

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

NADA HUMANO ME ES AJENO

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS

ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

**Diseño, Simulación e Implementación de un Robot SCARA (RRRP),
Antropomórfico de 4 Grados de Libertad Moviéndose
en el Plano Horizontal**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE

**LICENCIADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS
ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES**

PRESENTA

HUGO PEREZ RUIZ

DIRECTOR

ING. DAVID VELÁZQUEZ SUÁREZ

Ciudad de México, febrero de 2026.

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS:

A Dios agradezco infinitamente por la vida y el haberme permitido estudiar la carrera de ingeniería en sistemas electrónicos industriales.

A mi familia por tenerlos a ustedes llenando de dicha y amor cada día de mi vida, gracias papá por darme el respaldo y la confianza cada día durante estos años, gracias mamá porque nunca perdiste la confianza en mi y por todo el apoyo durante estos años.

Para mis amigos de carrera es un gran orgullo contar con su apoyo incondicional, motivándonos a perseguir cada meta y sueño que nos propusimos. Gracias por sus consejos y enseñanzas, que nos han impulsado a convertirnos en los profesionales que somos hoy. Y podemos decir con orgullo: Lo logramos.

Asimismo, quiero expresar mi agradecimiento a mi director de tesis, al Ingeniero David Velázquez Suárez. Sabemos que este trabajo representó grandes desafíos; sin embargo, usted asumió la responsabilidad con compromiso y dedicación para llevarlo a término. Gracias por guiarme, asesorarme y por la calidad profesional y humana con la que ejerce su labor docente.

Por todo esto y más, ¡muchas gracias!

LECTORES ASIGNADOS:

Alfonso San Miguel Aguirre

José Lorenzo Calzado López

Víctor Manuel Macías Medrano

El diseño de ingeniería se ha definido como “[...] el proceso de aplicar las diversas técnicas y principios científicos con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficientes detalles que permitan su realización.

[...] El diseño puede ser simple o muy complejo, fácil o difícil, matemático o no matemático; puede implicar un problema trivial o uno de gran importancia”

“La ingeniería es encontrar una solución donde no hay solución”

CONTENIDO

RESUMEN	2
OBJETIVOS	3
Objetivo general.....	3
Objetivos particulares.....	3
JUSTIFICACIÓN	3
INTRODUCCIÓN	5
Robot SCARA (RRPR), aspectos generales	5
CAPÍTULO 1 LOS MOTORES ELÉCTRICOS	8
1.1 Que es un Motor Eléctrico	10
1.2 Como funciona un motor eléctrico	12
1.3 Tipos de motores eléctricos	14
1.3.1 Motores de Corriente Alterna (CA).....	15
1.3.2 Motores de Corriente Directa (DC)	16
1.3.3 Motores Paso a Paso	17
1.3.4 Motores Universales	18
1.3.5 Servomotores	18
CAPÍTULO 2 MECANISMOS.....	37
2.1 Máquina.....	38
2.2 Mecanismo.....	39
2.3 Mecanismos del robot SCARA	42
CAPÍTULO 3 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO Y MODELOS MATEMÁTICOS DEL ROBOT SCARA	44
3.1 Descripción del robot (RRPR)	45
3.3 Matrices de transformación homogénea	47
3.4 Matrices jacobianas.....	52
3.5 Simulaciones de funcionamiento del robot.....	54
CAPÍTULO 4 DISEÑO DEL ROBOT	56
4.1 El Servomotor.....	57
4.2 Tarjeta de control Esp32. Especificaciones, funcionamiento, plataforma de desarrollo.....	68

4.3 Algoritmos de control.....	76
CAPÍTULO 5 IMPLEMENTACIÓN DEL ROBOT SCARA	81
5.1 Servomotores seleccionados e implementados en el brazo	82
5.2 Elementos mecánicos diseñados e implementados en el brazo	82
5.2.1 Base	82
5.2.2 Brazos rotacionales.....	83
5.2.3 Eje lineal	84
5.2.4 Actuador	86
5.3 Diagrama esquemático eléctrico	88
5.4 Tarjeta de circuito impreso con la ESP32	89
5.5 El SCARA propuesto	90
RESULTADOS	91
CONCLUSIONES.....	92
ÍNDICE DE FIGURAS.....	93
ÍNDICE DE TABLAS	94
BIBLIOGRAFÍA	94

RESUMEN

Al ser la piedra angular de las operaciones industriales modernas, los motores eléctricos tienen una importancia inigualable en el panorama tecnológico y de ingeniería actual. Cuando se consideran sus aspectos clave, su importancia resulta evidente. En el presente trabajo se presenta el diseño de un robot tipo SCARA [¹] y su control con servomotores.

Diseñado para tareas de alta velocidad y precisión, dentro de sus áreas de aplicación están pick-and-place, ensamblaje y automatización en general. Por otro lado, del robot SCARA existe amplia documentación, debido a su diseño compacto y control de dos motores (generan dos grados de libertad en el movimiento); lo que lo hace en términos generales un dispositivo sencillo como conceptualización. Si se integra el sistema controlador, facilita su integración en espacios reducidos y el montaje puede ser tanto en mesa como invertido; ofrece flexibilidad en diversas áreas de investigación, desarrollo e industriales.

La empresa **Mecademic** [²] presenta un modelo que se puede conocer como ejemplo de los manipuladores tipo SCARA, el modelo **MCS500** es una opción eficiente y rentable para mejorar la productividad en procesos que requieren precisión y rapidez. El brazo es un robot reconocido por ser de los más compactos y precisos del mercado.

¹ SCARA. Por sus siglas en inglés (Selective Compliance Assembly Robot Arm) tipo de robot industrial de 4gdl, diseñado para trabajos de ensamblaje y manipulación en plano horizontal.

² Mecademic. Empresa dedicada a la elaboración de robots SCARA (<https://mecademic.com/>).

El presente proyecto realiza todo el desarrollo de un robot SCARA de cuatro grados de libertad, RRRP o tres elementos rotacionales y un lineal que definen los cuatro grados para definir una posición espacial y acción. El diseño y la implementación de este prototipo implica elementos mecánicos y electrónicos, también la simulación en computadora y programación para el control del robot, será capaz de realizar diferentes tareas como: el seguimiento de trayectorias definidas por el usuario y tareas de manipulación. El correcto diseño y la implementación de algoritmos para el control son fundamentales para garantizar el funcionamiento del brazo robótico.

En resumen, abarcaremos una arquitectura mecánica que cuenta con una rotación en la base, una segunda rotación en el brazo, un movimiento vertical lineal implementado con un mecanismo biela-manivela, y una rotación final en el extremo (actuador). Se desarrollará tanto la cinemática directa como la inversa del robot. Para el sistema de control utilizaremos la tarjeta **ESP32** [³], se propone una estructura con la integración de los diferentes componentes y la fuente de alimentación correspondiente. La programación de las rutinas de control, será desarrollada en lenguaje de alto nivel, permitirá el control del robot SCARA en su totalidad. Utilizaremos servomotores en las articulaciones del robot, de modo que el sistema responda y ejecute de manera eficiente cada una de las tareas establecidas. Mencionado lo anterior, este proyecto representa una oportunidad de aplicar los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería en Sistemas Electrónicos Industriales, llevándolos a la práctica en un proyecto único y relevante en el campo de la robótica.

OBJETIVOS

Objetivo general

El objetivo del proyecto es diseñar e implementar un robot SCARA compacto de cuatro grados de libertad (RRPR).

Objetivos particulares

Investigar y documentar sobre los motores eléctricos.

Documentar sobre servomotores.

Investigar y documentar acerca de tipos de control de los servomotores.

Documentar sobre los principios y modelos matemáticos de control del robot.

Diseño, manufactura e implementación de las partes mecánicas del robot.

Documentar los resultados de la simulación del robot.

Documentar y desarrollar la programación para el control del robot.

JUSTIFICACIÓN

El avance en múltiples áreas y disciplinas de la sociedad moderna incluye la robótica, la automatización, el control de procesos y la manufactura.

³ ESP32. Es una familia de tarjetas genéricas programables, de la empresa Espressif Systems.

En este contexto, agregando que, para cumplir con los objetivos de la carrera de Ingeniería en Sistemas Electrónicos Industriales, resulta esencial analizar en profundidad todos los componentes involucrados en una implementación práctica que dé solución a planes y objetivos concretos. Podemos expresar qué

“El diseño en ingeniería se ha convertido en una prioridad para el ser humano, al constituir el proceso de aplicar diversas técnicas y principios científicos con el propósito de mejorar, optimizar y facilitar las actividades cotidianas. El diseño puede ser simple o muy complejo, fácil o difícil, matemático o no matemático; puede implicar un problema trivial o uno de gran importancia. Sin embargo, bajo ninguna circunstancia debe perderse de vista el compromiso con el entorno y la responsabilidad ambiental”.

Por otro lado, los robots desempeñan un papel fundamental en distintas áreas y son de diversos tipos; para nuestro caso, el brazo robótico SCARA ha adquirido una notable presencia debido a su versatilidad y eficiencia en una amplia gama de tareas. Los robots no solo realizan tareas específicas, sino que ya son capaces de “aprender”, adaptarse y colaborar de manera más efectiva en entornos dinámicos y complejos.

Este enfoque fundamenta y justifica el desarrollo del presente proyecto, asegurando una integración óptima de los sistemas mecánicos y electrónicos en aplicaciones reales.

Hoy en día los robots SCARA están siendo utilizados en áreas como la automotriz, eléctrica, electrónica y la manufactura; por su alta flexibilidad, destreza y productividad. Otra consideración importante en el estudio de manipuladores robóticos es el análisis de cinemática y dinámica, como base teórico práctica. Ya que estos permiten posicionar el robot en un punto dentro de su espacio de trabajo, se modela bajo formulaciones matemáticas para saber el movimiento del brazo. Con lo mencionado, este proyecto presenta el modelado y simulación de un robot SCARA de 4 grados de libertad.

INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad el ser humano ha desarrollado nuevas tecnologías para el crecimiento de la industria, construcción, exploración, entre otras. La robótica es un tema que ha evolucionado a lo largo de la historia, desde los primeros artefactos antiguos hasta los sofisticados sistemas autónomos de la actualidad. Esto impulsó por la búsqueda de mejorar la eficiencia, precisión y autonomía en diversas aplicaciones, principalmente en la industria.

Los primeros mecanismos automatizados se remontan a la antigua Grecia, en el primer siglo se diseñaron artefactos hidráulicos y neumáticos capaces de realizar movimientos predeterminados. En la edad media se diseñaron relojes mecánicos y figuras animadas en Europa con dispositivos programables que se basaban en sistemas de engranajes y válvulas.

Con la Revolución Industrial, surgieron avances en maquinaria automatizada, como los telares programables, considerados precursores de la computación moderna, a finales del siglo XIX y principios del XX la automatización avanzó con los motores eléctricos y sistemas de control más sofisticados.

La robótica moderna comenzó a consolidarse en la segunda mitad del siglo XX con la combinación de electrónica, mecánica y control computacional. Desde finales del siglo XX hasta la actualidad, los avances en microprocesadores, sensores, actuadores y lenguajes de programación han permitido la creación de robots cada vez más autónomos e inteligentes.

El desarrollo de la robótica ha contribuido con la Ingeniería y la integración de tecnologías emergentes como la computación cuántica, la neuro-robótica y la interacción humano-máquina avanzada. Se espera que los robots del futuro no solo realicen tareas específicas, sino que sean capaces de aprender, adaptarse y colaborar de manera más efectiva en entornos dinámicos y complejos, con la aplicación de Inteligencia Artificial.

La robótica se ha convertido en una disciplina de gran importancia en numerosos campos de aplicación, los robots se caracterizan por tener una estructura articulada que les permite movimientos rápidos y un alto grado de precisión.

Robot SCARA (RRPR), aspectos generales

La configuración del robot SCARA que, por sus siglas en inglés, **Selective Compliance Assembly Robot Arm**) significa “Brazo robótico para ensamble manipulador selectivo”, es un robot manipulador con cuatro grados de libertad (GDL) [4].

Haciendo un símil con el brazo de una persona, un robot SCARA típico de 4 grados de libertad tiene los siguientes movimientos:

- Rotación de la base (θ_1), **hombro**: Movimiento rotacional en el plano X, Y.
- Rotación del segundo brazo (θ_2), **codo**: Segundo eje rotacional, también en el plano X, Y.

⁴ Grados De Libertad (GDL). Número de variables que requiere el mecanismo para realizar el objetivo planeado.

- Movimiento vertical lineal (Z): Desplazamiento hacia arriba y abajo (eje Z).
- Rotación final (θ_3), **muñeca**: Giro final en torno al eje Z.

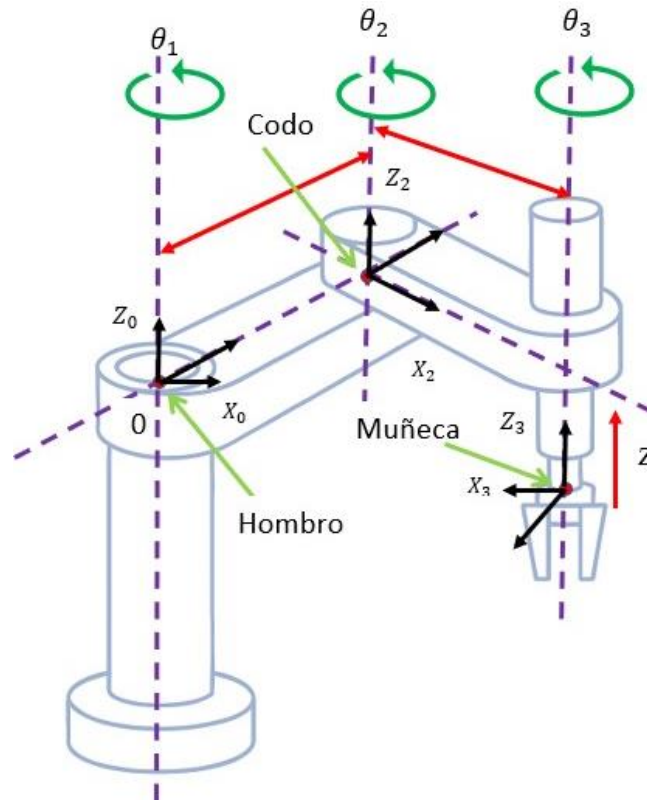


Figura I.1 Robot SCARA, articulaciones, grados de libertad, $\theta_1, \theta_2, \theta_3, Z$.

El diseño SCARA permite rigidez vertical y flexibilidad en el plano horizontal (X, Y), ideal para tareas de ensamble y manipulación que requieren posiciones e inserciones verticales. Existen dos tipos de articulaciones (lineales o rotacionales), que se denotan como, articulación rotacional (R) y articulación prismática (P).

Dependiendo del tipo de articulación se clasifican en general los robots manipuladores o brazos robóticos, descritos en la Tabla I.1.

Robot	Tipo de Movimiento	Características
Antropomórfico	RRR	3 articulaciones rotacionales
SCARA	RRP	2 articulaciones rotacionales y 1 articulación prismática
Esférico	RRP	2 articulaciones rotacionales y 1 articulación prismática
Cilíndrico	RPP	1 articulación rotacional y 2 articulaciones prismáticas
Cartesiano	PPP	3 articulaciones prismáticas

Tabla I.1. Clasificación de tipo de articulaciones en robots.

Al brazo propuesto, al estar constituido por mecanismos, se aplica el análisis con base a estos. Dentro del análisis de cinemática se contemplan 2 tipos:

Cinemática directa: Determina la posición final a partir de los ángulos articulares y el desplazamiento en Z.

Cinemática inversa: Calcula los ángulos y el desplazamiento necesarios para alcanzar una posición deseada.

Para la modelación matemática, se usan transformaciones homogéneas y trigonometría en la solución de estas ecuaciones.

En la figura I.2 se muestran las clasificaciones de las 5 configuraciones de robots de la tabla I.1.

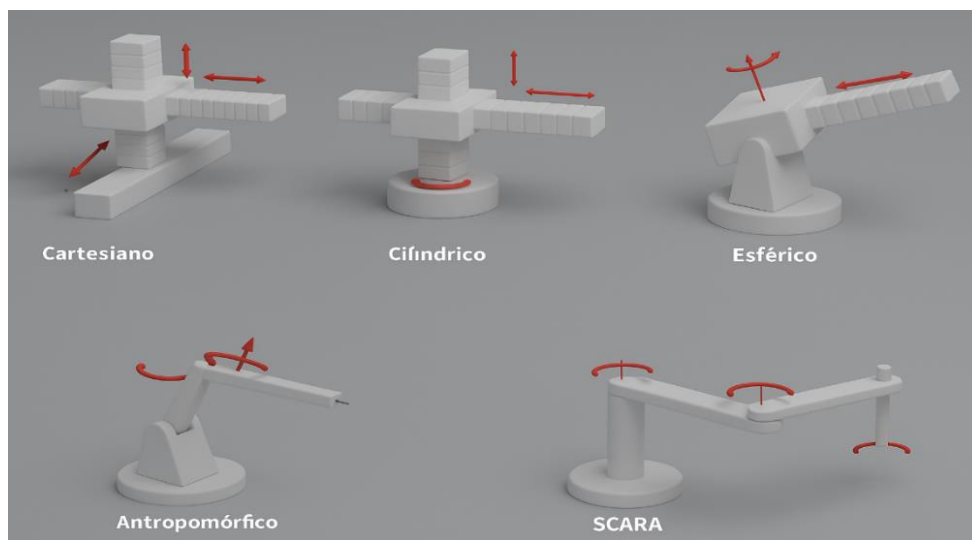


Figura I.2 Tipos de Robots manipuladores.

Finalmente, para esta introducción, la definición más completa y precisa de un Robot es:

“Manipulador automático servo controlado, reprogramable, polivalente, capaz de posicionar y orientar piezas, útiles o dispositivos especiales, siguiendo trayectorias variables reprogramables, para la ejecución de tareas variadas. Normalmente tiene la forma de uno o varios brazos terminados en una muñeca. Su unidad de control incluye un dispositivo de memoria y ocasionalmente sensores de “percepción” del entorno. Normalmente su uso es para realizar una tarea cíclica, pudiéndose adaptar a otra sin cambios permanentes en sus componentes” [28].

CAPÍTULO 1 LOS MOTORES ELÉCTRICOS

Al ser una piedra angular de las operaciones industriales modernas, los motores eléctricos tienen una importancia inigualable en el panorama tecnológico y de ingeniería actual. Cuando se consideran varios aspectos clave, su importancia resulta evidente. Los motores eléctricos se pueden encontrar en todas partes. Desde electrodomésticos como lavadoras y frigoríficos hasta maquinaria compleja en entornos industriales, los motores eléctricos constituyen la columna vertebral de las operaciones mecánicas en una serie de sectores; desde el posicionamiento preciso en dispositivos médicos hasta la alimentación de bombas industriales masivas, los motores eléctricos muestran versatilidad a través de una gama de tamaños, tipos y capacidades de potencia, lo que les permite ser utilizados en una variedad de aplicaciones.

Los motores eléctricos proporcionan una mayor eficiencia energética en comparación con los motores de combustión tradicionales. Una parte considerable del consumo de electricidad de la industria se dedica a alimentar motores eléctricos. De hecho, algunos motores alcanzan eficiencias superiores al 90%, transformando la energía eléctrica en energía mecánica con alta eficiencia. Colaborando con los esfuerzos hacia la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental, esta alta eficiencia resulta en costos de energía más bajos y emisiones de gases de efecto invernadero reducidas.

Los motores eléctricos tienen un enorme impacto económico. Componentes críticos en numerosas industrias, los motores eléctricos impulsan la maquinaria responsable de la producción de bienes, la gestión de la automatización y la ejecución de procesos esenciales. Los índices de producción, los costos y la producción general de las industrias se ven directamente afectados por la eficiencia y la confiabilidad de los motores eléctricos.

La influencia de los motores eléctricos afecta a la calidad de vida diaria. Son vitales en la atención médica, el transporte y los electrodomésticos, forman la columna vertebral de la mayoría de las ayudas y comodidades modernas. El buen funcionamiento de estos sistemas y dispositivos contribuye significativamente a la vida y actividad humana, su comodidad y conveniencia en la vida diaria, está garantizado por la confiabilidad y eficiencia de los motores eléctricos.

La importancia de los motores eléctricos no se puede resaltar lo suficiente. La expansión económica, el apoyo a tecnologías sostenibles, solución a problemas sociales, ambientales, de salud, entre otros, son elementos esenciales que impulsan la innovación y la eficacia en diversas industrias. Destacar las actividades en curso de importancia tanto en las aplicaciones de ingeniería actuales como futuras, a medida que la tecnología progresa, la importancia de los motores eléctricos está destinado a aumentar aún más.

Los avances en la tecnología de motores eléctricos han impulsado en gran medida el auge de la automatización y la robótica en el siglo XXI. La creación de sistemas y robots automatizados avanzados se ha visto facilitada por las características de los motores eléctricos, tales como el control de precisión, el par elevado a bajas velocidades y la adaptabilidad.

1.1 Que es un Motor Eléctrico

Si hablamos un poco de su historia: se remonta a una época caracterizada por rápidos descubrimientos e innovaciones científicas, la historia de los motores eléctricos se inicia a principios del siglo XIX. En 1821, Michael Faraday contribuyó a los motores eléctricos al demostrar la rotación electromagnética, que constituye la base de los principios del motor eléctrico. Con un imán permanente posicionado en su centro, el experimento de Faraday implicaba un cable suspendido libremente sumergido en una piscina de mercurio. Cuando una corriente eléctrica fluía a través del cable, giraba alrededor del imán, demostrando que las fuerzas electromagnéticas podían generar un movimiento rotativo continuo. En las décadas siguientes, hubo mejoras graduales y muy importantes, por ejemplo: Un elemento esencial en los motores de DC [⁵], en 1832, William Sturgeon ideó el conmutador. Los motores eléctricos prácticos y eficientes se desarrollaron hasta la segunda mitad del siglo XIX. La máquina Gramme, inventada por el belga Zenobe Gramme en 1873, que se marcó como el primer motor capaz de generar un movimiento rotativo continuo, dando paso a los motores eléctricos comerciales.

En los últimos años se ha producido un cambio de enfoque hacia la mejora de la eficiencia energética y el respeto del medio ambiente, como resultado, se han desarrollado motores de corriente continua sin escobillas y ha habido avances en la tecnología de materiales, incluida la utilización de imanes de tierras raras para aumentar la eficiencia.

*Los **motores eléctricos** son maquinas eléctricas que transforman la energía eléctrica a energía mecánica y que está energía es absorbida a través de sus bornes o terminales.*

La finalidad de los motores eléctricos es convertir la energía eléctrica, de corriente continua o alterna, en energía mecánica apta para mover otro tipo de mecanismos y cargas.

Los motores eléctricos cubren toda la gama de aplicaciones que la sociedad moderna exige, se encuentran tan pequeños como los usados en el giradiscos de un DVD, tan cotidianos como el de una licuadora, un ventilador o un acondicionador de aire. También los hay tan grandes como los que necesitan las industrias para mover molinos, trituradoras, compresores de aire, mezcladoras, etc. Otra cualidad que se distingue para los motores eléctricos es su vida útil, para motores de grandes potencias industriales deben durar por lo menos 10 años, no obstante, en muchas empresas operan motores con más de 30 años de vida.

Por otra parte, los altos rendimientos de los motores pequeños de menos de 1HP [⁶] su eficiencia es del 80%, pero en grandes capacidades llegan hasta el 96% de eficiencia.

Existen varios tipos de motores eléctricos, mencionaremos solo cinco, que son los más importares y utilizados en la ingeniería, industria, investigación, la vida diaria, etc. Son los siguientes:

⁵ DC. Motores que se alimentan con Corriente Continua, también llamada Corriente Directa.

⁶ HP. Caballo de fuerza, por sus siglas en inglés (horsepower), una unidad de medida de potencia.

- **Motores de Corriente Continua (DC).**
- **Motores de Corriente Alterna (CA).**
- **Motores Universales.**
- **Motores Paso a Paso.**
- **Servomotores.**

La diferencia fundamental entre estos tipos de motores radica en sus principios de funcionamiento, sus mecanismos de control y sus aplicaciones. En donde el control de velocidad se prioriza se prefieren los motores de DC. Se destacan por convertir energía en potencia mecánica, particularmente a bajas velocidades, lo que los hace adecuados para aplicaciones de velocidad variable o alimentada por batería. En las aplicaciones de velocidad fija se suelen utilizar motores de corriente alterna, son también la opción preferida para aplicaciones industriales y comerciales, al estar determinada por su durabilidad y requisitos mínimos de mantenimiento. Debido al mayor desgaste causado por los cepillos, los motores universales, a pesar de su alta potencia y diseño compacto, son menos adecuados para aplicaciones de funcionamiento continuo. En aplicaciones donde el control de posición supera las consideraciones de par, los motores paso a paso se utilizan con frecuencia, ofreciendo un control preciso. Para controlar con precisión la posición angular o lineal, la velocidad y la aceleración, se utilizan servomotores. Tanto los motores a pasos como los servomotores son componentes indispensables de los sistemas avanzados de control, aunque son más complejos y costosos.

Todos los motores eléctricos comparten componentes claves y cada uno de ellos desempeña un papel crucial en su funcionamiento, es fundamental del estudio de la tecnología motora entender y comprender estos componentes.

- **Rotor:** En la mayoría de los motores, el rotor está formado de bobinados conductores de alambre conductor eléctrico en un núcleo de acero, sirve como componente giratorio del motor. Es decir, en la conversión de energía eléctrica en energía mecánica, el movimiento del rotor sirve como la salida del motor.
- **Estator:** Alrededor del rotor, el estator es el componente estacionario del motor, aunque proporciona una vía de retorno para el flujo magnético, normalmente consiste en acero laminado y soporta el rotor. El estator contiene bobinados a través de los cuales se suministra la energía eléctrica de entrada en numerosos tipos de motores.
- **Rodamientos:** Apoyando la rotación del rotor, los rodamientos minimizan la fricción. Los rodamientos garantizan que el rotor gire libremente y se alinee correctamente con el estator, lo cual es crucial para garantizar el buen funcionamiento y la longevidad del motor.
- **Conmutador (en motores de escobilla):** Para garantizar que la corriente fluye en una sola dirección, este componente, exclusivo de los motores de escobillas, funciona como un interruptor. Comprende anillos conductores segmentados conectados a los devanados del rotor, formando este componente.

En algunos casos los motores eléctricos cuentan con componentes opcionales que mejoran su funcionalidad, control y longevidad, además de estas partes fundamentales. Como son:

- **Frenos de retención:** Esenciales en aplicaciones donde el motor mantiene una carga en una posición fija, estos componentes se utilizan para evitar que el eje del motor gire cuando no se aplica energía.
- **Ventiladores de refrigeración:** Los motores de alta potencia generan un calor importante. Para evitar daños y mantener la eficiencia, los ventiladores de refrigeración ayudan a disipar este calor.
- **Sellos de eje:** Estos sellos protegen los componentes internos al evitar fugas de lubricante de los rodamientos y bloquear la entrada de contaminantes en el motor.
- **Sensores:** En muchos motores modernos se incorporan varios sensores, entre ellos los de control de velocidad, posición y temperatura. Especialmente en los servomotores y motores paso a paso, estos sensores son esenciales en los sistemas de control de retroalimentación.

1.2 Como funciona un motor eléctrico

Cada elemento de un motor eléctrico cumple una función distinta, el movimiento se genera a través de la colaboración del rotor y el estator. El campo electromagnético del estator induce una fuerza sobre el rotor, lo que provoca su rotación. La conversión de energía eléctrica se produce dentro de los devanados, influyendo directamente en la eficiencia y potencia del motor.

Al disminuir la fricción y el desgaste, los rodamientos mejoran la vida útil y la fiabilidad del motor. En los motores cepillados, los conmutadores funcionan para alterar la dirección de la corriente, preservando la orientación rotacional del rotor. La incorporación de componentes opcionales como frenos de retención, ventiladores de refrigeración y sensores mejora el rendimiento del motor en aplicaciones específicas al agregar funcionalidad y control. El control y la confiabilidad son primordiales en las aplicaciones de precisión y alta potencia, por lo que estos componentes son particularmente importantes.

Para entender más a fondo el funcionamiento de un motor eléctrico nos basamos en principios electromagnéticos básicos fundamentales para los motores.

Los motores eléctricos se basan fundamentalmente en principios electromagnéticos para su funcionamiento. Describiendo cómo las corrientes eléctricas y los campos magnéticos interactúan para generar movimiento, estos principios se basan en las leyes del electromagnetismo enunciadas por científicos como Michael Faraday y James Clerk Maxwell. El campo magnético y la inducción electromagnética son dos conceptos clave en el centro de estos principios.

Un campo vectorial que envuelve imanes y corrientes eléctricas, un campo magnético representa la fuerza ejercida por un imán o un cable portador de corriente. Consisten en bobinas de alambre a través del cual fluye la corriente, los electroimanes se utilizan típicamente en motores eléctricos para generar campos magnéticos, junto con los imanes permanentes.

El proceso por el cual un cambio en el campo magnético dentro de una bobina de alambre induce una fuerza electromotriz (EMF) [7] en la bobina se conoce como inducción electromagnética. Un campo magnético dentro de una bobina induce una corriente eléctrica, constituyendo el proceso inverso del fenómeno descrito anteriormente. Una piedra angular de la operación del motor, la ley de Faraday de la inducción electromagnética describe cuantitativamente este efecto. La ecuación general es:

$$\mathcal{E} = \frac{-Nd\phi}{dt} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde:

- $\mathcal{E}$ es la fuerza electromotriz (EMF).
- N es el número de vueltas de la bobina.
- ϕ es el cambio instantáneo del flujo magnético con tiempo.

Los campos magnéticos, generación de par y rotación en los motores surge de la interacción entre campos magnéticos y corrientes eléctricas. En un motor eléctrico, el par es la contraparte rotacional de la fuerza lineal. La fuerza magnética que actúa sobre los conductores portadores de corriente dentro del campo magnético lo provoca.

Considere un escenario donde hay un lazo (trayectoria cerrada) de alambre con corriente que fluye a través de él colocado dentro de un campo magnético en un contexto simplificado. El campo magnético ejerce una fuerza sobre el cable portador de corriente dando como resultado la rotación del lazo, la dirección de esta fuerza, según la ley de la fuerza de Lorentz, es perpendicular tanto a la dirección de la corriente como al campo magnético. La mayoría de los motores eléctricos funcionan según este principio fundamental de rotación. En la figura 1.1 se muestra el principio de funcionamiento del motor eléctrico.

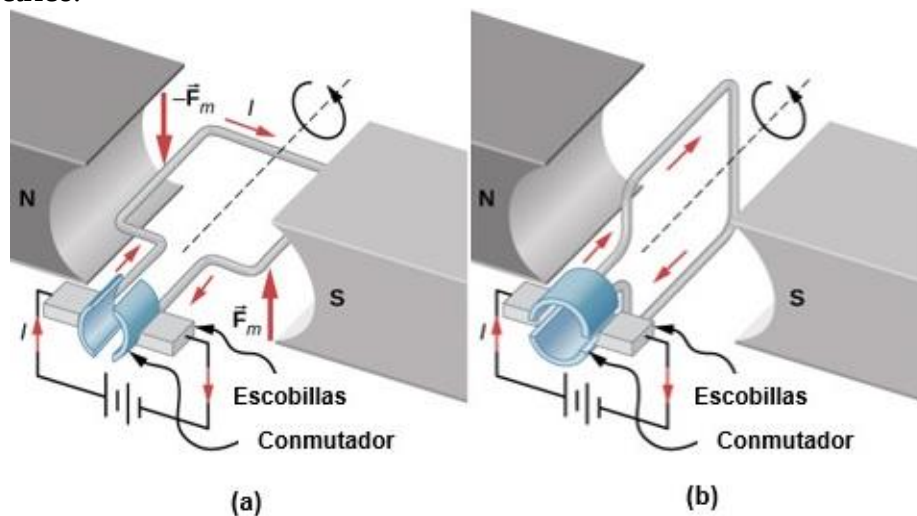


Figura 1.1 Principio de funcionamiento del motor eléctrico.

⁷ EMF. Fuerza electromotriz por sus siglas en inglés (Electromotive Force), que se refiere a la energía proporcionada por una fuente por unidad de carga eléctrica.

Relacionando las direcciones de la corriente, el campo magnético y la fuerza, se puede emplear la regla de la mano derecha para determinar la dirección de rotación y la magnitud del par. La magnitud del par producido está influida por factores como la intensidad del campo magnético, la cantidad de corriente que pasa a través del cable y las dimensiones del lazo de la bobina.

En los motores, para mantener una rotación continua, la dirección de la corriente en las bobinas (o la orientación del campo magnético) debe ser conmutada sincrónicamente con la rotación. Realizado mediante la utilización de un conmutador y escobillas o controladores electrónicos, este proceso, conocido como conmutación, es vital en los motores de DC. En los motores de Corriente Alterna, debido a la naturaleza alterna de la corriente, este efecto se logra naturalmente.

La función principal de un motor eléctrico es la transformación de energía eléctrica en energía mecánica. Dentro del motor, los campos magnéticos y las corrientes eléctricas interactúan para lograr esta conversión. Un motor, en su configuración básica, comprende un rotor (la parte en movimiento) y un estator (la parte en reposo), con el rotor o el estator creando un campo magnético. El movimiento es generado por la fuerza creada a través de la interacción entre el campo magnético y la corriente eléctrica que pasa por los devanados.

La ley de fuerza de Lorentz, que dicta que un conductor que transporta corriente dentro de un campo magnético encuentra una fuerza perpendicular tanto a la dirección de la corriente como al campo magnético, sustenta este principio de transformación:

$$F = q(E + v * B) \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Donde:

- F : es la fuerza experimentada por la partícula cargada.
- q es la carga de la partícula.
- E es el vector del campo eléctrico.
- v es el vector de velocidad de la partícula cargada.
- B es el vector del campo magnético.

Finalmente: *El flujo de corriente eléctrica a través de los devanados del rotor (o estator) en un motor genera un campo magnético que interactúa con el campo magnético del estator (o rotor). Esta fuerza generada por la interacción empuja contra el rotor, induciéndolo a girar.*

1.3 Tipos de motores eléctricos

La energía eléctrica que suministran las empresas eléctricas es del tipo alterna, sin embargo, hay aplicaciones que utilizan la corriente directa. Por ello los motores eléctricos pueden ser de estos diferentes tipos. Cada motor eléctrico es diseñado para aplicaciones específicas. En el ámbito de la ingeniería eléctrica, es crucial comprender la diversidad y funcionalidad de estos motores.

Cada uno de ellos desempeña un papel fundamental en su funcionamiento, independientemente del tipo, los motores eléctricos contienen componentes comunes a su funcionamiento. Un aspecto fundamental del estudio de la tecnología motora consiste en comprender estos componentes. Aunque el enfoque de esta conversión varía, diferentes tipos de motores logran la transformación de energía eléctrica en energía mecánica a través de un principio fundamental consistente.

1.3.1 Motores de Corriente Alterna (CA).

Estos motores funcionan con corriente alterna CA [8], son utilizados debido a su simplicidad, confiabilidad y rentabilidad; estos motores se clasifican principalmente en dos tipos, entre los que se incluyen los motores de:

- **Inducción** (o asíncronos): Los motores de inducción son muy apreciados por su robustez y simplicidad, lo que los hace populares.
- **Síncronos**: Los motores síncronos se emplean en situaciones que requieren una velocidad constante precisa.

Estos motores eléctricos tienen cambios periódicos en la dirección del campo electromagnético interno, base de su funcionamiento; los motores de inducción y los motores síncronos se encuentran entre los tipos más prevalentes.

La función de un **motor de inducción** se genera con un campo magnético giratorio periódicamente en el estator, “induciendo” una corriente eléctrica y posteriormente un campo magnético en el rotor, lo que da lugar a su rotación. Debido a su simplicidad, confiabilidad y rentabilidad, estos motores son ampliamente utilizados en tornos, fresadoras, rectificadoras y prensas. Equilibrando el rendimiento y el costo de manera efectiva, son adecuados para una amplia gama de maquinaria.

Por el contrario, los **motores síncronos** funcionan a una velocidad directamente ligada a la frecuencia de la corriente de suministro y requieren sincronización durante el arranque. Los sofisticados sistemas de control del motor también pueden integrar métodos avanzados como el control vectorial y el control directo del par, ofreciendo una mejor regulación de la velocidad y el par del motor.

Las aplicaciones de la automatización industrial moderna, la robótica y la maquinaria de precisión dependen en gran medida de estos sistemas. Los motores de CA brindan el movimiento giratorio continuo menos costoso, sin embargo, están limitados a unas cuantas velocidades estándar que son una función de la frecuencia de la corriente eléctrica.

⁸ CA. Motores que se alimentan con Corriente Alterna.

1.3.2 Motores de Corriente Directa (DC [⁹])

Los motores de corriente directa o continua son reconocidos por su alto par de arranque y la capacidad de controlar su velocidad, son alimentados por corriente continua, son óptimos para aplicaciones que requieren control de velocidad y/o posición.

Los tipos de escobillas y sin escobillas categorizan a los motores DC. Los motores de DC sin escobillas logran la conmutación a través de un interruptor electrónico externo, mientras que los motores de DC con escobillas cuentan con contactos y un conmutador.

En estos motores el estator está formado por polos magnéticos principales activados por corrientes continuas, suelen llevar además polos auxiliares y en grandes potencias polos de compensación. El rotor se alimenta con corriente continua a través del colector y las escobillas.

Para entender su funcionamiento, en otras palabras: Suministrar al motor ya sea desde una fuente de energía externa o baterías, producen tanto la corriente eléctrica y el campo magnético a través de corriente continua para transformarla en movimiento giratorio del rotor. La rotación se logra a través de la interacción entre los campos magnéticos generados por la corriente en los devanados del rotor y el campo producido en el estator. Para mantener una rotación continua, el conmutador y las escobillas cambian la dirección de la corriente en los devanados del rotor.

Los devanados del estator pueden alimentarse de diferentes formas y dan lugar a motores con características distintas:

- **Derivación.** El estator se alimenta con la misma tensión (voltaje) de alimentación que el inducido o rotor.
- **Independiente.** El estator se alimenta con una fuente de corriente continua externa.
- **Serie.** La intensidad de corriente que atraviesa los devanados del estator es la misma que alimenta el inducido.
- **Compuesto.** Es una combinación de las características Serie y Derivación.

Su facilidad de control de velocidad y alto par de arranque, esencial para levantar y mover cargas pesadas, los hacen de uso frecuente en la industria, pero requieren potencia de un generador o una batería, los motores de DC pueden alcanzar velocidades extremadamente grandes, hasta de 30,000 rpm (revoluciones por minuto). Se usan con frecuencia en vehículos, dispositivos inalámbricos, o en aplicaciones donde se requieren controlar múltiples velocidades y direcciones, como es el caso de una máquina de coser, por ejemplo.

⁹ DC. Motores que se alimentan con Corriente Directa.

1.3.3 Motores Paso a Paso

Los motores de pasos son dispositivos que transforman señales eléctricas en movimiento mecánico, es decir, dispositivos electromagnéticos donde su eje o flecha gira con ángulos precisos, teniendo un rango de giro de 90° hasta el más pequeño de 0.72° , dependiendo de su aplicación. Funciona a partir de un conjunto de pulsos eléctricos, que nos permite manipular el control de posición, velocidad y giro de manera precisa. Cada pulso eléctrico, de un motor paso a paso genera un movimiento en pasos discretos, girando una distancia angular fija. Permitiendo un control preciso sobre la posición del motor, el rotor gira en paso, correspondiente a una secuencia de pulsos, en otras palabras, es un motor de corriente continua sin escobillas donde la rotación se divide en un cierto número de pasos resultantes de la estructura del motor. Una revolución completa del eje es de 360° , que se puede dividir en 200 pasos, lo que significa que se realiza un giro angular de rotación del eje cada 1.8° , también hay motores donde la rotación del eje se realiza cada 2° , 2.5° , 5° , 15° o 30° .

Son motores ideales para aplicaciones que requieren un control preciso de la posición y la velocidad, como se observa en las impresoras 3D [10] y máquinas CNC [11]. Normalmente ofrecen una menor potencia de salida general, mientras que tienen un excelente control del ángulo de rotación y la velocidad.

Los motores paso a paso son muy confiables y tienen un mantenimiento de bajo costo, también cuentan con ventajas muy prácticas para su correcto funcionamiento:

- Compatibles por normatividad con los controladores de motores más comunes.
- Posicionamiento posible sin necesidad de un encoder [12].
- Disponibles en muchos tamaños y tipos.
- Fuerza y por tanto par elevados.
- Encoders y frenos disponibles.
- Grado de protección al ambiente alto (por ejemplo: clase IP68) [13].

Existen diferentes tipos de motores a pasos tales como los siguientes:

- Motor Paso a Paso de Imán Permanente.
- Motor Paso a Paso de Reluctancia Variable.
- Motor Paso a Paso Híbrido.
- Motor Paso a Paso Unipolares y Bipolares.

¹⁰ Impresoras 3D. Dispositivo que crea objetos tridimensionales a partir de un modelo digital, añadiendo material capa por capa.

¹¹ CNC. Control Numérico por Computadora, que significa automatización de máquinas con un sistema de control de 3 o más ejes para maquinado de objetos.

¹² Encoder, sistema de realimentación que indica posición del rotor.

¹³ IP68. Norma de protección de acuerdo al ambiente donde funciona, en este caso IP68 son sumergibles.

1.3.4 Motores Universales

Los motores universales son aquellos que funcionan con corriente continua DC o corriente alterna CA sin la necesidad de modificar componentes.

Una de las cualidades de este tipo de motor y que lo hace ideal para aplicaciones es la conexión de la fuente de alimentación, ya que funciona en modo DC o CA. Su estructura es muy similar al motor de DC en serie, pero está diseñado para funcionar en los dos modos (especialmente en CA). Tiene un alto rendimiento en términos de velocidad y torque especialmente donde se requiere alta velocidad y carga variable.

Es muy utilizado en electrodomésticos y herramientas eléctricas como aspiradoras, licuadoras, taladros y otras máquinas portátiles; su diseño compacto y ligero lo hace un motor adecuado para dispositivos portátiles y de tamaño pequeño.

La desventaja de estos motores es que utilizan escobillas o carbones en su interior, son relativamente duraderos, pero experimentan un desgaste por su funcionamiento y esto baja su vida útil.

1.3.5 Servomotores

Un servomotor es un dispositivo eléctrico autónomo, formado por un motor BLCD [¹⁴], motor de corriente continua sin escobillas o motor conmutado electrónicamente. Estos dispositivos son actuadores rotativos que permiten un control preciso de la posición angular, velocidad y aceleración. A diferencia de un motor común que gira cuando se le aplica corriente, un servomotor tiene un sistema electromecánico integrado y control interno; normalmente está compuesto por un motor, un sensor de posición (de retroalimentación), un tren de engranes y un circuito de control que le permite que el eje de salida se mueva a un ángulo específico, mantener su posición frente a fuerzas externas y regular la velocidad de su movimiento; un motor regular no puede lograr estas cualidades.

Para la ingeniería, el servomotor es un elemento adecuado para uso en un sistema de control de lazo cerrado, utiliza la retroalimentación de posición para controlar su velocidad de rotación y posición. Su señal de control que puede ser analógica o digital, representa el comando de posición final del eje. Capaces de controlar con precisión la posición, velocidad y aceleración, proporcionan una gestión completa. El circuito de control recibe información sobre la posición del motor desde el dispositivo de retroalimentación, normalmente un codificador o resolver, y ajusta el funcionamiento del motor para alinearlo con el comando de entrada. Esta configuración le permite actuar con instrucciones muy detalladas y llevar a cabo movimientos que requieren una precisión milimétrica. Ideal para la robótica (control de brazos), posicionamiento de antenas, sistemas de fabricación automatizada como CNC (Control Numérico Computarizado) y vehículos autónomos guiados.

¹⁴ BLCD. Por sus siglas en inglés (Brushless Direct Current Motor), que significa Motor de corriente continua sin escobillas.

La palabra servomotor se origina a principios del siglo XX y ha evolucionado en varias etapas innovadoras formando una pieza importante en la ingeniería moderna. Los diseños de servomotores fueron para uso de aplicaciones militares e industriales. EL término “servo” fue utilizado por primera vez en 1859 por Joseph Facort, quien construyó un mecanismo de retroalimentación para controlar los timones de un barco de vapor.

En una línea de tiempo desde 1920 hasta la actualidad, se puede mencionar el avance del desarrollo de estos motores. Estas son algunas fechas importantes de la historia de los servomotores.

- **1920:** Sistemas de control de los mecanismos para buques de navegación marítima.
- **1930:** Construcción de servosistemas para el control automático de aeronaves, aprovechando el mecanismo de retroalimentación.
- **1950:** Innovaciones en electrónica y teoría de control se logra miniaturizar los servosistemas y amplía sus aplicaciones para uso comercial.
- **1960:** Por el desarrollo en la electrónica se logró avances en el diseño y funcionalidad de los servomotores.
- **1982:** La patente del sistema digital de control de servomotores, se mejora en la precisión para su uso en la robótica y maquinaria CNC.

El funcionamiento de un servomotor se basa en un sistema de control de posición a lazo cerrado, es decir, que ajusta el ángulo del motor en función de una señal de entrada, utilizando Modulación por Ancho de Pulso PWM [15] o una señal analógica esto para servomotores industriales; son comunes en sistemas hidráulicos y otros, donde se requiere un control preciso y no una gran velocidad de respuesta, estos servomotores se pueden manejar con dispositivo de control como un PLC [16] o microcontrolador, estas señales de entrada nos dicen cuándo y cómo debe moverse el servomotor.

Para entender su funcionamiento de manera general, las señales de entrada le indican al servomotor la posición, velocidad o torque deseado, utilizando sensores de realimentación como encoders o resolver, quienes comparan la señal con su posición actual con la deseada y ajustar su movimiento en consecuencia.

¹⁵ PWM. Por sus siglas en inglés (Pulse Width Modulation), que significa Modulación por Ancho de Pulso, útil para controlar señales digitales.

¹⁶ PLC. Por sus siglas en inglés (Programmable Logic Controller), que significa Controlador Lógico Programable son computadoras industriales para la automatización y para controlar maquinaria y procesos.

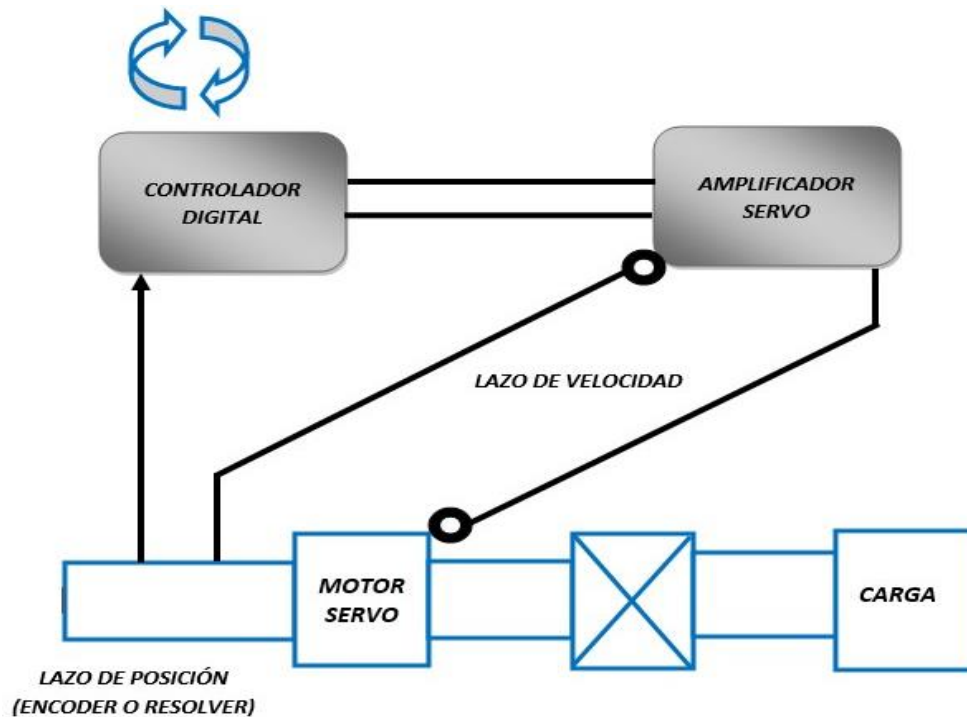


Figura 1.2 Diagrama Básico del funcionamiento de un Servomotor.

Si un servomotor está especificado para giro de solo 90° en cualquier dirección, tiene un movimiento de 180° ; si además el PWM se inicia cada 20 milisegundos (mS), la duración del pulso positivo determinará hasta donde gira el motor, por ejemplo:

- Un pulso positivo de 1.5mS hará que el motor gire a la posición de 90° .
- Si el tiempo es menor a 1.5mS hará que el motor gire en sentido contrario al reloj hacia la posición de 0° .
- Si el tiempo es mayor hará que el motor gire hacia la posición de 180° .

En el interior de todo servomotor reside su capacidad para controlar con precisión la posición de su eje de salida, esto se consigue con varios componentes clave del servomotor básico:

- **Motor:** Es el corazón del servomotor que convierte la energía eléctrica en energía mecánica.
- **Sensor de retroalimentación:** Proporciona información de la posición actual del eje del motor. Los tipos de sensores incluyen encoders ópticos, resolvers y potenciómetros.
- **Controlador:** Es el cerebro del servomotor, es un circuito electrónico y responsable de recibir las señales de entrada comparando la información del sensor para ajustar el movimiento del motor según lo deseado.

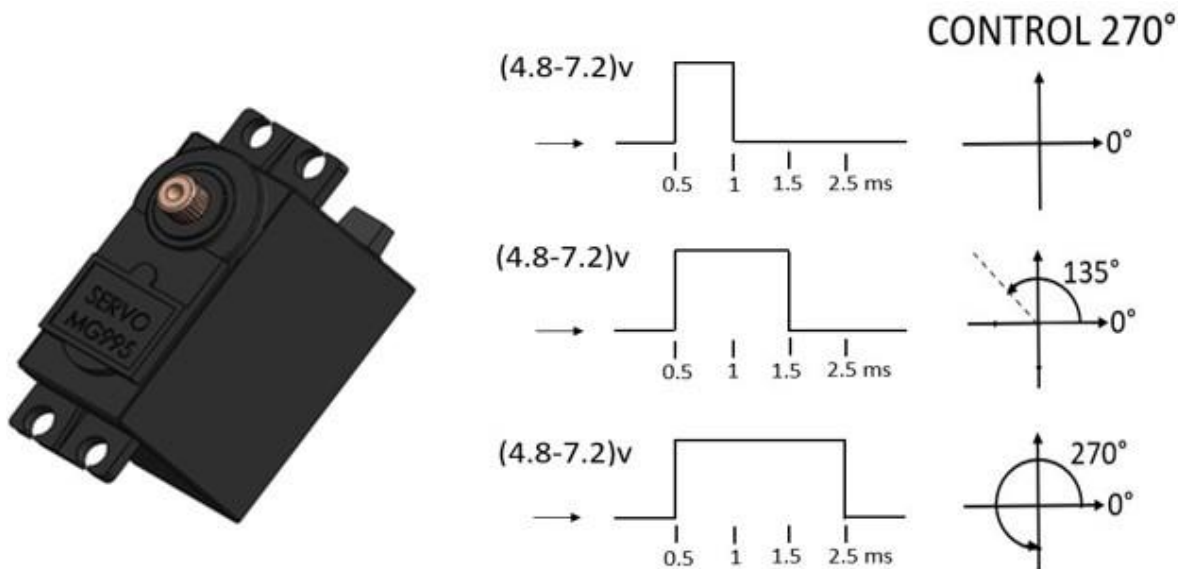


Figura 1.3 Servomotor MG995 de 270° de control angular y sus pulsos (PWM).

a) Las señales eléctricas (PWM y ancho del pulso positivo) son “instrucciones” enviadas desde un sistema de control al servomotor, estas señales dictan el comportamiento del motor desde la velocidad hasta la posición, y son importantes para el control preciso del mismo.

b) El sistema de control convierte esas señales eléctricas en movimiento físico, utilizando un sistema de engranajes, algoritmos de control y etapa de potencia, esto para que el servo pueda moverse con precisión hasta la posición angular deseada.

c) Su sistema de retroalimentación se basa en un algoritmo complejo para una exactitud precisa, donde el sistema garantiza que la salida del servo coincida con la orden de entrada. Los sensores de retroalimentación más comunes son:

- **Codificadores:** Son útiles para proporcionar información precisa de la velocidad del eje del motor.
- **Señal de consigna:** Es la respuesta deseada y comunicada por la señal de control.
- **Retroalimentación:** Es la respuesta real del servosistema.

La comparación y el ajuste continuo de estas dos señales, la de entrada y la posición actual permiten que el servo obtenga un control preciso.

Motor AC o DC: La pieza principal de potencia mecánica del servo es el tipo de motor ya que afecta a la aplicación.

- Los motores AC son para aplicaciones de mayor velocidad y potencia.
- Los motores DC son para aplicaciones de control más precisos.

De acuerdo a la aplicación y especificaciones del sistema se puede escoger el tipo de servomotor.

Ampliando los sistemas y componentes que forman el servomotor, podemos mencionar a los siguientes componentes:

Circuito de control: Este componente es el cerebro del servomotor y su función es procesar las señales entrantes del controlador y emitir “órdenes” al motor. Determina la posición, la velocidad y además garantiza que funcione el motor según lo indicado por las señales de entrada.

Potenciómetro: Este sensor se ubica principalmente en los servosistemas más sencillos o pequeños, proporciona información sobre la posición del eje del motor, ayudando a mantener la precisión del control.

Eje del motor: Es el componente giratorio que transmite la potencia mecánica del motor al tren de engranes que es la salida para realizar las tareas deseadas.

Servosistema: Actúa como intermediario entre el motor y el sistema de control, recibe las señales de control y suministra al motor la potencia requerida para lograr el movimiento indicado, ajustando voltaje y corriente necesaria en función de la retroalimentación.

Engranes: Son componentes clave para amplificar el par de salida del motor y permiten un movimiento preciso, los engranes están conectados al eje del motor y ayudan ajustar la fuerza mecánica deseada.

Servoamplificador o driver: Este elemento refuerza las señales del circuito de control, garantizando señales para accionar el motor con eficacia, es decir, es la etapa de potencia de un servomotor, encargada de dar potencia a la señal de control para generar el movimiento del motor. Esta etapa transforma la señal de control (PWM) en una señal de potencia que pueda impulsar el motor.

Encoders: Son dispositivos avanzados de retroalimentación que proporcionan información detallada sobre la posición o la velocidad del eje del motor al circuito de control. Ofreciendo datos de posición relativa o absoluta, esto significa información posicional específica en tiempo real.

Resolver: Son similares a los encoders, pero más robustos, se utilizan para proporcionar retroalimentación de posición en entornos donde se requiere precisión y durabilidad, como en espacios de alta temperatura o alta vibración.

Fuente de alimentación: Se requiere una fuente de alimentación específica para proporcionar la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento, estas especificaciones dependen del tipo de servomotor de AC o DC.

Sistema de refrigeración: En algunos casos de aplicación y entorno, los servomotores incluyen sistema de refrigeración para evitar el sobrecalentamiento que puede afectar al rendimiento y durabilidad.

En resumen, los servomotores, contiene elementos clave o mejor dicho elementos importantes para su funcionamiento y dependiendo de su aplicación se puede elegir el tipo de servomotor. Se pueden clasificar en función de su alimentación de corriente, construcción y características específicas de la aplicación. Cada tipo tiene elementos distintos que los hacen adecuados para las aplicaciones deseadas, que influyen en su rendimiento y dinámica de control. A continuación, un resumen de los tipos AC y DC, sus ventajas y desventajas.

Servomotores de AC.

Son conocidos por su robustez y se utilizan en aplicaciones de alta potencia, donde la importancia de su rendimiento y durabilidad son fundamentales, estos motores funcionan con corriente alterna, lo que significa que el sentido de la corriente cambia periódicamente.

Las aplicaciones para estos motores son en máquinas industriales, automatización industrial, máquinas CNC, procesos de fabricación automatizados y robóticos. Su capacidad para soportar cargas mayores y aplicaciones de alta velocidad los hace ideales para sectores que exigen un funcionamiento continuo y confiable.

VENTAJAS:

- **Alto rendimiento:** Muy eficientes en convertir la energía eléctrica en potencia mecánica.
- **Vida útil:** Está diseñado para entornos industriales adversos con un mantenimiento mínimo.
- **Alto par y bajas velocidades:** Estos motores se les conoce por producir un par elevado incluso a bajas velocidades, esencial para aplicaciones que implican maquinaria pesada.

DESVENTAJAS:

- **Costo:** Son más caros por su diseño y construcción.
- **Complejidad:** Sus sistemas de control son más complejos debido a la corriente alterna.

CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS ÚNICOS:

- **Control de velocidad:** son capaces de controlar una gama amplia de velocidades, utilizando algoritmos avanzados en sus controladores para ajustar la fase y la frecuencia del motor.
- **Sistemas de realimentación:** mecanismos sofisticados en encoder o resolver, proporcionan un control más preciso de la posición y la velocidad.

- **Fuente de alimentación de AC:** Debe ser estable y de potencia en función del tamaño del motor y de las demandas de la carga en la aplicación deseada.

Servomotores de DC.

Permiten un control de la posición y la velocidad, generan movimiento rotativo continuo y preciso, son compactos y eficientes, como hemos mencionado incluyen un circuito de control y un mecanismo de realimentación como un encoder o un potenciómetro.

La señal de control, se interpreta como la dirección y la velocidad de rotación. Dependiendo de la señal de comando, este servo puede girar en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario a las agujas del reloj a una velocidad variable.

Las aplicaciones de los servomotores de DC entran en una gama amplia de precisión pequeña para la robótica, sistemas de posicionamiento y la automatización a pequeña escala. Su control preciso lo hace idóneo para tareas que requieren una manipulación detallada y delicada.

VENTAJAS:

- **Control de alta precisión:** Facilita ajustar con precisión la posición y la velocidad.
- **Respuesta rápida:** Responden rápidamente a cambios de la señal de control, adecuados para tareas dinámicas.
- **Control sencillo:** La electrónica de control de estos motores es menos compleja en sus algoritmos respecto a los de AC.

DESVENTAJAS:

- **Par limitado:** Menor torque respecto a los de AC.
- **Desgaste:** Los elementos como las escobillas y los colectores, impactan en vida y pueden requerir mantenimiento o reemplazo de piezas.

CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS ÚNICOS:

- **Diseño del rotor y el colector:** Permite un control eficaz y preciso de la potencia del motor.
- **Mecanismo de retroalimentación:** Se utilizan sensores como los encoders, para una mayor precisión.
- **Fuente de alimentación:** Funciona con una fuente estable de DC.

Servomotores con escobillas.

Los servomotores con escobillas se utilizan para suministrar corriente al motor a través del conmutador, está diseñado de la manera tradicional, es un motor de DC.

Estos motores son muy útiles en electrónica de consumo, en aplicaciones de automoción y pequeños equipos industriales en los que el costo es esencial.

VENTAJAS:

- **Rentable:** Menos costos de producción que los otros servomotores.
- **Tecnología probada:** Es muy confiable y se basa en años de desarrollo y uso.
- **Facilidad de control:** El circuito es de los más sencillos que hay.

DESVENTAJAS:

- **Mantenimiento:** Las escobillas y los colectores se desgastan con el tiempo, lo que puede provocar un mal funcionamiento o averías en su interior.
- **Ruido eléctrico:** La fricción entre las escobillas y el colector genera ruido eléctrico que puede interferir con los dispositivos electrónicos cercanos.

CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS ÚNICOS:

- **Diseño de carbones:** El contacto directo con el conmutador facilita la transmisión de electricidad, pero requiere un mantenimiento regular.
- **Relación par-velocidad:** Proporciona un equilibrio de par y control de velocidad, adecuado para muchas aplicaciones de potencia moderada y baja.
- **Durabilidad:** Aunque en general son robustos, el desgaste de las escobillas puede afectar su tiempo de vida a largo plazo.

Servomotores sin escobillas (Brushless).

Los servomotores sin escobillas ofrecen ventajas que otros servomotores no tienen, al eliminar éstas en favor de un sistema de conmutación controlado electrónicamente, favorecen a un excelente funcionamiento, más confiabilidad y reduce el mantenimiento del motor.

Es muy utilizado en aplicaciones que requieran alto rendimiento y durabilidad, los motores sin escobillas se utilizan en maquinaria CNC, robótica, industria aeroespacial y automotriz. Su eficiencia y rendimiento los hacen adecuados para ambientes exigentes.

VENTAJAS:

- **Alta eficiencia:** Sin la fricción y la caída de tensión que suelen provocar las escobillas, los motores sin escobillas funcionan de forma más eficiente y sin ruido eléctrico.
- **Menor mantenimiento:** La ausencia de escobillas reduce el desgaste, alargando la vida útil del motor y disminuyendo mantenimiento.
- **Mayor rango de velocidad:** Los motores sin escobillas pueden funcionar a varias velocidades sin sacrificar la eficiencia ni el rendimiento.

DESVENTAJAS:

- **Mayor costo:** Su diseño y los sistemas de control sofisticados generan costos muy altos para algunas aplicaciones.
- **Complejidad en el control:** Requiere conmutación electrónica, lo que puede complicar la integración y la programación en algunas aplicaciones.

CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS ÚNICOS:

- **Conmutación electrónica:** Se utilizan sensores para regular el rendimiento y la posición a través de las bobinas del motor.
- **Mecanismo de retroalimentación:** Se combinan con encoders o resolvers, que proporcionan un control preciso de la velocidad y la posición.
- **Eficiencia térmica:** Genera menos calor que los motores de escobillas, lo que puede ser crucial en máquinas con poco espacio.

Servomotores síncronos.

El servomotor síncrono de AC, está diseñado para funcionar a una velocidad constante, sincronizada con la frecuencia de la corriente de alimentación. La velocidad del motor está directamente relacionada con la frecuencia aplicada, lo que hace que estos motores sean excepcionalmente precisos.

Estos motores son ideales para aplicaciones donde la velocidad es crucial, como en sistemas de transportadores, relojes síncronos y otra maquinaria en la que la precisión de la posición es fundamental.

VENTAJAS:

- **Velocidad constante:** Funcionan a una velocidad fija que no se ve afectada por las variaciones en las condiciones de carga.
- **Alta eficacia y precisión:** Muy eficaz y capaz de mantener posiciones precisas sin sistema de realimentación en condiciones estacionarias.
- **Construcción robusta:** Construidos normalmente para soportar entornos industriales rigurosos, lo que contribuye a su confiabilidad.

DESVENTAJAS:

- **Requiere un control preciso:** La fluctuación en la frecuencia de alimentación puede afectar al rendimiento del motor.
- **Menos versatilidad:** Principalmente eficientes sólo dentro de un estrecho rango de condiciones adaptadas a su diseño específico.

CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS ÚNICOS:

- **Funcionamiento a velocidad fija:** La velocidad del motor está intrínsecamente ligada a la frecuencia de la entrada, lo que la hace predecible y estable.
- **Corrección del factor de potencia:** Puede corregir el factor de potencia del sistema eléctrico, dando beneficios en las áreas industriales y cumplimiento de normatividad.
- **Retroalimentación independiente:** En muchas aplicaciones, los servomotores síncronos pueden mantener su posición sin necesidad de mecanismos de realimentación adicionales.

Servomotores asíncronos.

Este tipo de motor suele tener un diseño más sencillo que los servomotores síncronos, que carecen de motores de imanes permanentes. Son ampliamente utilizados en la industria donde se requiere variación de velocidad y robustez. Los usos comunes incluyen bombas, ventiladores y sistemas de banda transportadoras donde el control preciso de la velocidad es menos crítico.

VENTAJAS:

- **Robustez:** Vida útil amplia.
- **Mantenimiento:** menor debido al número de componentes expuestos al desgaste.
- **Relación costo-eficacia:** Generalmente más baratos de fabricar y su construcción más sencilla.

DESVENTAJAS:

- **Variación de la velocidad:** La velocidad puede variar con la carga y los cambios en la frecuencia de la entrada.
- **Menos eficiente:** Suelen ser menos eficientes que los servomotores síncronos, especialmente a bajas velocidades.

CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS ÚNICOS:

- **Deslizamiento relativo:** La velocidad del rotor va por detrás de la velocidad del campo magnético del motor, una característica conocida como deslizamiento.
- **Par:** Proporciona un alto par de arranque, pero la eficiencia disminuye a bajas velocidades.

Servomotores lineales.

Los servomotores lineales convierten directamente la energía eléctrica en movimiento lineal sin necesidad de sistemas de conversión mecánica como engranajes. El resultado es un sistema de control de movimiento más limpio, eficiente y preciso.

Ideal para aplicaciones que requieren un posicionamiento preciso y un movimiento rápido, como en robots de montaje, maquinaria CNC y sistemas de transporte de alta velocidad.

VENTAJAS:

- **Alta precisión:** Permite un posicionamiento y un control del movimiento precisos.
- **Velocidad y aceleración:** Capaz de alcanzar altas velocidades y aceleraciones rápidas.
- **Desgaste reducido:** La ausencia de elementos mecánicos de transmisión reduce el desgaste y el mantenimiento.

DESVENTAJAS:

- **Costo:** Generalmente más caro debido a la tecnología y los materiales utilizados.
- **Complejidad:** Requiere sofisticados sistemas de control y mecanismos de retroalimentación para funcionar eficazmente.

CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS ÚNICOS:

- **Accionamiento directo:** No hay conexiones mecánicas, por lo que el control del movimiento es directo y preciso.
- **Fuerza:** Alta densidad de fuerza en comparación con los motores tradicionales de tamaño similar.

Servomotor lineal con núcleo de hierro.

Los servomotores lineales con núcleo de hierro están equipados con un núcleo de hierro en sus bobinados, lo que aumenta el flujo magnético y mejora su rendimiento.

CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS ÚNICOS:

- **Fuerza:** Proporcionan mayor fuerza por unidad de tamaño debido a las propiedades magnéticas del núcleo de hierro.
- **Rigidez y precisión:** Ideal para aplicaciones que requieren una gran rigidez y un control preciso.

DESVENTAJAS:

- **Sobrecalentamiento:** La presencia de un núcleo de hierro puede provocar calentamiento en engranes, lo que puede afectar a la suavidad del movimiento.
- **Peso y producción de calor:** Estos motores son más pesados y tienden a producir más calor, por lo que requieren métodos de refrigeración robustos.

Servomotor lineal sin hierro.

Los servomotores lineales sin núcleo de hierro no contienen núcleo de hierro en los bobinados, lo que elimina el engranaje y permite un funcionamiento más suave.

CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS ÚNICOS:

- **Movimiento suave:** La ausencia de un núcleo de hierro reduce significativamente el calentamiento, mejorando la suavidad del movimiento.
- **Ligero:** Son más ligeros que los motores con núcleo de hierro, lo que los hace adecuados para aplicaciones en términos más pequeños en las que el peso es un factor crítico.

DESVENTAJAS:

- **Fuerza de salida inferior:** Sin núcleo de hierro, estos motores suelen tener una menor fuerza de salida, lo que puede no ser adecuado para todas las aplicaciones.

Los servomotores se utilizan en una variedad de aplicaciones por su capacidad para ofrecer un control preciso y dinámico. Algunas de las aplicaciones incluyen:

- **Robótica:** El servo de rotación continua se utiliza en la construcción de brazos robóticos para controlar con precisión el movimiento y la posición, y es esencial para líneas de montaje, robots quirúrgicos, entre otros.
- **Maquinaria CNC:** En máquinas de control numérico por computadora (CNC), los servomotores controlan los movimientos de los ejes para realizar corte y operaciones de mecanizado con alta precisión.
- **Impresión y embalaje:** En la industria de la impresión y el embalaje, los servomotores se utilizan para controlar la alimentación de material, la posición de las impresiones y el sellado de productos con una precisión milimétrica.
- **Automatización de procesos:** Desde sistemas de transporte hasta equipos de montaje, los servomotores son fundamentales en la automatización de procesos industriales, donde se requiere un control preciso del movimiento.
- **Electrónica de consumo:** En este sector, los servomotores se encuentran en dispositivos como cámaras fotográficas y de video, drones, sistemas de audio y video, e incluso en sistemas de enfoque automático de cámaras. Su capacidad para ofrecer un control preciso y estable del movimiento es crucial para garantizar su funcionalidad y la experiencia del usuario en estos dispositivos.
- **Automóviles:** Los servomotores se pueden encontrar en numerosos sistemas automotrices, desde los sistemas de dirección asistida hasta los sistemas de control de frenado y los sistemas de control de la transmisión. En los vehículos modernos,

los servomotores también se utilizan en sistemas de confort, proporcionando un control preciso del movimiento que contribuye a mejorar la seguridad, la eficiencia y la comodidad en la conducción.

- **Aeroespacial:** Su función integral en el control de la posición de los componentes de la aeronave, como flaps, timones y otras superficies de control.
- **Médica:** Fundamental en dispositivos, como las máquinas de resonancia magnética, donde el movimiento preciso es esencial para obtener imágenes exactas.
- **Comunicaciones:** Los servomotores ajustan las antenas parabólicas para optimizar la recepción y transmisión de la señal.

A continuación, comparamos características de diferentes servomotores y sus aplicaciones:

Características	Servomotor Básico	Servomotor Industrial
Aplicaciones	Modelismo, robótica educativa	Robótica, CNC, Automatización
Construcción	Más simple, materiales básicos	Robusta, materiales de alta resistencia.
Costo	Bajo (cientos)	Alto (miles)
Durabilidad	Baja a media	Muy alta, trabajo extremo continuo
Precisión	Moderada	Muy alta, milimétrico y milisegundos
Sensor	Potenciómetro sencillo	Encoder óptico, resolvers, etc.
Tipo de control	Señales PWM sencillas	Algoritmos avanzados y complejos
Torque	Limitado (muy bajo)	Muy alta (Mover cargas pesadas)

Tabla 1.1. Diferencias del Servomotor.

Aplicación	Tipo de Servomotor	¿Por qué?
Robótica educativa	Servomotor básico DC analógico	Bajo costo, fácil de controlar, suficiente precisión.
Drones / Modelismo	Servomotor básico digital	Mejor respuesta rápida y precisión ligera.
Brazos robóticos industriales	Servomotor AC más encoder	Alta precisión, gran torque y resistencia.
Máquinas CNC	Servomotor AC con encoder o resolver	Máxima precisión y durabilidad en trabajo continuo.
Impresoras 3D de alta gama	Step-Servomotor o Servomotor DC digital	Movimiento suave y sin pérdida de pasos.
Automatización ligera	Servomotor DC analógico o digital	Suficiente control, bajo costo.
Aplicaciones en áreas extremas (temperatura, vibraciones)	Servomotor AC con resolver	Alta resistencia ambiental, máxima fiabilidad.

Tabla 1.2. Comparativa del Servomotor en Aplicaciones.

Los servomotores básicos se pueden controlar fácilmente con señales PWM, usando tarjetas básicas como Arduino [17], Raspberry Pi [18], Esp32 [19], y otras. Los servomotores industriales necesitan sistemas muy robustos y de capacidades de cómputo altos y especiales como PLC [20] y en muchos casos comunicaciones como EtherCAT [21], CANopen [22], Modbus [23], entre otras. En las siguientes tablas mencionamos las características algunos modelos de servomotores:

MODELO	CARACTERÍSTICAS	COMENTARIOS
SG90	Servo pequeño analógico barato	Proyectos en Arduino
MG996R	Servo grande digital engranes metálicos	Mas torque y durabilidad perfecto para brazos simples
Futaba S3003	Marca clásica para modelismo RC	Muy usado en coches y aviones en control remoto

Tabla 1.3. Servomotores Básicos (educativos, modelismo, robótica básica).

MODELO	CARACTERÍSTICAS	COMENTARIOS
Savox SC-1258TG	Digital ultra rápido, engranes de titanio	Drones de carrera o robots de alta respuesta
Hitec HS-5645MG	Digital alta precisión y torque medio	Buen equilibrio entre fuerza y velocidad

Tabla 1.4. Servomotores Digitales (drones, robots rápidos).

MODELO	CARACTERÍSTICAS	COMENTARIOS
Leadshine ES-DH	Servo híbrido, encoder incorporado	Muy usado en impresoras 3D industriales y CNC pequeños
Teknic ClearPath	Motor paso a paso con control de servo interno	Fácil de instalar, calidad profesional y costoso

Tabla 1.5. Step-Servo (entre paso a paso y servo).

¹⁷ Arduino. Es una Plataforma de hardware y software de código abierto que permite crear proyectos electrónicos.

¹⁸ Raspberry Pi. Es un pequeño computador con un sistema operativo Linux.

¹⁹ ESP32. Es un microcontrolador de bajo consumo y conectividad de Wi-Fi y Bluetooth.

²⁰ PLC. Es una computadora industrial diseñada para controlar y automatizar procesos en fábricas.

²¹ EtherCAT. (Ethernet for Control Automation Technology), es un protocolo de comunicación en tiempo real para redes industriales como la automatización de control que utiliza Ethernet.

²² CANopen. Es un protocolo de comunicaciones industrial basado en el bus CAN (Controller Area Network), que estandariza la comunicación entre dispositivos y aplicaciones de diferentes fabricantes.

²³ Modbus. Es un protocolo de comunicación abierto que permite la transmisión de datos entre dispositivos electrónicos, como controladores lógicos programables (PLC), sensores, actuadores y otros equipos industriales.

MODELO	CARACTERÍSTICAS	COMENTARIOS
Askawa Sigma-7	Servo AC, encoder absoluto de alta resolución	Común en robots industriales y maquinaria de precisión
Mitsubishi MR-J4 Series	Servo AC, comunicación avanzada (EtherCAT, SSCNET [²⁴])	Muy usado en fábricas de alta velocidad
Delta ASDA-B2	Más económico, Servo AC de buena calidad	Buena opción para automatización de nivel medio

Tabla 1.6. Servomotores Industriales (robótica, CNC, automatización).

Los servomotores son importantes por su eficiencia y precisión en diversas aplicaciones industriales, y en los sistemas de automatización, donde la capacidad de controlar movimiento es esencial. Las maquinas CNC están compuestas por servomotores que impulsan los movimientos precisos necesarios para cortar, fresar y dar forma a las piezas con una precisión excepcional, del mismo modo, para los brazos robóticos utilizados en líneas de montaje, los servomotores proporcionan destreza y rendimiento al realizar tareas de montaje complejo sin fatiga.

Por otro lado, en el área de la electrónica de uso cotidiano, los servomotores desempeñan una función importante, con dispositivos electrónicos como las cámaras con función de autoenfoco y estabilización de imagen, que permiten obtener imágenes nítidas en condiciones dinámicas. Además, en los sistemas de entretenimiento doméstico, los servomotores se utilizan para accionar mecanismos en consolas de videojuegos y configuraciones de realidad virtual, proporcionando interacciones con el usuario realistas y con capacidad de respuesta rápida.

También los servomotores son utilizados en equipo especializado, tales como robots quirúrgicos, donde facilitan al doctor la intervención asistida y compleja.

Además de su precisión, los servomotores tienen otras cualidades, una de ellas es la capacidad de mantener un torque constante en toda su gama de revoluciones hasta 3,000 rpm [²⁵]. Esta cualidad supera a los motores asíncronos convencionales.

Teniendo en cuenta que el torque es una relación entre el momento de inercia de la carga y la aceleración angular, lo podemos expresar:

$$T = I * a \quad \text{Ecuación 1.3}$$

²⁴ SSCNET. (Servo System Controller Network), es un protocolo de red industrial que permite la comunicación determinista de alta velocidad entre servoamplificadores y controladores de movimiento.

²⁵ Rpm. Denotado así, por sus siglas en inglés (Revolutions per Minute), que significa revoluciones por minuto, unidad de medida que indica frecuencia de rotación de un objeto en movimiento circular.

Donde:

- T: torque (N → newton por metro)
- I: momento de inercia ($\text{Kgm}^2 \rightarrow \text{Kilogramo por metro cuadrado}$)
- a: aceleración angular ($\frac{\text{rad}}{\text{seg}^2} \rightarrow \text{radián por segundo al cuadrado}$)

En esta relación, se logra ver que, para una aceleración mayor con el mismo nivel de carga, precisaríamos más torque para mover la misma carga.

Los servomotores soportan hasta 300% de sobrecarga por un determinado tiempo, lo que les ayuda a romper la inercia con aceleraciones o desaceleraciones bruscas.

Control de un servomotor

Existen distintos métodos de control, el más común y utilizado es el control por pulso (PWM) y frecuencia.

El control de un servomotor se puede realizar con varios métodos que garantizan su funcionamiento para que sea preciso y eficaz, es fundamental el uso de la modulación por ancho de pulso (PWM), es la herramienta central que gobierna el movimiento del motor; pulsos digitales controlados, la duración del pulso de la modulación (ancho) determina la posición del eje del motor, esto significa que facilita el posicionamiento exacto. Estas duraciones (anchos) de pulso están integradas en trenes de pulsos, es decir, una serie de pulsos de encendido y apagado, así se controla la velocidad y la posición del servomotor.

Señales de control.

Los servomotores pueden controlarse por medio de señales tanto analógicas como digitales.

Una **señal analógica** es una señal continua en el tiempo y controla al servomotor a través de un rango de voltaje continuo, su nivel de voltaje se correlaciona directamente con una posición específica del eje de salida del servomotor, este tipo de señal se ocupa para aplicaciones que requieran un control directo y menos preciso.

Una **señal digital** son aquellas señales discretas que toman valores específicos, son las más utilizadas para el envío de cadenas binarias discretas al motor, que son traducidas por sus circuitos de control, es decir, que permite mecanismos de control y realimentación más preciso. Son esenciales en aplicaciones donde el posicionamiento exacto es importante.

Este sistema de control en lazo cerrado permite corregir errores en tiempo real, lo que es importante para mantener la precisión del motor.

Métodos de control.

Una manera de controlar los servomotores es utilizando un microcontrolador ya que este dispositivo permite programar con precisión la duración o tiempo del pulso y por tanto la

posición, la velocidad y el par del motor. Este método popular de controlar servomotores es muy útil en sistemas complejos como la robótica y la automatización, basándose en la entrada de sensores o una secuencia programada. Son capaces de manejar múltiples señales de control lo que permite el funcionamiento simultáneo de varios motores, muy útil para máquinas y robots avanzados.

Otro método de control es un servocontrolador, que actúa como intermediario entre el motor y su sistema de control, convirtiendo las señales de control en acciones precisas para el motor. La manera en que funciona es:

- 1) El servomotor recibe señales de control que son de la forma PWM, paquetes digitales o analógicos, estas señales indican posición, velocidad o par deseados.
- 2) El decodificador descifra estas señales y las convierte para después modular la potencia enviada a las bobinas del motor, normalmente a través de un puente H (circuito electrónico que permite invertir la polaridad de la tensión aplicada a una carga, utilizado motores de DC, esto con la finalidad de que gire en ambos sentidos) [26] que permite controlar con precisión la velocidad y la dirección.
- 3) Al ajustar la tensión y la corriente a las necesidades del motor, el servomotor garantiza un rendimiento y eficiencia con gran precisión.

Los mecanismos de realimentación

Son clave para los servomotores, ya que estos ayudan en los movimientos precisos del motor y suelen incluir sensores que monitorean la salida del motor y así transmitir información al sistema de control. Por otro lado, también ayudan durante su funcionamiento, ya que:

- a) Permite corregir errores en tiempo real, ajustando el funcionamiento del motor si se desvía de la trayectoria indicada.
- b) Ajustan cargas y condiciones variables, es decir, calibración en tiempo real

Los dispositivos de realimentación más utilizados en los servomotores son los encoders y resolver. Los encoders proporcionan información precisa sobre la ubicación y la velocidad, mientras los resolver ofrecen mejor rendimiento que el encoder, muy útil en entornos difíciles.

Etapas de potencia parte fundamental

Un aspecto del diseño y la aplicación de los servomotores es conocer sus especificaciones de alimentación, que varían en función del tamaño del motor y de su uso específico. Por lo

²⁶ Puente H. Circuito electrónico que permite controlar la dirección de giro de un motor de corriente continua DC.

general, la mayoría funciona con una fuente de alimentación de +5V, pero esto puede variar.

Rango de voltaje: Los servomotores están diseñados para funcionar dentro de un rango de 4.5V a 6V generalmente. Los servomotores más grandes pueden requerir tensiones más altas para alcanzar los niveles de rendimiento deseados.

Consumo de corriente: Varía considerablemente en función de la carga y el rendimiento del motor. Con carga máxima, un servomotor consume más corriente, lo que debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar el sistema de alimentación para evitar sobrecalentamientos y posibles daños.

En algunos casos los servomotores funcionan con otro tipo de fuente externa como:

Baterías: Los hace adecuados para aplicaciones portátiles como la robótica y los dispositivos teledirigidos, autónomos y otros.

Fuentes de voltaje: Para aplicaciones fijas, los servomotores pueden alimentarse mediante convertidores AC/DC o conexión directa a fuentes de alimentación de AC, especialmente en entornos industriales. Hay que considerar siempre las especificaciones de las fuentes de alimentación, para evitar posibles daños al servomotor. Garantizar una fuente de alimentación estable, sin fluctuaciones y con la capacidad suficiente es crucial para mantener la eficiencia y la durabilidad de los servomotores.

La densidad de par del motor

La densidad de par es un aspecto importante, el par que puede generar un motor en relación con su tamaño, es decir, es la cantidad de par que un motor puede generar por unidad de volumen. Una mayor densidad de par significa más potencia sin aumentar las dimensiones físicas del motor, lo que es fundamental en aplicaciones con limitaciones de espacio como la aeroespacial y la robótica.

Aspectos importantes que debemos conocer son:

Llamado también ondulación del par, es el movimiento entrecortado que pueden presentar los servomotores debido a la interacción entre los imanes del motor y los entrehierros o ranuras de hierro del estator. Este efecto puede reducir la precisión con la que funciona el motor, lo que no es deseable en entornos que requieren perfiles de movimiento suaves, como los sistemas ópticos y de enfoque de lentes. Los servomotores que evitan este efecto suelen incorporar estrategias de diseño como la inclinación de las ranuras del estator o el uso de materiales magnéticos especiales para minimizarlo.

Dispositivos de realimentación: Estos componentes, que incluyen encoders y resolvers, proporcionan información crítica sobre la posición y la velocidad al controlador del motor, lo que garantiza que el motor funcione dentro de los parámetros especificados. La elección

del dispositivo de realimentación influye en la precisión, la resolución, el tiempo de respuesta y la eficacia general del motor.

Como elegir un servomotor:

Para empezar, tenemos que saber los siguientes parámetros, para poder elegir adecuadamente el tipo de servomotor, hay dos elementos claves:

- a) El peso o fuerza que necesitas mover o torque requerido.
- b) La velocidad de movimiento que requieres.

Calcular el torque deseado.

El torque se mide en las siguientes unidades como kg*cm, N*m, por tanto, la fórmula básica de torque es:

$$T = F \times D \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Donde:

- T: torque que tenga el motor [Newton * metro (N * m)].
- F: fuerza es el peso en [kg * g, Newton (N)].
- D: distancia desde la carga o centro de masa de la misma al eje de giro (en m o cm).

Si el torque mide qué tan efectiva es una fuerza para hacer girar un objeto alrededor de un eje, entonces:

- Si aplicas la misma fuerza, pero más lejos el punto de giro, generas más torque.
- Si aplicas la fuerza más cerca, generas menos torque.
- Si no empujas en forma perpendicular, no toda la fuerza aporta al giro.

Para este caso la base tiene un servomotor que mueve el primer brazo, y ese motor debe producir torque para mover el siguiente antebrazo, esto implica que el primer brazo soportara el peso del antebrazo, es decir, el torque necesario en el motor aumenta conforme la carga este más lejos. Para el antebrazo que mide 20 cm y la carga es de 500 g, es:

$$F = (0.5)(9.81) = 4.9N \Rightarrow T = (4.9N)(0.20m) = 0.98 \approx 1N * m$$

El motor entregaría 1 Newton solo para sostener. En otras palabras, cuanto más lejos este la carga del motor, mayor torque necesita el motor.

CAPÍTULO 2 MECANISMOS

En la actualidad las máquinas y los mecanismos son un pilar fundamental para el trabajo industrial del ser humano. El empleo de las máquinas y mecanismos es una necesidad importante, razón por la cual su estudio es esencial para la formación de técnicos e ingenieros sin importar su área o especialidad.

La teoría de máquinas y mecanismos estudian la relación entre la geometría y el movimiento de un mecanismo o máquina, las acciones (fuerza y momento) que se generan a partir de estos movimientos, así también como la energía asociada. Esta ciencia puede abordarse de dos formas distintas como son la síntesis y el análisis, esto significa que:

La **síntesis** trata de diseñar un mecanismo o máquina que cumpla con especificaciones dadas.

El **análisis** desarrolla el estudio cinemático y dinámico de la máquina. En el estudio cinemático, se analiza el movimiento sin tener en cuenta la causa que lo produce, mientras que en el estudio dinámico se incluyen las acciones que generan el movimiento.

Con otras palabras, la teoría de los mecanismos y las máquinas es una ciencia aplicada que sirve para entender las relaciones causa y efecto entre los componentes mecánicos y los movimientos producidos en una máquina o mecanismo.

2.1 Máquina

Las máquinas son dispositivos que se utilizan para modificar, transmitir y dirigir fuerzas para llevar a cabo un trabajo específico, es decir, es un conjunto de elementos mecánicos, neumáticos, eléctricos o electrónicos que transforman, transmiten o aprovechan una energía para convertirla en energía mecánica, esto para facilitar el trabajo al ser humano.

Se clasifican las máquinas según su complejidad:

Máquinas simples: Son artefactos mecánicos básicos que permiten multiplicar o transmitir fuerza para facilitar un trabajo, no tienen partes móviles complejas y funcionan sin una fuente de energía externa.

Palanca: Es una máquina simple que consiste en una barra rígida que puede girar sobre un punto fijo llamado fulcro o punto de apoyo. Se usa para levantar o mover cargas pesadas, aplicando una fuerza desde un extremo. Hay tipos según su género:

- De 1° género: Fulcro entre carga y esfuerzo (tijeras)
- De 2° género: Carga entre fulcro y esfuerzo (carretilla)
- De 3° género: Esfuerzo entre fulcro y carga (pinzas)

Plano inclinado: Es una superficie plana con una inclinación, que permite subir o bajar objetos con menos esfuerzos que levantarlos verticalmente. Son las rampas, toboganes, escaleras, etc. Reduce la fuerza necesaria aumentando la distancia del desplazamiento.

Rueda y eje: Es un sistema formado por una rueda unida a un eje de forma sólida, de modo que ambos giran juntos. Esto transforma una fuerza rotatoria pequeña aplicada en la rueda, en una fuerza mayor en el eje o viceversa. Los volantes, manivelas, carretes de pesca, muy útil para el transporte y sistemas de giro.

Polea: Es una rueda anclada por donde pasa una cuerda, cable, cadena. Permite cambiar la dirección de una fuerza o multiplicarla cuando se usa en combinación con otras poleas.

Para poleas existen tres tipos:

- **Fija:** Cambia la dirección de la fuerza (no reduce esfuerzo)
- **Móvil:** Reduce el esfuerzo necesario de acuerdo a la relación entre ruedas
- **Compuesta:** Combinación de fijas y móviles

Tornillo: Un plano inclinado enrollado en forma helicoidal alrededor de un eje, convierte un movimiento rotatorio en lineal y genera una gran fuerza con poco esfuerzo. Son los tornillos, prensas, gatos mecánicos.

Cuña: Un objeto de forma triangular que convierte una fuerza aplicada en una dirección en fuerzas perpendiculares, útil para cortar, dividir o fijar objetos, tales como los cuchillos, hachas, clavos, cinces, etc.

En la tabla 2.1 se resume las máquinas simples, observar las fuerzas y tipo de máquina, así como un ejemplo.

Máquina Simple	Transforma Fuerza en	Ejemplo Práctico
Palanca	Aumenta o Redirección	Pinzas, Balancín
Plano Inclinado	Menor esfuerzo a mayor distancia	Rampa, Escaleras
Rueda y Eje	Movimiento rotatorio y fuerza	Volante, Carrete
Polea	Cambio de dirección o esfuerzo	Grúa, Elevador
Tornillo	Movimiento lineal y presión	Tornillo, Prensa de banco
Cuña	Corte o Separación	Hacha, Cuchillo

Tabla 2.1. Resumen general de máquina simple.

2.2 Mecanismo

Un mecanismo es un conjunto de elementos mecánicos (como eslabones, engranajes, levas, etc.) cuya función es transmitir movimiento y fuerza de una fuente de potencia a una salida. Es decir, es la combinación de cuerpos conectados por medio de articulaciones

móviles para formar una cadena cinemática cerrada con un eslabón fijo y cuyo propósito es transformar el movimiento.

Mecanismos planos, esféricos y especiales.

La mayoría de los mecanismos se mueven de tal forma que sus partes se desplazan en planos paralelos. El movimiento de estos mecanismos se da en un plano estrictamente paralelo, estos mecanismos se conocen como mecanismos planos porque su movimiento se limita a un espacio bidimensional. La mayoría de los mecanismos son planos.

Un **mecanismo plano** es aquel que describe curvas planas en el espacio y todas éstas se encuentran en planos paralelos, en otras palabras, los lugares geométricos de todos los puntos son curvas planas paralelas a un solo plano común. Esta característica hace posible que el lugar geométrico de cualquier punto elegido de un mecanismo plano se represente con su verdadero tamaño y forma real. Los mecanismos planos que utilizan sólo pares simples se conocen con el nombre de eslabonamientos planos y sólo incluyen articulaciones giratorias (R) y pares lineales también llamados prismáticos (P).

Un **eslabón** es una parte del mecanismo donde se unen elementos rígidos para formar una cadena. Otra parte se denomina **bancada**, porque sirve como marco de referencia para el movimiento de todas las demás partes, la bancada es una parte sin movimiento. Los eslabones son partes individuales del mecanismo y se consideran cuerpos rígidos que están conectados con otros eslabones para transmitir movimiento y fuerza.

Un **mecanismo esférico** es aquel en el que cada eslabón tiene algún punto que se mantiene estacionario conforme el eslabonamiento se mueve y en el que los puntos estacionarios de todos los eslabones están en una ubicación común. En otras palabras, el lugar geométrico de cada punto es una curva contenida dentro de una superficie esférica y las superficies esféricas definidas por varios puntos arbitrariamente elegidos son concéntricas.

Eslabonamiento esférico son aquellos que se componen exclusivamente de pares de articulaciones giratorias. Un par esférico no produciría restricciones adicionales y, por tanto, sería equivalente a una abertura en la cadena.

Un **mecanismo espacial** puede poseer pares con lugares geométricos de doble curvatura. Es decir, que cualquier eslabonamiento que comprenda un par de tornillos, es un mecanismo espacial, porque el movimiento relativo dentro del par de tornillo es helicoidal.

Tipos de Mecanismos.

Existen diferentes tipos de mecanismos, dependiendo de su función o principio de operación:

Mecanismos de transmisión de movimiento.

Son aquellos que transfieren el movimiento de un componente a otro sin cambiar su estado. Algunos de ellos son:

- **Ruedas de fricción:** Transmiten movimiento por contacto directo.
- **Engranes:** Transmiten movimiento rotativo mediante dientes.
- **Correas y poleas:** Transmiten movimiento a distancia mediante correas flexibles.
- **Cadenas y piñones:** Similar a engranajes, pero con cadena.

Mecanismos de transformación del movimiento.

Son mecanismos que cambian el tipo de movimiento, como el movimiento rotatorio a lineal, algunos ejemplos:

- **Biela-manivela:** Convierte movimiento circular en lineal (como los motores de combustión).
- **Leva-seguidor:** Convierte movimiento circular en lineal alternativo.
- **Tornillo sin fin:** Convierte rotación en desplazamiento lineal o cambia el eje de rotación.

Mecanismo de guía.

Permiten que un componente se desplace siguiendo una trayectoria específica, lineal o curva.

- **Guías lineales:** Movimiento en una sola dirección recta.
- **Levas con ranuras:** Movimiento programado según la forma de la leva.

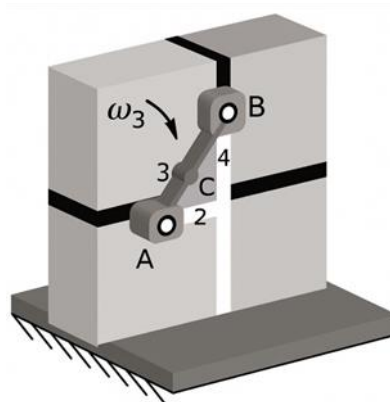


Figura 2.1 Compás de barra elíptica, ejemplo de mecanismo de movimiento programado.

Mecanismo de acoplamiento.

Permiten conectar o desconectar partes del sistema, para controlar el paso del movimiento o la energía.

- **Embragues:** Permiten acoplar o desacoplar el eje motriz.
- **Rótulas:** Permiten giros y movimientos en varias direcciones.

Mecanismos de seguridad.

Evitan el retroceso del sistema o controlan la dirección del movimiento, protegiendo así el mecanismo.

- **Frenos:** Detienen el movimiento.
- **Trinquetes y ruedas dentadas:** Permiten movimiento en una sola dirección.

2.3 Mecanismos del robot SCARA

Un robot SCARA funciona por un sistema de control que coordina los movimientos de sus ejes, estos ejes permiten que el robot se mueva de manera horizontal y vertical. Los robots SCARA están equipados con servomotores y un control sofisticado que aseguran movimientos suaves y exactos.

Los robots SCARA son artefactos programables de 3 y 4 GDL, su construcción consta de una base (bancada), dos brazos horizontales en línea uno con el otro y un eje vertical.

Las partes principales de un robot SCARA:

- **BASE:** Fija el robot al suelo o una mesa de trabajo, dando una estabilidad al robot, funciona como la bancada del mecanismo.
- **EJES:** Dos ejes rotacionales (RR) principales que permiten movimientos en el plano horizontal de sus eslabones prismáticos (barras).
- **SERVOMOTORES:** Motores que controlan los movimientos de los ejes rotacionales con precisión.
- **CONTROLADOR:** Unidad o sistema electrónico que gestiona y coordina los movimientos del robot.
- **POSICIÓN FINAL:** Herramienta situada en el extremo del brazo, diseñada para realizar tareas dependiendo de la aplicación a utilizar.

La cinemática del robot aborda el problema geométrico del movimiento y de sistemas mecánicos sin tomar en cuenta las fuerzas que lo producen, su análisis y diseño se centran en el desplazamiento de las trayectorias del robot. Los robots SCARA por lo regular son de 3 y 4 ejes dependiendo de su estructura mecánica, se considera el tipo de articulación, ya sea lineal o rotacional. Con base a esto se clasifican en general estos robots manipuladores en: antropomórficos, esférico, cilíndrico, SCARA y cartesiano.

Para un espacio tridimensional la posición del robot requiere de seis coordenadas, tres para la posición y tres para la orientación, esta relación que existe entre las coordenadas articulares y las coordenadas cartesianas, así como su orientación se conoce como cinemática directa. La cinemática inversa se describe como la relación entre las coordenadas articulares en función de las coordenadas cartesianas y ángulos de orientación.

La metodología de Denavit-Hartenberg [27] permite obtener la posición y orientación del robot, de tal manera que establece la estructura matemática de las transformaciones homogéneas del modelo matemático.

También las matrices rotacionales pueden ser utilizadas para trabajar giros y orientación, es decir, hay diferentes métodos de resolver la cinemática directa del robot.

Es importante mencionar que las matrices jacobianas [28] son parte fundamental de la estructura matemática del robot, describen las velocidades y posiciones de las articulaciones del robot y la velocidad con la posición del actuador o eje final; en otras palabras, cumplir el objetivo del robot o tarea que realiza. Sirven estas matrices para controlar el movimiento del robot.

Las matrices jacobianas contienen las derivadas parciales de las ecuaciones de posición y orientación del actuador final con respecto a las coordenadas de las articulaciones, es decir, cambia la posición y orientación del actuador cuando se mueven las articulaciones. Es el modelo utilizado para diseñar controladores que permitan al robot moverse a la velocidad y posición deseada en el espacio de trabajo.

²⁷ Denavit-Hartenberg, descrito en el apartado 3.2 de este documento.

²⁸ Jacobianas, descrito en el apartado 3.4 de este documento.

CAPÍTULO 3 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO Y MODELOS MATEMÁTICOS DEL ROBOT SCARA

En este capítulo se van a definir los conceptos matemáticos para la modelación de ecuaciones y las matrices necesarias para definir la posición del eje Z, así como de todo el movimiento del robot de 4 GDL como se muestra en la figura 3.1. Con este objetivo se definirá la notación utilizada y los métodos de cálculo cinemático, presentando las distintas opciones que existen y justificando el método seleccionado.

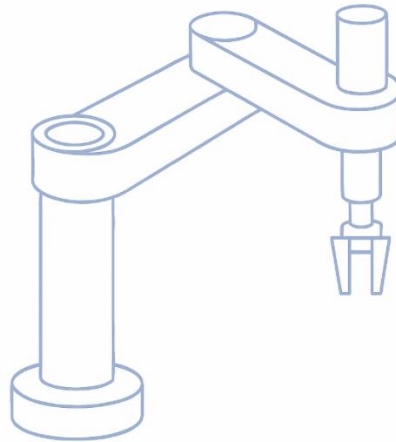


Figura 3.1 Robot SCARA de 4 GDL.

En la figura 3.1 se representa un robot antropomórfico de 4 grados de libertad, es decir, con una primera articulación rotacional en la base, una segunda articulación rotacional en brazo, una tercera articulación con movimiento lineal vertical (prismática) en el eje Z al final y una cuarta articulación con rotación del efector final. En otras palabras, el robot moverá los primeros dos ejes que rotan en el plano X, Y (hombro y codo), después el tercer eje Z prismático sube y baja el actuador y por último el cuarto eje rotacional gira la pinza o herramienta para orientar el objeto. Así, el eje Z da el control vertical del robot, mientras los demás ejes manejan la orientación y posición en el plano.

Iniciamos la modelación matemática, donde se presentan las variables geométricas del robot y el sistema de coordenadas a trabajar, estos conceptos son fundamentales para entender el desarrollo matemático y se van a utilizar a lo largo de todo el capítulo.

3.1 Descripción del robot (RRPR)

Definición de las variables a utilizar para los cálculos, se muestran en la tabla 3.1.

GDL	Tipo	Variable	Movimiento	Eje
1	Rotacional (R)	θ_1	Rotación de la base	Z_0
2	Rotacional (R)	θ_2	Movimiento del brazo	Z_1
3	Rotacional (R)	θ_3	Movimiento antebrazo	Z_2
4	Prismático (P)	d_4	Movimiento vertical	Z_3

Tabla 3.1. Variables del robot de 4 gdl.

El actuador final se mueve linealmente sobre el eje Z_3 .

3.2 Sistema de coordenadas por el método de Denavit-Hartenberg

Por este método de Denavit-Hartenberg, denotado como D-H [²⁹] se representa la geometría (cinemática) de un robot manipulador mediante un sistema de coordenadas para cada eslabón, donde se toma en cuenta los siguientes parámetros: desplazamiento, rotación, longitud del eslabón, e inclinación entre ejes; describen la relación del sistema de coordenadas y permiten modelar matemáticamente el movimiento del robot.

Estos parámetros mencionados se utilizan para construir las matrices de transformación homogénea, que a su vez permiten calcular la posición y orientación del eje (o actuador) final, que es la herramienta del robot, dependiendo de la aplicación.

Definición de los parámetros de D-H

Desplazamiento (d): Es la distancia a lo largo de un eje común entre dos ejes adyacentes o próximos. Es decir, a la distancia entre los ejes Z de dos eslabones consecutivos, medida a lo largo del eje X común.

Rotación (θ): Es el ángulo de rotación alrededor de un eje común entre dos ejes adyacentes o próximos. Es el ángulo entre los ejes X de dos eslabones consecutivos, medido alrededor del eje Z común.

Longitud del eslabón (a): Es la distancia entre dos ejes adyacentes o próximos a lo largo de un eje X común. Es la distancia entre los ejes Z de dos eslabones consecutivos, a lo largo del eje X común.

Inclinación entre ejes (α): Es el ángulo de rotación entre los ejes Z de dos eslabones adyacentes o próximos, alrededor de un eje x común.

De la figura 3.1, tenemos que:

- El eje Z_0 es la rotación de la base (θ_1)
- El eje Z_1 está a lo largo del segundo motor (hombro, θ_2)
- El eje Z_2 sigue al codo (θ_3)
- El eje Z_3 corresponde al actuador vertical d_4

El eje Z hace referencia de una rotación del actuador alrededor del eje mencionado como aparece en la figura 3.1, dando una orientación a la pinza o herramienta.

Usando el método de D-H definimos la siguiente tabla.

²⁹ D-H. Denavit-Hartenberg, un método para representar la cinemática o geometría de un robot manipulador mediante un sistema de coordenadas para cada eslabón.

i	θ_i	d_i	a_i	α_i	Tipo de articulación
1	θ_1	0	L_1	0	Rotacional
2	θ_2	0	L_2	0	Rotacional
3	θ_3	0	0	0	Rotacional
4	0	d_4	0	0	Prismático

Tabla 3.2. Valores Denavit-Hartenberg (D-H).

Donde:

- L_1 : Longitud del primer brazo (20 cm para el brazo propuesto).
- L_2 : Longitud del segundo brazo (20 cm para el brazo propuesto).
- $\theta_1, \theta_2, \theta_3 \in [0^\circ, 180^\circ]$.
- $d_4 \in [0 \text{ cm}, d_{max}]$.

Para α_i en D-H es el ángulo de torsión entre los ejes Z_{i-1} y Z_i , medido alrededor del eje X_{i-1} .

Si los ejes Z_{i-1} y Z_i son paralelos, es decir, apuntando en la misma dirección o en direcciones exactamente opuestas entonces el ángulo entre ellos es 0. Si apuntan en sentido contrario en la matriz D-H normalmente se elige el sentido de los ejes para que quede en cero.

En un robot SCARA (RRPR) todos los ejes de las articulaciones rotacionales son ejes verticales, es decir, coinciden con el mismo eje Z y el prismático también se desplaza a lo largo de ese eje Z, por eso los ejes Z_0, Z_1, Z_2, Z_3 son paralelos y $\alpha_i = 0$.

¿Cuándo α_i no serían cero?

Si un eje de articulación está rotado 90° respecto al anterior, por ejemplo, un robot antropomórfico con un eje paralelo al X o Y en lugar de Z entonces $\alpha_i = \pm \pi/2$. En manipuladores antropomórficos con muñeca los ejes suelen tener $\alpha_i \neq 0$, por ejemplo, $\alpha_i = \pm 90^\circ$ porque hay ejes perpendiculares entre sí.

3.3 Matrices de transformación homogénea

Definidos los valores, la matriz general la denotamos como A_i^{i-1} .

Matriz General:

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{Ecuación 3.1}$$

Como, de la tabla 3.2 tenemos que $\alpha_i = 0$, por tanto, la evaluamos en la matriz general y tenemos que $\cos \alpha_i = \cos(0) = 1$ y $\sin \alpha_i = \sin(0) = 0$.

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos(0) & \sin \theta_i \sin(0) & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos(0) & -\cos \theta_i \sin(0) & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{Ecuación 3.2}$$

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i (1) & \sin \theta_i (0) & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i (1) & -\cos \theta_i (0) & a_i \sin \theta_i \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{Ecuación 3.3}$$

Por tanto, la matriz nos queda:

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & a_i \sin \theta_i \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{Ecuación 3.4}$$

A partir de la matriz anterior, Ecuación 3.4, se definen las matrices individuales para cada elemento móvil del SCARA propuesto.

A_1 (Base a Hombro):

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & L_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & L_2 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{Ecuación 3.5}$$

A_2 (Hombro a Codo):

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & L_1 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & L_1 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{Ecuación 3.6}$$

A_3 (Codo a Muñeca):

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Ecuación 3.7}$$

A_4 (Actuador Lineal en Eje Z):

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Ecuación 3.8}$$

Con el producto de matrices homogéneas se obtiene la matriz de transformación total (T_4^0), paso a paso tenemos:

$$T_4^0 = A_1^0 * A_2^1 * A_3^2 * A_4^3 \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Donde:

- A_1^0 : transformación del hombro.
- A_2^1 : transformación del codo.
- A_3^2 : transformación de la muñeca.
- A_4^3 : transformación prismática en el eje Z.

De las ecuaciones 3.5 a 3.8, multiplicamos y utilizamos álgebra matricial homogénea, dado que las rotaciones están en el plano (X, Y) y la traslación en el eje X.

$$A_1^0 * A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & L_1 \cos \theta_1 + L_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & L_2 \sin \theta_1 + L_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 3.10

Multiplicamos el resultado de la ecuación 3.10 por la matriz A_3^2 .

$$A_2^0 * A_3^2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & 0 & L_1 \cos \theta_1 + L_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & 0 & L_2 \sin \theta_1 + L_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 3.11

No cambia la matriz A_3^2 , porque no tiene traslación.

Pasamos a multiplicar la ecuación 3.11 con la ecuación 3.8 dando como resultado:

$$T_4^0 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & 0 & L_1 \cos \theta_1 + L_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & 0 & L_2 \sin \theta_1 + L_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 3.12

Las ecuaciones de la cuarta columna de la matriz 3.12 representan la posición del actuador final en coordenadas cartesianas (X, Y, Z):

$$X = L_1 \cos (\theta_1) + L_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad \text{Ecuación 3.13}$$

$$Y = L_2 \sin (\theta_1) + L_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad \text{Ecuación 3.14}$$

$$Z = d_4 \quad \text{Ecuación 3.15}$$

Donde:

- X, es la orientación x está dada por el ángulo total $\theta_T = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$.
- Y, es la orientación y está dada por el ángulo total $\theta_T = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$.
- d_4 es el desplazamiento lineal en el eje Z (por el actuador prismático).
- L_1, L_2 son las longitudes de los brazos.

Estas ecuaciones son el modelo matemático para trazar trayectorias, realizar cinemática inversa o para control en tiempo real.

Cálculos de las ecuaciones de la posición final, un ejemplo

Pasando a los cálculos con los valores propuestos, calculamos en las ecuaciones de posición final para obtener una aproximación de un resultado en tiempo real.

Primero, tenemos que pasar los grados a radianes:

$$\theta_1 = 0^\circ \rightarrow 0 \text{ radianes}$$

$$\theta_1 + \theta_2 = 135^\circ$$

$$\theta_2 = 135^\circ \rightarrow \frac{3\pi}{4} \text{ radianes}$$

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 270^\circ$$

$$\theta_3 = 270^\circ \rightarrow \frac{3\pi}{2} \text{ radianes}$$

Segundo, obtener los cálculos para seno y coseno con los valores de θ_i en radianes.

$$\cos(0^\circ) = 1$$

$$\cos(135^\circ) = -\frac{\sqrt{2}}{2} \approx -0.7071$$

$$\sin(0^\circ) = 0$$

$$\sin(135^\circ) = \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0.7071$$

$$\cos(270^\circ) = 0$$

$$\sin(270^\circ) = -1$$

Tercero, sustituir los valores obtenidos en las ecuaciones de posición final.

$$L_1 = L_2 = 20 \text{ cm:}$$

Para la posición X: $X = L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$

$$X = 20 * \cos(0^\circ) + 20 * \cos(0^\circ + 135^\circ)$$

$$X = 20 * \cos(0) + 20 * \cos\left(0 + \frac{3\pi}{4}\right)$$

$$X = 20 * 1 + 20 * (-0.7071)$$

$$X = 20 + (-14.142)$$

$$X = 5.858 \text{ cm}$$

Para la posición Y: $Y = L_2 \sin(\theta_1) + L_1 \sin(\theta_1 + \theta_2)$

$$Y = 20 * \sin(0^\circ) + 20 * \sin(0^\circ + 135^\circ)$$

$$Y = 20 * 0 + 20 * \sin(135^\circ)$$

$$Y = 0 + 20 * 0.7071$$

$$Y = 14.142 \text{ cm}$$

Para el actuador en Z: $Z = d_4$

Con ayuda del software MATLAB ^[30] realizamos los cálculos de las ecuaciones 3.13 a 3.15 de posición final, para observar el área de trabajo del robot. Así se puede mostrar una gráfica del robot extendido en el plano X, Y.

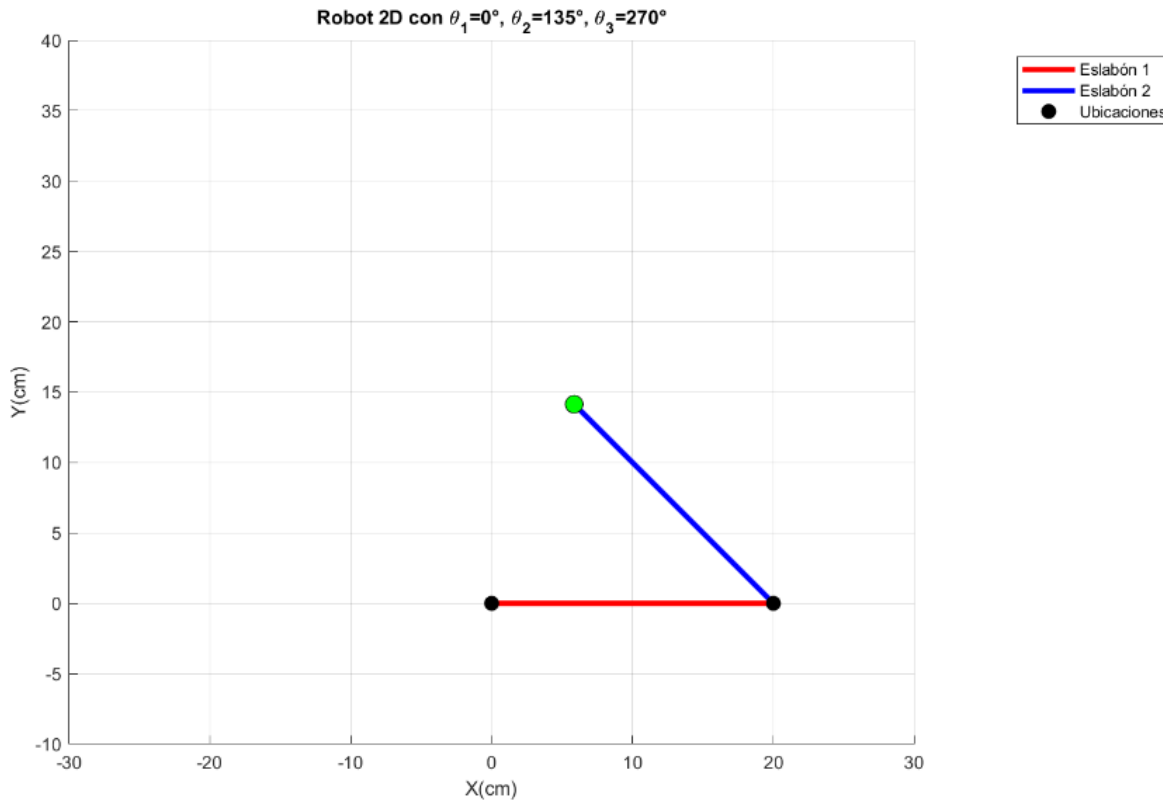


Figura 3.2 Gráfica en el plano X, Y del robot extendido. Posición final en: (5.858, 14.142, d_4) cm.

Con este grafico se observa que el robot está extendido en el plano (XY), con los eslabones en rojo y azul, con un círculo de color verde el actuador final en la posición (5.858, 14.142, d_4) cm.

3.4 Matrices jacobianas

Como definición: una matriz jacobiana relaciona la velocidad de las articulaciones $\dot{\theta}_i, d_4$ con la velocidad lineal del actuador final del robot.

$$J = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ d_4 \end{bmatrix} \text{ Ecuación 1.23}$$

³⁰ MATLAB. Es un entorno de programación y herramienta que utiliza un lenguaje propio y facilita la expresión de operaciones matemáticas y la manipulación de datos desarrollado por MathWorks. Aplicado en ingeniería y ciencias para el análisis de datos.

La matriz jacobiana de posición será:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X}{\partial \theta_2} & \frac{\partial X}{\partial \theta_3} & 0 \\ \frac{\partial Y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y}{\partial \theta_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Ecuación 1.24}$$

Cálculo de derivadas parciales.

⇒ Parciales con respecto a X:

$$\frac{\partial X}{\partial \theta_1} = -L_1 \sin \theta_1 - L_1 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \text{ Ecuación 1.25}$$

$$\frac{\partial X}{\partial \theta_2} = -L_1 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \text{ Ecuación 1.26}$$

$$\frac{\partial X}{\partial \theta_3} = -L_1 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \text{ Ecuación 1.27}$$

$$\frac{\partial X}{\partial d_4} = 0 \text{ Ecuación 1.28}$$

⇒ Parciales con respecto a Y:

$$\frac{\partial Y}{\partial \theta_1} = L_2 \cos \theta_1 + L_1 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \text{ Ecuación 1.29}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \theta_2} = L_1 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \text{ Ecuación 1.30}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \theta_3} = L_1 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \text{ Ecuación 1.31}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial d_4} = 0 \text{ Ecuación 1.32}$$

⇒ Parciales con respecto a Z

$$\frac{\partial Z}{\partial \theta_1} = 0, \frac{\partial Z}{\partial \theta_2} = 0, \frac{\partial Z}{\partial \theta_3} = 0, \frac{\partial Z}{\partial d_4} = 1 \text{ Ecuación 1.33}$$

Por tanto, tenemos la matriz final jacobiana, para $(\theta_T = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$.

$$J(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \begin{bmatrix} -L_1 \sin(\theta_1) - L_1 \sin(\theta_T) & -L_1 \sin(\theta_T) & -L_1 \sin(\theta_T) & 0 \\ L_2 \cos(\theta_1) + L_1 \cos(\theta_T) & L_1 \cos(\theta_T) & L_1 \cos(\theta_T) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Ecuación 1.34}$$

Si evaluáramos los valores del ejemplo anterior en la matriz jacobiana obtenemos lo siguiente.

$$\begin{aligned}\theta_1 &= 0^\circ \\ \theta_2 &= 135^\circ \\ \theta_3 &= 270^\circ \\ L_1 &= L_2 = 20 \text{ cm} \\ J &= \begin{bmatrix} 20 & 20 & 20 & 0 \\ 20 & \approx 0 & \approx 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Ecuación 1.35}\end{aligned}$$

Donde los valores muy pequeños (≈ 0) son de orden de 10^{-15} , es decir, son prácticamente cero. Esto significa que el movimiento es:

- El movimiento en X depende fuertemente de todos los $\theta_i = (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$.
- El movimiento en Y casi solo depende de un θ_i .
- El movimiento en Z depende solo del actuador prismático d_4 .

3.5 Simulaciones de funcionamiento del robot

Para la simulación del robot se utilizó el software de Geogebra es una plataforma matemática interactivo y gratuito para todos los niveles educativos, que combina geometría álgebra, cálculo, estadística y análisis.

Puede usarse en línea, descargarse o ejecutarse en diversos dispositivos. Esta herramienta dinámica que permite visualizar conceptos complejos de forma gráfica, algebraica y en 3D.

Por tanto, se realizó la simulación del robot en 2D, es decir, graficar, manipular y explorar en un plano bidimensional con dos ejes en x e y. Esto permite crear y visualizar objetos como puntos, líneas, funciones, ecuaciones, además de interactuar con ellos entender mejor las relaciones matemáticas.

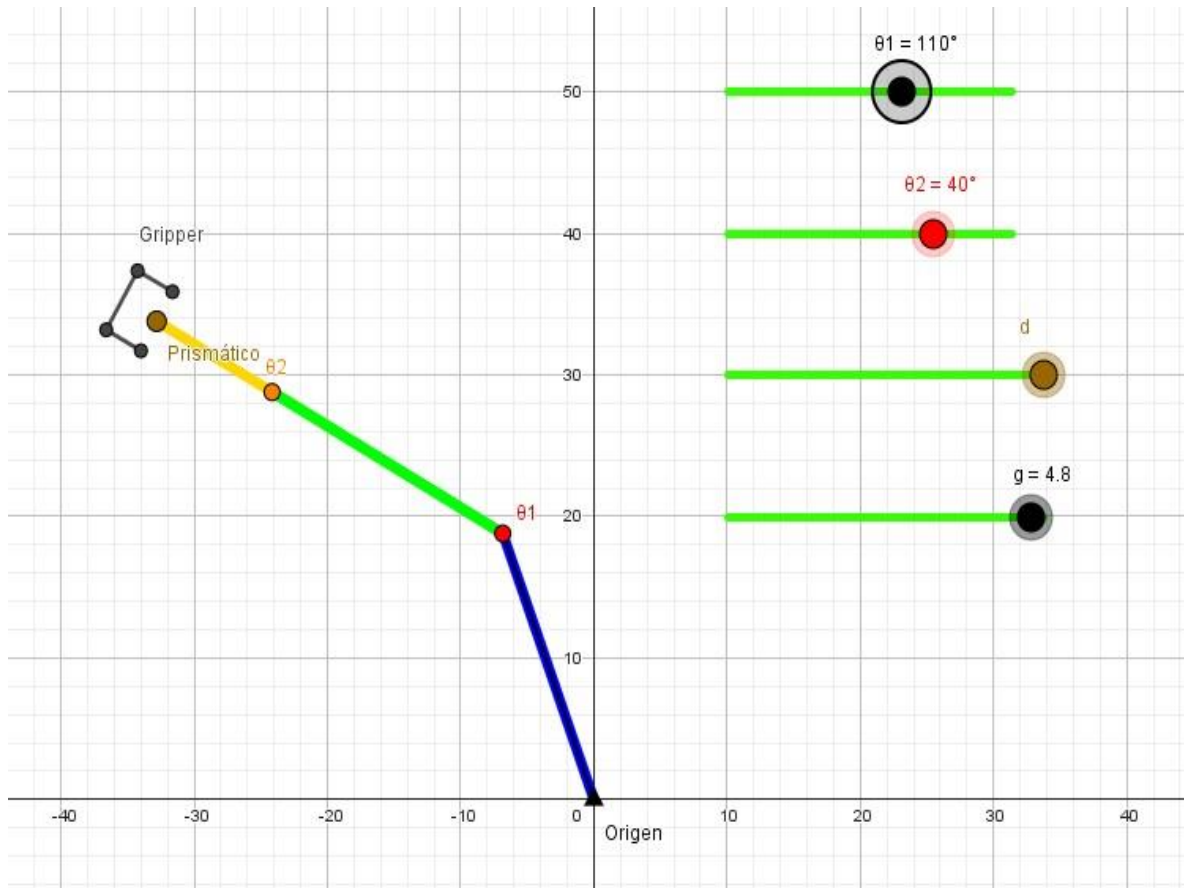


Figura 3.3 Simulación del robot SCARA de 4 GDL en Geogebra.

CAPÍTULO 4 DISEÑO DEL ROBOT

4.1 El Servomotor

Como se mencionó en los primeros capítulos, los servomotores o también llamado “servo” son dispositivos que contienen un motor de DC y el control para la posición o velocidad del rotor, sirven para ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación y mantener esa posición estable. Un servo está conformado por un motor de DC regularmente, caja con engranes reductora y un circuito de control.

Los servomotores son útiles en cualquier área, ya sea en sistemas de radio control y, principalmente en la robótica, aunque su uso no está limitado a estos.

Un servo normal tiene (3kg/cm) de torque que es bastante alto para su tamaño, proporcionando potencia para cargas mecánicas y no consume mucha energía.

Parte importante es la potencia del servo, ya que depende de la carga aplicada al mismo. Define el tamaño del motor, normalmente el fabricante indica la corriente que consume a un voltaje nominal.

En manera general existen tres tipos de servomotores:

- Servomotor de DC
- Servomotor de AC
- Servomotor de imanes permanentes o sin escobillas (Brushless)

Para entender el funcionamiento de un servo hay que partir de su estructura, que se muestra en la figura 4.1.

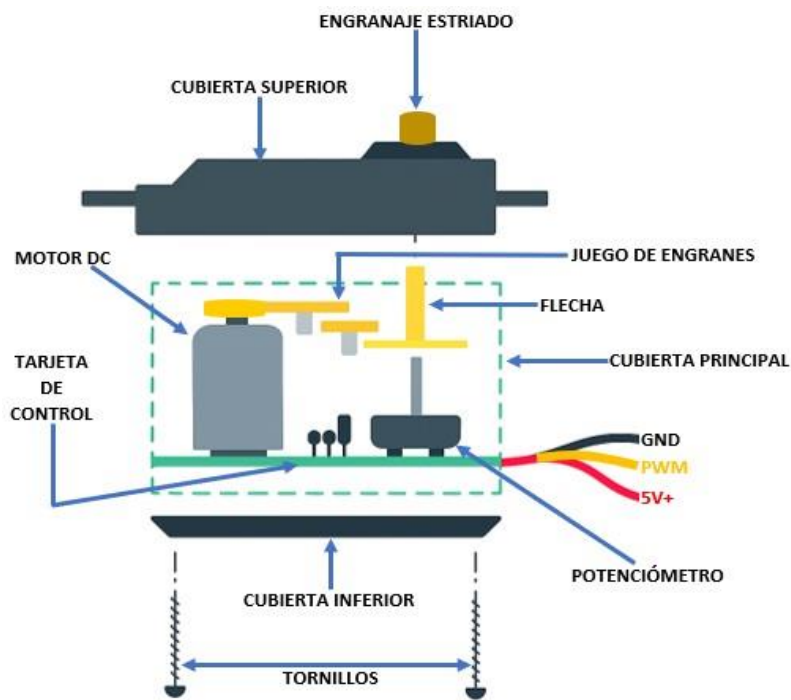


Figura 4.1 Estructura típica del servomotor.

Motor de corriente continua DC

Es la parte fundamental de la estructura, brinda la movilidad al servomotor, cuando se aplica un voltaje nominal a su bobina, el motor gira a su velocidad nominal, si el voltaje es inverso en sus terminales, el sentido de giro se invierte también.

Juego de engranes

Se encargan de convertir velocidad de giro del motor y por tanto el torque, que evidentemente será mayor al torque propio del motor, es decir, que la velocidad de entrada es rápida, pero con torque bajo en el motor, al pasar a través del tren de engranajes compuesto entrega una salida de velocidad menor, pero con torque alto.

Tarjeta de control

Es un circuito electrónico diseñado para controlar la posición del motor y su giro, recibe pulsos de entrada y ubica al motor en su nueva posición dependiendo de los anchos de pulsos, en otras palabras: PWM.

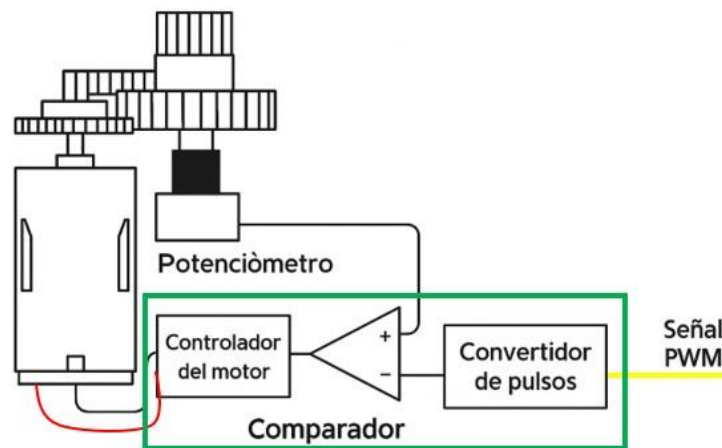


Figura 4.2 Tarjeta de control del servomotor.

En la figura 4.2 se muestra un esquema a bloques que integran la tarjeta de control; además de los circuitos de control, cuenta con un potenciómetro conectado al eje central del motor, este elemento permite al sistema electrónico supervisar el ángulo actual del servomotor; si el eje está en el ángulo correcto entonces el motor está apagado. Si el circuito revisa que el ángulo no es el correcto, el motor gira hasta llegar al ángulo que es correcto. El eje del servomotor es capaz de llegar a los 180° y 360° en giro continuo.

Para indicar al servo la posición deseada del eje, se presenta en la terminal de control (cable de control) un tren de pulsos a una determinada frecuencia, usualmente de 50 Hz, es un pulso cuyo ancho positivo determina el ángulo deseado, con período de 20 ms. Este tren de pulsos tiene una forma de onda cuadrada, alternando entre 0 volts y el valor de tensión del servo.

Partiendo de la ecuación 4.1, en la figura 4.3 se observa el período de la señal y ciclo de trabajo del servomotor.

$$F = \frac{1}{T} = \frac{1}{20 \text{ ms}} = 50 \text{ Hz} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

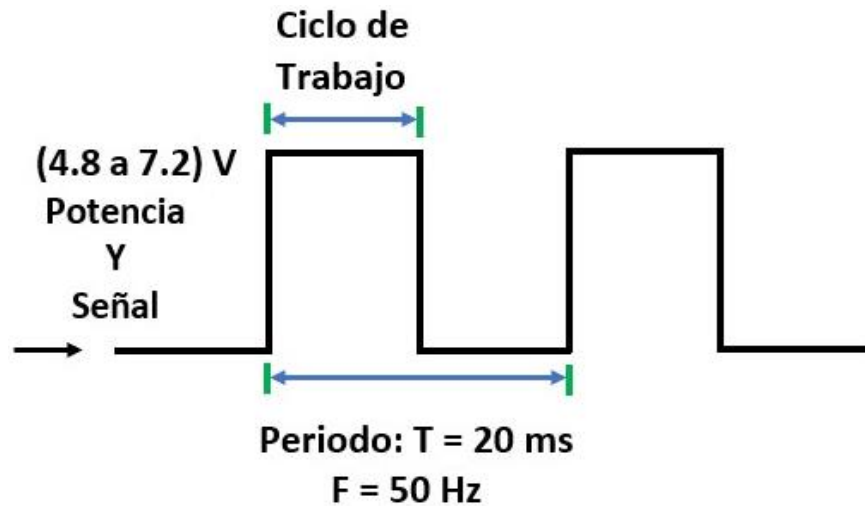


Figura 4.3 Señal de entrada (PWM) en forma de onda cuadrada.

El ciclo de trabajo, es la duración o tiempo que la tensión permanece en su valor máximo e indica que posición se desea del eje. Exactamente cuánto dura este ciclo de trabajo indica la posición angular del eje del motor, evidentemente el control de este ancho es la base de funcionamiento del servo. Este valor de tiempo es especificado por el fabricante.

Cada servomotor tiene sus propios márgenes de operación, depende de la marca y modelo. Siguiendo esto, la posición angular (θ) depende de la duración del pulso alto; una aproximación de modelo para este ancho de pulso se expresa con la ecuación 4.2.

$$t = \frac{0.3 + \theta}{100} [ms] \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde:

- t : Es el tiempo de duración del nivel alto (en milisegundos [ms]).
- θ : Ángulo de posición en grados.

La tabla 4.1 es un resumen que indica los tiempos de duración del pulso para las tres posiciones más significativas y las frecuencias indicadas por algunos fabricantes.

Fabricante	Duración de Pulso [ms]			Frecuencia [Hz]	Color de cables		
	0°	90°	180°		Positivo	Negativo	PWM
-----	0°	90°	180°	-----	Positivo	Negativo	PWM
Futaba	0.9	1.5	2.1	50	Rojo	Negro	Blanco
Hitech	0.9	1.5	2.1	50	Rojo	Negro	Amarillo
Graupner/Jr	0.8	1.5	2.2	50	Rojo	Marrón	Naranja
Multiplex	1.05	1.6	2.15	40	Rojo	Negro	Amarillo
Robbe	0.65	1.3	1.95	50	Rojo	Negro	Blanco
Simprop	1.2	1.7	2.2	50	Rojo	Azul	Negro

Tabla 4.1. Características básicas de algunas marcas de servomotores.

Generador de los pulsos

La generación de los pulsos necesarios puede hacerse de diferentes maneras. Normalmente en las aplicaciones de aeromodelismo, se utilizan radiorreceptores que ya poseen una salida que genera el ancho de pulso necesario, de acuerdo a la señal que reciben del dispositivo de radiocontrol. De este modo el flap, timón de cola o timón de profundidad que el servo comanda adoptará un ángulo igual al ángulo que el piloto imprima a la palanca de comando en su transmisor.

Para las aplicaciones en robótica, el uso de microcontroladores es muy utilizado, con los cuales es muy sencillo obtener el ancho de pulso y las frecuencias deseadas, ocupando sólo una salida. Si el microcontrolador posee, además, un periférico previsto para PWM resulta más sencillo y eficiente; la mayoría de los microcontroladores actuales la tienen.

Con electrónica discreta básica el control es sencillo, basta con un oscilador que pueda generar la frecuencia necesaria y en el que podamos ajustar el ancho de pulso. Por ejemplo: utilizando un temporizador como el 555 podemos ajustar el tiempo del tren de pulsos de la señal de entrada como se muestra en la figura 4.4.

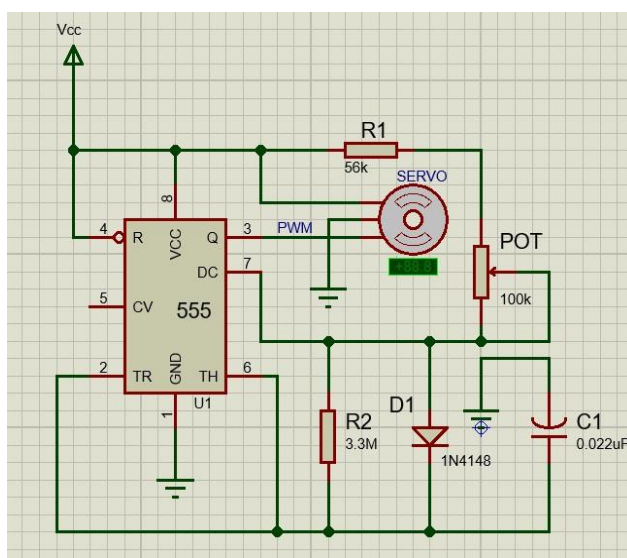


Figura 4.4 Control de un servomotor con temporizador 555.

El ajuste del ancho de pulso se hace con el potenciómetro de $100\text{ k}\Omega$, el valor de la resistencia de $3.3\text{ M}\Omega$ determina un tiempo entre pulsos de 40 ms, reduciendo su valor se puede llevar a 20 ms o lo que se necesite.

Funcionamiento de un servomotor de posición o normal

La modulación por ancho de pulso, conocida como PWM, es la herramienta para controlar estos servomotores. Consiste en generar una señal en forma de onda cuadrada, donde lo que se modifica es el tiempo que la señal permanece en estado alto, mientras que el período total de la señal suele mantenerse constante. Al variar esa duración se indica al servo la posición a la que debe moverse. El sistema de control de este servomotor simplemente le dice al motor a que posición debe ir, esto se logra enviando una serie de pulsos, la duración de cada pulso determina el ángulo de giro del motor. Cada servomotor tiene un rango específico de anchos de pulso que puede interpretar. Por lo general, un servomotor de 180° funciona con un rango específico, un pulso de 1 milisegundo (ms) mueve el servo a la posición de 0° , uno de 2 ms lo lleva a 180° y uno de 1.5 ms lo posiciona en el centro, es decir, 90° . Pulsos más cortos o más largos, menores de 1 ms o mayores de 1.5 ms logran ángulos superiores a 180° , esto depende del servomotor.

Si se supera el rango mecánico del motor, permanecerá en posición final, esto sucede porque el potenciómetro interno o las partes mecánicas del servomotor han llegado a su límite físico.

Servomotor de rotación continua

Un servo de rotación continua es un derivado del servo normal, en los que la señal que enviamos al servo controla la velocidad de giro, en lugar de la posición angular como ocurre en los servos normales. La principal característica de estos servos normales es que tiene un rango limitado de movimiento de 0° a 270° , la diferencia de un servo de rotación continua es que puede girar de 0° a 360° en ambos sentidos y de forma continua.

Las características y el control de un servo de rotación continua son similares a las de un normal; es posible modificar un servo normal para convertirlo a uno continuo; no es recomendable, solo hay que quitar los topes internos y sustituir el potenciómetro interno por dos resistencias iguales, por supuesto el rendimiento será inferior a un servo de rotación continua comercial.

En algunos modelos de servo de rotación continua incluyen un potenciómetro de calibración que permite ajustar con precisión el punto neutro, es decir, el punto en el que el servo no gira en ninguno de los sentidos.

Los servos de rotación continua, al igual que los normales admiten voltajes de alimentación de 4.8V a 7.2V típicamente.

El control de un servo de rotación continua es idéntico al de un servo normal, lo que varía es el significado de la señal de control, que en lugar de transformarla al ángulo de posición

se interpreta en velocidad angular en ambos sentidos de giro. Esto significa una forma sencilla de conseguir un motor con control de velocidad, sin tener que añadir dispositivos adicionales como controladores o encoders como ocurre para motores de DC o Paso a Paso, ya que su control está integrado en el propio servo.

La principal desventaja de los servomotores de rotación continua es que se sacrifica el control de posición y si queremos con precisión el ángulo de giro tendremos que añadir un encoder.

El funcionamiento es similar al servo normal, con la electrónica de control incorporada que regula la velocidad y la dirección en función de señales PWM, el motor rotará continuamente en la dirección que indica el ciclo de trabajo de la señal. Un ciclo de trabajo del 50% normalmente detiene el motor en posición neutral o 0°, mientras que los ciclos de trabajo más altos o más bajos hacen girar el motor en el sentido horario o en el sentido antihorario.

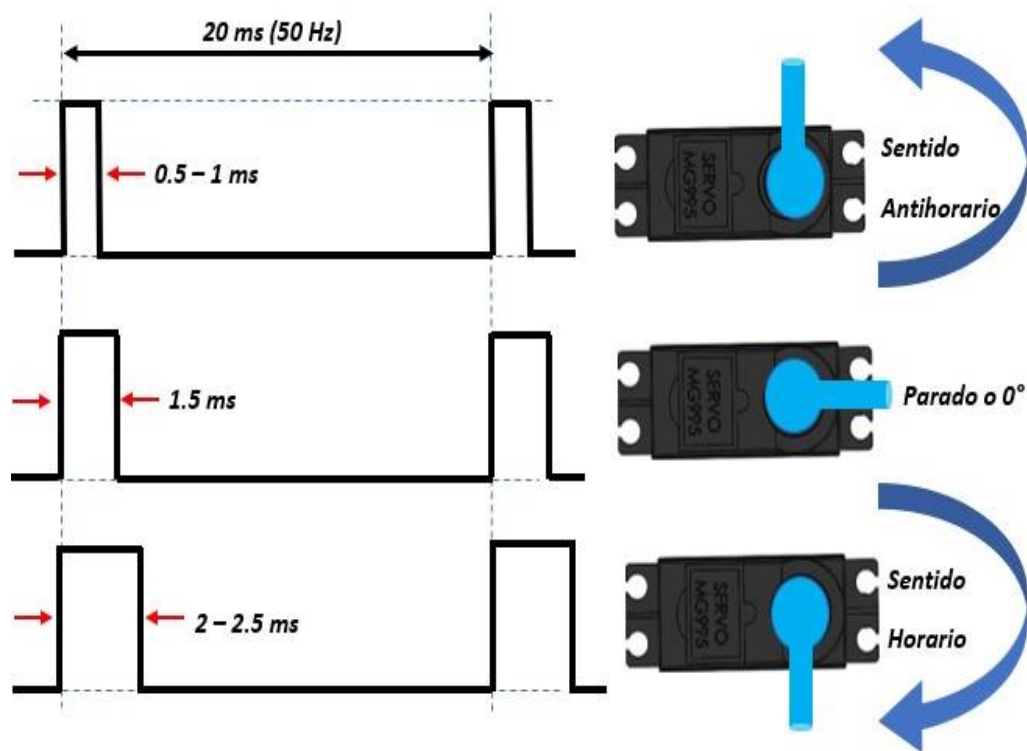


Figura 4.5 PWM de un servomotor de rotación continua.

Servomotor MG996R Tower Pro

El presente proyecto tiene el objetivo general en el diseño de un robot SCARA de cuatro grados de libertad. Donde se utilizarán 3 servomotores de la marca Tower Pro, modelo MG996R y un servomotor de la marca Tower Pro, modelo SG90.

Este servomotor es un dispositivo que contiene un motor de DC, esto significa de alta velocidad y bajo par, también cuenta con un sistema electrónico de realimentación, potenciómetro y un conjunto de engranes de metal.

Para conocer más acerca del servomotor MG996R lo dividimos de la siguiente manera:

- **MG:** Metal Gear, engranes metálicos mucho más resistentes que los de plástico.
- **996:** Hace referencia del modelo mejorado con respecto a la familia del MG995.
- **R:** Revisada o Redefinida, significa una versión mejorada del MG995.

El servomotor MG996R proporciona, mayor precisión en el control angular, menos vibraciones al detenerse, mejor torque y estabilidad, y por último un circuito interno más preciso, que evita variaciones al mantenerse en posición.

Especificaciones.

- Interfaz: Analógica
- Dimensiones: 40 x 20 x 43 mm (1.57 x 0.78 x 1.69 pulgadas)
- Peso: 55 gramos
- Rotación: 0° - 180°
- Ajuste de zona muerta: 4 microsegundos
- Temperatura de operación: 0°C – 55°C
- Torque: a 4.8V de 9.4 kg / cm, a 6V de 11 kg / cm
- Voltaje de operación: de 4.8 a 7.2 Volts
- Velocidad de operación (4.8V sin carga): 0.17 seg / 60°
- Velocidad de operación (6V sin carga): 0.14 seg / 60°
- Corriente sin carga: de 80 mA a 350 mA
- Corriente con carga: 1A
- Número de dientes en el eje: 25
- Frecuencia/Periodo del PWM: 50 Hz / 20 ms
- Mecanismo: Engranaje de metal y baleros de acero
- Conector universal



Figura 4.6 Servomotor MG996R DIGI HI-TORQUE.

Terminales de entrada

El servomotor cuenta con un cable de longitud de 28cm, con un conector universal de 3 terminales, los colores del cable varían según el fabricante, con frecuencia no cambia el cable positivo siempre es rojo, el cable negativo puede variar por marrón o negro y el cable de la señal de entrada suele ser de color blanco, naranja o amarillo.

Para el caso del MG996R, la parte del conector universal tiene los siguientes colores:

- Terminal positiva: **+Vcc**
- Terminal negativa: **GND**
- Terminal ancho de pulso: **PWM**

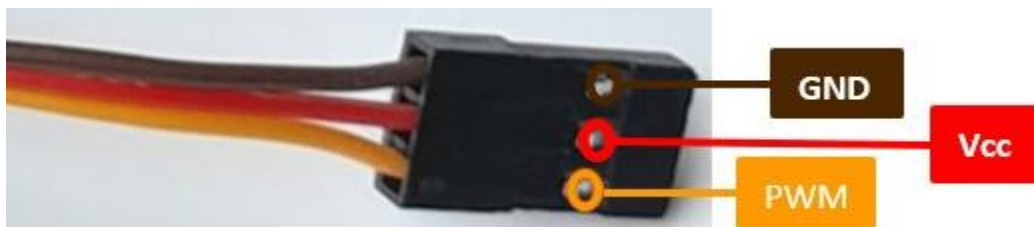


Figura 4.7 Terminales de las entradas de un servomotor.

Este tipo de servomotor económico se destaca por su gran torque, buen rendimiento, potenciómetro de alta precisión y controlador digital de alta resolución para garantizar un rendimiento estable. Funciona con todo tipo de tarjetas electrónicas y con microcontroladores, además de tener compatibilidad con los sistemas de radio control comerciales, las aplicaciones principales son para proyectos de robótica y de aeromodelismo de medio tamaño. El servo MG996R se puede utilizar tanto con tarjetas de Arduino, ESP32, Raspberry pi y compatibles, además se puede usar con microcontroladores como PIC ^[31], AVR ^[32], MSP430 ^[33], etc. Hay que tomar la precaución de conectar los servos y microcontroladores separando alimentaciones y trayectorias de tierra en los circuitos, para evitar el ruido eléctrico y errores en la ejecución del programa.

El modelo MG996R de la marca Tower Pro cuenta con torque de 11 kg/cm, es decir, que es posible soportar masas de 11 kg. Para el caso del robot SCARA utilizaremos estos servomotores ya que cuentan con un alto rendimiento estable, compacto y con engranes de metal tamaño estándar.

³¹ PIC. (Peripheral Interface Controller), que significa Controlador de interfaz periférica es un microcontrolador programable capaz de realizar tareas específicas en sistemas embebidos.

³² AVR. Es un microcontrolador que combina un procesador, memoria y periféricos en un solo circuito integrado, para aplicaciones embebidas.

³³ MSP430. Es un microcontrolador de 16 bits de bajo consumo, que integra un CPU RISC, periféricos digitales y analógicos, y diferentes modos de bajo consumo para optimizar el consumo de energía.

El funcionamiento del servomotor MG996R puede describirse mediante el siguiente diagrama, que muestra los bloques y su realimentación.

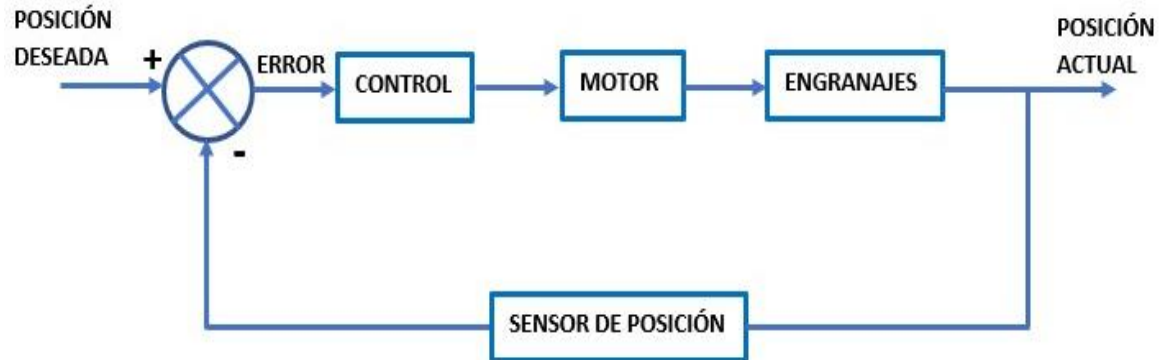


Figura 4.8 Funcionamiento del servo MG996R.

El servomotor MG996R de rotación posicional nos proporciona control exacto del movimiento angular. De la ecuación 4.2 obtenemos la siguiente información con los ángulos propuestos.

Si $\theta = 0^\circ$

$$t = \frac{0.3 + 0^\circ}{100} = \frac{0.3}{100} = 0.003 \text{ ms}$$

Si $\theta = 135^\circ$

$$t = \frac{0.3 + 135^\circ}{100} = \frac{135.3}{100} = 1.353 \text{ ms}$$

Si $\theta = 180^\circ$

$$t = \frac{0.3 + 180^\circ}{100} = \frac{180.3}{100} = 1.803 \text{ ms}$$

Con esa información del tiempo de duración del pulso, la tabla 4.2 muestra los rangos de tiempos del PWM para las respectivas posiciones angulares del servo.

Posición (Ángulo deseado)	Pulso PWM (ms)	Descripción
0°	0.003 – 1	Pulso mínimo
135°	1.3	Pulso regular
180°	1.8 - 2.0	Pulso máximo

Tabla 4.2. Posiciones angulares del servomotor MG996R.

Por tanto, la gráfica se vería de esta forma para un control de 0° a 180°.

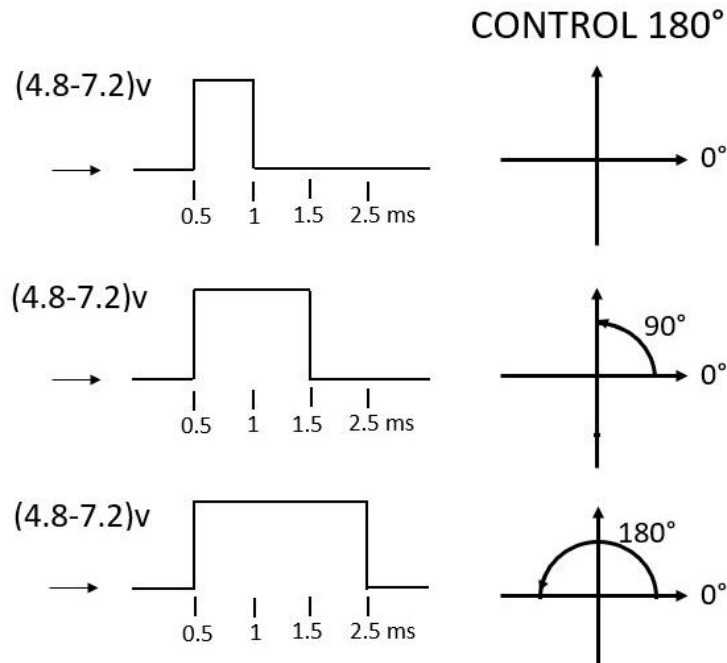


Figura 4.9 Grafica de pulsos PWM con un periodo constante de 20 ms.

El control recibe una señal PWM de 50 Hz con un periodo de 20 ms, que se traduce como:

- Pulso ≈ 1 ms $\rightarrow$ posición mínima igual a 0°
- Pulso ≈ 1.5 ms $\rightarrow$ posición central igual a 90°
- Pulso ≈ 2 ms $\rightarrow$ posición máxima igual a 180°

Esto es para el modelo y marca del servomotor que se utilizará, si se usa otro tipo de servo hay que revisar la hoja de datos, que proporciona el fabricante.

Este servomotor, a manera de resumen: El eje de salida está acoplado al motor mediante un tren de engranes, lo que multiplica el torque, a la vez que reduce su velocidad en la misma proporción. El eje de salida gira acoplado a un potenciómetro que le informa a la circuitería interna la posición del eje en cada instante. La electrónica compara esa posición de referencia que recibe de la señal de control y si difieren, actúa sobre el motor haciendo girar a izquierda o derecha, según corresponda hasta alcanzar la posición deseada. Como se observó en la figura 4.8 de la configuración básica de un servomotor, el dispositivo conforma un lazo de realimentación cerrado. La tabla 4.3 muestra diferencias entre los modelos MG996R y MG995.

Características	Servomotor MG996R (180°)	Servomotor MG995 (360°)
Precisión	Alta precisión, de un 1°	Rotación continua (baja)
Velocidad	Moderada (posición precisa)	Velocidad variable
Par	Moderado a alto	Moderado (baja velocidad)
Capacidad de Carga	Moderada	Baja a moderada
Método de control	PWM (control de posición)	PWM (control de velocidad y dirección)
Consumo de Energía	Moderado	Más alto durante el movimiento continuo
Costo	Alto debido a la precisión	Generalmente accesible y práctico
Aplicaciones	Robots, CNC, vehículos RC	Piezas móviles, Vehículos RC, Bandas

Tabla 4.3. Diferencia de los servomotores MG995 y MG996R.

Servomotor SG090

El servomotor TowerPro SG90, un motor analógico o digital pequeño y ligero que ofrece un recorrido de 180°; también hay de rotación continua. Como se había mencionado anteriormente acerca de su operación es la misma como todo servomotor, lo único que cambia es su tamaño, fuerza, dirección, velocidad, etc.

Características principales.

- Interfaz: Analógica o digital
- Dimensiones: 22 x 11.5 x 27 mm (0.86 x 0.45 x 1.06 pulgadas)
- Peso: 9 gramos
- Rotación: de 0° a 180°
- Ajuste de zona muerta: de 4 a 7 microsegundos
- Torque: a 4.8V de 1.2 kg / cm, a 6V de 2.5 kg / cm
- Voltaje de operación: de 4.8 a 6 Volts
- Velocidad de operación (4.8V sin carga): 0.09 seg / 60°
- Velocidad de operación (6V sin carga): 0.08 seg / 60°
- Corriente sin carga: 80 mA a 350 mA
- Corriente con carga: 500 mA
- Frecuencia/Periodo de PWM: 50 Hz / 20 ms
- Mecanismo: Engranajes de plástico y nylon



Figura 4.10 Micro Servomotor SG90.

El servomotor cuenta con un cable de longitud de 28cm, con un conector universal de 3 terminales de entrada, para este caso la terminal roja es el positivo, la terminal marrón es la referencia de tierra y la terminal naranja es la señal de entrada PWM.

Los pulsos PWM son de la misma duración como se muestra en la figura 4.9; el servo es de control angular.

4.2 Tarjeta de control Esp32. Especificaciones, funcionamiento, plataforma de desarrollo

El nombre de ESP32, se refiere a un tipo de microcontrolador desarrollado por Espressif Systems [34]. El término “ESP” proviene de Espressif, la empresa que lo diseñó y el “32” indica que es un controlador de 32 bits, es decir, que puede procesar datos en bloques de 32 bits a la vez, permitiendo un mayor rendimiento en comparación con otros chips de 8 o 16 bits.

La tarjeta ESP32 es un módulo de bajo costo y consumo energético que integra memoria FLASH, cristal oscilador, Wi-Fi y Bluetooth, es un microcontrolador SoC [35], ideal para proyectos de IoT [36], es decir, conexión de dispositivos y sensores a internet para recopilación y análisis de datos. Muy útil para conectarse a dispositivos inteligentes o celulares inteligentes.

La tarjeta que vamos a utilizar es la ESP32-WROOM 32. Es un controlador combinado de Wi-Fi y Bluetooth en la banda de velocidad 2.4 GHz, diseñado con tecnología de 40 nanómetros (nm) fabricado por TSMC [37]. Está diseñado para lograr el mejor rendimiento de potencia y radio frecuencia. La tarjeta ESP32 es una mejora del ESP8266, incrementando sus capacidades de comunicación y procesamiento.

³⁴ Espressif Systems (Shangai) fundada en China por Teo Swee Ann.

³⁵ SoC. (System on Chip), significa Todos los componentes de un sistema electrónico en un solo integrado.

³⁶ IoT. (Internet of Things), que significa Internet de las cosas, es decir, equipadas con sensores, software y otras tecnologías.

³⁷ TSMC. (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company), es una Empresa taiwanesa líder mundial en la fabricación de semiconductores por contrato.

Contiene un CPU [³⁸] de 32-bits de dos núcleos de velocidad hasta 240MHz y se pueden controlar independientemente. Además, incluye internamente periféricos para la conexión con sensores táctiles capacitivos, sensor de efecto Hall, amplificadores de bajo ruido, interfaz para tarjeta SD, Ethernet, SPI de alta velocidad, UART, I2S e I2C. Aplicaciones en mini servidores web, procesamiento digital, webcams, cámara IP, robótica móvil, entre otras. Su alimentación es por un puerto micro-USB o utilizando una fuente externa de 5V o 3.3V pues posee un regulador de voltaje en la tarjeta de circuito impreso. Las terminales de entradas y salidas (GPIO [³⁹]) trabajan en lógica de 3.3V.

Como se nota, la ESP32 es una tarjeta mucho más potente que un Arduino convencional o su antecesora la ESP8266, ofrece más terminales GPIO, más funcionalidades y contiene más periféricos o componentes. Por tanto, es una tarjeta más compleja, sobre todo por la gran cantidad de opciones de configuración y posibilidades de conexión.

En la tabla siguiente se muestran características principales de la ESP32 DEVKIT V1.

Características	Detalles
MCU [⁴⁰]	Xtensa Dual-Core LX6 a 160 o 240 MHz
Memoria	520 KB SRAM interna, hasta 16 MB Flash externa
Conectividad	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2 + BLE
GPIO	Hasta 34 terminales de propósito general
Entradas analógicas	18 canales ADC de 12 bits
Salidas analógicas	2 DACs de 8 bits
UART/SPI/I2C/CAN	Soporte de múltiples interfaces de comunicación
PWM	Soporte de modulación de ancho de pulso
Alimentación	3V-3.3V (lógica), corriente regulada desde 5V
Consumo en Deep Sleep	~10 μ A
RTC [⁴¹]	Reloj de tiempo real integrado
Seguridad	Cifrado AES, SHA, RSA, TLS, MAC

Tabla 4.4. Características importantes de la ESP32.

Esta versión de DEVKIT V1 MCU-32 utiliza el controlador de USB CP2102, para la comunicación con la computadora o laptop se usa USB-Serial, el conector USB es de tipo micro-USB.

Especificaciones

Estas son las especificaciones más relevantes del dispositivo.

- Antena en PCB
- Bluetooth: v4.2 BR/EDR, Bluetooth Low Energy (BLE)

³⁸ CPU. Significa Unidad Central de Procesamiento y es el cerebro de una computadora.

³⁹ GPIO. Que significa IN/OUT de propósito general, es decir, es un pin que puede configurarse como entrada o salida.

⁴⁰ MCU. Significa Unidad de Microcontrolador y es el cerebro de la ESP32.

⁴¹ RTC. Significa Reloj en Tiempo Real, es un circuito integrado que mantiene la hora actual.

- CPU o MCU: Dual-Core Tensilica Xtensa LX6 (32 bit)
- Conversor Digital a Analógico DAC: 2 (8 bit)
- Conector USB: micro-USB
- Controlador USB-Serial: CP2102
- Desempeño: Hasta 600 DMIPS
- Dimensiones: 55 x 28 mm
- Frecuencia de Reloj: Hasta 240 MHz
- Memoria: 448 KB ROM, 520 KB SRAM, 16 KB SRAM in RTC, 4 MB QSPI Flash/SRAM
- Peso: 9 g
- Terminales Digitales GPIO: 24 (Algunos pines solo como entrada)
- Terminales PWM: 16
- Terminales Analógicos ADC: 18 (3.3V, 12 bit: 4095, tipo SAR, ganancia programable)
- Terminales: 30
- Tarjeta: ESP32 DEVKIT V1 (Espressif)
- Procesador secundario: Permite hacer operaciones básicas en modo de ultra bajo consumo.
- Seguridad: Estándares IEEE 802.11 incluyendo WFA, WPA/WPA2 y WAPI, 1024-bit OTP, up to 768-bit para los clientes, aceleración criptográfica por hardware (AES, HASH (SHA-2), RSA, ECC, RNG)
- SoC: ESP32 (ESP32-D0WDQ6)
- SoM: ESP-WROOM-32 (Espressif)
- Voltaje de Entradas/Salidas: 3.3V DC
- Voltaje de alimentación (V_{in}): de 4V a 12V (de 5V a 9V recomendado)
- Voltaje de alimentación (micro-USB): 5V DC

Algunos detalles técnicos que contiene.

- Conector micro-USB para programación y comunicación serial integrado en placa
- El Bootloader integrado permite programarlo con el entorno de desarrollo Arduino sin necesidad de un programador externo
- LED_BUILTIN: GPIO2 (D2)
- LED POWER en placa para indicar el encendido
- Terminales con espacio de 0.1 pulgadas o 2.5 mm para insertarlo directamente sobre una tarjeta de pruebas (Protoboard)
- Interruptor/Pulsador ENABLE (Reset)
- Interruptor/Pulsador BOOT para seleccionar modo de inicio (Bootloader o Flash)

Funcionamiento

La ESP32 funciona como un microcontrolador con capacidades de comunicaciones inalámbricas, su núcleo principal ejecuta código como cualquier otro MCU, tiene coprocesadores para comunicaciones Wi-Fi/Bluetooth y para tareas de bajo consumo.

Se “carga” código vía USB, también cuenta con modos de ahorro de energía (activo, inactivo, reposo ligero, reposo profundo), soporta multitarea bajo FreeRTOS [⁴²], es decir, capaz de realizar procesos en tiempo real y optimizando el uso de los recursos de la ESP32 como el procesador, memoria, consumo, etc.

Todas las terminales de entrada/salida de la ESP32 tienen función de GPIO y algunas tienen funciones especiales, como RTC-GPIO, terminales de entrada/salida multifuncionales, pueden configurarse para diferentes propósitos según los requisitos. Algunas terminales entradas/salida tienen restricciones de uso. Es fundamental considerar el comportamiento multiplexado y las limitaciones al usar estas terminales de entrada/salida.

Terminales con restricción se destacan por algunas funciones, específicamente:

- Terminales solo entrada, la salida no es compatible debido a la falta de resistencias de pull-up.
- Terminales asignadas para la comunicación con la memoria flash, no útiles para otro uso.
- Terminales para funciones importantes como niveles lógicos, depurar datos y la UART.

Al recibir energía y configurar las entradas/salidas la ESP32 ejecuta el código cargado en la memoria flash, entonces el firmware, software residente, inicializa los periféricos, redes y configuración según la programación. A partir de ahí responde a la ejecución de tareas programadas, entradas como botones, sensores y realiza salidas a periféricos como motores, leds, oled, etc. Se puede comunicar por medio de Wi-Fi/Bluetooth.

A continuación, se muestra un diagrama de bloques del funcionamiento de la ESP32.

⁴² FreeRTOS. Es un sistema operativo en tiempo real, de código abierto permitiendo la ejecución simultanea de múltiples tareas o procesos.

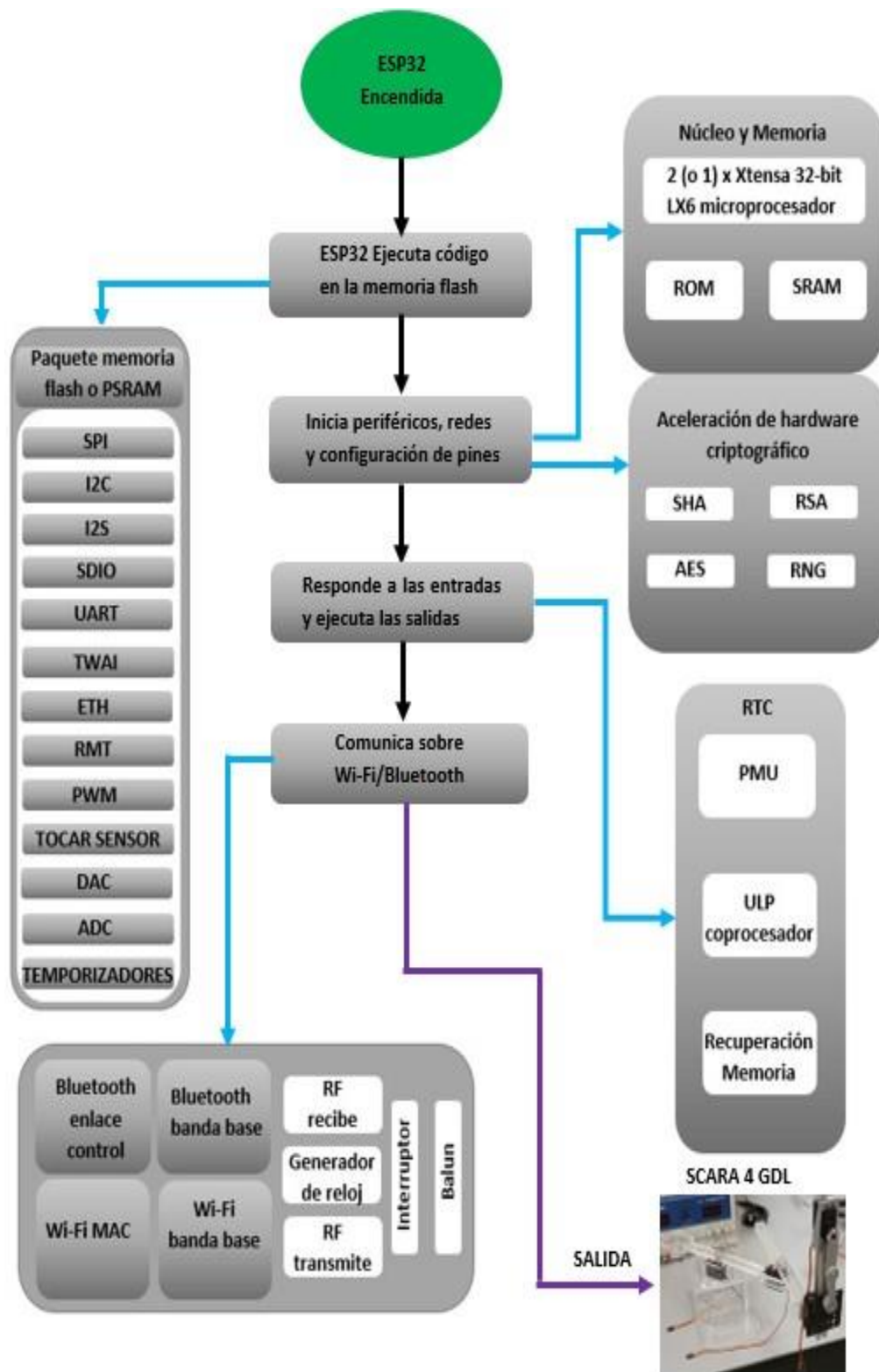


Figura 4.11 Diagrama de bloques de la ESP32.

Plataforma de desarrollo

La ESP32 cuenta con diferentes entornos y lenguajes de programación, entre los más utilizados es el IDE de Arduino (usando C++), MicroPython, Lua, y el Espressif IoT Development Framework conocido como ESP-IDF, desarrollado por el fabricante. Además, se puede utilizar JavaScript con plataforma como Espruino o Mongoose JS, incluido el básico.

Arduino IDE: De todos los lenguajes de programación, el Arduino IDE es el más común y utilizado para desarrollar el código que se ejecutará en la ESP32, su entorno proporciona un manejo fácil, ideal para principiantes que permite programar en C++ y aprovechar la gran cantidad de recursos y librerías disponibles para Arduino.

Espressif IoT Development Framework (ESP-IDF): Es la plataforma oficial de la ESP desarrollada por el fabricante, que aprovecha al máximo el hardware de la ESP32. Ofrece un control más profundo del microcontrolador y adecuado para proyectos complejos.

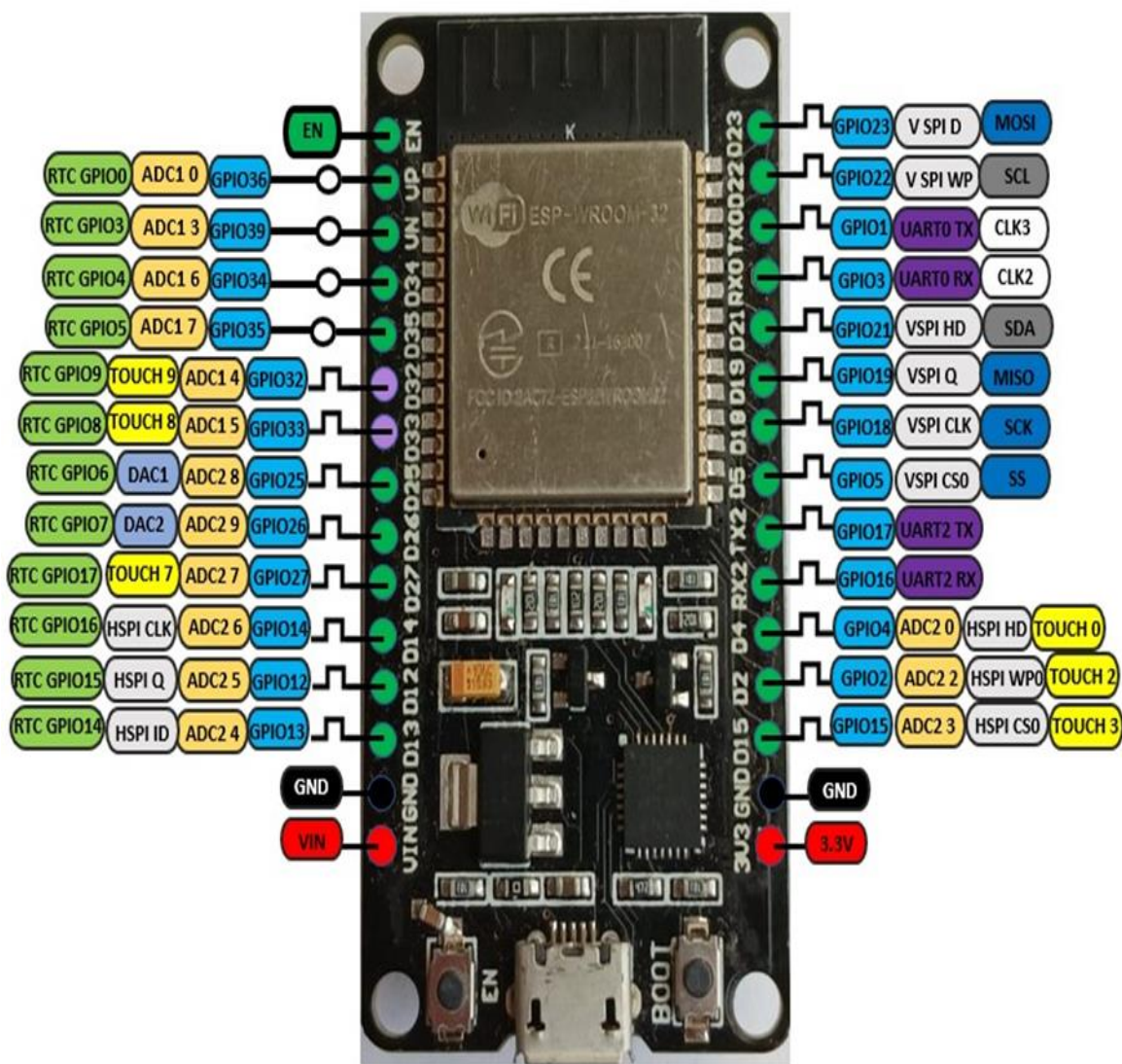
MicroPython: Otra posibilidad es la plataforma de Python optimizado para microcontroladores, permitiendo programar la ESP32 con un lenguaje más familiar y accesible para muchos desarrolladores, además ofrece una rápida velocidad de desarrollo.

Lua: Es un lenguaje ligero y flexible que puede ser usado para programar la ESP32, ofreciendo una opción para proyectos con recursos limitados.

JavaScript: Esta plataforma como Espruino o Mongoose JS, permiten programar la ESP32, lo que puede ser útil para desarrolladores web que quieran extender sus habilidades a dispositivos portables.

A continuación, en la figura 4.12 se muestra la designación de cada terminal en la ESP32.

ESP32 DEVKIT V1 30 TERMINALES



NOTACIÓN:



Figura 4.12 Tarjeta ESP-WROOM-32.

Alimentación

- Se puede conectar a través del puerto micro-USB con 5V o directamente de la terminal VIN.
- Cuenta con un regulador modelo AMS1117, que convierte los 5V en 3.3V, que es el voltaje de funcionamiento interno.
- Cuenta con una de salida de 3.3V para alimentar sensores u otros dispositivos.

Microcontrolador

El núcleo del sistema es un ESP-WROOM-32, que contiene:

- Doble núcleo de la marca Xtensa del modelo LX6 de 32 bits con una frecuencia de 240 MHz.
- Memoria SRAM interna y acceso a memoria flash externa.
- Tiene dos antenas, la primera de Wi-Fi 802.11 b/g/n y la segunda Bluetooth 4.2 más BLE [⁴³] integrado.

Entradas/Salidas GPIO

Tiene 25 entradas/salidas GPIO, que pueden ser configurados como:

- Entradas/Salidas digitales.
- Salidas PWM, para el control de servos, motores, leds, etc.
- Entradas analógicas tales como el ADC de 12 bits.
- Salidas tipo DAC de 2 canales de 8 bits.
- Interfaces de comunicación UART, SPI, I2C, I2S, CAN.

Comunicación Inalámbrica

- Wi-Fi que permite conectarse a redes, actuar como servidor web, enviar datos a la nube, etc.
- Bluetooth más Bluetooth de bajo consumo (BLE), permitiendo comunicación con teléfonos celulares, sensores BLE, transmisión de datos de bajo consumo.

Periféricos Internos

- Temporizadores de propósito general.
- RTM (Remote Control) útil para protocolos IR.
- Touch sensor, permite usar sensores táctiles capacitivos.
- RTC con procesadores ULP para tareas, mientras el sistema está en bajo consumo.
- Aceleradores criptográficos como son AES, RSA, SHA, RNG, útiles para seguridad en comunicación.

⁴³ BLE. Significa Bluetooth Low Energy (Bluetooth de bajo consumo), es una tecnología inalámbrica que permite la comunicación entre dispositivos con un consumo de energía muy bajo.

Modos de funcionamiento

- El modo activado, el sistema funcionando al máximo rendimiento.
- Modo reposo, el procesador sigue trabajando, pero el Wi-Fi se apaga.
- Suspensión ligera, el CPU en pausa, se reanuda rápidamente tras una interrupción.
- Suspensión profunda, consumo mínimo, solo RTC y coprocesador ULP activos.

Programación

- Arduino IDE, es el más utilizado por ser común y fácil.
- PlatformIO, está basado en VS Code.
- ESP-IDF, es la plataforma oficial para aprovechar al máximo la ESP32.
- MicroPython o Lua ofrece un lenguaje un poco más avanzado.

4.3 Algoritmos de control

Para la parte de programación utilizaremos la placa ESP32, utilizando el software de Arduino IDE (Entorno de Desarrollo Integrado), que es un programa gratuito y de código abierto que se instala en la computadora para escribir, compilar y subir; es decir, traduce el código escrito a lenguaje de máquina que la placa puede entender y cargar el programa a la placa asignada. Sirve como interfaz para desarrollar y depurar los comandos que controlaran las funciones de la placa electrónica.

Las características del Arduino IDE:

- **Código:** Utiliza un editor de texto que puede escribir instrucciones en lenguaje basado en C/C++.
- **Compilar código:** El software traduce el código que escribes a formato que el microcontrolador puede entender y ejecutar.
- **Cargar programas:** Permite enviar el código compilado al microcontrolador a través de un cable USB, permitiendo que la placa comience a funcionar de forma autónoma.
- **Depurar y monitorear:** Contiene herramientas como el monitor serial para interactuar con el microcontrolador en tiempo real, y observar la salida de datos y depurar problemas.
- **Interactuar con hardware:** Se puede conectar sensores, motores y otros componentes y a través del código en el IDE controlar estos elementos responden e interactúan en tiempo real.

En nuestro proyecto queremos controlar 3 servomotores y un micro servomotor, cada uno lleva consigo una señal PWM para su control. La placa ESP32 conllevará la carga del

software o código para la comunicación con el programa en Arduino IDE, y será con este dónde realizaremos los cálculos dejando la ESP32 con el software básico de control.

Se escogió la placa ESP32 por su rendimiento para proyectos y trabajos complejos también por su tamaño y compatibilidad con todo tipo de lenguaje. Además de ser compatible con la mayoría de servomotores de las marcas conocidas, se utilizará la librería mencionada

Librería <ESP32Servo.h>

Para saber más acerca de esta librería se realiza una descripción de la misma.

Un servo se activa creando una instancia de la clase Servo y pasando a la terminal GPIO deseado al método attach(). Los servos se pulsan en segundo plano utilizando el valor escrito más recientemente con el método write().

Los métodos de clase son:

Servo - Clase para manipular servomotores conectados a las terminales de la ESP32.

int attach (terminal) - Conecta la terminal GPIO dado al siguiente canal libre (los canales previamente desconectados se usan primero). Devuelve el número de canal o 0 si falla. Se permiten todos los números de terminales, pero solo se recomiendan las terminales 2, 4, 12-19, 21-23, 25-27, 32-33.

int attach (terminal, mínimo, máximo): se conecta a una terminal, estableciendo los valores mínimo y máximo en microsegundos; el mínimo obligatorio es 500 y el máximo obligatorio es 2500. La semántica es la misma que la de attach().

void write() - Establece el ángulo del servo en grados; un valor inferior a 500 se considera un valor en grados de 0° a 180°. Estos límites se aplican, es decir, los valores se tratan de la siguiente manera:

VALOR	SE CONVIERTE
< 0	0
0 - 180	Valor, tratado como grados
181 - 499	180
500 (min-1)	min
mín-máx (adjuntar o predeterminado)	valor (tratado como microsegundos)
(Máx+1) - 2500	max

Tabla 4.5. Valores de la librería ESP32Servo.

void writeMicroseconds() - Establece el ancho del pulso del servo en microsegundos. Se aplican los valores mínimo y máximo.

int read() - Obtiene el último ancho de pulso del servo escrito como un ángulo entre 0 y 180.

int readMicroseconds() - Obtiene el último ancho de pulso del servo escrito en microsegundos.

bool attached() - Devuelve verdadero si esta instancia de servo está adjunta.

void detach() - Detiene el servo conectado, libera su terminal conectado y libera su canal para su reutilización.

Funciones específicas de la ESP32:

setTimerWidth(value) - Establece el ancho del temporizador PWM (debe ser 16-20) (SOLO ESP32); como efecto secundario, se recalcula el ancho del pulso.

int readTimerWidth() - Obtiene el ancho del temporizador PWM (SOLO ESP32)

Trayectorias suaves

Es importante recordar que en mecanismos hay momentos de inercia, aceleraciones no lineales por las ecuaciones que definen los movimientos; además sacudimiento y vibraciones, es decir, se requiere modificar los ángulos de rotaciones en las ecuaciones de posicionamiento desde la inicial a la final para evitar movimientos bruscos. Un primer programa se implementó, para trayectorias suaves en el plano X, Y donde se aplica un movimiento de aceleración y desaceleración. Se toma una fórmula para esta clase de movimiento, teniendo en cuenta la siguiente ecuación 4.3, la cual se puede decir que “modula” el movimiento de forma senoidal, iniciando con un par alto (acelera) y finalizando disminuyendo el par durante la trayectoria.

Movimiento de ángulo inicial (θ_i) a uno final (θ_f) con un perfil senoidal.

$$\theta(t) = \left\{ \begin{array}{ll} \theta_i + \frac{1}{2}at^2 & 0 \leq t \leq t_a \\ \theta_i + v_{max}(t - \frac{t_a}{2}) & t_a \leq t \leq t_c \\ \theta_f - \frac{1}{2}a(t_f - t)^2 & t_c \leq t \leq t_f \end{array} \right\} \text{ Ecuación 4.3}$$

Donde:

- $a \rightarrow$ Aceleración Angular.
- $t_a \rightarrow$ Tiempo de Aceleración.
- $t_c \rightarrow$ Tiempo de Crucero.
- $t_f \rightarrow$ Tiempo Final.

Programación del robot SCARA de 4 grados de libertad, un ejemplo.

Para programación del robot y evitar los movimientos bruscos se propuso usar la fórmula de trayectorias suaves, pero al implementarla no se obtuvieron los resultados correctos, por lo cual se implementó otro método: aceleración y desaceleración por tramos, este consta de:

ETAPA	ACCIÓN	EFEECTO
Inicia	Velocidad = 0	Servo parte despacio
Aceleración	Velocidad += Aceleración	Movimiento suave
Actualización	Posición += Velocidad	Servo avanza
Corrección	Evita sobrepasar limite	Movimiento preciso
Escritura	Servo.write(posición)	Servo gira físicamente
Delay	Pausa de 15 o 20 ms	Control suave

Tabla 4.6. Proceso de aceleración y desaceleración en el código.

En la figura 4.13 se muestra el diagrama de flujo del ejemplo programado.

Es decir, con el brazo en posición de origen, el lazo inicia moviendo al brazo a la posición 1, bajando el actuador en Z, cerrando el actuador (tomando un objeto), sube el actuador del eje z, traslada el objeto a la posición 2, baja eje z y abre el actuador (suelta el objeto). La secuencia se repite.

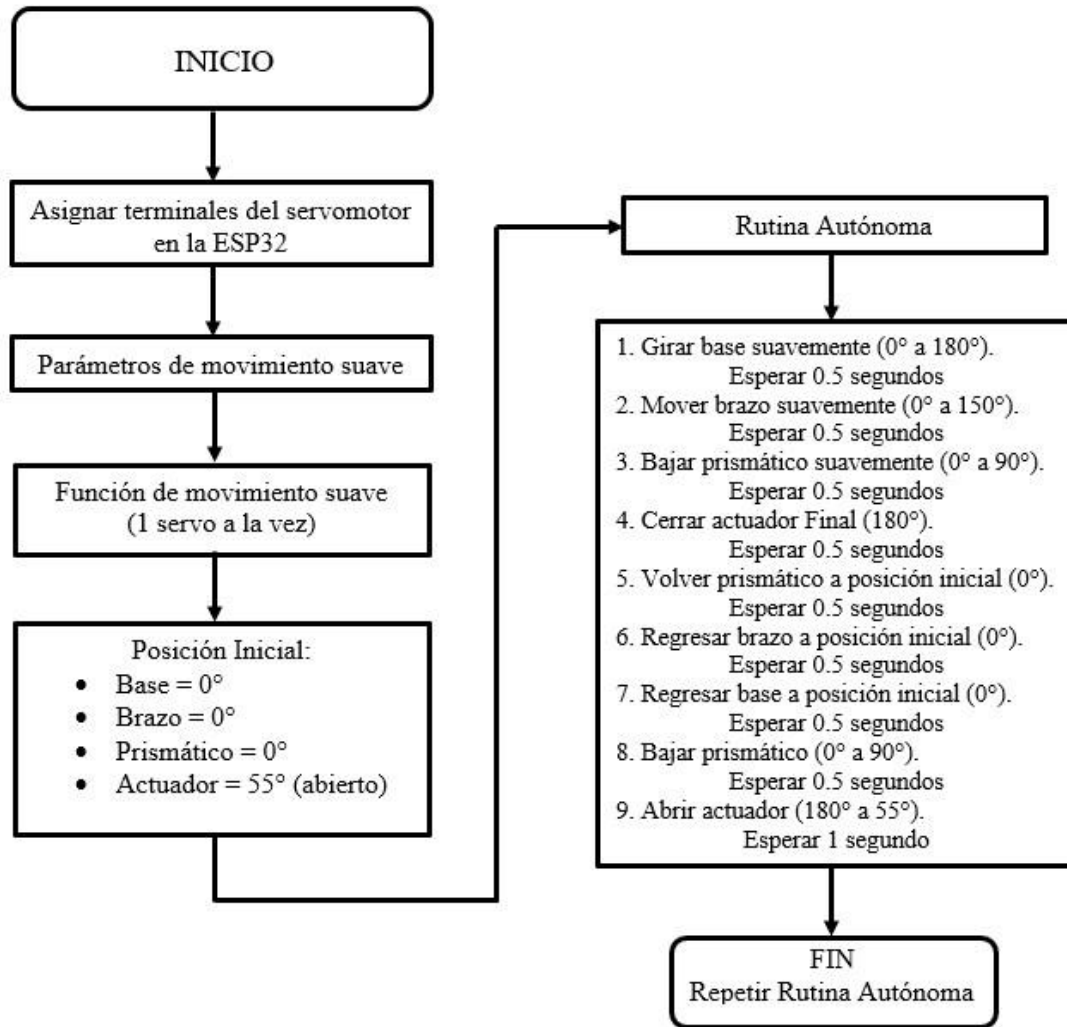


Figura 4.13 Diagrama de flujo del código para el movimiento del robot.

CAPÍTULO 5 IMPLEMENTACIÓN DEL ROBOT SCARA

Para esta parte se diseñará las partes mecánicas del robot SCARA, que son la base, brazo, antebrazo, eje prismático y el efector final.

5.1 Servomotores seleccionados e implementados en el brazo

Los servomotores seleccionados son los siguientes:

- MG996R de 0° a 180° con un torque de 15Kg.
- SG90 de 0° a 180° con un torque de 2.5Kg.

Estos servomotores son muy utilizados en toda clase de proyectos y en aeromodelismo, también son compatibles con toda clase de tarjetas de desarrollo, para nuestro caso se utilizará la ESP32 de 30 terminales, en el software Arduino IDE y para poder controlar los servomotores se hace uso de la librería ESP32Servo.h que es compatible con la mayoría de marcas de esta clase de servomotores.

5.2 Elementos mecánicos diseñados e implementados en el brazo

Para la implementación del proyecto propuesto, se realizaron modelos 3D en la plataforma ONSHAPE ^[44] de licencia gratuita para el sector académico. La base y brazos se maquinaron en CNC. Otros elementos de montaje, balanceo y soporte de motores, así como el mecanismo biela-manivela se imprimieron en 3D. A continuación, los documentamos.

5.2.1 Base

Placa de acrílico de 9 mm de espesor, 4 perforaciones para montaje, 4 perforaciones para ensamble con el primer brazo, 3 perforaciones y ranuras para cableado. Maquinada en CNC.

⁴⁴ ONSHAPE, plataforma de desarrollo de la empresa PTC, 121 Seaport Boulevard, Boston, MA 02210.

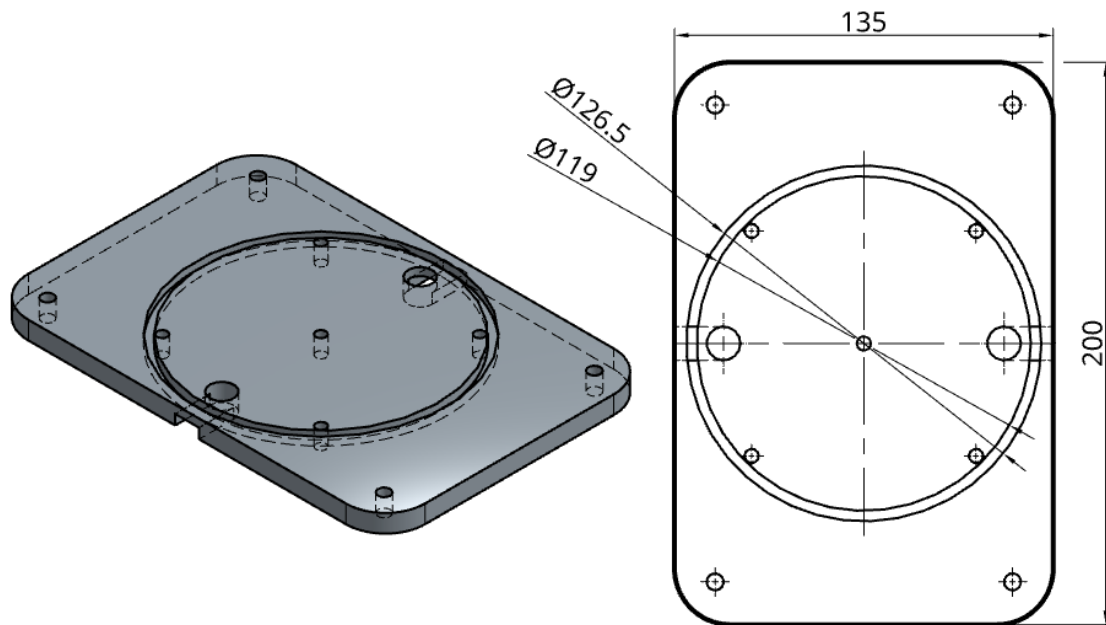


Figura 5.1 Placa Base del SCARA, medidas en mm.

5.2.2 Brazos rotacionales

Brazo 1, acrílico de 9 mm de espesor, caja rectangular y 4 perforaciones para montaje del segundo servomotor, 5 perforados para montaje al eje del primer servomotor, una perforación para montaje de peso balanceador.

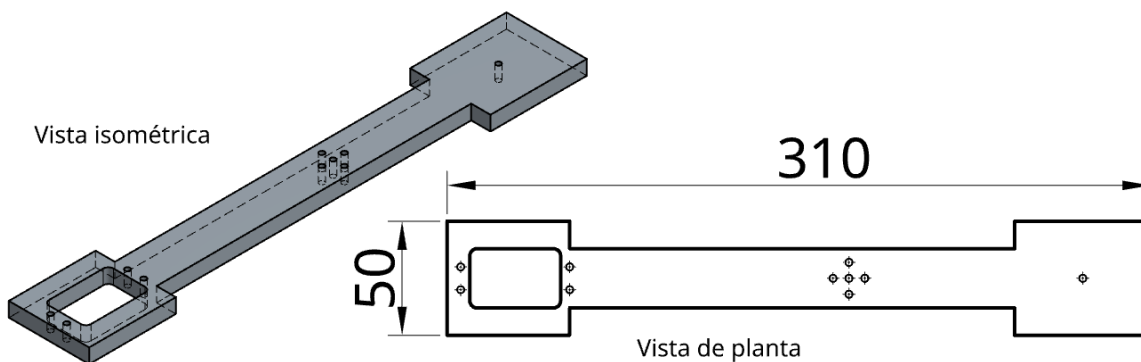


Figura 5.2 Brazo 1, medidas en mm.

Brazo 2, acrílico de 9 mm de espesor, una perforación para montaje de peso balanceador, 5 perforados para montaje al eje del segundo servomotor, una perforación para montaje de base eje Z.

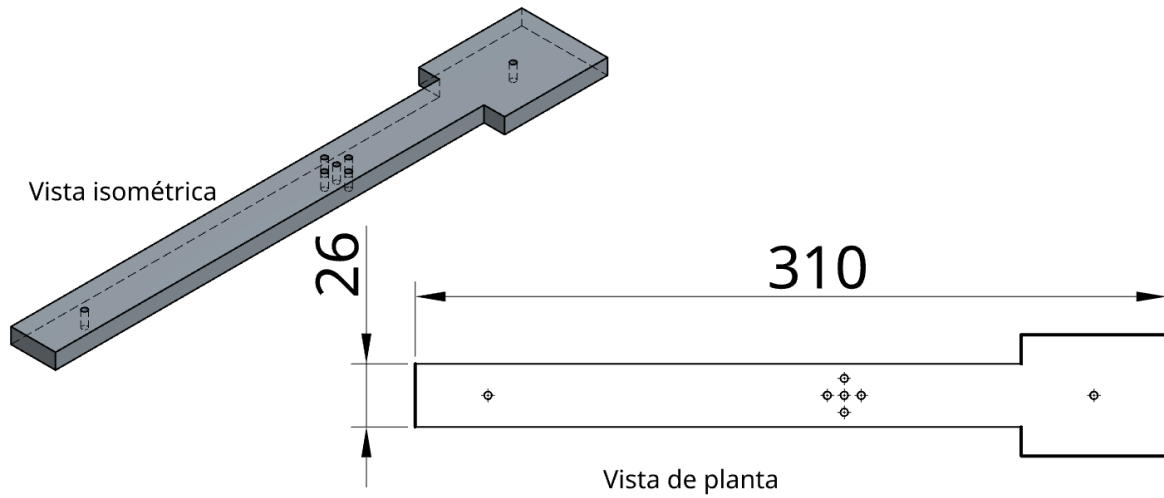


Figura 5.3 Brazo 2, medidas en mm.

5.2.3 Eje lineal

Soporte de montaje del servomotor eje Z, impresión 3D, perno de inserción a perfil 20x20.

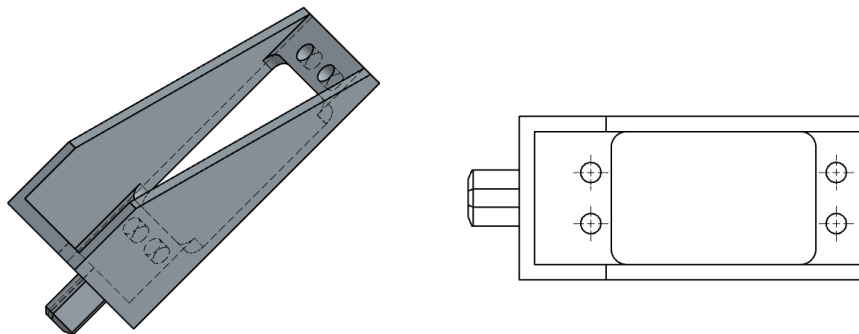


Figura 5.4 Soporte de servomotor eje Z, vista isométrica y de planta.

Biela del mecanismo de movimiento lineal del eje Z. Impresión en 3D

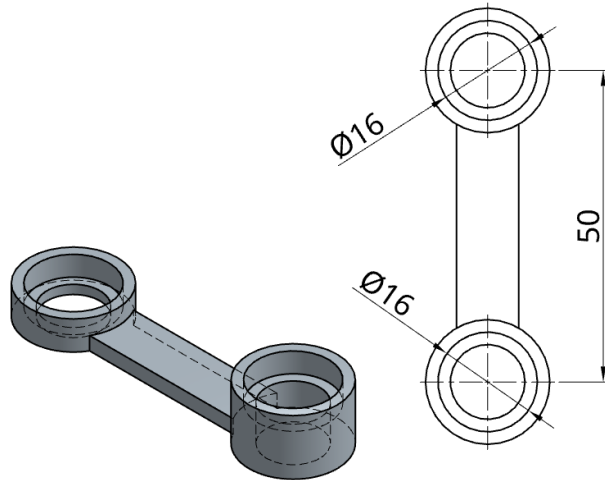


Figura 5.5 Biela eje Z, vista isométrica y de planta, medidas en mm.

Manivela del mecanismo de movimiento lineal del eje Z. Impresión 3D

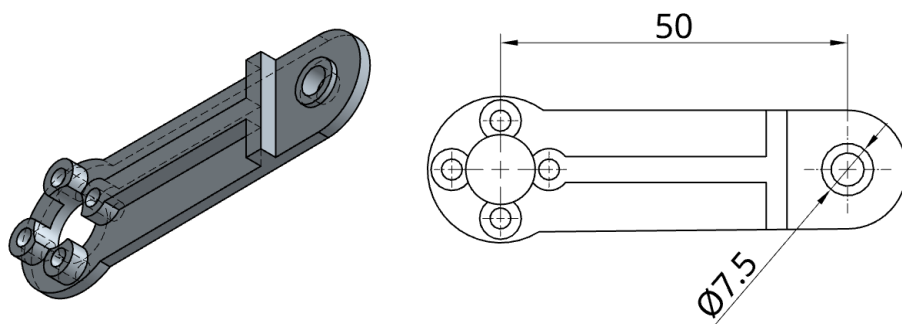


Figura 5.6 manivela eje Z, vista isométrica y de planta, medidas en mm.

Base de montaje en el brazo 2 para sujetar el eje Z. Impresión 3D

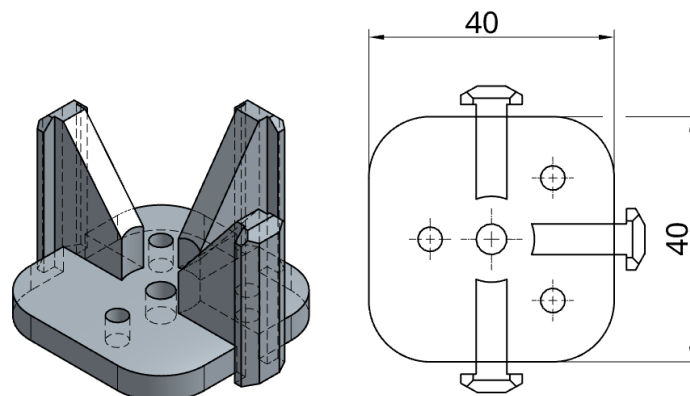


Figura 5.7 Montaje del eje Z al segundo brazo, vista isométrica y de planta, medidas en mm.

Contenedor de pesos de balanceo del segundo brazo. Impresión 3D. Se usan balines de bola de 25mm de diámetro para balancear.

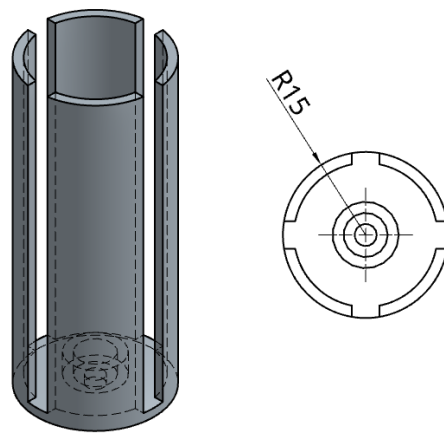


Figura 5.8 Contenedor de pesos de balanceo segundo brazo, vista isométrica y de planta, medidas en mm.

Para balancear el primer brazo se utiliza un bloque de aluminio.

La figura 5.9 muestra el autómatas SCARA del proyecto, se incluyen los componentes de los tres ejes, los dos rotatorios RR y el prismático P de movimiento lineal armónico.

5.2.4 Actuador

Un actuador es un dispositivo que convierte una señal de control en movimiento físico o acción mecánica. Es decir, es el músculo de un sistema automático o robot, encargado de ejecutar lo que ordena el controlador.

Existen tres tipos de actuadores según su clasificación:

- I. Actuadores eléctricos**, usan electricidad para generar movimiento como son los motores eléctricos, servomotores, solenoides, etc. Son muy comunes en robótica y automatización.
- II. Actuadores neumáticos**, funcionan con aire comprimido como son los cilindros neumáticos, son rápidos, pero no son tan precisos.
- III. Actuadores hidráulicos**, usan líquido a presión por lo regular aceite industrial como son los cilindros hidráulicos, es decir, proporcionan una gran fuerza para aplastar, levantar y son usados en maquinaria pesada.

Para nuestro robot utilizamos un actuador pinza o garra, usando el servomotor pequeño SG90 para abrir y cerrar sus dedos. Este servomotor actúa como actuador rotacional controlado y en conjunto con dos engranes que realizan la apertura y cierre de la pinza.

Sabemos que este servomotor tiene una rotación de 0° a 180° , funciona con una señal PWM y que dependiendo de su ancho de pulso abre o cierra la pinza, es decir:

- Señal de 1 ms $\rightarrow$ posición 0° , cerrado.
- Señal de 1.5 ms $\rightarrow$ posición 90° , semiabierto.
- Señal de 2 ms $\rightarrow$ posición 180° , abierto.

Este pulso se repite cada 20 ms en una frecuencia de 50 Hz.

Su movimiento, el eje del servo esta unido a una biela o engrane que mueve los dedos de la pinza, según el ángulo del servomotor indicado en el programa cargado en la ESP32.

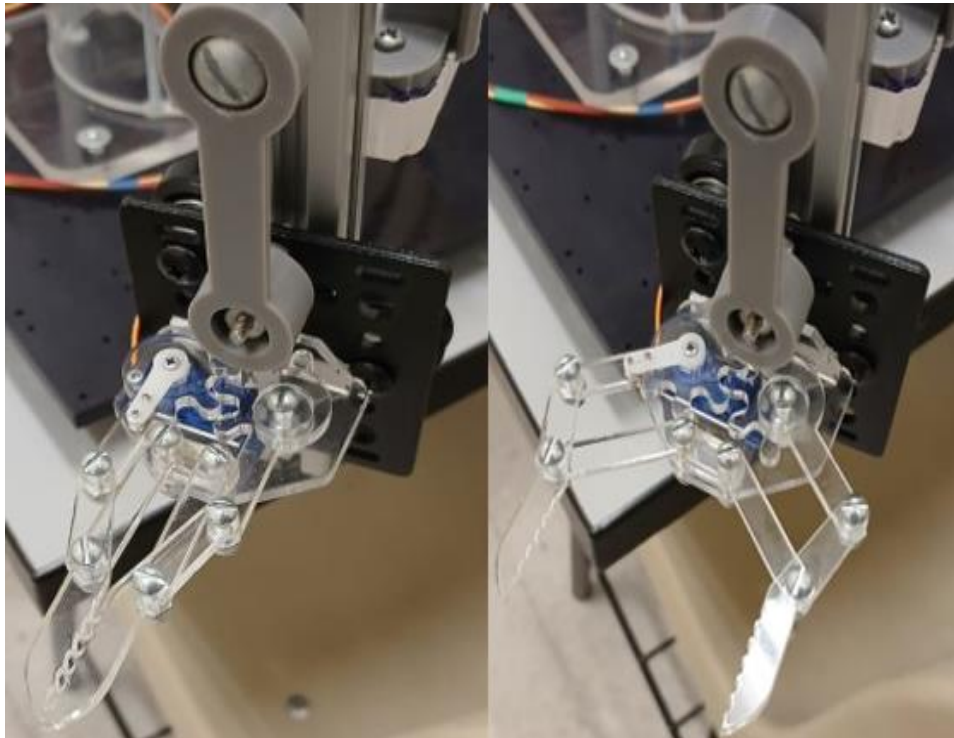


Figura 5.9 Pinza cerrada / abierta según el ángulo indicado.

5.3 Diagrama esquemático eléctrico

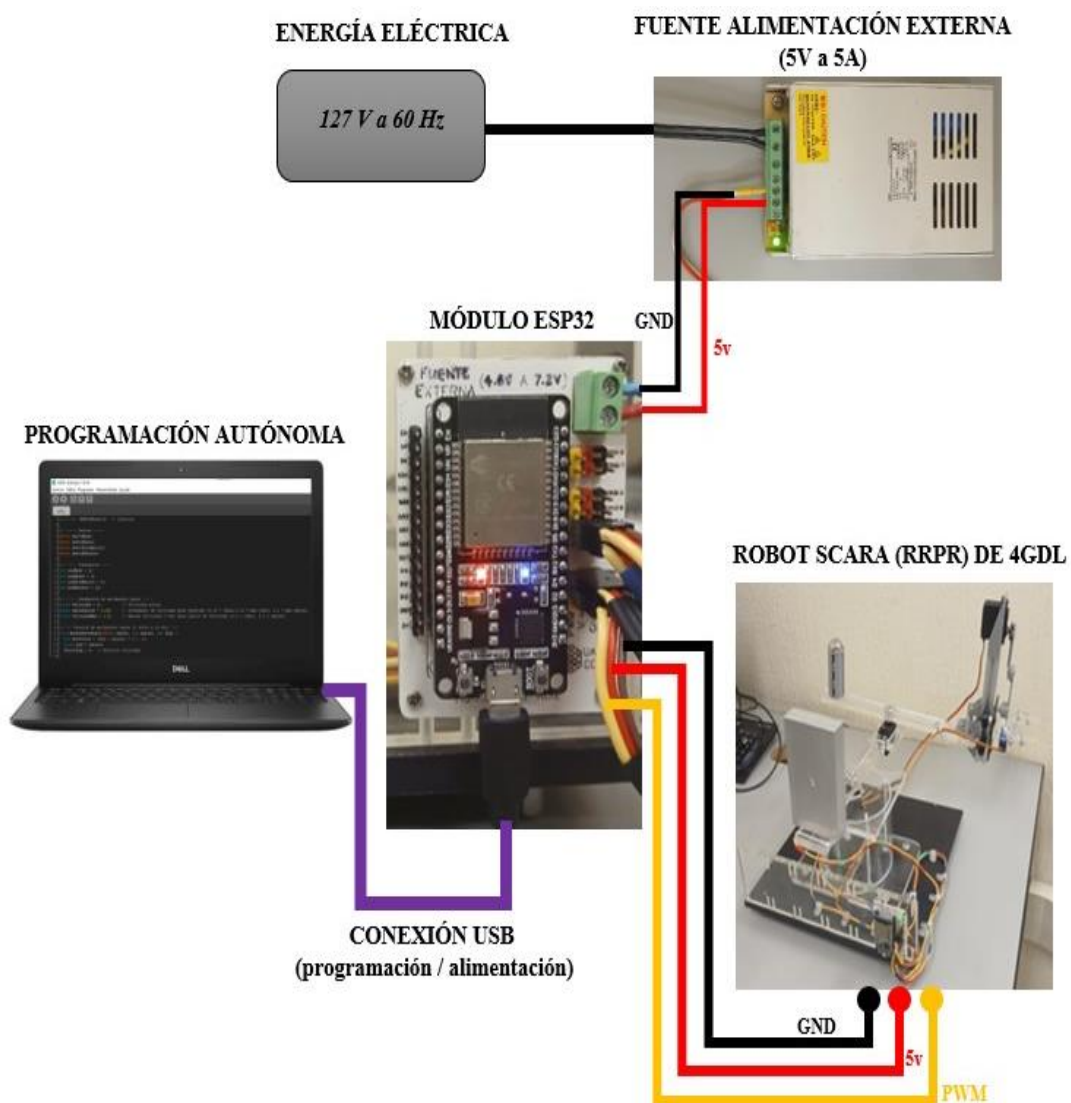


Figura 5.10 Diagrama de bloques del robot SCARA con la ESP32.

5.4 Tarjeta de circuito impreso con la ESP32

Para la tarjeta de conexiones junto con la ESP32, se diseñó en la plataforma gratuita EasyEDA que es un conjunto de herramientas de diseño electrónico basado en la nube y gratuito para diseñar, simular y compartir esquemas de circuitos y placas de circuito impreso.

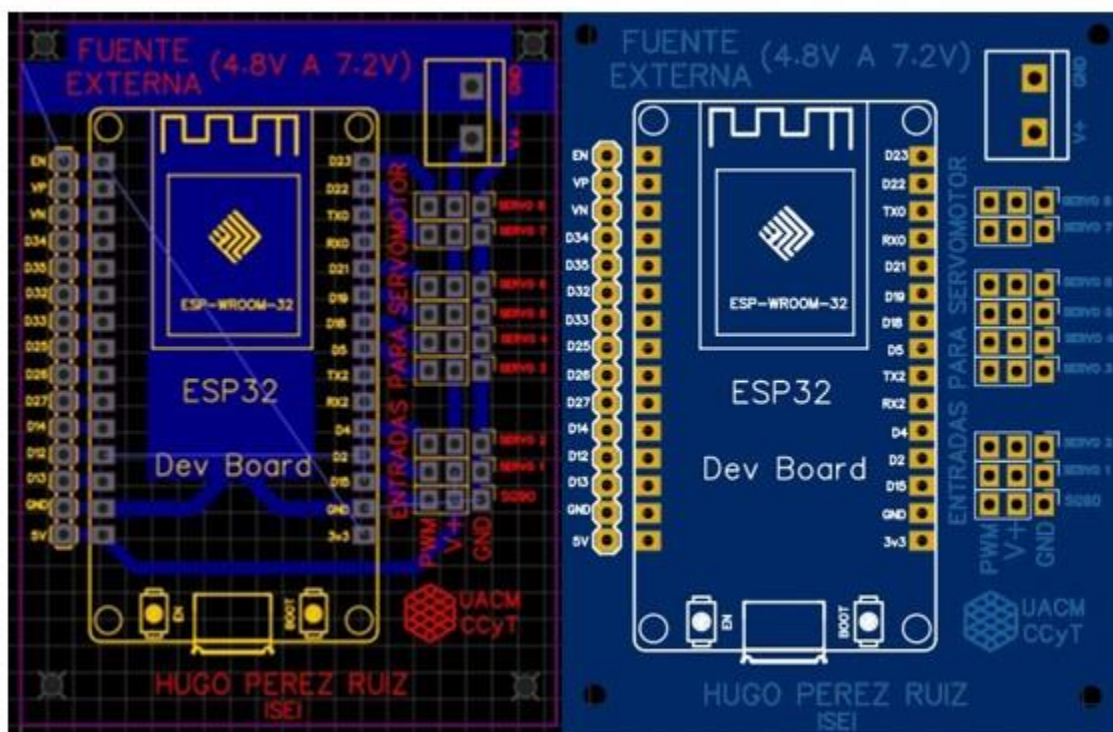


Figura 5.11 Esquema del módulo para la ESP32 y sus conexiones externas.

Solamente se diseñó un módulo sencillo, definiendo las terminales PWM para cada servomotor y alimentar a los servos con fuente externa, solamente la ESP32 se alimenta de la laptop.

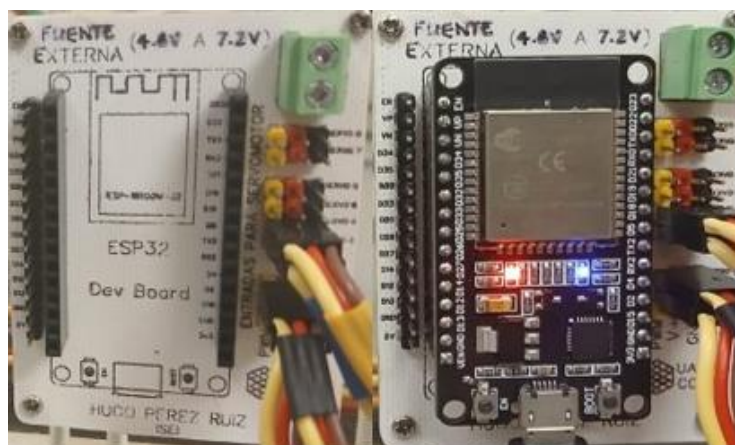


Figura 5.12 Módulo con ESP32 y conexiones externas.

5.5 EL SCARA propuesto

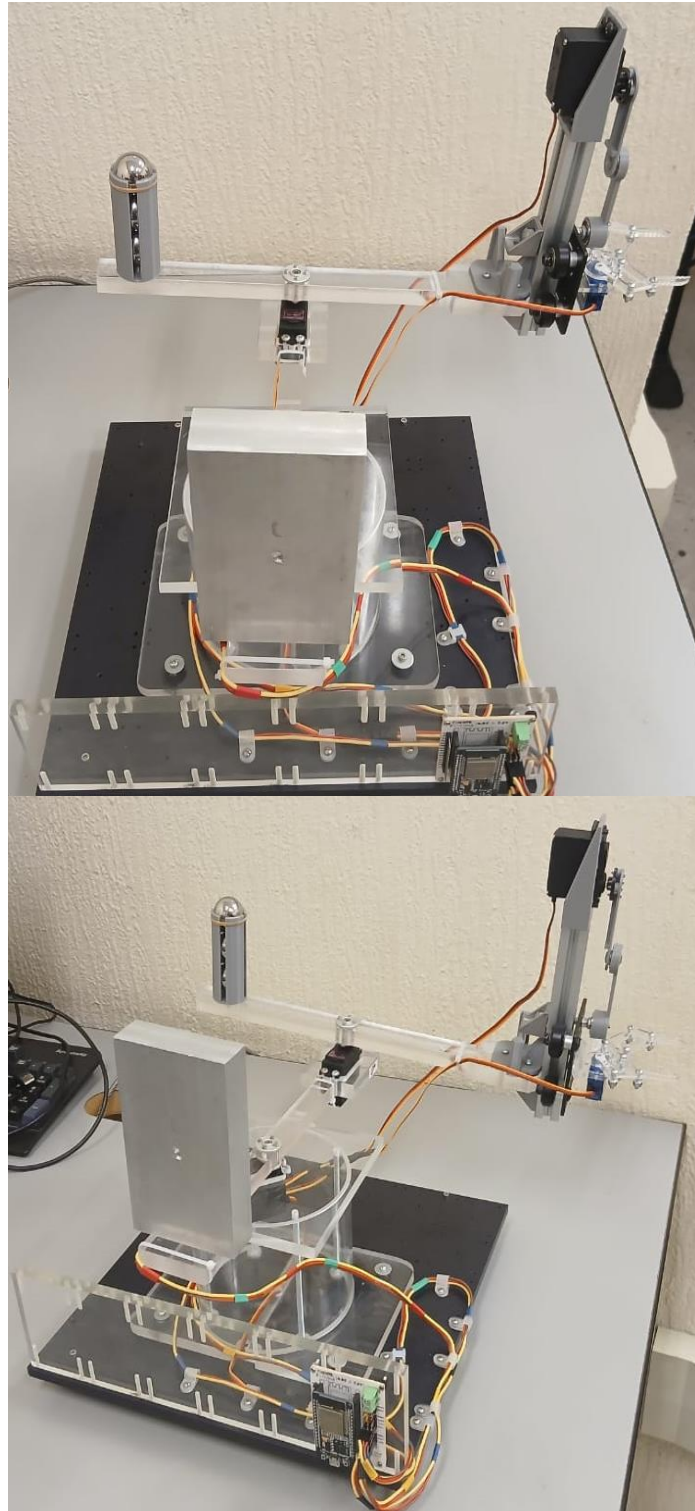


Figura 5.13 Robot SCARA (RRPR) de 4 GDL

RESULTADOS

1. El proyecto cumplió el objetivo general, diseñar con base en la investigación e implementación de sistemas y dispositivos un robot tipo SCARA de 4 grados de libertad. La rutina de movimientos y repetibilidad se cumple en el prototipo.
2. Diseñar e implementar un autómatas no es un asunto trivial, el proyecto propuesto resulto de mucha satisfacción, investigar, documentar, modelar, aprender de principios, modelos, programación, entre muchos otros, resulto en cumplimiento de todos los objetivos particulares; sino en plenitud si se logró una base de conocimiento y retos a futuro.
3. En las pruebas el robot cumplió con el objetivo de moverse y ejecutar la rutina implementada en la ESP32.
4. El robot permitió investigar sobre los elementos no contemplados en principio, los problemas causados por desbalance, sacudimientos, vibración y oscilaciones, se implementaron contrapesos para balancear brazos y la rutina implementada contempló programar movimientos controlados para reducir estos efectos.
5. En la parte mecánica se modelaron en 3D piezas que componen al robot, las cuales se fabricaron en impresora 3D, otras partes se compraron; sin una plataforma de modelado como ONSHAPE y la impresión respectiva el proyecto conllevaría costos y tiempos en el desarrollo que podrían no terminar la propuesta o solo quedar en simulaciones.
6. Se diseñó y fabricó una placa de circuito impreso para las conexiones eléctricas, evitar problemas con los componentes eléctricos o en la comunicación entre controlador y motores.
7. Se programó una rutina básica con base a la teoría de la cinemática directa, se implementaron movimientos suaves de aceleración-desaceleración controlados.
8. Durante la investigación no hay tanta información de los servomotores solo si es el caso a nivel industrial, durante la investigación observamos que existen dos tipos de servomotores uno de control angular (rotacional) y otro de control de velocidad (continuo), ambos son buenos en diferentes proyectos, pero en nuestro caso se requería un control angular preciso y no limitado en su rotación angular ya que estos son de 180°. Por tanto, su precio es poco accesible, al contrario de otros servomotores.
9. Otro problema es el balanceo, las masas de los elementos utilizados son cruciales para la operación del robot. En el proyecto se utilizó acrílico de una densidad que afecta a su movimiento, al brazo se le colocó una barra de aluminio de un peso aproximado de 1 Kg en el primer eje y en el segundo un contenedor para contrapesos tipo balón, que ayudan, pero no corrigen del todo el problema.
10. Por otro lado, los servomotores tienen juego en el tren de engranes provocando que los brazos se inclinen por su peso; provocando que el movimiento tenga sacudimiento a pesar de tener una programación con movimientos suaves y controlados al acelerar y desacelerar.

CONCLUSIONES

La robótica es un área con muchas aplicaciones dentro de la tecnología moderna, cuyo desarrollo requiere conocimientos de la ingeniería eléctrica, electrónica, mecánica, industrial y de sistemas, también de informática, matemáticas y teoría de control.

La palabra robot significa un manipulador industrial controlado por sistemas computacionales, sensores y actuadores; los robots son sistemas electromecánicos extremadamente complejos, que requieren métodos avanzados de control; donde se presentan retos e interesantes problemas de búsqueda, investigación y desarrollo de sistemas y componentes; requieren de mucha creatividad. El movimiento de un robot está controlado por sistemas de electrónica, procesamiento de datos y potencia, el controlador que es un sistema de cómputo secuencial de instrucciones o programas, donde se recoge y procesa la información generada por los sensores o actuadores y determina las decisiones o movimientos a realizar. Reiterar qué diseñar e implementar un autómatas no es un asunto trivial.

El desarrollo de los microprocesadores con sus capacidades de procesamiento, velocidad de ejecutar instrucciones y más de un proceso a la vez, además sus precios no tan elevados, han permitido el desarrollo de robots de última generación cada vez más económicos y con altos índices de rendimiento.

Durante el desarrollo del proyecto:

Se diseñó e implementó un robot antropomórfico de 4 grados de libertad tipo SCARA, que permite mover sus articulaciones eje a eje, dando a lugar a la utilización de actuadores para mover las articulaciones del robot desde una placa con un microcontrolador. No obstante, el brazo robótico presenta una serie de limitaciones y problemas.

Una de las limitaciones que se encontraron es su posición, sin carga puede rotar hasta 270° , pero con carga solo hasta su ángulo predeterminado o sea de 0° a 180° , uno de los retos fue encontrar sus posiciones cero, que si lo vemos puede ser con sentido horario o antihorario. Estos servomotores que tienen como sensor de posición un potenciómetro y por tanto tienen una resolución baja, es difícil que realicen movimientos de muy pocos grados o precisos, en especial para las primeras articulaciones que tienen que mover el peso de cada brazo. Esto los vuelve deficientes y no son precisos provocando sacudimiento en el movimiento del mismo.

Los momentos inerciales son todo un reto para el control, se requiere de control sofisticado y elementos de balanceo.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1 Robot SCARA, articulaciones, grados de libertad, $\theta_1, \theta_2, \theta_3, Z$	6
Figura I.2 Tipos de Robots manipuladores.....	7
Figura 1.1 Principio de funcionamiento del motor eléctrico.	13
Figura 1.2 Diagrama Básico del funcionamiento de un Servomotor.....	20
Figura 1.3 Servomotor MG995 de 270° de control angular y sus pulsos (PWM).....	21
Figura 2.1 Compás de barra elíptica, ejemplo de mecanismo de movimiento programado.....	41
Figura 3.1 Robot SCARA de 4 GDL.	45
Figura 3.2 Grafica en el plano X, Y del robot extendido. Posición final en: (5.858, 14.142, d ₄) cm.	52
Figura 3.3 Simulación del robot SCARA de 4 GDL en Geogebra.	55
Figura 4.1 Estructura típica del servomotor.....	57
Figura 4.2 Tarjeta de control del servomotor.	58
Figura 4.3 Señal de entrada (PWM) en forma de onda cuadrada.	59
Figura 4.4 Control de un servomotor con temporizador 555.	60
Figura 4.5 PWM de un servomotor de rotación continua.	62
Figura 4.6 Servomotor MG996R DIGI HI-TORQUE.....	63
Figura 4.7 Terminales de las entradas de un servomotor.....	64
Figura 4.8 Funcionamiento del servo MG996R.	65
Figura 4.9 Grafica de pulsos PWM con un periodo constante de 20 ms.....	66
Figura 4.10 Micro Servomotor SG90.	68
Figura 4.11 Diagrama de bloques de la ESP32.	72
Figura 4.12 Tarjeta ESP-WROOM-32.....	74
Figura 4.13 Diagrama de flujo del código para el movimiento del robot.....	80
Figura 5.1 Placa Base del SCARA, medidas en mm.	83
Figura 5.2 Brazo 1, medidas en mm.	83
Figura 5.3 Brazo 2, medidas en mm.	84
Figura 5.4 Soporte de servomotor eje Z, vista isométrica y de planta.	84
Figura 5.5 Biela eje Z, vista isométrica y de planta, medidas en mm.	85
Figura 5.6 manivela eje Z, vista isométrica y de planta, medidas en mm.....	85

Figura 5.7 Montaje del eje Z al segundo brazo, vista isométrica y de planta, medidas en mm.	85
Figura 5.8 Contenedor de pesos de balanceo segundo brazo, vista isométrica y de planta, medidas en mm.	86
Figura 5.9 Pinza cerrada / abierta según el ángulo indicado.....	87
Figura 5.10 Diagrama de bloques del robot SCARA con la ESP32.	88
Figura 5.11 Esquema del módulo para la ESP32 y sus conexiones externas.	89
Figura 5.12 Módulo con ESP32 y conexiones externas.....	89
Figura 5.13 Robot SCARA (RRPR) de 4 GDL	90

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I.1. CLASIFICACIÓN DE TIPO DE ARTICULACIONES EN ROBOTS.....	6
TABLA 1.1. DIFERENCIAS DEL SERVOMOTOR.....	30
TABLA 1.2. COMPARATIVA DEL SERVOMOTOR EN APLICACIONES.....	30
TABLA 1.3. SERVOMOTORES BÁSICOS (EDUCATIVOS, MODELISMO, ROBÓTICA BÁSICA). 31	
TABLA 1.5. STEP-SERVO (ENTRE PASO A PASO Y SERVO).	31
TABLA 1.6. SERVOMOTORES INDUSTRIALES (ROBÓTICA, CNC, AUTOMATIZACIÓN).....	32
TABLA 2.1. RESUMEN GENERAL DE MÁQUINA SIMPLE.	39
TABLA 3.1. VARIABLES DEL ROBOT DE 4 GDL.....	45
TABLA 3.2. VALORES DENAVIT-HARTENBERG (D-H).	47
TABLA 4.1. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE ALGUNAS MARCAS DE SERVOMOTORES.	60
TABLA 4.2. POSICIONES ANGULARES DEL SERVOMOTOR MG996R.....	65
TABLA 4.3. DIFERENCIA DE LOS SERVOMOTORES MG995 Y MG996R.	67
TABLA 4.4. CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE LA ESP32.....	69
TABLA 4.5. VALORES DE LA LIBRERÍA ESP32SERVO.	77
TABLA 4.6. PROCESO DE ACELERACIÓN Y DESACELERACIÓN EN EL CÓDIGO.....	79

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Reyes Cortés, Fernando. *MATLAB aplicado a Robótica y Mecatrónica*, Primera Edición, Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México.
- [2] Carlos Balaguer y Rafael Aracil-Santoja Antonio Barrientos. *Fundamentos de Robótica*, volumen 2. McGraw-Hill Interamericana de España, 2007.
- [3] Olmedo S, Jose F. y Echeverría Y, Jaime F. *Máquinas y mecanismos, implementación con Wolfram Mathematica*, Primera Edición, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador, 2018.

- [4] MYSZKA, DAVID B. *Máquinas y mecanismos*, Cuarta edición, PEARSON EDUCACIÓN, México, 2012.
- [5] Alberro, A. N. *Análisis De Mecanismos: Cinemática Y Dinámica*, Grupo Vanchri, 2019.
- [6] Reino Flores Manuel y Galán Marín Gloria. *CINEMÁTICA DE MECANISMOS PLANOS: TEORÍA Y PROBLEMAS RESUELTOS*, Primera Edición, Universidad de Extremadura UEX, España, 2020.
- [7] BUN-CA. *Manual técnico: Motores eléctricos*, Primera Edición, Fundación Red de Energía, Programa de Eficiencia Energética en los Sectores Industrial y Comercial en América Central, San José, Costa Rica, 2009.
- [8] Colorado RM. *Cinemática y dinámica de robots manipuladores*. Alpha Editorial; 2016.
- [9] *Blocked Page*. (2025). Translate.goog. <https://howtomechatronics-com.translate.goog/projects/how-to-make-a-linear-servo-actuator-with-position-feedback/>
- [10] Larraioz. *Robots SCARA*. Larraioz Group. <https://larraioz.com/iai/productos/robots-scara>. Published 25 de abril de 2024.
- [11] *Compact & Precise Industrial Robots | Mecademic Industrial Robotics*. (2024, November 26). Mecademic Industrial Robotics. <https://mecademic.com/>
- [12] Staff, A. (2024, May 23). *Qué es un servomotor: Definición, orígenes, componentes, tipos y aplicaciones - ADVANCED Motion Controls*. ADVANCED Controles de Movimiento. <https://www.a-m-c.com/es/servomotor/>
- [13] De Puebla, E. y. M. (2021, 17 Junio). *¿Qué es un Servomotor y para qué sirve?* Electrocontroles. https://www.electrocontrolesymotores.com/post/qu%C3%A9-es-un-servomotor-y-para-qu%C3%A9-sirve?srsId=AfmBOooETpa4b3ZPiDjXQpL9Y3ukBcE3HGTWKIYIFM_ALN-xYCwrEOie
- [14] rafael@nubeseo.es. (2024, February 26). *¿Qué es un servomotor? | Cinselmatic*. Cinselmatic. <https://cinselmatic.com/que-es-un-servomotor/>
- [15] *Qué es un Servomotor, para qué sirve y cómo funciona | Aula21*. (2019, September 17). Aula21 | Formación Para La Industria. <https://www.cursosaula21.com/que-es-un-servomotor/>
- [16] delefant. (2024, February 27). *▷ Servomotor: qué es y para qué sirve | TCA Automation*. TCA Automation. <https://www.tca-automation.com/servomotor-que-es-y-para-que-sirve/>

- [17] *ESP32 DEVKIT V1 - NodeMCU-32 30-pin ESP32 WiFi micro-USB*. (2023). Naylamp Mechatronics - Perú. <https://naylampmechatronics.com/espressif-esp/384-esp32-devkit-v1-nodemcu-32-30-pin-esp32-wifi-micro-usb.html>
- [18] jkb-git. (2017). *ESP32Servo/src/ESP32_Servo.h at master · jkb-git/ESP32Servo*. GitHub. https://github.com/jkb-git/ESP32Servo/blob/master/src/ESP32_Servo.h
- [19] admin. (2024, July 16). *Robot SCARA: qué es, cómo funciona, partes y ventajas* / *Elecproy*. Empresa de Automatización Industrial | © Elecproy. <https://elecproy.com/es/blog/robots-scara/>
- [20] *Trabajar con Servos*. (2025). Superrobotica.com. <http://www.superrobotica.com/servosrc.htm>
- [21] *Welcome to Zscaler Directory Authentication*. (2025). Makeblock.com.ar. <https://makeblock.com.ar/robotica-eje-rotatorio-y-prismatico/>
- [22] Llamas, L. (2023, August 25). *Cómo usar un servo con un ESP32*. Luis Llamas. <https://www.luisllamas.es/esp32-servo/>
- [23] Llamas, L. (2016, August 11). *Controlar un servo de rotación continua con Arduino*. Luis Llamas. <https://www.luisllamas.es/controlar-un-servo-de-rotacion-continua-con-arduino/>
- [24] *Arduino básico - Maker Space Zaragoza*. (2023, October 22). Maker Space Zaragoza. <https://zaragozamakerspace.com/courses/arduino-basico/lessons/servomotores-control-en-bucle/>
- [25] *Servomotores posicionales y de rotación continua: una comparación completa* - Gian Transmission. (2024). Gian-Transmission.com. <https://www.gian-transmission.com/es/servomotores-posicionales-y-de-rotacion-continua-una-comparacion-completa/>
- [26] Daniel. (2016, May 5). *Arduino: servomotor giro continuo*. Tecnopatafisica.com. <https://tecnopatafisica.com/tecno3eso/teoria/robotica/40-arduino-servomotor-giro-continuo>
- [27] Edison R Sasig - Roboticoss. (2023, November 9). *Pinza Robótica SG90 con ESP32*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=-JdiKzvUla8>
- [28] Barrientos, A., Peñín L., Balaguer C., “Fundamentos De Robótica”, Segunda edición, McGraw-Hill, 2007.