UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE MECATRÓNICA

DISEÑO DE UN ROBOT SCARA PARA EL BANCO MECATRÓNICO DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE - CUENCA

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

AUTORES: BORIS ISRAEL LOJA ILLESCAS
PABLO SANTIAGO MALDONADO NIOLA

TUTOR: ING. IVÁN MARCELO ESCANDÓN DEIDÁN, M.SC.

Cuenca – Ecuador

2025

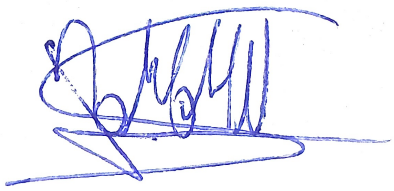
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Boris Israel Loja Illescas con documento de identificación N° 0107309379 y Pablo Santiago Maldonado Niola con documento de identificación N° 0150215614; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 06 de febrero del 2025

Atentamente,



Boris Israel Loja Illescas
0107309379

Pablo Santiago Maldonado Niola
0150215614

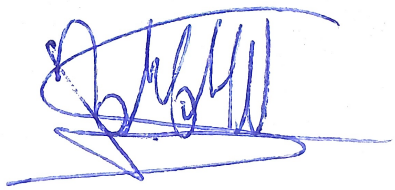
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Boris Israel Loja Illescas con documento de identificación N° 0107309379 y Pablo Santiago Maldonado Niola con documento de identificación N° 0150215614, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores de la Propuesta Tecnológica: "Diseño de un robot scara para el banco mecatrónico de la Universidad Politécnica Salesiana sede - Cuenca", la cual ha sido desarrollada para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 06 de febrero del 2025

Atentamente,



Boris Israel Loja Illescas
0107309379

Pablo Santiago Maldonado Niola
0150215614

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Iván Marcelo Escandón Deidán con documento de identificación N° 0103330999, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: "DISEÑO DE UN ROBOT SCARA PARA EL BANCO MECATRÓNICO DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE - CUENCA", realizado por Boris Israel Loja Illescas con documento de identificación N° 0107309379 y Pablo Santiago Maldonado Niola con documento de identificación N° 0150215614, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Propuestas Tecnológicas que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 06 de febrero del 2025

Atentamente,

Ing. Iván Marcelo Escandón Deidán M.sC.
0103330999

Dedicatoria

Boris Loja

Este trabajo está dedicado a mi madre Clara, por su apoyo incondicional y ser mi fuente de inspiración para seguir mis sueños, por enseñarme los valores y virtudes que me han permitido llegar hasta aquí. Sin ella no habría sido posible nada de lo que he sonseguido en mi vida. A mi padre Pablo, por sus consejos y demostrar que simpre a querido lo mejor para mi futuro, por su apoyo económico y su demostración de responsabilidad para con mis estudios desde el colegio.

A mi abuelo Gonzalo por su apoyo económico durante mi carrera universitaria.

A toda mi familia y amigos, tanto compañeros de clase como externos a todos quien alguna vez me brindaron su apoyo y consejo.

Pablo Maldonado

Quiero dedicar este trabajo a mis padres Pablo y Marcia, por su amor incondicional, su guía y el esfuerzo que han puesto en cada paso de mi formación. Gracias por enseñarme el valor del trabajo, la perseverancia y la honestidad. Sin su apoyo constante y sus sacrificios, este logro no habría sido posible.

A toda mi familia, por estar siempre presente, brindándome ánimo y motivación en los momentos difíciles. Sus palabras de aliento y su confianza en mí han sido un pilar fundamental para seguir adelante.

A mis amigos, por su compañía, su apoyo y por hacer de este proceso un camino más llevadero. Gracias por las risas, las palabras de aliento y por recordarme que siempre hay tiempo para disfrutar en medio del esfuerzo.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento. Esta meta alcanzada también es suya.

Agradecimientos

Boris Loja

Agradezco a Dios y mi madre, es el pilar fundamental de mi vida y de mi familia, enternamente agradecido por brindarme todas las facilidades para continuar mis estudios, por su comprensión, consejos, cariño. Por ser un ejemplo de madre y amiga. Por todos los sacrificios y el duro camino que tuvimos que recorrer para llegar hasta este punto.

Para mi padre, por su apoyo y sus consejos; por su sentido de responsabilidad para conmigo, ha sido un guía en mi vida que ha sabido corregir mi camino cuando me encontraba perdido o desorienteado.

A mi abuelo Gonzalo por su apoyo económico desde el exterior y mi abuelo Ariolfo por su cariño y consejos, por ser mi figura paterna.

Para toda mi familia, especialmente mis hermanos, tías y abuelas.

A todos los amigos y compañeros que hice durante mi paso por la universidad, cada uno de ellos me ha enseñado o ayudado en algún punto de la carrera.

A todos los docentes de la universidad y de manera especial al Ing. Iván Escandon por ser nuestro tutor y ayudarnos a sacar adelante el proyecto con sus aportaciónes.

Pablo Maldonado

En primer lugar, agradezco a Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza a lo largo de este camino. Gracias por darme la salud y la perseverancia para superar cada desafío.

A mis padres Pablo y Marcia, mis más grandes ejemplos de amor, sacrificio y dedicación. Gracias por cada palabra de aliento, por cada gesto de apoyo y por enseñarme con su ejemplo que el esfuerzo y la perseverancia siempre dan frutos. Este logro no es solo mío, es también suyo, porque sin su amor incondicional, nada de esto hubiera sido posible.

A mi familia, que ha estado siempre a mi lado, brindándome su cariño y motivándome en cada paso del camino. Especialmente a mi primo Jason que ha sido un pilar fundamental en todo este proceso y poder cumplir mis metas y adentrarme en el mundo de la ingeniería. A mis amigos, quienes han sido mi compañía en este viaje, compartiendo alegrías, desvelos y momentos de incertidumbre. Gracias por las risas que aliviaron la carga, por su apoyo y por recordarme que la amistad es un refugio en los días más difíciles.

A mis docentes, quienes con su conocimiento, paciencia y dedicación han sido parte

fundamental en mi formación.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Iván Escandón, nuestro tutor, por su guía, apoyo y compromiso durante este proceso. Su orientación ha sido clave para alcanzar esta meta.

Este logro es el reflejo del amor, el apoyo y la fe que han depositado en mí.

Este documento fue realizado enteramente en LaTeX

Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación **I**

Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana **II**

Certificado de dirección del trabajo de titulación **III**

Dedicatoria **IV**

Agradecimientos **V**

Resumen **XIV**

Abstract **XV**

1. Introducción **1**

2. Problema **2**

2.1. Descripción del problema 2
2.2. Antecedentes 2
2.3. Importancia y alcances 3
2.4. Delimitación 3
2.4.1. Espacial o geográfica 3
2.4.2. Temporal 4
2.4.3. Sectorial o institucional 4

3. Objetivos **4**

3.1. Objetivo general 4
3.2. Objetivos Específicos 5

4. Marco Teórico **5**

4.1. Antecedentes 5
4.2. Definición de robot 7
4.3. Definición de Robot Industrial Manipulador 8
4.4. Componentes de un robot 9
4.5. Clasificación de los robots 10

4.5.1. Clasificación atendiendo a la Generación . . . 10
4.5.2. Clasificación atendiendo al Área de Aplicación . . . 11
4.5.3. Clasificación atendiendo al Número de Ejes . . . 13
4.5.4. Clasificación atendiendo a la Configuración . . . 13
4.5.5. Clasificación atendiendo al Tipo de Control . . . 14
4.6. Aplicaciones . . . 15
4.7. Robot SCARA . . . 16
4.7.1. Espacio de trabajo . . . 17
4.7.2. Componentes del robot SCARA . . . 18
4.7.3. Diseños del robot SCARA . . . 19
4.8. Cinemática . . . 23
4.8.1. Cinemática Directa . . . 23
4.8.2. Convención Denavit-Hartenberg . . . 24

5. Marco metodológico **24**
5.1. Análisis de las especificaciónes del Banco Mecatrónico . . . 24
5.1.1. Diseño del Banco Mecatrónico en Autodesk Inventor® . . . 25
5.2. Definición de requerimientos y tareas del Robot SCARA . . . 28
5.2.1. Boceto inicial . . . 29
5.3. Análisis Cinemático del Robot . . . 29
5.3.1. Tabla de Parámetros de Denavit-Hartenberg . . . 31
5.3.2. Matrices de Transformación . . . 32
5.3.3. Matriz de Transformación Total . . . 32
5.3.4. Posición y Orientación del Efector Final . . . 33
5.3.5. Verificación de la Matriz de Posición del Efector Final . . . 33
5.4. Planteamiento del Mecanismo de Tornillo Sin Fin y Tuerca para la Articulación Prismática . . . 34
5.4.1. Cálculo de un Tornillo de Potencia para un Plano Inclinado . . . 37
5.5. Uso de Poleas Dentadas para la Trasmisión de Movimiento en los Eslabones del Robot SCARA . . . 39
5.5.1. Justificación del uso de poleas dentadas . . . 40
5.5.2. Ventajas específicas de las poleas dentadas . . . 42
5.5.3. Dimensionamiento del sistema de transmisión con poleas dentadas . . . 42
5.5.4. Relación de Velocidad y Torque . . . 45
5.6. Modelado 3D del Robot SCARA . . . 46

5.6.1. Modelado del robot en Autodesk Inventor® y SolidWorks® 46
5.6.2. Explosionado del robot 49
5.7. Simulaciones del modelo 51
5.7.1. Exportación de SolidWorks® a MATLAB Simulink® mediante SimMechanics Link 51
5.7.2. Ajuste de ejes de referencia y programación de trayectoria 52
5.7.3. Cinemática directa mediante parámetros de Denavit-Hartenberg . . . 55
5.7.4. Comparación de resultados y cálculo del error 56
5.8. Identificación de componentes electrónicos 58
5.8.1. Identificación de componentes necesarios 58
5.9. Identificación de componentes Mecánicos 64
5.9.1. Selección de materiales de partes a Manufacturar 64
5.9.2. Componentes mecánicos a adquiridos 69
5.9.3. Evaluación de proovedores, costos y selección final de componentes . 70
5.10. Estimación y evaluación de costos totales (materiales y mano de obra) 74

6. Resultados **75**
6.1. Establecimiento de requerimientos físicos, parámetros de diseño y tareas del robot SCARA 75
6.2. Diseño mecánico y análisis cinemático del robot SCARA 76
6.3. Selección de componentes electrónicos y mecánicos 78
6.4. Costos de construcción e implementación del robot SCARA 79

7. Cronograma **81**

8. Presupuesto **83**
8.1. Talento humano 83
8.2. Recursos materiales 83
8.3. Recursos totales 84

9. Conclusiones **85**

10. Recomendaciones **86**

Referencias **89**

ANEXOS **90**

Lista de Tablas

1. Clasificación de los robots de servicio por Áreas de aplicación según IFR . . 12
2. Tipos de Configuraciones de Robots 13
3. Verificación de la posición del efector final con valores específicos de θ_2, θ_3 y d_1 34
4. Comparación de sistemas de transmisión 41
5. Comparación de trayectorias y cálculo de error entre Denavit-Hartenberg y Simulink 57
6. *Comparación de controladores de motores paso a paso* 59
7. *Tabla comparativa de microcontroladores existentes en el mercado* 61
8. Comparativa de fuentes de alimentación recomendadas 62
9. Componentes mecánicos adquiridos y su función 69
10. Evaluación de Proveedores y Costos 71
11. Desglose de costos del robot SCARA 74
12. Comparación de costos de robots SCARA comerciales y desarrollado 80
13. Cronograma de actividades. 82
14. Recurso de talento humano. 83
15. Recursos materiales. 84
16. Recursos totales. 84

Lista de Figuras

2. Prototipos mecánicos de guerra y el primer robot articulado diseñado por Leonardo da Vinci . . . 5
3. Instalaciones por año de robots industriales de propósitos múltiples para los años 1995-2000 y proyectadas para los años 2012-2022 . . . 7
4. Componentes de un sistema robótico. . . . 9
5. Tipos de Configuraciones de Robots . . . 15
6. Robot de brazo robótico de ensamblaje de cumplimiento selectivo (SCARA) 17
7. Espacio de trabajo del robot SCARA. . . . 18
8. Modelo tridimensional del robot SCARA. . . . 19
9. Modelo tipico del robot SCARA . . . 20
10. Modelo mecánico del robot hibrido Long SCARA . . . 21
11. Robot FUM SCARA . . . 22
12. Robot SCARA de dos brazos . . . 23
13. Banco Mecatrónico UPS . . . 25
14. Banco Mecatrónico . . . 26
15. Medidas del Banco Mecatrónico . . . 27
16. Espacio de Trabajo del Robot SCARA . . . 28
17. Boceto del Robot SCARA . . . 29
18. Boceto con las dimensiones del Robot SCARA . . . 30
19. Sistemas de referencia en cada articulación del Robot SCARA . . . 31
20. Tornillo sin fin Detalle . . . 35
21. Bloque sobre un plano inclinado . . . 37
22. Boceto del Robot SCARA . . . 40
23. RELACION DE POLEAS . . . 43
24. Boceto del Robot SCARA . . . 45
25. Proyecciones SCARA . . . 47
26. Proyecciones SCARA . . . 48
27. Proyecciones SCARA . . . 49
28. Explosionado del Robot SCARA . . . 50
29. Explosionado del Robot SCARA . . . 51
30. Scara entorno Simulink . . . 52
31. Ajuste ejes de referencia Simulink . . . 53
32. Diagrama de bloques Simulink . . . 54

33. Gráficas trayectoria Simulink 55
34. Gráficas trayectoria DH 56
35. Diseño del motor NEMA 17 58
36. Controlador de motor paso a paso HiLetgo A4988 60
37. Microcontrolador Raspberry Pi 4 Model B 61
38. Fuente de alimentación Mean Well LRS-200-24 64
39. BASE ROBOT INVENTOR 65
40. Pilar del robot SCARA 66
41. Eslabones Solidworks 67
42. JUNTAS 68
43. Tapa del tercer eslabón 69
44. Espacio de trabajo y diseño final 76
45. Trayectoria 78

Resumen

La automatización industrial ha impulsado el desarrollo de robots comerciales con mayor precisión y eficiencia en tareas de manipulación. Sin embargo, suelen tener limitaciones en costos y arquitectura, lo cual es un factor negativo en el uso para entornos académicos de investigación y experimentación. Por esta razón, se plantea el diseño de un robot SCARA como una alternativa accesible para su implementación en laboratorios universitarios. Este diseño permite un estudio detallado de su cinemática, y desempeño mecánico. Este trabajo en su primera etapa presenta el diseño y desarrollo del robot SCARA de cuatro grados de libertad (GDL), el cual en su fase inicial abarca la determinación del espacio de trabajo y la selección de la geometría óptima, seguido por el modelado de componentes en Autodesk Inventor® y SOLIDWORKS®. Posteriormente, se realiza el estudio cinemático directo mediante la metodología de Denavit-Hartenberg (DH). En la fase siguiente, se calculan los sistemas de transmisión, incluyendo poleas y un mecanismo de tornillo sin fin. A continuación, se desarrolla el modelo final en CAD y se lleva a cabo una cosimulación en Simulink® de MATLAB® para definir una trayectoria deseada. Finalmente, se seleccionan los componentes mecánicos y electrónicos, y se realiza un análisis de costos de fabricación y ensamblaje.

Palabras clave: Robot SCARA, Automatización, Cinemático, Cosimulación, Denavit-Hartenberg.

Abstract

The industrial automation has driven the development of commercial robots with greater precision and efficiency in handling tasks. However, they often have limitations in cost and architecture, which is a negative factor for their use in academic research and experimentation environments. For this reason, the design of a SCARA robot is proposed as an accessible alternative for implementation in university laboratories. This design allows for a detailed study of its kinematics and mechanical performance. This work, in its first stage, presents the design and development of a four-degree-of-freedom (DOF) SCARA robot, which initially includes the determination of the workspace and the selection of the optimal geometry, followed by the modeling of components in Autodesk Inventor® and SOLIDWORKS®. Subsequently, the forward kinematics study is carried out using the Denavit-Hartenberg (DH) methodology. In the next phase, the transmission systems are calculated, including pulleys and a worm gear mechanism. Then, the final CAD model is developed, and a co-simulation in Simulink® of MATLAB® is performed to define a desired trajectory. Finally, the mechanical and electronic components are selected, and a cost analysis of manufacturing and assembly is conducted.

Keywords: SCARA robot, Automation, Kinematics, Cosimulation, Denavit-Hartenberg.

1. Introducción

En la actualidad, la automatización industrial tiene un papel fundamental en la optimización de procesos de manufactura, permitiendo incrementar la eficiencia, precisión y calidad en estos. Dentro de este contexto, los robots SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) se han posicionado como una solución ideal para tareas repetitivas y de alta velocidad, como son el ensamblaje y la manipulación de materiales, gracias a su diseño compacto, versatilidad y capacidad de integración en líneas de producción.

En la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, se ha implementado un banco mecatrónico con diversas estaciones que simulan una cadena de producción industrial. Este banco representa una herramienta educativa que busca acercar a los estudiantes de ingeniería mecatrónica a escenarios reales de la industria. Sin embargo, actualmente el banco carece de un robot que permita realizar ciertas tareas, lo que limita su capacidad de simular procesos completos que involucren tareas de manipulación, transporte y almacenamiento.

El presente proyecto se enfoca en el diseño de un robot tipo SCARA para el banco mecatrónico de la universidad, con el objetivo de cubrir esta necesidad específica. A través del análisis de la cinemática directa e inversa, la selección de componentes adecuados y el desarrollo de un modelo mecánico. Este diseño buscará integrarse eficazmente en el sistema existente.

Además de contribuir al fortalecimiento del banco mecatrónico, este proyecto tiene un impacto significativo en la formación académica de los estudiantes, al proporcionarles una experiencia práctica en el diseño y análisis de robots industriales. Asimismo, responde a la creciente demanda en la industria por profesionales capacitados en tecnologías de automatización, reforzando el vínculo entre la academia y el sector productivo.

2. Problema

2.1. Descripción del problema

La Universidad Politécnica Salesiana sede - Cuenca, en el año 2024, inició la implementación un banco mecatrónico en sus laboratorios, el cual servirá como material de estudio y apoyo académico para los estudiantes de ingeniería mecatrónica. Este cuenta con una banda transportadora y distintas estaciones que pretenden simular una cadena de produccion industrial. Esta banda transportadora actualmente requiere de la colocación y retirada manual de los objetos desde las estaciones de almacenamiento sobre la banda transportadora, con el fin de automatizar el proceso por completo es necesario la implementación de un robot, el cual moverá los objetos entre la banda y las estaciones de almacenaje.

2.2. Antecedentes

Actualmente la Universidad Politécnica Salesiana cuenta con diversos sistemas robotizados como:

- KUKA KR16 y KR5: Los cuales se encuentran en el laboratorio de robótica que ayudan a los estudiantes con el manejo y programación del mismo.
- Mitsubishi RV-2AJ: El cual se ubica en Laboratorio de Produccion Modular (MPS) que se encuentra en una linea de producción simulada el cual permite el control y programación junto al CNC.
- Mentor Desktop Robot de la empresa Feedback: Es un robot que tiene varios años de antiguedad y que tambien se encuentra en la Universidad Politécnica Salesiana

Los robots indicados son de tipo antropomórfico se encuentran en diferentes espacios, por lo que su interacción con el banco no es posible. Otros elementos a considerar son el tamaño y la herramienta que poseen. Los robots KUKA son grandes comparados con el banco mecatrónico y solo uno posee una herramienta tipo garra. El robot mitsubishi tiene un tamaño adecuado pero su herramienta está diseñada solo para una forma específica de pieza. Mientras que el robot mentor tiene un tamaño pequeño y una garra tipo pinza, este no posee, por el momento, un interfaz que permita comunicarse con los dispositivos del banco.

Los laboratorios de la sede Cuenca no poseen un robot tipo SCARA, por lo que su desarrollo podría ser beneficioso.

Un estudio previo de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil plantea:

- Desarrollo de un brazo robótico de tipo SCARA con estructura de fibra de carbono y sistema de modelado por deposición fundida. Con el objetivo de desarrollar un prototipo de brazo robótico tipo SCARA con capacidad de autoreplicar su estructura mediante modelado por deposición fundida. (Toro Rojas, 2023)

2.3. Importancia y alcances

- Con la incorporación de un brazo robótico tipo SCARA, el banco mecatrónico incrementará sus prestaciones y capacidad de simular un proceso productivo acorde a la insdustria contemporánea.
- Para trabajo colaborativo, ayudará a los estudiantes con la realizacion de prácticas y familiarizarse con este tipo de robots, los cuales están muy presentes en los procesos de produccion automatizados.
- Permitirá a los estudiantes el análisis de control y programación para la manipulación de objetos del brazo robótico.
- El proyecto pretende abarcar la parte del diseño de un robot SCARA, tomando en consideración el análisis de la cinemática directa e inversa, elección de componentes mecánicos y electrónicos, así como también el análisis de costos de implementación.

2.4. Delimitación

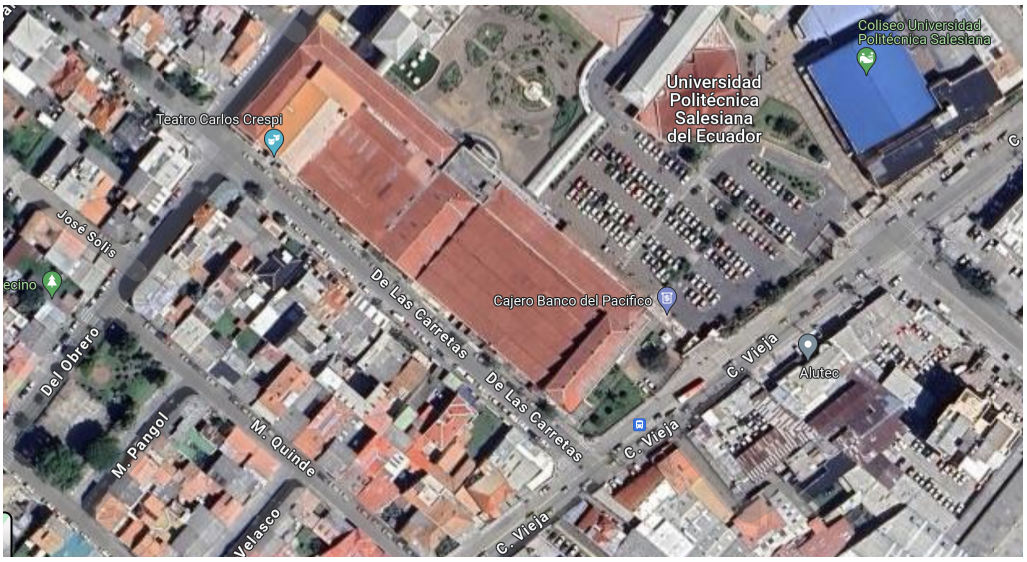
El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

2.4.1. Espacial o geográfica

El proyecto se va a llevar a cabo en la Universidad Politécnica Salesiana, sede del cantón Cuenca, provincia del Azuay en la Calle Vieja 12-30 y Elia Liut. Específicamente en el Laboratorio del edifício Cornelio Merchán.

Figura 1

Espacio geográfico de la Universidad



Nota: Observando la Figura 1, se presenta la delimitación geográfica de los laboratorios del edificio Cornelio Merchán.

2.4.2. Temporal

El periodo de tiempo previsto que tomará el desarrollo del proyeto corresponde a 400 horas dentro de la asignatura Trabajo de Titulación 2.

2.4.3. Sectorial o institucional

Se realizará en la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, la cual es de carácter privada y se localiza en el barrio El Vecino, parroquia El Vecino.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Diseñar un robot SCARA para el banco mecatrónico de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.

3.2. Objetivos Específicos

- Establecer los requerimientos físicos (dimensiones), parámetros de diseño y tareas que el robot SCARA debe cumplir, basados en la adaptación al banco de pruebas mecatrónico.
- Realizar el diseño mecánico del robot SCARA mediante el estudio cinemático del mismo.
- Llevar a cabo la selección de componentes electrónicos y actuadores adecuados para el robot SCARA.
- Determinar los costos de construcción e implementación del robot scara para el banco mecatrónico de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.

4. Marco Teórico

4.1. Antecedentes

El desarrollo de sistemas mecánicos tuvo una influencia notable Leonardo da Vinci cuál fue reconocido por sus actividades de pintura ilustrandose en la Figura 2. En el aspecto de la ingeniería diseñó muchos prototipos mecánicos para muchas aplicaciones y de gran uso. (Cortés, 2011)

Figura 2

Prototipos mecánicos de guerra y el primer robot articulado diseñado por Leonardo da Vinci

Nota: Leonardo da Vinci tuvo una gran influencia en la ingeniería mecánica con sus innovadores diseños y estudios sobre la fricción. (Cortés, 2011)

A continuación, se presentan algunos acontecimientos históricos en el Área de la Robótica

- El robot de Leonardo da Vinci se refiere al humanoide automatizado que se realizo en el año de 1495 . El diseño original fue encontrado en las notas de Leonardo da Vinci en 1950. (Cortés, 2011)

En la época contemporánea se han logrado los siguientes desarollos:

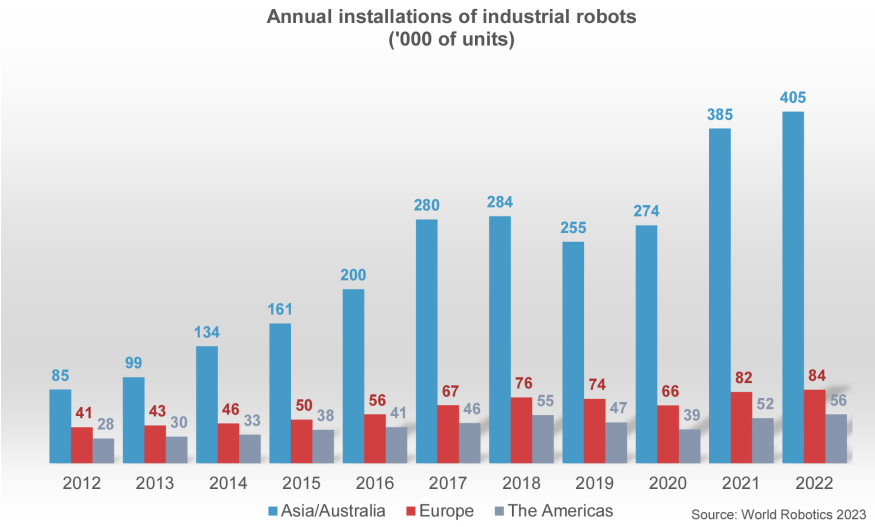
- En 1920 Karel Capek introdujo el termino robot en su novela Rusum's Universal Robots.
- Von Neumann presenta los fundamentos de los computadores en 1946.
- En 1961 se implementó el primer robot industrial Unimate (Maquina de transferencia universal) , usado en una línea de ensamblaje en una fabrica de General Motors de Trenton. (Barrientos, 2007)
- La empresa alemana KUKA instala la primera línea de soldadura equipada con robots industriales en el año de 1970.
- Uno de los cuales se enfocará este trabajo, Sankyo and IBM comercializan el primer robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) desarrollado por el profesor Makino de la Universidad Yamanashi de Japón en el año de 1979.
- En 1997 el robot móvil Sojourner recorre más de 100 m sobre la superficie de Marte teleoperado desde la tierra.
- El 31 de Octubre del 2000 se presentó el robot humanoide ASIMO, el cual puede caminar e interactuar con personas. (Honda Motor Co., Ltd., 2002)
- En el 2004 la NASA presentó Robonaut, un robot humanoide diseñado para asistir en tareas dentro de la estación espacial internacional (ISS).
- Boston Dynamics presentó robots humanoides como Atlas, capaces de realizar tareas complejas como saltos, parkour y manipulación avanzada. (Boston Dynamics, 2013)
- La NASA desplegó el robot rover Perseverance en Marte, equipado con tecnología avanzada para explorar el planeta rojo y recolectar muestras. (NASA, 2021)

La historia de la automatización industrial está caracterizada por periodos de cambios bruscos en los métodos populares. (Craig, 2006)

El uso del robot industrial, que se identificó como dispositivo único en la década de 1960 que con el paso del tiempo hasta la actualidad ha ido evolucionando y aumentando la demanda tal como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Instalaciones por año de robots industriales de propósitos múltiples para los años 1995-2000 y proyectadas para los años 2012-2022.



Nota: Se presenta el número anual de robots instalados en las principales regiones industriales del mundo. Cabe destacar que Asia reporta estas cifras de manera diferente a otras regiones, ya que incluye algunas máquinas que en otros lugares se clasifican únicamente como "máquinas de fábrica". (IFR, 2023)

Las aplicaciones que llevan a cabo los robots industriales se están volviendo cada vez más sofisticadas, pero aún se da el caso de que, como en el año 2000, aproximadamente el 78 por ciento de los robots instalados en los EE.UU. fueron robots para soldadura o manejo de materiales. (Goldman, 1985)

4.2. Definición de robot

El termino robot proviene de la palabra checa ***robota*** que significa ***trabajo*** el cual fue introducido por Karel Čapek en su novela satirica ***Rossum's Universal Robots*** el cual describe como una máquina que sustituye a los seres humanos para realizar tareas sin descanso. (Cortés, 2011)

En primera instancia, la robótica se define comúnmente como la ciencia que estudia la conexión inteligente entre percepción y acción. Esta se ocupa del estudio de aquellas máquinas que pueden sustituir a los seres humanos en la ejecución de una tarea, tanto en la actividad física como en la toma de decisiones. (Siciliano, Sciavicco, Villani, y Oriolo, 2008) Con esto, el rápido avance en robótica y disciplinas relacionadas en la actualidad hace necesario revisar y expandir frecuentemente el concepto de robot. Llegar a definir este término de manera adecuada para cubrir la amplia gama de dispositivos que se conocen actualmente.

A continuación, se presentan algunas de las definiciones conocidas de enciclopedias de gran prestigio.

- Enciclopedia Británica: Máquina operada automáticamente que sustituye el esfuerzo de los humanos, aunque no tiene por qué tener apariencia humana o desarrollar sus actividades a la manara de los humanos.
- Diccionario Merrian Webster: Máquina que se asemeja a los humanos y desarrolla como ellos tareas complejas como andar o hablar. Un dispositivo que desarrolla de manera automática tareas complicadas, a menudo de manera repetitiva. Un mecanismo guiado por control automático.
- Diccionario de la Real Academia Española: Máquina o ingenio electrónico programable, capaz de manipular objetos y realizar operaciones antes reservadas sólo a las personas.

Incluso estas definiciones amplias son insuficientes para incluir el conjunto de sistemas que hoy comprenden los robots en el estado tecnológico de la robótica Estas definiciones amplias son insuficientes para incluir el conjunto de sistemas que ahora comprenden los robots en el estado tecnológico de la robótica . Por ello , hoy en día es habitual añadir al término “ robot ” un adjetivo que permita describir con más detalle sus características o su ámbito de aplicación.

4.3. Definición de Robot Industrial Manipulador

Los primeros intentos de establecer una definición formal de robot surgen en el año 1979 por parte de la RIA (Robot Institute of America, actualmente Robotic Industries Association), según la cual:

Robot Industrial (RIA): *Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias*

variables, programadas para realizar tareas diversas. (Robotics Industries Association (RIA), 1982)

Esta temprana definición, matizada y acotada, ha sido la referencia para las sucesivas definiciones que se han ido dando al robot hasta llegar a la actual, establecida por la Asociación Internacional de Estándares (ISO).

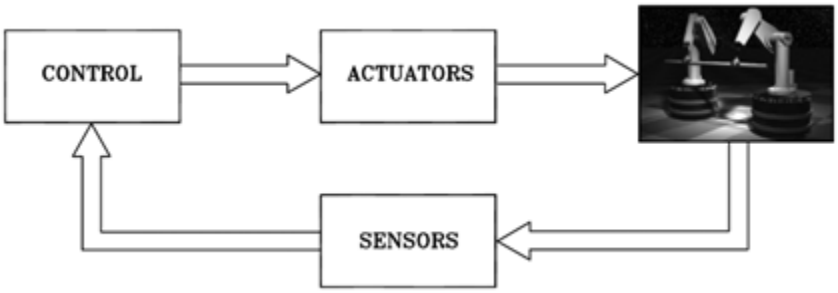
Robot manipulador industrial (ISO): *Manipulador de 3 o más ejes, con control automático, reprogramable, multiaplicación, móvil o no, destinado a ser utilizado en aplicaciones de automatización industrial. Incluye al manipulador (sistema mecánico y accionadores) y al sistema de control (software y hardware de control y potencia).(*ISO 8373:2012 - Robots and robotic devices – Vocabulary*, 2012)*

4.4. Componentes de un robot

Un sistema robótico es en realidad un sistema complejo, representado funcionalmente por múltiples subsistemas. El componente esencial de un robot es el sistema mecánico dotado, en general, de un aparato de locomoción (ruedas, orugas, piernas mecánicas) y de un aparato de manipulación (brazos mecánicos, efectores terminales, manos artificiales). Tal como la Figura 4 se puede ver que es un sistema que consta de sensores y actuadores. (Siciliano y cols., 2008)

Figura 4

Componentes de un sistema robótico.



Nota: En la Figura 4 , un sistema robótico es en realidad un sistema complejo, funcionalmente representado por múltiples subsistemas.(Siciliano y cols., 2008)

- **Articulaciones**: Son uniones que permiten la conexión y el movimiento relativo entre 2 eslabones consecutivos del robot. Estos pueden rotacionales o prismáticas (lineales). (Cortés, 2011)

- **Actuadores**: Suministran las señales necesarias a las articulaciones para producir un movimiento. Estos pueden ser: servomotores, elementos neumáticos, eléctricos o hidraúlicos. (Cortés, 2011)

- **Sensores**: Recogen información sobre el entorno o el robot, como distancia, temperatura, presión, orientación, y posición. (Cortés, 2011)

- **Sistema Mecánico**: Consiste en una secuencia de eslabones rígidos de metal conectados en cadena abierta por medio de articulaciones (servomotores) (Cortés, 2011)

- **Consola de control**: Consta de un sistema electrónico con la etapa de potencia encargada de suministrar energía al robot para su movimiento. (Cortés, 2011)

4.5. Clasificación de los robots

Un robot puede ser clasificado atendiendo a diferentes criterios o características. Algunas de éstas serán dependientes de su propia estructura, otras de la aplicación a que se destinan. En los criterios para clasificar un robot que la continuación se exponen, aparecen conceptos cuyo desarrollo será abordado en capítulos posteriores, haciéndose en este epígrafe sólo una breve reseña a su significado.(Barrientos, 2007)

4.5.1. Clasificación atendiendo a la Generación

La generación de un robot hace referencia al momento tecnológico en que éste aparece. De este modo se puede considerar que se pasa de una generación a la siguiente cuando se da un hito que supone un avance significativo en las capacidades de los robots.

Cronológicamente podría decirse que:

- Primera generación: Repite la tarea programada secuencialmente. No toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno.

- Segunda generación: Adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia. Puede localizar, clasificar (visión) y detectar esfuerzos y adaptar sus movimientos en consecuencia.

- Tercera generación: Su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural. Posee capacidad para la planificación automática de tareas.

4.5.2. Clasificación atendiendo al Área de Aplicación

Desde el punto de vista del uso que se da al robot es posible clasificarlos bien en base al sector económico en el que se encuentran trabajando o bien en base al tipo de aplicación o tarea que desarrollan, independientemente de en qué sector económico trabajen. (Barrientos, 2007)

Bastante más práctica es la clasificación que la IFR hace en base al tipo de aplicación. En ésta, se dividen las aplicaciones en Personales o Domésticas, Profesionales y en genral aplicaciones de I+D. En cada uno de los caso se detalla la actividad a la que se dedica el robot como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Clasificación de los robots de servicio por Áreas de aplicación según IFR

Seccion 1	**ROBOTS PERSONALES Y DOMESTICOS**
1-5	Robots para tareas domésticas
6-10	Robots de entretenimiento
11-14	Asistenciales, ayuda a discapacitados
15	Transporte y personal
16	Seguridad y vigilancia de la vivienda
17	Otros usos personales y domésticos
Seccion 2	**ROBOTS DE SERVICIOS PROFESIONALES**
18-23	Robots de exteriores
24-28	Limpieza profesional
29-31	Sistemas de inspección
32-36	Construcción y demolición
37-40	Sistemas logísticos
41-44	Medicina
45-50	Defensa, rescate y seguridad
51	Submarinos
52	Plataformas móviles de uso general
53-55	Robots de laboratorio
56-59	Relaciones públicas
60-61	Proposito especial
62	Humanoides
63	Robots a medida
64	Otros no especificados
Seccion 3	**I+D EN ROBÓTICA**
64	Percepción
65-67	Actuación
68	Micro y nano robots
69	Arquitecturas e integración
70	Navegación y control
71	Iterfases con usuario y otras
72	Otras actividades de I+D no especificadas
73	Investigación básica

Nota: Analizando en la Tabla 1, existen un sinnúmero de robots los cuales están clasificados de acuerdo a las áreas de aplicación, cabe recalcar que en la investigacíon en robotica se enfoca mas en el desarrollo de nuevas tecnologías.

4.5.3. Clasificación atendiendo al Número de Ejes

Esta característica se aplica a los robots o telerobots con cadena cinemática (es decir, sería aplicable a los robots manipuladores, pero no a los robots móviles, por ejemplo). Cada uno de los movimientos independientes que tiene el robot se conoce como eje. Debido a que la definición ISO establece que un robot manipulador industrial debe tener al menos 3 ejes, los robots de servicio manipuladores pueden tener cualquier número de ejes superior o igual a 3. En la práctica, la mayoría de los robots tienen seis ejes, seguidos por los que tienen cuatro. Es raro encontrar robots con más de seis ejes. (Barrientos, 2007)

4.5.4. Clasificación atendiendo a la Configuración

Como ocurre en el caso anterior, esta clasificación es sólo aplicable a robots o telerobots con cadena cinemática. La configuración de un robot queda definida por el tipo de movimientos permitidos entre 2 eslabones consecutivos de la cadena. (Barrientos, 2007)

De acuerdo a esto se tienen los tipos de configuraciones indicados en la Tabla 2.

Tabla 2

Tipos de Configuraciones de Robots

ROBOTS
Cartesiano
Cilíndrico
Polar o Esférico
Articular
SCARA
Paralelo

Nota: Como se aprecia en la Tabla 2, estos son las configuraciones más comunes de robots.

4.5.5. Clasificación atendiendo al Tipo de Control

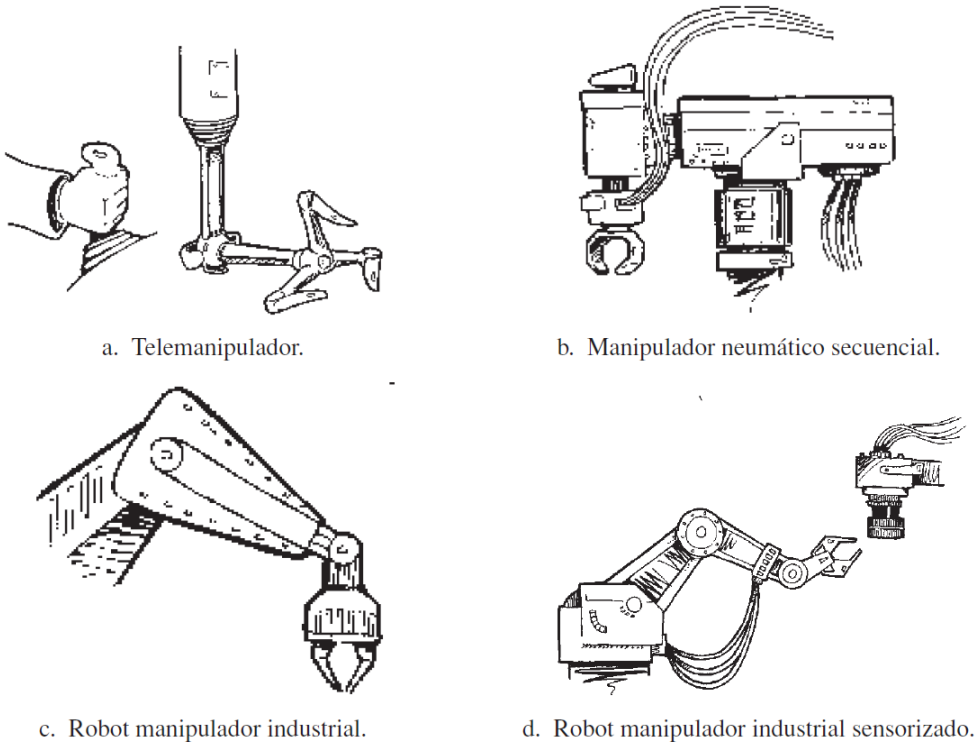
Atendiendo al tipo de control, la norma ISO 8373 y, en consonancia la IFR, distingue entre los siguientes:

- Robot secuencial *: Robot con un sistema de control en el que un conjunto de movimientos se efectúa eje a eje en un orden dado, de tal forma que la finalización de un movimiento inicia el siguiente.*
- Robot controlado por trayectoria *: Robot que ejecuta un procedimiento controlado por el cual los movimientos de tres o más ejes controlados, se desarrollan según instrucciones que especifican en el tiempo la trayectoria requerida para alcanzar la siguiente posición (obtenida normalmente por interpolación).*
- Robot Teleoperado *: Un robot que puede ser controlado remotamente por un operador humano, extendiendo las capacidades sensoriales y motoras de éste a localizaciones remotas.*

En la Figura 5 se muestran algunos tipos de robots.

Figura 5

Tipos de Configuraciones de Robots



a. Telemanipulador.

b. Manipulador neumático secuencial.

c. Robot manipulador industrial.

d. Robot manipulador industrial sensorizado.

Nota: De acuerdo en la Figura 5, hay variedades de configuraciones de robots los cuales dependiendo de la aplicación pueden dar soluciones a una necesidad.(Barrientos, 2007)

4.6. Aplicaciones

Los robots SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) son populares en la industria debido a su diseño específico para tareas de ensamblaje y manipulación de materiales. Algunas de sus aplicaciones más comunes incluyen:

- Se utilizan para ensamblar componentes electrónicos pequeños y delicados, como placas de circuitos impresos (PCBs).
- Son ideales para operaciones de "pick and place"donde el robot recoge piezas de una ubicación y las coloca en otra, debido a su alta velocidad y precisión.
- Ensamblaje de pequeños componentes mecánicos y eléctricos, como motores y engranajes.

- Movimiento de materiales ligeros en líneas de producción, como la carga y descarga de piezas en maquinaria de procesamiento.
- Empaque de productos en cajas y su colocación en palés para su almacenamiento o envío.
- Soldadura de precisión y aplicaciones de pegado en la fabricación de dispositivos electrónicos y componentes de automoción.
- Inspección visual automatizada y pruebas de productos en líneas de producción para garantizar la calidad y la conformidad con las especificaciones.
- Algunas configuraciones de robots SCARA se utilizan en impresoras 3D para la fabricación aditiva.
- Manipulación de pequeños viales y componentes en laboratorios y plantas de producción farmacéutica.

Estos robots son apreciados por su capacidad para realizar movimientos repetitivos con alta precisión y velocidad, lo que los hace adecuados para una amplia variedad de aplicaciones industriales. (Harten, 2008)

4.7. Robot SCARA

SCARA es un acrónimo de Brazo Robot de Ensamblaje de Cumplimiento Selectivo, acuñado por Hiroshi Makino (Makino y Furuya 1980), el inventor de esta nueva clase de robots. La clase se propuso como un medio para proporcionar capacidades de movimiento al efector final que son requeridas por el ensamblaje de circuitos impresos y otros dispositivos electrónicos con una geometría plana. Los movimientos constan de tres traslaciones independientes y una rotación alrededor de un eje de orientación fija generalmente vertical. En la Figura 6 se muestra que consta de ciertos movimientos de rotación y traslación. (Angeles, 2013)

Figura 6

Robot de brazo robótico de ensamblaje de cumplimiento selectivo (SCARA).

Nota: Tal como se muestra en la Figura 6, el robot SCARA tiene una restructura única con 2 ejes de inclinación, aqui tiene un enfoque particular en los ejes normales y los ejes de rotación.(Zhen, Meng, Xiao, Liu, y Chen, 2023)

Estos robots han recibido mucha atención. Los primeros robots de este tipo tenían una arquitectura en serie con tres revoluciones y una articulación prismática en la base o en el efector final. Estos robots han demostrado un rendimiento impresionante en una operación estándar de recogida y colocación que consiste en: (a) traslación hacia arriba de 25 mm; (b) traslación horizontal de 300 mm, girando simultáneamente en un ángulo de 180°; y (c) traslación hacia abajo de 25 mm. El ciclo se cierra volviendo a la postura original, siguiendo el mismo programa de desplazamientos, pero en orden inverso. Cabe recalcar que los datos numéricos mencionados hacer referencia a robots SCARA de ese tipo. (Zhen y cols., 2023)

4.7.1. Espacio de trabajo

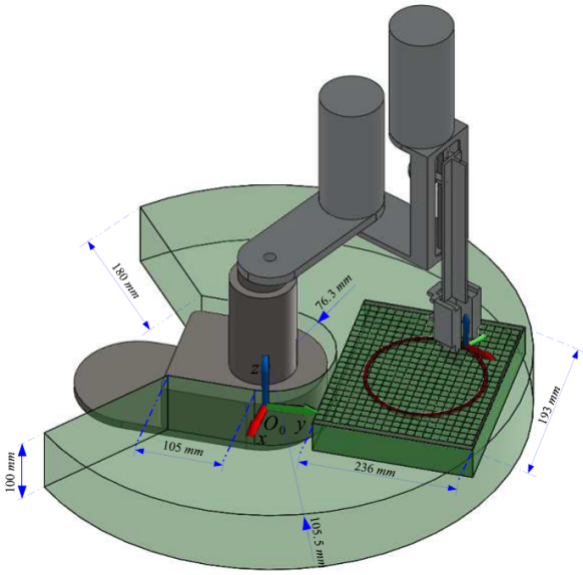
El espacio de trabajo de un robot se refiere a la región del espacio donde el robot puede interactuar con objetos por medio de su efector final y depende principalmente de la estructura del robot ya que existen diversos tipos de estos. (Lynch y Park, 2017)

El espacio de trabajo de un robot SCARA tradicional es el de un gran segmento de círculo alrededor de su base con cambios mínimos de altura. Respecto a la Figura 7. Los cambios

de altura están condicionados por la altura de la instalación en la que se encuentra el brazo robótico. Esto dificulta el crecimiento del ámbito de aplicaciones donde se consideraría un robot SCARA tradicional, ya que surge la necesidad de cambios significativos de altura y solo puede utilizarse en un entorno de trabajo específico. (Jimenez-Nixon, Paredes-Sánchez, y Reyes-Duke, 2022)

Figura 7

Espacio de trabajo del robot SCARA.



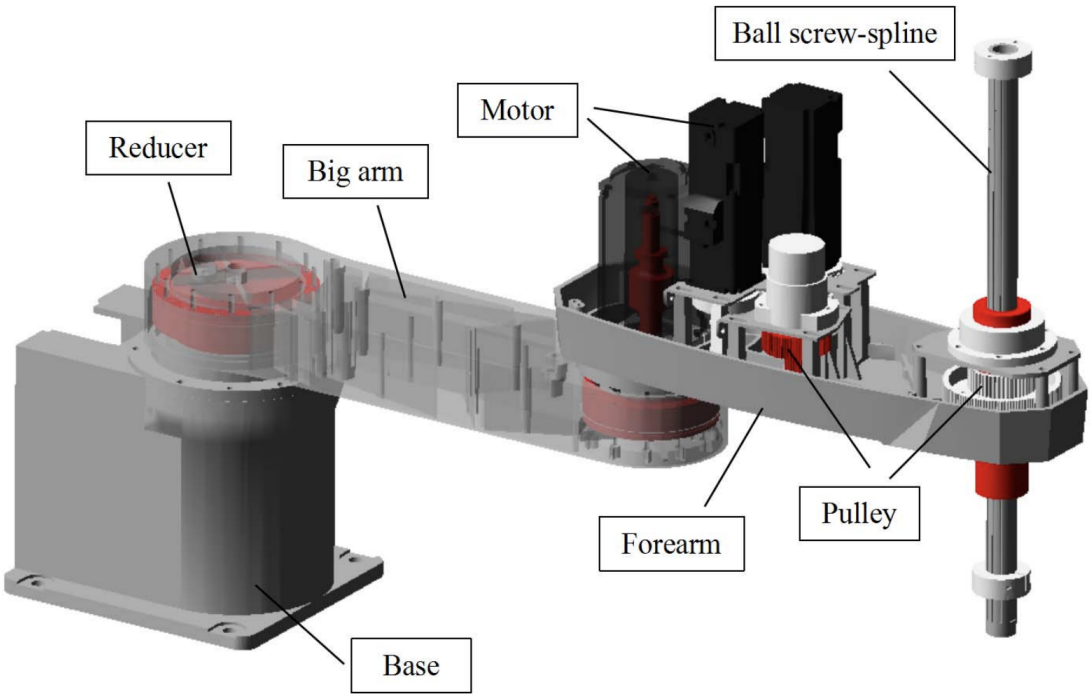
Nota: Referente a la Figura 7, el robot SCARA tiene un espacio circular de trabajo con cierta restricción.(Miguel G. Villarreal, 2016)

4.7.2. Componentes del robot SCARA

El robot SCARA principalmente se compone de una base, brazo grande, antebrazo, motores de cuatro articulaciones, reductores de la articulación 1 y la articulación 2, poleas, husillo de bolas y otras piezas clave, tal como la Figura 8.

Figura 8

Modelo tridimensional del robot SCARA



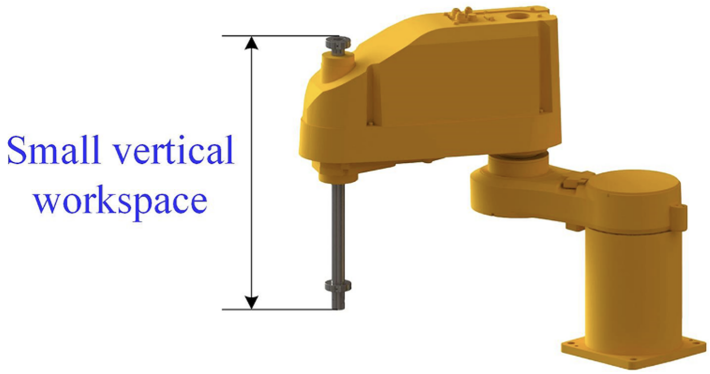
Nota: Respecto a la Figura 8, este es un modelo el cual está pensado para realizar una simulación por medio del software ADAMS para posteriormente proporcionar los parámetros de densidad de acuerdo con el material real de cada componente.("Investigación sobre simulación de dinámica de acoplamiento rígido-flexible del robot SCARA", 2022)

4.7.3. Diseños del robot SCARA

Un robot con movimiento SCARA, que incluye tres traslaciones y una rotación, ha sido ampliamente utilizado en tareas como recoger y colocar, agarrar, manipular, apilar y desapilar. Un típico robot Scara serial puede alcanzar altas velocidades, aunque su espacio de trabajo vertical es limitado, tal como se aprecia en la Figura 9.

Figura 9

Modelo tipico del robot SCARA.



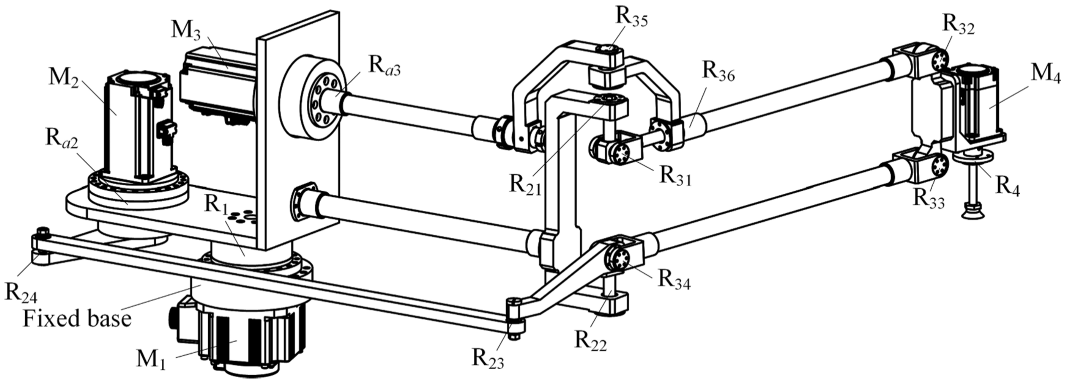
Nota: Conforme a la Figura 9, se puede notar que es un robot típico SCARA con sus articulaciones predefinidas, lo cual es funcional, pero de acuerdo a las necesidades, su diseño puede variar para aumentar las capacidades del robot.(ao Cao y cols., 2024)

Respecto a esto, la nueva propuesta denominado robot híbrido Long SCARA, se espera que el nuevo robot cumpla con los siguientes requisitos de diseño el cual se ilustra en la Figura 10:

- Generar movimiento SCARA para aplicaciones de pick and place.
- Tener solo pares de revoluciones para una mayor destreza y un menor desgaste.
- La mayoría de los actuadores están ubicados en la base o cerca de la base para obtener un movimiento de alta velocidad.

Figura 10

Modelo mecánico del robot hibrido Long SCARA.



Nota: Referente a la Figura 10, se ha podido rediseñar el nuevo robot para su necesidad establecida, cumpliendo con los requerimientos propuestos en dicho artículo. (ao Cao y cols., 2024)

En el artículo de .ªo Cao y cols"de presenta el diseño de un robot SCARA con ciertos parametros al que denominan "FUM SCARA".

En dicho artículo el objetivo del diseño es fabricar un manipulador educativo con características similares a los robots industriales comerciales más importantes del mundo, de modo que se puedan diseñar e implementar algoritmos de control innovadores. (ao Cao y cols., 2024)

Observar en la Figura 11.

Figura 11

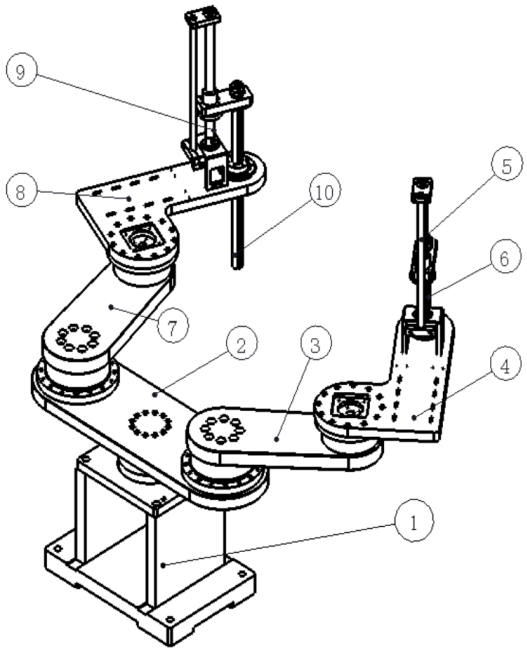
Robot FUM SCARA.

Nota: De acuerdo a la Figura 11, los parámetros de diseño del robot incluyen carga útil, alcance y espacio de trabajo, velocidad máxima, precisión y repetibilidad, rigidez del brazo y costo. (Shariatee, Akbarzadeh, Mousavi, y Alimardani, 2014)

En la siguiente revisión del articulo se ha analizado el diseño de un nuevo robot SCARA de 2 brazos. Es un robot de alta velocidad y alta precisión que combina funciones de detección y ensamblaje. El robot tiene dos brazos operativos SCARA simétricos e idénticos que minimizan el espacio operativo del robot evidenciandose en la Figura 12. Para ampliar el rango de trabajo del robot, se agrega una base giratoria entre los dos brazos.(Shariatee y cols., 2014)

Figura 12

Robot SCARA de dos brazos.



Nota: Modelo tridimensional de la estructura del robot SCARA de dos brazos 1-base 2-cintura 3-brazo superior derecho 4-brazo inferior derecho 5-eje Z derecho 6-actuador de extremo derecho 7-brazo superior izquierdo 8-brazo inferior izquierdo 9-eje Z izquierdo 10-actuador de extremo izquierdo. (Liu, He, y Kuang, 2018)

4.8. Cinemática

La cinemática es una rama de la física que estudia el movimiento de los cuerpos sin considerar las fuerzas que lo causan. Se centra en describir cómo se mueven los objetos, analizando variables como la posición, la velocidad y la aceleración.

4.8.1. Cinemática Directa

La cinemática directa se refiere al cálculo de la posición y orientación del extremo del robot (efector final) en función de los ángulos de las articulaciones. Esencialmente, se trata de determinar dónde se encuentra el efector final si se conocen los valores de las variables articulares. (Cortés, 2011)

4.8.2. Convención Denavit-Hartenberg

Existen varios métodos para obtener el modelo de cinemática directa, entre los cuales se encuentran la formulación por matrices de transformación sucesivas, las ecuaciones de coordenadas homogéneas y la representación por cuaterniones. Sin embargo, cuando el número de grados de libertad crece, estos métodos pueden volverse procedimientos largos y tediosos debido a la complejidad en el manejo de múltiples matrices de transformación o en la parametrización de orientaciones en el espacio tridimensional. Una alternativa más estructurada es la metodología Denavit-Hartenberg, ampliamente utilizada en ingeniería, la cual ofrece un procedimiento sistemático y compacto para obtener el modelo cinemático directo, representándolo en términos de transformaciones homogéneas y facilitando su implementación en estudios de robótica. (Cortés, 2011)

Jaques Denavit y Richard S. Hartenberg en 1955 presentaron un procedimiento para obtener una mínima representación de la orientación y traslación de los diferentes eslabones de robots manipuladores. Consiste en determinar una tabla de parámetros relacionados con los eslabones del robot. La convención Denavit- Hartenberg toma como referencia al diagrama de un robot manipulador en cadena cinemática abierta.

5. Marco metodológico

5.1. Análisis de las especificaciónes del Banco Mecatrónico

El banco mecatrónico que se está implementando en la universidad tiene los siguientes elementos:

- Un conjunto de bandas transportadoras que se encargan de mover las piezas en círculo por las distintas estaciones existentes.
- Una estación de reconicimiento de objetos, mediante una cámara de alta definición.
- Un puesto en donde mediante un laser se define la forma y tamaño de los objetos que pasan por la misma.
- Varias barreras con pistones que sirven para detener las piezas en las debidas estaciones.
- Un almacén de cuatro piezas.
- Varios sensores, sobretodo de presencia, para detectar cuando la pieza se encuentre en la estación correspondiente.

- Un tablero de control con pulsantes, luces indicadoras, botón de emergencia.

Todos estos elementos conectados a un PCL conforman el banco mecatrónico colaborativo, que simula un proceso industrial. Como se puede observar en la Figura 13.

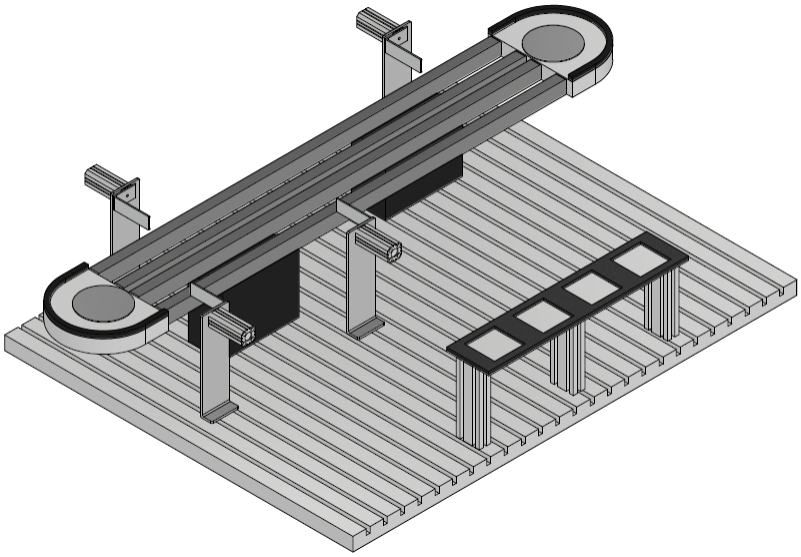
Figura 13

Nota: Se puede observar el banco mecatrónico que se encuentra instalado actualmente en la universidad. Fuente: Elaboración Propia

5.1.1. Diseño del Banco Mecatrónico en Autodesk Inventor®

En la Figura 14 y 15 se puede corroborar el modelado del banco mecatrónico en el software Autodesk Inventor® para la posterior obtención de medidas referenciales y definición del espacio de trabajo.

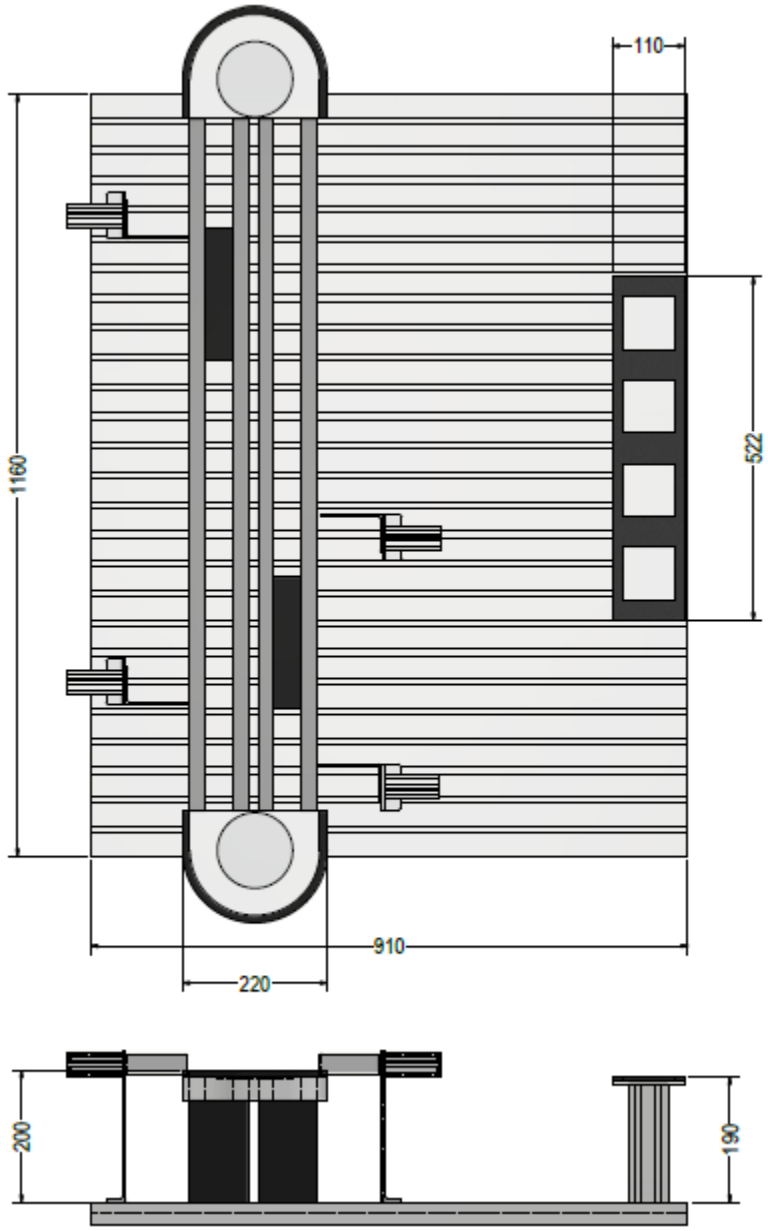
Figura 14



Nota: Simulación del banco mecatrónico y sus elementos más destacados para la obtención del espacio de trabajo disponible para la ubicación del robot SCARA. Fuente: Elaboración Propia

El Banco Mecatrónico tiene las siguientes medidas:

Figura 15



Nota: Escala en mm, dimensiónes tomadas directamente del banco mecatrónico en los laboratorios de la universidad. Fuente: Elaboración Propia

Se acotó unicamente los elementos más destacados y la base sobre la que se encuentran,

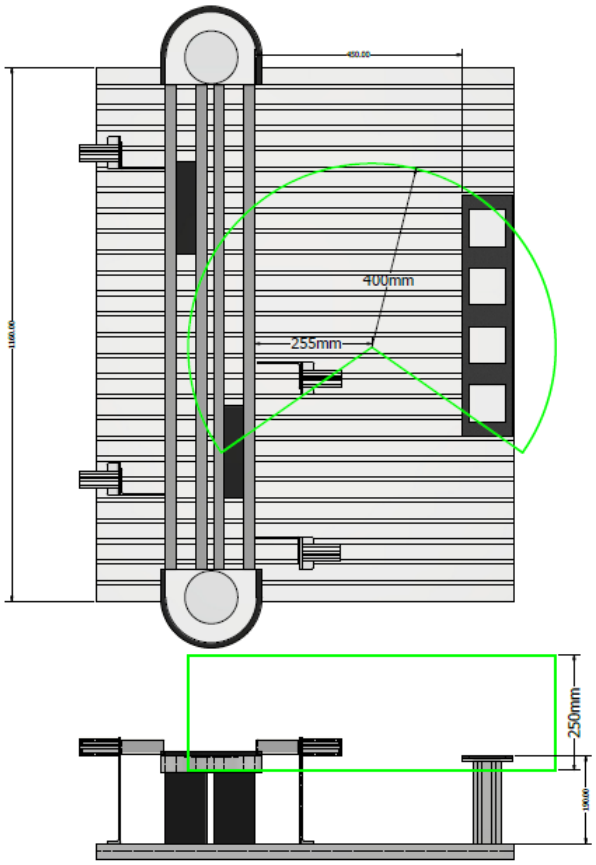
debido a que esta base cuenta con rieles, lo que permite reubicar cualquiera de los elementos.

5.2. Definición de requerimientos y tareas del Robot SCARA

El Robot SCARA va a realizar tareas de almacenamiento de piezas desde la banda hacia la zona de almacenamiento y biceversa. Con la posibilidad que, mediante programación, se pueda realizar otro tipo de tareas, dandole versatilidad al banco mecatrónico.

El espacio de trabajo del robot, especificado con líneas de color verde, se puede observar en la Figura 16:

Figura 16

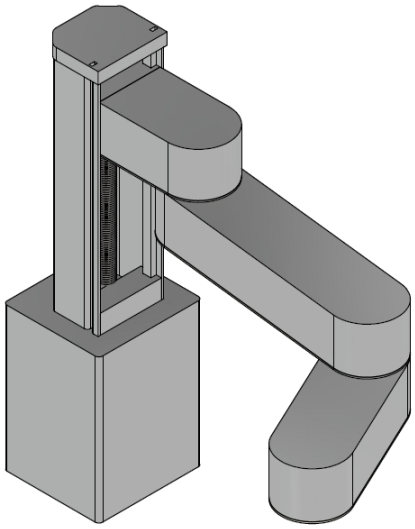


Nota: Escala en mm, el espacio de trabajo se encuentra de color verde. Fuente: Elaboración Propia

5.2.1. Boceto inicial

Tomando en cuenta que el robot SCARA va a realizar principalmente trabajos de PICK AND PLACE, nos basamos en el modelo PRRR como se muestra en la figura 6 (Zhen y cols., 2023) Obteniendo el boceto que se muestra en la Figura 17.

Figura 17

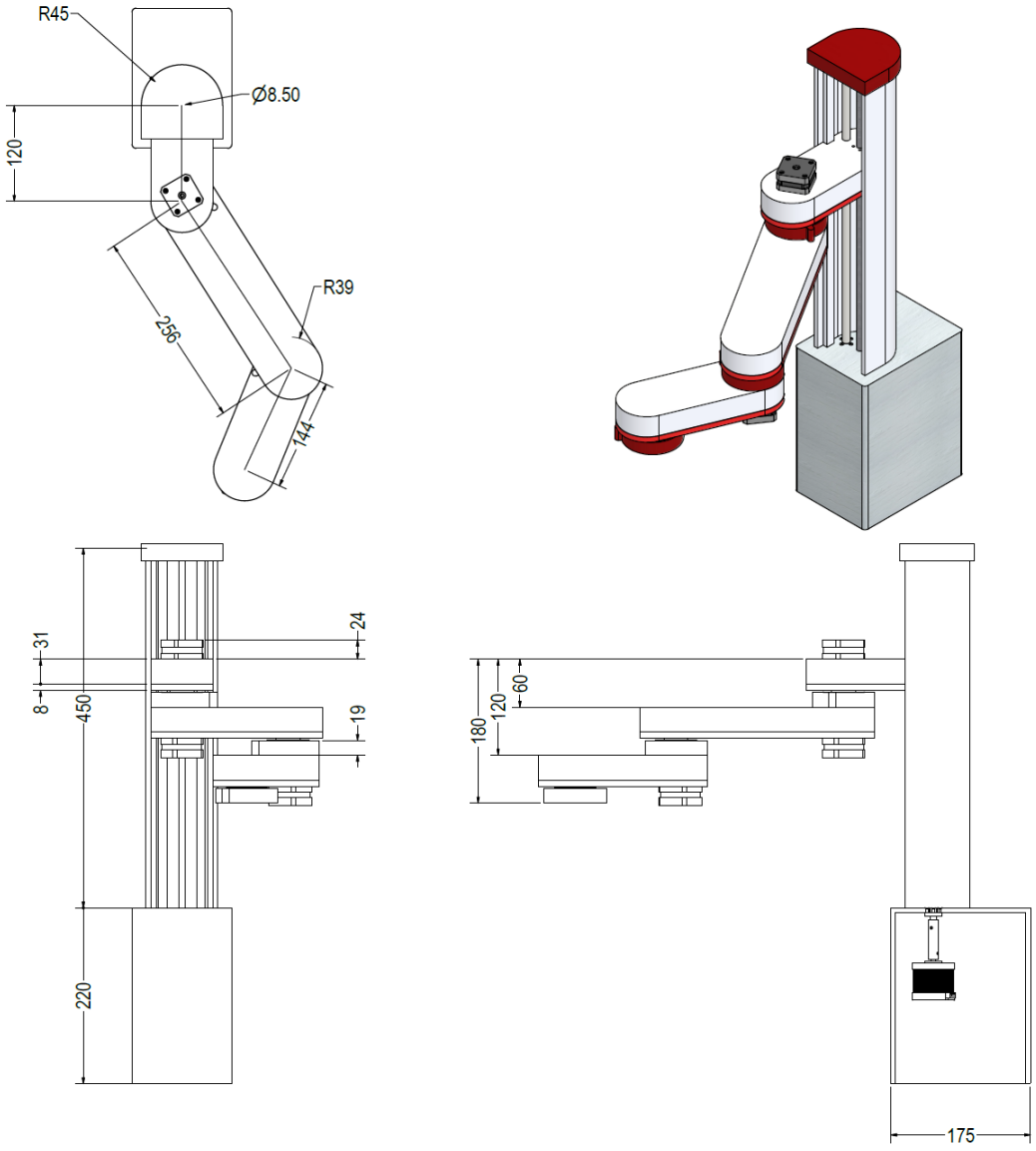


Nota: Diseño elaborado en Autodesk Inventor®. Fuente: Elaboración Propia

5.3. Análisis Cinemático del Robot

La notación de Denavit-Hartenberg (D-H) se emplea para describir geométricamente al robot SCARA y llevar a cabo un análisis matemático estructurado. A continuación, en la Figura 18, se plantea el boceto del robot SCARA, junto a las dimensiones establecidas para cada eslabón que lo compone.

Figura 18



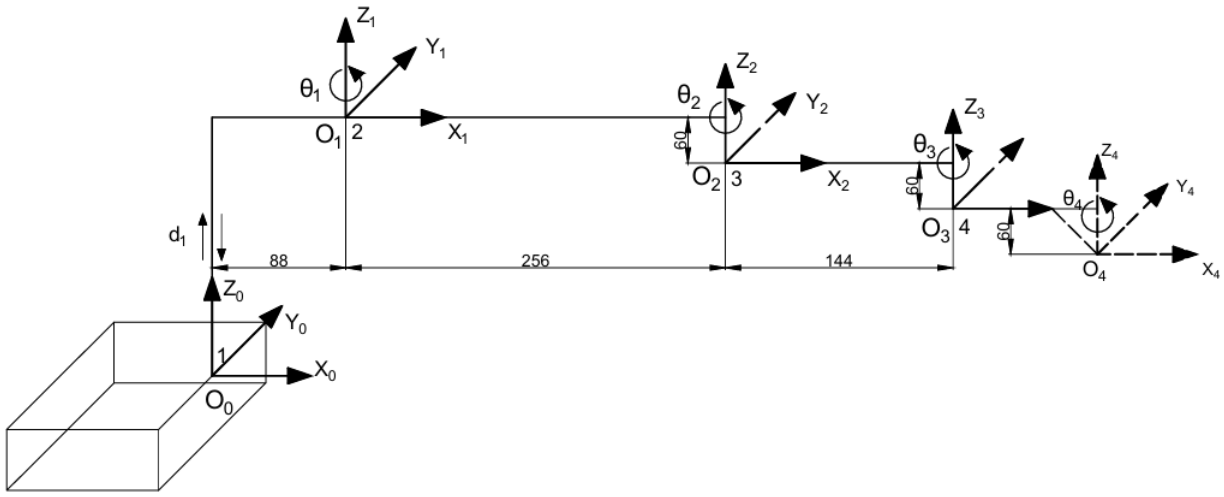
Nota: Escala en mm, se puede observar las dimensiones de cada eslabon para posteriormente aplicar a la tabla de parámetros de Denavit-Hartenberg. Fuente: Elaboración Propia

5.3.1. Tabla de Parámetros de Denavit-Hartenberg

En primera instancia se realiza la gráfica que incluye los ejes con el sistema de referencia adecuado para cada articulación y las medidas correspondientes al robot SCARA tal como se presenta en la Figura 19 .

En este caso consideramos 4 articulaciones, que corresponden a los 4 grados de libertad que posee el robot SCARA planteado.

Figura 19



Nota: Escala en mm, se puede observar la ubicación de los sistemas de referencia en cada articulación que compone el robot PRRR con las dimensiones definidas. Fuente: Elaboración Propia

Para un robot SCARA con configuración PRRR, definimos los parámetros de DH de la siguiente manera:

Eslabón (i)	θ_i	d_i	a_i	α_i
1 (P)	0	d_1	88	0°
2 (R)	θ_2	-60	256	0°
3 (R)	θ_3	-60	144	0°
4 (R)	θ_4	-60	0	0°

5.3.2. Matrices de Transformación

Cada matriz de transformación homogénea A_i^{i-1} se define como:

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

Para cada eslabón, las matrices de transformación específicas son:

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 88 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 256\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 256\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & -60 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & 144\cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 144\sin\theta_3 \\ 0 & 0 & -60 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & 0 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -60 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

5.3.3. Matriz de Transformación Total

La matriz de transformación total desde la base hasta el efector final, T_4^0, se obtiene multiplicando las matrices individuales:

$$T_4^0 = A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot A_3^2 \cdot A_4^3$$

Sustituyendo, tenemos:

$$T_4^0 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4) & -\sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4) & 0 & a_1 + a_2\cos\theta_2 + a_3\cos(\theta_2+\theta_3) \\ \sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4) & \cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4) & 0 & a_2\sin\theta_2 + a_3\sin(\theta_2+\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & d_1 + d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Reemplazando los valores de Denavit Hartenberg se tiene:

$$T_4^0 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4) & -\sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4) & 0 & 88 + 256\cos\theta_2 + 144\cos(\theta_2+\theta_3) \\ \sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4) & \cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4) & 0 & 256\sin\theta_2 + 144\sin(\theta_2+\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & d_1 - 180 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

5.3.4. Posición y Orientación del Efector Final

La posición del efector final está dada por los elementos de la columna de traslación en T_4^0:

$$P_{efector} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 + a_2\cos\theta_2 + a_3\cos(\theta_2+\theta_3) \\ a_2\sin\theta_2 + a_3\sin(\theta_2+\theta_3) \\ d_1 + d_4 \end{bmatrix}$$

Reemplazando los valores de Denavit-Hartenberg, se tiene:

$$P_{efector} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 88 + 256\cos\theta_2 + 144\cos(\theta_2+\theta_3) \\ 256\sin\theta_2 + 144\sin(\theta_2+\theta_3) \\ d_1 - 180 \end{bmatrix}$$

La orientación del efector final se determina por la suma de los ángulos $\theta_2 + \theta_3 + \theta_4$ alrededor del eje Z.

5.3.5. Verificación de la Matriz de Posición del Efector Final

Una vez obtenida la matriz de transformación total T_4^0, se procede a verificar la validez de la ecuación de posición del efector final mediante la asignación de valores específicos a los ángulos θ_2, θ_3 y la distancia d_1. Esta validación permite confirmar que el modelo cinemático representa correctamente el comportamiento del robot SCARA PRRR.

Para ello, se evaluaron diferentes configuraciones de los parámetros articulares, obteniendo la posición del efector final en los ejes x, y y z. Los resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3

Verificación de la posición del efector final con valores específicos de θ_2, θ_3 y d_1

Caso	θ_2 (°)	θ_3 (°)	d_1 (mm)	x (mm)	y (mm)	z (mm)
1	0	0	430	488.00	0.00	250.00
2	0	0	180	488.00	0.00	0.00
3	90	0	430	88.00	400.00	250.00
4	90	0	180	88.00	400.00	0.00
5	0	90	430	344.00	144.00	250.00
6	0	90	180	344.00	144.00	0.00

Nota. Los valores de θ_2 y θ_3 están expresados en grados (°), mientras que d_1, x, y y z están en milímetros (mm).

Como se observa en la Tabla 3, los resultados obtenidos concuerdan con las posiciones esperadas del efector final para cada combinación de parámetros. Esto valida la correcta formulación de la matriz de transformación y el modelo cinemático desarrollado.

Es importante destacar que la posición en el eje Z se ha definido en un rango de $d_1 = 180\,\text{mm}$ a $430\,\text{mm}$, medido desde la base del robot SCARA. Este desplazamiento se traduce en un recorrido efectivo del efector final desde $0\,\text{mm}$ hasta $250\,\text{mm}$, lo cual coincide con el espacio de trabajo propuesto para el diseño del robot.

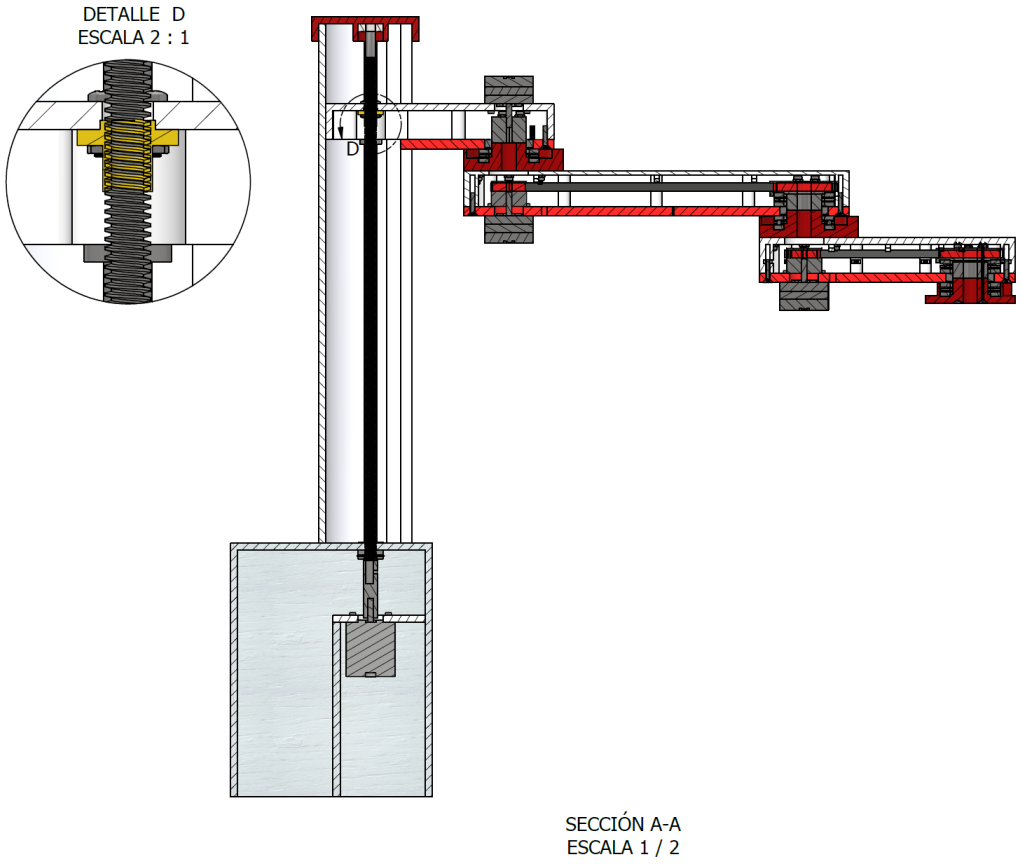
De igual manera, se observa que la posición más lejana del efector final en el eje X es de $488\,\text{mm}$. Al restar la distancia correspondiente al primer eslabón ($88\,\text{mm}$), se obtiene un alcance máximo de $400\,\text{mm}$, lo cual también concuerda con el espacio de trabajo planteado. Esta coherencia entre el modelo matemático y los límites físicos del robot confirma que el diseño cumple con los requerimientos operativos establecidos.

5.4. Planteamiento del Mecanismo de Tornillo Sin Fin y Tuerca para la Articulación Prismática

En el diseño del robot SCARA de tipo PRRR, la articulación prismática constituye el pilar principal que soportará tanto las demás articulaciones como la carga total del sistema. Para garantizar un movimiento lineal preciso y robusto en esta articulación, se propone el uso de un mecanismo de tornillo sin fin y tuerca tal como se observa en la Figura 20 . Este

mecanismo es ampliamente utilizado en aplicaciones donde se requiere alta capacidad de carga, precisión en el desplazamiento y resistencia al retroceso Norton (2011).

Figura 20



Nota: Se puede observar el detalle ”D” del mecanismo del tornillo sin fin junto a la tuerca (pieza amarilla) anclada al primer eslabón. Fuente: Elaboración Propia

El funcionamiento del mecanismo se basa en la transmisión del movimiento rotacional del tornillo a un movimiento lineal de la tuerca, la cual está acoplada a la estructura móvil de la articulación. Al emplear un tornillo sin fin, se logra una relación de transmisión elevada, permitiendo un control exacto de la posición de la articulación prismática mediante pequeños desplazamientos angulares en el motor de accionamiento Shigley, Mischke, y Budynas (2010).

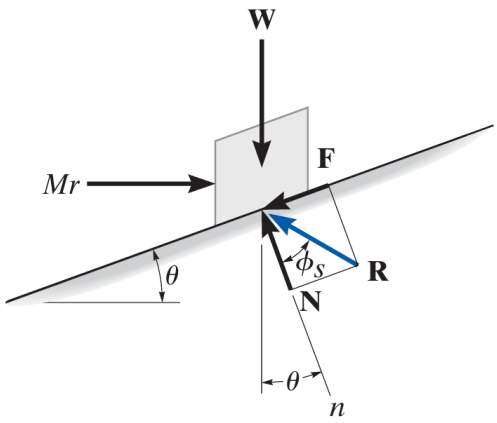
Además, este mecanismo presenta las siguientes ventajas:

- **Capacidad de carga elevada**: Gracias al diseño del tornillo y la tuerca, el sistema puede soportar tanto el peso de las demás articulaciones como la carga útil del robot, manteniendo la estabilidad estructural (Norton, 2011)
- **Precisión y repetibilidad**: El paso del tornillo puede ajustarse para obtener desplazamientos lineales mínimos por vuelta, garantizando un control detallado del movimiento. (Shigley y cols., 2010).
- **Resistencia al retroceso**: La naturaleza autolock del tornillo sin fin evita deslizamientos involuntarios bajo carga estática, incrementando la seguridad y estabilidad del robot (Norton, 2011).
- **Durabilidad**: Los materiales y tratamientos del tornillo y la tuerca aseguran un buen desempeño en condiciones de operación prolongadas y de alta exigencia (Shigley y cols., 2010).

La implementación de este mecanismo no solo asegura un rendimiento confiable para el pilar principal del robot, sino que también simplifica el diseño al integrar un sistema mecánico compacto y eficiente. Este planteamiento técnico responde a los requerimientos de precisión, fuerza y robustez necesarios para el diseño del robot SCARA propuesto (Norton, 2011; Shigley y cols., 2010).

5.4.1. Cálculo de un Tornillo de Potencia para un Plano Inclinado

Figura 21



Nota: En la figura se muestra la descomposición de las fuerzas de un bloque sobre un plano inclinado. Fuente: (Hibbeler, 2009)

Datos conocidos

- Carga (W): 5 kg.
- Recorrido (L): 410 mm = 0.41 m.
- Velocidad lineal (v): 0.05 m/s.
- RPM del motor: 800 RPM.
- Coeficiente de fricción (μ): para acero inoxidable, $\mu \approx 0.15$.
- Paso del tornillo (p): desconocido, a determinar.
- Ángulo de hélice (λ): depende del paso y el diámetro nominal (d) del tornillo.

Relación entre velocidad lineal y velocidad angular

La velocidad lineal está relacionada con el paso del tornillo y las revoluciones por minuto (n) mediante la fórmula:

$$v = p \cdot \frac{n}{60}$$

Despejando el paso p:

$$p = \frac{v \cdot 60}{n}$$

Sustituyendo los valores:

$$p = \frac{0.05 \cdot 60}{800} = 0.00375\,\text{m} = 3.75\,\text{mm}$$

Por lo tanto, el paso del tornillo es $p = 3.75\,\text{mm}$.

Cálculo del ángulo de hélice (λ)

El ángulo de hélice (λ) se calcula mediante la fórmula:

$$\tan(\lambda) = \frac{p}{\pi \cdot d}$$

Sustituyendo un valor inicial estimado para el diámetro nominal $d = 10\,\text{mm}$:

$$\tan(\lambda) = \frac{3.75}{\pi \cdot 10} \approx 0.119$$

Despejando λ:

$$\lambda \approx \arctan(0.119) \approx 6.8^\circ$$

Por lo tanto, el ángulo de hélice es aproximadamente 6.8°.

Fuerza axial y par de torsión

La fuerza axial necesaria para mover la carga está dada por:

$$F_a = W \cdot g = 5 \cdot 9.81 = 49.05\,\text{N}$$

El par de torsión necesario para vencer la fricción y mover la carga es:

$$T = \frac{F_a \cdot d_m}{2} \cdot (\tan(\lambda + \phi))$$

Donde:

- d_m: diámetro medio del tornillo ($d_m = d - \frac{p}{2}$).
- ϕ: ángulo de fricción ($\tan(\phi) = \mu$).

Calculamos d_m:

$$d_m = 10 - \frac{3.75}{2} = 8.125\,\text{mm} = 0.008125\,\text{m}.$$

Calculamos ϕ:

$$\phi = \arctan(\mu) = \arctan(0.15) \approx 8.53^\circ$$

Sustituyendo en la ecuación del par de torsión:

$$\tan(\lambda + \phi) = \tan(6.8^\circ + 8.53^\circ) = \tan(15.33^\circ) \approx 0.274$$

Finalmente, calculamos el par de torsión T:

$$T = \frac{49.05 \cdot 0.008125}{2} \cdot 0.274 \approx 0.0547\,\text{N*m}.$$

Relación con el motor

El motor debe proporcionar suficiente torque para superar esta fuerza y girar el tornillo a 800 RPM. Verificamos que el torque requerido está dentro del rango típico de un motor NEMA 17, que puede proporcionar entre 0.2 N*m y 0.5 N*m.

El paso del tornillo es 3.75 mm, el diámetro nominal es 10 mm, y el par de torsión necesario es 0.0547 N*m. Este diseño sigue siendo adecuado para un motor NEMA 17 y cumple con las condiciones de velocidad y carga para un recorrido de 410 mm.

5.5. Uso de Poleas Dentadas para la Trasmisión de Movimiento en los Eslabones del Robot SCARA

Inicialmente, se planteó el diseño del robot SCARA con un motor NEMA 17 conectado directamente a cada una de sus articulaciones. Sin embargo, durante el proceso de modelado en Autodesk Inventor®, se identificó que no se contaba con el espacio suficiente para gestionar los cables de conexión entre las articulaciones, dado que la intención era que estos quedaran dentro de las mismas. Esta decisión se tomó con dos fines principales:

1. Mantener la estética minimalista del robot.

2. Permitir que la articulación 3 sea capaz de girar 360°, ya que los eslabones están dispuestos en forma escalonada.

Este inconveniente llevó a replantear el sistema de transmisión de movimiento, por lo que decidimos optar por un mecanismo de poleas dentadas, que ofrece la ventaja de permitir la transmisión del movimiento de manera eficiente sin la necesidad de ocupar espacio adicional dentro de las articulaciones. Estas poleas tendrán agujeros en sus centros, lo que permitirá el paso de los conductores a travéz de las articulaciónes, sin afectar a la movilidad ni la estética del robot. A continuación, el la Figura 22 se muestra el sistema de transmision de movimiento propuesto.

Figura 22

Nota: El sistema de consta de 2 poleas dentadas y una correa dentada que permitirá la transmisión del movimiento para cada eslabón del robot. Fuente: Amazon México (2025)

5.5.1. Justificación del uso de poleas dentadas

Las poleas dentadas representan una excelente solución para la transmisión de movimiento en el diseño de un robot SCARA debido a sus características de eficiencia, bajo peso y capacidad de transmisión suave. Este sistema es especialmente útil en aplicaciones donde se requiere una combinación de precisión, versatilidad y facilidad de mantenimiento. (Norton, 2011)

A continuación, en la Tabla 4, se presenta una comparación entre las poleas dentadas y otros sistemas de transmisión como los engranajes y el piñón-cremallera, resaltando sus

ventajas y desventajas principales:

Tabla 4

Comparación de sistemas de transmisión

Criterio	Poleas dentadas	Engranajes	Piñón-cremallera
Precisión	Buena precisión para sistemas que no requieren posicionamiento extremo (±0.5 mm).	Alta precisión gracias a la transmisión directa (±0.1 mm o menos).	Muy alta precisión en aplicaciones lineales, pero con mayor complejidad mecánica.
Peso	Ligeras, ideales para reducir la carga en robots SCARA.	Pesados, especialmente si se usan materiales metálicos.	Moderadamente pesados debido a la estructura de cremallera y piñones metálicos.
Ruido	Bajo nivel de ruido gracias al contacto suave de la correa.	Ruidosos, especialmente a altas velocidades.	Ruido moderado dependiendo de los materiales.
Costo	Económicas y fáciles de fabricar.	Más costosos debido a la precisión requerida en la fabricación.	Altos costos de fabricación y mantenimiento.
Mantenimiento	Bajo, no requieren lubricación y son resistentes al desgaste.	Alto, requieren lubricación constante y ajustes.	Alto, debido a la necesidad de ajuste y lubricación regular.
Versatilidad	Muy versátiles, permiten diseños compactos y distancias entre ejes variables.	Limitados a distancias cortas entre ejes.	Ideales para movimientos lineales, pero requieren mayor espacio.
Eficiencia energética	Alta eficiencia (>95 %) si se mantiene bien tensada.	Muy alta eficiencia (>95 %).	Moderada (80-90 %) debido a la fricción.
Velocidad	Adecuadas para velocidades medias a altas.	Excelentes para altas velocidades.	Buen desempeño en velocidades moderadas.

Nota: Las comparaciones están basadas en un análisis general y pueden variar dependiendo del diseño específico de cada sistema de transmisión. Las eficiencias energéticas son valores típicos reportados en la literatura.

5.5.2. Ventajas específicas de las poleas dentadas

1. **Reducción de peso y tamaño**: Las poleas dentadas son ligeras y compactas, lo que es ideal para aplicaciones en robots SCARA.
2. **Transmisión suave**: Ofrecen un movimiento continuo y sin retrocesos, mejorando la precisión en tareas repetitivas.
3. **Bajo mantenimiento**: No requieren lubricación constante, lo que reduce los costos operativos.
4. **Flexibilidad de diseño**: Permiten transmitir movimiento entre ejes separados, adaptándose a diversas configuraciones.
5. **Costo competitivo**: Son más económicas y fáciles de reemplazar que otros sistemas.

5.5.3. Dimensionamiento del sistema de transmisión con poleas dentadas

El diseño del sistema de transmisión con poleas dentadas para el robot SCARA se realizó considerando las características geométricas de los eslabones, las limitaciones de tamaño y la disponibilidad de componentes comerciales. A continuación, se detallan los cálculos realizados y los ajustes necesarios para seleccionar componentes comercialmente disponibles. (Juvinall y Marshek, 2011)

Datos iniciales

Para el dimensionamiento se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- **Eslabón 2:** distancia entre el eje del motor y el eje de transmisión ($L_2 = 256\,\text{mm}$). Este eslabón soporta el peso del eslabón 3, la herramienta de sujeción y la pieza a transportar.
- **Eslabón 3:** distancia entre el eje del motor y el eje de transmisión ($L_3 = 144\,\text{mm}$). Este eslabón soporta la herramienta de sujeción y la pieza a transportar.
- **Motor:** motores paso a paso NEMA 17 ($200\,\text{pasos/rev}$).
- **Restricción:** el diámetro máximo de las poleas no debe exceder $60\,\text{mm}$.

Cálculo inicial de parámetros

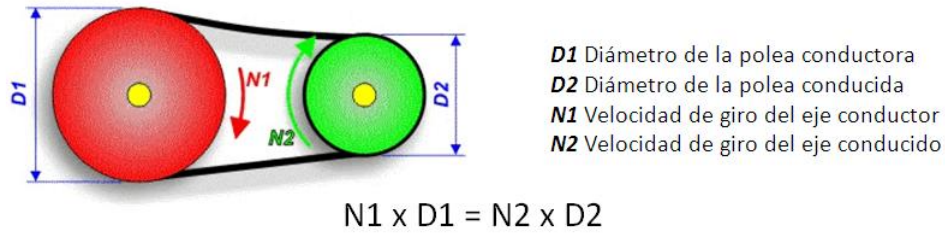
Relación de transmisión (R)

Para garantizar suficiente torque y una operación precisa en el robot SCARA, se seleccionó una relación de transmisión inicial de $R = 2:1$.

Diámetro y número de dientes de las poleas

La relación entre el diámetro de las poleas motriz (D_1) y conducida (D_2) está dada por la siguiente ecuación, tal como se muestra en la Figura 23:

Figura 23



Nota: En la figura se observas la relación de diámetros y velodidades del sistema de trasmisión por poleas. Fuente: Eudotec (2013)

$$R = \frac{D_2}{D_1}$$

Suponiendo un diámetro inicial de la polea motriz de $D_1 = 30\,\text{mm}$, el diámetro de la polea conducida es:

$$D_2 = R \cdot D_1 = 2 \cdot 30 = 60\,\text{mm}.$$

El número de dientes se calcula como:

$$N = \frac{\pi \cdot D}{P}$$

Donde $P = 5\,\text{mm}$ es el paso de la correa. Para $D_1 = 30\,\text{mm}$ y $D_2 = 60\,\text{mm}$:

$$N_1 = \frac{\pi \cdot 30}{5} \approx 19\,\text{dientes}, \quad N_2 = \frac{\pi \cdot 60}{5} \approx 38\,\text{dientes}.$$

Ajuste a valores comerciales

Dado que las poleas dentadas comerciales están normalizadas, se seleccionaron componentes con parámetros ajustados según el perfil HTD5M:

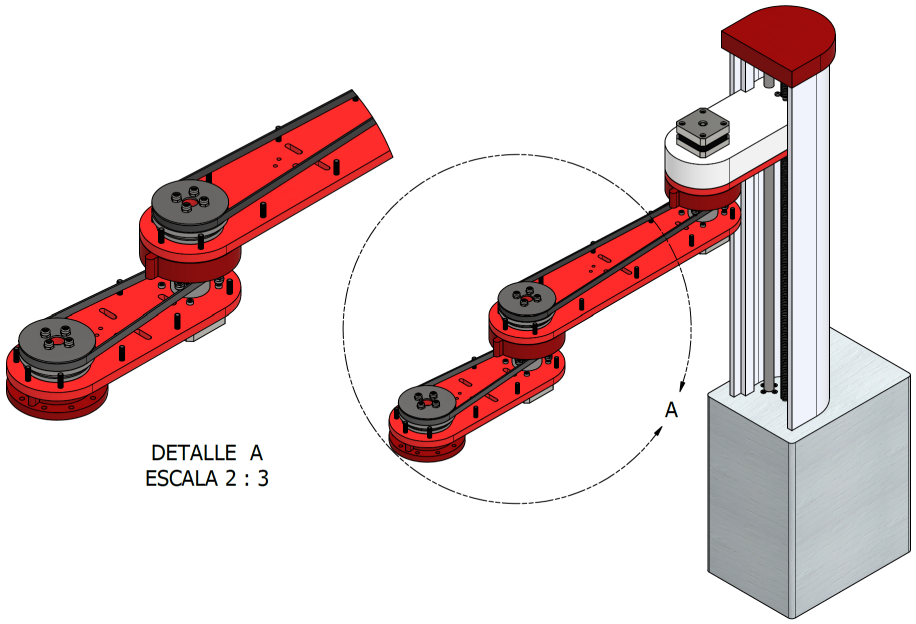
- **Polea motriz (D_1):**
  - Número de dientes: $N_1 = 16$.
  - Diámetro: $D_1 = \frac{N_1 \cdot P}{\pi} = \frac{16 \cdot 5}{\pi} \approx 25.46\,\text{mm}$.
- **Polea conducida (D_2):**
  - Número de dientes: $N_2 = 32$.
  - Diámetro: $D_2 = \frac{N_2 \cdot P}{\pi} = \frac{32 \cdot 5}{\pi} \approx 50.93\,\text{mm}$.

Estos valores garantizan que la relación de transmisión sea:

$$R = \frac{N_2}{N_1} = \frac{32}{16} = 2:1$$

El sistema de transmisión con poleas dentadas diseñado para los eslabones 2 y 3 del robot SCARA cumple con las restricciones geométricas y asegura una operación eficiente y precisa. Las poleas seleccionadas, con $N_1 = 16$ y $N_2 = 32$, están disponibles comercialmente, facilitando la implementación y el mantenimiento del sistema. En la Figura 24 se muestra el diseño del sistema de transmisión de poleas dentadas para los eslabones 2 y 3 del robot.

Figura 24



Nota: El sistema de consta de 2 poleas dentadas y una correa dentada que permitirá la transmisión del movimiento para cada eslabón del robot. Fuente: Elaboración Propia

5.5.4. Relación de Velocidad y Torque

La relación de velocidad i en un sistema de poleas se define como la razón entre el número de dientes de la polea impulsora (conectada al motor) y el número de dientes de la polea conducida (conectada a la articulación) (Norton, 2011). Para ambos eslabones, la relación de velocidad se calcula de la siguiente manera:

$$i = \frac{N_{\text{motor}}}{N_{\text{articulación}}} = \frac{16}{32} = 0.5$$

Esto indica que la velocidad de la articulación será 0.5 veces la velocidad del motor. Por lo tanto, el motor gira a una velocidad mayor que la articulación, lo que se traduce en una reducción de la velocidad en las articulaciones.

El torque transmitido $T_{\text{articulación}}$ en un sistema de poleas es proporcional al inverso de la relación de velocidad y se calcula como:

$$T_{\text{articulación}} = T_{\text{motor}} \cdot i^{-1} = T_{\text{motor}} \cdot \frac{1}{0.5} = T_{\text{motor}} \cdot 2$$

Esto significa que el torque en la articulación será 2 veces el torque proporcionado por el motor.

El aumento del torque en las articulaciones resulta conveniente en este diseño, ya que permite mejorar la capacidad de carga y la eficiencia del robot al realizar tareas de manipulación. Al incrementar el torque en las articulaciones, se garantiza que el robot pueda mover cargas más pesadas sin necesidad de utilizar motores de mayor tamaño, lo que también contribuye a la reducción de costos y al mantenimiento de un diseño más compacto y eficiente.

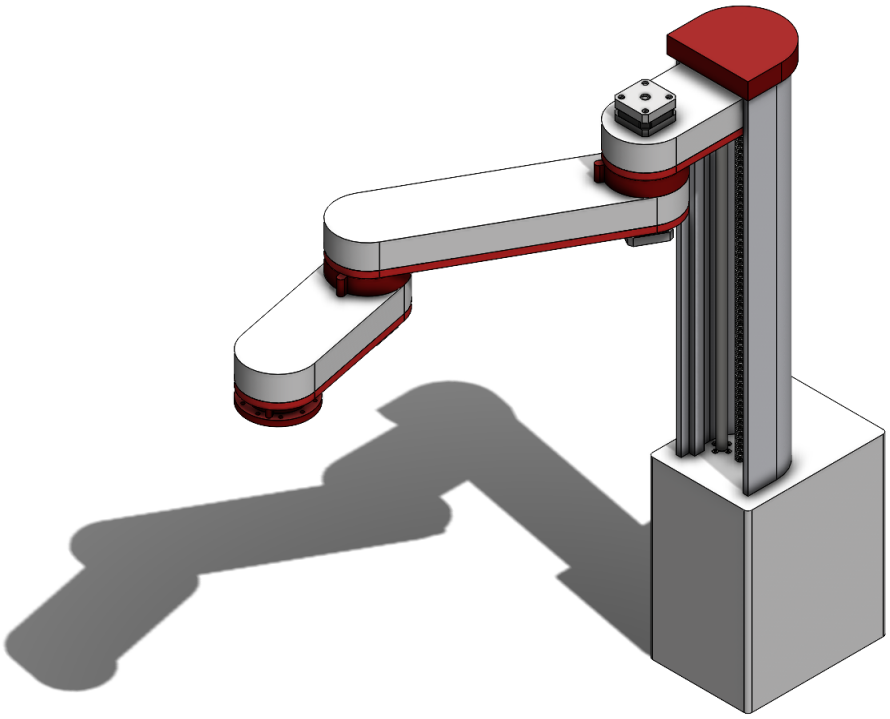
Esta amplificación del torque se logra gracias al sistema de poleas dentadas, que ofrece una ventaja adicional al disminuir la velocidad de las articulaciones sin comprometer su capacidad de carga, permitiendo así una mayor precisión y control en los movimientos.

5.6. Modelado 3D del Robot SCARA

5.6.1. Modelado del robot en Autodesk Inventor® y SolidWorks®

El modelado tridimensional del robot SCARA PRRR se llevó a cabo utilizando los programas de diseño asistido por computadora (CAD) Autodesk Invento® y SolidWorks®. Estas herramientas permiten la creación de modelos precisos a partir de las dimensiones previamente definidas del robot, facilitando la visualización y análisis del diseño. En esta etapa se definieron los componentes mecánicos del robot, como sus eslabones, juntas y la disposición de los actuadores. A continuación en la Figura 25 se muestra el diseño final del robot SCARA PRRR.

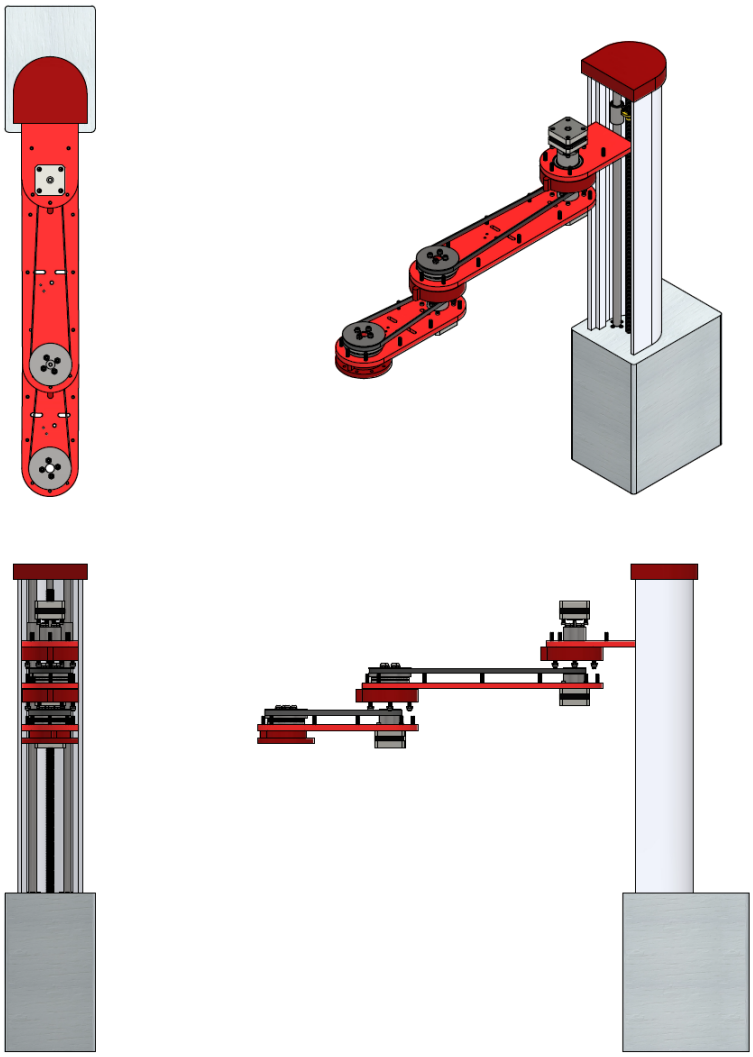
Figura 25



Nota: En la figura se presenta el diseño final 3D del robot SCARA, realizado en Solidworks®. Fuente: Elaboración Propia.

Como se sabe, el diseño interno del robot SCARA es muy importante para entender el funcionamiento de cada mecanismo, por lo cual se presenta en la Figura 26 los componentes internos de cada eslabón en las 4 vistas: Lateral, frontal, superior e isométrica.

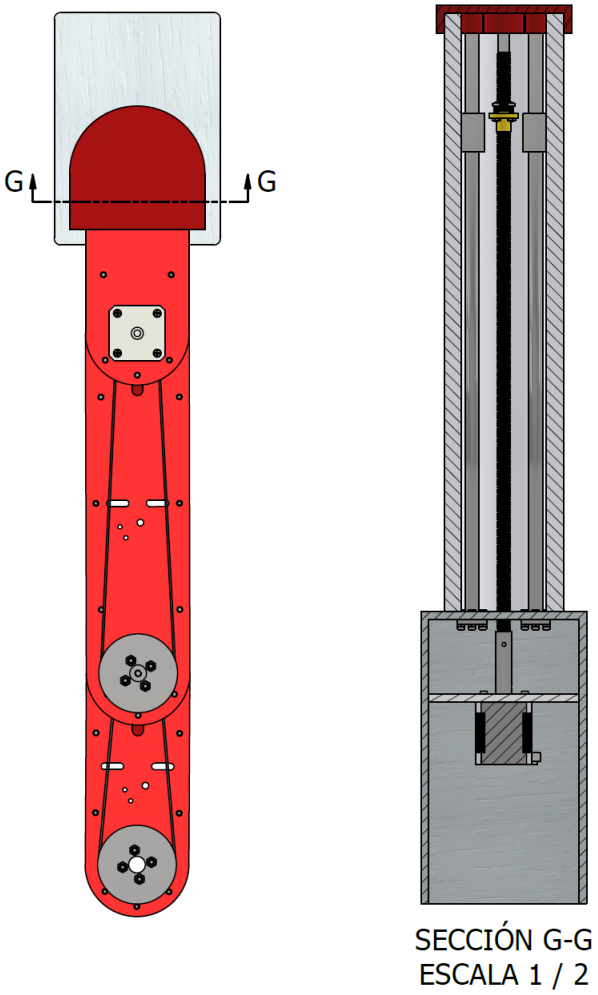
Figura 26



Nota: En la Figura 26 se presenta el diseño final 3D del robot SCARA la cual se observa una vista lateral, frontal y superior pero aqui se muestra los componentes internos, es decir sin sus tapas. El diseño está realizado en Solidworks®. Fuente: Elaboración Propia.

En el diseño del tornillo, para que tenga una mejor estabilización, se incluyen 2 ejes guías para que el desplazamiento superior e inferior de los eslabones sea lineal. A continuación, en la figura 27 se presenta el diseño del tornillo y los ejes guías.

Figura 27



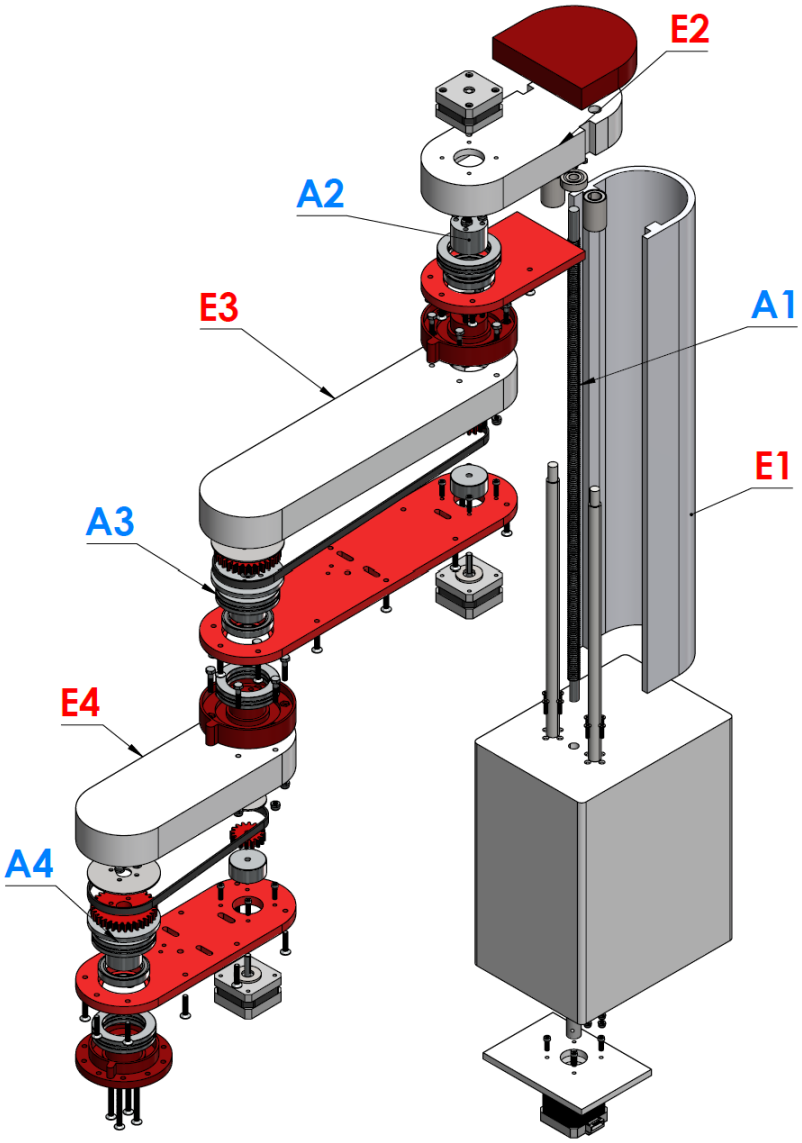
Nota: Se observa el diseño final del tornillo con sus ejes guías en la vista frontal y superior. Fuente: Elaboración Propia.

5.6.2. Explosionado del robot

A continuación, se presenta el explosionado del robot SCARA el cual muestra todas las uniones, eslabones, articulaciones que componen el robot. Además muestra todos los componentes mecánicos y electricos como: tuercas, tornillos, ejes, motores, cojinetes, etc. Esta vista permite tener un concepto claro de la posición específica de cada pieza tal como se puede

observar en la Figura 28.

Figura 28

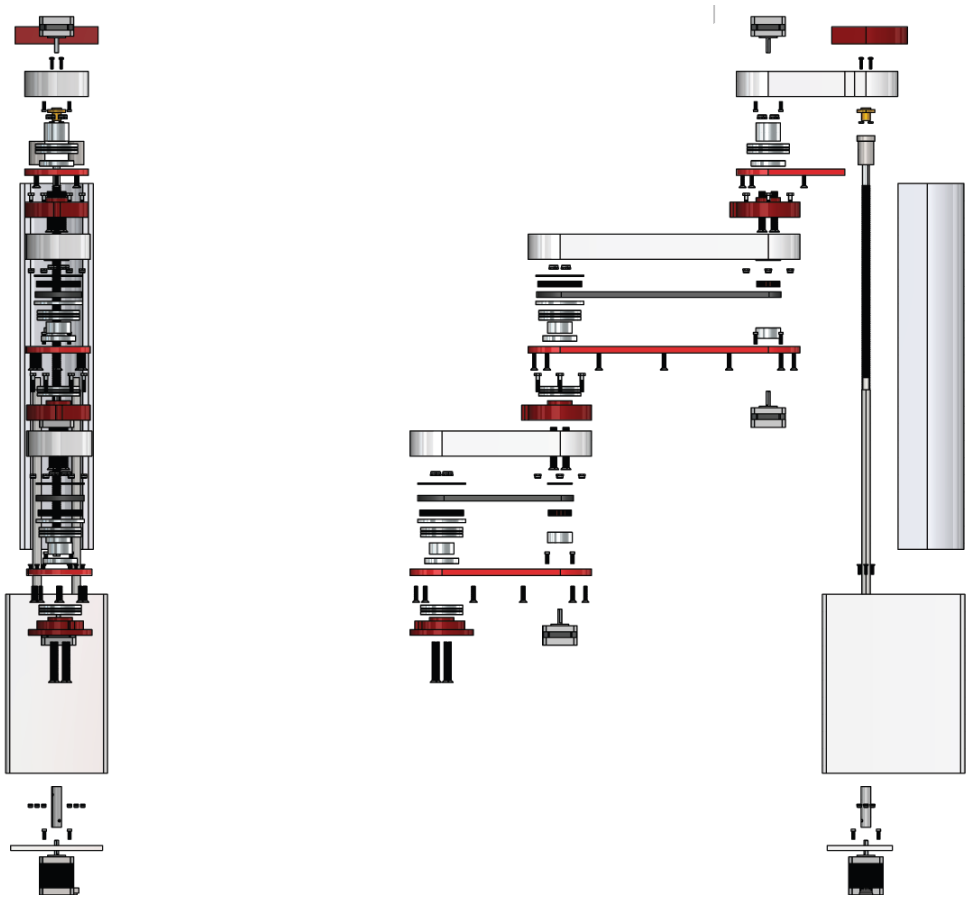


Nota: En la Figura 28 se observa la explosión del ensamble, esto ayuda a ver los elementos internos de cada articulación y eslabon que compone el Robot, la letra E hace referencia a los eslabones y la letra A las articulaciones. Fuente: Elaboración Propia

Para una mejor visualización de cada componente mecánico y eléctrico se presenta en la

Figura 29 una vista frontal y lateral del diseño del robot.

Figura 29



Nota: En la Figura 29 se observa la explosión del ensamble, en este caso en vista frontal y lateral. Fuente: Elaboración Propia

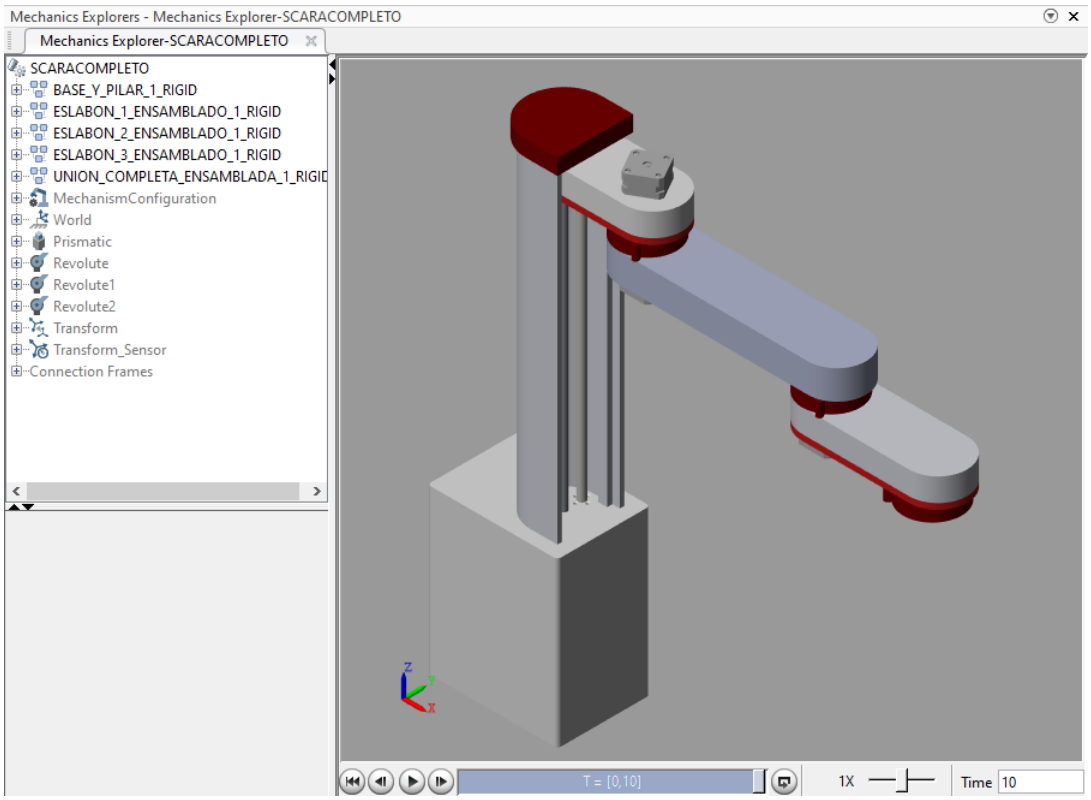
5.7. Simulaciones del modelo

5.7.1. Exportación de SolidWorks® a MATLAB Simulink® mediante SimMechanics Link

Una vez finalizado el modelado 3D, se procedió a la exportación del modelo desde SolidWorks® a MATLAB Simulink® utilizando la herramienta SimMechanics Link. Esta herramienta permite convertir el modelo CAD en un modelo dinámico que puede ser simulado dentro de Simulink. Como se puede observar en la Figura 30. Durante el proceso de exportación,

se aseguraron las conexiones de los elementos y se verificaron las propiedades de los materiales y restricciones.

Figura 30

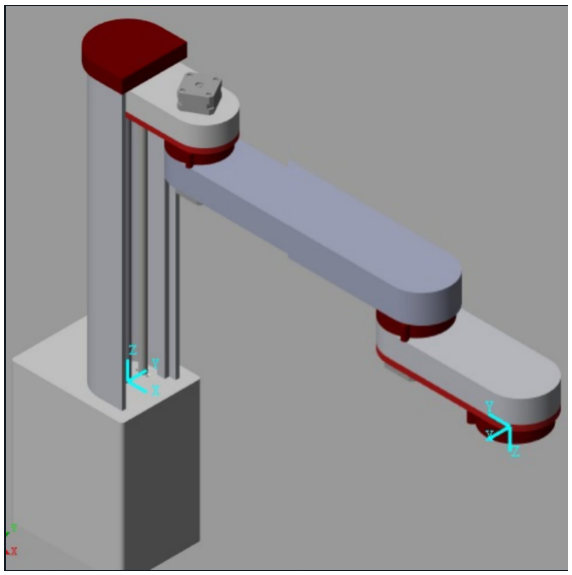


Nota: Robot Scara completo mostrado en el entorno de Matlab - Simulink® Fuente: Elaboración Propia

5.7.2. Ajuste de ejes de referencia y programación de trayectoria

Después de la importación del modelo a Simulink®, se realizó un ajuste de los ejes de referencia, específicamente el eje de referencia inicial, en la base del robot y el eje de referencia del efector final (esto se evidencia en la Figura 31) para garantizar una correcta correspondencia con el sistema de coordenadas utilizado en los análisis posteriores de cinemática directa.

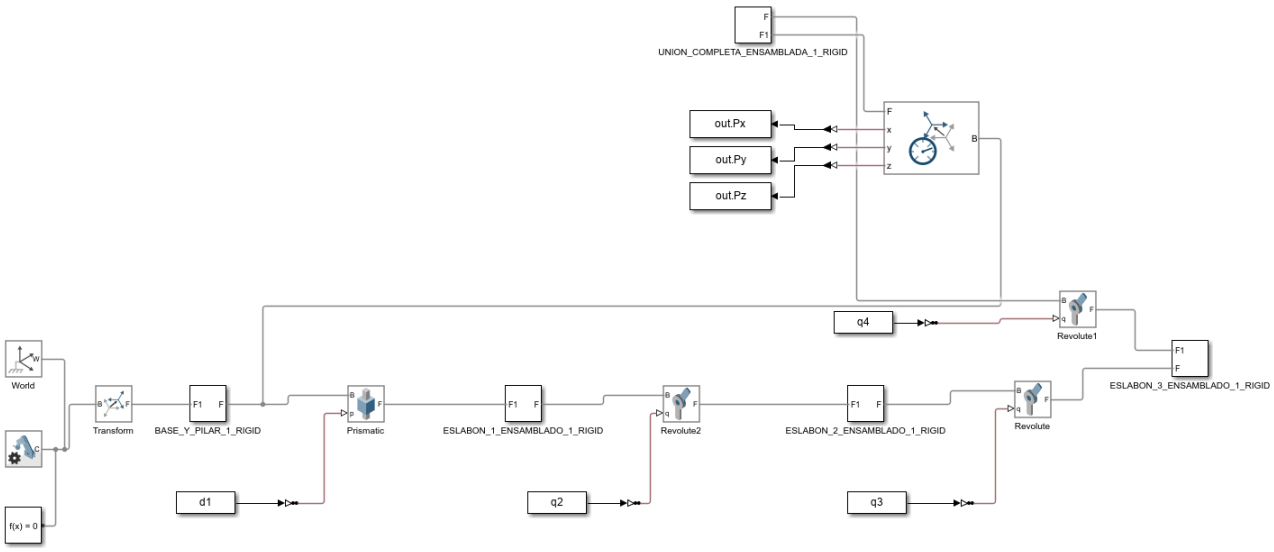
Figura 31



Nota: Se muestra los ejes de referencia, el principal desde la base del robot y del efector final. Fuente: Elaboración Propia

Para guardar las posiciones del efector final y proporcionar un movimiento a cada una de las articulaciónes, se realizó unas modificaciones en el entorno de bloques de simulink. Esto se aprecia en la Figura 32.

Figura 32



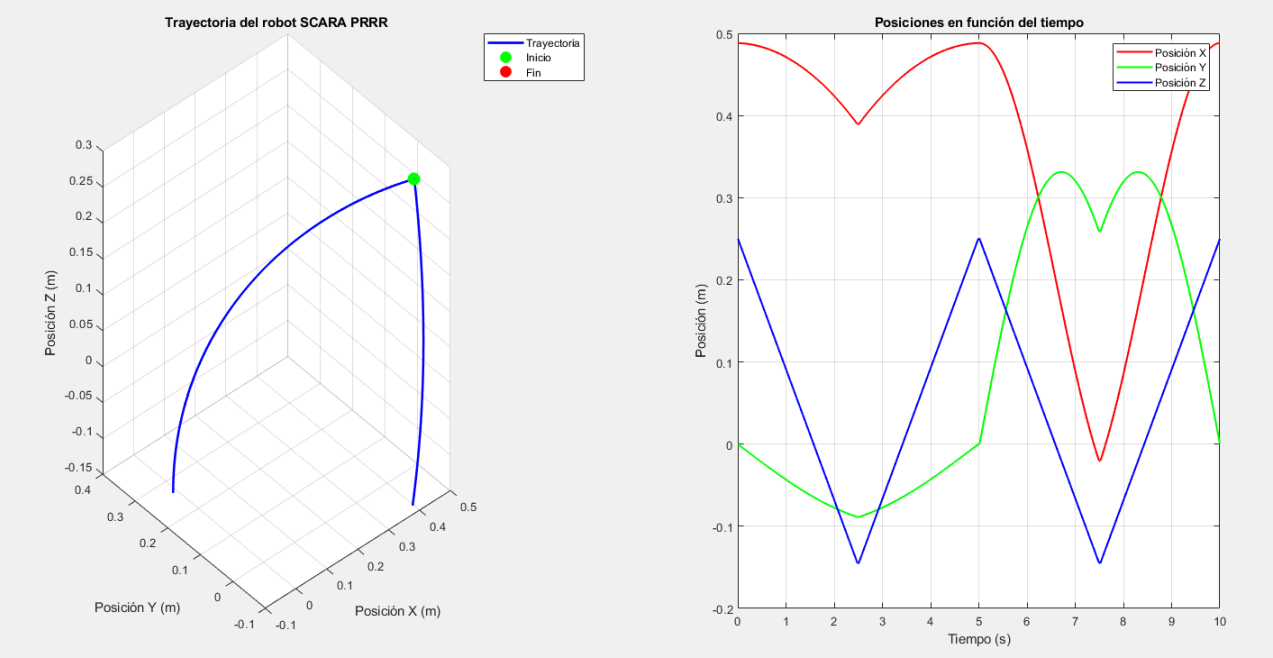
Nota: Se añade los bloques para la lectura de la posición del efector final y la entrada de movimientos en cada articulación. Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se programó una trayectoria de movimiento para el robot utilizando scripts de MATLAB®, este movimiento simula la principal taerea de "pick and place", describiento las siguientes trayectorias en orden:

- 1. Parte desde "HOME"(Articulación prismática en lo más alto y las aritculaciónes rotativas en 0°). Y se mueven todas las articulaciónes, describiendo una trayectoria curva hacia abajo a la derecha.
- 2. Suponiendo que toma la pieza, regresa a la posición de "HOME".
- 3. Trayectoria curva hacia abajo a la izquierda, suponiendo que baja la pieza tomada hasta la zona de almacenamiento.
- 4. Suponiendo que suelta la pieza, regresa a la posición de "HOME".

Se obtuvieron los vectores de posición en los ejes X, Y y Z. Dando las gráficas de trayectoria en tres ejes y posición de cada eje respecto al tiempo, que se muestra en la Figura 33.

Figura 33

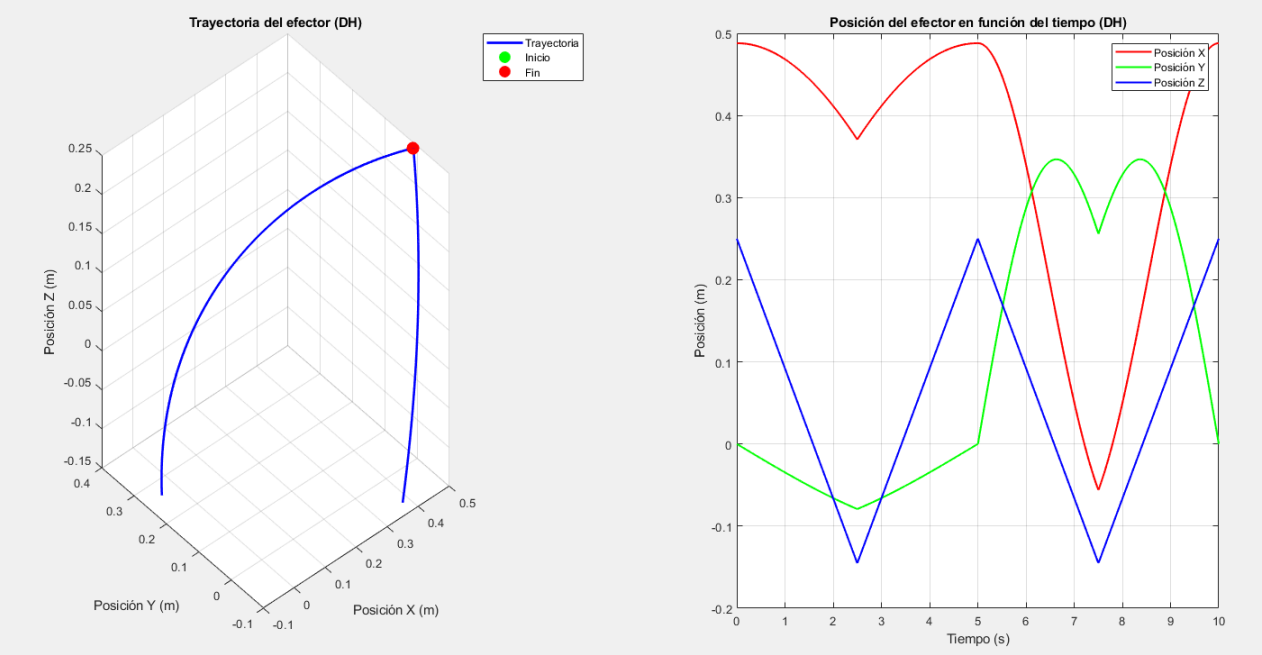


Nota: Al lado izquiero se muestra la trayectória del efector final en X, Y, Z. En el lado derecho se muestra las posiciónes de cada eje en función del Tiempo, del Robot de Simulink. Fuente: Elaboración Propia

5.7.3. Cinemática directa mediante parámetros de Denavit-Hartenberg

Para validar los resultados obtenidos mediante la simulación en Simulink, se realizó la programación de la misma trayectoria utilizando la matriz de cinemática directa derivada de los parámetros de Denavit-Hartenberg, referenciando la Figura 34. Esto permitió calcular la posición del efector final a lo largo de la trayectoria y compararla con los resultados de la simulación.

Figura 34



Nota: Al lado izquiero se muestra la trayectória del efector final en X, Y, Z. En el lado derecho se muestra las posiciónes de cada eje en función del Tiempo, utilizando la matriz de cinemática directa. Fuente: Elaboración Propia

5.7.4. Comparación de resultados y cálculo del error

Los resultados de ambas simulaciones fueron comparados mediante la superposición de las trayectorias obtenidas. Evidenciando, en las Figuras 33 y 34, ser practicamente iguales, reforzando la idea de que los cálculos realizados y la simulación del modelo se hicieron de manera adecuada. Para reforzar esto, se calculó el error entre las posiciones resultantes, como se puede observar en la siguiente Tabla 5.

Tabla 5

Comparación de trayectorias y cálculo de error entre Denavit-Hartenberg y Simulink

X Smlink	X D-H	Error %	Y Smlink	Y D-H	Error %	Z Smlink	Z D-H	Error %
0,488	0,488	0,041	0,000	0,000	0,646	0,250	0,250	0,034
0,488	0,488	0,041	0,000	0,000	-0,299	0,250	0,249	0,240
0,488	0,488	0,042	0,000	-0,001	-0,820	0,250	0,248	0,832
0,488	0,488	0,042	0,000	-0,001	-0,850	0,250	0,247	1,009
0,488	0,488	0,042	0,000	-0,001	-0,854	0,250	0,247	1,170
0,389	0,371	4,997	-0,089	-0,066	0,438	-0,065	-0,066	-1,026
0,389	0,371	4,915	-0,089	-0,066	0,434	-0,065	-0,065	0,458
0,389	0,372	4,590	-0,089	-0,066	0,424	-0,068	-0,069	-1,127
0,389	0,373	4,513	-0,089	-0,066	0,422	-0,068	-0,069	-1,904
0,389	0,373	4,440	-0,089	-0,066	0,419	-0,069	-0,070	-1,279
0,488	0,488	0,041	0,000	-0,035	-1,244	0,093	0,092	0,884
0,488	0,488	0,042	0,000	-0,034	-1,244	0,093	0,093	-0,238
0,488	0,488	0,050	0,000	-0,034	-1,244	0,093	0,095	-2,409
0,488	0,488	0,054	0,000	-0,034	-1,244	0,093	0,092	0,217
0,488	0,488	0,059	0,000	-0,034	-1,244	0,093	0,096	-3,460
-0,050	-0,056	-10,202	0,259	0,286	-0,119	0,093	0,093	0,225
-0,050	-0,055	-8,192	0,259	0,288	-0,127	0,091	0,092	-0,264
-0,050	-0,054	-6,325	0,259	0,289	-0,132	0,091	0,091	0,536
-0,050	-0,053	-5,378	0,259	0,290	-0,134	0,090	0,090	0,001
-0,050	-0,052	-2,405	0,259	0,291	-0,141	0,087	0,089	-1,639
0,488	0,488	0,032	0,009	0,011	-0,226	0,245	0,245	-0,008
0,488	0,488	0,033	0,008	0,010	-0,252	0,246	0,246	0,016
0,488	0,488	0,033	0,007	0,009	-0,255	0,246	0,246	-0,005
0,488	0,488	0,038	0,003	0,004	-0,452	0,249	0,248	0,037
0,488	0,488	0,0387	0,002	0,003	-0,563	0,249	0,249	0,037
Total		-8,4199			-8,6565			-7,6614
% error		-0,3367			-0,3462			-0,3064

Encontrándose que el error promedio se encuentra entre un rango de 0.30 % y 0.40 %, lo que indica una alta precisión en la implementación del modelo cinemático.

5.8. Identificación de componentes electrónicos

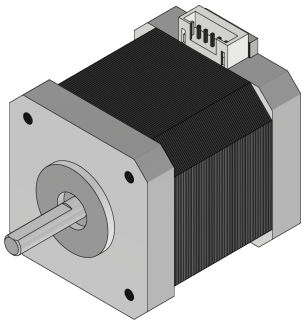
5.8.1. Identificación de componentes necesarios

Motor paso a paso

De acuerdo al apartado anterior, referente a los cálculos de torque y velocidad requerida para el correcto funcionamiento del robot se establece el uso del motor paso a paso NEMA 17.

Este tipo de motor tiene alta precisión en el control de posición, lo que lo hace ideal para aplicaciones como el movimiento de un brazo robótico SCARA. Además, es ampliamente utilizado en proyectos de automatización debido a su versatilidad, compatibilidad con controladores como el A4988, DRV8825 y TMC2209 por lo que es fácil encontrar en diversos locales de electronica a precios accesibles. Su capacidad para operar con microstepping permite un movimiento más suave y preciso, mientras que su tamaño compacto y eficiencia energética lo convierten en una opción confiable para sistemas mecánicos medianos o pequeños. A continuación se observa su diseño en la Figura 35.

Figura 35



Nota: Se puede observar el diseño del motor Nema 17. Fuente: Elaboración Propia

Entonces, una vez establecido la selección del motor, se procede con la selección de los componentes que ayudarán al control del motor NEMA 17.

Controladores para el motor

Estos permiten controlar con precisión el movimiento de motores paso a paso. Estos motores, a diferencia de los motores convencionales, avanzan en incrementos específicos

(pasos), lo que les permite ofrecer una alta precisión y repetibilidad en sus movimientos. Los controladores, como el A4988, DRV8825, TMC2209 y TB6600 que se presentan en la siguiente tabla comparativa, son responsables de gestionar la señal de control que dirige la secuencia de pasos del motor, permitiendo que el motor gire en incrementos exactos de acuerdo a las necesidades del sistema.

Cada uno de estos controladores tiene características distintas que los hacen adecuados para diferentes aplicaciones. En la Tabla 6, se muestra las características principales de cada uno de estos.

Tabla 6

Comparación de controladores de motores paso a paso

Características	**A4988**	**DRV8825**	**TMC2209**	**TB6600**
Corriente máxima por fase	2 A	1.5 A (2.2 A con disipador)	2 A (2.5 A con disipador)	Hasta 4.5 A
Voltaje máximo	35 V	45 V	28 V	45 V
Microstepping máximo	1/16	1/32	1/256	1/32
Ruido (operación)	Moderado	Moderado	Muy silencioso	Moderado
Protección térmica	Sí	Sí	Sí, con mayor eficiencia	Sí
Tecnologías avanzadas	No	No	UART, detección de carga	No
Tamaño físico	Compacto (placa pequeña)	Compacto	Compacto	Grande
Aplicaciones ideales	Baja potencia y simplicidad	Más torque y precisión	Silencio y precisión	Altos torques y cargas

Nota: Las características están basadas referente a la hoja de datos de cada uno de los controladores. Para más información se puede revisar en la página web de los fabricantes.

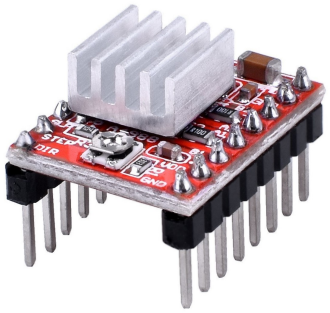
De acuerdo a las características de cada uno de los controladores, en la Figura 36 se muestra la selección del controlador A4988 del fabricante HiLetgo por diversas razones:

- **Costo y disponibilidad:** Es un controlador asequible y ampliamente disponible en el mercado lo que le convierte en una opción donde el costo es importante.
- **Compatibilidad:** Es compatible con motores NEMA 17, ya que son de baja a media potencia. Este controlador permite gestionar hasta maximo 2 A por fase, suficiente para

motores NEMA 17, y soporta microstepping, lo que mejora la precisión y suaviza el movimiento.

- **Facilidad de uso:** Este controlador es fácil de implementar con Raspberry Pi gracias a su interfaz simple (paso/dirección). Su bajo costo y la comunidad de usuarios que lo respalda proporcionan un entorno de desarrollo amigable y eficiente.

Figura 36



Nota: Controlador de motor paso a paso HiLetgo A4988. Fuente: Amazon México (2025)

Microcontroladores

Los microcontroladores son componentes electrónicos esenciales en sistemas de control y automatización. Actúan como la unidad central de procesamiento encargada de interpretar señales, ejecutar instrucciones y controlar dispositivos periféricos. (Wilmshurst, 2010)

En proyectos como robots y sistemas avanzados, elegir el microcontrolador adecuado es clave para optimizar compatibilidad, rendimiento y eficiencia. En la Tabla 7 se presenta una comparación de las características y aplicaciones del SKR Mini E3, Arduino Mega 2560 y Raspberry Pi, facilitando la selección según las necesidades del robot SCARA.

Tabla 7

Tabla comparativa de microcontroladores existentes en el mercado

Características	SKR Mini E3	Arduino Mega	Raspberry Pi
Procesador	STM32 (Cortex-M3, 32 bits)	ATmega 2560 (8 bits)	ARM (Cortex-A, 32/64 bits)
Velocidad del CPU	Alta (72 MHz)	Baja (16 MHz)	Muy alta (1.5 GHz o más)
Compatibilidad con controladores	Integrados (TMC2209, TMC2208)	Externos (DRV8825, A4988, etc)	Externos (DRV8825, A4988, etc)
Interfaz de conexión	Integrada para impresoras 3D	Pines GPIO	GPIO, USB, Ethernet
Capacidad de memoria	Amplia (32 KB SRAM, 256KB Flash)	Limitada (8KB SRAM, 256KB Flash)	Alta, (512MB - 8GB)
Costo	Moderado	Bajo	Alto
Aplicaciones ideales	Impresoras 3D, robots pequeños	Proyectos de robótica, automatización	Robótica avanzada

Nota: Las características están basadas referente a la hoja de datos de cada uno de los controladores. Para más información se puede revisar en la página web de los fabricantes.

En base a la tabla comparativa de los microcontroladores existentes en el mercado se opta por el microcontrolador Raspberry Pi 4 model B el cual se observa en Figura 37.

Figura 37

Nota: Los modelos Raspberry incluyen algunas variaciones, en este caso se opta por el Raspberry Pi 4 Model B. Fuente: Amazon México (2025)

La elección de este modelo se hace por diversas razones:

- **Versatilidad y Potencia:** Es un microcontrolador popular debido a su capacidad de procesamiento, conectividad y flexibilidad. Con un potente procesador ARM y varios puertos GPIO, es capaz de manejar múltiples tareas , controlar motores y comunicar con otros dispositivos.
- **Costo-beneficio:** En comparación con otros microcontroladores , la Raspberry Pi 4 ofrece un excelente balance entre costo y rendimiento. Su bajo costo de adquisición y su versatilidad la hacen ideal para proyectos en los que se necesita ejecutar algoritmos de control.
- **Facilidad de Integración:** La Raspberry Pi es compatible con una amplia variedad de librerías y software, incluyendo herramientas para controlar motores paso a paso. Esto facilita la integración con el A4988 y permite implementar estrategias de control de manera eficiente.

Fuente de alimentación

La fuente de alimentación es un componente muy importante, ya que proporciona la energía necesaria para el funcionamiento de los microcontroladores, controladores de motor y motores paso a paso como es este caso, los NEMA 17. Además, es fundamental considerar aspectos como el voltaje, la corriente y la capacidad para manejar variaciones en la carga del sistema, asegurando un rendimiento confiable en aplicaciones como robots y sistemas embebidos. A continuación, se muestra en la Tabla 8 las especificaciones de fuentes de alimentación existentes en el mercado.

Tabla 8

Comparativa de fuentes de alimentación recomendadas

Modelo	**Voltaje**	**Corriente**	**Potencia**	**Uso recomendado**	**Costo**
Mean Well LRS-200-24	24 V	8.3 A	200 W	Sistemas con hasta 4 motores NEMA 17	$25 - $35
Mean Well NES-350-24	24 V	14.6 A	350 W	Sistemas con más de 4 motores	$40 - $50

Tabla 8 – continuación

Modelo	**Voltaje**	**Corriente**	**Potencia**	**Uso recomendado**	**Costo**
Mean Well LRS-100-12	12 V	8.5 A	102 W	Sistemas pequeños o medianos	$20 - $30
Fuente de alimentación genérica	24 V	10 A	240 W	Alternativa económica	$15 - $25

Nota: Las especificaciones se basan información obtenida de la página web de los fabricantes.

En base a la Tabla 8 , se escoge el modelo Mean Well LRS-200-24 por diversos motivos:

- **Voltaje y corriente adecuados:** Proporciona una salida de 24V y 8.3A, lo cual es ideal para alimentar tanto los controladores del motor A4988 como los motores NEMA 17. Este voltaje y corriente son suficientes para manejar los motores de forma eficiente, garantizando un suministro estable sin sobrecargar los componentes.
- **Fiabilidad y durabilidad:** Mean Well es conocida por producir fuentes de alimentación de alta calidad, duraderas y confiables. La LRS-200-24 cuenta con una buena regulación de voltaje y bajo nivel de ruido.
- **Costo eficiente:** Aunque las fuentes de alimentación de marca suelen ser más caras que las opciones genéricas, la LRS-200-24 ofrece una excelente relación calidad-precio. La eficiencia y durabilidad de esta fuente justifica la inversión, reduciendo riesgos de fallas en el sistema.

En la Figura 40 se presenta el modelo de fuente de alimentación optada.

Figura 38

Nota: Mean Well incluye en su catálogo un sinnúmero de modelos de fuentes de almientación de acuerdo a la necesidad del usuario, en este caso se opta por el modelo LRS-200-24. Fuente: Amazon México (2025)

5.9. Identificación de componentes Mecánicos

5.9.1. Selección de materiales de partes a Manufacturar

La selección de materiales es un aspecto crucial en el diseño de un robot SCARA, ya que influye directamente en su peso, costo, resistencia y facilidad de fabricación. En este proyecto, se han seleccionado materiales accesibles y económicos para garantizar un diseño funcional y de bajo costo. A continuación, se detalla la elección de materiales para los principales componentes del robot:

Base del robot

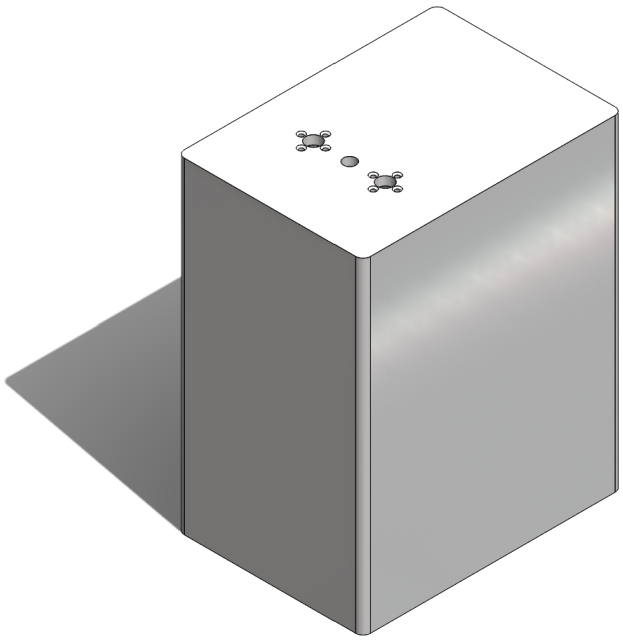
La base del robot SCARA está diseñada para proporcionar estabilidad y soporte a todo el sistema. Se observa en la Figura 39. Por ello, se ha seleccionado aluminio como material principal debido a sus características:

- **Alta resistencia mecánica:** El aluminio es capaz de soportar las cargas estáticas y

dinámicas generadas durante el funcionamiento del robot.

- **Peso ligero:** Reduce el peso total del robot, facilitando su manipulación e instalación.
- **Resistencia a la corrosión:** Aumenta la durabilidad del robot en entornos industriales.
- **Facilidad de mecanizado:** Permite la fabricación precisa de la base a un costo razonable.

Figura 39



Nota: Se muestra la base del robot SCARA que incluye una vista isométrica la cual está elaborado en el software Solidworks®. Fuente: Elaboración Propia.

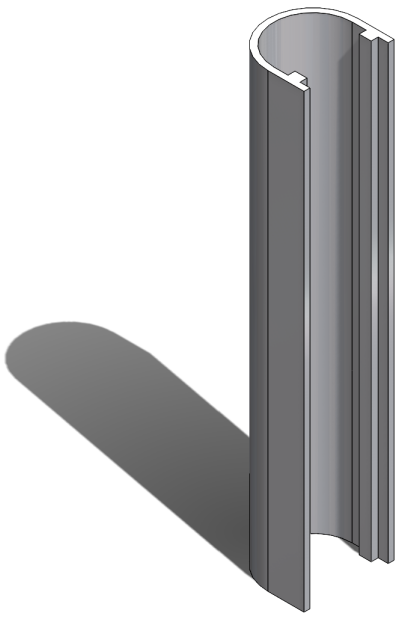
Pilar de la articulación prismática

El diseño del pilar que se muestra en la Figura 40, el cual soporta la articulación prismática, será fabricado mediante impresión 3D utilizando resina ABS de alta resistencia debido a las siguientes razones:

- **Versatilidad en el diseño:** La impresión 3D permite fabricar geometrías complejas que se ajustan perfectamente a las necesidades del robot.

- **Alta resistencia mecánica:** La resina ABS de alta resistencia proporciona mayor durabilidad y capacidad para soportar esfuerzos mecánicos, garantizando la estabilidad del componente.
- **Buena estabilidad dimensional:** Este material asegura que las dimensiones del pilar se mantendrán constantes incluso ante cambios de temperatura o condiciones externas.

Figura 40



Nota: Como se menciona, el material a tener geometrías complejas, resulta mas viable por impresión 3D. Fuente: Elaboración propia.

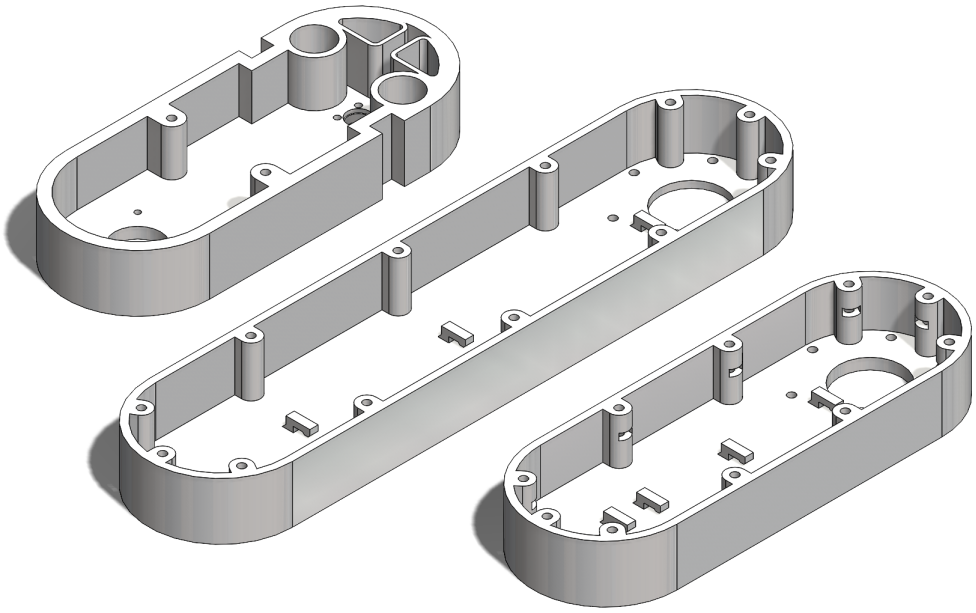
Eslabones del robot

Los eslabones del robot también serán fabricados mediante impresión 3D, como se muestra en la Figura 41, utilizando resina ABS de alta resistencia. Esto se justifica por:

- **Peso ligero:** Aunque es más denso que el *PLA*, el ABS sigue siendo suficientemente ligero para reducir la inercia en los movimientos del robot, mejorando su eficiencia dinámica.

- **Mayor resistencia mecánica:** La resina ABS de alta resistencia proporciona una mayor durabilidad y capacidad para soportar esfuerzos mecánicos, asegurando un desempeño óptimo de los eslabones.
- **Flexibilidad de diseño:** Permite iterar fácilmente el diseño de los eslabones según los requerimientos funcionales, al igual que el *PLA*, pero con mejores propiedades mecánicas.

Figura 41

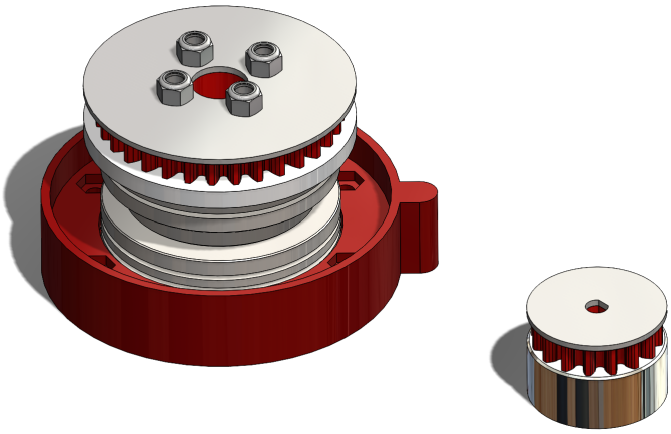


Nota: El sistema de los eslabones cuenta con 3 tipos de diferentes dimensiones. Fuente: Elaboración Propia.

Juntas y conexiones

Las juntas y conexiones entre los eslabones, así como otros componentes móviles que no se encuentren en las medidas requeridas, serán igualmente fabricadas mediante impresión 3D con resina ABS de alta resistencia. Alguna de estas se muestran en la Figura 42. Esto simplifica el ensamblaje, mejora la durabilidad de las uniones y reduce los costos de producción.

Figura 42



Nota: En la figura se muestra algunas de las juntas y conexiónes que se pretende realizar mediante impresión 3D. Fuente: Elaboración propia.

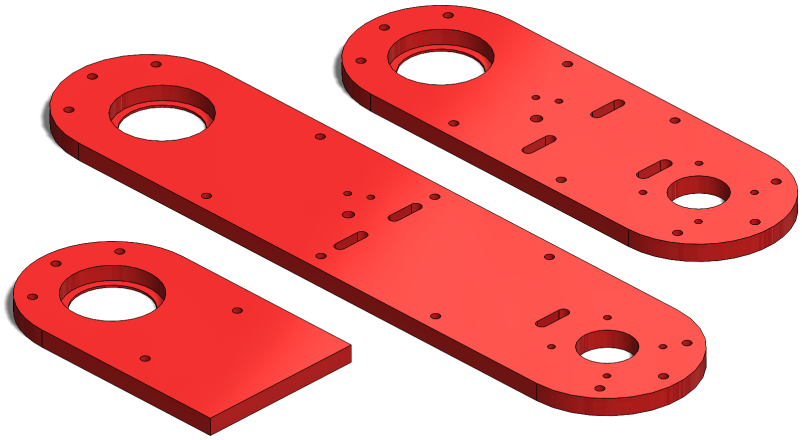
Tapas de los eslabones

Para destacar las conexiones internas y facilitar el mantenimiento, las tapas de los eslabones serán fabricadas con acrílico transparente. Este material ofrece las siguientes ventajas:

- **Transparencia:** Permite visualizar el interior de los eslabones para monitorear conexiones y componentes internos.
- **Bajo peso:** No afecta significativamente la carga total del robot.
- **Estética:** Mejora la apariencia general del robot, especialmente en un entorno académico.

La selección de materiales propuesta combina el uso de aluminio, *PLA* y acrílico para optimizar el diseño del robot SCARA en términos de funcionalidad, costos y manufacturabilidad. Esta combinación asegura un balance entre resistencia estructural, ligereza y estética, cumpliendo con los objetivos del proyecto. A continuación se muestra en la Figura 43 el diseño del tercer eslabón.

Figura 43



Nota: El diseño se realiza en acrílico ya que ayuda con la disminución del peso. Fuente: Elaboración Propia.

5.9.2. Componentes mecánicos a adquiridos

Los componentes mecánicos que se deberán adquirir se muestran a continuación en la Tabla 9. Con una breve descripción de su función.

Tabla 9

Componentes mecánicos adquiridos y su función

Componente	**Función**
2x Guías lineales cromadas – 10mm x 400mm	Proveen soporte y precisión al movimiento lineal de la articulación prismática, asegurando estabilidad durante la operación.
1x Tornillo de avance – 8mm x 400mm	Transforma el movimiento rotacional del motor en movimiento lineal en la articulación prismática, permitiendo subir o bajar los eslabones del robot.

Componente	Función
2x Rodamientos lineales – 10mm	Facilitan el deslizamiento suave de las guías lineales, reduciendo la fricción y asegurando precisión en el movimiento de la articulación prismática.
3x Cojinetes axiales de bolas – 40x60x13mm	Soportan cargas axiales en las juntas entre las articulaciones, asegurando un movimiento suave y sin desgaste excesivo en los puntos de giro.
2x Cojinetes radiales de bolas – 8x22x7mm	Permiten el giro del tornillo de avance en la articulación prismática con un bajo coeficiente de fricción, incrementando la eficiencia del sistema.
Tornillos y tuercas M3, M4 y M5 de varias longitudes	Se utilizan para el ensamblaje de los eslabones y otras partes mecánicas del robot, asegurando una estructura rígida y confiable.
2x Correas de polea de goma de paso de 5mm	Transmiten el movimiento rotacional desde las poleas motrices hacia las poleas conducidas en las articulaciones 2 y 3, garantizando un movimiento eficiente y preciso.

5.9.3. Evaluación de proovedores, costos y selección final de componentes

Los elementos optados en el apartado anterior ofrecen una buena relación costo-beneficio. El A4988 es asequible y cumple con los requisitos de control de los motores NEMA 17. La Raspberry Pi 4 model B, además de ser una solución económica, proporciona una plataforma poderosa que permite extender el proyecto en el futuro. La fuente de alimentación Mean Well, aunque más cara que las opciones genéricas, ofrece una mayor fiabilidad y vida útil, lo que minimiza el riesgo de fallos y el costo de mantenimiento a largo plazo.

La elección de estos componentes se basa en la necesidad de un sistema robusto, confiable, económico y fácil de implementar. La combinación del A4988, Raspberry Pi y Mean Well LRS-200-24 proporciona un control eficiente de los motores NEMA 17, con un costo razonable y la flexibilidad para adaptarse a futuras mejoras o cambios en el diseño del robot SCARA.

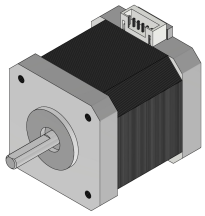
Además se sabe que el robot SCARA necesita de elementos mecánicos donde su elección se basa en los cálculos mostrados en el apartado del tornillo de potencia y el uso de poleas

dentadas para la transmisión de movimiento de los eslabones los cuales se especifican en la Tabla 9 para su correcto funcionamiento

A continuación en la Tabla 10 se muestra los proovedores de cada uno de los componentes con su costo aproximado ya que dependiendo del local o sitio web los costos cambian.

Tabla 10

Evaluación de Proveedores y Costos

Componente	**Proveedor**	**Costo Estimado (USD)**	**Fotografía**
3x Motor NEMA 17	Amazon/USA	$48	
3x Controlador A4988	Amazon/USA	$6	
1x Raspberry Pi 4 Model B	Amazon/USA	$61	
1x Fuente MeanWell LRS-200-24	Amazon/USA	$34	

Continúa en la siguiente página...

(Continuación de la tabla)

Componente	**Proveedor**	**Costo Estimado (USD)**	**Fotografía**
2x Guías lineales cromadas – 10mm x 400mm	Amazon/USA	$14	
1x Tornillo de avance – 8mm x 400mm	Amazon/USA	$10	
2x Rodamientos lineales – 10mm	Amazon/USA	$5	
3x Cojinetes axiales de bolas – 40x60x13mm	Amazon/USA	$14.6	
2x Cojinetes radiales de bolas – 8x22x7mm	Amazon/USA	$2	

Continúa en la siguiente página...

(Continuación de la tabla)

Componente	**Proveedor**	**Costo Estimado (USD)**	**Fotografía**
Tornillos y tuercas M3, M4 y M5 de varias longitudes	Banco del Perno/Cuenca	$6	
2x Correas de polea de goma de paso de 5mm	Electronics Ecuador/Quito	$3.5	
1x Acoplamiento Flexible 5mm-8mm	Innovatech/Quito	$4.7	
1x Polea dentada 16 dientes GT2	Electronica Pi/Quito	$3.5	
1x Polea dentada 32 dientes HTD	HC-Maschinentechnik	$9.5	

Nota: Los costos pueden variar segun el local, tienda o sitio web, es el motivo por el cual se eligen rangos de precios de cada componente. Fuente: Amazon México (2025)

5.10. Estimación y evaluación de costos totales (materiales y mano de obra)

Tabla 11

Desglose de costos del robot SCARA

Ítem	**Precio ($)**
Componentes electrónicos	320
Componentes mecánicos	120
Impresión 3D en resina ABS	240
Costos de envío e importación	90
Mano de obra	310
Costo total del robot	**1080**

6. Resultados

El diseño y desarrollo del robot SCARA permitió obtener un sistema optimizado en términos de precisión, eficiencia y viabilidad económica. A partir del establecimiento de requerimientos y análisis cinemático, se logró un mecanismo con movimientos fluidos y controlados. La selección de componentes mecánicos, como motores y reductores, garantizó un equilibrio entre desempeño y costos.

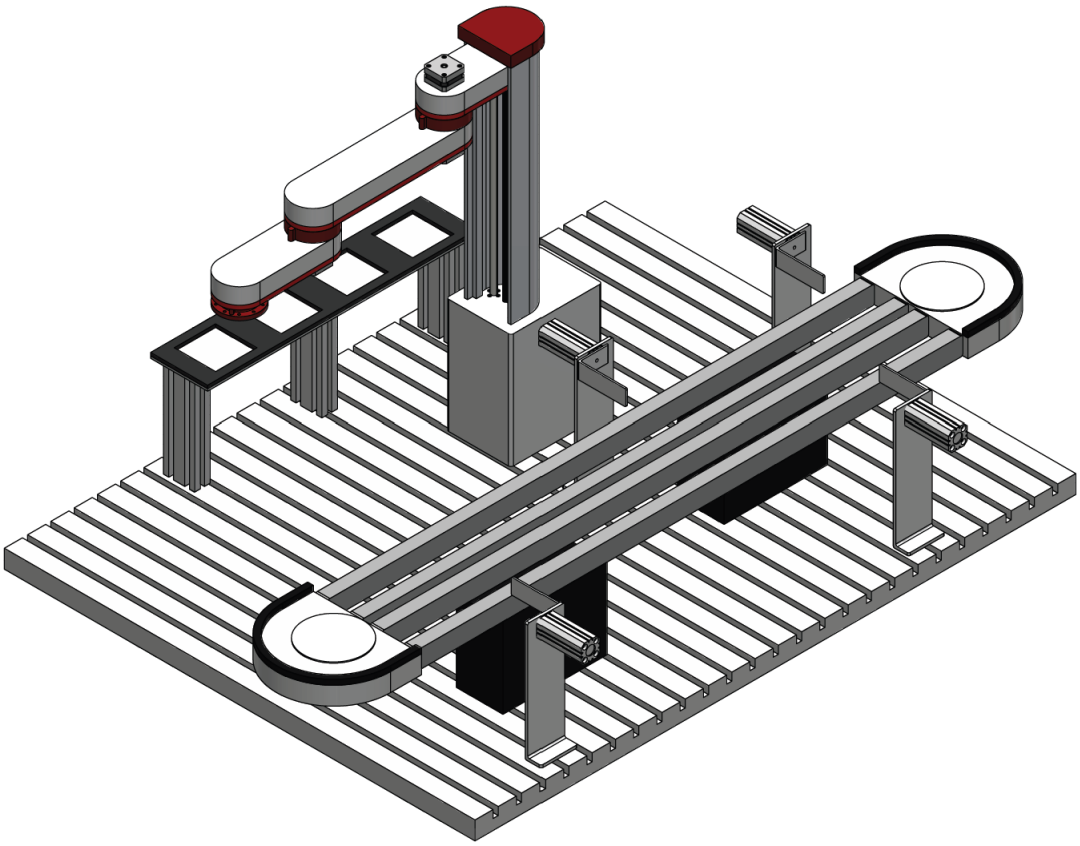
El análisis estructural confirmó la resistencia y estabilidad del diseño, mientras que la evaluación de costos demostró la factibilidad de su construcción. Estos resultados que se presentarán a continuación validan el diseño propuesto y su potencial aplicación en entornos industriales automatizados.

6.1. Establecimiento de requerimientos físicos, parámetros de diseño y tareas del robot SCARA

Se realizó un análisis detallado del banco mecatrónico de la Universidad Politécnica Salesiana para determinar los requerimientos físicos y parámetros de diseño del robot SCARA. Este análisis incluyó las dimensiones del banco, los espacios disponibles y las posibles interacciones del robot con las estaciones del mismo.

Como resultado, se definió que el robot SCARA debe realizar tareas de *pick and place*, transportando piezas desde un almacén hacia la banda transportadora y viceversa. Estas tareas requieren precisión y repetitividad, lo que condicionó las dimensiones del robot y su espacio de trabajo, asegurando una correcta integración con el banco. Las medidas obtenidas y los bocetos iniciales guiaron el diseño, cumpliendo con los requerimientos establecidos. En la Figura 44 se muestra es espacio de trabajo y el diseño final planteado.

Figura 44



Nota: La figura muestra, finalmente, la proyección del robot SCARA diseñado colocado sobre el banco mecatrónico. Fuente: Elaboración Propia.

6.2. Diseño mecánico y análisis cinemático del robot SCARA

El diseño mecánico se desarrolló mediante un enfoque estructurado que incluyó:

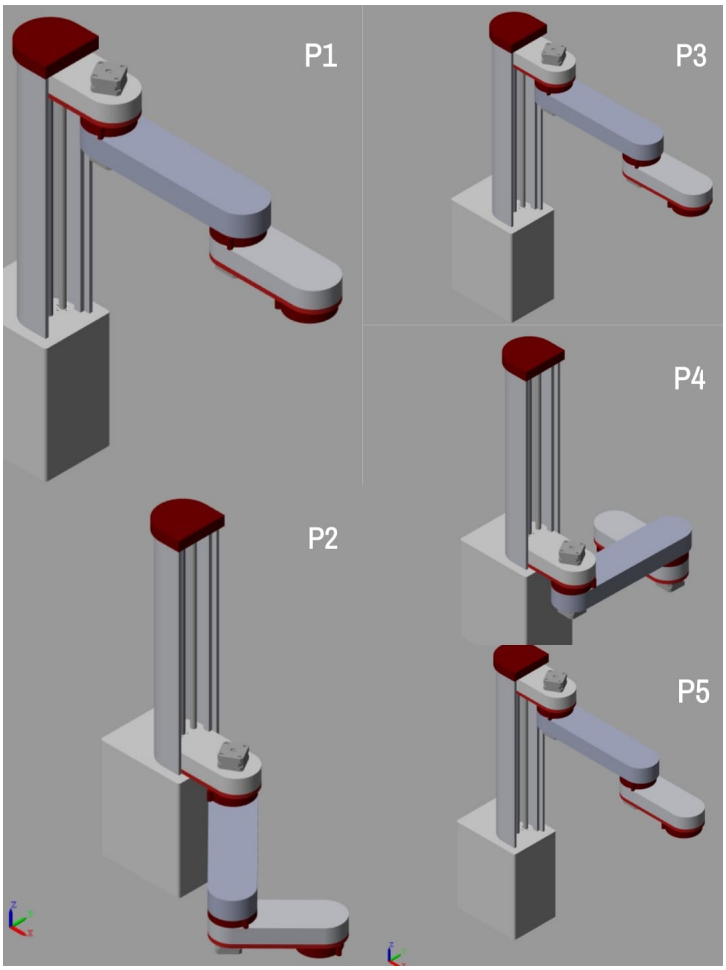
- El estudio de la cinemática directa utilizando la convención Denavit-Hartenberg, que permitió definir la posición y orientación del efector final en función de las articulaciones del robot.
- El dimensionamiento del tornillo sin fin para la articulación prismática, garantizando un desplazamiento preciso y adecuado para las tareas definidas.

- El diseño de un sistema de transmisión de movimiento por poleas dentadas para las articulaciones rotativas, maximizando la eficiencia y minimizando costos.

Posteriormente, se realizó el modelado tridimensional en *SolidWorks*® y *Inventor*®. Este modelo se exportó a *MATLAB Simulink*®, donde se programaron las trayectorias del robot. Trayectoria descrita en la Figura 45. La simulación demostró la correcta operación del diseño, comparándose con las matrices de posición calculadas previamente. Los errores obtenidos en esta comparación oscilaron entre un 0.30 % y 0.40 %, valores aceptables según estándares de diseño.

Adicionalmente, se seleccionaron los motores paso a paso NEMA 17 para la articulación prismática, justificando su elección mediante cálculos de torque y simulaciones que incluyeron el levantamiento de una carga sobre una rampa.

Figura 45



Nota: La figura muestra paso a paso la trayectoria del robot, simulando un proceso de "pick and place". Fuente: Elaboración Propia.

6.3. Selección de componentes electrónicos y mecánicos

La selección de componentes se realizó en función de un análisis costo-beneficio, priorizando eficiencia, disponibilidad en el mercado y facilidad de integración al sistema robótico.

Componentes electrónicos: Se seleccionaron los siguientes elementos:

- Motores paso a paso NEMA 17, por su alta precisión y compatibilidad con controladores

estándar.

- Drivers A4988 para el control de los motores.
- Una fuente de poder adecuada para alimentar todos los componentes.
- Una Raspberry Pi como controlador principal, debido a su versatilidad y capacidad de manejo de múltiples periféricos.

Componentes mecánicos: Los componentes seleccionados incluyeron:

- Rodamientos lineales y axiales para garantizar movimientos suaves y soportar cargas.
- Tornillos de avance y correas dentadas para la transmisión de movimiento.
- Poleas dentadas dimensionadas según los requerimientos de torque y velocidad.

Todos los componentes fueron adquiridos de proveedores locales e internacionales, asegurando su calidad y disponibilidad.

6.4. Costos de construcción e implementación del robot SCARA

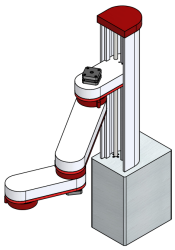
Se realizó un estudio detallado de los costos de construcción del robot SCARA, incluyendo materiales, mano de obra y costos de envío e importación, obteniendo un costo total de $1,080.00.

Para poner este valor en contexto, se realizó una comparación con robots comerciales similares:

- **Robot HITBOT Z-Arm 2442E Robot Arm:** Este robot comercial tiene un costo de $7,205.18 sin incluir envío. Fue una fuente de inspiración para nuestro diseño, pero nuestro robot logra un costo significativamente menor.
- **Robot BORUNTE BRTIRSC0603A:** Este robot genérico tiene un costo aproximado de $5,550.00 sin costos de envío. Nuestro diseño representa una opción más económica para un entorno educativo.
- **Robot EPSON SCARA GX10B - 650 mm:** Este robot de alta gama tiene un costo de $25,122.00, ofreciendo mayores prestaciones. Sin embargo, para fines educativos, representa una inversión considerablemente alta comparada con nuestro modelo.

Tabla 12

Comparación de costos de robots SCARA comerciales y desarrollado

Robot	**Precio (USD)**	**Imagen**
Robot SCARA desarrollado	1,080.00	
HITBOT Z-Arm 2442E	7,205.18	
BORUNTE BRTIRSC0603A	5,550.00	
EPSON SCARA GX10B - 650 mm	25,122.00	

Nota: Los costos pueden variar segun el local, tienda o sitio web, los precios colocados fueron recuperados de: AliExpress (2025)

Características distintivas del robot SCARA propuesto: El robot SCARA destaca por las siguientes razones:

- Bajo costo de construcción e implementación, accesible para fines educativos.

- Apertura para el desarrollo y programación de tareas adicionales distintas al *pick and place*.
- Diseño como robot colaborativo para la universidad, permitiendo su uso en entornos seguros para estudiantes.
- Flexibilidad para desarrollar y mejorar el sistema de control.
- Facilidad en la programación de trayectorias y tareas, adaptándose a diferentes escenarios educativos.

7. Cronograma

Tabla 13

Cronograma de actividades.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES																											HORAS
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	**ACTIVIDADES**	**MES 1**				**MES 2**				**MES 3**				**MES 4**				**MES 5**				**MES 6**					
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		
Estudio de los requerimientos físicos (dimensiones), parámetros de diseño y tareas que el robot SCARA debe cumplir, basados en la adaptación al banco de pruebas mecatrónico.	Revisión bibliográfica y normativa aplicable.	X	X	X	X	X	X																				30
	Análisis de las especificaciones del banco mecatrónico.		X	X	X	X	X	X																			30
	Definición de requerimientos y tareas del robot.			X	X	X	X																				25
Realizar el diseño mecánico del robot SCARA mediante el estudio cinemático del mismo.	Análisis cinemático del robot.					X	X	X	X																		40
	Modelado 3D del robot.						X	X	X	X	X																50
	Simulaciones del modelo.							X	X	X	X																35
Efectuar la selección de componentes electrónicos adecuados para el robot SCARA.	Identificación de componentes necesarios.								X	X																	25
	Evaluación de proveedores y costos.								X	X	X																30
	Selección final de componentes.									X	X	X															25
Determinar los costos de construcción e implementación del robot scara para el banco mecatrónico de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.	Estimación de costos de materiales.											X	X	X													25
	Estimación de costos de mano de obra.												X	X	X												25
	Evaluación de costos totales.															X	X	X									30
	Redacción del documento final.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		60
																										Total de horas empleadas	400

Nota: La Tabla 13 presenta las actividades para cumplir con los objetivos planteados. La tabla puede ajustarse de acuerdo a la cantidad de objetivos y actividades que se requieran

8. Presupuesto

A continuación, se detallan los recursos necesarios para el desarrollo del proyecto de titulación, incluyendo talento humano, recursos materiales y una tabla con el costo total.

8.1. Talento humano

En esta tabla se describen los costos asociados al tiempo dedicado por parte del tutor y los autores durante el desarrollo del trabajo.

Tabla 14

Recurso de talento humano.

Cargo	**Nombre**	**Costo/hora ($)**	**Horas/mes**	**Total de horas**	**Costo total ($)**
Tutor	Iván Escandón	12.5	8	96	1200
Autor 1	Nombre del autor	8	48	240	1920
Autor 2	Nombre del autor	8	48	240	1920

Nota. En la tabla se detalla el tiempo estimado dedicado por el tutor y los autores en función del cronograma establecido para el desarrollo del proyecto.

8.2. Recursos materiales

En la tabla a continuación se especifican los costos asociados a los recursos materiales, incluyendo software, hardware y otros insumos utilizados durante el desarrollo del proyecto.

Tabla 15

Recursos materiales.

Denominación	Cantidad	Horas/uso	Costo/hora ($)	Costo unitario ($)	Costo total ($)
Software: MATLAB®	2	-	-	980	1960
Software: SolidWorks®	2	-	-	150	300
Software: Simulink®	2	-	-	200	400
Computadores	2	-	-	2000	4000
Laboratorios de robótica	2	150	20	-	6000
Transporte	2	-	-	25	50

Nota. Los costos de software son aproximados considerando licencias comerciales. El costo del uso de laboratorios corresponde al tiempo estimado de trabajo durante el desarrollo del proyecto.

8.3. Recursos totales

Finalmente, se presenta un resumen de los costos totales del proyecto, integrando los recursos humanos y materiales.

Tabla 16

Recursos totales.

Denominación	Costo total ($)
Recursos humanos	5040

Denominación	**Costo total ($)**
Recursos materiales	12800
Total	**17840**

Nota. El costo total del proyecto incluye todos los recursos utilizados para su desarrollo.

9. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto permitió alcanzar los objetivos planteados para el diseño del robot SCARA destinado al banco mecatrónico de la Universidad Politécnica Salesiana. A continuación, se presentan las principales conclusiones:

1. Se establecieron con precisión los requerimientos físicos y parámetros de diseño del robot SCARA, adaptándolo a las dimensiones y necesidades específicas del banco mecatrónico. Las tareas definidas de *pick and place* fueron el eje central del diseño, asegurando su integración funcional con el sistema existente.

2. El diseño mecánico, realizado mediante el estudio de la cinemática directa y el dimensionamiento de los sistemas de transmisión, permitió validar la viabilidad del modelo a través de simulaciones en *MATLAB Simulink*®. Los resultados demostraron un error mínimo entre el análisis cinemático teórico versus la simulación, con valores dentro de un rango aceptable del 0.30 % al 0.40 %.

3. La selección de componentes electrónicos y mecánicos se llevó a cabo priorizando el costo-beneficio y la facilidad de integración, logrando un balance óptimo entre funcionalidad, disponibilidad y eficiencia. Componentes como motores NEMA 17, drivers y rodamientos lineales garantizaron el desempeño del robot en sus tareas asignadas.

4. La metodología utilizada, desde el análisis de requerimientos hasta las simulaciones y validaciones finales, permitió diseñar un robot SCARA funcional y adaptable a entornos académicos e industriales.

5. La integración de tecnologías como impresión 3D, componentes accesibles y software de simulación demuestra que es posible desarrollar soluciones robóticas económicamente

viables y educativas, lo cual es esencial para fortalecer el aprendizaje práctico en la universidad.

Para finalizar, el diseño y desarrollo del robot SCARA demostró la importancia de un enfoque integral que combine análisis técnico, optimización estructural y viabilidad económica. Este estudio no solo valida la funcionalidad del robot, sino que también sienta las bases para futuras mejoras en eficiencia, control y automatización en aplicaciones industriales.

10. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos y la experiencia adquirida durante el desarrollo del proyecto, se plantean las siguientes recomendaciones para futuros trabajos y mejoras:

1. Realizar pruebas físicas del robot SCARA en el banco mecatrónico una vez construido, a fin de validar su funcionamiento en un entorno real y detectar posibles ajustes o mejoras necesarias en su diseño.

2. Ampliar las tareas asignadas al robot SCARA, incorporando funcionalidades adicionales como clasificación de piezas o ensamblajes básicos, para maximizar su utilidad en el banco mecatrónico.

3. Incorporar sensores y sistemas de retroalimentación, como sensores de posición o cámaras, para mejorar la precisión y el control del robot, incrementando su aplicabilidad en procesos más complejos.

4. Evaluar la viabilidad económica de implementar motores más avanzados, como servomotores, en futuras versiones del robot, con el fin de mejorar la precisión y suavidad del movimiento.

5. Desarrollar guías y manuales técnicos para el uso y mantenimiento del robot, fomentando su correcta integración en prácticas académicas y su preservación a largo plazo.

6. Continuar investigando y aplicando herramientas de simulación avanzadas que permitan optimizar el diseño y análisis de robots industriales en proyectos académicos, promoviendo la innovación tecnológica.

Referencias

AliExpress. (2025). *Polea dentada gt2 de 20 dientes para correa de 6mm, orificio de 5mm.* Descargado de https://es.aliexpress.com/item/1005006483841500.html?gatewayAdapt=glo2esp (Recuperado el 2 de febrero de 2025)

Amazon México. (2025). *Gllehkt poleas dentadas de aluminio, 5 mm de diámetro, 2 unidades.* Descargado de https://www.amazon.com.mx/Gllehkt-dentadas-aluminio-di%C3%A1metro-unidades/dp/B0DBHBB6WR (Recuperado el 2 de febrero de 2025)

Angeles, J. (2013). *Fundamentals of robotic mechanical systems* (4.ª ed.). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.

ao Cao, W., Li, S., Cheng, P., Ge, M., Ding, H., y Lai, J. (2024). Design and development of a new 4 dof hybrid robot with scara motion for high-speed operations in large workspace. *Mechanism and Machine Theory*, *198*, 105656. Descargado de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X24000831 doi: https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2024.105656

Barrientos, A. (2007). *Fundamentos de robotica*. McGraw-Hill.

Boston Dynamics. (2013). *Atlas Robot - The Most Dynamic Humanoid Robot.* Boston Dynamics Official Website. Descargado de https://www.bostondynamics.com/atlas (Atlas demonstrates advanced robotics with dynamic locomotion and manipulation.)

Cortés, F. R. (2011). *Róbotica: control de robots manipuladores*.

Craig, J. J. (2006). *Introduction to robotics*. Pearson Educación.

Eudotec. (2013). *Relación de poleas.* Descargado de https://eudotec.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/03/relacion1.jpg (Recuperado el 2 de febrero de 2025)

Goldman, R. (1985). *Design of an interactive manipulator programming environment*.

Harten, J. (2008). *Industrial robotics: Technology, programming, and applications*. New York: McGraw-Hill Education. (Explores various robotic systems, including SCARA robots, their applications in industries such as automotive, electronics, and packaging.)

Hibbeler, R. C. (2009). *Estatica*. Pearson Educacion.

Honda Motor Co., Ltd. (2002). *ASIMO - The Humanoid Robot.* Honda Official Website. Descargado de https://www.honda.com/innovation/robotics (ASIMO demonstrated advanced bipedal locomotion and human-like interactions.)

IFR. (2023). *World robotics 2023*. VDMA Services.

Investigación sobre simulación de dinámica de acoplamiento rígido-flexible del robot scara. (2022). En *2022 simposio internacional sobre ingeniería de control y robótica (iscer)* (p. 87-94). doi: 10.1109/ISCER55570.2022.00021

ISO 8373:2012 - Robots and robotic devices – Vocabulary. (2012). Geneva, Switzerland. Descargado de `https://www.iso.org/standard/55890.html` (Defines terms related to robots and robotic devices, including industrial manipulators.)

Jimenez-Nixon, D. A., Paredes-Sánchez, M. C., y Reyes-Duke, A. M. (2022). Design, construction and control of a scara robot prototype with 5 dof. En *2022 ieee international conference on machine learning and applied network technologies (icmlant)* (p. 1-6). doi: 10.1109/ICMLANT56191.2022.9996479

Juvinall, R. C., y Marshek, K. M. (2011). *Fundamentals of machine component design* (5th ed.). Hoboken, NJ, USA: Wiley. (Focuses on the design, analysis, and practical application of machine components, incorporating real-world examples and modern engineering tools.)

Liu, B., He, Y., y Kuang, Z. (2018). Design and analysis of dual-arm scara robot based on stereo simulation and 3d modeling. En *2018 ieee international conference on information and automation (icia)* (p. 1233-1237). doi: 10.1109/ICInfA.2018.8812353

Lynch, K. M., y Park, F. C. (2017). *Modern robotics.* Cambridge, England: Cambridge University Press.

Miguel G. Villarreal, J. S. P. G. G. S. C., Daniel De la Cruz Muciño. (2016). Arquitectura de control abierta por medio de una pc para sistemas mecatrónicos. *SCIELO.*

NASA. (2021). *Perseverance Rover - Exploring Mars.* NASA Mars Exploration Program. Descargado de `https://mars.nasa.gov/mars2020/` (Perseverance is designed to search for signs of ancient life on Mars and collect rock samples.)

Norton, R. L. (2011). *Design of machinery: An introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines* (5th ed.). New York, NY, USA: McGraw-Hill Education. (Comprehensive text for understanding the synthesis and analysis of mechanisms and machines, with emphasis on practical engineering applications.)

Robotics Industries Association (RIA). (1982). *Definition of an industrial robot.* Robotics Industries Association Standard R15.06-1982. Descargado de `https://www.robotics.org` (Defined as a reprogrammable, multifunctional manipulator designed to move materials, parts, tools, or devices through variable programmed motions for the performance of a variety of tasks)

Shariatee, M., Akbarzadeh, A., Mousavi, A., y Alimardani, S. (2014). Design of an economical scara robot for industrial applications. En *2014 second rsi/ism international conference on robotics and mechatronics (icrom)* (p. 534-539). doi: 10.1109/ICRoM.2014.6990957

Shigley, J. E., Mischke, C. R., y Budynas, R. G. (2010). *Diseño en ingeniería mecánica de shigley.* McGraw-Hill.

Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., y Oriolo, G. (2008). *Robotics* (2009.ª ed.). Guildford, England: Springer.

Toro Rojas, J. S. (2023). *Desarrollo de un brazo robótico de tipo scara con estructura de fibra de carbono y sistema de modelado por deposición fundida* (B.S. thesis).

Wilmshurst, T. (2010). *Designing embedded systems with pic microcontrollers: Principles and applications* (2nd Edition ed.). Oxford, UK: Newnes. Descargado de `https://www.elsevier.com/books/designing-embedded-systems-with-pic-microcontrollers/wilmshurst/978-1-85617-750-4`

Zhen, S., Meng, C., Xiao, H., Liu, X., y Chen, Y.-H. (2023). Robust approximate constraint following control for scara robots system with uncertainty and experimental validation. *Control Engineering Practice*, *138*, 105610. Descargado de `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096706612300179X` doi: https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105610

ANEXOS