



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA.

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN.

“DESARROLLO DE UN MANIPULADOR
TIPO SCARA ENFOCADO A LA
ROBOTICA DE LIMPIEZA”

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADO EN INGENIERÍA EN
CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN.**

PRESENTA:

CINTHYA KARLA SALDAÑA
ESCALONA

ASESOR:

DR. JOSÉ LUIS HERNÁNDEZ AMECA

PUEBLA, PUE. MAYO 2021



Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a mi Dios, por haberme permitido llegar hasta este momento que es tan importante para mi formación como profesional.

A mis padres Estela y Eustacio quienes con su amor, Paciencia y esfuerzo me han impulsado a llegar a hoy a esa meta, gracias por enseñarme que la mejor herencia que me pueden dar es la educación, por inculcarme el ejemplo de esfuerzo y valentía de no temerle a las adversidades porque dios está conmigo.

A mi hermana Nadia por su cariño y apoyo incondicional durante todo este proceso, por escucharme y por estar conmigo en todo momento. A todos mis abuelos porque sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una forma u otra estarán presentes todos mis sueños y metas.

A mi novio por el apoyo, cariño, motivación y porque nunca dejo de confiar en mi a pesar de los bueno y malos momentos.

A mis amigas y amigos por apoyarme cuando más los necesitaba, por extender su mano en momentos difíciles.

Finalmente quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Jose Luis Hernandez Ameca, principal colaborador de este proceso, quien con su conocimiento y enseñanza permitió el desarrollo de este trabajo.

Índice.

Dedicatoria	3
Índice de figuras.....	6
Índice de tablas.....	7
Capítulo 1. Introducción.....	10
1.1 Antecedentes.....	10
1.2 Descripción del problema.....	12
1.3 Objetivo general y específico.....	13
1.3.1 Objetivo general.....	13
1.3.2 Objetivos específicos.....	13
1.4 Hipótesis.....	13
1.5 Alcances y limitaciones.....	13
1.5.1 Alcances.....	13
1.5.2 Limitaciones.....	14
1.6 Justificación.....	14
1.7 Organización de la tesis.....	15
Capítulo 2. Marco Teórico.....	17
2.1 Robótica de servicio.....	17
2.1.1 Robots de limpieza.....	18
2.2 Definición de los robots industriales.....	20
2.3 Estructura del manipulador robótico.....	24
2.3.1 Articulaciones.....	24
2.3.2 Pinza o Gripper.....	24
2.3.3 Herramienta.....	25
2.4 Configuración SCARA.....	25
2.4.1 Grados de libertad.....	27
2.5 Software de Diseño Asistido.....	28
2.5.1 SolidWorks.....	29
2.6 Sistema Empotrado.....	31
2.7 Servomotor.....	33
2.7.1 Características.....	33
2.7.2 Funcionamiento.....	34
2.8 Manejador de corriente- voltaje.....	35
2.9 Batería tipo LiPo.....	36
2.9.1 Significado de la nomenclatura.....	36

Clasificación del número de celdas (S).....	36
Capacidad en miliamperios (mA).....	37
Tasa de descarga (C).....	37
Tasa de carga C.....	37
Capítulo 3. Desarrollo del robot manipulador SCARA.....	39
3.1 Diseño.....	39
3.2 Grados de libertad.....	39
3.3 Cinemática de robot SCARA.....	40
3.3.1 Parámetros de Denavit-Hartenberg.....	40
3.3.1.1 Algoritmo para obtener parámetros DH.....	41
3.3.2 Análisis Cinemático Directo.....	42
3.3.2.1 Transformación de Coordenadas.....	43
3.3.2.2 Coordenadas generalizadas.....	43
3.3.2.3 Matriz de transformación D-H.....	44
3.3.3 Análisis cinemático Inverso.....	46
3.4 Obtención de las ecuaciones cinemáticas del robot.....	46
3.4.1 Sistema de Coordenadas.....	46
3.4.2 Parámetros estructurales.....	47
3.5 Ecuaciones Cinemáticas Directas para el robot SCARA.....	48
3.6 Ecuaciones Cinemáticas Inversas del robot SCARA.....	49
3.7 Piezas mecánicas.....	50
3.8 Electrónica.....	55
3.9 Máquina de estados.....	58
Capítulo 4. Resultados.....	61
4.1 Diseño mediante software.....	61
4.1.1 Diseño estructural.....	61
4.2 Electrónico.....	63
4.3 Lógico.....	64
4.4 Cinemático.....	64
4.4.1 Cinemática Directa.....	65
4.4.2 Cinemática Inversa.....	67
4.5 Conclusiones y trabajo futuro.....	68
Referencias.....	69

Índice de figuras.

Fig. 1. Roomba de Irobot. Fuente: https://www.irobot.mx/es-MX/Roomba	19
Fig. 2. Cuadro sinóptico Robots Industriales.	22
Fig. 3. El robot SCARA. Fuente: propia.	25
Fig. 4. Ubicación de un punto en el espacio de un robot SCARA.....	26
Fig. 5. Logotipo de Solidworks.	30
Fig. 6. Ejemplo de un Sistema empotrado. Fuente: https://www.researchgate.net/figure/EJEMPLO-DE-UN-SISTEMA-EMBEBIDO-10_fig1_280746985	31
Fig. 7. Microcontrolador. Fuente: https://softwareparatodo.com/software-embecido/	33
Fig. 8. Diagrama de bloques del servomotor. Fuente: http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-servomotor/	35
Fig. 9. Grados de libertad para el robot tipo SCARA. Fuente: propia.....	40
Fig. 10. Parámetros de Denavit-Hartenberg para el robot. Fuente: propia.	42
Fig. 11. Representación de Denavit-Hartenberg para el robot SCARA. Fuente: propia.	47
Fig. 12. Parámetros estructurales del robot SCARA. Fuente: propia.	47
Fig. 13. Medidas para la base del robot. Fuente: propia.	50
Fig. 14. Medidas del eslabón 0 del robot. Fuente: propia.	51
Fig. 15. Medidas del eslabón 1 del robot. Fuente: propia.	51
Fig. 16. Medidas para el barreno 1 del robot. Fuente: propia.	52
Fig. 17. Medidas para el eslabón 2 del robot. Fuente: propia.	52
Fig. 18. Medidas para el barreno 2 del robot. Fuente: propia.	53
Fig. 19. Medidas para la base del gripper. Fuente: propia.	53
Fig. 20. Medidas para el gripper del robot. Fuente: propia.	54
Fig. 21. Medidas del barreno para el gripper. Fuente: propia.	54
Fig. 22. Diagrama de Servomotor MG995. Fuente: https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132435/ETC2/MG995.html	55
Fig. 23. Disposición de pines del PIC16F887. Fuente: https://www.mikroe.com/ebooks/microcontroladores-pic-programacion-en-basic/caracteristicas-basicas-pic16f887	56
Fig. 24. Vista isométrica del Módulo Controlador de servos PCA9685	57
Fig. 25. Batería tipo LiPo.	58
Fig. 26. Máquina de estados. Fuente: propia.	59
Fig. 27. Vista Isométrica del robot SCARA. Fuente: propia.	61
Fig. 28. Vista Trimétrica del robot SCARA. Fuente: propia.	62
Fig. 29. Vista dimétrica del robot SCARA. Fuente: propia.	62
Fig. 30. Diagrama de bloques para el robot SCARA. Fuente: propia.	63
Fig. 31. Diagrama esquemático del robot. Fuente: propia.	63
Fig. 32. Máquina de estados. Fuente: propia.	64
Fig. 33. Matrices de transformación obtenidas mediante el software Matlab. Fuente: propia.	66
Fig. 34. Matriz de transformación de coordenadas obtenidas mediante el software Matlab. Fuente: propia.	67

Índice de tablas.

Tabla 1. Clasificación de los robots según la AFRI.	22
Tabla 2. Clasificación de robots según T.M Knasel.	23
Tabla 3. Código de color de los cables de un servomotor.	34
Tabla 4. Parámetros D-H para el robot SCARA.	44
Tabla 5 Parámetros DH para el robot SCARA	65

Capítulo UNO

Capítulo 1. Introducción.

1.1 Antecedentes.

El robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robotic, Brazo robótico de ensamblaje de cumplimiento selectivo) se usa comúnmente como un robot ensamblador en la industria para realizar algunas tareas de limpieza repetidamente. Por lo tanto, debe controlarse adecuadamente para rastrear alguna trayectoria periódica incluso en presencia de incertidumbres y perturbaciones.

Los brazos robóticos son manipuladores, generalmente programables, tienen funciones similares a las de un brazo humano. Se puede obtener una cadena cinemática conectando los actuadores usando lo que se llaman "eslabones" para construir el brazo robótico. El extremo manipulador del sistema de la cadena se llama "efector final". Para la mayoría de las aplicaciones de brazos robóticos, los efectores finales se denominan "pinzas". Los actuadores se denominan "articulaciones" del brazo robótico. Los brazos robóticos se usan ampliamente en las industrias automotrices, microelectrónica, química, agrícola, biomédica, defensa, manejo de materiales y soldadura, etc.

La mayor ventaja del uso de brazos robóticos es que pueden operar en áreas peligrosas o áreas a las que no puede acceder un brazo humano. Un ejemplo de tal aplicación es el brazo robótico InSight de la NASA, el cual es el primer explorador robótico del espacio exterior que estudia en profundidad la estructura interior de Marte (su corteza, manto y núcleo). O los brazos robóticos de la compañía alemana KUKA utilizados ampliamente en la industria automotriz.

A continuación se mencionan algunos de los trabajos que han servido de referencia en el presente trabajo.

Bora y Nandi proponen el diseño, la fabricación y el control de un brazo robótico articulado que puede imitar el movimiento de un brazo humano mediante el uso de sensores de bajo costo. Se utilizaron servomotores como actuadores para construir

el brazo robótico. La parte de software del sistema se graba en el microcontrolador. Se reporta la construcción de un brazo robótico portátil con 4 grados de libertad (gdl), que fue capaz de imitar el movimiento de un brazo humano con un retraso imperceptible y se logró una capacidad de carga de 150 gramos [1].

Shariatee y Akbarzadeh presentan el proceso de diseño mecánico de un robot SCARA industrial en Irán. Los robots SCARA se encuentran entre los robots más utilizados en la industria debido a su rigidez inherente y alta precisión. La arquitectura del SCARA está diseñada para permitir la implementación simple de nuevos algoritmos de control. Los resultados indican un error bajo durante la trayectoria rápida. Los resultados experimentales del movimiento del robot utilizando un Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) convencional y la trayectoria de prueba se compararon con simulaciones. Se mostró que la trayectoria de prueba se sigue con gran precisión en posición y velocidad [2].

Nkomo y Collier describen el desarrollo de un brazo robótico SCARA, el diseño utiliza la tecnología System-on-Chip para diseñar una solución de detección de color de bajo costo. Se implementaron los componentes del bloque electrónico de los sistemas, lo que resultó en una estructura mecánica robusta que tiene la capacidad de seleccionar y clasificar con precisión los diversos objetos coloreados en sus respectivos colores [3].

Liyanage y Krouglicof proponen un brazo robótico SCARA con dos articulaciones revoluciones para deshuesar aves de corral. El sistema se simuló utilizando la caja de herramientas MATLAB-Simulink. La simulación se realizó para dos presiones de suministro diferentes (3000 y 5000 psi). El controlador PID se sintonizó utilizando el método de prueba y error. El sistema fue simulado en un rango de valores para la posición del efector final. El sistema fue capaz de lograr un control satisfactorio con una ley de control PID [4].

Checa y Luna describen las fases de construcción de una simulación virtual de un SCARA con 4 gdl (grados de libertad). Permitiendo configurar el tipo de trayectoria, sintonización del control y ubicación inicial del efector final [5].

Martínez y Sandoval presentan una metodología de diseño propio, la construcción y las especificaciones básicas de un robot manipulador, usando como herramienta de diseño el software SolidWorks [6].

En la presente investigación se realiza el desarrollo de un manipulador tipo SCARA de cuatro eslabones y 4 grados de libertad, tomando en cuenta las posiciones angulares, las masas, longitudes de los eslabones, posiciones del centro de gravedad y las posiciones de rotación.

1.2 Descripción del problema.

La limpieza y desinfección de cuartos de baños forma una parte importante del enfoque para prevenir la propagación de enfermedades infecciosas en lugares públicos. Debido a que los agentes biológicos infecciosos pueden sobrevivir en superficies sólidas, es importante mantener las áreas sanitizadas. La sanitización disminuye a un nivel seguro el número de gérmenes en superficies, según lo evaluado por normas y requisitos de salud pública. El proceso de sanitización incluye el manejo de sustancias corrosivas, nocivas para la salud, por lo que es necesario usar equipo de protección básico para evitar lesiones en la piel.

En el presente trabajo se aborda el problema de diseñar la estructura de un robot SCARA, con algunas adecuaciones necesarias para realizar la limpieza en cuartos de baño. Lo cual implica utilizar técnicas de diseño como cinemática directa, inversa, lógica de funcionamiento y máquinas de estados.

1.3 Objetivo general y específico.

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un robot manipulador tipo SCARA enfocado a tareas de sanitización de cuartos de baño.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Buscar información.
- Diseñar el manipulador mediante software
- Diseñar electrónicamente
- Diseñar una máquina de estados para la descripción de movimientos.
- Recopilar y analizar los resultados.
- Redactar las conclusiones y el trabajo futuro.

1.4 Hipótesis.

Se propone diseñar un manipulador tipo SCARA que en un futuro apoye a las acciones de asepsia en cuartos de baño.

1.5 Alcances y limitaciones.

1.5.1 Alcances

En esta investigación se desarrolló un prototipo de robot tipo SCARA basado en las técnicas de cinemática directa e inversa, con la finalidad de obtener las características necesarias para desarrollar un modelo mediante un software asistido por computadora, también se diseñó un máquina de estados finitos como una herramienta que permite programar diferentes secuencias de movimientos que pueden implementarse y aplicarse mediante un sistema empotrado. Se diseñó un

sistema electrónico para la manipulación de cuatro servomotores que brindan de movimiento al diseño de robot tipo SCARA.

1.5.2 Limitaciones.

Las limitaciones que se presentan en este proyecto principalmente tienen que ver con el tiempo de trabajo que se ha dedicado a la realización de la presente tesis ya que cada una de las áreas de desarrollo (diseño, implementación y pruebas de funcionamiento) podría llevarse a cabo durante el doble de tiempo dedicado. Otras de las limitaciones que se presentaron derivadas de la pandemia de COVID-19 son la incertidumbre de un regreso a clases, la alerta sanitaria y esto provocó que las piezas diseñadas no se pudieran imprimir, lo que impidió la implementación de manera física del diseño realizado.

1.6 Justificación.

El presente proyecto nace de la necesidad de poner en práctica los conocimientos adquiridos durante la formación académica. Lo cual ha permitido profundizar en múltiples aspectos relacionados con las materias sobretodo en el área de hardware y matemáticas, desde los conceptos más generales a los más específicos.

Además de contribuir a resolver el problema de diseñar un manipulador tipo SCARA con herramientas de las ciencias de la computación.

Por último se pretende impulsar el desarrollo científico y tecnológico dentro del área de la robótica de limpieza que en la actualidad es una rama poco desarrollada dentro de la robótica.

1.7 Organización de la tesis.

El presente trabajo de investigación se enfoca al diseño de un brazo robótico tipo SCARA enfocado a tareas de sanitización de cuartos de baño, este trabajo se compone de 4 capítulos estructurados de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se habla de los antecedentes de los robots SCARA, de la hipótesis planteada en esta tesis, los alcances y limitaciones del trabajo y por último la justificación de la misma.

En el capítulo 2 se hace mención de la robótica de servicio, la definición de los robots industriales, la estructura del manipulador , la configuración SCARA, Software de Diseño Asistido, Sistema Empotrado, Servomotor, Manejador de corriente- voltaje y por último la Batería LiPo.

El capítulo 3 hace referencia al diseño del robot, los grados de libertad con que cuenta, la cinemática directa e inversa, las piezas mecánicas, la electrónica y por último la máquina de estados.

El capítulo 4 se enfoca en mostrar los resultados obtenidos en el diseño mediante software, el diseño lógico, electrónico y cinemático. Por último muestra las conclusiones y trabajo futuro.

Capítulo DOS

Capítulo 2. Marco Teórico.

2.1 Robótica de servicio.

Durante esta última década ha aparecido la necesidad de hacer que los robots realicen distintas tareas a las industriales [7], como respuesta a esta demanda aparece la denominada Robótica de Servicio [8].

La Federación Internacional de Robótica (IFR) ha definido un robot de servicio como: un robot que opera de manera automática o semiautomática para realizar servicios útiles al bienestar de los humanos o a su equipamiento, excluyendo las operaciones de fabricación.

La robótica de servicio surge por la inquietud de la comunidad científica de realizar desarrollos destinados al servicio de la sociedad, tratando de que se reconozca y se apoyen sus resultados. Desde un punto de vista social ya existen desarrollos en esta área que han impactado en la forma de vivir de muchas personas, en los centros de investigación hay una gran actividad de investigación con el objetivo de mejorar.

Un robot de servicio es aquel que funciona de manera parcial o totalmente autónoma, realizando actividades útiles para el bienestar de los humanos [9]. Es importante resaltar que los robots son diferentes a los industriales, como ya antes se mencionó, ya que su objetivo principal es simplificar el trabajo humano en casas, oficinas, hospitales, etc., para lo cual el robot tiene que moverse de manera intencional o autónoma, evitando los diferentes obstáculos, reconocer e identificar a los humanos, comunicarse en las diferentes lenguas, ver, tomar, llevar y entregar objetos entre otro tipo de acciones [10].

Los robots de servicio de uso profesional están experimentando una evolución de tecnología a gran escala. Actualmente los fabricantes están aumentando las utilidades de los robots, siendo todo esto impulsado por la innovación en el aprendizaje, la inteligencia artificial y los sistemas de visión. Combinando las capacidades de precisión y fuerza con la flexibilidad del ser humano se ha ampliado

las funcionalidades de los robots resultando de gran apoyo para el ser humano en sus actividades cotidianas.

Las aplicaciones de un robot de servicio principalmente se encuentran en la asistencia los seres humanos, servicio a equipos (mantenimiento, reparación, limpieza) y funciones autónomas.

Un ejemplo de las funciones de un robot de servicio es el aspirado de una casa, ya sea que se le indique directamente al robot o se programe a una hora y día determinado.

Los robots de servicio poco a poco se incorporarán en la vida diaria como lo hicieron las televisiones, las computadoras y los celulares, tomando un lugar principal en la vida de los seres humanos.

2.1.1 Robots de limpieza.

Un robot de limpieza es un autómatas que realiza diversas funciones del ámbito doméstico, como la seguridad, vigilancia, atención de niños o personas mayores, así como tareas del hogar como aspirar, planchar o fregar suelos [11]. Los robots de limpieza que se conectan a una red doméstica se llaman domobots, por ello disponen de un puerto para la conexión que puede ser mediante cable o de forma inalámbrica, un ejemplo de ello es la aspiradora Roomba de Irobot (véase Fig. 1).



Fig. 1. Roomba de Irobot. Fuente: <https://www.irobot.mx/es-MX/Roomba>.

Actualmente existen una gran variedad de robots de limpieza por lo general son clasificados según sus tareas:

- Robots para aspirar y mopear.
- Robots trapeadores.
- Robots que lavan la ropa.
- Robots de planchado.
- Robots que cortan el césped.
- Robots que limpian las piscinas.

Gracias al rápido desarrollo de la tecnología, la robótica de servicio ha tenido grandes avances. Los avances en el análisis de datos del entorno ha mejorado la funcionalidad de los robots, logrando que cumplan su labor de manera más eficiente. También gracias al procesamiento de información, se ha logrado superar el problema de la zona de desempeño, ya que estos robots deben ser capaces de cumplir su tarea y superar obstáculos en cualquier ambiente, es decir, en distintos tipos de arquitectura. La implementación del uso de sensores y cámaras para la recolección de datos complementado con los avances del procesamiento de información ha logrado una gran capacidad de procesamiento en un espacio reducido, con lo cual se mejora la precisión del robot en sus tareas [12].

La cantidad de robots domésticos vendidos según la IFR en 2013 es de 2500 aproximadamente. Esta cifra ascendió 26000 durante 2015. El crecimiento del avance tecnología mejora los modelos de robots a cada segundo, por lo que existe una gran variedad de opciones en el mercado, los cuales realizan diversas tareas. De acuerdo a las investigaciones de mercado, las venta a nivel mundial de robots domésticos creció en un 23.5% por año entre el 2015 y el 2020 [13].

2.2 Definición de los robots industriales.

Existen algunas particularidades al definir un robot industrial. La primera surge de la diferencia conceptual que ofrece el mercado japonés y el euro-americano acerca de lo que es un robot y lo que es un manipulador. Para los japoneses, un robot industrial es cualquier dispositivo mecánico dotado de articulaciones móviles destinado a la manipulación. Para el mercado occidental es más restrictivo, exigiendo una mayor determinación, en relación al control. La segunda particularidad se establece al centrarse en el concepto occidental, existe la idea común acerca de lo que es un robot industrial pero no es fácil ponerse de acuerdo para establecer una definición formal. Además la evolución de la robótica ha obligado a que surjan actualizaciones referentes a su definición.

La definición mayormente aceptada es posiblemente la de la Asociación de Industrias Robóticas (RIA) la cual dice: “Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas”.

La Organización Internacional de Estándares (ISO) adopta pero modifica ligeramente la definición de la RIA, entonces define a un robot industrial como: “Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad (gdl), capaz de manipular materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales según sus trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas”.

La Asociación Francesa de Normalización (AFNOR) nos ofrece una definición más completa, que define primero un manipulador:

“Mecanismo formado generalmente por elementos en serie, articulados entre sí, destinados al agarre y desplazamiento de objetos. Es multifuncional y puede ser manipulado directamente por un operador humano o mediante un dispositivo lógico.”

En base a la definición anterior la AFNOR define un robot:

“Manipulador automático servo-controlado reprogramado, 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 de percepción del entorno. Normalmente su uso es el de realizar una tarea de manera cíclica. Pudiéndose adaptar a otra sin cambios permanentes en su material”.

La Federación Internacional de Robótica (IFR) distingue entre robot industrial de manipulación y otros robots:

“Por robot industrial de manipulación se entiende una máquina de manipulación automática, reprogramable y multifuncional con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales para la ejecución de trabajos diversos en las diferentes etapas de la producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento”.

En esta definición se entiende que la programabilidad y la multifunción se consiguen sin modificaciones físicas al robot.

La aceptación del robot industrial como un brazo mecánico con la capacidad de manipulación y que además incorpora un control más o menos complejo, es común en todas las definiciones anteriores.

2.2.1 Clasificación de los robots industriales.

En la Fig. 2 se presenta un cuadro sinóptico de elaboración propia donde se muestra una clasificación de los robots industriales basada en el tipo de movimientos y grados de libertad.

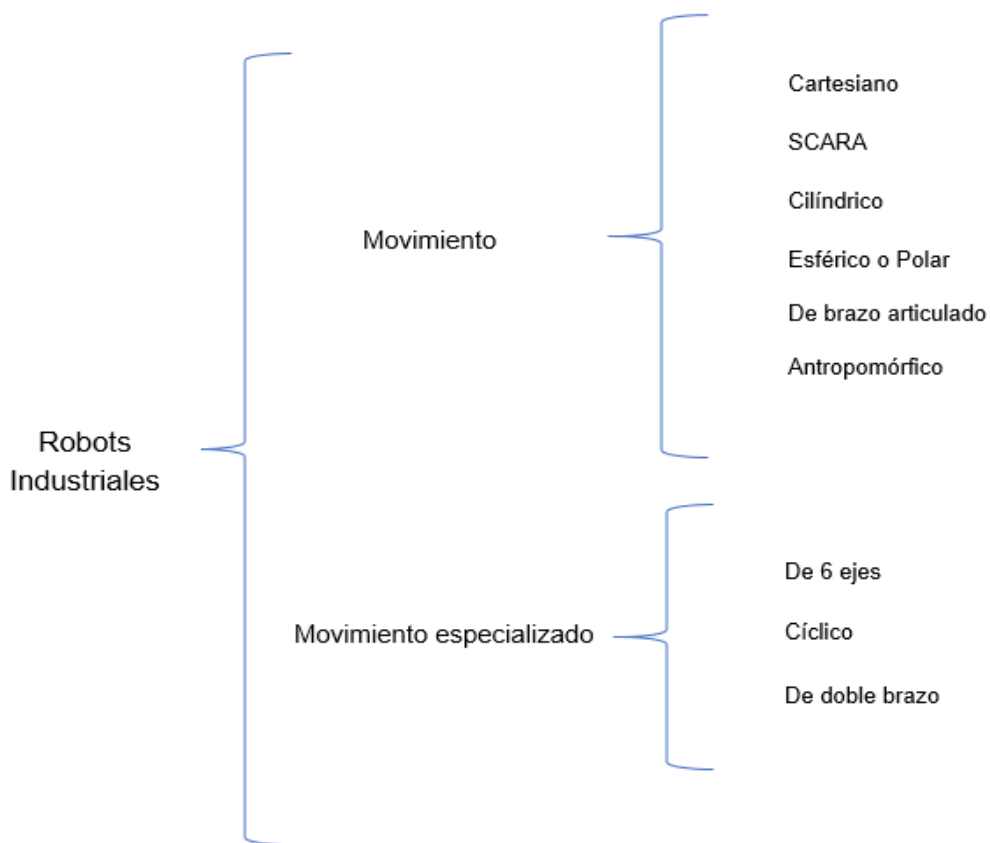


Fig. 2. Cuadro sinóptico Robots Industriales.

A continuación se muestra la clasificación de los robots industriales (del tipo A al D) tomada de la Asociación Francesa de Robótica Industrial (AFRI) en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de los robots según la AFRI.

Tipo A	Manipulador con control manual o telemando.
Tipo B	Manipulador automático con ciclos pre ajustados, regulación mediante fines de carrera o topes, control por PLC, accionamiento neumático eléctrico o hidráulico.
Tipo C	Robot programable con trayectoria continua o punto a punto. Carece de conocimiento sobre su entorno.
Tipo D	Robot capaz de adquirir datos de su entorno, readaptando su tarea en función de estos.

En la tabla 2 se muestra una clasificación de los robots dada por Michael Knasel [14] director del Centro de Aplicaciones Robóticas.

Tabla 2. Clasificación de robots según T.M Knasel.

Generación.	Nombre.	Tipo de control.	Grado de movilidad.	Usos más frecuentes.
1(1982)	Pick & place.	Fines de carrera, aprendizaje.	Ninguno.	Manipulación, servicio de máquinas.
2 (1984)	Servo.	Servo control, trayectoria continua, programación condicional.	Desplazamiento por vía.	Soldadura, pintura.
3 (1989)	Ensamblado.	Servo de precisión, visión, tacto	Guiado por vía.	Ensamblado, desbarbado.
4 (2020)	Móvil.	Sensores Inteligentes.	Patas, ruedas.	Construcción, mantenimiento.
5 (2010)	Especiales.	Controlados con técnicas de Inteligencia Artificial.	Andante, saltarín.	Militar, espacial

2.3 Estructura del manipulador robótico.

Un manipulador robótico es a grandes rasgos un brazo compuesto por elementos mecánicos con articulaciones entre ellos. En la última unión se posiciona un dispositivo funcional, con una pinza o un efector final para llevar a cabo las distintas operaciones que se requiere. Un manipulador robótico es esencialmente un brazo artículo, generalmente es una cadena cinemática abierta formada por un conjunto de eslabones interrelacionados mediante articulaciones. Las articulaciones permiten el movimiento relativo entre los sucesivos eslabones.

Un robot manipulador se suele construir con distintos enlaces rígidos que están interconectados por las distintas articulaciones. Estas articulaciones tienen un extremo fijo y otro libre. Su finalidad será realizar una tarea determinada. Todas las articulaciones del manipulador robótico son móviles, y le permiten el movimiento relativo en los distintos enlaces adyacentes. De la misma manera existen dos lineales a un robot manipulador que suele asegurar el movimiento no rotacional entre todos los eslabones, a su vez posee tres juntas de tipo rotativo que aseguran el movimiento de rotación [15].

2.3.1 Articulaciones.

Las articulaciones permiten que entre los ejes se pueda producir un movimiento de desplazamiento, de giro o una combinación de los dos. Existen diferentes tipos de articulaciones, las dos más utilizadas son la prismática (P) y la de rotación (R); ambas permiten un solo movimiento independiente entre las partes que las unen es decir un grado de libertad. La articulación prismática permite únicamente un movimiento relativo de desplazamiento o traslación en un solo eje, por este motivo, podemos decir que en general que el número de grados de libertad de un robot es igual al número de articulaciones o ejes que presenta [16].

2.3.2 Pinza o Gripper

Un robot SCARA convencional cuenta con cuatro grados de libertad (gdl), tres se utilizan para el posicionamiento del robot y el último restante se usa para la orientación de la muñeca. El posicionamiento se realiza por medio de la combinación de dos ejes de rotación (movimiento en el plano XY) y un eje de traslación (movimiento en el eje Z). Así el robot SCARA se consigue ubicar en un punto en el espacio, tal como se observa en la Fig. 4.

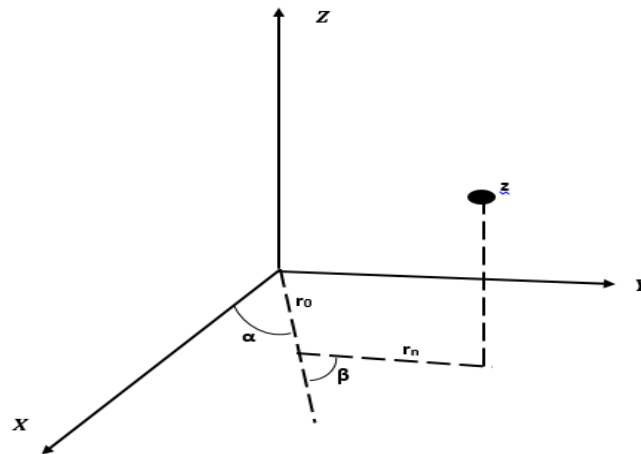


Fig. 4. Ubicación de un punto en el espacio de un robot SCARA.

Como se observa en la figura anterior los ejes de las dos primeras articulaciones de revolución son verticales haciendo que los eslabones se muevan en un plano horizontal mientras que el tercer eslabón se mueve en su eje vertical. En esta configuración particular las fuerzas gravitatorias, centrífugas y de Coriolis no cargan a la estructura como pudiera ocurrir en las demás configuraciones.

Los brazos robóticos tipo SCARA cuentan típicamente con 6 ejes montados sobre una base. Pueden realizar tres movimientos en los planos cartesianos X, Y, Z. Su característica es que en el plano Z añaden un eje que permite hacer girar la pinza o efector final ubicado en el final del brazo. Se comportan de manera similar al brazo humano, lo que permite ubicar el efector final en cualquier localización sobre el plano [18].

La característica más notoria es el uso de dos o tres articulaciones giratorias con ejes verticales, también se llaman robots de configuración giratoria-prismática.

Aunque los robots SCARA tienen una estructura Rotacional-Rotacional-Prismática (RRP) son bastantes diferentes con respecto al de configuración esférica, que tiene la misma estructura. La complejidad del manejo se sitúa entre la del robot de configuración cartesiana y el robot de configuración rotacional. Son utilizados para trabajos de carga, desplazamiento y descarga de materiales, en aplicaciones de sellado, ensamblaje y manejo de herramientas. La configuración SCARA, está pensada para realizar tareas de montaje en un plano, esta constituida por dos articulaciones de rotación con respecto a dos ejes paralelos y una de desplazamiento en sentido perpendicular al plano [19]. Debido a esta configuración puede realizar movimientos horizontales de mayor alcance debido a sus dos articulaciones rotacionales.

2.4.1 Grados de libertad.

Se denomina grado de libertad (gdl) a cada una de las coordenadas independientes que son necesarias para describir el estado del sistema mecánica del robot (posición y orientación en el espacio de sus elementos). Normalmente, en cadenas cinemáticas abiertas, cada par compuesto por un eslabón y una articulación tiene solo un grado de libertad, ya sea de rotación o de traslación. En cambio una articulación podría tener dos o más grados de libertad que operan sobre los ejes que se cortan entre sí.

Los seis grados de libertad más comunes:

- Adelante / Atrás (Forward/ Back).
- Arriba / Abajo (Up/ Down).
- Izquierda / Derecha (Left/ Right).
- Cabecear (Pitch).
- Guiñar (Yaw).
- Rodar (Roll).

Para controlar y describir el estado de un brazo robótico se debe determinar:

1. La posición de un punto (puede ser el punto terminal) respecto de un sistema de coordenadas externo y fijo, denominado como el sistema mundo.
2. El movimiento del brazo cuando los elementos actuadores aplican fuerzas y momentos.
3. El análisis desde el punto de vista mecánico de un robot que se puede efectuar atendiendo exclusivamente a sus movimientos (análisis cinemático) o atendiendo además a las fuerzas y momentos que actúan sobre las partes (análisis dinámico) debidas a los elementos actuadores y a la carga que transporta el efector final.

Los robots tipo SCARA cuentan típicamente con cuatro grados de libertad incluido el posicionamiento horizontal, se conocen por sus ciclos rápidos de trabajo, su excelente repetitividad, gran capacidad de carga y su amplio campo de aplicación [20].

2.5 Software de Diseño Asistido.

El software de diseño asistido por computadora o CAD (Computer Aided Desing) es una manera de crear un modelo de comportamiento de un producto aun antes de que se haya construido [21].

Las características generales que debe tener un software de Diseño Asistido por Computadora son:

- Contar con simulaciones dinámicas que tengan características especiales de visualización de procesos y resultados por ejemplo representaciones de fotos realistas, tabulaciones, diagramas, sonidos, etc.
- El software debe tener la capacidad de generar soluciones optimas según los tipos de aplicación.
- Permitir el desarrollo de sistemas virtuales dentro de un entorno, para eliminar en muchos casos los prototipos físicos.
- Ingeniería concurrente (trabajo multidisciplinario en la red, con niveles de acceso y geo procesamiento referenciado).

- Contar con una arquitectura abierta de software (posibilidad de personalizar y generar programas complementarios).
- Permitir la ingeniería inversa por ejemplo obtener un modelo CAD a partir del escaneado tridimensional de una pieza real.
- Permitir el intercambio estandarizado de formatos de archivos para trabajar en multiplataforma (run anywhere).
- Contar con una pantalla de trabajo compartida con diferentes aplicaciones y programas adicionales (plug-in).

La incorporación de la computadora en la producción es el elemento puente que permite la automatización integral de los procesos industriales así como la integración tecnológica de sus áreas. Es así que softwares profesionales se están integrando al sistema CAD; lo que ha resaltado la importancia de automatizar informáticamente cualquier proceso industrial desde el diseño hasta la fabricación. Esta automatización recae directamente sobre el proceso de varias formas:

- Hay una reducción importante de los tiempos y existe una mayor sencillez en la etapa de diseño.
- La seguridad de un correcto funcionamiento debido a la simulación del prototipo.
- La fácil integración de una cadena de fabricación y el mejoramiento de la gestión del proyecto.
- La obtención de un producto más económico, de mejor calidad en menor tiempo.

2.5.1 SolidWorks.

SolidWorks (Fig. 5) es un software de diseño tipo CAD 3D usado para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos 2D. nos ofrece un amplio abanico de soluciones para el proceso de desarrollo de un producto. Dentro de los productos que SolidWorks nos ofrece, existe la posibilidad de crear, diseñar, fabricar, simular publicar y gestionar los datos del proceso de diseño.



Fig. 5. Logotipo de Solidworks.

SolidWorks ofrece un completo conjunto de herramientas que nos ayudan a ser más eficientes y productivos en el proceso de diseño de los productos.

Las herramientas con las que cuenta SolidWorks incluyen cinco líneas de productos diferentes:

1. Herramientas de diseño para la creación de modelos y ensamblajes.
 2. Herramientas de diseño para la fabricación de piezas mecánicas que automatizan la creación de la documentación sin planos 2D además de los documentos de inspección.
 3. Herramientas de simulación que evalúan el diseño y garantizan que es el mejor posible.
 4. Herramientas que evalúan el impacto ambiental de los diseños durante todo su ciclo de vida.
-
1. Herramientas que usan los datos CAD en 3D para simplificar el modo en que las empresas crean, conservan y utilizan contenidos para la comunicación técnica.

2.6 Sistema Empotrado

Un sistema empotrado también llamado embebido (ver Fig. 6) es sistema informático de uso específico, que está totalmente encapsulado por el dispositivo al que controla. Los sistemas empotrados son un sistema computacional que deriva de la combinación de hardware y software. Dicha combinación tiene como propósito llevar a cabo una funcionalidad específica (o un conjunto de funcionalidades específicas). Se les llama empotrados porque comúnmente forman parte de un sistema completo o con funcionalidades más generales.

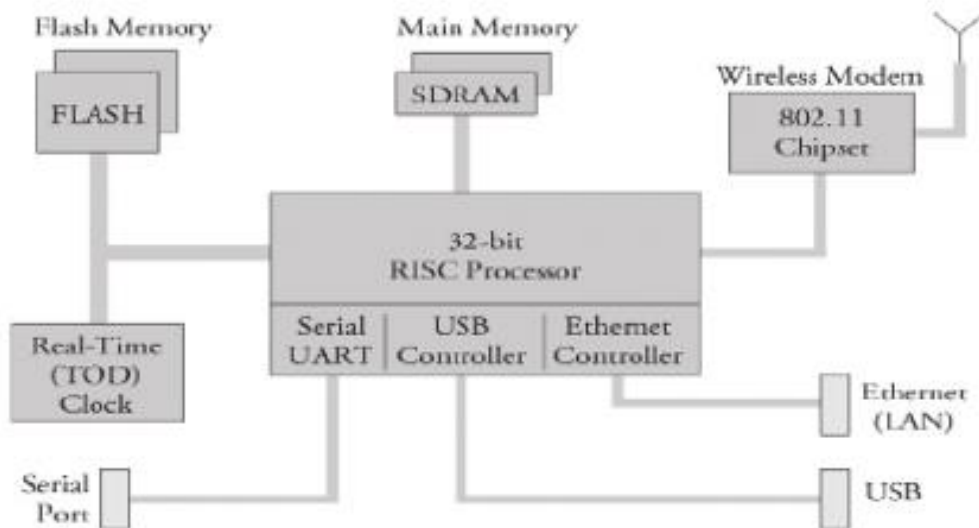


Fig. 6. Ejemplo de un Sistema empotrado. Fuente:

https://www.researchgate.net/figure/EJEMPLO-DE-UN-SISTEMA-EMBEBIDO-10_fig1_280746985

Un sistema empotrado está basado normalmente en un microcontrolador (μC), que como su nombre lo dice es el encargado de controlar una función o un conjunto de funciones específicas de un sistema. Dicho sistema no está diseñado para ser programado por el usuario final, como suele suceder en una computadora personal, es decir el usuario final puede configurar el sistema empotrado pero no puede modificar la funcionalidad específica para la que fue construido.

Los microcontroladores son los cerebros de cada sistema empotrado, son los encargados de procesar toda la información, de ejecutar las tareas o generar un flujo de información. Los microcontroladores (véase Fig. 7) de los dispositivos que usamos hoy en día van desde un simple microcontrolador de 4 bits, como los que encontramos en una postal navideña con sonido, hasta los complejos microcontroladores dedicados de 128 bits, con altas capacidades de procesamiento y gestión de gráficos, que encontramos en una Play Station 3 [22].

Un sistema empotrado está diseñado para llevar a cabo la tarea específica para la que ha sido programado. Esta tarea puede o no ser única, por lo cual se pueden incluir varias opciones que el usuario puede seleccionar en un menú. Actualmente un grupo pequeño de dispositivos empotrados han experimentado una evolución y ya casi nos ofrecen funcionalidades muy cercanas a las de una computadora personal.

El desarrollo de un sistema empotrado está condicionado por la robustez y la eficiencia, con el condicionante de que ninguno de los usuarios finales sea consciente de su existencia. Los sistemas empotrados interactúan con una variedad de dispositivos tanto analógicos como digitales, para ello el desarrollador se debe enfrentar al uso de sensores y transductores, comprender su funcionalidad y como sus señales son digitalizadas o viceversa. También los sistemas empotrados usan cada día más las conexiones de red, en muchos casos con protocolos específicos debido a la naturaleza de los mismos. Por lo tanto la tarea de desarrollar un sistema empotrado es heterogénea y requiere que el desarrollador tenga amplios conocimientos y sobre todo habilidades.

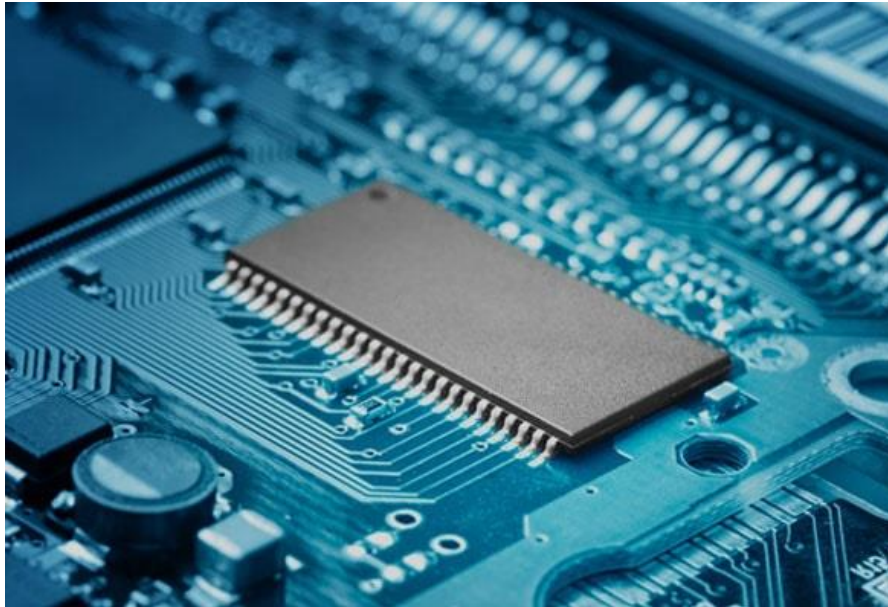


Fig. 7. Microcontrolador. Fuente: <https://softwareparatodo.com/software-embebido/>

2.7 Servomotor

Un servomotor es un motor dotado de varias características especiales. La principal de ellas es que cuenta con un sistema de retroalimentación (llamado encoder), el cual le indica al controlador del servomotor (servo driver) la posición en la que se encuentra el eje del servomotor y este le corrija la posición, en caso de que no fuese correcta. De esta manera, se pueden corregir en tiempo real los errores de posición y obtener una precisión muy alta. Para tener una referencia, el nivel de precisión que se puede conseguir con los servomotores de Micro® es que pueden alcanzar una resolución de 1, 280,000 (un millón doscientos ochenta mil) pulsos por vuelta [23] .

2.7.1 Características.

Además de la precisión, otra de las características es la capacidad de mantener el torque constante en toda su gama de revoluciones (hasta 3,000 rpm). Esta característica hace que se diferencien de los motores asíncronos convencionales, puesto que si quisierais mantener la posición en un motor convencional, necesitaríamos la ayuda de dispositivos adicionales como lo son los frenos, un conjunto de frenos-embague, reductores de velocidad, etc. En cambio, los

servomotores aplican todo su torque disponible para conservar la posición de la carga, independientemente de la velocidad del funcionamiento del servomotor, es decir, que el servomotor puede conservar la posición de la carga a cero revoluciones por minuto (0 rpm) sin la necesidad de agregar otros dispositivos [24]. Aunado a esto existe otra condición particular que se refiere a los niveles de aceleración y desaceleración que se pueden adquirir, teniendo en cuenta que el torque es una relación entre el momento de inercia de la carga y la aceleración angular. Esto se traduce a la siguiente ecuación:

$$T = I * a$$

Donde:

- T es el torque (newton metro Nm).
- I es el momento de inercia (kilo-metro cuadrado kg-m²).
- a es la aceleración angular (radian por segundo al cuadrado rad/seg²).

En esta ecuación se logra ver que para una aceleración mayor con el mismo nivel de carga se necesitaría más torque para poder mover la misma carga.

Los servomotores soportan un 300% de sobrecarga por un determinado periodo de tiempo, lo que posibilita romper la inercia en aceleraciones o desaceleraciones bruscas.

2.7.2 Funcionamiento.

Los servomotores poseen tres cables de diferente color, a diferencia de los motores comunes que solo presentan dos. Estos cables casi siempre tienen los mismos colores, por lo que es fácil reconocerlos (véase tabla 3).

Tabla 3. Código de color de los cables de un servomotor.

Voltaje positivo	Tierra	Señal de Control
Rojo	Negro/Café	Amarillo/Blanco/Naranja

Es imposible usar este tipo de motores sin un circuito de control adecuado, puesto que se necesita una señal de control. Esto se debe a que el circuito interno para funcionar necesita una señal modulada. Para esto se utiliza la modulación por ancho de pulsos también conocida como PWM.

El diagrama de bloque de un servomotor es la representación de forma visual del servomotor como un sistema. El circuito electrónico es el encargado de recibir la señal de control PWM y traducirla en movimiento del motor de Corriente Directa (DC). El eje del motor de corriente directa está acoplado a un potenciómetro, que permite formar un divisor de voltaje. El voltaje en la salida del divisor varía en función de la posición del eje del motor de corriente directa.

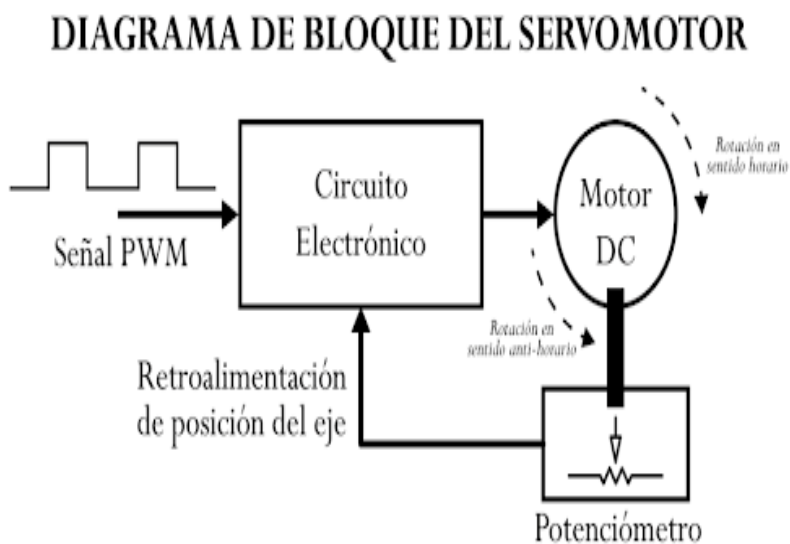


Fig. 8. Diagrama de bloques del servomotor. Fuente: <http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-servomotor/>.

2.8 Manejador de corriente- voltaje

Un Driver o manejador de motor es un pequeño amplificador de corriente, su función es tomar una señal de control de baja corriente y convertirla en una señal de corriente alta que pueda conducir un motor [25].

El manejador es además un dispositivo industrial que controla la velocidad rotacional del motor regulando la frecuencia del voltaje aplicado al motor. De la misma manera modifica el voltaje aplicado al motor para evitar la saturación del flujo magnético con una elevación de la corriente que dañaría el motor. De tal manera que varía la velocidad y la acopla en los motores asíncronos trifásicos, convirtiendo las magnitudes fijas de frecuencia y tensión de red en magnitudes variables.

Originalmente los manejadores fueron desarrollados para mejorar los procesos industriales, pero con el paso del tiempo se han destacado por otras capacidades como lo es proporcionar par o el manejo de la velocidad, operar sin golpes mecánicos, realizar movimientos complejos y ajustar la tasa de producción [26].

2.9 Batería tipo LiPo

Una batería LiPo (de Litio y Polímero) es una tipo de batería recargable muy común en el mundo de los servomotores. Son altamente recomendables ya que ofrecen beneficios superiores a las de NiCd y NiHmm.

Una batería LiPo puede almacenar una gran cantidad de energía y puede fabricarse en medidas personalizadas.

2.9.1 Significado de la nomenclatura.

Clasificación del número de celdas (S).

Este tipo de baterías tienen la particularidad de disponer de un mayor voltaje por celda que otros tipos de batería. Pueden llegar a contener 4.2 v cuando están completamente cargadas.

El número S corresponde al número de celdas que contiene. Por celda entendemos a una pequeña batería que compone por repetición a una batería completa.

Capacidad en miliamperios (mA).

A mayor número de miliamperios, más capacidad de carga. Una batería de mayor capacidad acarrea un mayor tamaño y por lo tanto peso.

Tasa de descarga (C).

Cuando se habla de una batería con capacidad de 2200mA se está diciendo que esa batería es capaz de descargar 2.2 A en una hora.

Si una batería es 1C significa que la tasa máxima de descarga a la que puede llegar es 1A (amperio).

Por ejemplo: Una batería de 1000 mA 1C, se descargaría en razón de 1A por hora.

Si el número C, es distinto a 1 significa que debemos multiplicar la tasa de descarga por un su valor, reduciendo el tiempo proporcionalmente.

Por ejemplo: Una batería de 1000 mA 2C, se descargaría a razón de 2A en media hora.

Tasa de carga C.

Está indicada con C y funciona de manera muy similar. El cómo realicemos la carga de la batería influirá directamente en la vida útil de la misma.

Si realizamos una carga a 1C de una batería de 1000 mA, significa que hemos configurado el cargador para que a carga se realice a 1A. El tiempo de carga será de aproximadamente una hora.

Si realizamos una carga a 2C de una batería de 1000 mA, significa que hemos configurado el cargador para que la carga se realice a 2A. En este caso el tiempo de carga será de aproximadamente media hora.

El rango de C que tenga una batería nos indica por lo tanto la velocidad a la que podemos cargar la batería [27].

Capitulo TRES.

Capítulo 3. Desarrollo del robot manipulador SCARA

3.1 Diseño.

El diseño del robot se realizó tomando en cuenta su objetivo principal, que es la limpieza de un cuarto de baño. Para ello se tomó en cuenta el recorrido que el robot debe realizar desde su punto inicial, el peso que debe manipular y que sea de fácil manejo para el usuario final.

Tomando en cuenta los aspectos anteriores se tiene el diseño de un robot SCARA de cuatro grados de libertad, tres de los cuales se usan para el posicionamiento del robot y el restante para la orientación de la muñeca (Efector final). El posicionamiento se realiza por medio de la combinación de dos ejes de rotación y un eje de traslación. Las dimensiones aproximadas son 50 cm de alto por 40 cm de ancho. El hardware requerido para brindar los movimientos al robot son 4 servomotores, un sistema empotrado y una fuente de alimentación. La lógica de funcionamiento se basa en una máquina de estados finito que permitirá generar diferentes secuencias de movimiento.

3.2 Grados de libertad.

El robot cuenta con 4 grados de libertad divididos en 3 rotacionales y 1 traslación, el conjunto de ellos permite al robot realizar movimientos para su función. La distribución de los grados de libertad se muestra en la figura 9.

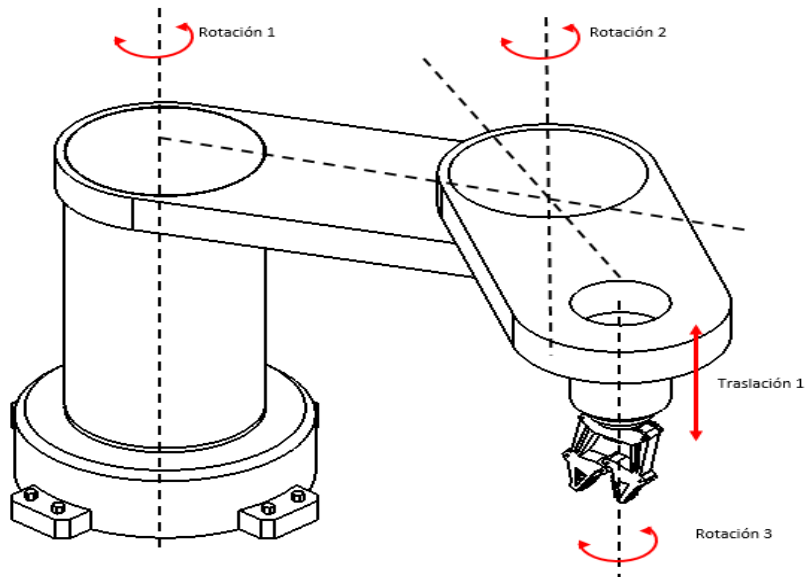


Fig. 9. Grados de libertad para el robot tipo SCARA. Fuente: propia.

3.3 Cinemática de robot SCARA

El análisis cinemático permite la obtención de información acerca de donde se encuentra ubicado cada elemento del sistema mecánico del robot. El análisis cinemático comprende dos enfoques. El enfoque cinemático directo y el cinemático inverso.

- La cinemática directa es la que determina la posición y orientación del efector final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas.
- La cinemática inversa es la que determina la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del efector final conocidas.

3.3.1 Parámetros de Denavit-Hartenberg.

En el año de 1955 Denavit y Hartenberg introdujeron la cinemática directa con el propósito de estandarizar la ubicación de los sistemas de referencia de los eslabones de un robot. La metodología o convención de Denavit-Hartenberg (DH), permite establecer la ubicación de los sistemas de referencia de los eslabones en los sistemas robóticos articulados.

3.3.1.1 Algoritmo para obtener parámetros DH.

Los pasos del algoritmo para la obtención de los parámetros Denavit-Hartenberg se enuncian a continuación:

1. Numerar los eslabones: Primero se identifican los eslabones (nombramos el eslabón 0 al eslabón de la base, que es estático y así sucesivamente hasta el eslabón n).
2. Numerar las articulaciones: Se identifican las articulaciones, es decir, los puntos de movimiento del brazo robótico. La articulación 1 será el primer grado de libertad y n será el último.
3. Localizar el eje de cada articulación: se colocan los ejes Z. el eje Z_0 va sobre la articulación 1, el Z_1 va sobre la articulación 2 y así sucesivamente.
 - a. Los ejes Z deben ser el eje de rotación de cada articulación.
 - b. El sistema de coordenadas 0 se sitúa en el punto origen en cualquier punto a lo largo de Z_0 . La orientación de X_0 y Y_0 puede ser arbitraria, siempre y cuando se respete que XYZ sea un sistema dextrógiro.
4. Para el resto de sistemas se debe colocar en el punto origen en la intersección con el eje Z del sistema anterior y el actual, es decir la normal común entre Z_i y Z_{i-1} . En caso de cortarse los dos ejes Z, colocarlo en ese punto de corte. En caso de ser paralelos, colocarlos en algún punto de la articulación $i+1$.
 - a. Ejes X: cada X_i va en la dirección de la normal común a Z_{i-1} y Z_i en la dirección de Z_{i-1} hacia Z_i .
 - b. Ejes y: una vez situados los ejes Z y X, los Y tienen sus direcciones determinadas por la restricción de formar un sistema XYZ dextrógiro.
 - c. Sistema externo del robot: el sistema XYZ se coloca en el efector final, con su eje Z paralelo a Z_{n-1} y X e Y en cualquier dirección válida.
5. Angulos Theta (θ): theta es el ángulo que cada eje X gira alrededor del eje Z en cada sistema de referencia de una articulación.
6. Distancias d: Cada d_i es la distancia desde el sistema XYZ de la articulación anterior hasta la intersección de las normales común de los ejes Z_i y se mide a desde el punto de intersección de la articulación anterior hasta la actual.
7. Distancias (a): Cada a_i es la longitud de espesor entre la unión de los extremos de inicio y fin entre las articulaciones.

8. Ángulos alfa (α): Es el ángulo que hay que rotar el Z_{i-1} , es decir, del sistema de referencia anterior, para que se alinee con el eje Z_i del sistema actual.
9. Definir la matriz de transformación: Por cada articulación se define la matriz que se muestra a continuación.

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

De acuerdo con la representación de Denavit-Hartenberg, el establecimiento de los sistemas de coordenadas del robot se ilustra en la Figura 10.

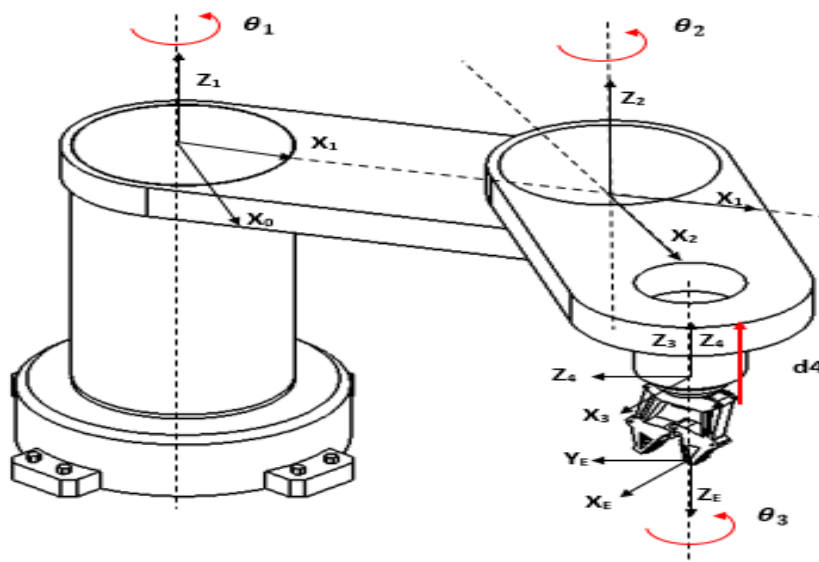


Fig. 10. Parámetros de Denavit-Hartenberg para el robot. Fuente: propia.

3.3.2 Análisis Cinemático Directo.

Para realizar el estudio de la cinemática directa se utiliza el álgebra vectorial y matricial, puesto que estas herramientas nos permiten desarrollar un método general y sistemático para la descripción y representación de la localización de los elementos del robot con respecto a un sistema de referencia.

Como los elementos del robot giran en torno a un sistema de coordenadas, se debe establecer un sistema de coordenadas ligado al cuerpo a lo largo de la articulación para el elemento final del manipulador. Dicho esto, el problema cinemático directo se reduce a encontrar una matriz de transformación que relacione el sistema de coordenadas ligadas al cuerpo con el sistema de coordenadas de referencia.

3.3.2.1 Transformación de Coordenadas

La matriz de transformación homogénea se compone de cuatro submatrices que se muestran a continuación.

$$T = \left[\begin{array}{c|c} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ \hline f_{1 \times 3} & w_{1 \times 1} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} \text{Matriz de rotación} & \text{Vector de posición} \\ \hline \text{Transformación de perspectiva} & \text{escalado} \end{array} \right]$$

La submatriz $R_{3 \times 3}$ representa la matriz de rotación; la submatriz $P_{3 \times 1}$ representa al vector de posición del origen del sistema de coordenadas con respecto al sistema de referencia; la submatriz $f_{1 \times 3}$ representa la transformación de perspectiva, y el cuarto elemento diagonal w representa el factor de escala global.

El vector de posición $P_{3 \times 1}$ de la matriz de transformación homogénea tiene el efecto de trasladar al sistema de coordenadas 1 (uno) que tiene ejes paralelos al sistema de referencia 0 (cero), pero cuyo origen se encuentra a una distancia $\sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$ del sistema de coordenadas de referencia.

La matriz de transformación homogénea 4X4 transforma a un vector que esta expresado en coordenadas homogéneas con respecto al sistema de coordenadas 1 en el sistema de coordenadas de referencia 0. Esto es, con $w = 1$, nos queda la ecuación siguiente:

$$P_0 = T_0^1 P_1$$

3.3.2.2 Coordenadas generalizadas.

Las coordenadas generalizadas son las que describen completamente la localización (posición y orientación) de un sistema físico con respecto a un sistema de

coordenadas de referencia. Dichas coordenadas se denotan con q y se representan en un espacio R .

Así que para un sistema con n grados de libertad existe un vector $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ mediante el cual es posible definir el sistema.

Los parámetros D-H se basan en las características geométricas de cada enlace y los sistemas de coordenadas en cada uno.

Las características de los parámetros D-H son:

- θ_i = rotación alrededor del eje Z_{i-1} .
- d_i = traslación a lo largo del eje Z_{i-1} .
- α_i = rotación a lo largo del eje X_i .
- A_i = traslación alrededor del eje X_i .

Los sistemas de coordenadas se deben colocar como se ilustra en la figura 11, para cumplir con las características de los parámetros (anteriormente mencionadas).

En la tabla 4 se muestran los parámetros de D-H para nuestro robot.

Tabla 4. Parámetros D-H para el robot SCARA.

Articulación.	θ	d	A	α
1	90°	50 cm	0 cm	90°
2	90°	30 cm	0 cm	60°
3	45°	30 cm	0 cm	30°
4	0°	10 cm	0 cm	0°

3.3.2.3 Matriz de transformación D-H

Se observa que un punto P del vector de posición $P_{3 \times 1}$ expresado en el sistema de coordenadas i -ésimo se puede expresar en el sistema de coordenadas $i-1$ -ésimo como p , realizando las siguientes transformaciones sucesivas.

- Girar con respecto al eje Z_{i-1} un ángulo de θ_i para alinear el eje x_{i-1} de tal forma que el eje x_{i-1} sea paralelo a x_i y que apunte a la misma dirección.

- Trasladar a lo largo del eje Z_{i-1} una distancia de d_i , para llevar en coincidencia los ejes x_{i-1} y x_i .
- Trasladar a lo largo del eje x_i una distancia de a_i , para traer en coincidencia a los dos orígenes de los ejes x_i .
- Girar con respecto al eje x_i , un ángulo de α_i , para tener en coincidencia a los sistemas de coordenadas.

Cada una de las operaciones anteriores se expresa en una matriz de rotación-traslación homogénea básica. El producto de estas matrices da como resultado una matriz de transformación homogénea compuesta A_{i-1}^i conocida como la Matriz de transformación Denavit-Hartenberg (D-H) para sistemas de coordenadas adyacentes i e $i-1$ de la forma:

$$A_{i-1}^i = Rot_{z_{i-1},m} \cdot Tras_{z_{i-1},m} \cdot Tras_{M,m} \cdot Rot_{M,m} =$$

$$\begin{bmatrix} c_{\theta_i} & s_{\theta_i} & 0 & 0 \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\alpha} & -s_{\alpha} & 0 \\ 0 & s_{\alpha} & c_{\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$c_{\theta_i} = \cos\theta_i \quad s_{\theta_i} = \sin\theta_i \quad c_{\alpha_i} = \cos\alpha_i \quad s_{\alpha_i} = \sin\alpha_i$$

Utilizado la matriz A_{i-1}^i se puede relacionar un punto (p) en reposo en el eslabón i y ser expresado en coordenadas homogéneas con respecto al sistema de coordenadas i en el sistema $i-1$ establecido en el elemento $i-1$ por:

$$P_{i-1} = A_{i-1}^i P_i$$

Donde

$$P_{i-1} = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}, 1)^r \quad \text{y} \quad P = (x_i, y_i, z_i, 1) =, 1$$

3.3.3 Análisis cinemático Inverso

La cinemática inversa es la encargada de encontrar las variables de la articulación θ_i en articulaciones de revolución o d_i en articulaciones prismáticas, en términos de posición y orientación del efector final.

Las ecuaciones cinemáticas del robot SCARA definen los vectores de posición y orientación del efector final en términos de los parámetros estructurales cinemáticos y las variables de la articulación, la posición y orientación del efector final en el sistema de coordenadas de la base puede ser determinado mediante la cinemática directa.

Dada la orientación y posición del efector final del manipulador robótico de n grados de libertad, además de sus parámetros estructurales cinemáticos, se debe encontrar el vector de variables de la articulación $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$ de manera que el efector final pueda posicionarse como se desea.

Para este análisis existen diferentes métodos para encontrar a q . Entre los que más se conocen son:

- Matrices de transformación de coordenadas.
- Método geométrico.
- Cuaterniones.

El método geométrico resulta ser el más fácil de utilizar en el robot SCARA.

3.4 Obtención de las ecuaciones cinemáticas del robot.

3.4.1 Sistema de Coordenadas.

Con respecto a la representación de Denavit-Hartenberg, el establecimiento del sistema de coordenadas del robot SCARA se muestra en la figura 11.

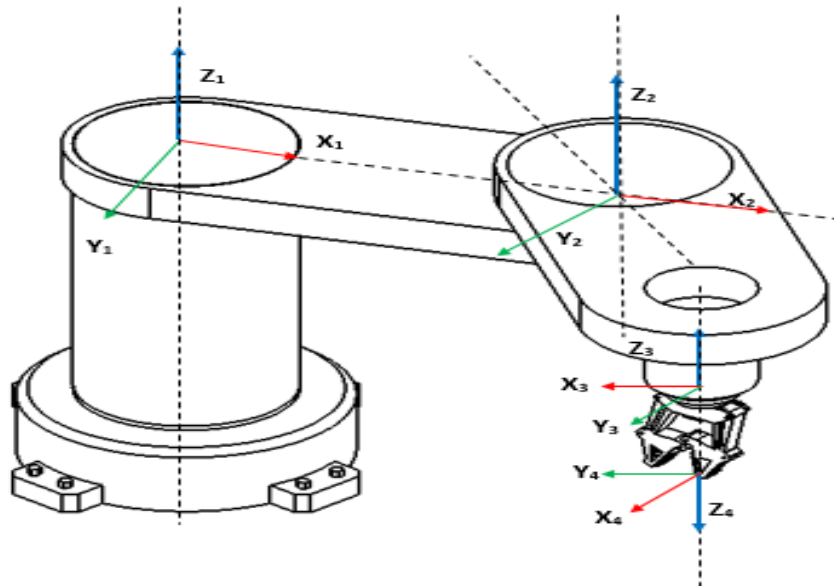


Fig. 11. Representación de Denavit-Hartenberg para el robot SCARA. Fuente: propia.

3.4.2 Parámetros estructurales.

Los parámetros del robot SCARA se observan en la Fig. n. Estos parámetros obedecen a los criterios antes mostrados.

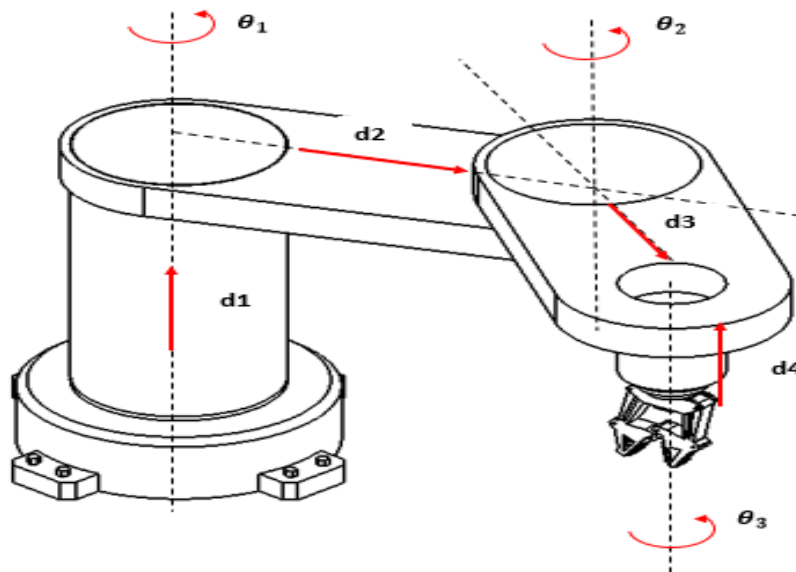


Fig 12. Parámetros estructurales del robot SCARA. Fuente: propia.

3.5 Ecuaciones Cinemáticas Directas para el robot SCARA.

Tomando en cuenta que las articulaciones 1, 2 y 4 del robot son de revolución y la 3 es prismática. Las matrices D-H quedarán de la forma siguiente:

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & a_1c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & a_1s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_1^2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_2c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^4 = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & a_4c_4 \\ s_4 & c_4 & 0 & a_4s_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

De esta forma la matriz de transformación desde la base hasta el elemento final es:

$$T_0^4 = \begin{bmatrix} R_0^4 & d_0^4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = A_0^1 A_1^2 A_2^3 A_3^4 = \begin{bmatrix} c_{12}c_4 + s_{12}s_4 & -c_{12}c_4 + s_{12}s_4 & 0 & a_1c_1 + a_2c_{12} \\ s_{12}c_4 - c_{12}s_4 & s_{12}s_4 - c_{12}c_4 & 0 & a_1s_1 + a_2s_{12} \\ 0 & 0 & -1 & d_3 - d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$c_1 = \cos \theta_1, c_2 = \cos \theta_2, c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2), \\ s_1 = \sin \theta_1, s_2 = \sin \theta_2, s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

Mediante estas ecuaciones se puede conocer en todo momento la posición del efector final, respecto a las posiciones de cada una de las articulaciones.

3.6 Ecuaciones Cinemáticas Inversas del robot SCARA.

El método geométrico es el más simple y natural para encontrar las variables q_1, q_2, q_3 . Al proyectar la configuración del robot sobre un plano x, y , se puede deducir que:

$$\cos \theta_2 = \frac{d_x^2 + d_y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2} = r$$

Al recurrir a la identidad trigonométrica $\cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_2 = 1$, se puede comprobar que

$$\sin \theta_2 = \pm \sqrt{1 - r^2}$$

Entonces:

$$\theta_2 = \text{Atan}(\pm \sqrt{1 - r^2}, r)$$

Observamos que la ecuación anterior tiene dos soluciones posibles dependiendo del signo del radical.

Ahora para q_1 se tiene que

$$\theta_1 = \text{Atan}(d_y, d_x) - \text{Atan}(a_2 s_2, a_1 + a_2 c_2)$$

La solución del problema cinemático inverso para el robot SCARA está dado por las ecuaciones anteriores de la forma:

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Atan}(d_y, d_x) - \text{Atan}(a_2 s_2, a_1 + a_2 c_2) \\ \text{Atan}(\pm \sqrt{1 - r^2}, r) \\ d_b - (d_4 + d_H + d_z) \\ -\text{Atan}(n_y, n_x) \end{bmatrix}$$

Donde:

$$r = \frac{d_x^2 + d_y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2}$$

3.7 Piezas mecánicas

En la figura 13 se muestran las medidas obtenidas para la base del robot, dicha base cuenta con 8 tornillo de seguridad como se observa en la figura.

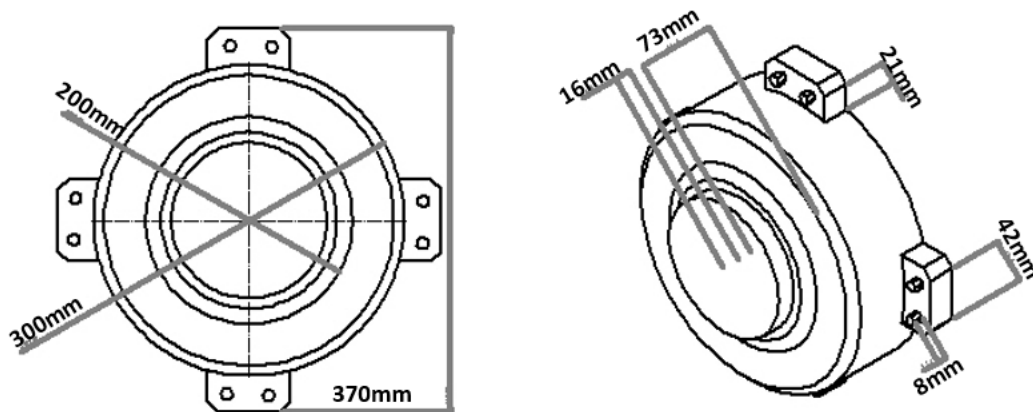


Fig. 13. Medidas para la base del robot. Fuente: propia.

El eslabón 0 cuenta con una extrusión en su base para ser acoplado a la base del robot como se muestra en la figura 14.

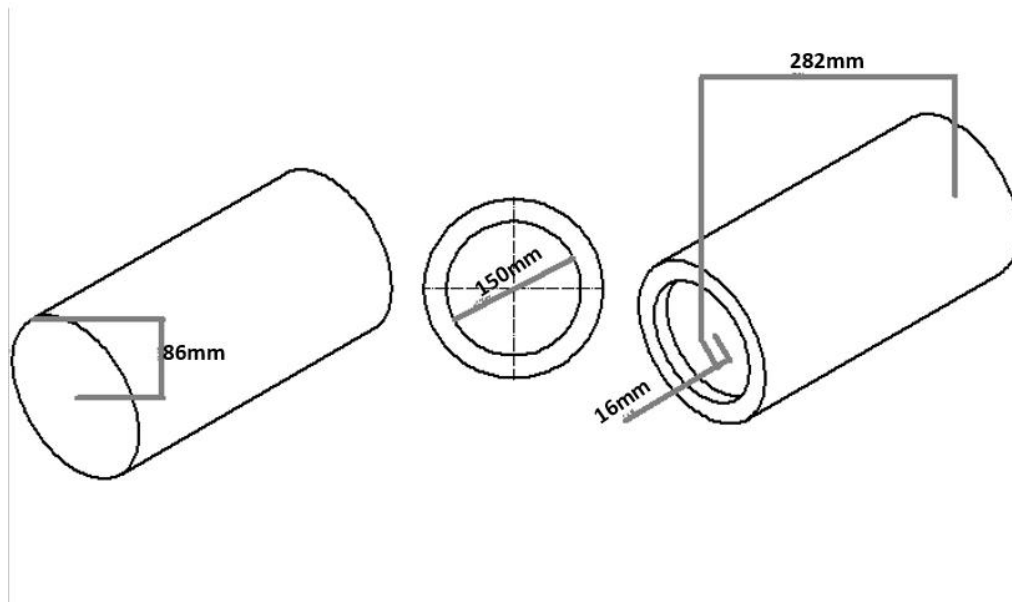


Fig. 14. Medidas del eslabón 0 del robot. Fuente: propia.

El eslabon 1 cuenta con dos extrusiones, en la primera se acopla el eslabon 0 y en la segunda un barreno que sostenga al eslabon 2. Las medidas del eslabon 1 se muestran en la figura 15.

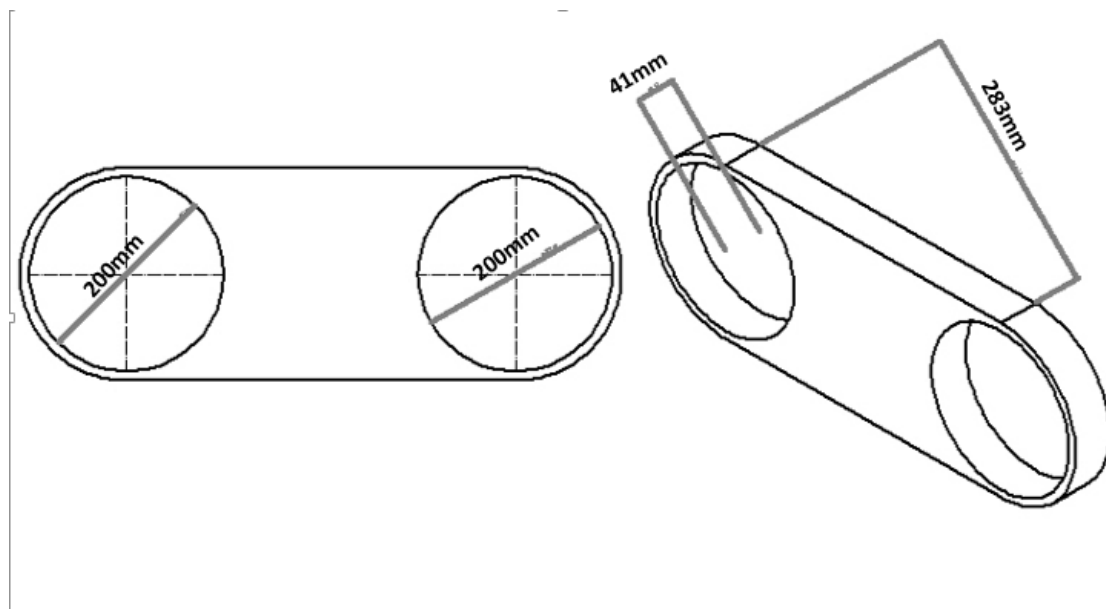


Fig. 15. Medidas del eslabón 1 del robot. Fuente: propia.

El barreno1 del robot tiene como función sostener el eslabón 1 y 2 del robot. Sus medidas se muestran en la figura 16.

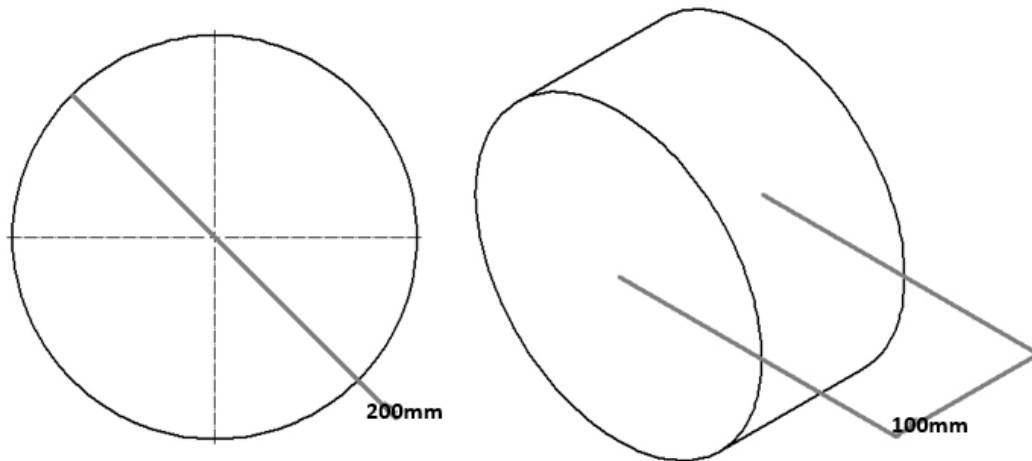


Fig. 16. Medidas para el barreno 1 del robot. Fuente: propia.

El eslabón 2 tiene cuenta con dos extrusiones, en la primera se acopla el barreno 1 y en la segunda se acopla el barreno 2 que sostiene al gripper del robot. Las medidas del eslabón 2 se muestran en la figura 17.

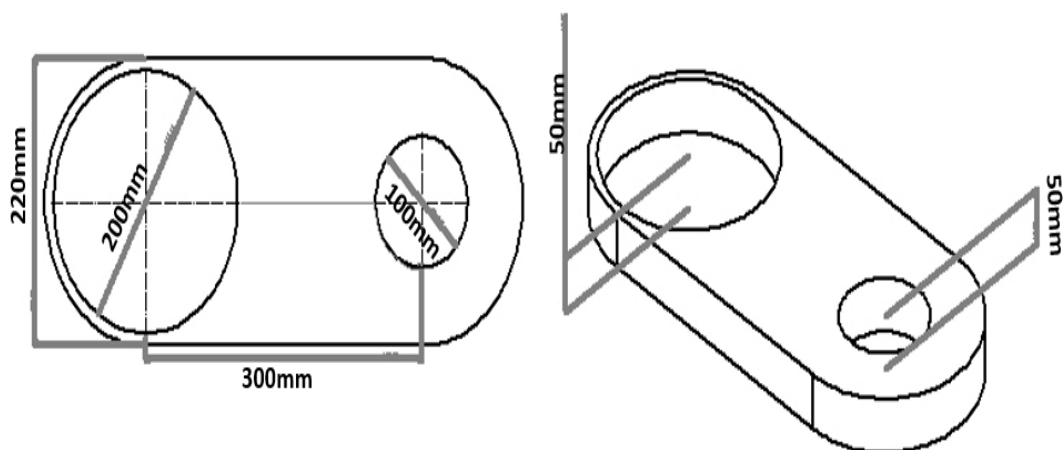


Fig. 17. Medidas para el eslabón 2 del robot. Fuente: propia.

El barreno 2 del robot cuenta con una extrusión en su base para poder acoplar la base del gripper en el. Las medidas del barreno 2 se muestran en la figura 18.

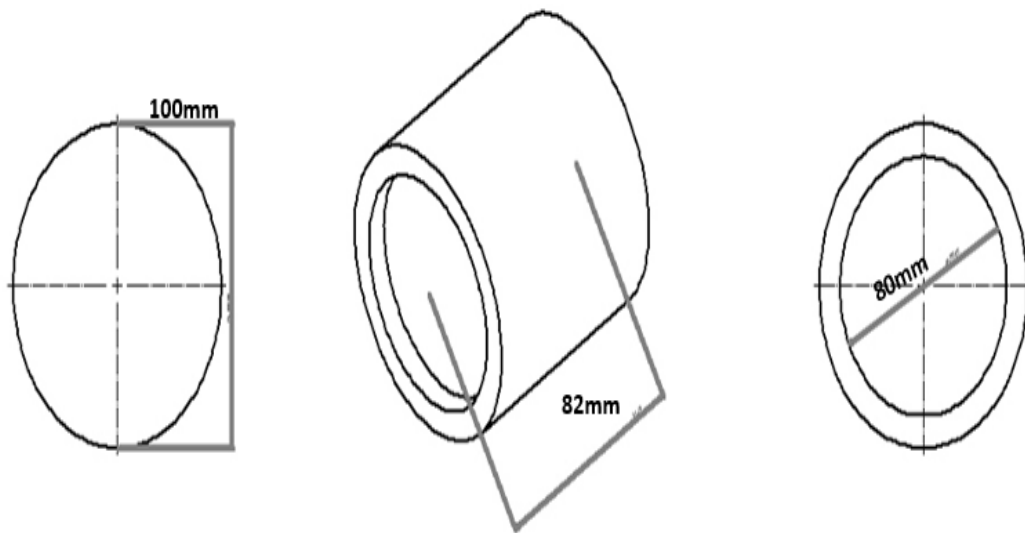


Fig. 18. Medidas para el barreno 2 del robot. Fuente: propia.

La base del gripper cuenta con una extrusión saliente en la parte superior para poder acoplarse con el barreno 2. Las medidas de la base del gripper se muestran en la figura 19.

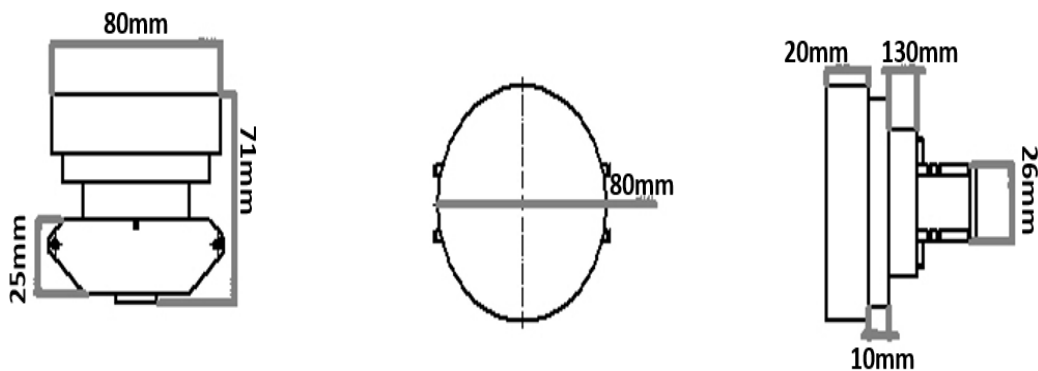


Fig. 19. Medidas para la base del gripper. Fuente: propia.

La pinza o gripper del robot cuenta con dos extrusiones en donde se acoplan dos barrenos para poder sostenerse a su base. Las medidas del gripper se observan en la figura 20.

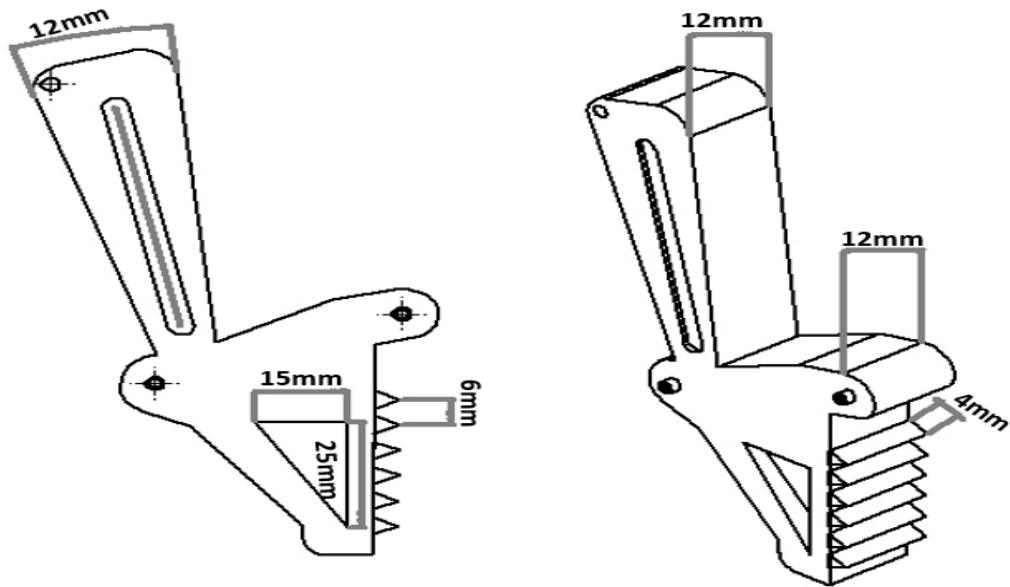


Fig. 20. Medidas para el gripper del robot. Fuente: propia.

El barreno del gripper tiene la función de unir el gripper con su base. Las medidas se encuentran indicadas en la figura 21.

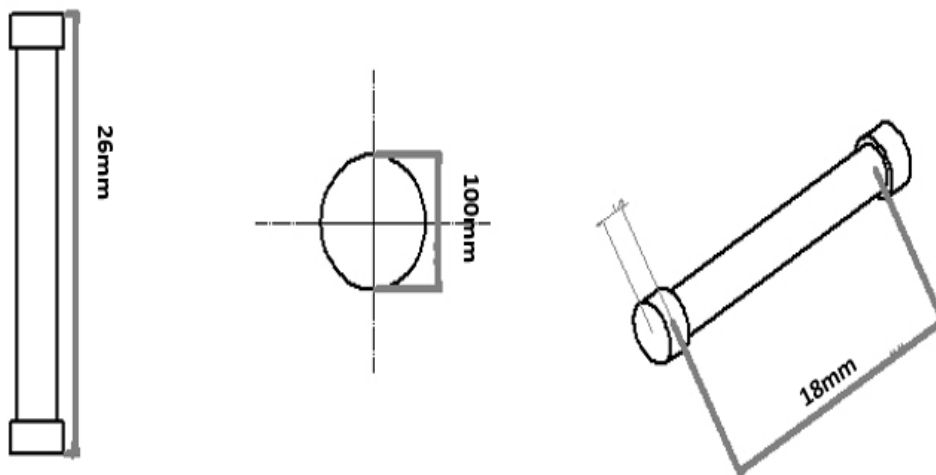


Fig. 21. Medidas del barreno para el gripper. Fuente: propia.

3.8 Electrónica

El diseño del hardware requerido para brindar los movimientos al robot son 4 servomotores, un sistema empotrado y una fuente de alimentación.

El servomotor que se decidió utilizar para los movimientos del robot es el Servomotor TowerPro MG995 por las características que ofrece:

- Voltaje de operación de 4.8 v a 6.6 v.
- Velocidad de operación: 0.20s/ 60° (4.8 v), 0.16s/60° (6.6 v).
- Torque detenido: 9.4 kgf x cm (4.8 v), 11kgf x cm (6.6 v).
- Ángulo de rotación de 180° aproximadamente.
- Dimensiones: 40.7mm de largo, 19.7 mm de ancho y 42.9 de altura aproximadamente.
- Un cable de 32 cm aproximadamente.

El diagrama del servomotor se muestra en la figura 22.

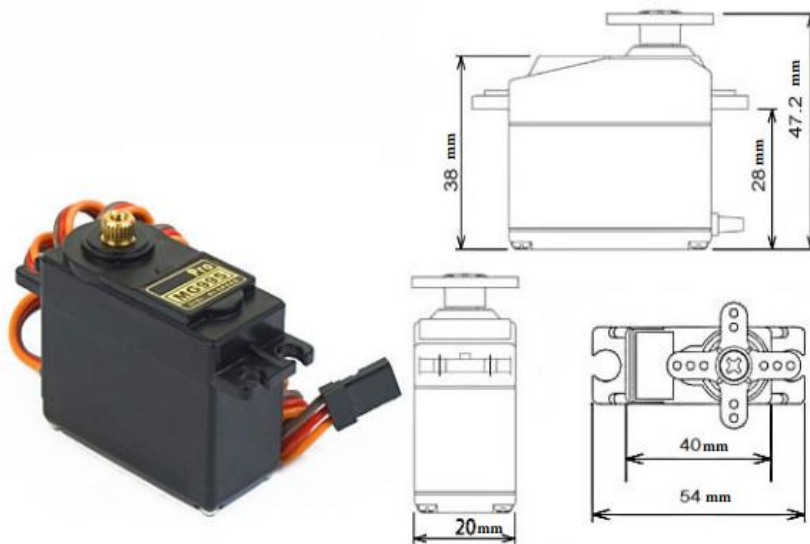


Fig. 22. Diagrama de Servomotor MG995. Fuente: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132435/ETC2/MG995.html>

El sistema empotrado que se decidió utilizar es el PIC16f887 es debido a las características que presenta, las cuales son:

- Voltaje de la fuente de alimentación desde 2.0 v a 5.5 v.
- Una frecuencia de operación de 0-20 MHz.
- 35 pines de Entrada / Salida.
- Memoria ROM de 8K FLASH.
- 256 bytes de memoria EEPROM.
- 368 bytes de memoria RAM
- Módulo PWM incorporado.

Diagrama del microcontrolador mostrado en la figura 23.

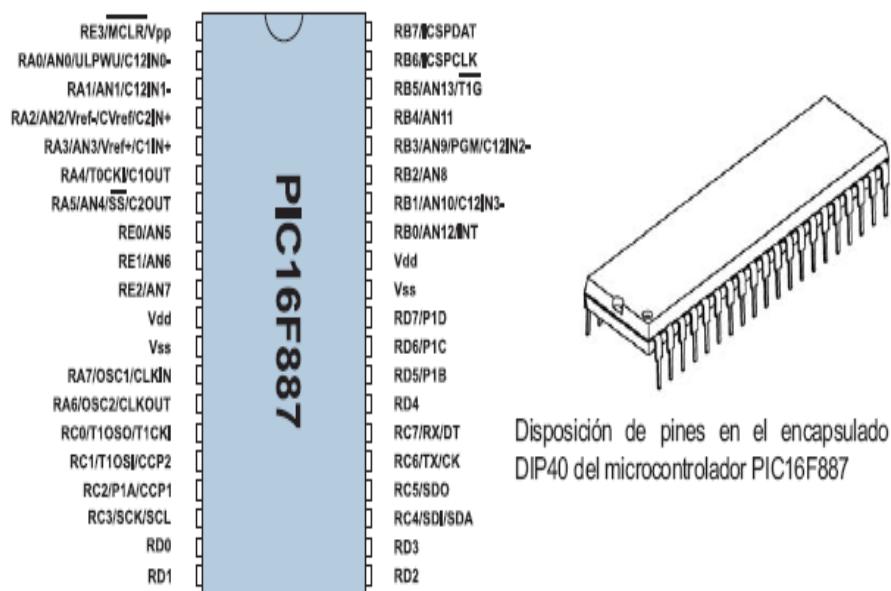


Fig. 23. Disposición de pines del PIC16F887. Fuente:

<https://www.mikroe.com/ebooks/microcontroladores-pic-programacion-en-basic/caracteristicas-basicas-pic16f887>

Como sistema de protección, para el manejo de servomotores simultáneos se decidió utilizar el Módulo Controlador de servos PCA9685 (figura 24) que cuenta con las siguientes características:

- Voltaje de operación de 5 v.
- Interfaz: I2C.
- Cuenta con bornera de conexión para voltaje de alimentación.
- Diseño de conector I2C para utilizar varios módulos con el mismo BUS.
- Frecuencia de PWM hasta de 1.6 KHz.
- Salida de 12 bits de resolución, dando una resolución de 4bits para una frecuencia de 60Hz.
- Salidas configurables como Push-Pull u Open-Drain.
- Opción de activar/desactivar todas las salidas mediante el pin ENABLE.

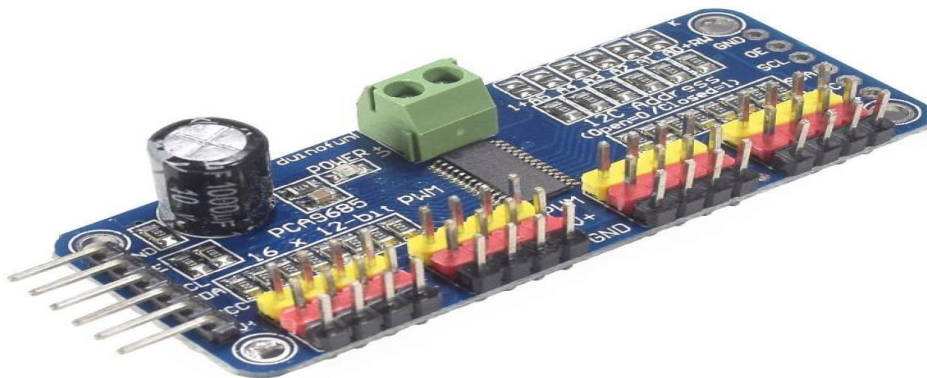


Fig. 24. Vista isométrica del Módulo Controlador de servos PCA9685

Como fuente de alimentación se utilizó una Batería LiPo 1000mah 7.4v 2s 30c Turnigy (figura 25) por sus características:

- Capacidad mínima de 1000 mA.
- 2s1P/ 7.4 v/ 2C.
- Descarga constante de 30C.
- Descarga máxima (10 seg) de 40C.
- Peso 70 g.

- Carga del enchufe: JST-XH.
- Tapón de descargar: XT60.



Fig. 25. Batería tipo LiPo.

3.9 Máquina de estados

La lógica de funcionamiento se basa en una máquina de estados finitos que permitirá generar diferentes secuencias de movimiento. A continuación se muestra un ejemplo con la máquina de estados en la figura 26

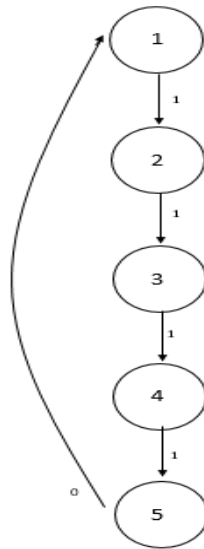


Fig. 26. Máquina de estados. Fuente: propia.

La máquina inicia en el estado 1 correspondiente al estado de reposo, el estado 2 corresponde a un giro derecho, después el estado 3 corresponde a un giro izquierdo, el estado 4 corresponde a un levantamiento del gripper y por último el estado 5 corresponde a una baja del gripper. Para que se lleve a cabo la transición de un estado a otro se requiere la existencia de una señal, representada por el número 1 en la máquina de estados. En caso de no existir la señal se representa con el número 0.

Capítulo CUATRO.

Capítulo 4. Resultados

Basándose en el modelo de Liyanage y Krouglicof quienes proponen un brazo robótico tipo SCARA con dos articulaciones revolativas para deshuesar aves de corral, el modelo de un SCARA de 4 gdl de Checa y Luna; y por ultimo del modelo de Martínez y Sandoval quienes presentan la construcción de un robot manipulador, se diseñó un robot manipulador tipo SCARA enfocado a las tareas de sanitización de cuartos de baño. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

4.1 Diseño mediante software.

4.1.1 Diseño estructural

Como resultado del diseño del robot SCARA se muestra la vista isométrica (véase fig. 27) del diseño en SolidWorks. La vista isométrica cuenta con la particularidad de que los tres ejes de proyección forman el mismo ángulo. Dentro de la vista isométrica los ejes de coordenadas XYZ están separados formando ángulos de 120° .

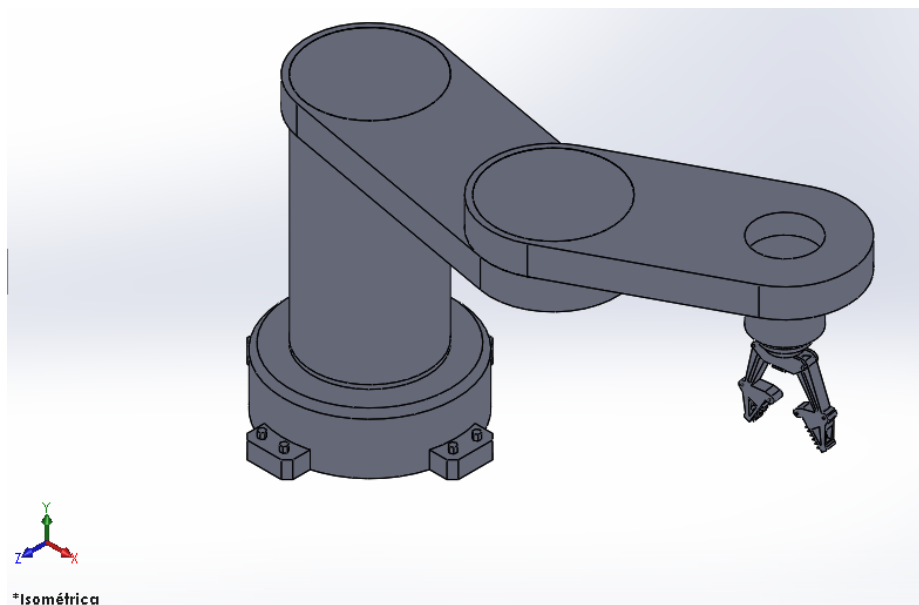


Fig. 27. Vista Isométrica del robot SCARA. Fuente: propia.

La vista Trimétrica del robot es una proyección axonométrica (medición a lo largo de ejes) que sirve para representar volúmenes, en la cual el robot se encuentra

inclinado con respecto al plano del cuadro de forma que sus tres ejes principales experimentan reducciones diferentes (Véase fig. 28).

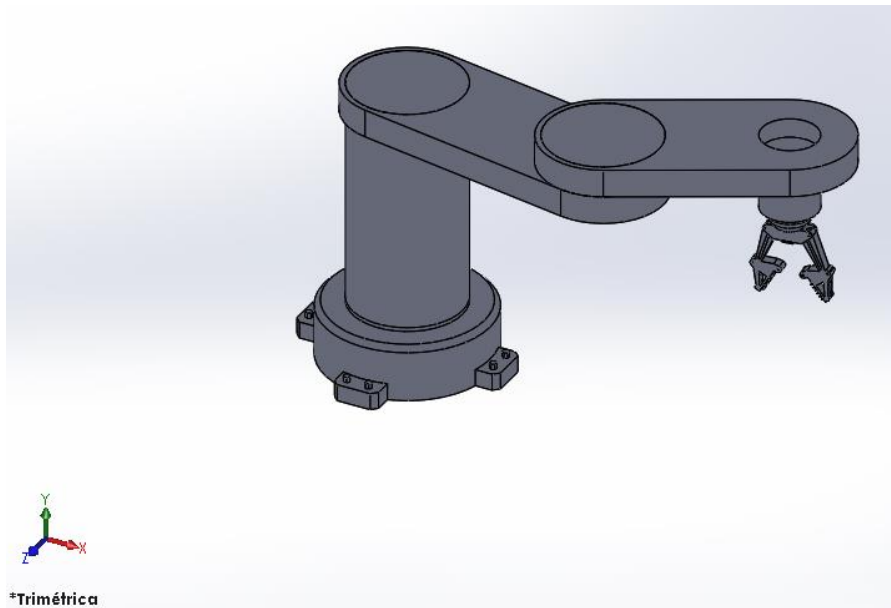


Fig. 28. Vista Trimétrica del robot SCARA. Fuente: propia.

La vista dimétrica se obtiene cuando dos de los tres ángulos que forman los ejes axonométricos son iguales, lo que permite tener una perspectiva del volumen del robot (véase fig. 29)

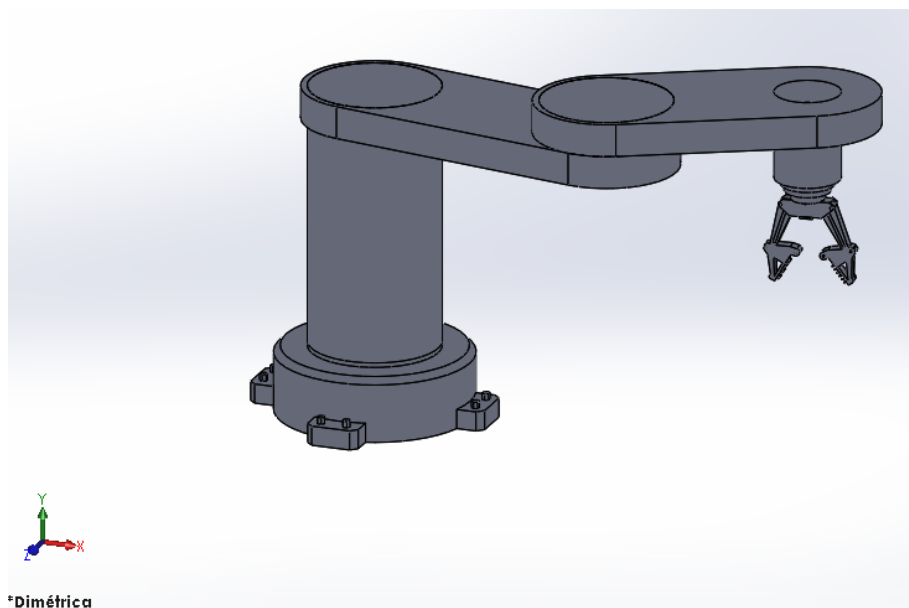


Fig. 29. Vista dimétrica del robot SCARA. Fuente: propia.

4.2 Electrónico

En el microcontrolador PIC16f887 se ha programado la máquina de estados del apartado 3.10 del capítulo 3 donde se encuentra una secuencia de funcionamiento para cada motor. Las secuencias son enviadas mediante bits al driver, el cual enviará la posición deseada a cada uno de los servomotores, lo que permitirá el movimiento deseado del robot. El diagrama a bloques que se ha diseñado para la interconexión de los dispositivos electrónicos es ilustrado en la figura 30.

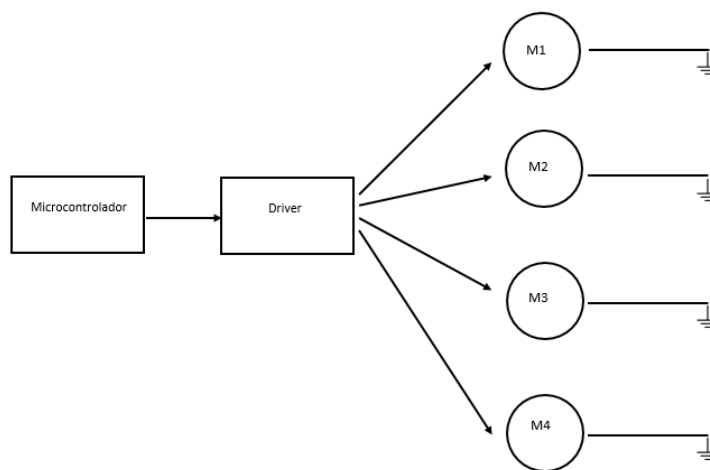


Fig. 30. Diagrama de bloques para el robot SCARA. Fuente: propia.

La implementación en software del diagrama a bloques que se mostró en la figura 30, se presenta en el diagrama electrónico de la figura 31.

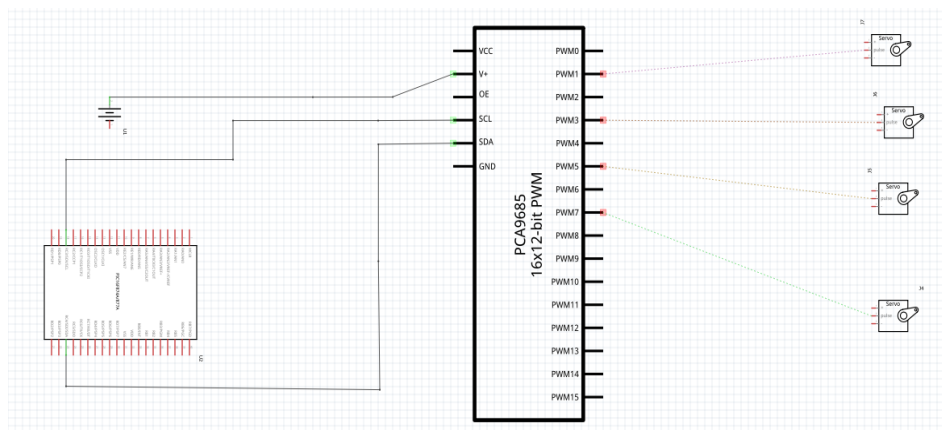


Fig. 31. Diagrama esquemático del robot. Fuente: propia.

4.3 Lógico

A continuación se muestra un ejemplo con la máquina de estados en la figura 32.

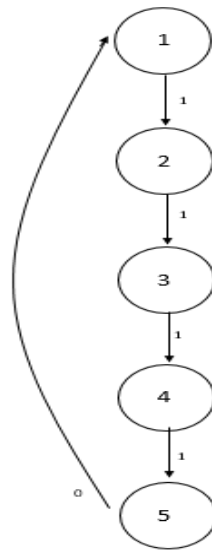


Fig. 32. Máquina de estados. Fuente: propia.

La máquina inicia en el estado 1 correspondiente al estado de reposo, el estado 2 corresponde a un giro derecho, después el estado 3 corresponde a un giro izquierdo, el estado 4 corresponde a un levantamiento del gripper y por último el estado 5 corresponde a una baja del gripper. Para que se lleve a cabo la transición de un estado a otro se requiere la existencia de una señal, representada por el número 1 en la máquina de estados. En caso de no existir la señal se representa con el número 0.

4.4 Cinemático.

Dentro de la tabla 5 se resumen los movimientos que se realizaron con el robot. En robótica se le conoce como tabla de parámetros Denavit-Hartenberg, para ello se debe recalcar que la secuencia de los movimientos primero se realiza en Z y luego en X.

Articulación	θ	d	a	α
1	90°	50cm	0cm	90°
2	90°	30cm	0cm	60°
3	45°	30cm	0cm	30°
4	0°	10cm	0cm	0°

Tabla 5 Parámetros DH para el robot SCARA

4.4.1 Cinemática Directa

Los resultados de la cinemática directa son los obtenidos al utilizar el método Denavit-Hartenberg para la obtención de la matriz de transformación homogénea que describe los movimientos desde la base del robot hasta el efector final.

Las matrices de transformación de coordenadas para el robot SCARA se presentan a continuación, nótese que cada fila de la tabla D-H (véase tabla 5) nos produce una matriz de transformación de coordenadas, si la tabla tiene 4 filas esto implica 4 grados de libertad, entonces tenemos 4 matrices de coordenadas.

Tomando en cuenta que las articulaciones 1,2 y 3 son de revolución y la 4 prismática. Las matrices D-H serán las siguientes:

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} \cos(90) & -\sin(90) & 0 & 0 \times \cos(90) \\ \sin(90) & \cos(90) & 0 & 0 \times \sin(90) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_1^2 = \begin{bmatrix} \cos(90) & -\sin(90) & 0 & 0 \times \cos(90) \\ \sin(90) & \cos(90) & 0 & 0 \times \sin(90) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2^3 = \begin{bmatrix} \cos(45) & -\sin(45) & 0 & 0 \times \cos(45) \\ \sin(45) & \cos(45) & 0 & 0 \times \sin(45) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

```

A10=
  -0.4481  -0.8940     0     0
   0.8940  -0.4481     0     0
         0         0   1.0000     0
         0         0         0   1.0000

A21=
  -0.4481  -0.8940     0     0
   0.8940  -0.4481     0     0
         0         0   1.0000     0
         0         0         0   1.0000

A32=
   0.5253  -0.8509     0     0
   0.8509   0.5253     0     0
         0         0   1.0000     0
         0         0         0   1.0000

A43=
   1     0     0     0
   0    -1     0     0
   0     0    -1    10
   0     0     0     1

```

Fig. 33. Matrices de transformación obtenidas mediante el software Matlab. Fuente: propia.

De esta forma la matriz de transformación de coordenadas resultante del robot SCARA se obtiene multiplicando todas las matrices de transformación de coordenadas. Obteniendo la matriz de transformación desde la base hasta el elemento final.

$$T_0^4 = \begin{bmatrix} R_0^4 & d_0^4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = A_0^1 A_1^2 A_2^3 A_3^4$$

$$T = \begin{bmatrix} 0.3673 & -0.9301 & 0 & 0 \\ -0.9301 & -0.3673 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1.0000 & 10.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

Fig. 34. Matriz de transformación de coordenadas obtenidas mediante el software Matlab.
Fuente: propia.

4.4.2 Cinemática Inversa.

Como resultados de la cinemática inversa consideramos los resultados obtenidos mediante el método geométrico, este consiste en obtener las variables articulares necesarias para alcanzar una combinación de posición y orientación deseadas del efector final.

La solución del problema cinemático inverso para el robot SCARA por medio del método geométrico está dada por:

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Atan}(d_y, d_x) - \text{Atan}(a_2 s_2, a_1 + a_2 c_2) \\ \text{Atan}(\pm\sqrt{1-r^2}, r) \\ d_b - (d_4 + d_H + d_z) \\ -\text{Atan}(n_y, n_x) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \varphi - \beta \\ p_3 - l_1 \\ d_3 + l_4 \\ -\text{Atan}(\sin \theta_4, \sin \theta_4) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.6747 \\ 5 - 3 \\ 30 + 2 \\ -\text{Atan}(\sin 0, \sin 0) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.6747 \\ 2 \\ 32 \\ 0 \end{bmatrix}$$

4.5 Conclusiones y trabajo futuro.

El objetivo general de la tesis fue diseñar un robot manipulador robótico tipo SCARA enfocado a las tareas de sanitización de cuartos de baño. Dicho objetivo fue logrado gracias al cumplimiento en tiempo y forma de los objetivos específicos planteados.

- Diseño del manipulador mediante software: las piezas del robot SCARA diseñado se realizaron en el software SolidWorks, el cual posee las características necesarias para el diseño, ensamble, simulación e impresión de las piezas del robot. Este diseño cumplió con los requisitos planteados en la cinemática directa e inversa.
- Diseño electrónico: se comprobó que el diseño de la máquina de estados permite manipular los movimientos de robot los cuales dependen del tipo de hardware, material y el tiempo de uso.
- El procesamiento de datos numéricos se realizó mediante la herramienta matemática Matlab, que dio como resultado los valores de las posiciones en el plano XYZ.
- El algoritmo de Denavit-Hartenberg permitió la obtención del modelo cinemático directo, ya que define los puntos cartesianos de ubicación del efector final. Además es una forma simplificada de obtener las matrices de transformación homogénea que describen los movimientos de cada articulación del robot para la ubicación del efector final.

Como trabajo futuro se propone continuar desarrollando las diversas líneas de investigación como: la caracterización mecánica del modelo (esfuerzos y deformaciones), la implementación física del diseño electrónico para corroborar la funcionalidad del sistema de movimientos con respecto al tiempo. Así como desarrollar un sistema que brinde movilidad a este brazo robótico para que en conjunto pueda aplicarse la sanitización de cuartos de baño.

Referencias

- [1] P. Bora y N. Vishwajit, «Low Cost Shadow Function based Articulated Robotic Arm,» *IEE*, 2015.
- [2] M. Shariatee, A. Akbarzadeh, A. Moussavi y S. Alimardani, «Desing a Economical SCARA Robot for Insdustrial Applications,» *IEEE*, pp. 534-539, 2014.
- [3] M. Nkomo, «A Color-Sorting SCARA Robotic ARM,» *IEEE*, pp. 763-768, 2012.
- [4] M. Liyanage, N. Krouglicof y R. Gosine, «Desing and control of high perfomance SCARA type robotic arm with rotary hydraulic actuators,» *IEEE*, pp. 827-832, 2009.
- [5] C. Diego, L. Diana y M. Victor, «Simulador de un Robot SCARA de 4 Grados de LibertadBasado en Realidad Virtual,» *Cuarto Congreso Colombiano de Computación 4CCC*, 2009.
- [6] A. Martínez, G. Martinez, A. Sonia, M. Rivera y O. Jáquez, «Diseño propio y contrucción de un brazo robotico de 5GDL,» *Revista de ingenieria electrica, electronica y computacion*, pp. 7-15, 2008.
- [7] M. Jimenez, P. Gonzalez y P. García, «The evolution of robotics research from industrial to service robots,» *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 14, nº 1, pp. 2-15, 2007.
- [8] J. F. Engelberger, *Robotics in service*, Great Britain: The MIT press, 1989.
- [9] N. Villaseñor, «Ciencia MX,» 2 Junio 2015. [En línea]. Available: <http://www.cienciamx.com/index.php/tecnologia/robotica/1745-los-pasos-de-la-robotica-de-servicio>. [Último acceso: 14 octubre 2019].
- [10] L. A. Cortés, H. Trujillo, A. Sánchez y N. Jiménez, *La Computación en México por especialidades académicas*, Mexico: Academia Mexicana de Computación, A. C., 2017.
- [11] «Guías Practicas.COM,» 27 Febrero 2014. [En línea]. Available: <http://www.guiaspracticass.com/robots-de-limpieza/robot-domestico#:~:text=Caracter%C3%ADsticas%20de%20los%20robots%20dom%C3%A9sticos,%2C%20vigilancia%2C%20ocio%20o%20entretenimiento..> [Último acceso: 18 Octubre 2020].
- [12] S. Rodriguez, «Robots aspiradores,» 16 marzo 2020. [En línea]. Available: <https://robotsaspirador.es/robot-aspirador/>. [Último acceso: 15 Noviembre 2020].
- [13] «World Robotics 2014 Service Robots,» IFR, 2015.
- [14] T. Knasel, «Robotics and Autonomous Systems,» *New applications of robots*, vol. 6, nº 4, pp. 321-322, 1990.
- [15] Sara, «Rivas Robotics,» 7 Junio 2017. [En línea]. Available: <https://rivasrobotics.com/robot-manipulador/#:~:text=Caracter%C3%ADsticas%20del%20robot%20manipulador,ser%C3%A1%20realizar%20una%20determinada%20tarea..> [Último acceso: 18 Noviembre 2020].
- [16] «editudela,» 12 Febrero 2020. [En línea]. Available: <http://www.etitudela.com/profesores/rpm/rpm/downloads/robotica.pdf>. [Último acceso: 25 Noviembre 2020].

- [17] J. A. Velasco, *Tecnologías de la información y de la comunicación.*, España: Ra-Ma, 2004.
- [18] «BrazosRoboticos.net,» 2016. [En línea]. Available: <https://brazosroboticos.net/aviso-legal/>. [Último acceso: 19 Noviembre 2020].
- [19] A. O. Baturone, «Configuración SCARA,» de *ROBÓTICA Manipuladores y robots móviles*, Barcelona, AlfaOmega, 2001, pp. 86-88.
- [20] I. Sanchez, J. Mario y E. Levi, «Elementos de Máquinas,» 12 Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://machinelements.wordpress.com/2017/03/12/robot-scara/>. [Último acceso: 14 Octubre 2020].
- [21] O. Rojas y L. Rojas, «Diseño asistido por computador,» *Industrial Data*, vol. 9, nº 1, pp. 7-15, 2006.
- [22] I. Guillén, *Introducción a los sistemas empotrados*, España: Creative Commons, 2019.
- [23] «Servomotores: control, precisión y velocidad,» *AADECA REVISTA*, vol. 4, pp. 22-23, 2017.
- [24] A. G. González, «Panama Hitek,» 2 Diciembre 2016. [En línea]. Available: <http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-servomotor/>. [Último acceso: 13 Noviembre 2020].
- [25] L. F. Obando, «dademuchconnection,» 26 Abril 2018. [En línea]. Available: <https://dademuch.com/2018/04/26/driver-de-motor-dc-electronica-de-potencia/>. [Último acceso: 8 Octubre 2020].
- [26] «Autycom,» 17 Septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.autycom.com/que-es-variador-de-velocidad-drive/>. [Último acceso: 23 Octubre 2020].
- [27] «iCharger NZ,» [En línea]. Available: <https://www.icharger.co.nz/buying/resources-faq/introduction-to-lipo-batteries/>. [Último acceso: 15 Octubre 2020].