipo. El autor.....	80
Tabla 9. Costo mano de obra indirecta. El autor	81
Tabla 10. Resumen de costos para desarrollo de prototipo. El autor	81
Tabla 11. VAN y TIR del mecanismo. El autor	83

Índice de Figuras

Figura 1. Espacio de trabajo robot Configuración esférica.[28].....	23
Figura 2. Diagrama de eslabones, uniones y movimiento de brazo robótico.....	24
Figura 3. Interfaz Software SolidWorks.....	26
Figura 4. Impresora 3D Creality Ender 3 v2 NEO	27
Figura 5. Interfaz software EasyEDA [30].....	29
Figura 6. Microcontrolador Arduino Uno [25].....	31
Figura 7. Módulo Bluetooth HC-05 [26].....	32
Figura 8. Diagrama de bloques sobre el desarrollo del brazo robótico. El autor.	35
Figura 9. Brazo robótico manipulador con gripper.	38
Figura 10. Base de brazo robótico.....	39
Figura 11. Cintura del robot o eslabón 1.	39
Figura 12. Brazo o eslabón 2.....	40
Figura 13. Eslabón 3 o antebrazo del robot.	41
Figura 14. Eslabón 4 o muñeca del robot.	41
Figura 15. Herramienta final o gripper.....	42
Figura 16. Interfaz para cálculo de selección de motores en Matlab.	43
Figura 17. Obtención de par pico (1) y par nominal (2) en interfaz de Matlab para cada par articulado.	44
Figura 18. Análisis de Esfuerzo en Software.	58
Figura 19. Coeficiente de seguridad del brazo robótico.....	59
Figura 20. Análisis de Tensión en Software.....	59
Figura 21. Diagrama de flujo - Diseño electrónico brazo robótico. El autor.	60
Figura 22. Esquema de alimentación microcontrolador.....	61
Figura 23. Esquema conexión de servomotores con microcontrolador.....	62
Figura 24. Esquema conexión módulo bluetooth con microcontrolador.....	63

Figura 25. Diagrama circuito electrónico en software Proteus. El autor.....	64
Figura 26. Sistema de control - programación.	65
Figura 27. Diagrama de bloques desarrollo de aplicativo móvil.....	66
Figura 28. Impresión piezas brazo robótico	68
Figura 29. Diseño PCB para prototipo de brazo robótico.	69
Figura 30. Conexión microcontrolador y módulo bluetooth.	69
Figura 31. Conexión alimentación a circuito del mecanismo.	70
Figura 32. Conexión de actuadores del mecanismo.	70
Figura 33. Diagrama de bloques programación de mecanismo.....	72
Figura 34. Diagrama de bloques programación de app móvil.....	74
Figura 35. Interfaz usuario aplicativo móvil	75
Figura 36. Prototipo finalizado y listo para pruebas.....	76
Figura 37. Posición inicial y final de la trayectoria del mecanismo.....	77

RESUMEN

El presente proyecto se centra en el diseño, desarrollo, programación y análisis de un prototipo de brazo robótico colaborativo en la movilización de circuitos impresos que será controlado mediante un aplicativo móvil. El propósito principal de este trabajo es evaluar el rendimiento, la precisión y eficiencia que disponga el brazo robótico, así como su capacidad de realizar una tarea de manera autónoma.

A continuación, se realiza el análisis cinemático para determinar los grados de libertad que posee el brazo robótico, las posiciones y orientaciones de las articulaciones, velocidades lineales y angulares de las articulaciones del brazo robótico.

Posterior, se lleva a cabo un análisis dinámico para comprender el comportamiento del gripper en el brazo robótico durante su operación, así determinar cómo influye el rendimiento y la estabilidad en el agarre de un objeto.

Finalmente, para el desarrollo del prototipo se basó en una metodología de diseño mecánico, el cual incluyó análisis de requisitos, selección de componentes, rediseño y reacondicionamiento de la estructura mecánica y la implementación del sistema de control.

Palabras clave: brazo robótico, sistema de control, sistema electrónico, eficiencia, cinemática, análisis dinámico.

ABSTRACT

This project focuses on the design, development, programming and analysis of a prototype collaborative robotic arm in the mobilization of printed circuit boards that will be controlled by a mobile application. The main purpose of this work is to evaluate the performance, accuracy and efficiency of the robotic arm, as well as its ability to perform a task autonomously.

Next, the kinematic analysis is performed to determine the degrees of freedom of the robotic arm, the positions and orientations of the joints, linear and angular velocities of the robotic arm joints.

Subsequently, a dynamic analysis is carried out to understand the behavior of the gripper on the robotic arm during its operation, thus determining how performance and stability influence the grasping of an object.

Finally, the development of the prototype was based on a mechanical design methodology, which included requirements analysis, component selection, redesign and reconditioning of the mechanical structure and implementation of the control system.

Keywords: robotic arm, control system, electronic system, efficiency, kinematics, dynamic analysis.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para la manipulación de circuitos impresos o denominadas placas electrónicas, existen componentes los cuales al estar en contacto con el ser humano llegan a deteriorarse con mayor facilidad mediante la energía estática enviada por el cuerpo. Esta energía puede causar que los elementos o la placa entera sufra deterioros y quede completamente inservible. Por tal razón, en la industria, para evitar estos daños se debe trabajar en una estación que sea adecuada y con el equipo de trabajo sofisticado.

Igualmente, en el momento del ensamble de estas placas con su respectiva carcasa, los componentes implementados al ser sumamente pequeños pueden llegar a romperse y ocasionar un cortocircuito que producirá el daño del circuito impreso. Al instante que se genera un cortocircuito los componentes más propensos a deteriorarse son los circuitos integrados correspondientes con la placa electrónica, componentes de audio y diodos que ayudan al funcionamiento del dispositivo. Además, pueden existir una mala conexión debido a problemas de soldadura, lo cual perjudicaría el funcionamiento del circuito impreso.

JUSTIFICACIÓN

El desarrollo del proyecto consiste en el diseño y construcción de un brazo robótico el cual va a ser controlado mediante un aplicativo móvil conectado mediante bluetooth, este mecanismo ayuda a evitar que componentes electrónicos sufran daños al momento de ser reparados o movilizadas por el ser humano, por la energía estática que el cuerpo genera, entonces el brazo robótico será el encargado de movilizar las placas o circuitos impresos de una estación a otra. En el efector final del brazo se dispondrá material antiestático y de material adherente para facilitar la sujeción y evitar el daño o el deterioro del circuito de la radio. Al evitar la conducción de electricidad estática se previene que al momento de movilizar de un lugar a otro la placa no sufra un deterioro de componentes electrónicos, teniendo en cuenta que mediante el aplicativo móvil ayudará a realizar la secuencia que se desea implementar en el área de trabajo. Esta herramienta deberá ser capaz de realizar su movimiento de manera controlada y recoger las placas, para ayudar en tareas, como elegir y colocar elementos de la tarjeta electrónica.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un prototipo de brazo robótico colaborativo para la manipulación de circuitos impresos controlado mediante una aplicación móvil.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar los elementos mecánicos y electrónicos para su integración en un brazo robótico controlado mediante un aplicativo móvil.
- Implementar el prototipo mediante la integración del sistema mecatrónico para validar su funcionalidad.
- Realizar pruebas de funcionamiento para corroborar los movimientos del brazo y determinar posibles mejoras.

METODOLOGÍA

Para lograr un proyecto eficiente se realiza un cronograma de lo que se va a realizar en todo el proceso. En este caso está distribuidos por fases, la primera fase es investigar sobre el brazo en su totalidad y analizar los beneficios del proyecto, posteriormente se realiza el diseño de cada una de las piezas de un brazo robótico, tomando como referencias distintos modelos, los cuales será de apoyo para llegar a obtener un diseño original y adecuado para su funcionamiento. Una vez ya diseñado se procede a ensamblar digitalmente para corroborar que las piezas tengan las dimensiones adecuadas y se pueda posicionar correctamente.

Después de terminar la primera y segunda fase, se realiza la adquisición de componentes tanto electrónicos, eléctricos y a su vez equipos para la impresión 3D correspondiente,

sin antes realizar las distintas cotizaciones para cada componente para realizar importación o su compra debida de manera nacional.

Para la siguiente fase, una vez ya adquirido los componentes, se diseña el diagrama electrónico de conexiones mediante software el cual permitirá visualizar de manera más adecuada el tipo de conexiones que se va a realizar y como va a estar configurado cada uno. Mientras se realiza las conexiones o armado del circuito electrónico con todos los componentes a la par se trabaja en la impresión 3D de las piezas correspondientes al brazo robótico, para luego realizar el ensamblado del brazo y constatar que todo esté en correcto funcionamiento.

Una vez ya ensamblado se lleva a cabo la programación del microcontrolador en este caso Arduino, el cual ayudará al desarrollo de movimiento de los servomotores implementados en el circuito electrónico. Para lograr la automatización correspondiente se lleva a cabo un aplicativo móvil que estará conectado mediante un módulo bluetooth, el cual será el encargado de controlar los movimientos y desplazamiento del brazo robótico para el lugar de trabajo correspondiente.

Al momento de tener ya desarrollado la implementación del proyecto se procede a realizar las distintas pruebas de funcionamiento para verificar el trabajo optimo que se espera como objetivo de este.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se exhibe información fundamental que permite la interpretación y desarrollo del mecanismo, características sobre un brazo robótico y los componentes que destacan en el proyecto.

1.1. Mecatrónica, Robótica y Automatización

La mecatrónica agrupa áreas de la tecnología y ciencia que implican componentes electrónicos y sistemas de medición, y a su vez sistemas de microprocesador. La mecatrónica más que solo la unión de sistemas electrónicos y mecánicos, implican todas estas tecnologías el cual se enfoca al diseño. El desarrollo de la automatización en la industria puede beneficiar a la misma, gracias a la programación producida en distintas herramientas a utilizar que facilita el desarrollo de tareas. Una ventaja de esto es que ya el ser humano no realiza acciones en las que corre peligro su vida [1,2].

La mecatrónica al ser la unión entre mecánica, electrónica y sistemas de control proporciona fundamentos para el diseño y fabricación de sistemas inteligentes. Por otro lado, la robótica se centra en el diseño e implementación de robots capaces de interactuar con su entorno y realizar tareas automatizadas. La robótica es importante debido a la aptitud de los robots al momento de realizar trabajos constantes y de mayor riesgo para la manipulación del ser humano. Mediante la robótica se ha logrado una mayor eficiencia en la industria para tener una mayor facilidad al realiza procesos complicados [3].

Al ser procesos de automatización de componentes se logra que las industrias tengan una mayor producción. Los sistemas autónomos han permitido el avance en la tecnología, a través de la optimización de procesos de producción, en la capacidad de acelerar y optimizar la producción afectada por la maquinaria y la intervención del ser humano.

Estos procesos automatizados permiten la eliminación total o parcial en la intervención de personal humano en distintos procesos de la industria [4].

1.2. Robots

Hasta 1920, año en el que se empleó el término “robot”, descende de la palabra “robota”, la cual significa servidumbre o trabajo forzado. Con el pasar del tiempo, gracias al gran desarrollo tecnológico avanzada en la computación apoyaron a compatibilizar los mecanismos autónomos para ser controlados y operasen de forma autónoma dentro de una industria.

En 1954, surge el primer robot programable a comercialización, apodado como Unimate, este robot fue diseñado por George Devol y junto con el Joseph Engel Berger fundaría la empresa Unimation la cual se convertiría en la primera empresa en fabricación de robótica en el mundo [5].

Para 1962 se inicia las primeras investigaciones sobre inteligencia artificial en el MIT y a su vez en distintas instituciones. En 1978 la empresa Unimatío desarrolla un robot PUMA el cual empieza a emplearse en la industria, específicamente en General Motors [5].

Para aplicar un robot en la industria se debe saber cómo y cuándo será el momento indicado para implementarlo. En la industria, mediante la experiencia se demuestra que un gran número de accidentes han ocurrido durante la programación y el mantenimiento aplicado, por ello es recomendable tomar todas las medias del caso para efectuar con seguridad estas operaciones, y si se encuentra una persona cerca de la estación de trabajo de maquinaria automatizada, ubicarlo fuera del alcance máximo del robot. Esto indica el cuidado que se debe tener con el personal que este destinado al área donde se encuentre

un robot. Principalmente al realizar los protocolos de seguridad necesarios se debe gestionar el ambiente de trabajo donde se ubicará esta herramienta [6,7].

1.2.1. Tipos de robots

En la actualidad existen varios tipos de robots, los cuales son de gran ayuda en las industrias modernas para distintos tipos de trabajos los cuales son:

1. Robots manipuladores
2. Robots móviles
3. Robots autónomos
4. Robots Androides

De estos tipos, para el presente proyecto se realiza como principal tema un robot manipulador, el cual es el encargado de manipular objetos y moverlos a una posición establecida.

1.2.2. Robots Manipuladores

En la industria la mayor parte de los robots actuales son especialmente brazos articulados, más conocidos como manipuladores. Un robot industrial manipulador es un dispositivo reprogramable multifuncional el cual está diseñado para para mover materiales, piezas, herramientas o distintos dispositivos especiales, esto mediante movimientos variados y programados para la ejecución de tareas [8].

1.2.3. Brazo robótico

El brazo robótico es un dispositivo el cual puede realizar distintas tareas sin la necesidad de ser controlado por el ser humano. Este dispositivo está realizado para lograr una mayor producción en la industria. Estos mecanismos han revolucionado y se han transformado en una herramienta para el desarrollo profesional y estudiantil. El brazo robótico es una

innovación tecnológica que está presente en mayormente todas las industrias de la actualidad y llevan a cabo distintos tipos de tareas. Igualmente puede utilizarse en todas las áreas que lleguen a producir distintos suplementos como plásticos y polímeros, así también en la supervisión de prensas con una precisión exacta, entre otras. [9,10]

Para conocer a profundidad sobre un brazo robótico, Fuji Kyogo en 1963 desarrolló el robot Palletizer, un brazo robótico que transportaba pallets a diferentes lugares. A partir de los años ochenta, con el gran avance en la tecnología informática, se impulsó de manera definitiva el uso de robots en las industrias para mayor facilidad de procesos de alto riesgo. [11]

1.2.4. Características brazo robótico

Al hablar sobre robots, se entiende que las características que poseen son demasiado amplias. Como se logra entender como un brazo mecánico programable que logra desarrollar tareas parecidas al brazo de un ser humano. A esos mecanismos se les puede llamar manipuladores y su característica principal se determina por su autonomía [12,13].

1.2.5. Área de trabajo

Se define el área de trabajo de un brazo robótico como el espacio tridimensional dentro del cual el brazo puede moverse y así realizar el proceso establecido sobre la estructura esférica mostrada en la Figura 1. El área de trabajo dependerá del tamaño, forma y número y tipo de articulaciones y eslabones.

Las características correspondientes sobre la estructura esférica o polar de un brazo robótico:

- Volumen de trabajo teórico $29L^3$. Donde L son los sólidos de longitud equiparable.

- Capacidad de carga dependiente de la configuración establecida por el usuario.
- Precisión en el área de trabajo.
- Aplicaciones: Carga y descarga, alimentación de máquinas, soldadura, montaje, transporte de objetos, etc. [27]

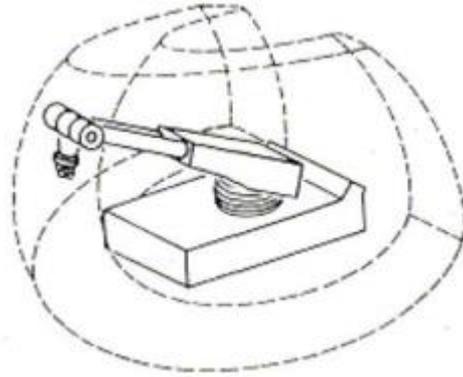


Figura 1. Espacio de trabajo robot Configuración esférica.[28]

1.2.6. Grados de libertad del brazo robótico

Los grados de libertad es la cantidad de parámetros independientes que determinan la posición del elemento terminal de un brazo robótico, por lo general este valor coincide con el número de eslabones de la cadena cinemática, para el cálculo de grados de libertad para cualquier mecanismo, el primer paso es identificar y reconocer el número de eslabones, uniones y el grado de libertad para cada movimiento a realizar en las uniones [8].

Para determinar los grados de libertad del mecanismo, el criterio de Kutzbach-Grübler sería el más utilizado, calculando mediante su ecuación la cual es:

$$m = 3(n - 1) - 2j_1 - j_2 \quad (1)$$

Donde:

m , movilidad o grados de libertad.

n , número de elementos de un mecanismo (eslabones, barras, etc.).

j_1 , número de uniones de 1 grado de libertad.

j_2 , número de uniones de 2 grado de libertad.

Para la obtención de grados de libertad se identifica el número de eslabones, articulaciones y grados de libertad que posee el brazo robótico. En la Figura 2 se exhibe el diagrama de eslabones, articulaciones y movimientos que realiza el mecanismo.

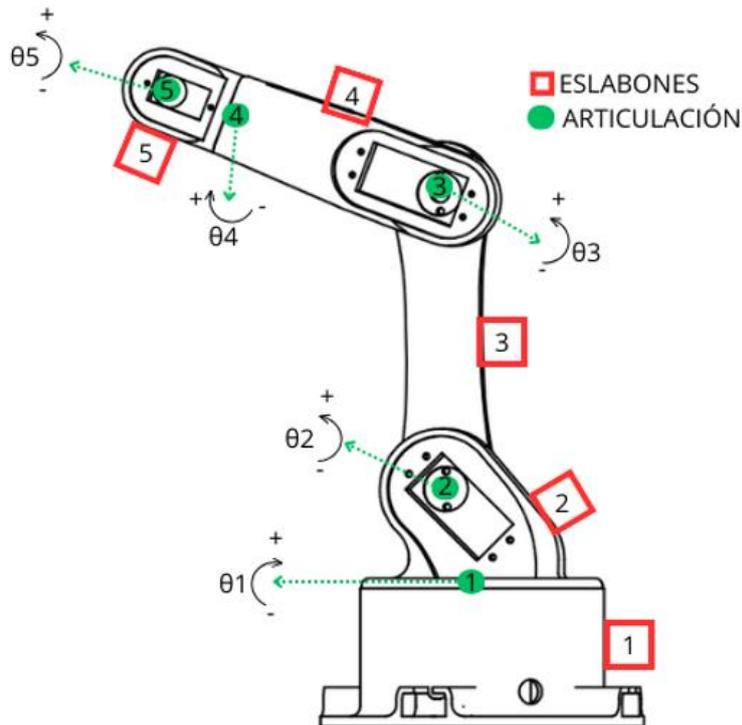


Figura 2. Diagrama de eslabones, uniones y movimiento de brazo robótico.

El prototipo de brazo robótico determina los siguientes datos indicados en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Datos para cálculo de GDL.

CRITERIO	SIMBOLO	VALOR
Número de eslabones	n	5
Uniones 1GDL	j1	3
Uniones 2 GDL	j2	1

Aplicando la ecuación (1), se realiza el cálculo y se obtiene que:

$$m = 3(n - 1) - 2j_1 - j_2$$

$$m = 3(5 - 1) - 2(3) - 1$$

$$m = 12 - 6 - 1$$

$$m = 5 \text{ GDL}$$

1.3. Instrumentación mecánica

Para la realización de este mecanismo se emplea el uso de diversos programas informáticos que han facilitado la resolución de procesos. A continuación, se expone las características, porque y para que se utiliza dentro del proyecto.

1.3.1. Software SolidWorks

Es un software de diseño CAD 3D para modelado y ensamblaje 3D y realizar planos en 2D. Este software dispone de soluciones intuitivas correspondientes para cada una de las fases de diseño. Estas soluciones se las refiere como:

- ❖ Herramientas para diseño de creación de modelos y ensamblajes de piezas.
- ❖ Herramientas para diseño en la fabricación mecánica, se encarga de automatizar y generar documentación sin planos 2D.

- ❖ Herramientas encargadas en simulaciones para evaluación del diseño y garantizar su uso.
- ❖ Herramientas encargadas en evaluar el impacto ambiental.
- ❖ Simplificar datos 3D y 2D en modo creación, conservación y utilización de contenidos [14].

Este software ayuda de manera intuitiva diseñar diversos tiempos de productos deseados para así certificar su estética, forma, ajuste y funcionalidad. También es posible realizar diversos tipos de análisis para así evaluar las características mecánicas de la pieza diseñada. En la Figura 3 se observa el entorno de trabajo intuitivo del software.

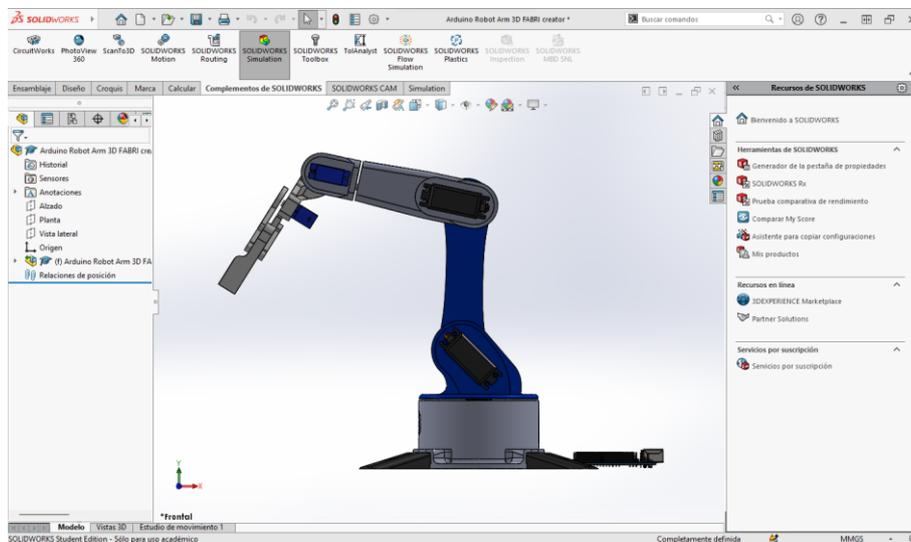


Figura 3. Interfaz Software SolidWorks

Una de las funciones que se utiliza para su visualización es la simulación de movimiento, esta herramienta permite crear una animación sobre un ensamble diseñado.

Finalmente se usa la opción de dibujo, permite la creación de planos totalmente normalizados a partir de una pieza o un ensamblaje.

Al momento de elegir el software adecuado se opta por el uso de SolidWorks por varias ventajas que favorecen al usuario. Facilita comprender el entorno a usar y el proceso de

diseño. Dentro del propio programa dispone de la opción de creación de planos de cada una de las piezas diseñadas. La gran cantidad de información que se puede adquirir al momento de realizar cálculos o análisis de características mecánicas.

1.3.2. Impresión 3D

La tecnología y el funcionamiento de una impresora 3D se desarrolla mediante una idea de creación de objetos físicos desarrollados en archivos CAD. Esta tecnología, ha ido evolucionando hasta un punto que comprende facilitar el desarrollo de piezas que antes podían ser diseños complicados y ahora son fácilmente imprimibles y replicables mediante esta herramienta [15].

Para el desarrollo del mecanismo se opta el uso de una impresora 3D reconocida en el mercado. El modelo que está a disponibilidad de uso es la impresora Creality Ender 3 v2 NEO visualizada en la Figura 4.



Figura 4. Impresora 3D Creality Ender 3 v2 NEO

Las características de operación de esta impresora son las siguientes:

- ❖ **Diámetro cama de impresión:** 220 x 220 x 250 mm
- ❖ **Diámetro del cabezal:** 0.4 mm
- ❖ **Diámetro del filamento admitido:** 1.75 mm
- ❖ **Temperatura para la cama caliente de impresión:** 110 °C
- ❖ **Máx. Velocidad de impresión:** 180 mm/s
- ❖ **Resolución de capa:** 0,1-0,4 mm (100-400 micrones)
- ❖ **Conectividad:** lector de tarjeta SD
- ❖ **Pantalla LCD:** si
- ❖ **Precisión de impresión:** +/- 0,1 mm
- ❖ **Contenido:** impresora para ensamblar [16].

Se considera utilizar PLA como material de impresión debido a la facilidad de impresión que posee y la baja propensión a la deformación, una de las principales razones es la comparación de calidad – precio, a esto conlleva a la facilidad de disponibilidad en el mercado. Este material es biodegradable y no tóxico, lo que hace que sea respetuoso con el medio ambiente y no generar gases al momento de realizar la impresión, y así brinda un acabado de buena calidad y visualmente atractivo. Las características que posee normalmente un rollo de filamento PLA son:

- ❖ **Diámetro:** 2,85 +/- 0,10 mm
- ❖ **Desviación de redondez máxima:** 0,10 mm
- ❖ **Peso neto del filamento:** 350 g / 750 g
- ❖ **Longitud del filamento:** ~44 m / ~95 m
- ❖ **Módulo de elasticidad a la tracción:** 2346,5 MPa
- ❖ **Esfuerzo de tracción a la deformación:** 49,5 MPa
- ❖ **Esfuerzo de tracción a la rotura:** 45,6 MPa
- ❖ **Resistencia a la flexión:** 103 MPa

❖ **Módulo de flexión:** 3150 MPa [17].

1.3.3. EasyEDA

EasyEDA es un software de diseño electrónico que se enfoca en la creación, diseño, modelo y simulación de circuitos electrónicos mediante el uso de herramientas EDA, la plataforma facilita la discusión de esquemas, simulaciones y placas de circuito impreso, los cuales pueden ser compartidos de manera pública o privada con diferentes usuarios. El uso de este software tiene la finalidad de diseñar y crear la placa de circuito impreso correspondiente al circuito a utilizar en el proyecto como se observa en la Figura 5 [29].

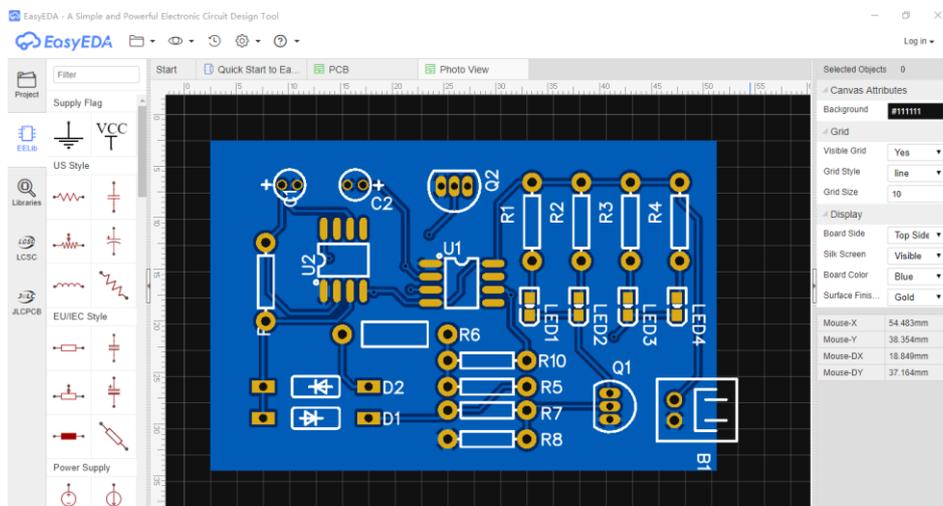


Figura 5. Interfaz software EasyEDA [30].

1.4. Instrumentación electrónica

Para el desarrollo de este proyecto es necesario el uso de una gran variedad de dispositivos ajenos de diseño y fabricación propia. Se necesita el uso de servomotores para el movimiento de diferentes articulación y eslabones. Al ser un mecanismo controlado se necesita de un microcontrolador y en la comunicación inalámbrica el uso de modulo bluetooth.

1.4.1. Controladores

Al automatizar se utiliza diversos microcontroladores que serán los encargados de ser el cerebro de todo el mecanismo. Arduino se denomina un hardware libre el cual reúne un microcontrolador reprogramable y está compuesta de pines que permiten conectar de manera sencilla y adecuada diferentes componentes electrónicos. Los microcontroladores son sencillos de manipular y realizar distintos proyectos con facilidad [18].

1.4.2. Arduino

Arduino tiende a ser una opción adecuada para el desarrollo de un prototipo de brazo robótico debido a que es fácil de usar tanto en conexión como interfaz, existen una gran variedad de recursos que sean necesarios para su trabajo, es compatible con la mayoría de los periféricos, y a su vez en relación costo-eficiencia es una gran ventaja al momento de realizar un prototipo.

Arduino Uno es un hardware el cual permite grabar instrucciones. Estas instrucciones provienen del software de Arduino IDE. La aplicación logra transmitir distintas líneas de código creada a la placa y este microcontrolador se encarga de interactuar con los distintos circuitos.

En la Figura 6 se observa la placa microcontroladora, esta placa se puede alimentar mediante conexión USB directa al computador o alimentarlo mediante un adaptador CA a CC [19].

Dispone de una variedad de pines de entrada y salida los cuales son los encargados de recibir información mediante periféricos o dispositivos de recolección de datos y luego enviar la información procesada a otros dispositivos en nuestro caso serán los servomotores [20].

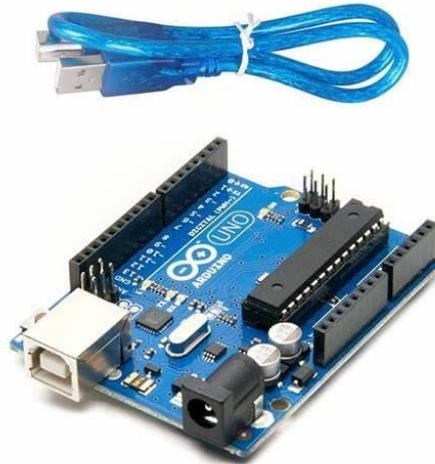


Figura 6. Microcontrolador Arduino Uno [25]

1.4.3. Programación

En el desarrollo de la programación en los microcontroladores se utiliza lenguaje de programación C. Los programas con lenguaje C pueden escribirse agrupando la codificación en funciones que a su vez se acoplen con varios módulos, de esta forma el código realizado puede reutilizarse en distintas ocasiones. Como lenguaje universal de programación ayuda en la eficiencia del dispositivo a realizar [21].

Mediante la programación en bloques se facilita el desarrollo de un aplicativo móvil en la plataforma Android. Este tipo de programación permite instruirse en el desarrollo de programación desde niños, a través de la facilidad de programación en forma de bloques, en este aspecto cada bloque posee una instrucción a realizar. La programación en bloques es el más eficiente para el desarrollo de aplicativos móviles o para iniciar en el campo de la programación. [22,23].

1.4.4. Servomotores

Los servomotores se caracterizan por la capacidad que poseen para posicionar con precisión el eje de salida en un ángulo específico, a su vez el torque y la velocidad son controlables. En el proyecto es esencial para el movimiento articulado del brazo robótico,

puesto que cada una de las articulaciones requieren de una posición y un movimiento preciso. Para determinar el tipo de servomotores a utilizar como actuadores se procede a realizar el cálculo mediante un programa elaborado por Matlab y Simulink para uso gratuito de la comunidad.

1.4.5. Módulo bluetooth HC-05

El módulo bluetooth HC-05 se considera una excelente opción para un prototipo de brazo robótico debido a la capacidad de conexión inalámbrica que posee, la configuración que maneja es sumamente sencilla al momento de realizar comunicación hacia el microcontrolador, y a su vez existe una amplia documentación sobre el uso y soporte para ayuda del usuario [24].

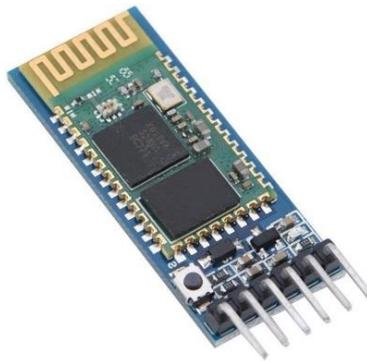


Figura 7. Módulo Bluetooth HC-05 [26]

En la Figura 7 se visualiza el módulo Bluetooth HC-05 diseñado para configuración en serie inalámbrica transparente. Este módulo es fácil de conectar y comunicar a un dispositivo.

Las características principales son:

- ❖ **Protocolo Bluetooth:** estándar de protocolo bluetooth v2.0
- ❖ **Nivel de potencia:** Class2 +6dBm
- ❖ **Banda:** 2.4 GHz – 2.48 GHz, banda ISM

- ❖ **Sensibilidad del receptor:** -85dBm
- ❖ **Protocolo USB:** USB v1.1/2.0
- ❖ **Modo de modulación:** cambio de frecuencia de Gauss
- ❖ **Características de seguridad:** autenticación y cifrado
- ❖ **Rango de voltaje de funcionamiento:** +3.3v a +6v
- ❖ **Rango de temperatura de funcionamiento:** -20°C a +55°C
- ❖ **Corriente de funcionamiento:** 40mA [24].

Se dispone el uso de este módulo para la comunicación inalámbrica que posee el proyecto y así conectar con el aplicativo móvil que se detallara más adelante.

CAPÍTULO II

DISEÑO DEL PROTOTIPO

En el presente capítulo se procede a exhibir todo el proceso de rediseño del prototipo a realizar, se enfoca en dar una solución que se adapte correctamente al problema que aborda el proyecto.

El diseño se procede a revisar, puesto que para el desarrollo del prototipo se establece un mecanismo relacionado con un robot Mitsubishi Melfa RV-2AVJ que se posee en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana y a su vez relacionar con un robot Palletizer o paletizador los cuales se encargan de movilizar objetos en una estación de trabajo predeterminada. Una vez que se revisa el diseño completamente, se realiza modificaciones y redimensionamiento de las piezas para que sean adecuadas correspondiendo al proceso que realiza el mecanismo.

En la Figura 8 se determina el proceso de desarrollo del brazo robótico, teniendo en cuenta los pasos que se realizan para un correcto funcionamiento del sistema. Se detalla desde el ensamble del prototipo sin dejar de lado en la realización del diseño correspondiente, para determinar los siguientes parámetros para el desempeño mediante construcción, desarrollo de circuitos eléctricos y electrónicos, programación del microcontrolador y al finalizar, con la ejecución de pruebas verificar que el prototipo de brazo robótico trabaja de manera eficiente.

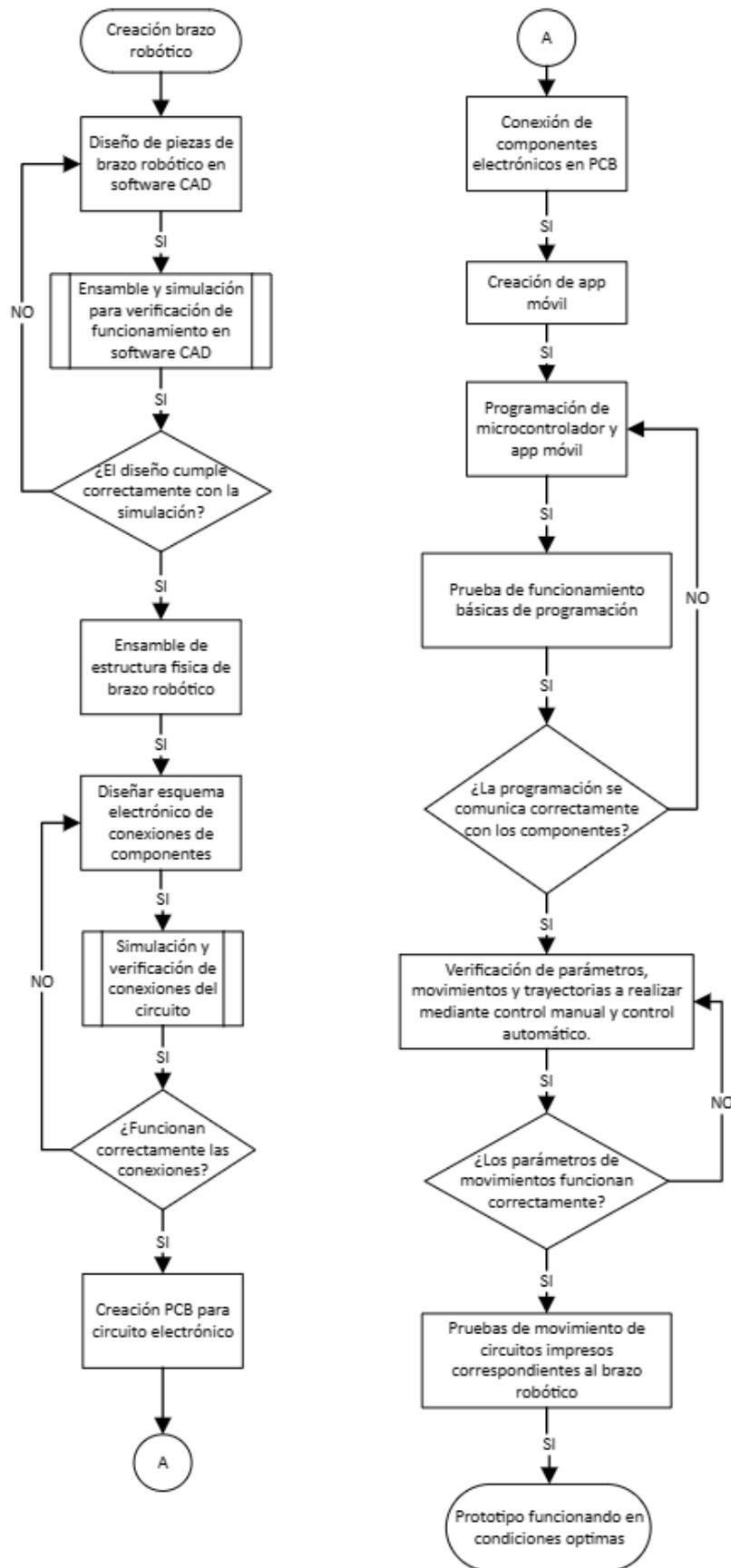


Figura 8. Diagrama de bloques sobre el desarrollo del brazo robótico. El autor.

2.1. Definición de la estructura

Parte del diseño del mecanismo es la definición de la estructura para asegurar la estabilidad, movilidad y capacidad de cargas adecuadas. La propuesta que se genera sobre la estructura del brazo robótico es:

2.1.1. Caja de control

La caja de control se desarrolla para la implementación de los componentes electrónicos para conexión de alimentación y circuitos en el brazo robótico.

2.1.2. Base

La base del brazo robótico es la parte que necesita estar estable. Esta pieza debe ser suficientemente sólida para soportar el peso del mecanismo en caso de realizar un movimiento.

2.1.3. Articulaciones

Las articulaciones que posee el brazo robótico permiten el movimiento y la flexibilidad. Las articulaciones que se usa en el mecanismo son rotativas, la cantidad y su configuración depende de los requisitos que necesita para realizar el movimiento y tener un alcance adecuado.

2.1.4. Eslabones

Los eslabones son conocidos como los segmentos que conectan las articulaciones y son capaces de definir la longitud del brazo robótico. La elección de los eslabones depende netamente de la resistencia requerida y las limitaciones de peso.

2.1.5. Actuadores

Se considera actuadores a los servomotores que se usa, estos componentes son los responsables de generar el movimiento en las articulaciones. Cada articulación está

constituida con un actuador adecuado para que sea el encargado de proporcionar el torque y precisión necesario para cada movimiento.

2.1.6. Herramienta Final

La estructura incluye una interfaz para la herramienta final, en este caso es un gripper, el cual se encarga de agarrar objetos y juntamente al mecanismo movilizarlos de un lugar a otro.

2.2. Diseño mecánico

Al definir cada una de las partes del brazo robótico, se centra en la estructura que se va a utilizar, en este caso un brazo robótico de 5 GDL. Con este parámetro se especifica la versatilidad del mecanismo, al ser un brazo con 5 GDL, permite un rango de movilidad más amplio, lo que facilita la manipulación de objetos en diferentes posiciones. Su estructura se adapta y configura a diferentes espacios de trabajo.

Una vez que se logra definir la estructura que debe tener el brazo robótico, se diseña las piezas que lo conforman en 3D como se observa en la Figura 9. Se realiza mediante impresión 3D conociendo que este sistema no es netamente capaz de reproducir con calidad absoluta los detalles pequeños de las piezas.

Para el diseño del mecanismo se consideran las posiciones que tendrán los servomotores, conociendo que, los componentes utilizados en los primeros eslabones tienden a ser las piezas más pesadas, se propone un diseño en el cual estén céntricos y junto a la base para comprimir alguna imperfección.

Para el desarrollo de este prototipo se lo realiza mediante impresión en 3D con material PLA (poli láctico) el cual es una de las opciones más sostenibles en el sector de los

termoplásticos, este ayuda a combatir los problemas ambientales que normalmente genera el plástico [17].

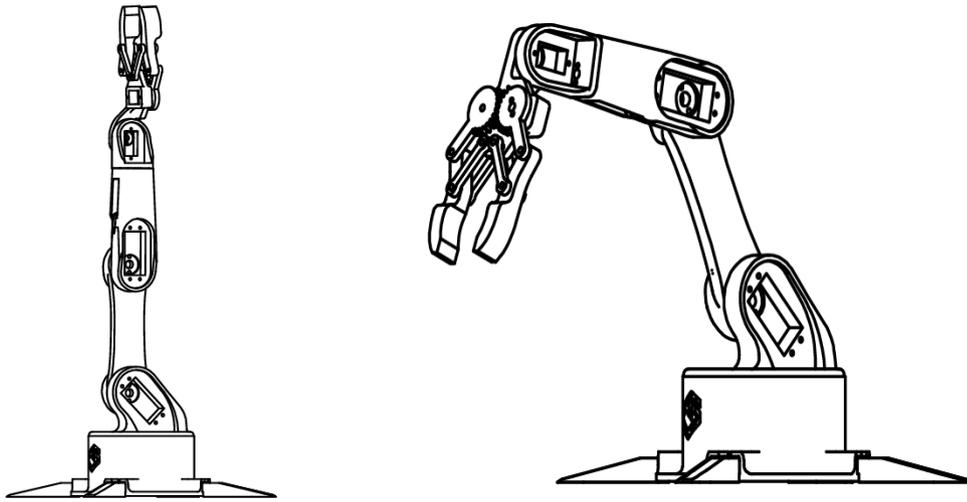


Figura 9. Brazo robótico manipulador con gripper.

2.2.1. Eslabón 0 o base del robot

Se define a la Figura 10 como el eslabon 0. Se determina la estructura más conocida como cintura del robot que servirá como soporte para el brazo robótico, Esta diseñada con una forma circular para facilitar el movimiento de rotación. Esta estructura, cuenta con una cavidad interior donde alberga el primer actuador y la conducción del cableado.

La base del mecanismo es el punto de anclaje y soporte fundamental para el brazo robótico. Para la selección se define considerando aspectos de estabilidad, fijación, flexibilidad de ubicación y espacio disponible para integración de componentes del sistema electrónico.

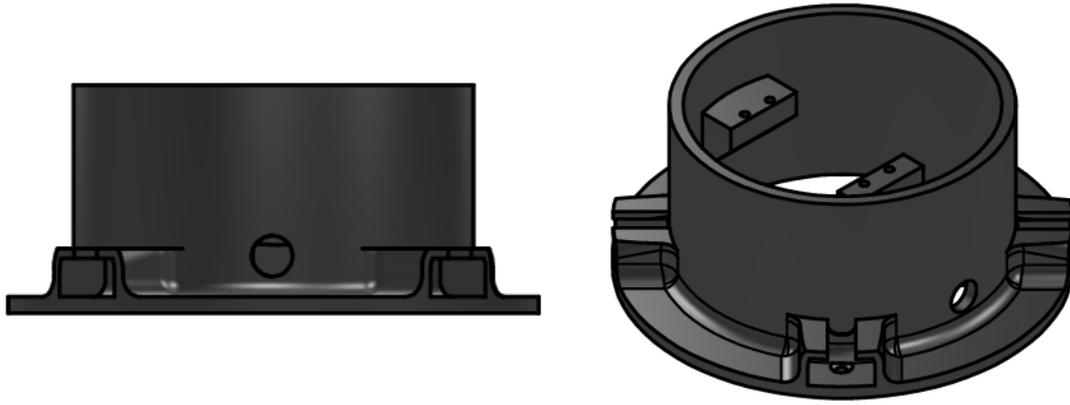


Figura 10. Base de brazo robótico.

2.2.2. Eslabón 1 o cintura del robot

Representado en la Figura 11, es la pieza que suministra el primer movimiento rotatorio alrededor del eje z. La forma circular que posee en su estructura admite el ensamble adecuado con la base del robot. Esta pieza está conectada al servomotor del eslabón 0 mediante los anclajes que posee.

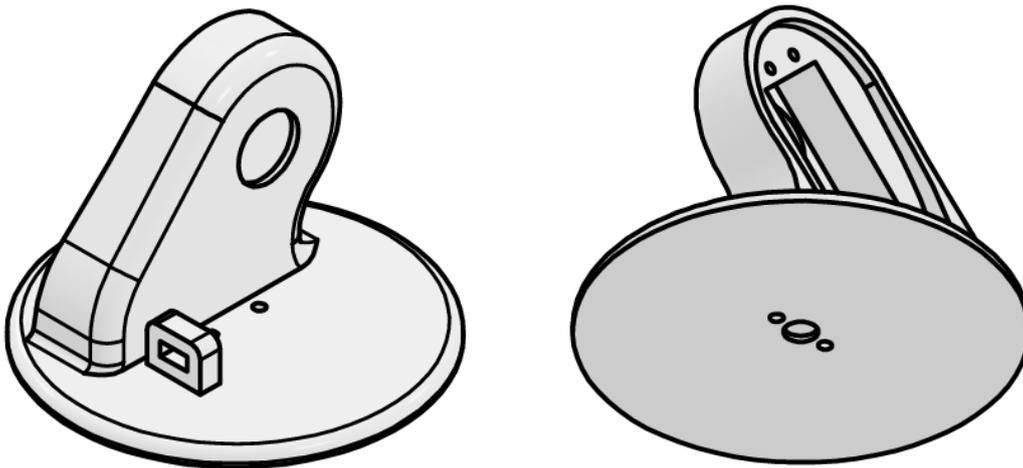


Figura 11. Cintura del robot o eslabón 1.

2.2.3. Eslabón 2 o brazo

El eslabón 1 o brazo visualizado en la Figura 12 realiza un movimiento rotatorio, posee una perforación para la conexión del servomotor. Por consiguiente, ofrece el segundo grado de libertad.

Este eslabón es la parte intermedia que conecta la placa rotatoria con la muñeca. Se define considerando aspectos como la longitud que posee y sus dimensiones, articulaciones del mecanismo para el movimiento del eslabón.

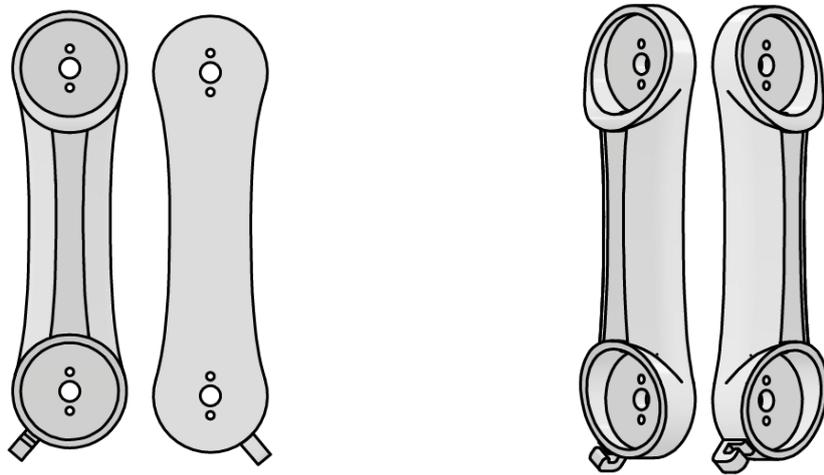


Figura 12. Brazo o eslabón 2.

2.2.4. Eslabón 3 o antebrazo del robot

El eslabón 3 o antebrazo determinado en la Figura 13 realiza un movimiento rotatorio. Esta pieza está conectada mediante un servomotor al eslabón 2. Posee un espacio

en su extremo derecho para alojar el servomotor que es el encargado de realizar la primera rotación de la muñeca y así alberga el tercer grado de libertad.

El antebrazo o eslabón 3 permite el movimiento de flexión y extensión, lo cual permite que el brazo alcance diferentes alturas y adaptarse a objetos en posiciones diferentes.

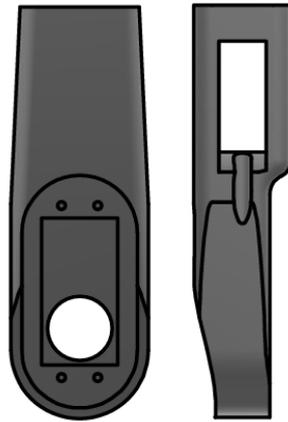


Figura 13. Eslabón 3 o antebrazo del robot.

2.2.5. Eslabón 4 o muñeca del robot

La muñeca o eslabón 4 se visualiza en la Figura 14. Este eslabón se conecta al eslabón 3 mediante el eje rotatorio que ofrece el servomotor, el cual consta de un nuevo grado de libertad. Este eslabón facilita el acople de la herramienta a usar, en este caso el gripper.

La muñeca al ubicarse después del antebrazo proporciona movimiento de rotación y flexión adicionales que permiten una mayor destreza en la manipulación de objetos.

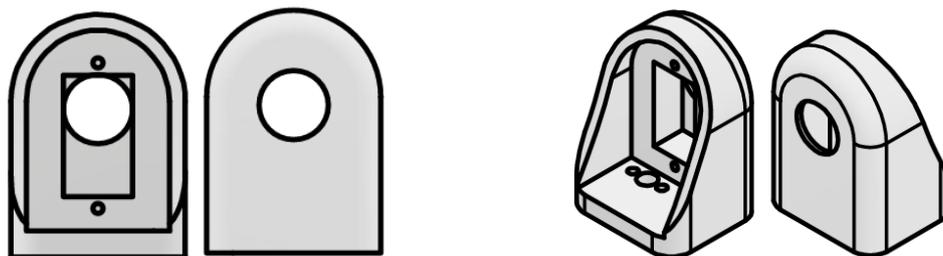


Figura 14. Eslabón 4 o muñeca del robot.

2.2.6. Gripper

En la Figura 15 se presenta la herramienta final a utilizar, en este caso un gripper o considerada mano. En el ensamble del gripper se observa la conformación entre engranajes, biela, la base de la pinza y sus pinzas. El gripper será el encargado de recoger los circuitos impresos. El funcionamiento de esta pieza trata de un dispositivo paralelogramo articulado donde la piza ejerce una presión paralela. El engranaje acoplado al servomotor se encarga de transmitir el movimiento para ejecución de las piezas que lo conforman.

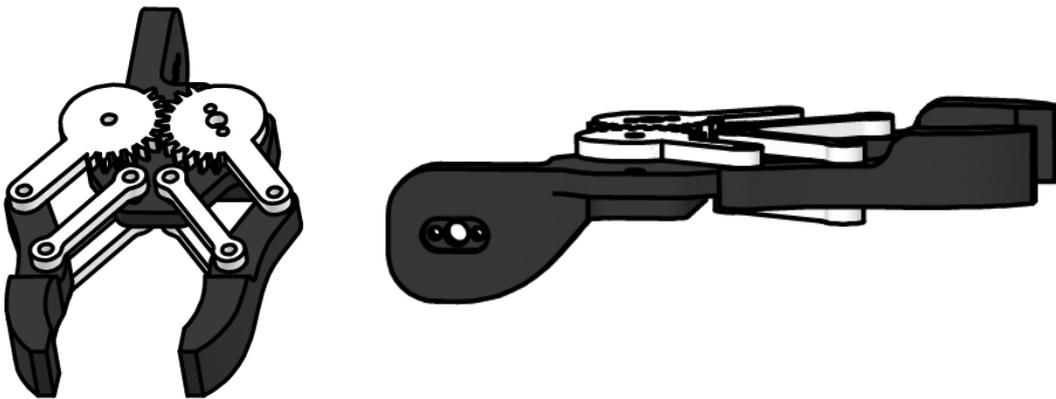


Figura 15. Herramienta final o gripper.

2.3. Selección de servomotores

Para la selección de servomotores a usar se realiza un cálculo en Matlab mediante el uso del programa el cual se encuentra de manera gratuita y libre para el uso de la comunidad.

2.3.1. Par máximo requerido

Inicialmente se proyecta la posición crítica del robot y el perfil de velocidad para obtener el par pico y par nominal del mecanismo. Para obtener datos adecuados se procede a modificar ligeramente el programa.

Conociendo que el punto crítico del brazo robótico es $q = [0 \frac{\pi}{2} 0 0 0 0]$, se ingresa los valores necesarios en el que trabajará el brazo robótico en el programa selmotor6 el cual es de uso libre en Matlab, el mismo se puede visualizar en la Figura 16.

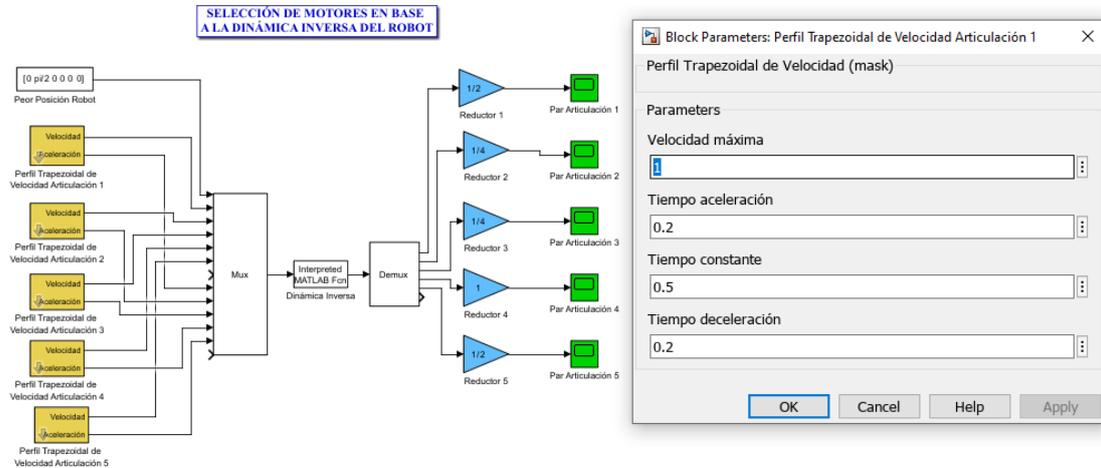
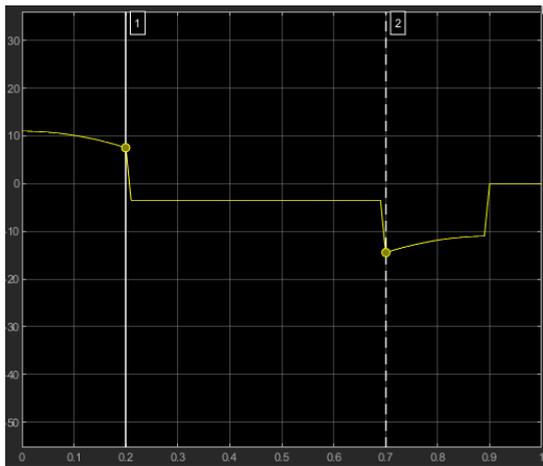


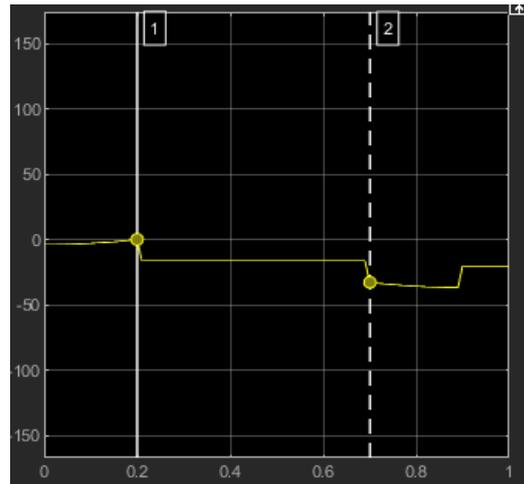
Figura 16. Interfaz para cálculo de selección de motores en Matlab.

A continuación, se procede a simular el programa y obtener los valores par pico y par nominal para cada actuador los cuales se puede visualizar en la Figura 17.

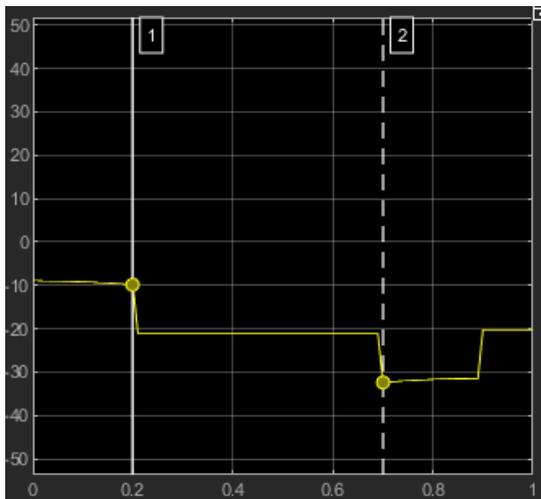
PAR ARTICULACIÓN 1



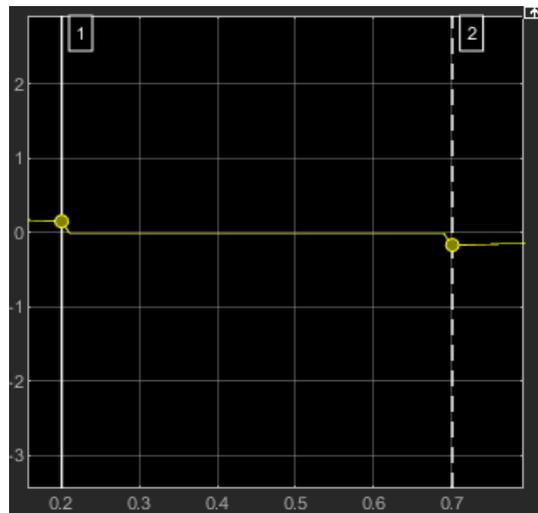
PAR ARTICULACIÓN 2



PAR ARTICULACIÓN 3



PAR ARTICULACIÓN 4



PAR ARTICULACIÓN 5

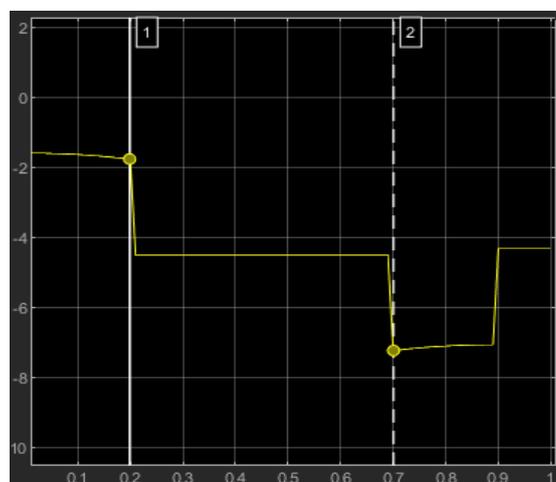


Figura 17. Obtención de par pico (1) y par nominal (2) en interfaz de Matlab para cada par articulado.

Luego de obtener las gráficas de cada par articulado, se desarrolla la Tabla 2 con cada uno de los valores utilizados para la simulación de selección de actuadores correspondiente, obteniendo el par pico y par máximo de todos los pares articulados a utilizar.

Tabla 2 Obtención datos par pico y par nominal.

Par Articulado	Velocidad máxima [rad/s]	Tiempo aceleración [s]	Tiempo constante [s]	Tiempo desaceleración [s]	Relación de transmisión multiplicador	Par Pico [kg/cm]	Par Nominal [kg/cm]
1	1	0,2	0,5	0,2	2:1	7,525	10,443
2	1	0,2	0,5	0,2	4:1	0,1112	32,71
3	1	0,2	0,5	0,2	4:1	9,893	32,4
4	1	0,2	0,5	0,2	1:1	0,1518	0,1677
5	1	0,2	0,5	0,2	2:1	1,742	7,215

Una vez obtenido los valores par pico y par nominal, se procede a desarrollar la Tabla 3 en la cual se determina los datos obtenidos mediante el programa de Matlab teniendo en cuenta que los valores obtenidos al ser valores absolutos se convierten en positivos y así se procede a seleccionar el tipo de actuador a utilizar.

Tabla 3. Datos obtenidos para la selección de servomotores. El autor.

# Motor	Par Pico [kg/cm]	Par Nominal [kg/cm]	Relación de transmisión multiplicador	Torque del Motor [kg/cm]	Torque Total Motor [kg/cm]	Cumple con el requerimiento
1	7,525	10,443	2:1	9,4	18.8	si
2	0,1112	32,71	4:1	9,4	37.6	si
3	9,893	32,4	4:1	9,4	37.6	si
4	0,1518	0,1677	1:1	2,2	2.2	si
5	1,742	7,215	2:1	2,2	4.4	si

Se debe considerar que, para garantizar el funcionamiento adecuado del actuador elegido en cada articulación para el prototipo de brazo robótico, teniendo en cuenta que el par

pico debe ser menor al torque del motor multiplicado por la relación de transmisión del multiplicador.

Posteriormente, al conocer el torque que se necesita en los actuadores, se opta por escoger el servomotor MG90s, el servomotor SG90 y el servomotor MG966r los cuales se procederá a detallar sus características de cada uno en la Tabla 4.

Tabla 4. Características servomotores. El autor.

Características de servomotores		
Modelo	Diseño	Descripción
SG90		<ul style="list-style-type: none"> * Peso soportado: entre 1.2 y 1.6 kg * Par motor a 4.8 v: 1.2 kg/cm * Voltaje de operación: 4 – 7.2v * Ángulo de rotación: 120° * Rango de temperatura de funcionamiento: -30°C +60°C * Dimensiones: 22 x 11.5 x 27 mm * Peso: 9 g o 10.6 g [31].
MG90s		<ul style="list-style-type: none"> * Voltaje de funcionamiento: 4,8 V a 6 V (normalmente 5 V) * Par motor a: 1,8 kg/cm (4,8 V) * Par máximo motor: 2,2 kg/cm (6 V) * La velocidad de funcionamiento es de 0,17 s/60° (4,8 V) * Tipo de engranaje: Metal * Rotación: 0°-180° * Peso del motor: 13.4gm [32].
MG996r		<ul style="list-style-type: none"> * Peso soportado: entre 9,4 y 11 kg * Par motor a 4.8 v: 9,4 kg/cm * Voltaje de operación: 4.8 – 7.2v * Ángulo de rotación: 180° * Dimensiones: 41 x 20 x 43 mm * Peso: 55 g [33].

Al conocer las características de los servomotores se procede a elegir el servomotor MG90s y el servomotor MG996r para el uso de cada una de las articulaciones del prototipo a implementar.

2.4. Cinemática

En la rama de cinemática se evalúa el cinemática directa, inversa y modelo jacobiano, estos modelos permiten establecer el espacio de trabajo del brazo robótico. Para realizar el cálculo es necesario obtener parámetros de Denavit-Hartenberg, estos datos son netamente conformes del mecanismo a construir.

2.4.1. Método de Denavit-Hartenberg

Para el desarrollo del método de Denavit-Hartenberg se contempla las posiciones en las que trabajará el brazo robótico para determinar los parámetros de movimiento, como se visualiza en la Tabla 5, para la obtención de datos que se utilizará para el cálculo de cinemática.

Tabla 5. Parámetros Denavit-Hartenberg para el brazo robótico.

N	θ	d	a	α
1	θ_1	96.28	0	+90°
2	$\theta_2 + 90^\circ$	0	198	0
3	θ_3	0	87.66	-90°
4	$\theta_4 - 90^\circ$	0	0	+90°
5	θ_5	30.12	0	-90°

Para determinar correctamente los parámetros de matrices, el cálculo se realizan en el orden de movimiento del brazo robot como se muestra en las siguientes ecuaciones.

$${}^1_0A = R(z, \theta_1) * T(z, 96.28) * R(x, +90^\circ) \quad (2)$$

$${}^2_1A = R(z, \theta_2 + 90^\circ) * T(x, 198) \quad (3)$$

$${}^3_2A = R(z, \theta_3) * T(x, 87.66) * R(x, -90^\circ) \quad (4)$$

$${}^4_3A = R(z, \theta_4 - 90^\circ) * R(x, +90^\circ) \quad (5)$$

$${}^5_4A = R(z, \theta_5) * T(z, 30.12) * R(x, -90^\circ) \quad (6)$$

2.4.2. Cinemática Directa

Mediante los datos obtenido en el método de Denavit-Hartenberg se encuentra la matriz de transformación, en este proceso se ocupa la Ecuación (7) también conocida como matriz estándar y se sustituye los datos para el cálculo de las matrices, para mayor facilidad este proceso se lo realiza en software Matlab.

$${}^{n-1}_nA = \begin{pmatrix} \cos\theta_n & -\sin\theta_n \cos\alpha_n & \sin\theta_n \sin\alpha_n & a_n \cos\theta_n \\ \sin\theta_n & \cos\theta_n \cos\alpha_n & -\cos\theta_n \sin\alpha_n & a_n \sin\theta_n \\ 0 & \sin\alpha_n & \cos\alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Al usar la matriz estándar se obtiene las matrices correspondientes a los parámetros determinados mediante Denavit-Hartenberg. Se puede observar las matrices obtenidas para el cálculo de la matriz homogénea.

Para la articulación 1 se obtiene la matriz de la ecuación (8).

$${}^1_0A = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & \sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & 0 & -\cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 96.28 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Para la articulación 2 se obtiene la matriz de la ecuación (9).

$${}^2_1A = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & 198 \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 198 \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Para la articulación 3 se obtiene la matriz de la ecuación (10).

$${}^3_2A = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & 0 & -\sin(\theta_3) & 87.66 \cos(\theta_3) \\ \sin(\theta_3) & 0 & \cos(\theta_3) & 87.66 \sin(\theta_3) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Para la articulación 4 se obtiene la matriz de la ecuación (11).

$${}^4_3A = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & 0 & \sin(\theta_4) & 0 \\ \sin(\theta_4) & 0 & -\cos(\theta_4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Para la articulación 5 se obtiene la matriz de la ecuación (12).

$${}^5_4A = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & 0 & -\sin(\theta_5) & 0 \\ \sin(\theta_5) & 0 & \cos(\theta_5) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 30.12 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Para la obtención de la matriz final se la calcula con la Ecuación (13).

$${}^5_0A = {}^1_0A * {}^2_1A * {}^3_2A * {}^4_3A * {}^5_4A \quad (13)$$

Y como resultado del cálculo se obtiene la siguiente matriz.

$${}^5_0A = \begin{bmatrix} a1 & b1 & c1 & d1 \\ a2 & b2 & c2 & d2 \\ a3 & b3 & c3 & d3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Donde:

$$a1 = -\cos \theta_5 (\sin \theta_1 \sin \theta_4 - \cos \theta_4 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3))$$

$$- \sin \theta_5 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \theta_1 \cos \theta_3 \sin \theta_2)$$

$$b1 = -\cos \theta_4 \sin \theta_1 - \sin \theta_4 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3)$$

$$\begin{aligned}
c1 &= \sin \theta_5 (\sin \theta_1 \sin \theta_4 - \cos \theta_4 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3)) \\
&\quad - \cos \theta_5 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \theta_1 \cos \theta_3 \sin \theta_2) \\
d1 &= 30.12(-\cos \theta_4 \sin \theta_1 + \sin \theta_4 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3)) \\
&\quad + 198 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + 87.66 \cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\
a2 &= \cos \theta_5 (\cos \theta_1 \sin \theta_4 - \cos \theta_4 (\sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 - \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3)) \\
&\quad - \sin \theta_5 (\cos \theta_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3 + \cos \theta_3 \sin \theta_1 \sin \theta_2) \\
b2 &= \cos \theta_1 \cos \theta_4 + \sin \theta_4 (\sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 - \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3) \\
c2 &= -\sin \theta_5 (\cos \theta_1 \sin \theta_4 - \cos \theta_4 (\sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 - \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3)) \\
&\quad - \cos \theta_5 (\cos \theta_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3 + \cos \theta_3 \sin \theta_1 \sin \theta_2) \\
d2 &= 198 \cos \theta_2 \sin \theta_1 \\
&\quad + 30.12(\cos \theta_1 \cos \theta_4 \\
&\quad + \sin \theta_4 (\sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 - \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3)) \\
&\quad + 87.66 \sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\
a3 &= \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_5 + \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \cos \theta_5 \\
b3 &= -\sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_4 \\
c3 &= \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_5 - \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \sin \theta_5 \\
d3 &= 96.28 + 87.66 \sin(\theta_2 + \theta_3) + 198 \sin \theta_2 + 30.12 \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_4
\end{aligned}$$

Mediante la ecuación (15), se obtiene el punto final a través de las ecuaciones obtenidas en la matriz de 5_0A .

$$Pf = {}^5_0A * Po \quad (15)$$

El punto inicial de los sistemas de coordenadas es $X_o=0$; $Y_o=0$; $Z_o=0$; obteniendo la ecuación (16) y al usar la equivalencia de la ecuación (14) se obtiene la ecuación (17).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = {}^5_0A \begin{bmatrix} Xo \\ Yo \\ Zo \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a1 & b1 & c1 & d1 \\ a2 & b2 & c2 & d2 \\ a3 & b3 & c3 & d3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Resolviendo la ecuación (17) la relación entre matriz y coordenadas se obtiene un sistema de tres ecuaciones, las coordenadas X, Y, Z tienden a ser valores conocidos para mediante cinemática inversa obtener los valores de las variables $\theta_1, \theta_2, \theta_3$.

$$X = 30.12(-\cos \theta_4 \sin \theta_1 + \sin \theta_4(\cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3))) \\ + 198 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + 87.66 \cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$Y = 198 \cos \theta_2 \sin \theta_1 \\ + 30.12(\cos \theta_1 \cos \theta_4 \\ + \sin \theta_4(\sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 - \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3)) \\ + 87.66 \sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$Z = 96.28 + 87.66 \sin(\theta_2 + \theta_3) + 198 \sin \theta_2 + 30.12 \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_4$$

2.4.3. Cinemática inversa

La cinemática inversa puede obtenerse mediante distintos métodos de cálculo que permiten la determinar las coordenadas de articulación de cada actuador que compone el dispositivo y así determinar una solución para el movimiento a realizar dependiendo la posición y rotación que posee el mecanismo [34].

Para facilidad de cálculo de cinemática inversa, se tiende analizar los tres primeros grados de libertad $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, y de manera independiente los dos restantes considerados como pitch: θ_4 y roll: θ_5 .

Para analizar la primera parte del brazo robótico se necesita conocer la matriz correspondiente a 3_0A mediante la ecuación (18).

$${}^3_0A = {}^1_0A * {}^2_1A * {}^3_2A = T \quad (18)$$

Y gracias a la ecuación (18) se obtiene:

$$({}^1_0A)^{-1} * T = {}^2_1A * {}^3_2A$$

Al remplazar los valores correspondientes se obtiene la matriz representada en la ecuación

$${}^3_1A = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -96.28 \\ \sin \theta_1 & -\cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} nx & ox & ax & X \\ ny & oy & ay & Y \\ nz & oz & az & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 & -\sin(\theta_2 - \theta_3) & 198 \cos \theta_2 + 87.66 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) & 0 & \cos(\theta_2 + \theta_3) & 198 \sin \theta_2 + 87.66 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Para obtener θ_1 se realiza la multiplicación entre la fila 3 y la columna 4 de la ecuación (19) y así tener como resultado:

$$X \sin \theta_1 - Y \cos \theta_1 = 0$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1} = \frac{Y}{X}$$

$$\tan \theta_1 = \frac{Y}{X}$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)$$

Por consiguiente, se consigue un sistema de ecuaciones 2x2, utilizando la ecuación (19)

se detalla las siguientes ecuaciones:

Primera ecuación:

$$Z - 96.28 = 198 \cos \theta_2 + 87.66 \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

Segunda ecuación:

$$X \cos \theta_1 + Y \sin \theta_1 = 198 \sin \theta_2 + 87.66 \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

Para calcular θ_2 , se eleva las ecuaciones encontradas al cuadrado y sumándolas, se logra eliminar variables $(\theta_2 + \theta_3)$, y así agrupar términos de $\sin \theta_2$ y $\cos \theta_2$, obteniendo:

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{198^2 + (X \cos \theta_1 + Y \sin \theta_1)^2 - 87.66^2}{2 \times 198(X \sin \theta_1 + Y \sin \theta_1)}\right) + \arcsin\left(\frac{Z - 96.28}{\sqrt{X^2 + Y^2 + (Z - 96.28)^2}}\right) - 90^\circ$$

$$\theta_2 = \theta_2 - 180^\circ + \arccos\left(\frac{87.66^2 - (X \cos \theta_1 + Y \sin \theta_1)^2 + 198^2}{2 \times 198 \times 87.66}\right)$$

Mediante el cálculo de ángulos de Euler también conocidos como roll, pitch y yaw, representados en la ecuación (20), logra determinar que el brazo robótico posee 2 movimiento denominados pitch θ_4 y roll θ_5 .

$$R = T[1:3,1:3] \times Rot(z, 90^\circ) \quad (20)$$

Manejando la ecuación (20) logra determinar por intermedio de la revolución especificada en el eje Z:

$$R = {}_0^3A * \begin{bmatrix} \cos 90^\circ & -\sin 90^\circ & 0 \\ \sin 90^\circ & \cos 90^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tras obtener el resultado de la matriz de rotación R, se procede a obtener los datos de la ecuación (17) y calcular los últimos sistemas de pitch y roll.

$$\begin{aligned} \sin \theta_4 &= -R_{3,1} \\ \sin \theta_4 &= -\cos \theta_2 \cos \theta_3 + \sin \theta_2 \sin \theta_3 + 1 \\ \theta_4 &= 90^\circ + \arcsin(1 - \cos(\theta_2 + \theta_3)) \\ \tan \theta_5 &= \frac{R_{3,2}}{\cos \theta_4} \\ \theta_5 &= \arctan\left(\frac{-\sin(\theta_2 + \theta_3)}{\cos \theta_4}\right) \end{aligned}$$

2.4.4. Método Jacobiano

Es una técnica utilizada que determina como afecta los cambios de configuración articulares a las velocidades del efector final. El producto Jacobiano y las velocidades articulares proporciona las velocidades del efector final. Este método se calcula teniendo en cuenta la geometría y la configuración del brazo robótico, al igual se debe conocer las relaciones cinemáticas entre las articulaciones y el extremo del brazo [35].

El método Jacobiano brinda a su vez el cálculo de precisión mediante los parámetros que requiere el proceso de obtención de datos para controlar los movimientos del brazo robótico de manera precisa y eficiente [35].

Al calcular cinemática directa e inversa se procede a encontrar el Jacobiano de velocidad lineal “Jv” de la ecuación (21), esta matriz describe como se relaciona las velocidades de las articulaciones del brazo robótico con la velocidad lineal del extremo del brazo. Se tiene en cuenta que el jacobiano de velocidad se compone de tres filas correspondientes a las componentes x, y, z de la velocidad lineal.

$$Jv = \begin{bmatrix} w1 & x1 & y1 & z1 & 0 \\ w2 & x2 & y2 & z2 & 0 \\ 0 & x3 & y3 & z3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Donde:

$$w1 = 30.12(\cos \theta_1 \cos \theta_4 + \sin \theta_4 (\sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3)))$$

$$- 198 \cos \theta_2 \sin \theta_1 - 87.66 \sin \theta_1 \cos(\theta_2 - \theta_3)$$

$$x1 = -\cos(\theta_1) \left(\frac{30.12 \cos(\theta_2 + \theta_3 - \theta_4)}{2} \right)$$

$$+ 87.66 \sin(\theta_2 + \theta_3) + 198 \sin \theta_2 - \left(\frac{30.12 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)}{2} \right)$$

$$y1 = -\sin(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_1 (87.66 + 30.12 \sin \theta_4)$$

$$z1 = -30.12(\sin \theta_1 \sin \theta_4 - \cos \theta_4 (\cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3)))$$

$$w2 = 30.12(\sin \theta_1 \cos \theta_4 + \sin \theta_4 (\sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3)))$$

$$- 198 \cos \theta_2 \cos \theta_1 - 87.66 \sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$x2 = -\sin \theta_1 \left(\frac{30.12 \cos(\theta_2 + \theta_3 - \theta_4)}{2} \right)$$

$$+ 87.66 \sin(\theta_2 + \theta_3) + 198 \sin \theta_2 - \left(\frac{30.12 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)}{2} \right)$$

$$y2 = -\sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_1 (87.66 + 30.12 \sin \theta_4)$$

$$z2 = 30.12(\cos \theta_1 \sin \theta_4 - \cos \theta_4 (\cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3)))$$

$$x3 = 87.66 \cos(\theta_2 + \theta_3) + 198 \cos(\theta_2) + 30.12 \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_4$$

$$y3 = \cos(\theta_2 + \theta_3)(87.66 + 30.12 \sin \theta_4)$$

$$z3 = 30.12 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4$$

Se le considera a “Jw” como el jacobiano de velocidad angular mostrado en la ecuación (22), esta matriz describe las velocidades de las articulaciones del brazo robótico y están relacionadas con la velocidad angular del extremo del brazo. El jacobiano de velocidad

dispone de tres filas correspondientes a los componentes de rotaciones alrededor de los ejes.

$Jw =$

$$\begin{bmatrix} 0 & \sin(\theta_1) & \sin(\theta_1) & -\sin(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_1 & \cos \theta_4 \sin \theta_1 + \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_1 \sin \theta_4 \\ 0 & -\cos(\theta_1) & -\cos(\theta_1) & -\sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_1 & \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_1 \sin \theta_4 - \cos \theta_1 \cos \theta_4 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\theta_2 + \theta_3) & \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Al encontrar el jacobiano de velocidad lineal y el jacobiano de velocidad angular, se procede al desarrollo de la matriz del jacobiano completo para el brazo robótico el cual esta denotado como “J” en la ecuación (23).

$$J = \begin{bmatrix} j1 & k1 & l1 & m1 & 0 \\ j2 & k2 & l2 & m2 & 0 \\ 0 & k3 & l3 & m3 & 0 \\ 0 & k4 & l4 & m4 & n4 \\ 0 & k5 & l5 & m5 & n5 \\ 0 & 0 & 0 & m6 & n6 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Donde:

$$j1 = 30.12(\cos \theta_1 \cos \theta_4 + \sin \theta_4 (\sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3)))$$

$$- 198 \cos \theta_2 \sin \theta_1 - 87.66 \sin \theta_1 \cos(\theta_2 - \theta_3)$$

$$k1 = -\cos(\theta_1) \left(\frac{30.12 \cos(\theta_2 + \theta_3 - \theta_4)}{2} \right)$$

$$+ 87.66 \sin(\theta_2 + \theta_3) + 198 \sin \theta_2 - \left(\frac{30.12 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)}{2} \right)$$

$$l1 = -\sin(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_1 (87.66 + 30.12 \sin \theta_4)$$

$$m1 = -30.12(\sin \theta_1 \sin \theta_4 - \cos \theta_4 (\cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3)))$$

$$j2 = 30.12(\sin \theta_1 \cos \theta_4 + \sin \theta_4 (\sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3)))$$

$$- 198 \cos \theta_2 \cos \theta_1 - 87.66 \sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$k2 = 30.12(\sin \theta_1 \cos \theta_4 + \sin \theta_4 (\sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3)))$$

$$- 198 \cos \theta_2 \cos \theta_1 - 87.66 \sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$l2 = -\sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_1 (87.66 + 30.12 \sin \theta_4)$$

$$m2 = 30.12(\cos \theta_1 \sin \theta_4 - \cos \theta_4 (\cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3)))$$

$$k3 = 87.66 \cos(\theta_2 + \theta_3) + 198 \cos(\theta_2) + 30.12 \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_4$$

$$l3 = \cos(\theta_2 + \theta_3) (87.66 + 30.12 \sin \theta_4)$$

$$m3 = 30.12 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4$$

$$k4; l4 = \sin(\theta_1)$$

$$m4 = -\sin(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_1$$

$$n4 = \cos \theta_4 \sin \theta_1 + \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_1 \sin \theta_4$$

$$k5; l5 = -\cos(\theta_1)$$

$$m5 = -\sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_1$$

$$n5 = \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_1 \sin \theta_4 - \cos \theta_1 \cos \theta_4$$

$$m6 = \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$n6 = \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_4$$

2.5. Análisis de Esfuerzo

Para el análisis de esfuerzo se lo realiza en la herramienta final del prototipo en este caso el gripper, teniendo en cuenta que el valor máximo de torque es de 1,5 [N] en el agarre del objeto, se puede visualizar en la Figura 18 el rango máximo en el que trabaja referente a su desplazamiento y esfuerzo realizado.

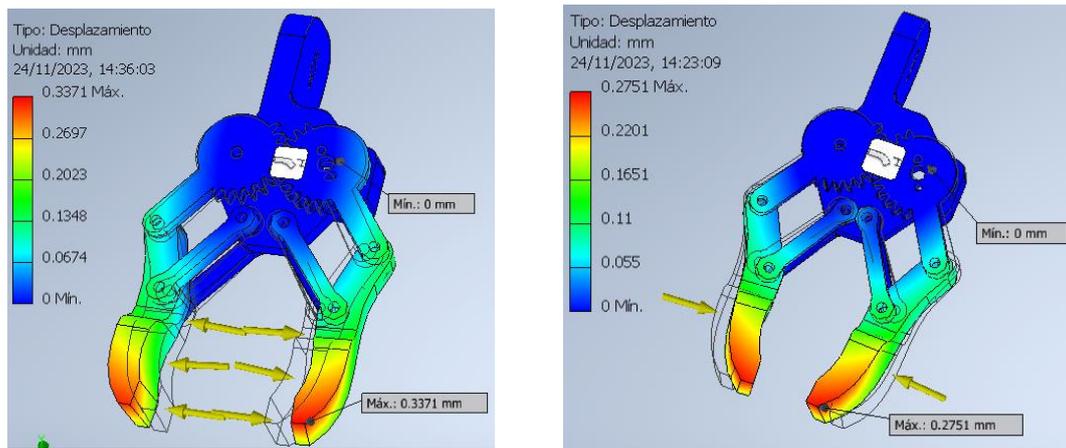


Figura 18. Análisis de Esfuerzo en Software.

En la Figura 19, se determina el coeficiente de seguridad que posee el gripper. Mediante los parámetros utilizados para el análisis se determina si la herramienta sufre deformaciones al momento de realizar su operación, en caso de que sufra una deformación se procede a realizar cambios en su estructura. Teniendo en cuenta que un mecanismo para ser seguro necesita un coeficiente de seguridad mayor a 2, con esto se

determina la carga que el mecanismo puede manipular conociendo que el coeficiente de seguridad en la herramienta es de 5.66 en agarre y 4.71 al soltar el objeto.

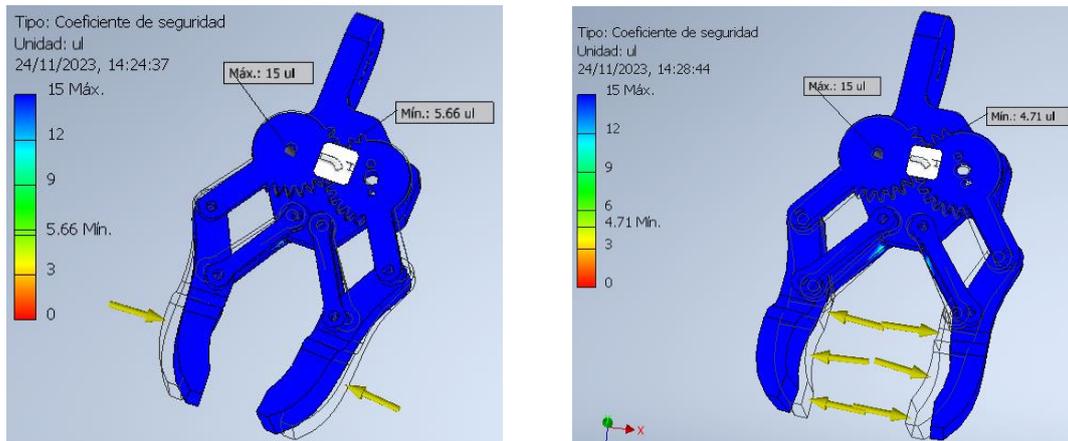


Figura 19. Coeficiente de seguridad del brazo robótico.

2.6. Análisis de Tensión

Para el análisis de tensión se tiene en cuenta la fuerza aplicada en el gripper al momento de accionar para recoger el objeto y soltarlo, conociendo que el límite de tensión que soportaría al accionar se encuentra entre los 3.535 MPa y 4.247 MPa como se logra visualizar en la Figura 20, al igual que en el análisis de esfuerzos permite determinar si la herramienta sufre alguna deformación y así realizar algún cambio para mejorar su funcionalidad.

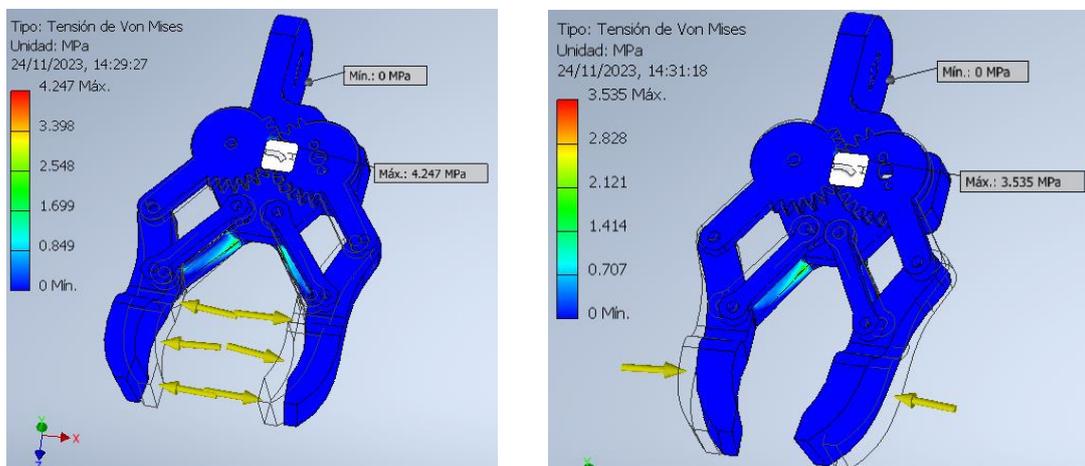


Figura 20. Análisis de Tensión en Software.

2.7. Diseño electrónico

Para el desarrollo del sistema electrónico emplea un microcontrolador Arduino, el cual se programa con lenguaje basado en C, en su propia plataforma, este será el encargado de enviar comandos para que el brazo manipulador realice sus respectivas acciones a partir de los datos generados por el aplicativo móvil.

En la Figura 21 se detalla el diagrama de bloque que constituye en el proceso de diseño electrónico, se determina el proceso que se realiza para las conexiones que tiene el brazo robótico, se inicia por la alimentación de microcontrolador, servomotores y módulo bluetooth, se verifica el funcionamiento de cada componente y se implementa en el brazo robótico.

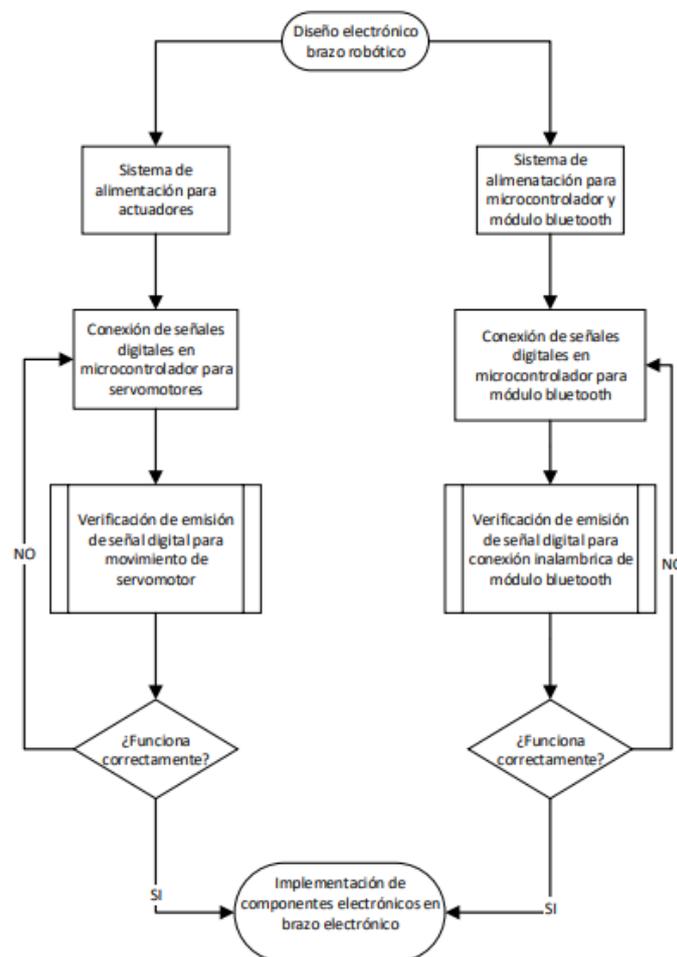


Figura 21. Diagrama de flujo - Diseño electrónico brazo robótico. El autor.

2.8. Esquema de conexión

La fuente de alimentación regulable alimenta al microcontrolador Arduino Uno, el cual es el encargado de distribuir energía y las respectivas señales de salida tanto para los servomotores, como para el módulo bluetooth. Es importante considerar que al módulo bluetooth se lo puede alimentar mediante una fuente externa para mayor eficiencia de trabajo puesto que los servomotores consumirán demasiada corriente del microcontrolador para su trabajo.

Se facilita la interpretación del sistema electrónico del prototipo mediante distintos esquemas de conexión por pasos, tanto para alimentación del microcontrolador como para los diferentes elementos a conectar, todo esto en base a su hoja técnica correspondiente:

La Figura 22 muestra un esquema de alimentación correcta en el microcontrolador Arduino Uno R3:

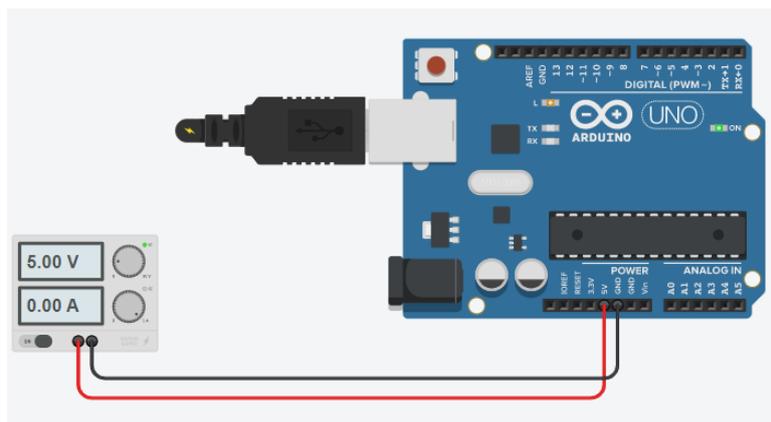


Figura 22. Esquema de alimentación microcontrolador

Al momento de realizar la alimentación correspondiente del circuito se detalla que se usa en voltaje correspondiente a 5V para el trabajo eficiente del microcontrolador y se hace el uso de una alimentación externa para el trabajo de los servomotores.

La Figura 23 muestra la conexión correspondiente de los distintos servomotores en el microcontrolador y a su fuente de alimentación para su correcto funcionamiento:

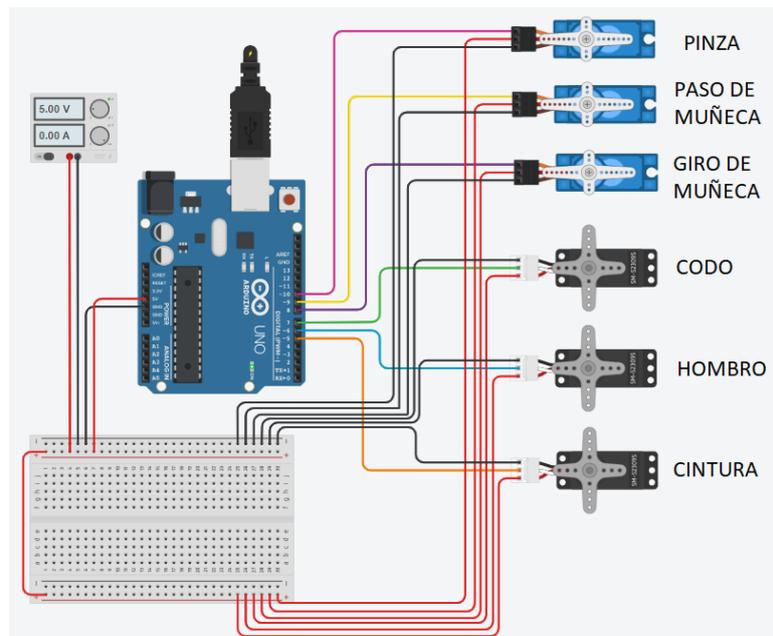


Figura 23. Esquema conexión de servomotores con microcontrolador

Al usar una alimentación externa para los servomotores se evita que exista un consumo de corriente excesivo y que no tenga un correcto desempeño. En la Figura 23 se detalla las conexiones tanto de alimentación como de señal de cada uno de los servomotores, los cuales están conectados a los puertos digitales del microcontrolador.

La Figura 24, muestra un bosquejo de interconexión entre microcontrolador y módulo bluetooth HC-05:

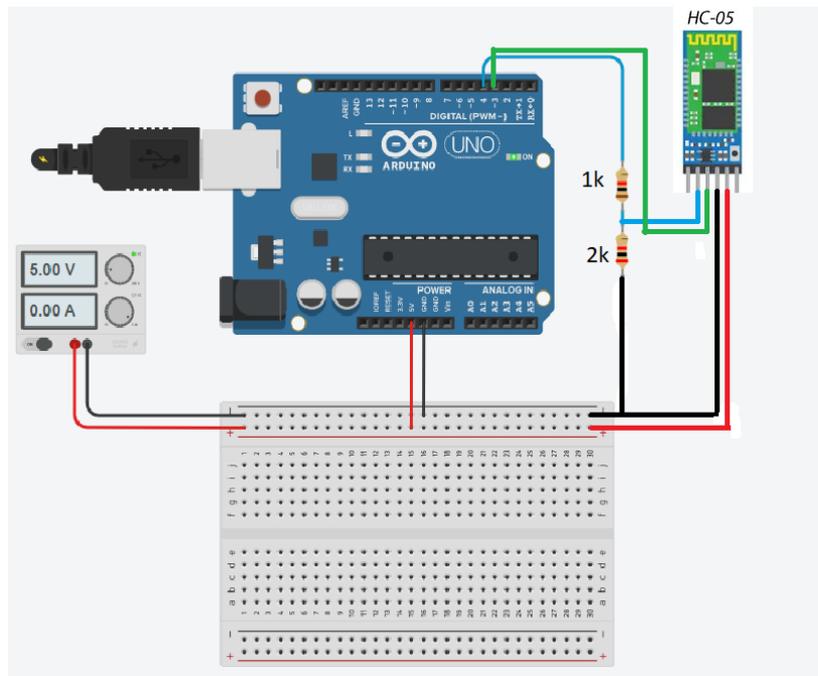


Figura 24. Esquema conexión módulo bluetooth con microcontrolador

La conexión del módulo inalámbrico bluetooth HC-05 permite la intercomunicación entre el aplicativo móvil y el microcontrolador, se utilizan resistencias para controlar el paso de corriente hacia el módulo, como se observa en la Figura 24 las conexiones de las señales van a los puertos digitales del microcontrolador para realizar el intercambio de datos o señales digitales enviadas.

En la Figura 25 se puede visualizar el circuito electrónico completo que posteriormente se implementa en una PCB, teniendo en cuenta que los pines de alimentación en software Proteus, en los componentes de microcontrolador y módulo bluetooth no determinan ninguna conexión hacia el sistema de alimentación.

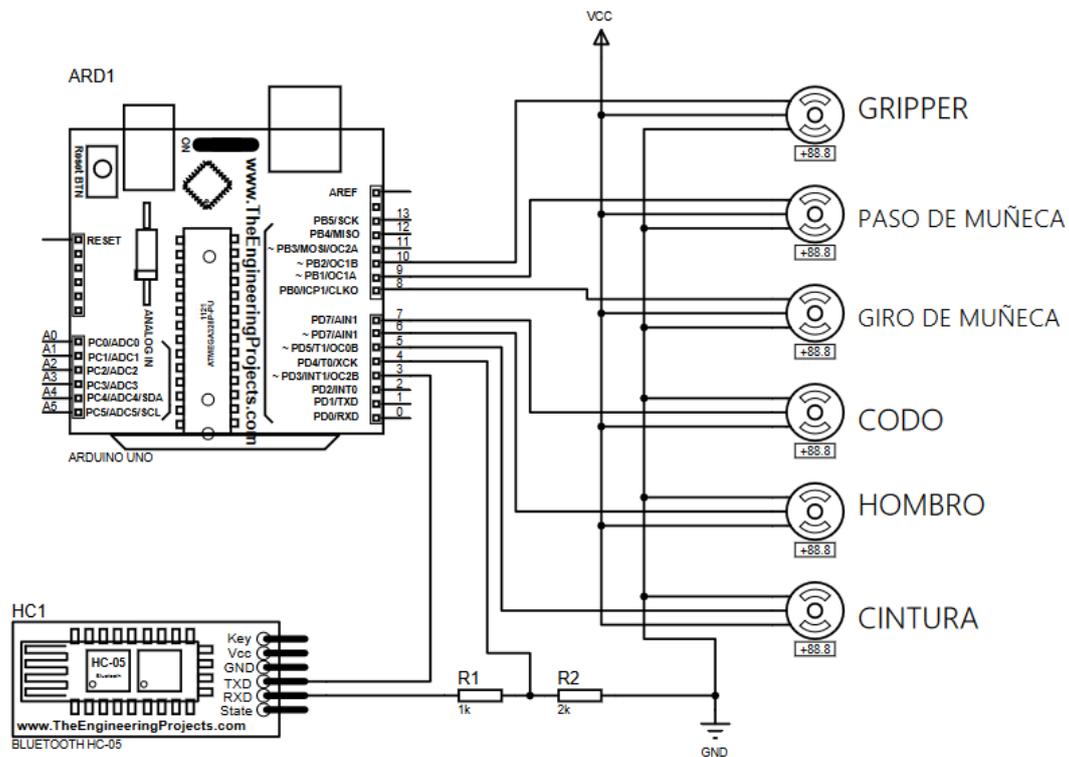


Figura 25. Diagrama circuito electrónico en software Proteus. El autor.

2.9. Sistema de control (Programación)

Mediante la Figura 26 se observa el proceso que tiene el mecanismo en modo de programación, detallando cada punto empezando por las conexiones en los puertos digitales, definiendo las entradas, velocidad de movimiento de los servomotores y la posición en la que se ubican. Luego de definir esos parámetros se procede a crear la conexión inalámbrica mediante el módulo bluetooth con el dispositivo móvil en el que se encuentra el aplicativo móvil para realizar el movimiento del mecanismo. Una vez realizada la conexión inalámbrica se configura los movimientos de los servomotores dependiendo el rango en el que se manipule mediante el aplicativo. Cabe destacar que cuando se guarda el programa, el proceso se desarrolla en bucle hasta que se presione el botón pause o reset.

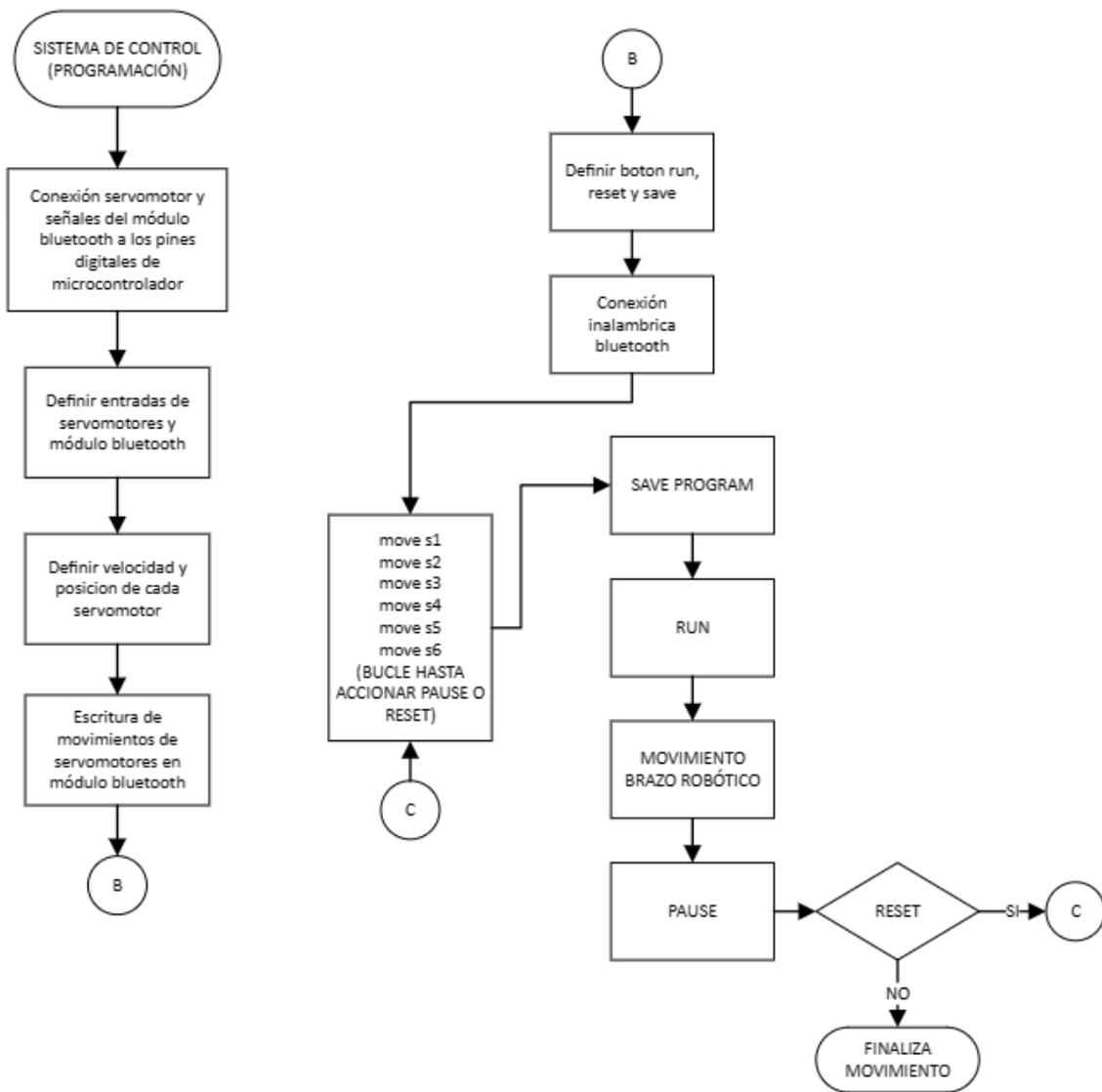


Figura 26. Sistema de control - programación.

2.10. Aplicativo móvil

En la Figura 27 se observa el proceso para desarrollar el aplicativo móvil, este aplicativo ayuda en la manipulación y control del brazo robótico, siendo una interfaz interactiva y fácil de usar, el usuario puede controlar el movimiento de cada servomotor, así como también controla la velocidad en la que desee que se muevan. El aplicativo móvil dispone de un apartado en el cual se puede visualizar el diseño en 3D del mecanismo y reconocer que parte del brazo está moviéndose.

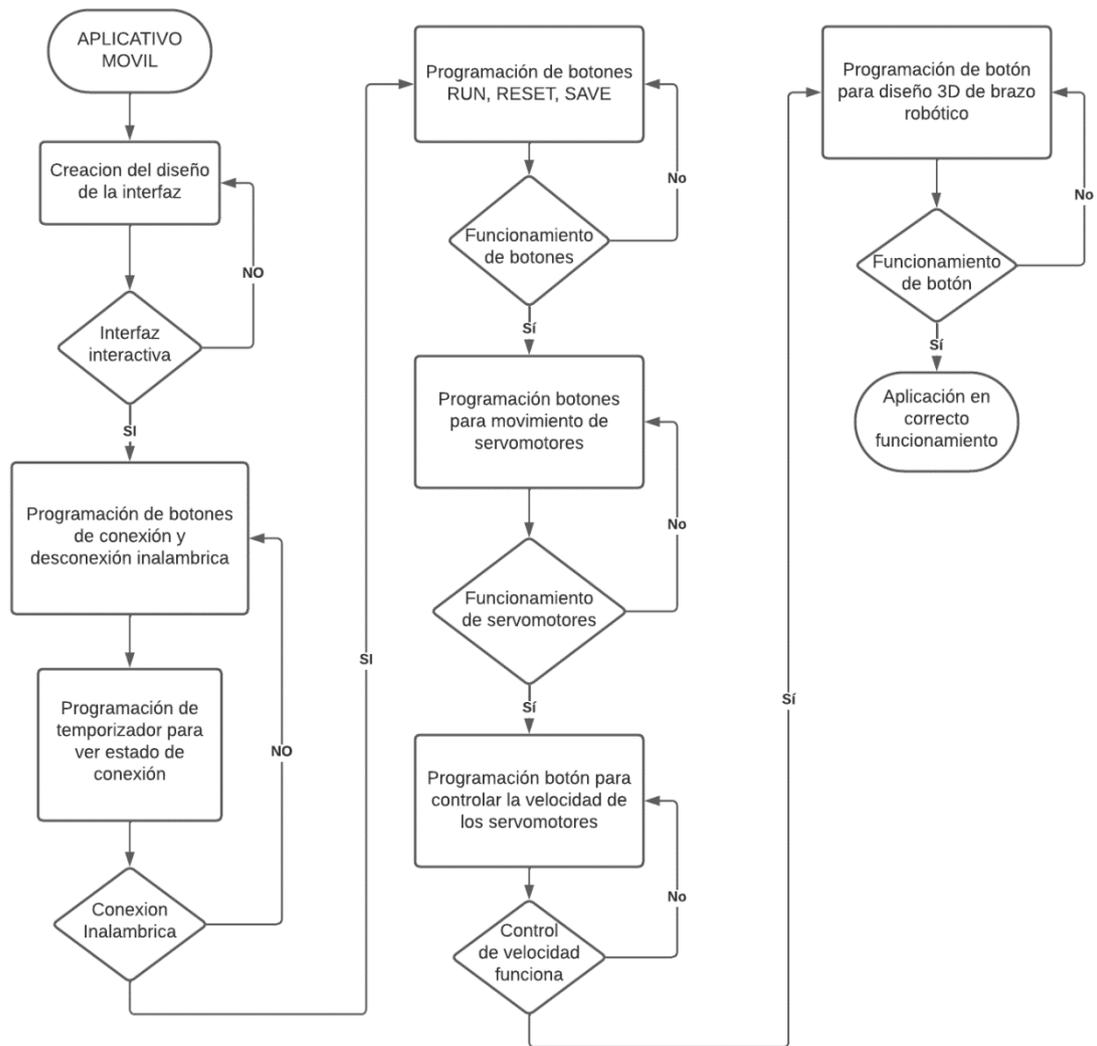


Figura 27. Diagrama de bloques desarrollo de aplicativo móvil

CAPÍTULO III

IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

3.1. Fabricación

Para la fabricación y ensamble de cada pieza, se eligió el desarrollo en impresión 3D. La impresora dispone una boquilla con diámetro 0.4 mm la cual permite la extrusión del material PLA fundido.

Por otra parte, para el ensamble de algunas de las piezas se destina el uso de tornillos M3 con su respectiva tuerca para que el montaje sea sencillo y tenga un movimiento eficiente y correcto.

3.2. Impresión y ensamble de brazo robótico

La impresión del brazo robótico comprende de un total de doce piezas, las cuales se comprenden de material PLA, cada pieza dependiendo el tamaño tiene un determinado tiempo de impresión, teniendo en cuenta que para el proceso de impresión de debe configurar los parámetros de la impresora y así obtener un resultado de impresión de calidad y eficiente. El rango de temperatura para impresión en PLA se determina entre los 180 y 230 grados Celsius, en la Figura 28 se presenta el proceso de impresión de determinadas piezas del brazo robótico.

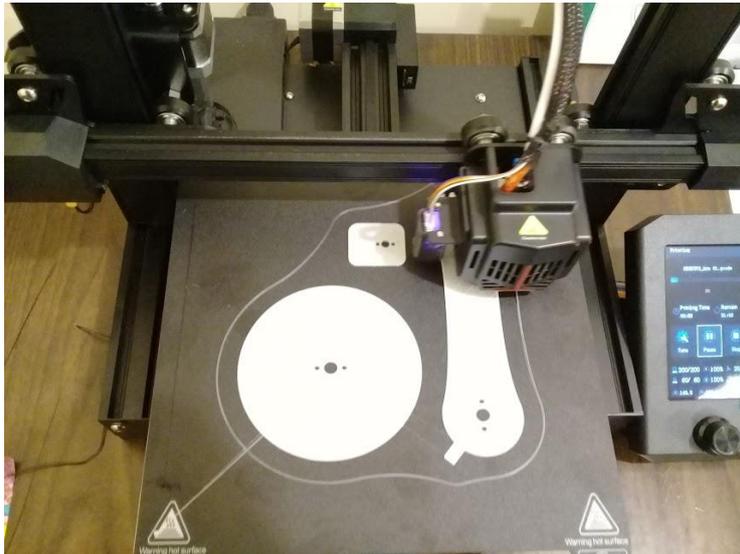


Figura 28. Impresión piezas brazo robótico

Una vez impresas todas las piezas del brazo robótico se procede al ensamble del mecanismo, en la se detalla el ensamble del prototipo teniendo en cuenta que las articulaciones del brazo robótico para que se junte a cada eslabón serán implementadas por los actuadores seleccionados anteriormente en la Tabla 4.

3.3. Diseño y creación de PCB

Una vez determinados los actuadores a utilizar, el módulo bluetooth y el microcontrolador se destina al diseño de circuito correspondiente para la PCB realizado en software EasyEDA, la cual se puede visualizar en la Figura 29, aquí se detalla las conexiones correspondientes a la fuente de alimentación tanto como a los servomotores, microcontrolador y módulo bluetooth.

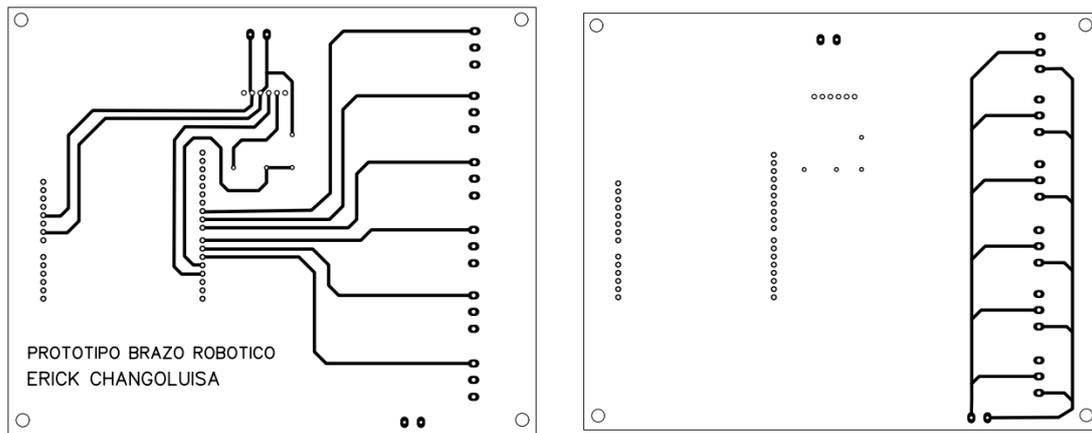


Figura 29. Diseño PCB para prototipo de brazo robótico.

3.4. Sistema electrónico y de control

En la Figura 30 se visualiza las conexiones de microcontrolador y entradas digitales y a su vez módulo bluetooth para la conexión entre mecanismo y aplicativo móvil, teniendo en cuenta la conexión de las pistas en la PCB para que no exista algún corto circuito o mala conexión de componentes.

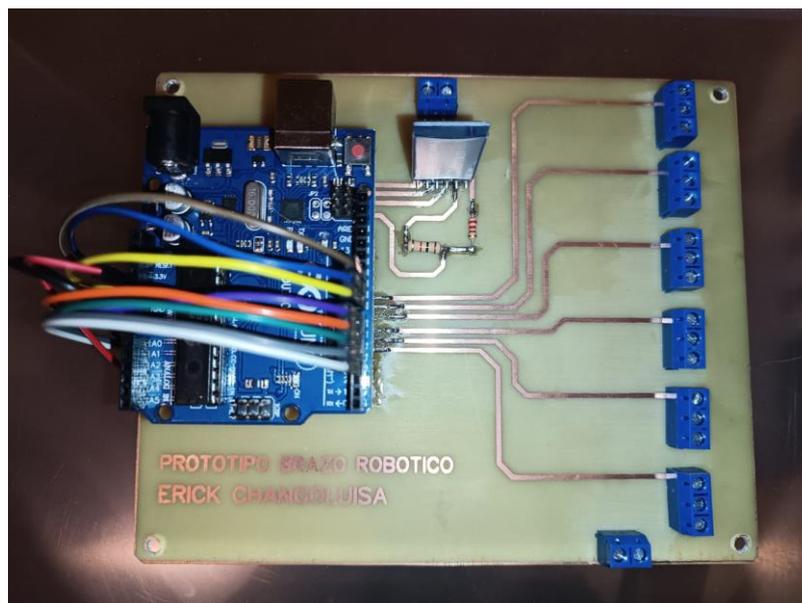


Figura 30. Conexión microcontrolador y módulo bluetooth.

Una vez realizadas las conexiones del microcontrolador y módulo bluetooth, se procede a realizar la conexión del sistema de alimentación enviado mediante una fuente de poder de 5V/5A como se visualiza en la Figura 31, la cual es eficiente para el tipo de

microcontrolador y actuadores a utilizar, teniendo en cuenta que se tendrá una conexión de alimentación para microcontrolador y otra para actuadores.

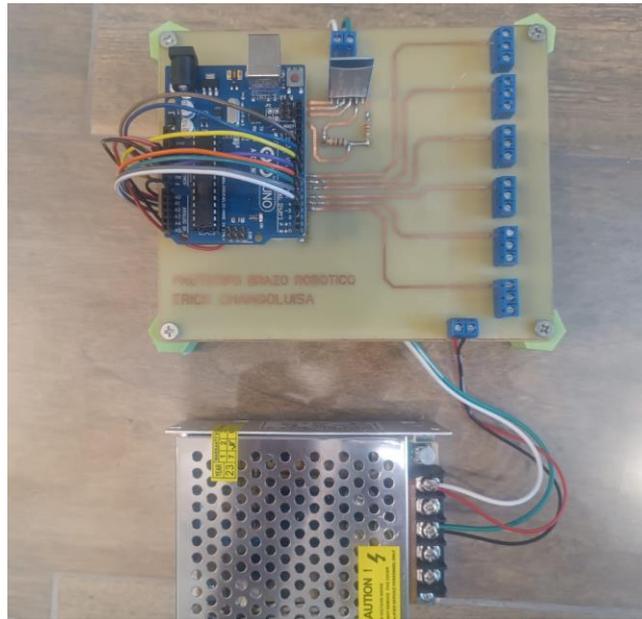


Figura 31. Conexión alimentación a circuito del mecanismo.

Para finalizar el sistema electrónico y de control, conociendo a que entrada digital del microcontrolador está destinado cada actuador se procede a realizar las conexiones de cada actuador en cada una de las bornera instalada en la PCB como se visualiza en la Figura 32.

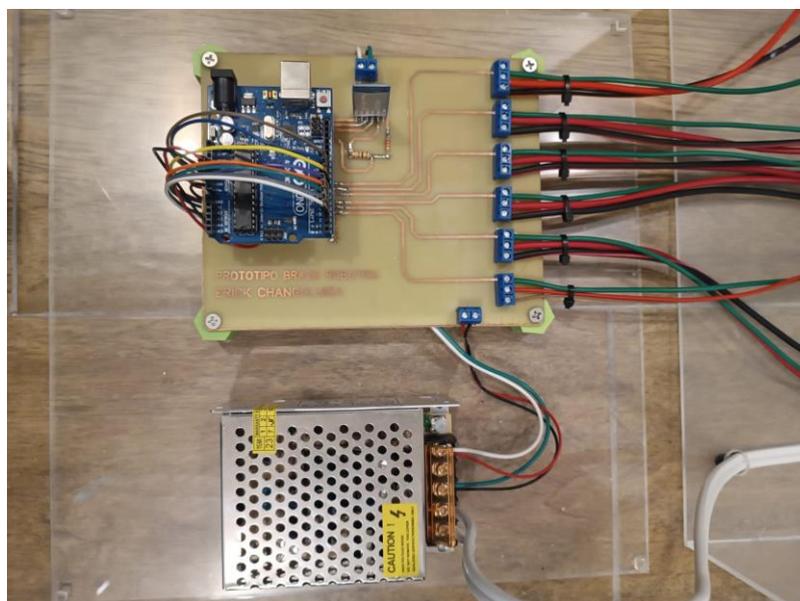


Figura 32. Conexión de actuadores del mecanismo.

3.5. Programación microcontrolador

La programación se la realiza en software de Arduino IDE, este software ya incluye las librerías que se necesitan para los servomotores como para el módulo bluetooth. Inicialmente se programa las entradas para los servomotores, la velocidad en la que trabajan y la posición en la que se encuentra al accionar el mecanismo.

La comunicación que realiza el módulo bluetooth y las dimensiones en que tienen los servomotores, estos comandos ayudan a determinar datos que se envían para el movimiento de los componentes, así como la comunicación de cada servomotor con el microcontrolador para enviar datos y realizar sus movimientos respectivos.

Una vez determinado las entradas y movimientos de cada componente, se procede a enviar comandos para el movimiento de cada uno de los servomotores, teniendo en cuenta que se debe poner parámetros para el funcionamiento y movimiento en sus ángulos, estos comandos se determinan para cada uno de los servomotores.

Una vez ya enviada la comunicación de cada servomotor a través del módulo bluetooth, se realiza la programación para los botones de SAVE que se encarga de guardar los movimientos que realice el brazo robótico y RESET para borrar el proceso anterior.

A continuación, se realiza la programación del botón RUN, este botón es el encargado de empezar con el movimiento de cada servomotor, teniendo en cuenta que este movimiento se realiza en bucle hasta que el operario presione el botón pause o reset.

Para finalizar la programación se realiza los comandos para enviar datos a cada servomotor, con esta parte de la programación se finaliza el código en la interfaz de Arduino IDE, a continuación, se detalla en la Figura 33 el diagrama de bloques enfocado en la programación del mecanismo. El código de programación para mayor comprensión y entendimiento se puede visualizar en el Anexo B.

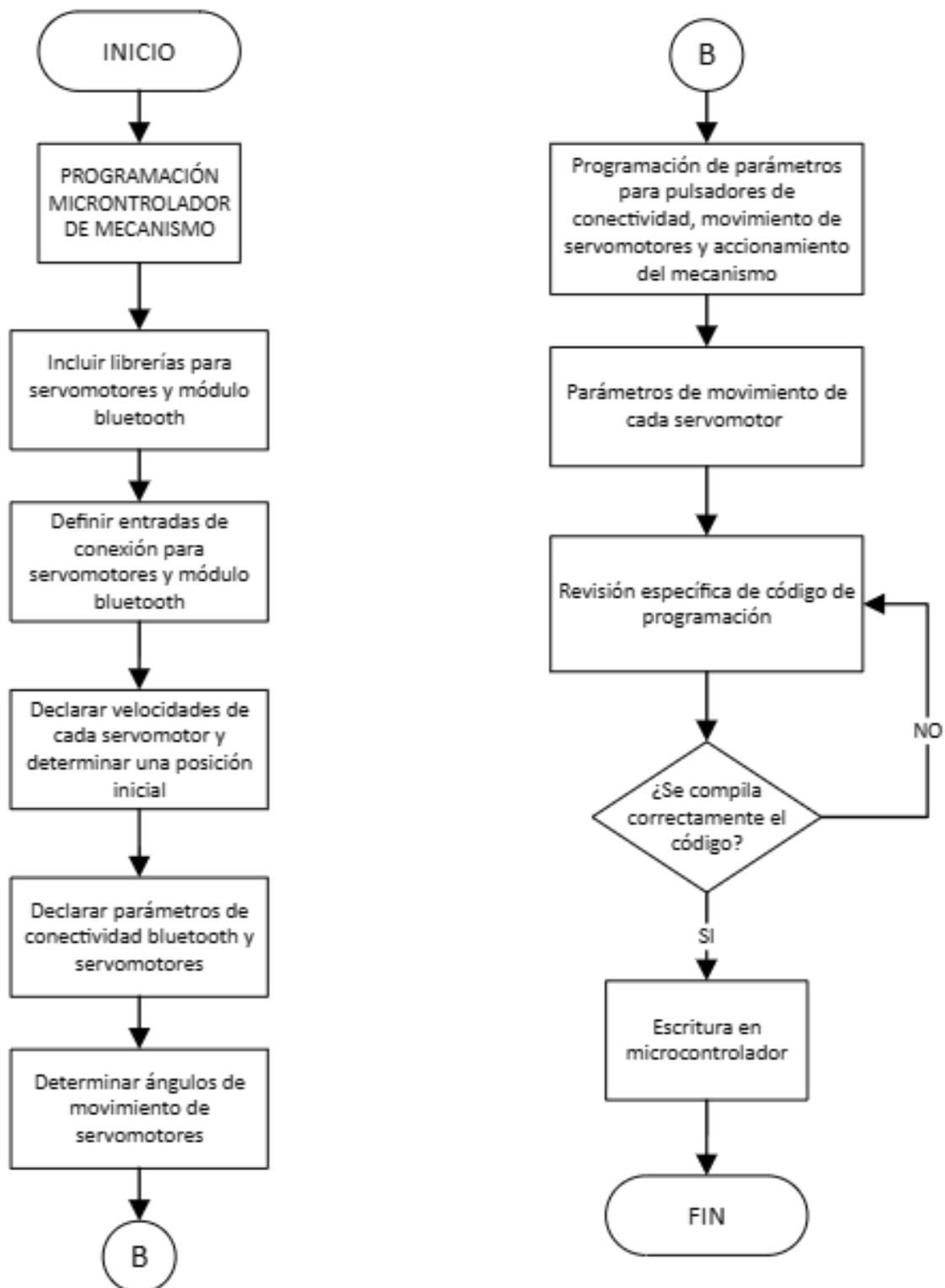


Figura 33. Diagrama de bloques programación de mecanismo.

3.6. Desarrollo del aplicativo móvil

En la Figura 34 se explica el proceso de programación del aplicativo móvil. Para la programación del aplicativo móvil se usa programación por bloques o también conocida como programación visual. Este tipo de programación es sencilla e interactiva, al ser por bloques se crea un flujo de programa visualmente claro y estructurado.

La programación para la conexión del dispositivo móvil en el cual está instalado el aplicativo, al momento de realizar la conexión inalámbrica dará el aviso si se logra conectar o hubo un error de conexión entre dispositivo y módulo.

Para la programación de botones principalmente se realiza el diagrama para el botón reset, que ayuda en el paro del proceso de movimiento del mecanismo. Se dispone de un botón de guardado de programación, el cual es el encargado de guardar un proceso para realizarlo autónomamente en un ciclo de bucle hasta que se presione el botón reset. Y por último se desarrolla la programación de un botón de control de velocidad, aquí se puede controlar la velocidad de movimiento de cada servomotor.

Se emplea un botón el cual muestra el modelo 3D del brazo robótico para mayor interacción con el mecanismo, a su vez también se realiza la programación del botón run, este botón es el encargado de dar inicio al proceso del proyecto y también dará pausa en caso de que se requiera.

Una vez realizado la programación de botones de inicio y emergentes del mecanismo, se detalla los botones a programar para cada uno de los servomotores, esos botones son los encargados de mover cada articulación. La manipulación en cada servomotor se realiza mediante un botón slider para así mover el brazo robótico al ángulo deseado. La programación del aplicativo móvil para mayor comprensión se lo puede visualizar en el Anexo A.

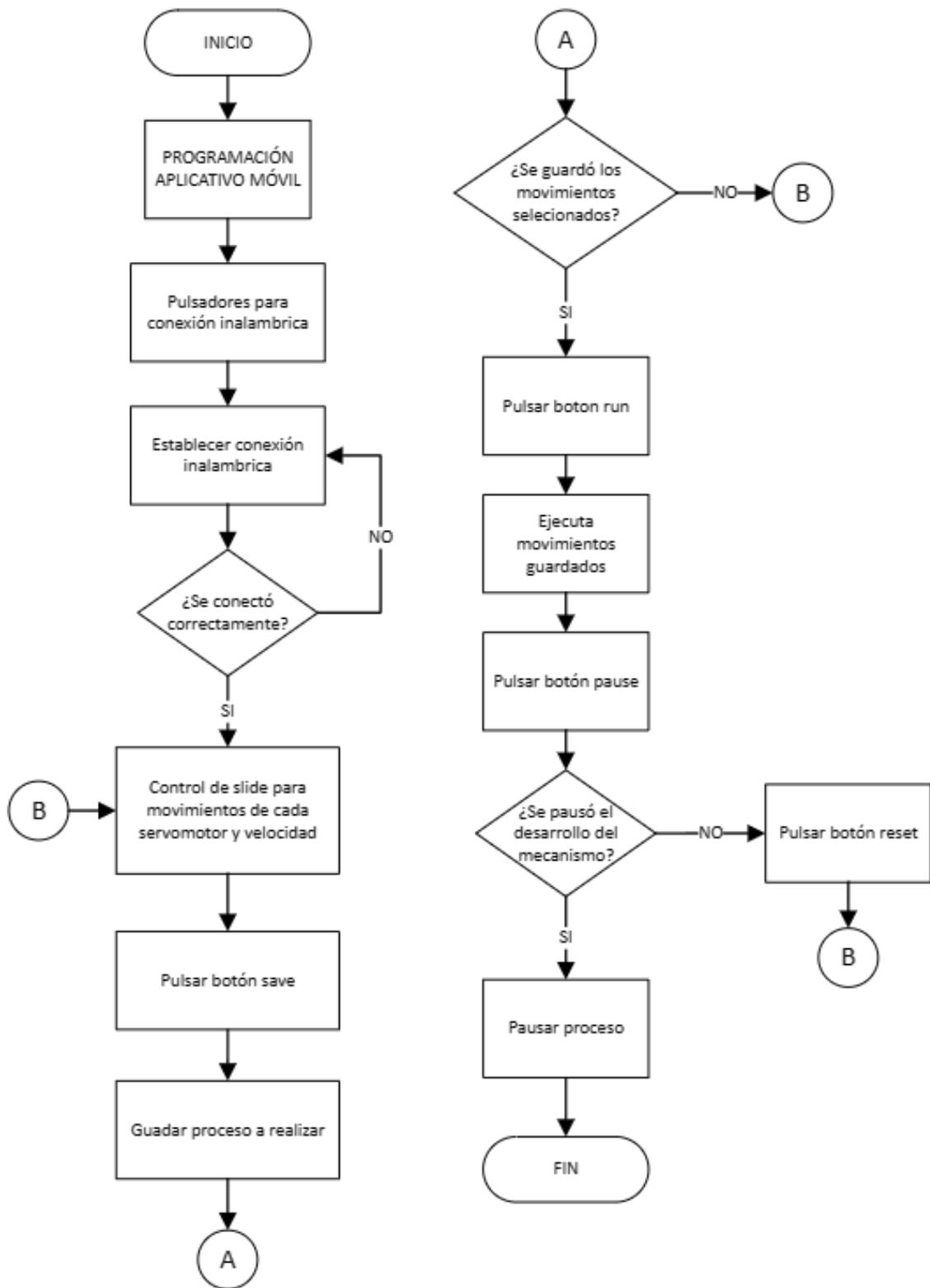


Figura 34. Diagrama de bloques programación de app móvil

3.6.1. Interfaz de usuario

Se realiza una interfaz para el usuario de manera interactiva y llamativa para que así el usuario comprenda y pueda manejar la aplicación con mayor facilidad. En la Figura 35 se observa la interfaz con la que se manipula el brazo robótico. En el diseño se detalla específicamente para entender cuál es el servomotor que se está manipulando.

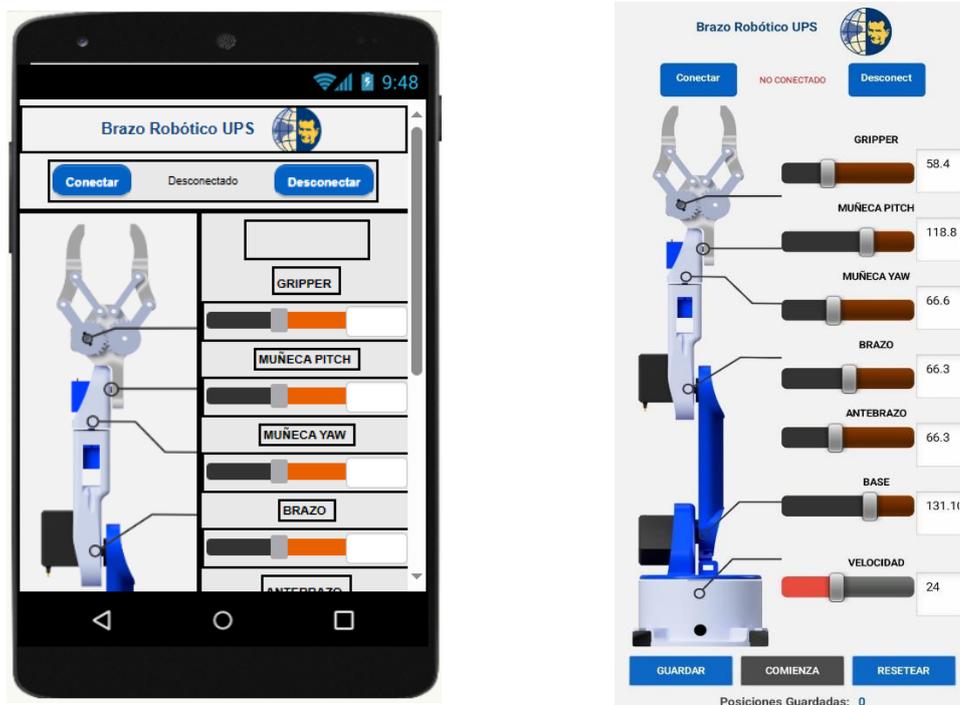


Figura 35. Interfaz usuario aplicativo móvil

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de resultados se pretende evaluar las dimensiones que posee el mecanismo y el tiempo que demora en desarrollar un proceso. Para corroborar todos los parámetros se realiza pruebas de funcionamiento para la adquisición de datos.

4.1. Pruebas y análisis

Para verificar la veracidad del diseño es necesario realizar la construcción del prototipo, en el cual se analiza el funcionamiento del sistema correspondiente al brazo robótico manipulado mediante un aplicativo móvil como se visualiza en la Figura 36.

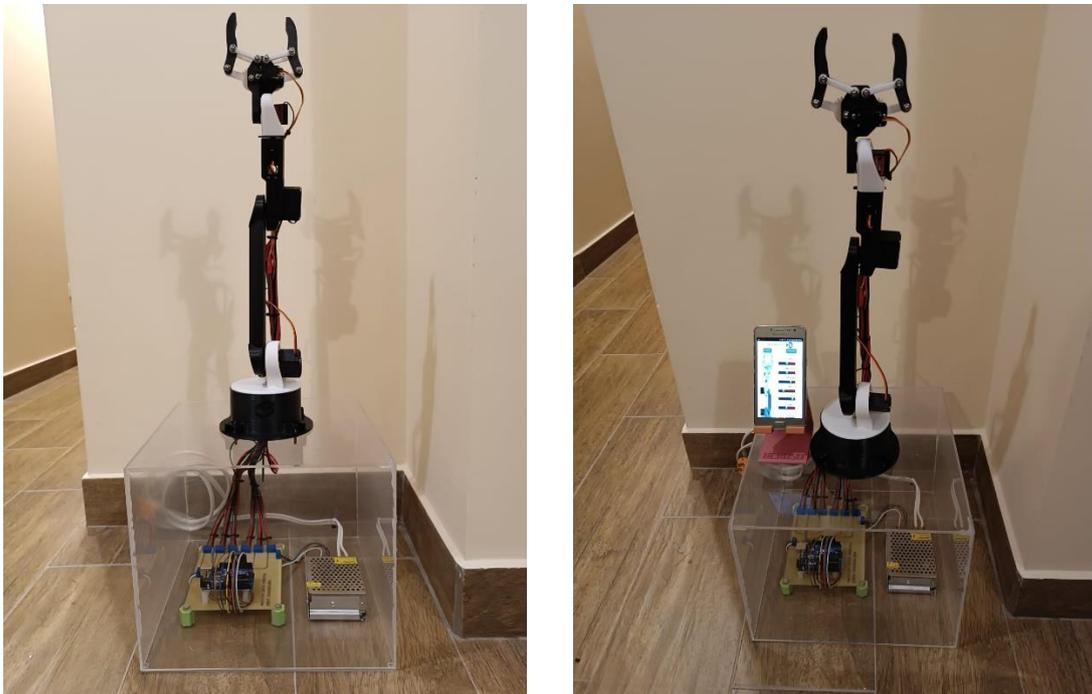


Figura 36. Prototipo finalizado y listo para pruebas

En la construcción del prototipo se contempla los parámetros de diseño detallados en el capítulo anterior. Durante su ejecución se realizó varias pruebas de funcionamiento para obtener un mecanismo óptimo.

4.1.1. Pruebas de funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento determinan y verifican si el mecanismo diseñado y construido cumple con las necesidades y parámetros establecidos; los parámetros son:

- a) Dimensiones del mecanismo
- b) Tiempo de proceso
- c) Ángulos de posicionamiento

4.1.2. Recolección de datos

El dato por evaluar son los grados en los que se posiciona el brazo robótico al termina un proceso automatizado una vez guardados los datos mediante el aplicativo móvil y las dimensiones que posee el prototipo, se ha considerado la toma de 10 muestras para la recolección de datos mediante instrumentos de medición, consta de un cronómetro y flexómetro, cabe destacar que en cada muestra se varía la velocidad de movimiento en el aplicativo móvil.

Teniendo en cuenta que los datos que se registra en la Tabla 6 se dispone a los ángulos del brazo robótico en su posición final representada en la Figura 37.

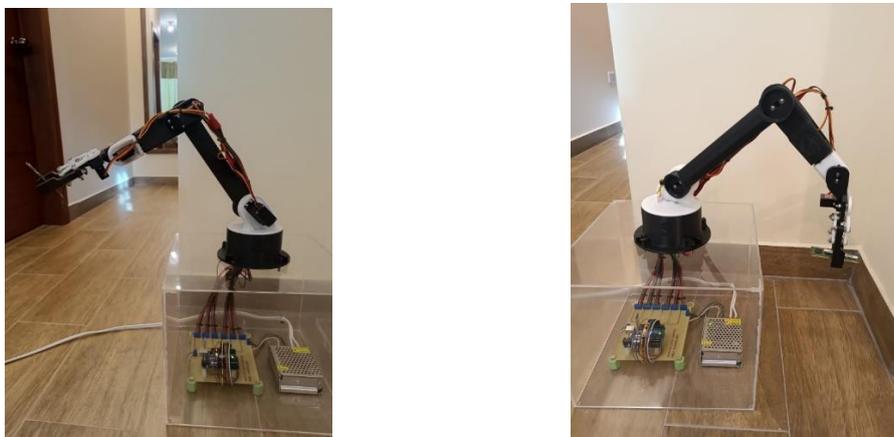


Figura 37. Posición inicial y final de la trayectoria del mecanismo.

Los datos obtenidos en las diferentes muestras se aprecian en la Tabla 6.

Tabla 6. Recopilación de datos.

Muestra	eslabón 1 [°]	eslabón 2 [°]	eslabón 3 [°]	eslabón 4 [°]	eslabón 5 [°]	Velocidad [rad/s]
P. INICIAL	90	-90	180	0	-139	0
1	180	-143,2	229	0	-218	5
2	180	-143,2	229	0	-218	10
3	180	-143,3	229	0	-218	15
4	180	-143,2	228,9	0	-217,9	20
5	180,1	-143,2	229	0	-217,9	25
6	180,1	-143,3	229,1	0	-218	30
7	180	-143,3	228,7	0	-218	35
8	180,2	-143,4	229,2	0	-218,1	40
9	180,1	-143,3	229,2	0	-218,1	45
10	180,2	-143,4	229,2	0	-218,1	45
PROMEDIO	180,07	-143,28	229,03	0	-218,01	27

4.1.3. Precisión y repetibilidad

Para la obtención de los valores de precisión y repetibilidad en cada uno de los eslabones de calcula mediante valores de promedio obtenidos de la Tabla 6 y aplicación de fórmulas como la desviación estándar correspondiente a la precisión y al error relativo correspondiente a la repetibilidad detallada en la Tabla 7.

La precisión refiere a la capacidad del brazo robótico para el alcance de una posición deseada. Para el cálculo de la precisión de cada eslabón se utiliza medidas estadísticas como el promedio de movimientos y la desviación estándar de cada uno de los eslabones, para determinar si el eslabón es preciso debe estar igual o mayor a 0 [36].

Tabla 7. Precisión y repetibilidad del robot

DESCRIPCIÓN	PRECISIÓN	REPETIBILIDAD
Eslabón 1	0,08233	0,0457
Eslabón 2	0,07888	0,0551
Eslabón 3	0,15670	0,0684
Eslabón 4	0,00000	0,0000
Eslabón 5	0,07379	0,0338
TOTAL	0,39170	0,2030

La repetibilidad especifica la capacidad del brazo robótico para alcanzar la misma posición cuando se indica el mismo comando de movimiento repetidamente. Para determinar la repetibilidad de cada eslabón se calcula mediante la desviación estándar entre las posiciones alcanzadas en cada una de las repeticiones o el promedio obtenido [37].

Es importante realizar varias mediciones para obtener resultados confiables en el cálculo de la precisión y repetibilidad. Además, se tiene en cuenta que la precisión y repetibilidad se puede ver afectada por el mecanismo de las articulaciones, rigidez del sistema y el control de cada servomotor.

4.2. Cálculo de costos

4.2.1. Elementos de fabricación

La Tabla 8 detalla el costo de los elementos empleados para la construcción del prototipo.

Tabla 8. Costo de elementos utilizados para la construcción de prototipo. El autor

Descripción	Cantidad	Precio unidad	Subtotal
Impresora 3D Creality Ender 3 V2 NEO	1	\$400,00	\$400,00
Filamento PLA SUNLU blanco	1	\$19,65	\$19,65
Filamento PLA SUNLU negro mate	1	\$26,79	\$26,79
Arduino Uno R3	1	\$19,00	\$19,00
Servomotor MG996r	3	\$12,89	\$38,67
Servomotor MG90s	3	\$4,50	\$13,50
Módulo bluetooth HC-05	1	\$10,95	\$10,95
Fuente de poder 5V/5A	1	\$12,50	\$12,50
Protoboard	1	\$3,50	\$3,50
PCB	1	\$23,80	\$23,80
Resistencias	3	\$0,02	\$0,06
Bornera de 3 pines	6	\$0,35	\$2,10
Bornera de 2 pines	2	\$0,30	\$0,60
Cables	60	\$0,10	\$6,00
Cable flexible 18 AWG	11	\$0,40	\$4,40
Cable gemelo 12 AWG	2	\$1,20	\$2,40
Enchufe	1	\$0,95	\$0,95
Caja de acrílico para montaje	1	\$48,00	\$48,00
Tornillos y pernos M4	12	\$0,17	\$2,04
Total			\$634,91

4.2.2. Mano de obra

En la Tabla 9 se especifica el pago al autor que realiza el presente mecanismo, el cual desarrolló el prototipo en un lapso de 3 meses trabajando de lunes a viernes con jornada de 3 horas diarias. En este apartado abarca el proceso de diseño, impresión de piezas, implementación de circuitos electrónicos y desarrollo de programación para Arduino y aplicativo móvil.

Tabla 9. Costo mano de obra indirecta. El autor

Descripción	Horas	Valor por hora	Valor por semana	Tres meses
	semanales			
Mano de Obra	15	\$2,5	\$37,5	\$450,00
			Total	\$450,00

4.2.3. Resumen de costos realizados

En la Tabla 10 se muestra el resumen de costos que se utilizó en el desarrollo del prototipo de brazo robótico colaborativo manipulado mediante un aplicativo móvil.

Tabla 10. Resumen de costos para desarrollo de prototipo. El autor

Descripción	Valor unitario
Elementos de fabricación	\$634,91
Mano de obra	\$450,00
Total	\$1.084,91

4.3. VAN Y TIR

Para el cálculo del VAN se procede a usar la fórmula de Excel para facilitar la recolección de resultados, la cual se detalla la tasa de descuentos, matriz que contiene flujo de fondos futuros y la inversión inicial, la fórmula a utilizar es:

$$= VNA(\textit{tasa de descuento}; \textit{matriz de flujo de fondos futuros}) \\ + \textit{inversión inicial}$$

Para el cálculo del TIR se destina la fórmula de Excel, la cual detalla la devolución de la tasa interna de retorno recopilando la matriz que contiene los flujos de caja, la fórmula a utilizar es:

$$= TIR(\textit{matriz que contiene los flujos de caja})$$

En la Tabla 11 se visualiza el VAN y el TIR desarrollado para el uso de tres años del prototipo, teniendo en cuenta la inversión realizada para la construcción del mecanismo, los años en que se estima recuperar la inversión y conociendo que la tasa de descuento aplicable en el país es del 12%.

Tabla 11. VAN y TIR del mecanismo. El autor

CALCULO DE VAN Y TIR DEL MECANISMO			
DETALLE	INGRESOS	EGRESOS	RESULTADOS
INVERSIÓN INICIAL			-\$1.084,91
AÑO 1	\$5.520,00	\$4.920,00	\$600,00
AÑO 2	\$5.520,00	\$4.920,00	\$600,00
AÑO 3	\$6.000,00	\$5.760,00	\$240,00
TASA DE DESCUENTOS (i)	12%		
VAN	\$99,95		
TIR	18%		

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El modelo de brazo robótico ha sido capaz de demostrar que su diseño mecánico es eficiente corroborando los parámetros de factor de seguridad al momento de recoger el circuito impreso es de 5,66 y al momento de soltarlo cambia a 4,71, teniendo en cuenta para que un mecanismo sea eficiente, el coeficiente de seguridad debe ser mayor a 2.

Mediante el desarrollo del aplicativo móvil para validar su funcionalidad se configura los parámetros de conexión inalámbricos entre mecanismo y app, la interfaz desarrollada se estima ser interactiva y sencilla para el manejo de todo tipo de usuario.

Se realizó diferentes pruebas de funcionamiento del mecanismo, determinando el movimiento de cada uno de los eslabones con diferentes valores de velocidad enviados mediante el aplicativo móvil, constatando que las más eficientes en su trabajo es la velocidad en un rango de 20 a 30 mm/s y así obtener el trabajo eficiente que se requiere.

Las pruebas de funcionamiento también han permitido obtener la precisión que tendrá el robot para así alcanzar una posición deseada, corroborando que la precisión debe de ser igual o mayor a 0, con los datos obtenidos se obtiene que el prototipo al llegar a su movimiento final obtiene una precisión de 0,39170 y a su vez mediante el cálculo de la repetibilidad se estima que el mecanismo posee una repetibilidad final de 0,2030.

Para el desarrollo del mecanismo se especifica el costo total de los elementos utilizados el cual posee un valor de \$634,91 y el costo de mano de obra es de \$450,00, teniendo así un valor total para el desarrollo del prototipo de \$1.084,91 el cual ayudó en el cálculo

correspondiente del VAN y TIR para un rango de 3 años laborables estimados, obteniendo como resultado del VAN un valor de \$99,95 con un TIR del 18%.

5.2. Recomendaciones

Es importante realizar mantenimiento regular al brazo robótico para garantizar la confiabilidad y prolongar su vida útil. Este mantenimiento incluye lubricación en las articulaciones y la inspección periódica de cables y conexiones.

Realizar pruebas adicionales en condiciones más exigentes para evaluar la resistencias y durabilidad en situaciones de carga máximo y uso prolongado. Esto ayudará a identificar posibles puntos débiles y realizar mejoras en el diseño.

Se sugiere explorar la implementación de algoritmos avanzados de control y planificación de movimiento para mejorar la eficiencia y la capacidad de realizar tareas complejas.

Al usar material PLA en la estructura del brazo robótico ha ofrecido varias ventajas. Sin embargo, se considera para futuros prototipos el uso de material con mayor resistencia para aumentar durabilidad y la capacidad de carga.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. E. García Moreno, Automatización de procesos industriales: robótica y automática. Valencia: Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, 2020. [En Línea] Disponible en: <https://bibliotecas.ups.edu.ec:3488/es/lc/bibliotecaups/titulos/129686>.
- [2]. W. Bolton. "MECATRÓNICA". Google Books. 2017. [En Línea]. Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=b6FxEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=que+es+mecatronica&ots=tnB6rxVvG6&sig=poKc2HMuzhOuMvbZD3qdwe7hcR4#v=onepage&q&f=false>.
- [3]. J. C. Vázquez Cortés, Automatización neumática. Bogotá: Ediciones de la U, 2016. [En Línea] Disponible en: <https://bibliotecas.ups.edu.ec:3488/es/lc/bibliotecaups/titulos/70261>.
- [4]. S. Kumar Saha, Introducción a la robótica. México etc.: McGraw-Hill España, 2011. [En Línea] Disponible en: <https://bibliotecas.ups.edu.ec:3488/es/lc/bibliotecaups/titulos/36580>.
- [5] Historia de la robótica: de Arquitas de Tarento al Robot da Vinci. (Parte II). Sánchez-Martín FM, Jiménez Schlegl P, Millán Rodríguez F, Salvador-Bayarri J, Monllau Font V, Palou Redorta J, Villavicencio Mavrich H. Servicio de Urología. Fundació Puigvert. Barcelona. Institut de Robòtica Industrial (IRI). Univ. Politècnica de Catalunya. CSIC.
- [6]. D. Audí Piera, Cómo y cuándo aplicar un robot industrial. Barcelona: Marcombo, 2009. [En Línea] Disponible en: <https://bibliotecas.ups.edu.ec:3488/es/lc/bibliotecaups/titulos/45841>.
- [7]. J. Piñero and S. Velásquez, "Control Brazo Robótico," Memorias de las IX Jornadas de Investigación., 2011. [En Línea]. Disponible en:

<http://www.poz.unexpo.edu.ve/postgrado/uct/descargas/IXJornada/Electr%C3%B3nica/IEL16.pdf>.

[8]. A. Ollero Baturone, Robótica Manipuladores y robots móviles. Barcelona: MARCOMBO, S.A., 2001. Accedido el 25 de abril de 2023. [En línea]. Disponible: <https://books.google.com.mx/books?id=TtMfuy6FNCcC&pg=PR15&ots=33OVGZv96U&dq=tipos%20de%20brazos%20rob%C3%B3ticos&lr&hl=es&pg=PR4#v=onepage&q&f=false>

[9]. T. Monserrat, “¿Dónde se utiliza un brazo robótico?” 2021. [En Línea]. Disponible en: <https://aleph.org.mx/donde-se-utiliza-un-brazo-robotico>.

[10]. M. Molina Cárdena, P. Pedroza Barrios, K. M. Gaitán Moreno, J. F. Salgado Arismendy, & M. C. Ordoñez Ávila, “Diseño y construcción del prototipo de un Brazo Robótico con tres grados de libertad, como objeto de estudio,” | Ingeniare, 2015. [En Línea]. Disponible en: <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/ingeniare/article/view/542/422>.

[11]. E. Esneca, “Brazo Robot: Tipos y funciones en la industria,” Esneca, 22-Aug-2022. [En Línea]. Disponible en: <https://www.esneca.com/blog/que-es-brazo-robot/#:~:text=Ha%20sido%20as%C3%AD%20como%20el%20brazo%20robot%20se,gran%20precisi%C3%B3n%20repetici%C3%B3n%20o%20son%20pesadas%20o%20peligrosas>.

[12] González Sorribes, Antonio. Introducción morfología del robot. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática (DISA), Universitat Politècnica de València.

[13] Barrientos, Antonio. Peñin, Luis Felipe. Balaguer, Carlos. Aracil Santoja, Rafael. Fundamentos de robótica. 2ª ED. McGraw Hill. 2007.

- [14]. SolidBI. "SOLIDWORKS - Qué es y para qué sirve". SolidBI. [En línea]. Disponible: <https://solid-bi.es/solidworks/>
- [15]. A. Aguilar Romero, "Diseño, impresión, montaje y control de un manipulador robótico," Google, 2012. [En Línea]. Disponible en: https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=https%3A%2F%2Fe-archivo.uc3m.es%2Fbitstream%2Fhandle%2F10016%2F16922%2FTFG_Alejandro_Aguilar_Romero.pdf.
- [16]. La Casa Del Chollo. "Impresora Ender 3 pro-características, review, análisis y mejoras". Lacasadelchollo. [En línea]. Disponible: <https://lacasadelchollo.com/impresora-ender-3-pro#:~:text=Características%20Impresora%20Ender%203%20pro%20Volumen%20de%20impresión:,de%20la%20cama%20caliente%20de%20impresión:%20110%20C>
- [17]. Ultimaker. "Ficha de datos técnicos PLA". Ultimaker. [En línea]. Disponible: <https://docs.rs-online.com/7ade/0900766b81698006.pdf>
- [18]. Ó. Torrente Artero, "Arduino. Curso práctico de formación," Google Libros, 2013. [En Línea]. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=6cZhDmf7suQC>.
- [19]. Arduino. "UNO R3 | Arduino documentation". Arduino Docs | Arduino Documentation. [En línea]. Disponible: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>
- [20] Descripción Placa Elegoo Uno R3. [En línea]. Disponible en: https://www.amazon.es/Tarjeta-Microcontrolador-ATmega328P-ATMEGA16U2-Compatible/dp/B01M7ZB2B4/ref=sr_1_1_sspa?_mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=elegoo+uno&qid=1631265933&sr=8-1-spons&psc=1&spLa=ZW5jcnlwdGVkUXVhbGlmaWVyPUFNUE44SUMwWIM2Nk8

mZW5jcnlwdGVkSWQ9QTA1MDgyNzAyREQ5UIAxREpCTk1VJmVuY3J5cHRlZE
FkSWQ9QTA2NDQ5NTQyRUFPRTA5MzFQREhWJndpZGdldE5hbWU9c3BfYXR
mJmFjdGlvbj1jbGlja1JlZGlyZWV0JmRvTm90TG9nQ2xpY2s9dHJlZQ==

[21]. M. Peña Basurto, & J. Cela Espín, “Introducción a la programación en C,” Google Libros, 2010. [En Línea]. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=0JNZ0G7gv5IC&lpg=PR7&ots=KhyQEfosM&dq=lenguaje+c+programacion&lr&hl=es&pg=PR7#v=onepage&q=lenguaje%20c%20programacion&f=false>.

[22]. C. the Code, “¿Qué es la programación por bloques?,” Crack the Code, 2021 [En Línea]. Disponible en: <https://blog.crackthecode.la/programacion-en-bloques>.

[23]. Friesen. J., “Java para desarrollo Android,” Madrid: Anaya Multimedia, 2011.

[24]. Oscar. "HC-05 | CódigoElectronica". Inicio | CódigoElectrónica. [En línea]. Disponible: <http://www.codigoelectronica.com/blog/hc-05>

[25] Arduino uno. [Imagen]. Disponible: https://http2.mlstatic.com/arduino-uno-r3-D_NQ_NP_883036-MLM31218947669_062019-F.jpg

[26] Módulo bluetooth HC-05. [Imagen]. Disponible: <https://www.embtronik.com/wp-content/uploads/2020/08/61TAWrn-3NL.AC.SL1000-768x754.jpg>

[27]. A. Romeo. “MORFOLOGÍA DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES”. UNIZAR. [En línea]. Disponible: <https://automata.cps.unizar.es/robotica/Morfologia.pdf>

[28]. Configuración esférica. [Imagen]. Disponible: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https://www.monografias.com/trabajos10/robap/robap&psig=AOvVaw3kvLPHeO0c2hoxu13htBMX&ust=16975670036>

00000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBEQjRxqFwoTCNDC_4OY-4EDFQAAAAAdAAAAABAJ

[29]. Deingenierias.com. “EasyEDA”. SITIO WEB DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA. [En línea]. Disponible: <https://deingenierias.com/software/easyeda/>

[30]. Interfaz Software EasyEDA. [Imagen]. Disponible: https://d22blwhp6neszm.cloudfront.net/80/792015/screenshot_easyeda_pcb_designer2.0.0_15bfbe953be4e5.png

[31]. Isaac. “Servo SG90: todo lo que debes saber sobre este pequeño motor eléctrico”. Hardware libre. [En línea]. Disponible: <https://www.hwlibre.com/servo-sg90/#:~:text=Características%20del%20Servo%20SG90%201%20Peso%20soportado:%20entre,g%20incluyendo%20el%20cable%20y%20conector%20M%C3%A1s%20elementos>

[32]. Electron perdido. “Microservo MG90S (ref: 0038) – electronperdido.com”. electronperdido.com – Arduino, electrónica, robótica. [En línea]. Disponible: <https://electronperdido.com/shop/servos/servos-servos/micro-servo-mg90/>

[33]. Ferretrónica. “Servomotor MG996R”. Ferretrónica. [En línea]. Disponible: <https://ferretronica.com/products/servomotor-mg996r>

[34]. L. A. Fernández Yáñez y L. F. Sotomayor Reinoso. “Repositorio Digital - EPN: Análisis cinemático inverso y directo del robot paralelo”. Repositorio Digital - EPN: Página de inicio. [En línea]. Disponible: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16868>

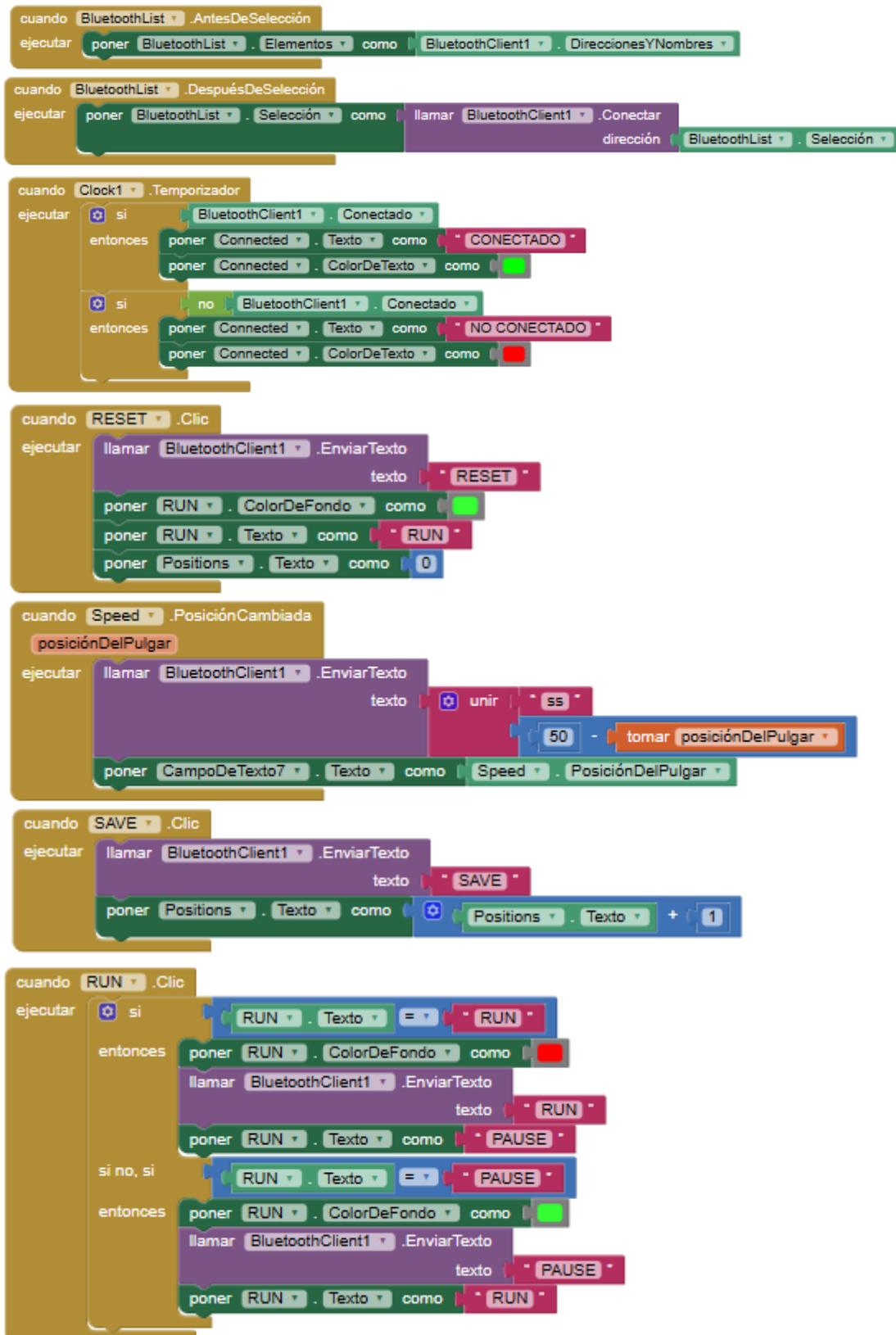
[35]. A. Gutiérrez. “Jacobiano parte I: Jacobiano analítico y jacobiano geométrico”. INAOE. [En línea]. Disponible: <https://ccc.inaoep.mx/~alejandro.giles/assets/pdf/09-jacobiano1.pdf>

[36]. Don Como. “Como calcular la precisión - doncomo”. DonComo. [En línea].
Disponibile: <https://doncomo.com/como-calculer-la-precision/>

[37]. Ciencia de Hoy. “¿Cómo calculo la repetibilidad? - Ciencia de Hoy”. Ciencia de
Hoy. [En línea]. Disponible: <https://cienciadehoy.com/como-calculer-la-repetibilidad/>

ANEXOS

Anexo A.



```
cuando Servo_01 .PosiciónCambiada
  posiciónDelPulgar
  ejecutar
    llamar BluetoothClient1 .EnviarTexto
      texto unir " s1 "
      tomar posiciónDelPulgar
    poner CampoDeTexto6 . Texto como Servo_01 . PosiciónDelPulgar
```

```
cuando Servo_02 .PosiciónCambiada
  posiciónDelPulgar
  ejecutar
    llamar BluetoothClient1 .EnviarTexto
      texto unir " s2 "
      tomar posiciónDelPulgar
    poner CampoDeTexto5 . Texto como Servo_02 . PosiciónDelPulgar
```

```
cuando Servo_03 .PosiciónCambiada
  posiciónDelPulgar
  ejecutar
    llamar BluetoothClient1 .EnviarTexto
      texto unir " s4 "
      tomar posiciónDelPulgar
    poner CampoDeTexto4 . Texto como Servo_03 . PosiciónDelPulgar
```

```
cuando Servo_04 .PosiciónCambiada
  posiciónDelPulgar
  ejecutar
    llamar BluetoothClient1 .EnviarTexto
      texto unir " s5 "
      tomar posiciónDelPulgar
      180 - tomar posiciónDelPulgar
    poner CampoDeTexto3 . Texto como Servo_04 . PosiciónDelPulgar
```

```
cuando Servo_05 .PosiciónCambiada
  posiciónDelPulgar
  ejecutar
    llamar BluetoothClient1 .EnviarTexto
      texto unir " s6 "
      tomar posiciónDelPulgar
    poner CampoDeTexto2 . Texto como Servo_05 . PosiciónDelPulgar
```

```
cuando Servo_06 .PosiciónCambiada
  posiciónDelPulgar
  ejecutar
    llamar BluetoothClient1 .EnviarTexto
      texto unir " s7 "
      tomar posiciónDelPulgar
    poner CampoDeTexto1 . Texto como Servo_06 . PosiciónDelPulgar
```

Anexo B.

```
#include <Servo.h>
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial Bluetooth(3, 4); // RX, TX

Servo servo1; //BASE
Servo servo2; //HOMBRO1
Servo servo3; //HOMBRO1
Servo servo4; //COD01
Servo servo5; //COD02
Servo servo6; //MUÑECA
Servo servo7; //GRIPPER

//10rapido 15medio 20lento
int s1Vel = 15; //BASE
int s2Vel = 25; //HOMBRO
int s4Vel = 20; //COD01
int s5Vel = 20; //COD02
int s6Vel = 15; //MUÑECA
int s7Vel = 15; //GRIPPER

int index=0;

int velG=25;

int s1Act,s2Act,s3Act,s4Act,s5Act,s6Act,s7Act; //posicion actual de
los servos
int s1Ant,s2Ant,s3Ant,s4Ant,s5Ant,s6Ant,s7Ant; //posicion anterior de
los servos
int s1[50],s2[50],s3[50],s4[50],s5[50],s6[50],s7[50]; //matrices para
almacenar las posiciones de cada servo

String bt,btS;

void setup(){
  Serial.begin(115200);
  Bluetooth.begin(9600);
  Bluetooth.setTimeout(10);
  servo1.attach(5,510,1200); //ancho min y max exclusivo para MG996R base
  servo2.attach(11,650,1400); //ancho min y max exclusivo para MG996R
hombro1
  servo3.attach(6,650,1400); //ancho min y max exclusivo para MG996R
hombro1
  servo4.attach(7,650,1400); //ancho min y max exclusivo para MG996R codo1
  servo5.attach(8,650,1400); //ancho min y max exclusivo para MG90s codo2
  servo6.attach(9,800,1290); //ancho min y max exclusivo para MG90s muneca
  servo7.attach(10,700,1290); //ancho min y max exclusivo
para MG90s gripper

  s1Ant=90; //BASE
  servo1.write(s1Ant);
  //Importante empezar s2 y s3 complementados a 180°;es decir; s2+s3=180;
  s2Ant=100; //HOMBRO1
  s3Ant=80; //HOMBRO1
  servo2.write(s2Ant);
```

```

servo3.write(s3Ant);

s4Ant=115; //COD01
servo4.write(s4Ant);

s5Ant=60; //COD02
servo5.write(s5Ant);

s6Ant=90; //MUÑECA
servo6.write(s6Ant);

s7Ant=60; //GRIPPER
servo7.write(s7Ant);

delay(50);
}

void loop() {

    if(Bluetooth.available(>0){

        bt = Bluetooth.readString();          // leemos cadena
        //////////////////////////////////// SERVO 1 - BASE
        ////////////////////////////////////
        ////////////////////////////////////
        if(bt.startsWith("s1")){              // comprueba si la cadena
comienza con "s1"
            btS = bt.substring(2, bt.length()); // extraigo los caracteres
desde la poision 2 en adelante ejem:"s1120" a "120"
            s1Act = btS.toInt();              //convierto de string a
entero
            //MUEVO EL SERVOMOTOR CON UN BARRIDO
            if(s1Ant > s1Act){
                for(int j=s1Ant; j>=s1Act; j--){
                    servo1.write(j);
                    delay(s1Vel);}}
            else{
                for(int j=s1Ant; j<=s1Act; j++){
                    servo1.write(j);
                    delay(s1Vel);}}

            s1Ant = s1Act;                    //el angulo movido(s1Act) se
convierte en la poision anterior

            //////////////////////////////////// SERVO 2 y 3 - HOMBRO 1
            ////////////////////////////////////
            ////////////////////////////////////
            if(bt.startsWith("s2")){
                btS = bt.substring(2, bt.length());
                s2Act = btS.toInt();
                Serial.println(s2Act);
                if(s2Ant > s2Act){
                    for(int j=s2Ant; j>=s2Act; j--){
                        servo2.write(j);
                        servo3.write(180-j);
                        delay(s2Vel);}}
                else{
                    for(int j=s2Ant; j<=s2Act; j++){

```

```

        servo2.write(j);
        servo3.write(180-j);
        delay(s2Vel);}}

s2Ant = s2Act;}

////////////////////////////////////////// SERVO 4 - COD01
//////////////////////////////////////////
////

if(bt.startsWith("s4")){
    btS = bt.substring(2, bt.length());
    s4Act = btS.toInt();

    if(s4Ant > s4Act){
        for(int j=s4Ant; j>=s4Act; j--){
            servo4.write(j);
            delay(s4Vel);}}
    else{
        for(int j=s4Ant; j<=s4Act; j++){
            servo4.write(j);
            delay(s4Vel);}}

s4Ant = s4Act;}

////////////////////////////////////////// SERVO 5 - COD02
//////////////////////////////////////////
////

if(bt.startsWith("s5")){
    btS = bt.substring(2, bt.length());
    s5Act = btS.toInt();

    if(s5Ant > s5Act){
        for(int j=s5Ant; j>=s5Act; j--){
            servo5.write(j);
            delay(s5Vel);}}
    else{
        for(int j=s5Ant; j<=s5Act; j++){
            servo5.write(j);
            delay(s5Vel);}}

s5Ant = s5Act;}

////////////////////////////////////////// SERVO 6 - MUÑECA
//////////////////////////////////////////
////

if(bt.startsWith("s6")){
    btS = bt.substring(2, bt.length());
    s6Act = btS.toInt();
    Serial.println(s6Act);
    if(s6Ant > s6Act){
        for(int j=s6Ant; j>=s6Act; j--){
            servo6.write(j);
            delay(s6Vel);}}
    else{
        for(int j=s6Ant; j<=s6Act; j++){
            servo6.write(j);
            delay(s6Vel);}}

```

```

s6Ant = s6Act;}

////////////////////////////////////// SERVO 7 - GRIPPER
//////////////////////////////////////
////
if(bt.startsWith("s7")){
  btS = bt.substring(2, bt.length());
  s7Act = btS.toInt();

  if(s7Ant > s7Act){
    for(int j=s7Ant; j>=s7Act; j--){
      servo7.write(j);
      delay(s7Vel);}}
  else{
    for(int j=s7Ant; j<=s7Act; j++){
      servo7.write(j);
      delay(s7Vel);}}

  s7Ant = s7Act;}

////////////////////////////////////// SAVE
//////////////////////////////////////
if(bt.startsWith("SAVE")){
  s1[index]= s1Ant;
  s2[index]= s2Ant;
  s4[index]= s4Ant;
  s5[index]= s5Ant;
  s6[index]= s6Ant;
  s7[index]= s7Ant;
  index++;}

////////////////////////////////////// RESET
//////////////////////////////////////
if(bt.startsWith("RESET")){
  //memset se utiliza para rellenar un bloque de memoria con un valor
determinado
  //memset("matriz", "dato a rellenar", "tamaño de la matriz")
  memset(s1, 0, sizeof(s1)); //rellena con el valor de "0" todas las
posiciones de la matriz
  memset(s2, 0, sizeof(s2));
  memset(s4, 0, sizeof(s4));
  memset(s5, 0, sizeof(s5));
  memset(s6, 0, sizeof(s6));
  memset(s7, 0, sizeof(s7));
  index=0;}

////////////////////////////////////// RUN
//////////////////////////////////////
if(bt.startsWith("RUN")){
  //Ejecuta los pasos una y otra vez hasta que se pulse el botón
"RESET" o espera hasta que se vuelva a pulsar "RESET"
  while(bt.startsWith("RESET") != true){//MIENTRAS NO SE PRESIONE
'RESET' SE MANTIENE EN EL BUCLE y SOLO FUNCIONA BOTON "PAUSE"
    for(int i=0; i<= index-2; i++){
      if(Bluetooth.available()>0){
        bt = Bluetooth.readString();
        if(bt.startsWith("PAUSE") == true){
          //Ejecuta los pasos una y otra vez hasta que se
pulse el botón "RUN" o espera hasta que se vuelva a pulsar
"RUN"

```

```

        while(bt.startsWith("RUN") != true){//MIENTRAS NO
SE PRESIONE 'RUN' SE MANTIENE EN EL BUCLE Y SOLO FUNCIONA BOTON "RESET"
            if(Bluetooth.available()>0){
                bt = Bluetooth.readString();
                if(bt.startsWith("RESET") == true){
                    break;}
            }
        }
    }//end if(PAUSE)
    if(bt.startsWith("ss")){
        btS = bt.substring(2, bt.length());
        velG = btS.toInt();}
} //end 1er Bluetooth.available
////////// SERVO 1 //////////
if(s1[i] == s1[i+1]){}

if(s1[i] > s1[i+1]){
    for(int j = s1[i]; j >= s1[i+1];j--){
        servo1.write(j);
        delay(velG);}}

if(s1[i] < s1[i+1]){
    for(int j = s1[i]; j <= s1[i+1];j++){
        servo1.write(j);
        delay(velG);}}
////////// SERVO 2 y 3 //////////
if(s2[i] == s2[i+1]){}

if(s2[i] > s2[i+1]){
    for(int j = s2[i]; j >= s2[i+1];j--){
        servo2.write(j);
        servo3.write(180-j);
        delay(velG);}}

if(s2[i] < s2[i+1]){
    for(int j = s2[i]; j <= s2[i+1];j++){
        servo2.write(j);
        servo3.write(180-j);
        delay(velG);}}
////////// SERVO 4 //////////
if(s4[i] == s4[i+1]){}

if(s4[i] > s4[i+1]){
    for(int j = s4[i]; j >= s4[i+1];j--){
        servo4.write(j);
        delay(velG);}}

if(s4[i] < s4[i+1]){
    for(int j = s4[i]; j <= s4[i+1];j++){
        servo4.write(j);
        delay(velG);}}
////////// SERVO 5 //////////
if(s5[i] == s5[i+1]){}

if(s5[i] > s5[i+1]){
    for(int j = s5[i]; j >= s5[i+1];j--){
        servo5.write(j);
        delay(velG);}}

```

```

    if(s5[i] < s5[i+1]){
        for(int j = s5[i]; j <= s5[i+1];j++){
            servo5.write(j);
            delay(velG);}}

////////// SERVO 6 //////////
if(s6[i] == s6[i+1]){}

if(s6[i] > s6[i+1]){
    for(int j = s6[i]; j >= s6[i+1];j--){
        servo6.write(j);
        delay(velG);}}

if(s6[i] < s6[i+1]){
    for(int j = s6[i]; j <= s6[i+1];j++){
        servo6.write(j);
        delay(velG);}}
////////// SERVO 7 //////////
if(s7[i] == s7[i+1]){}

if(s7[i] > s7[i+1]){
    for(int j = s7[i]; j >= s7[i+1];j--){
        servo7.write(j);
        delay(velG);}}

if(s7[i] < s7[i+1]){
    for(int j = s7[i]; j <= s7[i+1];j++){
        servo7.write(j);
        delay(velG);}}

        }// end FOR INDEX
    }//end 1er WHILE "RESET"
}

} //if(Bluetooth.available()>0){
} //end void loop

```