



# Universidad **Mariana**

Implementación de un banco de laboratorio para robótica y autómatas programables en la  
Universidad Mariana

Ismael Arévalo Martínez  
Diego Gustavo Timaná Navarro

Universidad Mariana  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Mecatrónica  
San Juan de Pasto

2024

Implementación de un banco de laboratorio para robótica y autómatas programables en la  
Universidad Mariana

Ismael Arévalo Martínez  
Diego Gustavo Timaná Navarro

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecatrónico

Mg. Fausto Andrés Escobar  
Asesor

Mg. Anghelo Marino Lopez  
Co-asesor

Universidad Mariana  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Mecatrónica  
San Juan de Pasto  
2024

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007  
Universidad Mariana

## **Agradecimientos**

Gracias a todos aquellos que han sido parte fundamental de este proyecto. A los profesores, quienes con su sabiduría y paciencia han guiado y brindado las herramientas necesarias para alcanzar esta meta, a los asesores, que siempre aportaron valioso conocimiento y a los laboratoristas de la sede Alvernia, siempre dispuestos a colaborar.

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mis padres, quienes me han brindado su amor incondicional y su apoyo a lo largo de toda mi vida académica. Sin su confianza en mí y su constante motivación, este logro no habría sido posible. A mi familia, gracias por creer en mis sueños y por ser mi inspiración diaria.

Ismael Arévalo

A mis padres y mi hermano Edwar, Patricia y Alejandro que siempre me han apoyado en todo lo que me he propuesto.

Gustavo Timaná

## **Contenido**

Introducción .....	13
1. Resumen del proyecto .....	14
1.1. Descripción del problema .....	15
1.1.1. Formulación del problema .....	16
1.2. Justificación.....	17
1.3. Objetivos .....	18
1.3.1. Objetivo general.....	18
1.3.2. Objetivos específicos .....	18
1.4. Marco referencial o fundamentos teóricos .....	19
1.4.1. Antecedentes .....	19
1.4.1.1. Análisis de los estudios. ....	21
1.4.2. Marco teórico .....	22
1.4.2.1. Automatización industrial. ....	22
1.4.2.2. PLC.....	22
1.4.3.3. Robótica .....	24
1.4.3.4. Sensores de detección.....	28
1.5. Metodología .....	28
1.5.1. Tipo de investigación.....	28
1.5.2. Línea de investigación .....	29
1.5.3. Hipótesis .....	29
1.5.3.1. Hipótesis de la investigación.....	29
1.5.3.2. Hipótesis nula .....	29
1.5.3.3. Hipótesis alternativas de la investigación. ....	30
1.5.4. Descripción metodológica .....	30
1.5.5. Validación.....	31
1.5.5.1. Validación interna. ....	31

1.5.5.2. Validación externa.....	31
2. Resultados .....	32
2.1. Resultados objetivo 1 .....	32
2.1.1. Autómata a emplear.....	32
2.1.2. Robot UR3.....	34
2.1.3. Módulo SCALANCE XB-005 .....	35
2.1.4. Requerimientos.....	36
2.1.5. Selección de sensores y demás elementos.....	36
2.1.6. Selección de elementos conductores y no conductores.....	39
2.2. Resultados objetivo 2 .....	39
2.2.1. Verificar y poner a punto la banda transportadora .....	39
2.2.2. Adecuación de los elementos en la cinta transportadora.....	40
2.2.3. Primer programa de clasificación.....	41
2.2.4. Segundo programa de clasificación.....	50
2.2.5. Organización de los elementos.....	58
2.2.6. Simulación Robot UR3 .....	59
2.3. Resultados objetivo 3 .....	67
2.3.1. Validación interna .....	67
2.3.2. Estrategia en las prácticas de laboratorio (Validación externa) .....	69
2.3.3. Desarrollo del primer programa de clasificación .....	70
2.3.4. Desarrollo del segundo programa de clasificación.....	73
2.3.5. Encuesta de satisfacción de la practica.....	74
2.3.6. Resultados obtenidos encuesta de satisfacción .....	75
3. Conclusiones .....	80
4. Recomendaciones.....	81
Referencias bibliográficas .....	82
Anexos.....	85



## **Índice de tablas**

Tabla 1. Artículos Internacionales.....	19
Tabla 2. Artículos Nacionales .....	20
Tabla 3. Matriz metodológica .....	30
Tabla 4. Características PLC S7-1200 CPU 1214C AC/DC/RLC .....	32
Tabla 5. Parámetros robot UR3.....	34
Tabla 6. Requerimientos del proyecto.....	36
Tabla 7. Características componentes elegidos .....	37
Tabla 8. Características actuador neumático y demás elementos a fines .....	38
Tabla 9. Mantenimiento realizado a la cinta transportadora .....	40
Tabla 10. Parámetros geométricos robot UR3 .....	61
Tabla 11. Valores de la matriz jacobiana (J) robot UR3 .....	63
Tabla 12. Bloques del modelo de Simulink .....	65
Tabla 13. Preguntas encuesta de satisfacción.....	75

## Índice de Figuras

Figura 1. PLC Siemens S7-1200 .....	23
Figura 2. Tipos de articulación.....	25
Figura 3. Configuraciones más comunes .....	26
Figura 4. Diagrama DH estándar robot UR3.....	27
Figura 5. PLC empleado.....	33
Figura 6. Modulo SCALANCE XB-005.....	35
Figura 7. Módulos y sensores.....	37
Figura 8. Componentes neumáticos .....	38
Figura 9. Mantenimiento realizado a la cinta transportadora .....	39
Figura 10. Banda transportadora .....	40
Figura 11. Elementos agregados a la cinta trasportadora.....	41
Figura 12. Diagrama P&ID pg-1 .....	42
Figura 13. Diagrama lógico de funcionamiento programa 1.....	43
Figura 14. Habilitar PROFINET .....	44
Figura 15. Diagrama lógico de funcionamiento programa UR3 pg-1.....	45
Figura 16. Variables utilizadas S7-1200 pg-1 .....	46
Figura 17. Programa Ladder pg-1 .....	47
Figura 18. Diagrama eléctrico didáctico pg-1 .....	48
Figura 19. Conexión de red ethernet .....	49
Figura 20. Diagrama neumático .....	50
Figura 21. Diagrama P&ID pg-2.....	51
Figura 22. Diagrama P&ID pg-2.....	52
Figura 23. Elementos clasificados.....	53
Figura 24. Diagrama lógico de funcionamiento programa UR3 pg-2 .....	54
Figura 25. Variables utilizadas S7-1200 .....	55
Figura 26. Programa Ladder segmento 1-2 pg-2.....	55
Figura 27. Programa Ladder segmento 3-4-5 pg-2 .....	56
Figura 28. Programa Ladder segmento 6 pg-2.....	57
Figura 29. Diagrama eléctrico didáctico .....	58

Figura 30. Caja de elementos del banco de laboratorio .....	59
Figura 31. Diagrama DH estándar robot UR3.....	60
Figura 32. Matrices de transformación robot UR3.....	61
Figura 33. Matrices de transformación $O_{(T_6)}$ robot UR3 .....	62
Figura 34. Matriz de posiciones $O_{(T_6)}$ robot UR3 .....	62
Figura 35. Modelo simulink .....	65
Figura 36. Trayectoria enviada vs trayectoria obtenida UR3.....	66
Figura 37. Error cartesiano.....	67
Figura 38. Ejercicio de repetibilidad .....	68
Figura 39. Gráfica repetibilidad .....	69
Figura 40. Desarrollo de las prácticas de laboratorio.....	70
Figura 41. Desarrollo del primer programa de clasificación.....	71
Figura 42. Diagrama didáctico conexiones eléctricas pg-1.....	72
Figura 43. Desarrollo de la guía 1 en laboratorio.....	72
Figura 44. Desarrollo del segundo programa de clasificación .....	73
Figura 45. Diagrama didáctico conexiones eléctricas pg-2.....	74
Figura 46. Gráfico de cajas y bigotes .....	76
Figura 47. Gráfico de frecuencia.....	76
Figura 48. Gráfico porcentual .....	78
Figura 49. Respuestas destacadas a la pregunta 9 .....	79
Figura 50. Respuestas destacadas a la pregunta 12.....	79

## **Índice de Anexos**

Anexo A. Video programa 1.....	85
Anexo B. Video programa 2... ..	85
Anexo C. Programa desarrollados... ..	85
Anexo D. Guías de laboratorio.....	85
Anexo E. Evidencias prácticas de laboratorio... ..	85

## **Introducción**

En la búsqueda por brindar una educación de calidad y alineada con los desafíos globales del siglo XXI, la Universidad Mariana se enfrenta a un gran reto en el ámbito de la ingeniería mecatrónica. En el contexto de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas y su enfoque en el desarrollo sostenible, es imperativo que nuestras prácticas educativas no solo transmitan conocimientos teóricos, sino que también preparen a nuestros estudiantes para enfrentar los desafíos tecnológicos y sociales del futuro.

La mecatrónica, como disciplina interdisciplinaria que combina la ingeniería mecánica, electrónica, y la informática, desempeña un papel crucial en la creación de soluciones innovadoras y sostenibles. En este contexto, el presente proyecto surge como una respuesta estratégica para cerrar la brecha entre la teoría y la aplicación práctica en la formación de ingenieros mecatrónicos.

En particular, nos enfrentamos al desafío de integrar el robot colaborativo UR3 con un autómata para emular un entorno industrial real en el contexto de nuestro curso de robótica. Si bien esta integración promete enriquecer la experiencia educativa de nuestros estudiantes y alinearla con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, nos encontramos con obstáculos técnicos y de recursos que han obstaculizado su implementación exitosa hasta la fecha.

Este proyecto busca superar estos desafíos, sino también sentar las bases para una educación de calidad que combine la teoría y la práctica, fomente la sostenibilidad, y prepare a nuestros estudiantes para ser agentes de cambio en la industria y la sociedad.

## **1. Resumen del proyecto**

El presente proyecto de investigación se propone el desarrollo y diseño de un banco de laboratorio para robótica y automatización con el objetivo de clasificar elementos conductores y no conductores realizando la integración del PLC el robot colaborativo UR3 una cinta transportadora principalmente, el propósito del desarrollo de este banco de laboratorio es generar en la universidad mariana específicamente en el programa de ingeniería mecatrónica una práctica que simule un ambiente industrial y que acerque a los estudiantes a estos elementos como lo es la integración del robot UR3 con un autómata y una cinta transportadora ya que esto es lo que más se puede encontrar en la industria, enfocados en los objetivos de desarrollo sostenible de la OMS como el de educación de calidad para así brindar practicas acercadas a ambientes industriales a los estudiantes del programa.

## **1.1. Descripción del problema**

En el marco de la educación en ingeniería mecatrónica y con un fuerte enfoque en la sostenibilidad y la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, la Universidad Mariana se encuentra ante el desafío de ofrecer a sus estudiantes una experiencia educativa enriquecedora y alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). La comprensión y aplicación de conceptos relacionados con la automatización industrial, la robótica y la integración tecnológica son esenciales para formar a los ingenieros del futuro, capaces de contribuir de manera significativa a los avances tecnológicos y la transformación social (ONU, 2022).

En el contexto del curso de robótica, surge una necesidad imperante de realizar prácticas que integren el robot colaborativo UR3 con un autómata, con el objetivo de emular un entorno industrial real para fundamentar los conocimientos prácticos con los teóricos. Sin embargo, no se ha abordado esta necesidad debido a una serie de desafíos y limitaciones que han dificultado la implementación exitosa de esta práctica debido a diferentes desafíos que se deben abordar, entre los principales desafíos se encuentran: la falta de componentes esenciales y la disponibilidad limitada de sensores específicos que son cruciales para el funcionamiento seguro y eficiente de la práctica. La configuración del robot UR3 junto con los sensores externos y el autómata presenta un desafío considerable, este proceso es arduo y requiere un conocimiento necesario de programación y la interacción de estos dispositivos.

Así entonces se presenta la necesidad de lograr una práctica que integre el robot UR3 y un autómata en el curso de robótica y automatización. Esto ha dado lugar a una falta de experiencia práctica en esta área, lo que limita el desarrollo de habilidades y conocimientos críticos como: programación de robots, integración de sistemas automatizados industriales, la resolución de problemas en ambientes integrados industriales y la comprensión de las aplicaciones prácticas de la robótica en la industria, estos conocimientos son una base sólida para los estudiantes interesados en la robótica industrial.

También, es crucial explorar las ventajas y desventajas de la integración del robot UR3 con un autómata en el contexto de las prácticas de robótica. Comprender estos aspectos es fundamental

para determinar si esta integración es realmente beneficiosa y cómo podría mejorar la formación de los estudiantes.

Así entonces el propósito fundamental del proyecto es proporcionar a los estudiantes una plataforma que promueva la comprensión integral de los conceptos teóricos, así como la aplicación práctica de habilidades técnicas y de programación. Además, este proyecto contribuirá a la consecución de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible, incluidos el ODS 4 (Educación de Calidad), el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) y el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables).

### ***1.1.1. Formulación del problema***

Para abordar esta problemática, se propone el desarrollo de un proyecto de grado que tenga como objetivo principal la creación de un banco de laboratorio. Dicho banco deberá integrar autómatas programables, un robot colaborativo UR3 y sensores para la implementación de un sistema de selección y clasificación automática de objetos. Sin embargo, es fundamental definir cómo lograr una integración efectiva de estas tecnologías, diseñar algoritmos y programas que permitan el funcionamiento coordinado de los elementos del banco y evaluar el impacto de esta experiencia práctica en la formación de los estudiantes.

La pregunta central es: ¿Cómo diseñar y desarrollar un banco de laboratorio que integre autómatas programables, un robot colaborativo UR3 y sensores para implementar un sistema de selección y clasificación automática de objetos, con el objetivo de acercar a los estudiantes a un entorno industrial?

Esta problemática requiere un enfoque multidisciplinario que abarque aspectos tecnológicos, pedagógicos y sostenibles. La solución a este problema tiene el potencial de no solo mejorar la calidad de la educación en ingeniería mecatrónica en la Universidad Mariana, sino también de contribuir a la formación de profesionales conscientes de su papel en la promoción de un desarrollo sostenible y tecnológicamente competente.



## **1.2. Justificación**

La propuesta de desarrollar un banco de laboratorio que integre autómatas programables, un robot colaborativo UR3 sensores inductivos y sensores capacitivos para implementar un sistema de selección y clasificación automática de materiales conductores y no conductores en el contexto de la ingeniería mecatrónica y la educación superior encuentra su fundamentación en una serie de consideraciones multidisciplinarias.

En primer lugar, la brecha entre la educación teórica y la aplicación práctica en las disciplinas de automatización industrial y robótica es una problemática ampliamente documentada (Hanna, 2019; Matthews, 2019). La literatura académica resalta cómo esta desconexión obstaculiza la formación de ingenieros capacitados para enfrentar desafíos tecnológicos (Kurfman, 2020) y afecta la competitividad de la industria (Alavi, 2018). El proyecto de banco de laboratorio propuesto ataca directamente esta problemática al proveer una plataforma donde los estudiantes puedan experimentar con tecnologías reales y practicar la aplicación de conocimientos teóricos (Agrawal, 2021).

En segundo lugar, la Agenda 2030 de las Naciones Unidas establece los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como un marco integral para abordar los desafíos globales (Naciones Unidas, 2021). La integración de la sostenibilidad en la formación académica es esencial para formar profesionales conscientes y capaces de abordar problemas ambientales y sociales (Orr, 2020). Al unir las tecnologías de automatización con la promoción de la producción y consumo responsables (ODS 12), el proyecto propuesto demuestra un compromiso real con la transformación sostenible (Corral-Verdugo, 2019).

En tercer lugar, la implementación de laboratorios prácticos mejora significativamente la adquisición de conocimientos técnicos y habilidades prácticas en ingeniería. La creación de un banco de laboratorio que emule situaciones industriales reales ofrece a los estudiantes una valiosa oportunidad para desarrollar habilidades relevantes y aplicables (Nagel et al., 2017). Además, la exposición temprana a tecnologías avanzadas como autómatas programables y robótica

colaborativa fomenta el interés en campos especializados y prepara a los estudiantes para futuros roles en la industria (Salvador et al., 2020).

Por último, el impacto del aprendizaje experiencial y práctico en la educación superior es un tema ampliamente estudiado. La "teoría de la práctica" destaca cómo la experiencia práctica mejora la retención del conocimiento y la transferencia de habilidades a situaciones del mundo real (Kolb, 2014). El proyecto de banco de laboratorio propuesto se ajusta a esta metodología, permitiendo a los estudiantes experimentar la interacción entre la teoría y la práctica de manera efectiva y significativa (Cook et al., 2013).

### **1.3. Objetivos**

#### ***1.3.1. Objetivo general***

Desarrollar un banco de laboratorio que permita la realización de prácticas de control de proceso de separación de materiales conductores y no conductores mediante la interacción del robot UR3 y autómata, en el laboratorio de Robótica y Control de la Universidad Mariana.

#### ***1.3.2. Objetivos específicos***

- Establecer los requerimientos software/hardware para la instrumentación y diseño del banco de laboratorio en el proceso de separación de materiales conductores y no conductores.
- Implementar la arquitectura software/hardware del banco de laboratorio, definiendo la estructura de programación del robot UR3 para realizar la tarea de separación de materiales conductores y no conductores, comandado por un PLC.
- Evaluar el funcionamiento del banco de laboratorio en el factor de repetibilidad y error de clasificación, mediante el diseño y realización de prácticas de laboratorio que emule el proceso de separación de materiales conductores y no conductores.

## 1.4. Marco referencial o fundamentos teóricos

### 1.4.1. Antecedentes

En este apartado se mostrarán los antecedentes relacionados con el proyecto de investigación tanto a nivel nacional como internacional para eso se utilizaron los criterios de búsqueda: (Implementación de un banco de laboratorio de robótica AND autómatas programables) OR (Laboratory Robotics AND Programmable Automata) AND (proyecto OR investigación OR artículo). En la Tabla 1 se muestra los artículos internacionales encontrados y en la Tabla 2 Se puede evidenciar los artículos nacionales.

**Tabla 1.**

*Artículos internacionales*

<b>Autores</b>	<b>Área temática</b>	<b>Año</b>
Jhonatan Bernardo Jarro Patiño, Francisco Xavier Pesántez Zúñiga	Proyecto técnico: Desarrollo de un laboratorio remoto de un banco PLC en la Universidad Salesiana con IoT.	2021
Iván Inzunza et al.	Design of a SCADA automation and integration system between a collaborative Robot (Cobot UR) and the HT-PLC platform	2021
Alfonso Safont	Control distribuido del robot colaborativo UR3	2022
Lim Yong	PLC-Controlled of a Conveyor System	2012

Jhonatan Bernardo Jarro Patiño y Francisco Xavier Pesántez Zúñiga (2021): En este trabajo, los autores se enfocaron en la creación de un proyecto técnico que implicaba el desarrollo de un laboratorio remoto. Este laboratorio se centraba en el uso de Controladores Lógicos Programables (PLC) y la tecnología de Internet de las cosas (IoT). El objetivo principal era establecer un entorno de aprendizaje donde los estudiantes de la Universidad Salesiana pudieran interactuar con sistemas PLC de forma remota, lo que implica controlar y supervisar dispositivos y procesos industriales utilizando IoT.

Iván Inzunza y otros (2021): El trabajo de Inzunza y su equipo se centra en el diseño de un sistema de automatización y control SCADA. Este sistema fue desarrollado para integrar un robot colaborativo conocido como cobot UR con la plataforma HT-PLC. La integración de la robótica colaborativa y el control de procesos industriales permite la realización de tareas más complejas y colaborativas en entornos industriales, lo que puede tener aplicaciones en la industria manufacturera y otros sectores.

Alfonso Safont (2022): El texto de Alfonso Safont se centra en el control distribuido de un robot colaborativo específico, el UR3. Los detalles específicos del control distribuido en este contexto podrían incluir estrategias para coordinar múltiples robots colaborativos en una fábrica o planta de producción, lo que puede ser crucial para mejorar la eficiencia y la seguridad en dichos entornos.

Lim Yong (2012): Aunque este texto es más antiguo en comparación con los otros, es relevante para comprender cómo se aplican los Controladores Lógicos Programables (PLC) en el control de sistemas industriales. En este caso, el enfoque se centra en el control de un sistema de cinta transportadora, lo que es fundamental en muchas líneas de producción y logística.

**Tabla 2.**

*Artículos Nacionales*

<b>Autores</b>	<b>Área temática</b>	<b>Año</b>
Roger Zarante, Iván Mardini	Sistema para la automatización y la tele-gestión de la banda transportadora del laboratorio de automatización industrial.	2019
Juan Fernando Flórez et al.	Diseño, simulación y construcción de un modelo de laboratorio de transporte de pellets	2021
Abel Ávila, Rodrigo Pulido	Diseño e implementación de un módulo didáctico con base en una banda transportadora, para la implementación de sensores de proximidad en el área de automatización.	2015

Roger Zarante e Iván Mardini (2019): Este trabajo se centra en el desarrollo de un sistema diseñado para automatizar y gestionar a distancia una banda transportadora en un laboratorio de automatización industrial. El enfoque principal es mejorar la eficiencia y la funcionalidad de esta banda transportadora mediante la implementación de tecnologías de control y automatización. Esto puede incluir la supervisión y el control remoto de la velocidad, dirección y parada de la banda, así como la integración de sensores y sistemas de gestión de datos para optimizar su rendimiento.

Juan Fernando Flórez y otros (2021): El trabajo de Flórez y su equipo se orienta hacia el diseño, simulación y construcción de un modelo de laboratorio relacionado con el transporte de pellets. Este modelo probablemente se haya desarrollado con fines educativos o de investigación para estudiar los procesos de transporte de materiales en la industria. El enfoque puede incluir la implementación de sistemas de control para simular y analizar cómo se comporta el transporte de pellets en diferentes condiciones.

Abel Ávila y Rodrigo Pulido (2015): En este texto, Avila y Pulido se dedican al diseño e implementación de un módulo didáctico basado en una banda transportadora. El propósito principal de este módulo es servir como una herramienta educativa para la enseñanza de conceptos relacionados con la automatización y la aplicación de sensores de proximidad en el ámbito industrial. Esto podría implicar la creación de escenarios de laboratorio donde los estudiantes pueden experimentar y comprender cómo funcionan los sensores en un entorno de automatización con una banda transportadora.

**1.4.1.1. Análisis de los estudios.** La mayoría de estudios están enfocados en la automatización de algún tipo de cadena de producción, es muy poco común encontrar investigaciones basadas en la integración de estos elementos para generar practicas enfocadas en un área temática. Sin embargo, se puede encontrar diferentes investigaciones relacionadas con la implementación del robot UR3 con autómatas para automatizar o controlar ciertos tipos de procesos.

## **1.4.2. Marco teórico**

**1.4.2.1. Automatización industrial.** La automatización industrial y el control son dos disciplinas fundamentales en la industria moderna que permiten optimizar los procesos de producción, mejorar la calidad y garantizar la seguridad en las operaciones (Groover, 2007) (Verma, 2013). Estas disciplinas son esenciales en la automatización de sistemas de manufactura y han revolucionado la forma en que se llevan a cabo los procesos industriales.

La automatización industrial tiene una amplia gama de aplicaciones en diversas industrias. En la manufactura, por ejemplo, se utiliza para la producción en masa de productos electrónicos, automóviles, alimentos y bebidas, entre otros (Huo, 2018). En el sector logístico, la automatización es esencial en almacenes y centros de distribución para la gestión de inventarios y la preparación de pedidos (Garetti et al., 2014).

La automatización industrial está experimentando una serie de avances tecnológicos importantes. La Industria 4.0, también conocida como la Cuarta Revolución Industrial, está marcando el camino hacia la fábrica inteligente, donde los sistemas ciberfísicos, la Internet de las cosas (IoT) y la inteligencia artificial se combinan para optimizar la producción y la toma de decisiones (Kagermann et al., 2013). Estas tecnologías están siendo adoptadas en la industria para mejorar la eficiencia y la flexibilidad de la producción.

La automatización industrial tiene un impacto significativo en la economía global. Si bien la inversión inicial puede ser alta, los beneficios a largo plazo en términos de reducción de costos y aumento de la productividad son sustanciales. Además, la automatización industrial puede generar empleos en áreas relacionadas, como la programación y el mantenimiento de sistemas automatizados (Arntz et al., 2016).

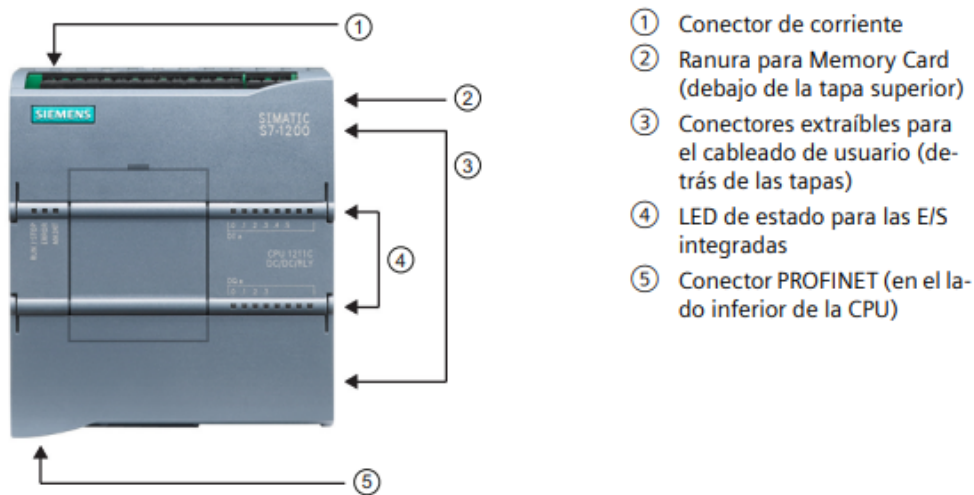
**1.4.2.2. PLC.** Dentro de la automatización industrial, los Controladores Lógicos Programables (PLC) son componentes esenciales (Bolton, 2015). Un PLC es un dispositivo electrónico programable que se utiliza para controlar maquinaria y procesos industriales de manera confiable y precisa. Su flexibilidad y capacidad de programación hacen que sean ideales para adaptarse a una

amplia variedad de aplicaciones industriales. En este proyecto, se emplea el PLC Siemens S1200, un modelo reconocido por su eficiencia y confiabilidad (Siemens, 2021).

En la **Figura 1** se muestra un PLC el cual es de la marca Siemens y de referencia S7-1200 este PLC es una solución de automatización industrial versátil y robusta que satisface las necesidades de una amplia gama de aplicaciones industriales. Su diseño compacto, rendimiento ajustable y capacidades de comunicación hacen que sea una elección certera para proyectos de control y monitoreo de procesos en la industria y la manufactura. Su integración con el software TIA Portal facilita la programación y configuración, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para aplicaciones en control y automatización industrial (Siemens, 2021).

**Figura 1.**

*PLC Siemens S7-1200*



*Fuente: Siemens, 2021.*

Entre las características más importantes de este dispositivo se encuentran: 1). Rendimiento ajustable; 2). Comunicación versátil; 3. Interfaz de programación integrada; 4. Entradas y salidas configurables; 5). Seguridad integrada. Entre estas características se destaca su comunicación versátil y su interfaz de comunicación integrada. En cuanto a su comunicación cuenta con

protocolos de comunicación como: PROFINET, Modbus TCP/IP, y OPC UA los cuales le permiten su fácil conexión con otros dispositivos como pantallas de visualización HIM entre otros, este dispositivo también cuenta con puertos Ethernet y puertos seriales (RS232/RS485), también cuenta con tecnologías como VPN y redes virtuales. (Siemens, 2021).

Este dispositivo también cuenta con una Interfaz de programación integrada el cual es el software TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal). Este entorno de desarrollo integral ofrece soporte para varios lenguajes de programación, como Lenguaje de Escalera (Ladder), Lenguaje de Bloques Funcionales (Function Block Diagram), y Texto Estructurado (Structured Text), (Siemens, 2021).

Un PLC consta de varias partes clave, incluyendo: CPU (Central Processing Unit): Es el cerebro del PLC y ejecuta el programa de control. Puede realizar cálculos, tomar decisiones en tiempo real y coordinar las operaciones de entrada/salida. Módulos de Entrada: Estos módulos conectan el PLC al mundo exterior y aceptan señales de dispositivos como sensores, interruptores y pulsadores. Las señales de entrada se convierten en datos digitales que la CPU puede procesar. Módulos de Salida: Los módulos de salida se utilizan para controlar actuadores y dispositivos en el proceso, como motores, válvulas y relés. La CPU envía señales de control a través de estos módulos para realizar acciones físicas. Memoria: Almacena el programa de control y los datos temporales necesarios para la ejecución del programa. Esta memoria puede ser volátil (RAM) o no volátil (ROM), (Sarmiento, 2016).

Los PLC se utilizan en una amplia gama de aplicaciones industriales, desde la automatización de líneas de ensamblaje en la industria manufacturera hasta el control de sistemas de energía en la industria de la energía (Scheiperpeter et al., 2014). Son esenciales en la monitorización y control de procesos, lo que incluye la regulación de temperatura, presión, velocidad, flujo y otros parámetros críticos.

**1.4.3.3. Robótica.** La robótica se enfoca en el estudio y análisis de una categoría específica de sistemas mecánicos conocidos como robots, y lo que diferencia principalmente a un robot de un sistema mecatrónico es su capacidad de llevar a cabo múltiples funciones. En la mayoría de los



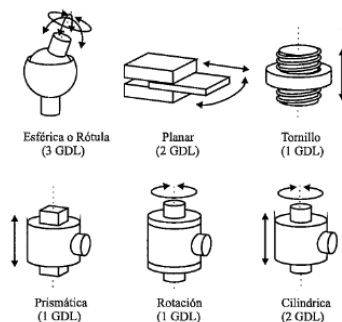
casos, los sistemas mecatrónicos desempeñan una sola función, como en el caso de electrodomésticos como lavadoras electrónicas, máquinas expendedoras de café, aspiradoras, cortadoras de papel, entre otros. Esto significa que la estructura mecánica de un sistema mecatrónico no está diseñada para ser versátil y realizar múltiples tareas. En contraste, un robot está configurado de manera que su estructura mecánica le permite llevar a cabo una amplia variedad de aplicaciones, simplemente modificando la herramienta que utiliza para una tarea en particular y realizando la programación correspondiente (Reyes, 2011).

Un robot este compuesto por los siguientes elementos: estructura mecánica, transmisiones, sistema de accionamiento, sistema sensorial, sistema de control y elementos terminales. En cuanto a su estructura mecánica el robot está formado por unos eslabones unidos por articulaciones que permite el movimiento relativo entre cada articulación. Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación respecto a la anterior se denomina grado de libertad (GDL), en la **Figura 2** se puede observar los diferentes tipos de articulaciones para robots. (Barrientos et al, 1997).

En la **Figura 3** se puede evidenciar las configuraciones más usuales de los robots en donde se priorizan las tres primeras articulaciones del robot ya que estas son las más importantes en el momento de posicionar su extremo en un punto en el espacio.

## Figura 2.

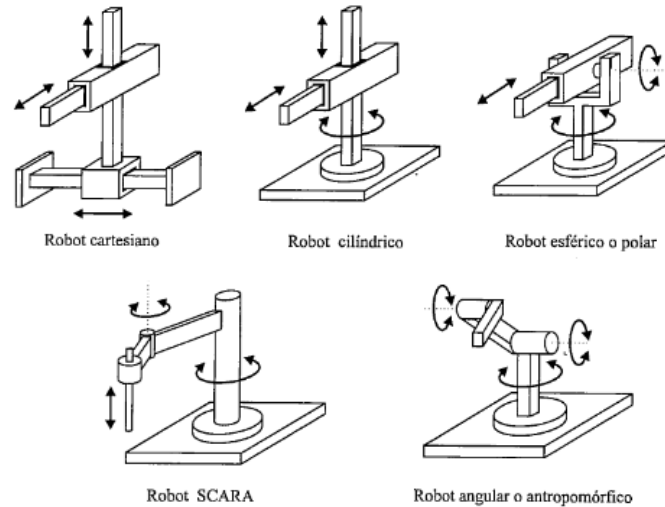
### *Tipos de articulación*



*Fuente: Barrientos et al, 1997.*

**Figura 3.**

*Configuraciones más comunes*



*Fuente: Barrientos et al, 199.)*

El UR3 de Universal Robots es un robot colaborativo COBOT, un "Cobot" es un tipo específico de robot que se utiliza en entornos de trabajo compartidos con humanos. Estos robots están diseñados para colaborar de manera segura con personas en tareas de manipulación y otras actividades. La idea es que los Cobots pueden trabajar junto a los operadores humanos, compartiendo el mismo espacio de trabajo y realizando diferentes tareas en colaboración. Su diseño y programación están orientados a garantizar la seguridad de los trabajadores humanos en su entorno y a facilitar la interacción entre humanos y robots en aplicaciones de manufactura y otras áreas de trabajo (Salimbeni, 2022).

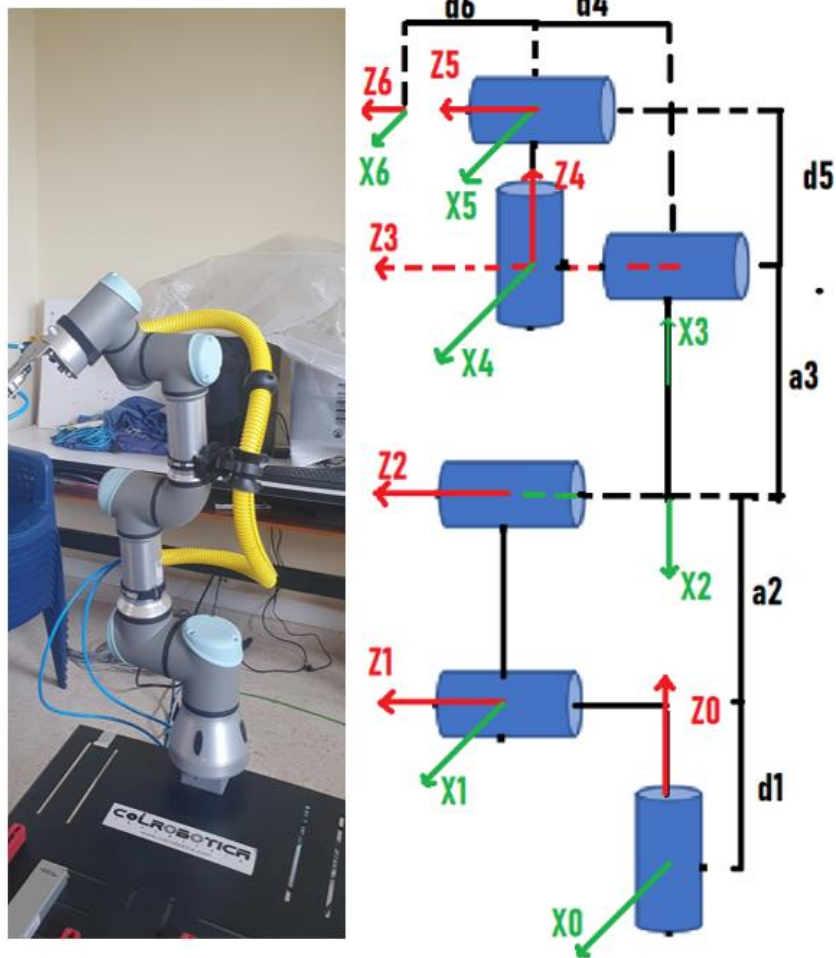
Este es un robot compacto y ligero que en su morfología se parece a un brazo humano, este robot está diseñado para realizar diferentes tipos de tareas en entornos industriales, además este robot cuenta con 6 grados de libertad rotacionales y una de las más importantes características a destacar es el rango de movimiento de sus articulaciones, siendo de  $\pm 360$  grados, excepto la última que es de rotación infinita. Esta capacidad de movimiento nos permite contar con un robot muy

flexible. Además, en este robot se puede realizar la conexión con el PLC a través del protocolo de comunicación PROFINET. (Universal Robots A/S, 2015).

En la Figura 4 se presenta en diagrama DH del robot UR3 El diagrama DH (Denavit-Hartenberg) es una representación gráfica utilizada en la cinemática de robots para describir las relaciones geométricas entre las diferentes articulaciones y eslabones de un robot manipulador. Fue desarrollado por Jacques Denavit y Richard Hartenberg en la década de 1950 como una herramienta para simplificar y estandarizar la descripción matemática de la cinemática de robots (Barrientos et al, 1997).

**Figura 4.**

*Diagrama DH estándar robot UR3*



**1.4.3.4. Sensores de detección.** La utilización de sensores es esencial en la automatización industrial para recopilar datos del entorno y tomar decisiones informadas. En el contexto de este proyecto, se requiere la detección de elementos metálicos y no metálicos en una banda transportadora. Para este propósito, se pueden emplear sensores de visión, que utilizan cámaras para identificar objetos, y sensores inductivos, que detectan la presencia de materiales metálicos (Pfeiffer, 2017).

Existen diferentes tipos de sensores que pueden ser útiles para la aplicación de la clasificación de materiales conductores y no conductores entre ellos se encuentran los sensores: capacitivos, inductivos, de visión, ultrasonido, peso, color e infrarrojos entre otros. En este caso nos enfocaremos en los que más potencial aplicativo observamos los cuales son los sensores capacitivos e inductivos. (Artagaveytia & Gutiérrez-Zorrilla, 2013)

Los sensores capacitivos son un tipo de sensor eléctrico que reacciona ante variaciones en la capacidad de un capacitor. Por lo tanto, pueden ser utilizados para medir cualquier parámetro que, al variar, modifique la capacidad de un capacitor. En este orden de ideas los sensores capacitivos se configurarán y calibrarán para detectar las diferencias en la capacitancia eléctrica entre materiales conductores y no conductores. Se ajustarán para establecer umbrales de detección adecuados. (Artagaveytia & Gutiérrez-Zorrilla, 2013)

El robot UR3 viene equipado con sensores de seguridad, de fuerza y colisiones, que permiten su uso en entornos de trabajo compartidos con humanos, sin necesidad de un vallado. (Universal Robots A/S, 2015).

## **1.5. Metodología**

### ***1.5.1. Tipo de investigación***

Dado que el enfoque principal de esta iniciativa es brindar una plataforma efectiva para la formación y el aprendizaje práctico en el campo de la automatización industrial, se ha optado por un enfoque de investigación aplicada.

La investigación aplicada se caracteriza por abordar problemas o situaciones específicas del mundo real y buscar soluciones prácticas a través de la aplicación de conocimientos y tecnologías existentes. En este caso, la problemática es clara: la necesidad de proporcionar a los estudiantes una experiencia de aprendizaje en la automatización industrial utilizando equipos disponibles en la universidad.

Dado que no se pretende desarrollar nuevos conocimientos teóricos o tecnologías revolucionarias, sino más bien utilizar eficazmente los recursos existentes para fines educativos y de entrenamiento, la investigación aplicada es el enfoque más adecuado. Esta metodología permitirá lograr los objetivos del proyecto, que se centran en la formación práctica de los estudiantes en el uso de un PLC, un robot y una banda transportadora, mejorando así su preparación para futuras aplicaciones industriales.

### ***1.5.2. Línea de investigación***

La línea de investigación asociada a este proyecto se encuentra dentro de Desarrollo Mecatrónico y área temática Electrónica, Automatización y Control, la cual se enfoca en la implementación y aprovechamiento efectivo de tecnologías avanzadas en el ámbito de la automatización industrial para mejorar la formación y el aprendizaje de estudiantes en instituciones educativas.

### ***1.5.3. Hipótesis***

**1.5.3.1. Hipótesis de la investigación.** La implementación de un banco de laboratorio de automatización que integra un PLC Siemens S1200 y un robot UR3 en la Universidad Mariana, Pasto, para la separación de materiales conductores y no conductores simula un proceso industrial de manera correcta y fortalece de manera significativa las habilidades prácticas de los estudiantes de ingeniería Mecatrónica

**1.5.3.2. Hipótesis nula.** La implementación de un banco de laboratorio de automatización que integra un PLC Siemens S1200 y un robot UR3 en la Universidad Mariana, Pasto, para la

separación de materiales conductores y no conductores no simula un proceso industrial de manera correcta y no fortalece de manera significativa las habilidades prácticas de los estudiantes de ingeniería Mecatrónica.

**1.5.3.3. Hipótesis alternativas de la investigación.** El prototipo de banco de laboratorio funciona de manera correcta y tiene un porcentaje mayor al 60% de repetibilidad en la fase pick and place del robot UR3.

#### 1.5.4. Descripción metodológica

En la Tabla 3 se presenta la matriz metodológica la cual explica el proceso metodológico por cada objetivo para cumplir exitosamente en presente proyecto de investigación

**Tabla 3.**

*Matriz metodológica*

Etapa	Actividades Metodológicas
Establecer los requerimientos software/hardware para la instrumentación y diseño del banco de laboratorio en el proceso de separación de materiales conductores y no conductores.	Revisión del marco de antecedentes Análisis del autómata programable a emplear y el robot colaborativo UR3 Establecer los requerimientos del proyecto Selección de diferentes sensores inductivos y capacitivos para la aplicación del proyecto Selección de elementos conductores y no conductores que se enviarán por la banda.
Implementar la arquitectura software/hardware del banco de laboratorio, definiendo la estructura de programación del robot UR3 para realizar la tarea de separación de materiales conductores y no	Verificar y poner a punto la banda transportadora. Conexión de la banda, PLC y sensores (programa de detención de la banda cuando el sensor detecte un objeto)

---

conductores, comandado por un PLC.	Protocolo de comunicación entre el robot colaborativo UR3 y el PLC
	Programa de clasificación 1
	Programad de clasificación 2
	Entrega del informe de avance
Evaluar el funcionamiento del banco de laboratorio en el factor de repetibilidad y error de clasificación, mediante el diseño y realización de prácticas de laboratorio que emule el proceso de separación de materiales conductores y no conductores.	Verificar el correcto funcionamiento del laboratorio según los requerimientos planteados
	Realizar correcciones (si es necesario) para el correcto funcionamiento del banco de laboratorio.
	validación Interna
	validación externa (prácticas de laboratorio)
	Redacción de documento.
	Entrega del informe final

---

### 1.5.5. Validación

**1.5.5.1. Validación interna.** Se evalúa el funcionamiento del banco de laboratorio en aspectos como, posición de error y secuencia correcta en la clasificación de materiales conductores y no conductores.

**1.5.5.2. Validación externa.** Para la validación externa se plantea realizar una práctica de laboratorio con los estudiantes la cual pondrá a prueba el banco de laboratorio a través de una encuesta de satisfacción por parte de los estudiantes que realizaron la práctica de laboratorio.

## 2. Resultados

### 2.1. Resultados objetivo 1

En esta sección se encuentran los resultados obtenidos al objetivo 1, iniciando con el análisis de los equipos a trabajar como el robot UR3, PLC y *switch ethernet*, para a partir de este análisis definir los requerimientos para los demás elementos como sensores, actuadores entre otros. Finalmente, en este objetivo se diseñan los elementos conductores y no conductores que se enviarán por la banda.

#### 2.1.1. Autómata a emplear

El PLC S7-1200 CPU 1214C AC/DC/RLY 6ES7214-1BG40-0XB0 es un controlador lógico programable diseñado para aplicaciones de control y de automatización industrial, en este caso en específico de CPU gracias a su versatilidad de compatibilidad tanto con elementos de corriente alterna (AC) o de corriente directa (DC) empleado en diferentes aplicaciones en la automatización y control industrial. Cuenta con salidas de tipo relé para controlar dispositivos externos como motores, válvulas u otros equipos eléctricos y compatibilidad, protocolo de conexión PROFINET y con el robot colaborativo UR3, como se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4.**

*Características PLC S7-1200 CPU 1214C AC/DC/RLY*

<b>PLC S7-1200 CPU 1214C AC/DC/RLY</b>	
Entradas Analógicas	2
Rango VDC entradas analógicas	0-10V
Salidas Analógicas	0
Entradas digitales	14
Tensión nominal entradas digitales	24V
Para señal '0'	5 V DC a 1mA
Para señal '1'	15 V DC a 2.5 mA
Salidas digitales tipo relé	10 relés



---

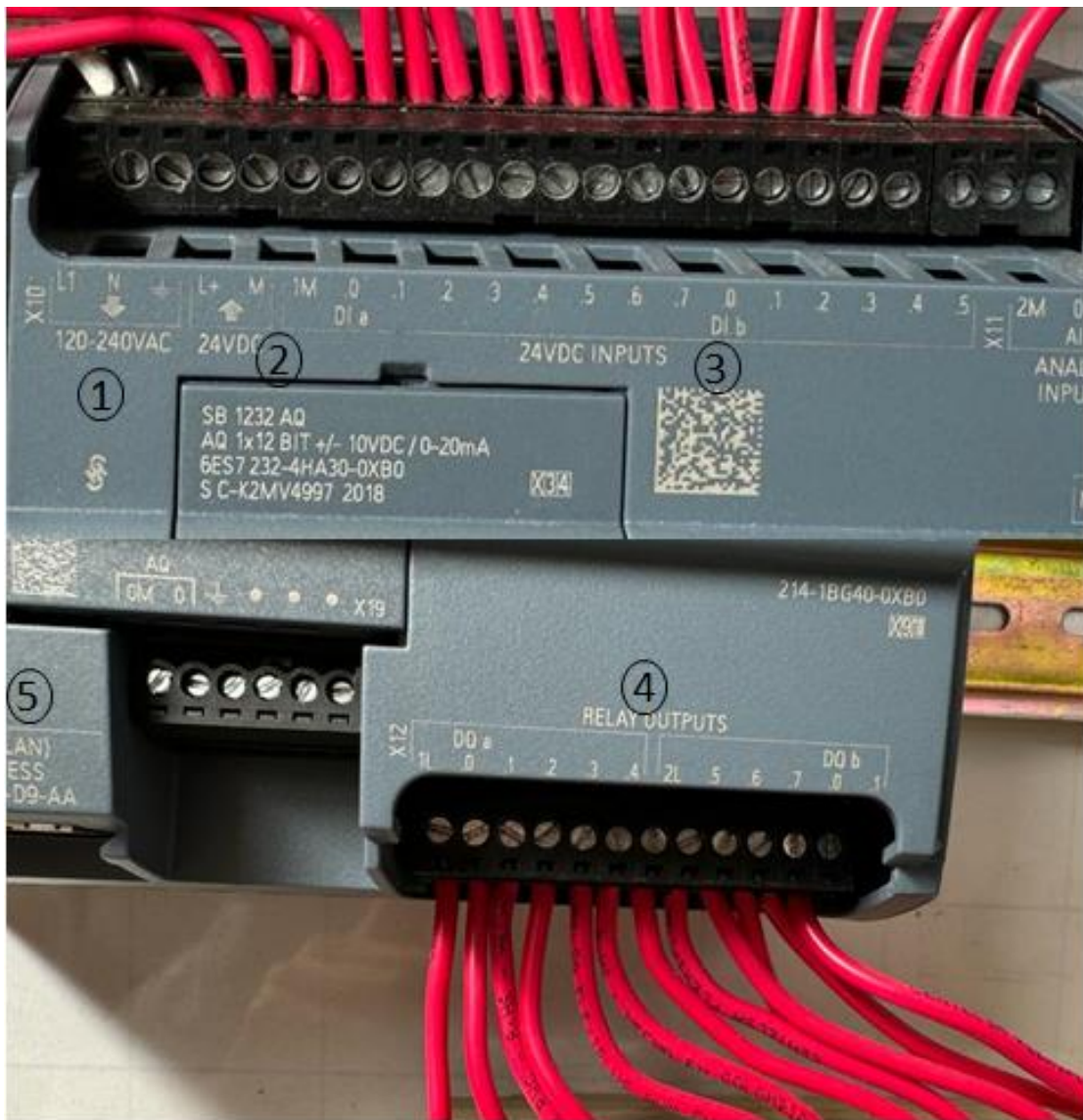
Salidas digitales (DC)	0
Interfaz compatible con UR3	PROFINET

---

En la **Figura 5** se puede observar las principales características del PLC empleado las cuales son: alimentación del autómata (1); salida de 24VDC (2); Entradas digitales (3); salidas tipo relé (4); puerto LAN RJ45 (5).

**Figura 5.**

*PLC empleado*



### 2.1.2. Robot UR3

El robot colaborativo UR3 es un robot colaborativo *COBOT*, un *cobot* es un tipo específico de robot que se utiliza en entornos de trabajo compartidos con humanos. Estos robots están diseñados para colaborar de manera segura con personas en tareas de manipulación y otras actividades. La idea es que los *cobots* pueden trabajar junto a los operadores humanos, este es un robot compacto y ligero que en su morfología se parece a un brazo humano, este robot está diseñado para realizar diferentes tipos de tareas en entornos industriales, además este robot como se muestra en la **Tabla 5** cuenta con 6 grados de libertad rotacionales y una de las más importantes características a destacar es el rango de movimiento de sus articulaciones, siendo de  $\pm 360$  grados, excepto la última que es de rotación a  $360^\circ$ . Esta capacidad de movimiento nos permite contar con un robot muy flexible. Además, en este robot se puede realizar la conexión con el PLC a través del protocolo de comunicación PROFINET.

**Tabla 5.**

*Parámetros robot UR3*

<i>Peso</i>	<b>11 kg</b>
Radio de trabajo	500 mm
Rango de ángulos de las articulaciones	$\pm 360$ grados
Grados de libertad (GDL)	6
Entradas digitales controlbox	16
Salidas digitales controlbox	16
Entradas analógicas controlbox	2
Salidas analógicas controlbox	2
Fuente de alimentación	24V 2A en controlbox y 12 V/24 V 600 mA en tool
Comunicación	CP/IP 100 Mbit: IEEE 802.3u, 100BASE-TX Puerto Ethernet & Modbus TCP

### **2.1.3. Módulo SCALANCE XB-005**

Adicionalmente para este proyecto se empleó el módulo **SCALANCE XB-005** que se muestra en la Figura 6. Este módulo cumple la función de switch industrial ethernet el cual es de vital ayuda para la interconexión entre el computador desde el programa TIA PORTAL hacia el PLC S7-1200 y de este a otros dispositivos, este módulo es ampliamente usado para controlar desde el PLC diferentes tipos de dispositivos, en nuestro caso se utilizará para comunicar el robot UR3 mediante el protocolo de PROFINET.

#### **Figura 6.**

*Modulo SCALANCE XB-005*



### 2.1.4. Requerimientos

Para definir los requisitos del banco de laboratorio, es esencial identificar sus componentes. En este caso, el banco estará compuesto por los siguientes elementos: fuente de alimentación, módulo relé, cinta transportadora, regulador de ancho de pulso PWM, sensor óptico, sensor inductivo, conectores de banana, cilindro neumático de doble efecto, válvula solenoide y regulador de presión. Así, se establecen los requisitos del banco de laboratorio que se detallan en la Tabla 6.

**Tabla 6.**

*Requerimientos del proyecto*

<b>Componente</b>	<b>Requerimientos</b>	<b>Requerimientos</b>
Fuente de alimentación	Salida DC (1):12 V	Salida DC (2):18 V
Modulo Relé	Alimentación: 12 VDC	Numero de canales: 1 canal
Modulo variador de velocidad	Alimentación: 12 VDC	Porcentaje PWM: 0-100%
Sensor óptico	Alimentación: 24 VDC Alcance: 1-200 mm	Conmutación: NPN
Sensor inductivo	Alimentación: 24 VDC Alcance: 0-10 mm	Conmutación: NPN
Cilindro neumático	Longitud de carrera: 50-100 mm	Presión: 5-10 bar
Electroválvula	Alimentación: 12 VDC	Presión: 1-8 bar
Unidad de regulación de aire	Presión regulable: 0-10 bar	Material del cuerpo: Acero inoxidable

### 2.1.5. Selección de sensores y demás elementos

En la Figura 7 muestra los componentes elegidos: módulo relé(A), módulo variador PWM (B), sensor óptico(C) y sensor inductivo (D). En la **Tabla 7** se enseñan las características de los elementos seleccionados.

**Figura 7.**

*Módulos y sensores*



*Nota: Modulo relé (A), variador PWM (B), sensor óptico (C) e inductivo (D)*

**Tabla 7.**

*Características componentes elegidos*

Componente	Características	Características
Modulo Relé SRD-12VDC	Alimentación:12 VDC	1 canal
Controlador PWM 12V-40V/10A	Alimentación: 12-40 VDC	Porcentaje PWM:10-90%
Sensor óptico E3f-ds30c4 NPN	Alimentación: 6-36 VDC Alcance: 50-300 mm	Conmutación: NPN
Sensor inductivo LJ18A3-8-Z/BX NPN	Alimentación: 6-36 VDC Alcance: 1-8 mm	Conmutación: NPN

Adicionalmente en la Figura 8 se encuentran los elementos necesarios restantes como: actuador neumático (A), electroválvula (B), unidad de regulación de aire (C) y manguera neumática (D). En la Tabla 8 se enseñan las características de los elementos seleccionados.

**Figura 8.**

*Componentes neumáticos*



*Nota: Cilindro doble efecto(A), válvula solenoide(B), regulador de presión(C) y manguera neumática(D)*

**Tabla 8.**

*Características componentes neumáticos*

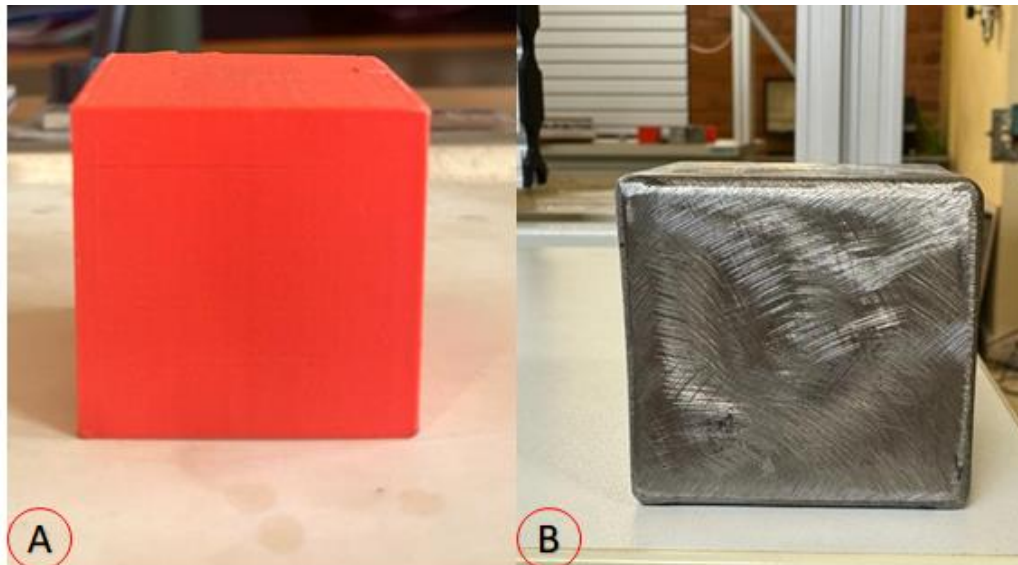
<b>Componente</b>	<b>Características</b>	<b>Características</b>
Cilindro neumático MA 20X75 SU	Longitud de carrera: 75 mm	Presión: 1-8 bar
válvula neumática 5/2 solenoid 4V210-08 12VDC	Alimentación: 12 VDC	Presión: 1-8 bar
Regulador de presión de aire AR-2000	Presión regulable: 0-9 bar	Cuerpo: acero inoxidable
Manguera neumática 6MM	Presión máxima: 10 bar	

### **2.1.6. Selección de elementos conductores y no conductores**

Como se puede ver en la Figura 9 se diseñaron seis cubos de 5cm cúbicos, 3 cubos no conductores y 3 cubos conductores. En el caso del material no conductor el cubo A, se lo realizó mediante impresión 3D y su material es el PLA en cuanto al material conductor (B) se lo realizó con aluminio reciclado de la Universidad Mariana sede Alvernia.

#### **Figura 9.**

*Elementos no conductores y conductores*



## **2.2. Resultados objetivo 2**

### **2.2.1. Verificar y poner a punto la banda transportadora**

El banco de laboratorio propuesto, integra una cinta transportadora desarrollada en un trabajo de grado en el año 2021, la cual se encontró en desuso y en mal estado electromecánica. Por tanto, se realiza una repotenciación, instrumentación y mantenimiento. En la Tabla 9 se muestran las fallas encontradas y el mantenimiento realizado.

**Tabla 9.**

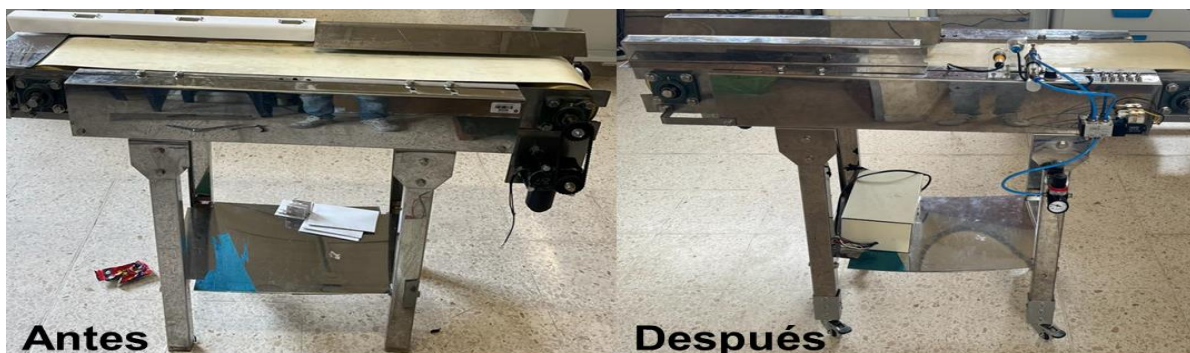
*Mantenimiento realizado a la cinta transportadora*

<b>Fallas encontradas</b>	<b>Mantenimiento realizado</b>
Error en la fuente de alimentación, transistores dañados, fusible quemado e integrado de control en desuso	Remplazo de transistores dañados, remplazo de fusible quemado, deshabilitar integrado de control
Ejes desalineados	Alinear ejes de la cinta, agregar tornillos faltantes
Engrane mal tensionado	Apertura de nuevos orificios en la cinta transportadora para que el engrane quede bien tensionado.

Adicionalmente se agregó a la cinta transportadora rodachines para mejorar la manipulación dentro de los laboratorios. En la Figura 10 puede observar cómo se encontró la cinta transportadora y como está actualmente.

**Figura 10.**

*Banda transportadora antes(A) y banda transportadora actual(B)*



### **2.2.2. Adecuación de los elementos en la cinta transportadora**

En la Figura 11 se pueden ver los elementos que se usaron para instrumentar la cinta transportadora: sensor óptico, sensor inductivo, cilindro neumático doble efecto, regulador de velocidad, válvula



solenóide y regulador de presión de aire. Por último, también se agregaron 10 puertos de conexión para facilitar las conexiones de los elementos de la cinta transportadora a el PLC por parte de los estudiantes en las prácticas de laboratorio.

**Figura 11.**

*Elementos agregados a la cinta transportadora*

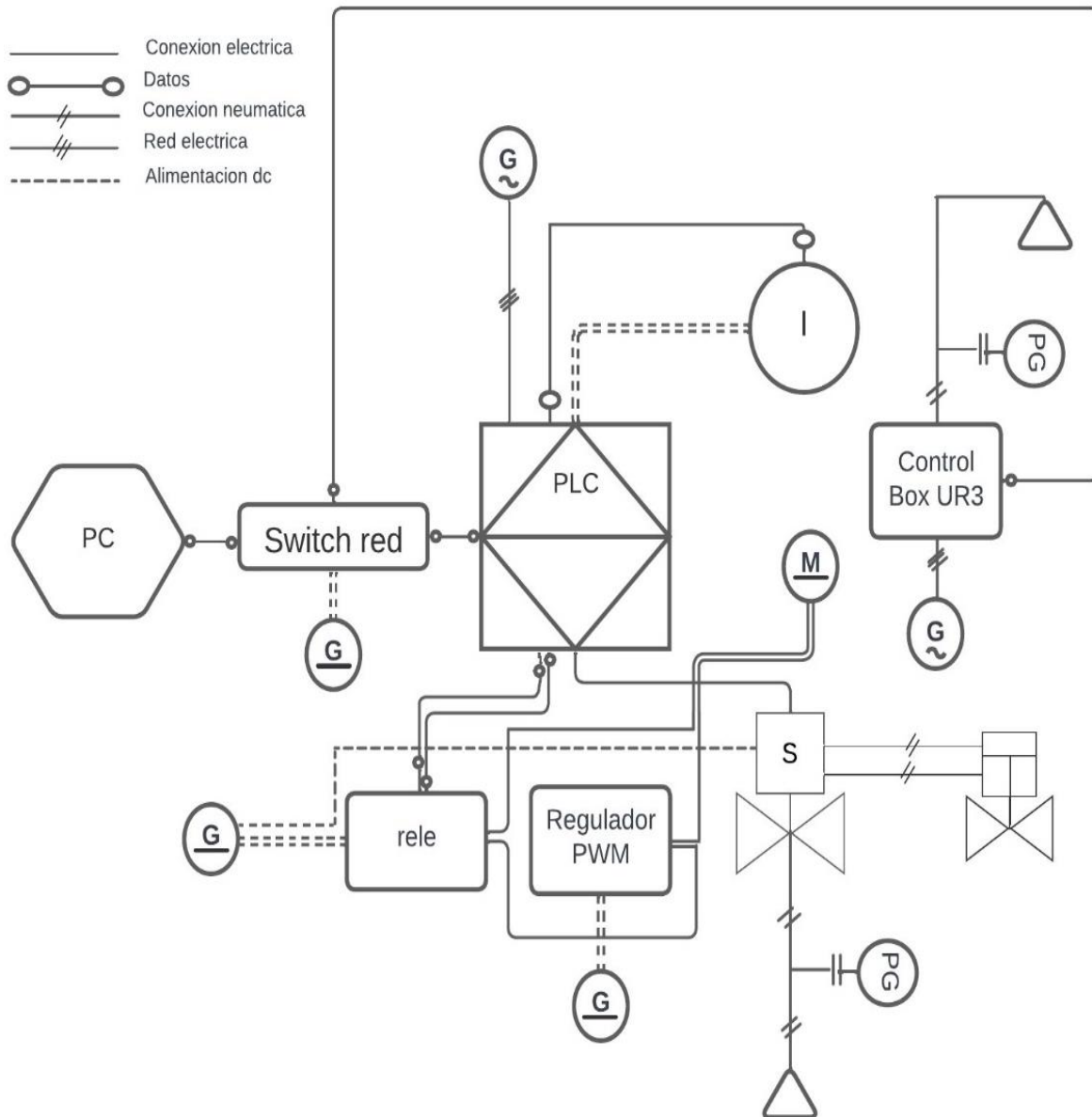


**2.2.3. Primer programa de clasificación**

En la Figura 12 se muestra el diagrama P&ID que incluye los elementos que se utilizan para el primer programa de clasificación, este tipo de diagrama es de los más utilizados en la industria en los procesos de automatización y control y muestra los diferentes tipos de conexiones entre los elementos para su correcto funcionamiento.

**Figura 12.**

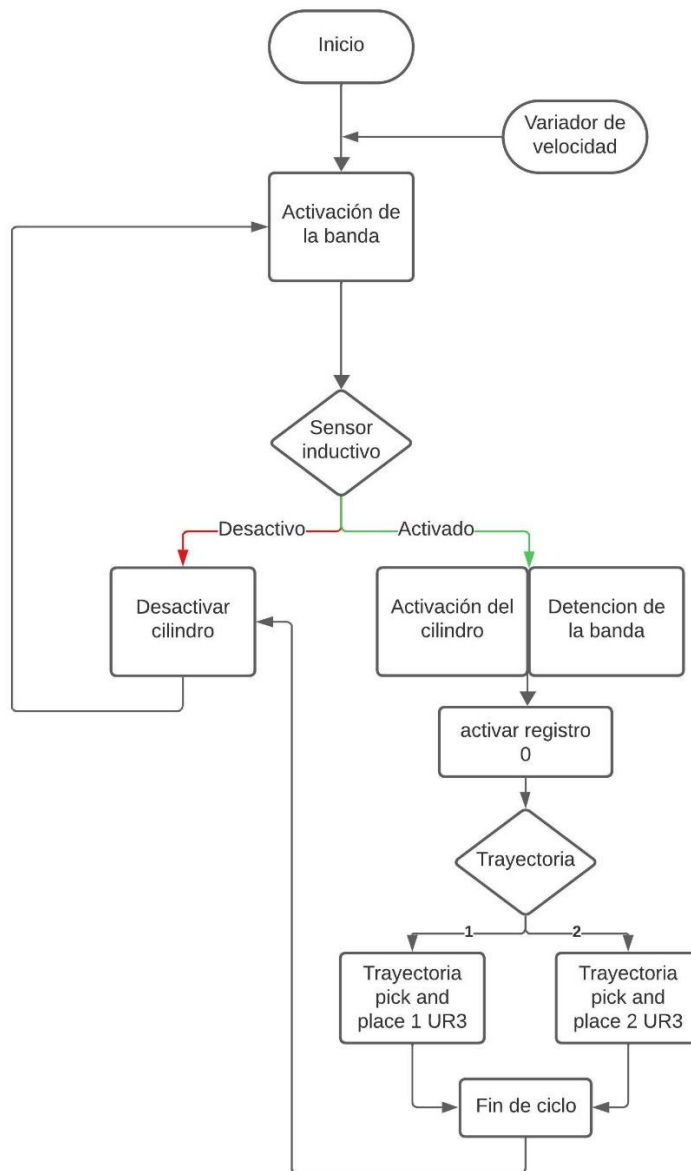
*Diagrama P&ID pg-1*



En la Figura 13 se encuentra el diagrama lógico del funcionamiento del primer programa de clasificación, lo que busca este programa es clasificar elementos conductores de la banda transportadora con el robot UR3, en este caso para dos trayectorias configuradas con el UR3.

**Figura 13.**

*Diagrama lógico de funcionamiento programa 1*



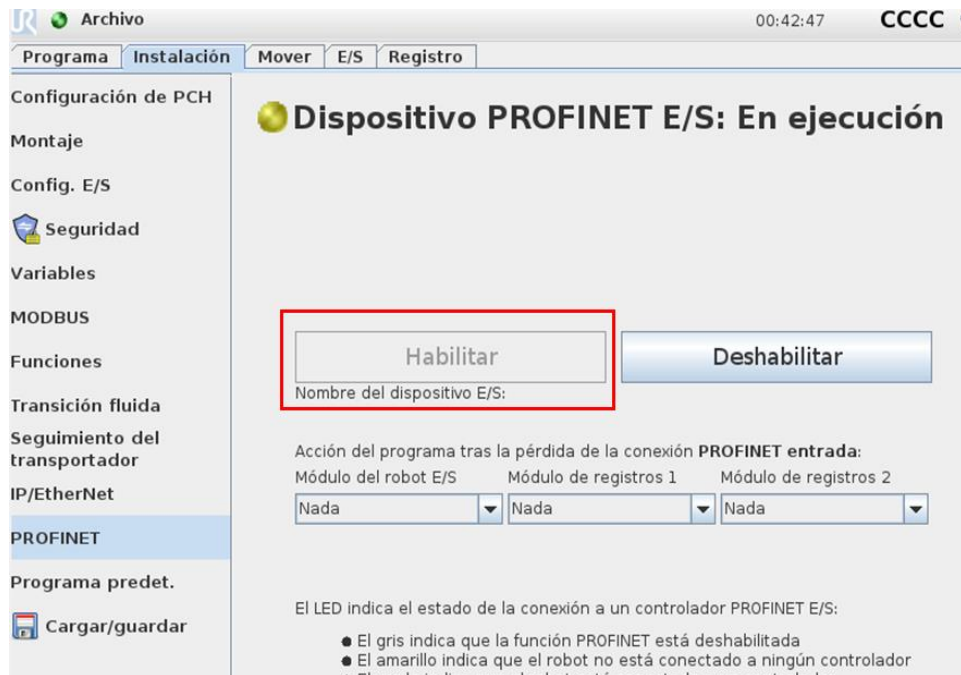
El programa detecta el elemento conductor mediante un sensor inductivo y activará el cilindro neumático para que detenga el objeto y la banda. Una vez el elemento este en su posición se activará la trayectoria *pick and place* del robot UR3 y retirará el elemento conductor de la cinta transportadora finalizado su ciclo de *pick and place* se reanudará el proceso desactivando el

actuador(cilindro) y se reanuda la banda. En cambio, si el elemento es no conductor, este no se detiene ni se retira de la cinta transportadora; simplemente continúa su trayectoria a lo largo de la banda.

Para iniciar con la programación del robot es necesario tener habilitada la opción de PROFINET en el programa del robot UR3 para lograr la comunicación con el PLC. Esta opción debe estar habilitada para los dos programas como se muestra en la Figura 14.

**Figura 14.**

*Habilitar PROFINET*

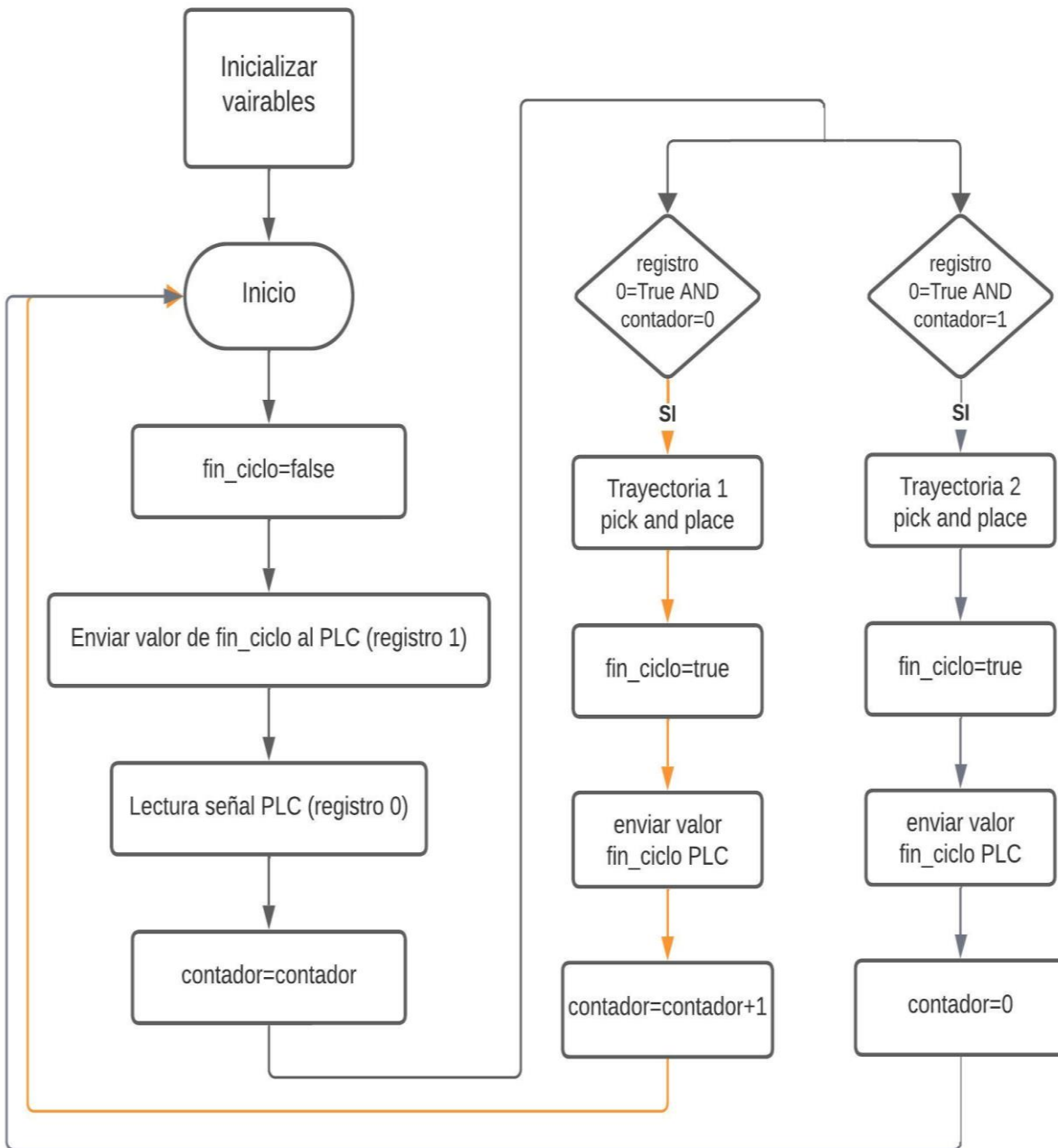


El programa lógico del robot UR3 se presenta en la **Figura 15**. Comienza con la inicialización de las variables, seguida por la adición de una variable de ciclo para controlar el proceso del robot. Esta variable se envía al PLC mediante el comando `“write_output_boolean_register(1,fin_ciclo)”`. Luego, se recibe la señal del PLC a través del registro 0 con el comando `“sinductivopl=read_input_boolean_register(0)”`. Finalmente, se define un contador que ayuda a determinar las trayectorias correspondientes. Después de esto, se compara si el registro 0 está

activado y el valor del contador, y en función de esto, se ejecuta la trayectoria pick and place 1 o 2.

**Figura 15.**

*Diagrama lógico de funcionamiento programa UR3 pg-1*








Inicialmente es necesario configurar el PLC para su conexión con el robot UR3 mediante PROFINET, para esto es necesaria descarga la librería proporcionada en la documentación oficial de Universal Robots.(*Universal Robots - PROFINet How-To Guide CB3*, n.d.).

Posterior a esto se creó el programa en el PLC S7-1200 en el cual se utilizan las variables que se muestran en la **Figura 16**. Como se muestra en la imagen se utilizan las variables URI y URO gracias a las librerías proporcionadas por Universales Robots, con estas variables podemos comunicar el PLC con el robot UR3, para enviar del PLC al robot UR3 se utiliza URO y para recibir en el PLC del UR3 se utiliza URI.

**Figura 16.**

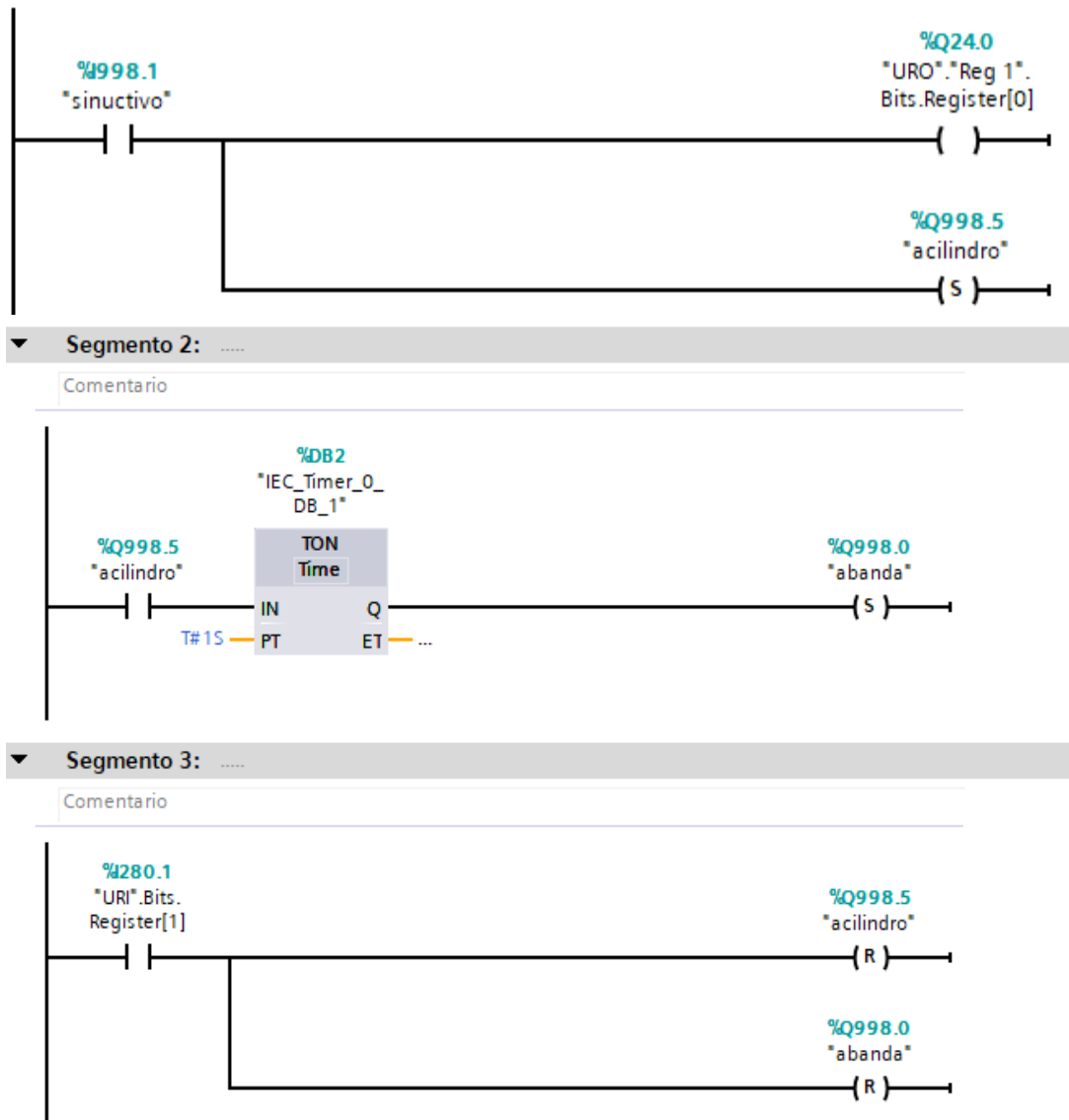
*Variables utilizadas S7-1200 pg-1*

	Nombre	Tipo de datos	Dirección
	URI	"UR_T20"	%I0.0
	URO	"UR_O2T"	%Q0.0
	sinactivo	Bool	%I998.1
	acilindro	Bool	%Q998.5
	abanda	Bool	%Q998.0

Siguiendo, se crea el programa lógico en Ladder el cual se muestra en la Figura 17, el programa inicia en el segmento 1 con la detección del sensor inductivo es decir que si el sensor inductivo se activa este va a enviar la señal al robot a través del registro 0 por el comando URO.Reg1.Bits.Register(0) y también activara el cilindro para la detección de la pieza, posterior a esto en el segmento 2 si el cilindro se encuentra activado se activara un temporizador mínimo que es el que asegura que la pieza se detenga justo en la posición deseada después de 1s y detendrá la banda. Por ultimo en el segmento 3 una vez el robot haya finalizado su ciclo enviara una señal que se lee en el programa con el comando URI.Bits.Register[1] lo que nos reanudara el proceso con el *reset* del cilindro y de la banda.

**Figura 17.**

Programa Ladder pg-1

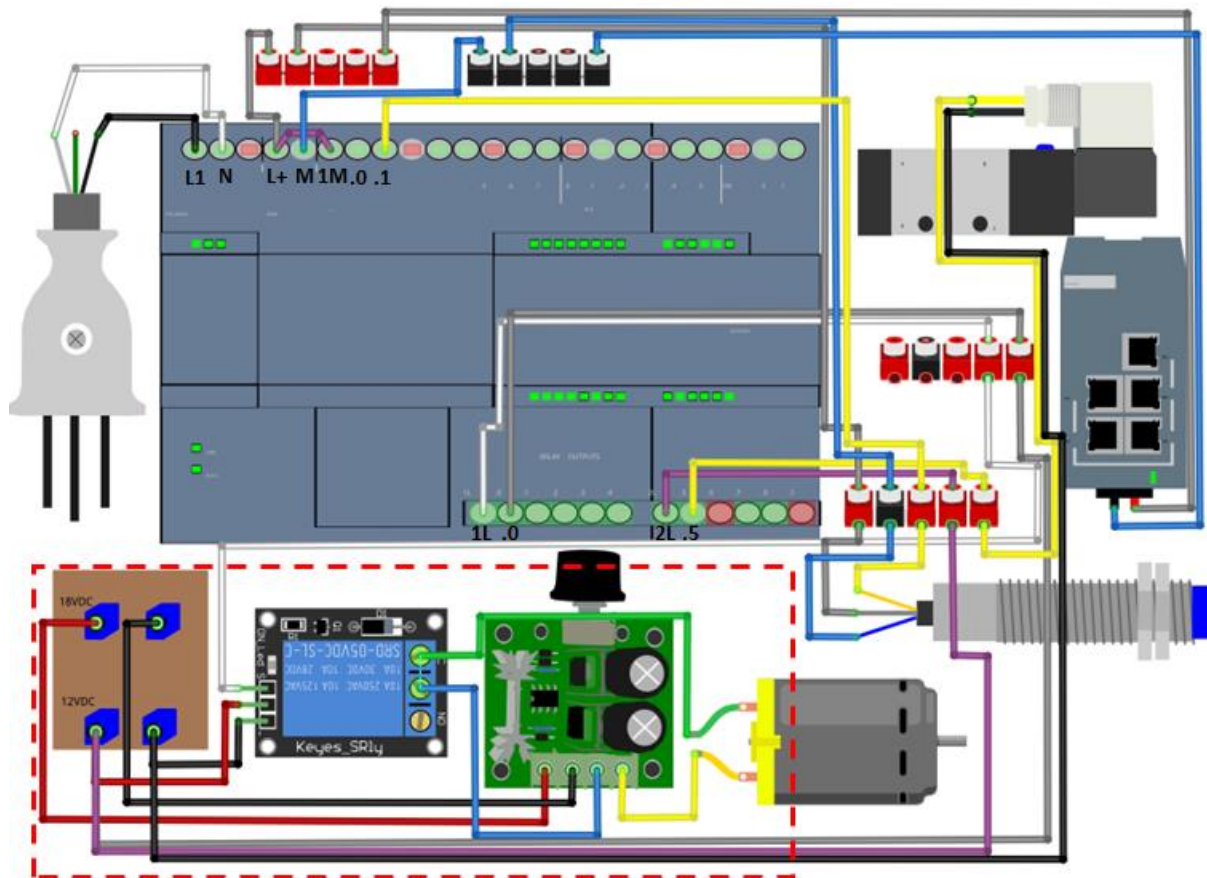


En la Figura 18 se muestra el diagrama eléctrico didáctico para el programa de clasificación uno elaborado en el software de *Fritzing*, con el fin de facilitar el entendimiento de los estudiantes en el momento de conectar los elementos entre sí, en este diagrama los colores de los cables son iguales a los que el estudiante conectara en la práctica de laboratorio. La parte delimitada por rojo son las conexiones internas del banco de laboratorio es decir estas conexiones no son modificadas

durante el laboratorio, las conexiones que realizara el estudiante son desde las bananas de conexión de la banda hacia las entradas y salidas del autómata.

**Figura 18.**

*Diagrama eléctrico didáctico pg-1*

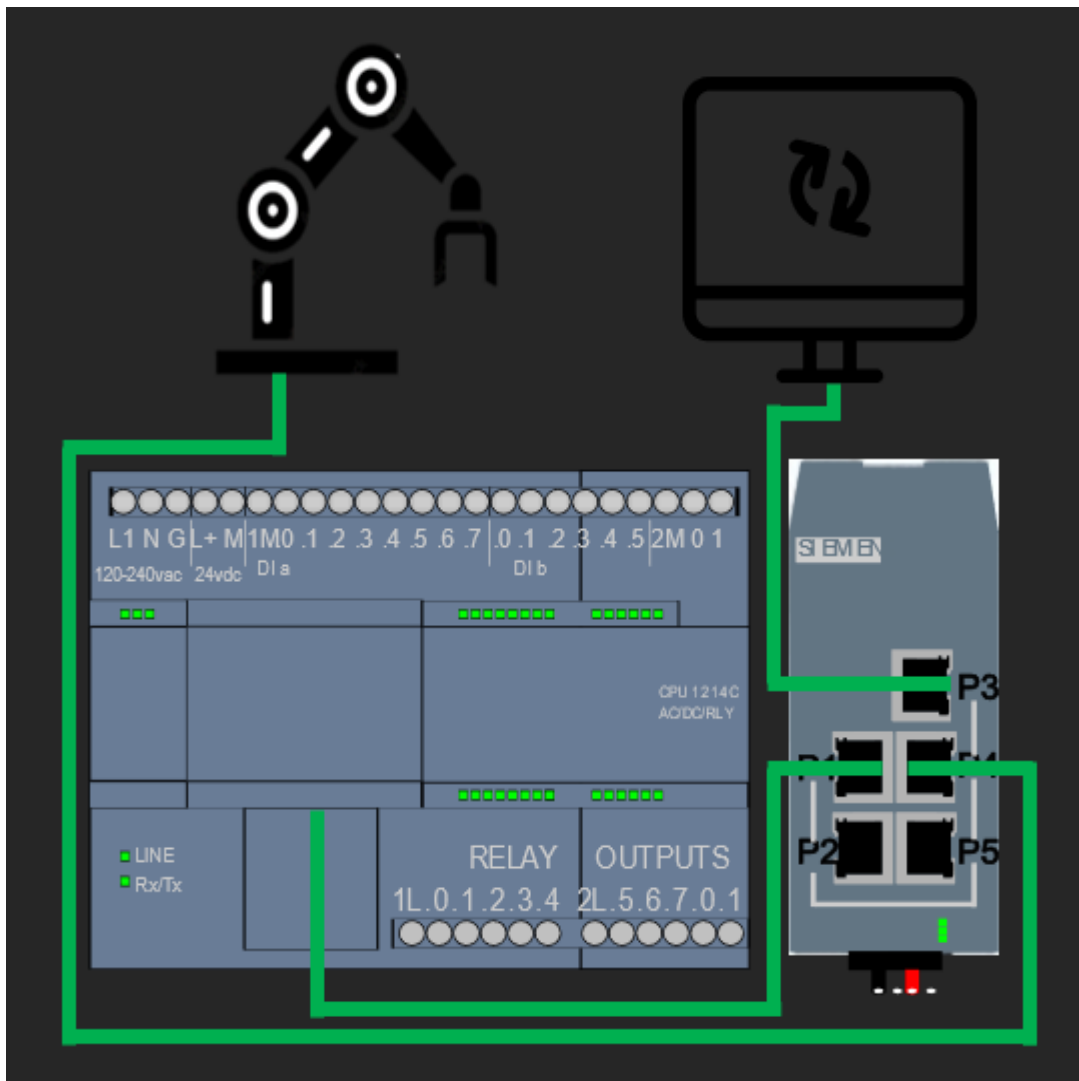


En la Figura 19 se muestra el diagrama de la conexión de red Ethernet, en este caso esta conexión será igual para el primer programa de clasificación como para el segundo programa de clasificación.



**Figura 19.**

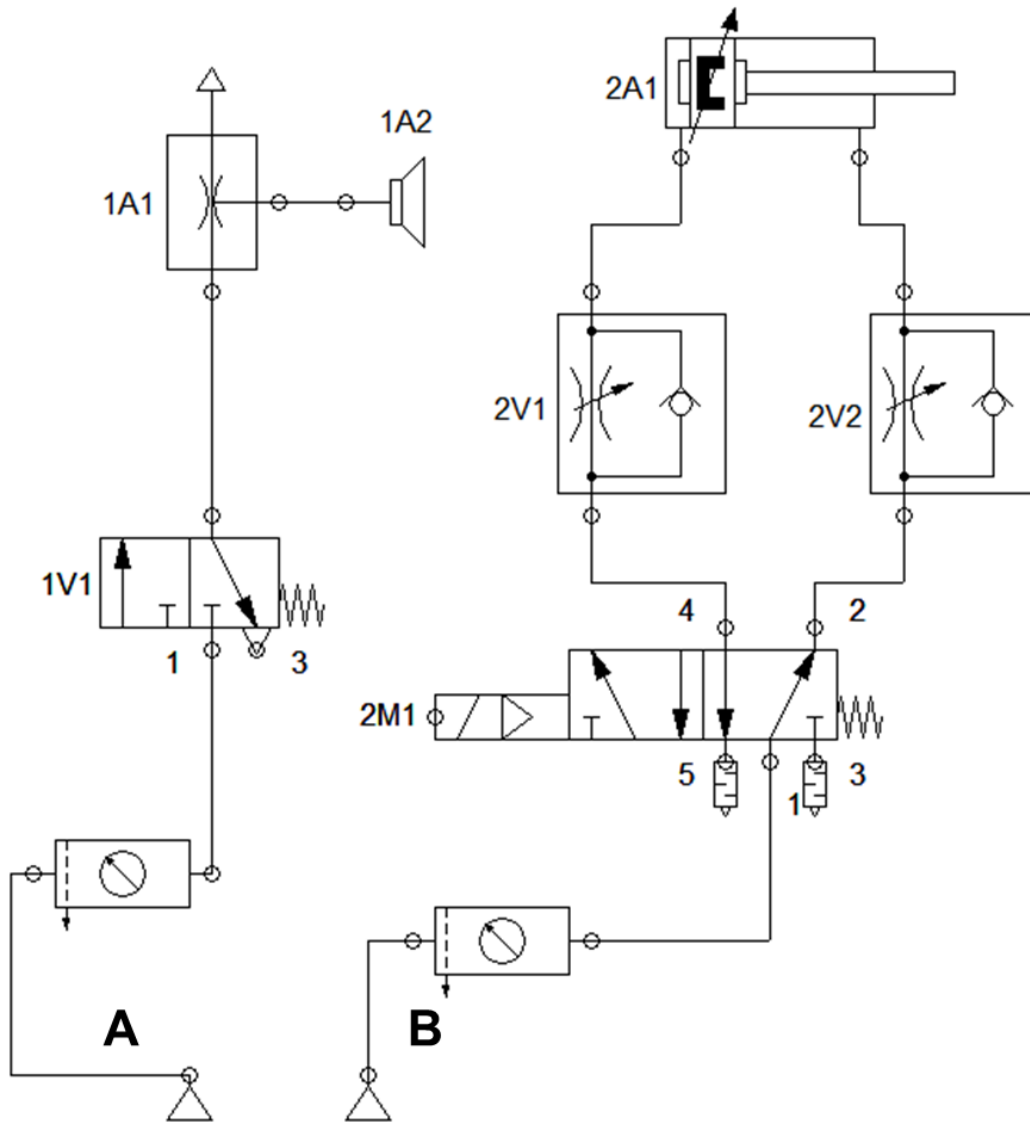
*Conexión de red ethernet*



En la Figura 20 se muestra el diagrama neumático según la norma ISO 1219-2:1995-12, donde la sección A se encuentra el diagrama neumático del *gripper* tipo ventosa del robot UR3. y en la sección B el diagrama neumático de la cinta transportadora. Las conexiones neumáticas son iguales para el programa de clasificación 1 y 2.

**Figura 20.**

*Diagrama neumático*



#### 2.2.4. Segundo programa de clasificación

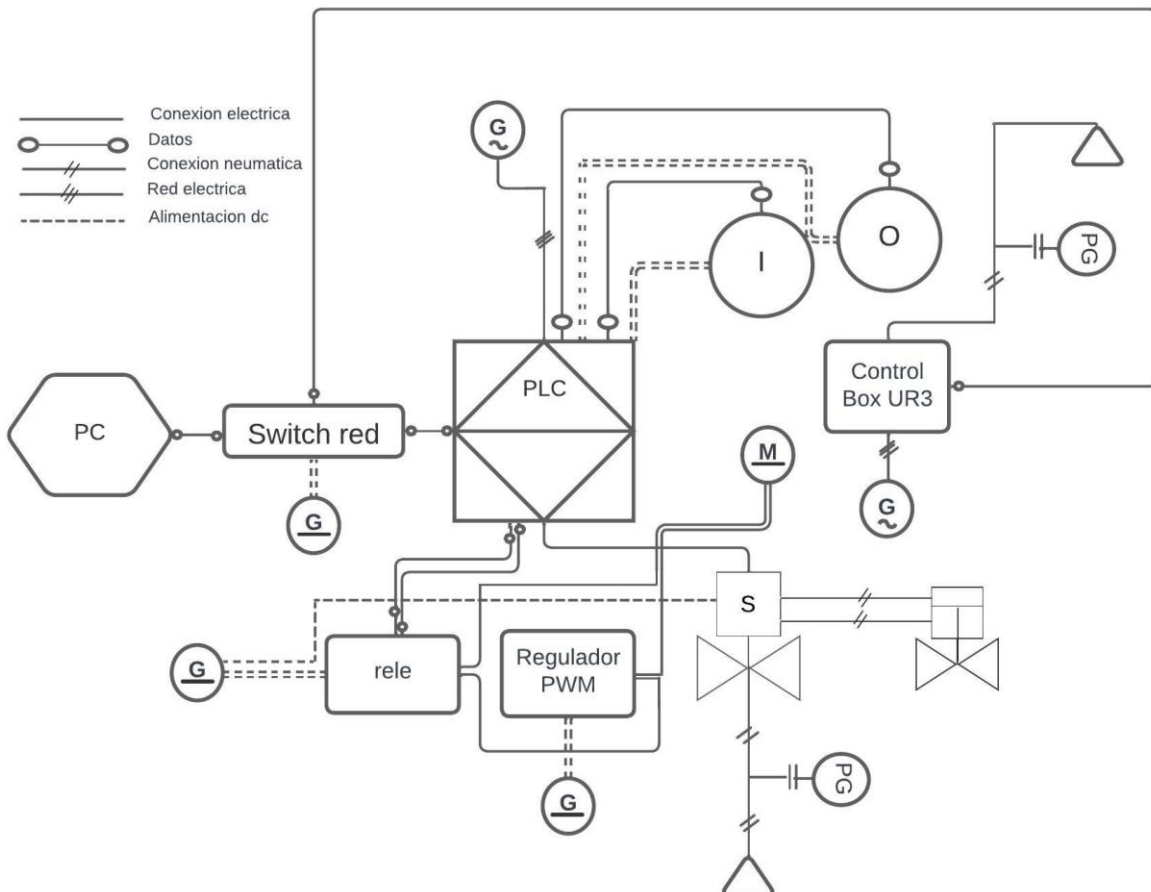
El programa inicia con la activación de la banda, una vez activada la banda el sensor óptico detectará cualquier pieza y activará el cilindro neumático y detendrá así mismo la banda, por último, activa una memoria denominada Mplás, si el sensor inductivo se activa activará otra

memoria denominada Mmetal, con la finalidad de comparar si es una pieza plástica o no. En ese caso la memoria Mplás debe estar activa y la memoria Mmetal debe estar inactiva si se cumple esta condición se enviará una señal por el registro 0 al Robot UR3, este con ayuda de un contador ejecutará la trayectoria correspondiente. Si es una pieza metálica o conductora quiere decir que la memoria Mplás y Mmetal deben estar activas si se cumplen estas dos condiciones se envía una señal por el registro 1 al robot UR3 este con ayuda de un contador ejecutara la trayectoria correspondiente, tanto para los elementos plásticos como metálicos.

En la Figura 21 se muestra el diagrama P&ID que incluye todos los elementos que se utilizan para el segundo programa de clasificación, este tipo de diagrama es de los más utilizados en la industria en los procesos de automatización y control y muestra los diferentes tipos de conexiones entre los elementos para su correcto funcionamiento.

**Figura 21.**

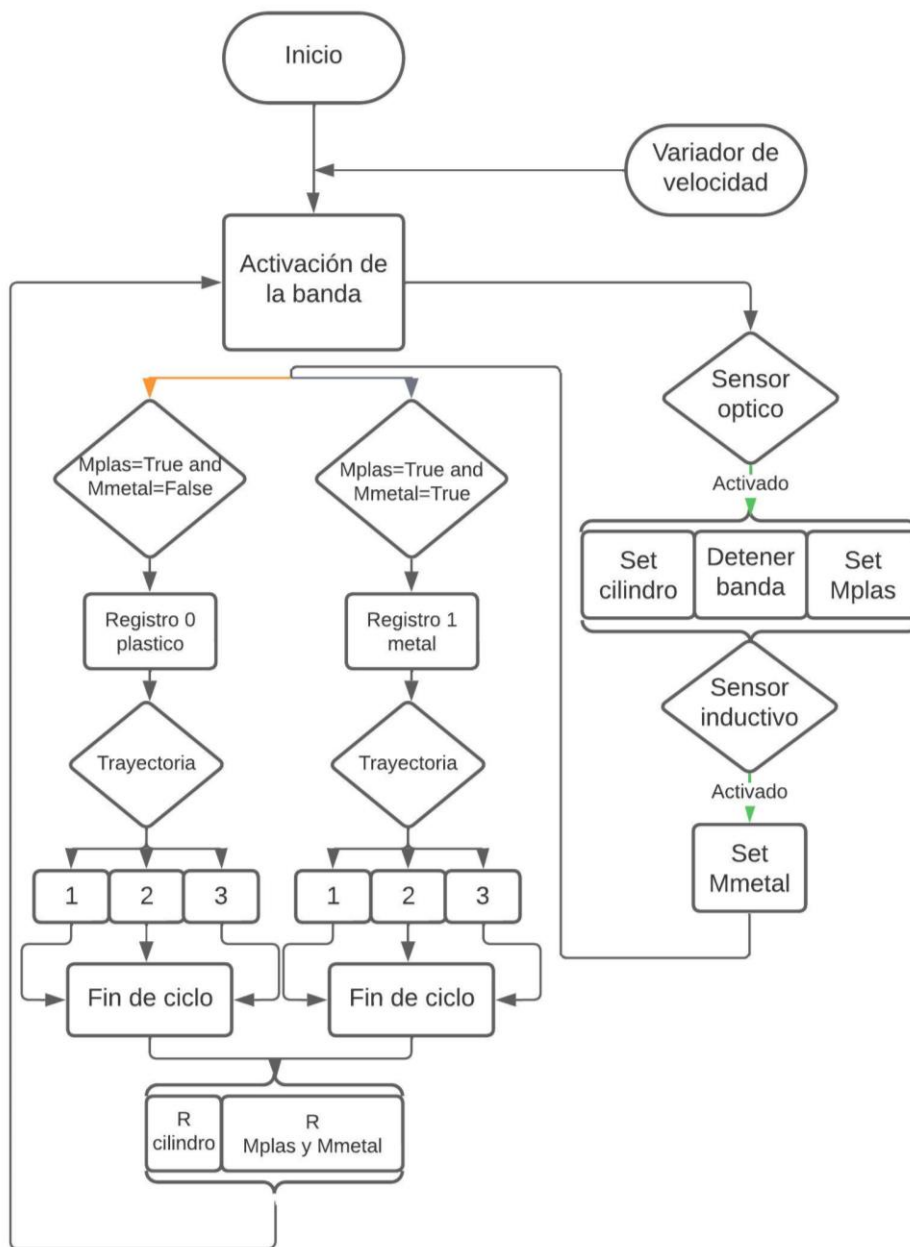
*Diagrama P&ID pg-2*



En la Figura 22 se encuentra el diagrama lógico del funcionamiento del segundo programa de clasificación, lo que busca este programa es clasificar elementos conductores y no conductores de la banda transportadora con el robot UR3, para clasificarlos según su conductividad en el tablero de trabajo en seis posiciones diferentes, 3 para los conductores y 3 para los no conductores.

**Figura 22.**

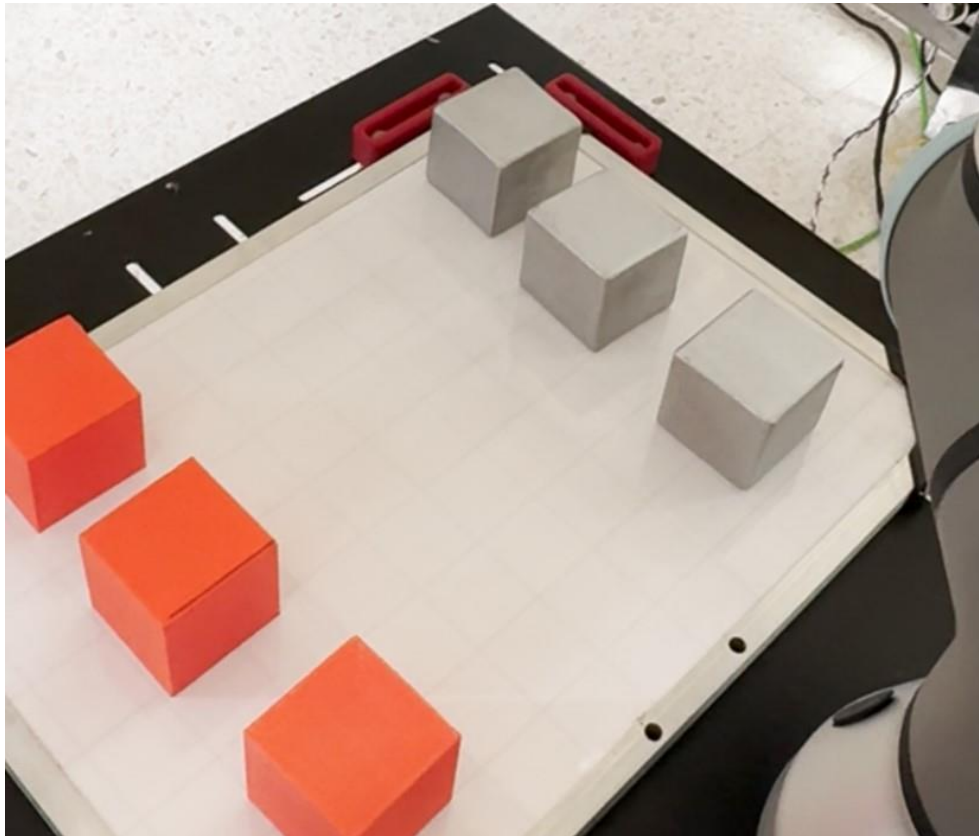
*Diagrama lógico de funcionamiento programa 2*



Una vez el robot cumple su ciclo se activa el comando fin de ciclo que restablece las memorias y reanuda todo el proceso. De esta manera los elementos se clasificarán como se muestra en la Figura 23.

**Figura 23.**

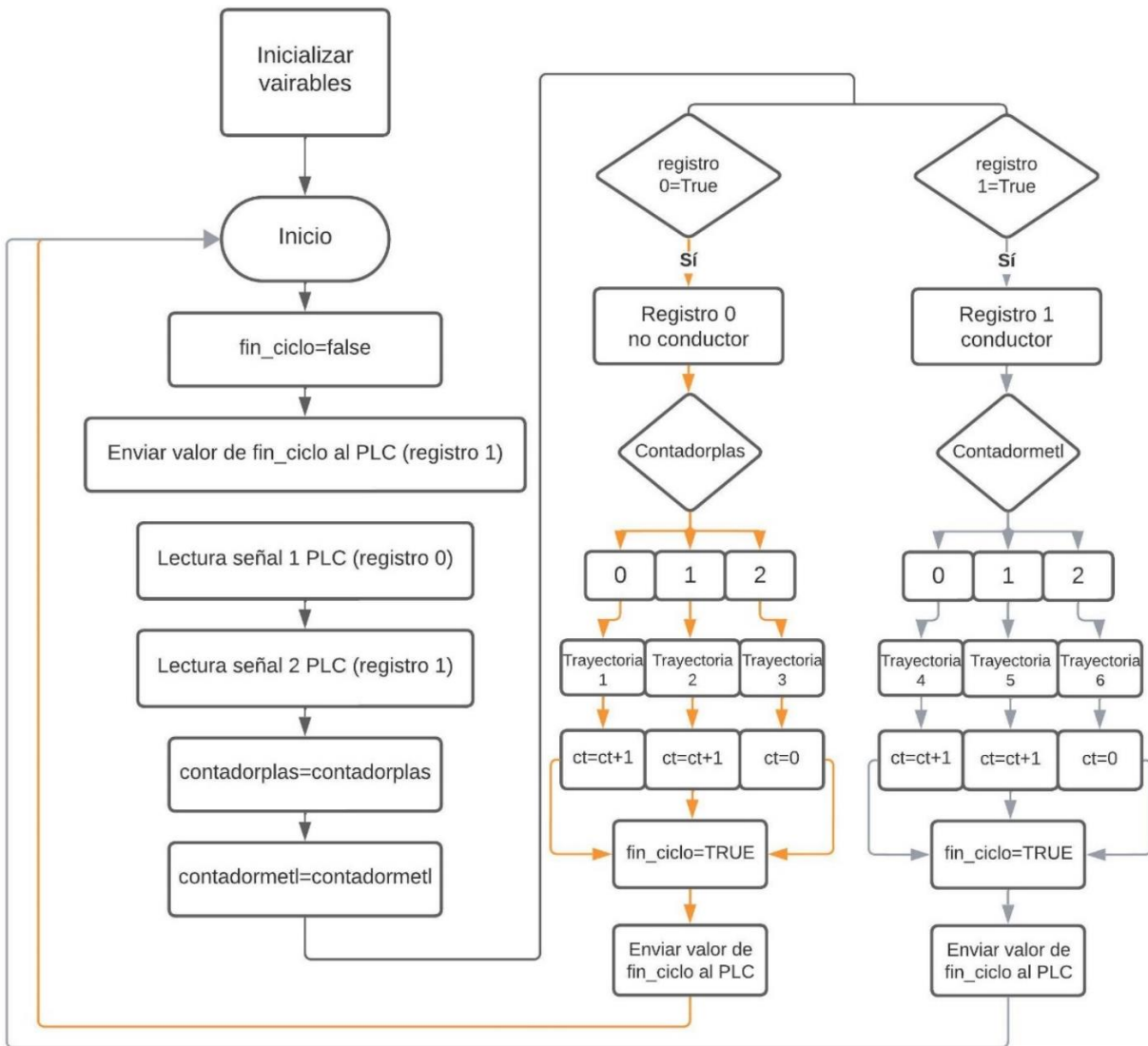
*Elementos clasificados*



El programa lógico del robot UR3 se muestra en la Figura 24, que inicia con la inicialización de las variables, posterior a esto se agrega una variable de ciclo para controlar el ciclo del proceso del robot la cual se envía al PLC con el comando `write_output_boolean_register(1, fin_ciclo)`, después de esto se recibe dos señales del PLC a través del registro 0 y 1 respectivamente con el comando `read_input_boolean_register(0)` y se define dos contadores los cuales servirán para definir que trayectoria ejecutara el robot, y se finaliza comparando el estado activado entre los registros y ejecutando la trayectoria correspondiente.

**Figura 24.**

Diagrama lógico de funcionamiento programa UR3 pg-2



Se creó el programa en el PLC S7-1200 en el cual se utilizan las variables que se muestran en la Figura 25. Se agregan las variables necesarias para la lectura del sensor óptico y dos memorias para realizar la clasificación de los elementos. Posterior a esto se crea el programa lógico en Ladder el cual inicia en la Figura 26,

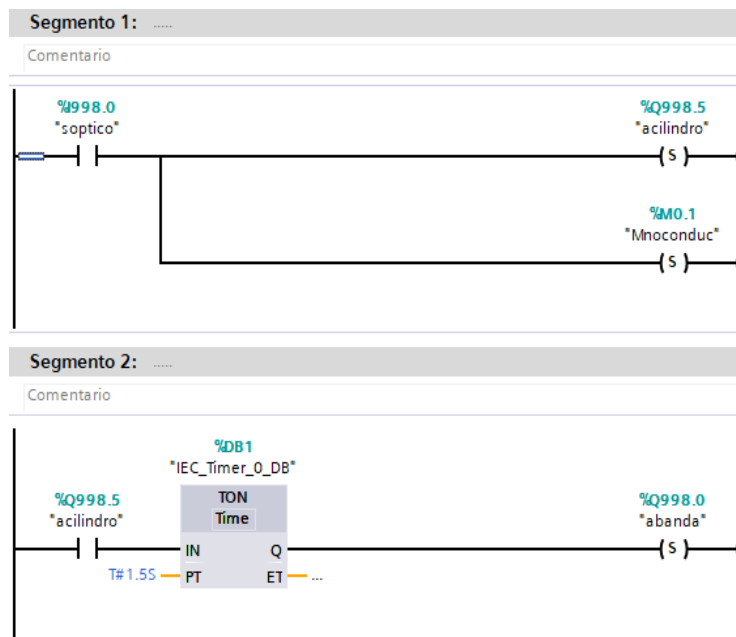
**Figura 25.**

*Variables utilizadas S7-1200*

Nombre	Tipo de datos	Dirección
URI	*UR_T2O*	%I0.0
URO	*UR_Q2T*	%Q0.0
sinuctivo	Bool	%I998.1
acilindro	Bool	%Q998.5
abanda	Bool	%Q998.0
soptico	Bool	%I998.0
Mnoconduc	Bool	%M0.1
Mconduc	Bool	%M0.2

**Figura 26.**

*Programa Ladder segmento 1-2 pg-2*

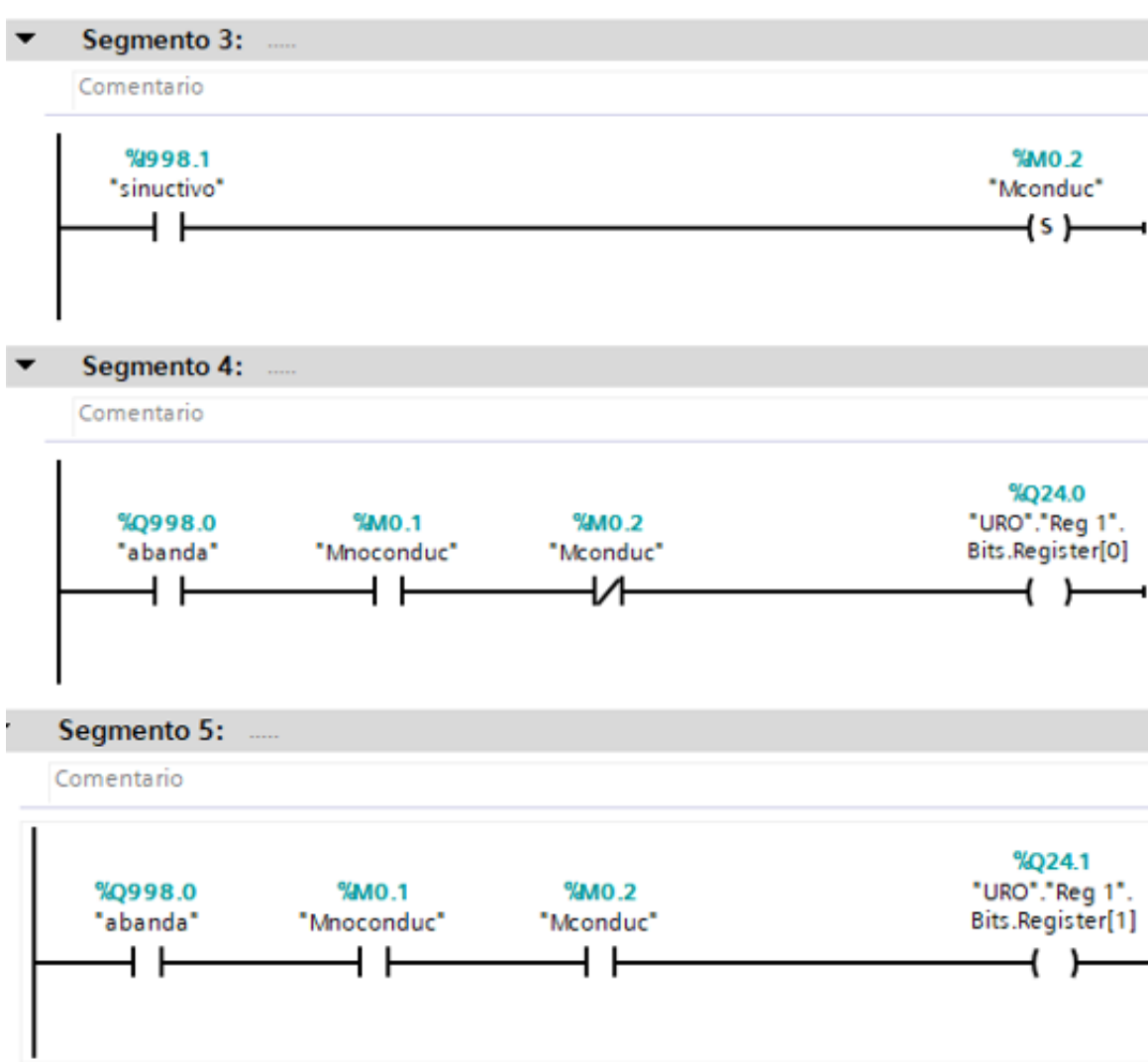


El segmento **uno** inicia con la detección del sensor óptico, si este se activa se activará el cilindro neumático y también activará la memoria denominada Mnoconduc. En el segmento dos se ejecuta si el cilindro se encuentra activado y activa un temporizador de activación TON que después de 1,5 S detendrá la banda. En la Figura 27 el segmento tres se activa si el sensor inductivo se activa activara una memoria denominada Mconduc. En el segmento cuatro se hace la comparación de las memorias en este caso cuando un elemento es plástico y se envía una activación al registro cero.

En el segmento cinco se hace la comparación de las memorias en este caso cuando un elemento es metálico y se envía al registro uno.

**Figura 27.**

Programa Ladder segmento 3-4-5 pg-2

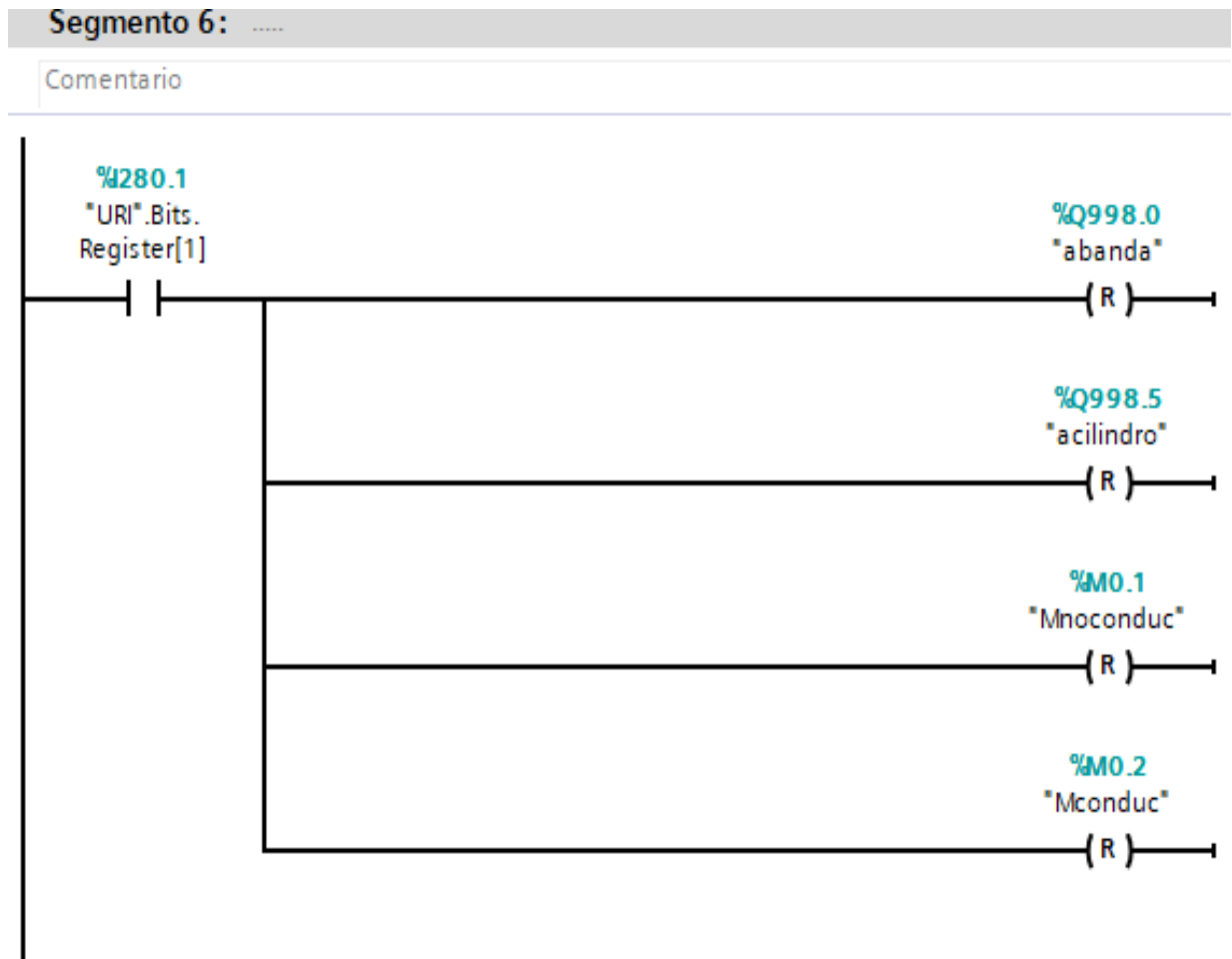


Finalmente, en el segmento 6 como se muestra en la Figura 28. se inicia con la activación del registro uno que nos envía el UR3, es decir cuando la variable **fin\_ciclo** del programa del UR3 se activa, esta señal nos dará el *reset* a todo el proceso reiniciando la banda, el cilindro y las memorias de activación.



**Figura 28.**

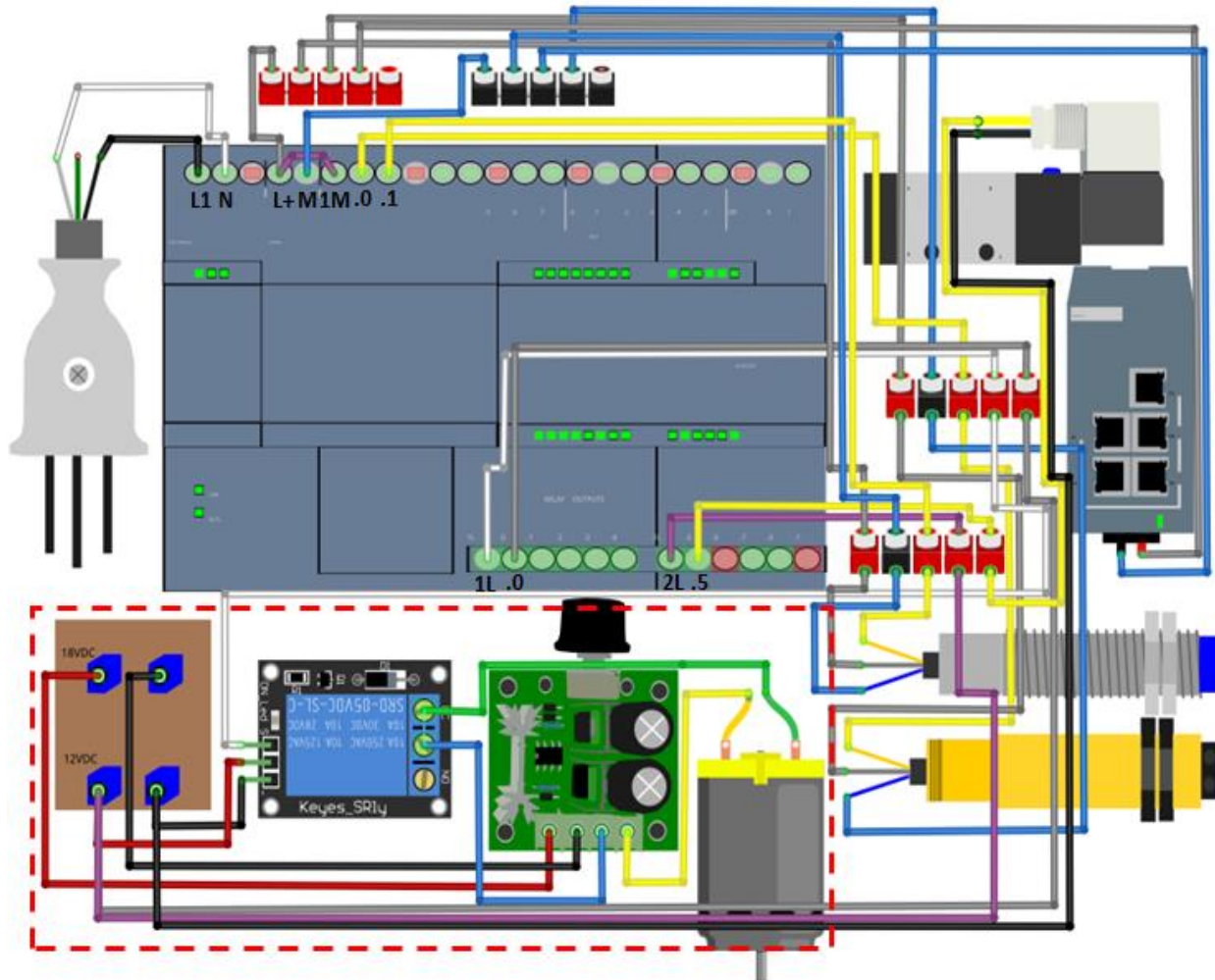
Programa Ladder segmento 6 pg-2



En la Figura 29 se muestra el diagrama eléctrico didáctico para el programa de clasificación 2 elaborado en el software de *Fritzing*, con el fin de facilitar el entendimiento de los estudiantes en el momento de conectar los elementos entre sí, en este diagrama los colores de los cables son iguales a los que el estudiante conectara en la práctica de laboratorio. La parte delimitada por rojo son las conexiones internas del banco de laboratorio es decir estas conexiones no son modificadas durante el laboratorio, las conexiones que realizara el estudiante son desde las bananas de conexión de la banda hacia las entradas y salidas del autómata.

**Figura 29.**

*Diagrama eléctrico didáctico*



### **2.2.5. Organización de los elementos**

Finalmente, como se muestra en la Figura 30 se diseñó una caja en mdf la cual contiene todos los elementos que el estudiante necesitara para desarrollar la práctica satisfactoriamente, de igual manera la caja está marcada de tal manera que al finalizar la practica el estudiante debe volver a ubicar cada elemento en su posición.

**Figura 30.**

*Caja de elementos del banco de laboratorio*



### 2.2.6. Simulación Robot UR3

Se realizó la simulación del robot UR3 para encontrar el error cartesiano, a través de la cinemática diferencial jacobiana que incluye la cinemática directa e inversa del robot UR3. El modelo cinemático diferencial describe las velocidades de las articulaciones del robot en el espacio operacional (cartesiano) en función de las velocidades de estas articulaciones expresadas en el espacio articular. En la Ecuación 1 se muestra la expresión para el modelo directo y en la Ecuación 2 para el modelo inverso. Donde  $J(q)$  es la llamada matriz Jacobiana, definida como la derivada parcial entre las posiciones cartesianas y articulares ( $\partial X/\partial q$ ).

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (1)$$

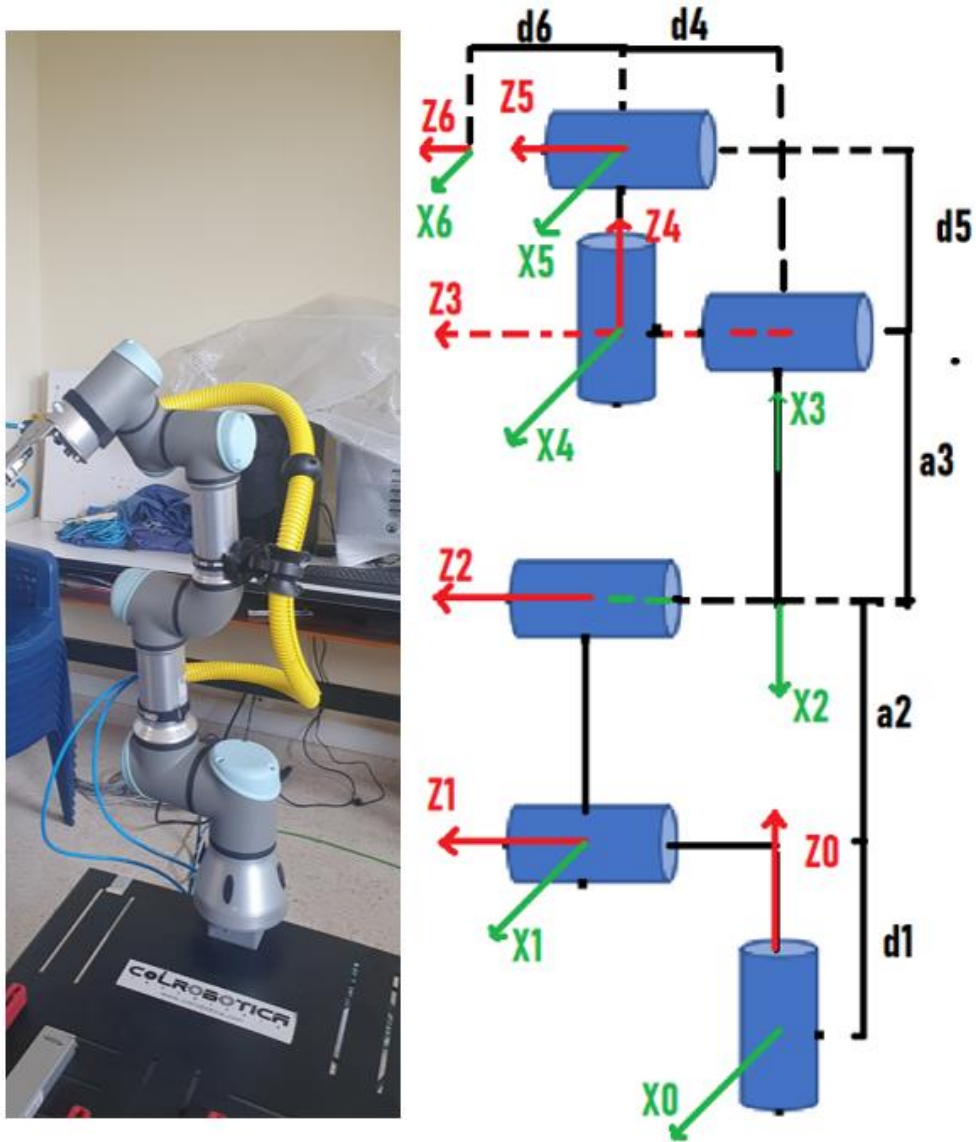
$$\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{X} \quad (2)$$

Para calcular la matriz jacobiana es necesario realizar el modelo geométrico directo del robot para esto tenemos que calcular el diagrama DH (*Denavit-Hartenberg*) este método ayuda a

describir la configuración geométrica de un sistema robótico articulado. En la Figura 31 se muestra el diagrama DH estándar para el robot UR3.

**Figura 31.**

*Diagrama DH estándar robot UR3*



De esta manera los parámetros geométricos del robot UR3 se muestran en la Tabla 10, las medidas del robot las obtenemos a través de la información del fabricante y los ángulos se obtienen de los ángulos que nos proporciona el software del robot en la posición Home.

**Tabla 10.**

*Parámetros geométricos robot UR3*

Parametros geometricos robot UR3				
Artic	$\theta$	d	a	$\alpha$
1	Q1	d1	0	90
2	Q2	0	-a2	0
3	Q3	0	a3	0
4	Q4	d4	0	90
5	Q5	d5	0	-90
6	Q6	d6	0	0

Después se calcula la velocidad lineal empleando el vector de posición del modelo geométrico directo del robot, que relaciona la primera articulación con el efector final del robot matriz  ${}^0T_6$ . Estas matrices se muestran en la Figura 32.

**Figura 32.**

*Matrices de transformación robot UR3*

$$\begin{aligned}
 {}^0T_1 &= \begin{pmatrix} \cos(Q_1) & 0 & \sin(Q_1) & 0 \\ \sin(Q_1) & 0 & -\cos(Q_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} &
 {}^1T_2 &= \begin{pmatrix} \cos(Q_1) & 0 & \sin(Q_1) & 0 \\ \sin(Q_1) & 0 & -\cos(Q_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} &
 {}^2T_3 &= \begin{pmatrix} \cos(Q_3) & -\sin(Q_3) & 0 & -a_3 \cos(Q_3) \\ \sin(Q_3) & \cos(Q_3) & 0 & -a_3 \sin(Q_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 {}^3T_4 &= \begin{pmatrix} \cos(Q_4) & 0 & \sin(Q_4) & 0 \\ \sin(Q_4) & 0 & -\cos(Q_4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} &
 {}^4T_5 &= \begin{pmatrix} \cos(Q_5) & 0 & -\sin(Q_5) & 0 \\ \sin(Q_5) & 0 & \cos(Q_5) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} &
 {}^5T_6 &= \begin{pmatrix} \cos(Q_6) & -\sin(Q_6) & 0 & 0 \\ \sin(Q_6) & \cos(Q_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Ahora calculamos la matriz  ${}^0T_6$  la cual es el resultado de la multiplicación de todas las matrices de transformación presentadas previamente, el resultado se muestra en la Figura 33.

**Figura 33.**

Matrices de transformación  $O_{T_6}$  robot UR3

$$O_{T_6} = \begin{pmatrix} \cos(Q_6) \sigma_6 - \cos(Q_1) \sin(Q_6) \sigma_1 & -\sin(Q_6) \sigma_6 - \cos(Q_1) \cos(Q_6) \sigma_1 & \sigma_4 & d_4 \sin(Q_1) - \cos(Q_1) \sigma_2 + d_6 \sigma_4 + d_5 \cos(Q_1) \sigma_1 \\ -\cos(Q_6) \sigma_5 - \sin(Q_1) \sin(Q_6) \sigma_1 & \sin(Q_6) \sigma_5 - \cos(Q_6) \sin(Q_1) \sigma_1 & -\sigma_3 - \sigma_7 & d_5 \sin(Q_1) \sigma_1 - d_4 \cos(Q_1) - d_6 (\sigma_3 + \sigma_7) - \sin(Q_1) \sigma_2 \\ \sigma_8 \sin(Q_6) + \cos(Q_5) \cos(Q_6) \sigma_1 & \cos(Q_6) \sigma_8 - \cos(Q_5) \sin(Q_6) \sigma_1 & -\sin(Q_5) \sigma_1 & d_1 - a_3 \sin(Q_2 + Q_3) - d_5 \sigma_8 - a_2 \sin(Q_2) - d_6 \sin(Q_5) \sigma_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

where

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sin(Q_2 + Q_3 + Q_4) & \sigma_5 &= \cos(Q_1) \sin(Q_5) - \cos(Q_5) \sigma_8 \sin(Q_1) \\ \sigma_2 &= a_3 \cos(Q_2 + Q_3) + a_2 \cos(Q_2) & \sigma_6 &= \sin(Q_1) \sin(Q_5) + \cos(Q_1) \cos(Q_5) \sigma_8 \\ \sigma_3 &= \cos(Q_1) \cos(Q_5) & \sigma_7 &= \sigma_8 \sin(Q_1) \sin(Q_5) \\ \sigma_4 &= \cos(Q_5) \sin(Q_1) - \cos(Q_1) \sigma_8 \sin(Q_5) & \sigma_8 &= \cos(Q_2 + Q_3 + Q_4) \end{aligned}$$

De la matriz de transformación  $O_{T_6}$  podemos obtener las posiciones de la columna 4. En la Figura 34 se muestran las posiciones obtenidas

**Figura 34.**

Matriz de posiciones  $O_{T_6}$  robot UR3

$$P = \begin{pmatrix} d_4 \sin(Q_1) - \cos(Q_1) \sigma_1 + d_6 (\cos(Q_5) \sin(Q_1) - \cos(Q_1) \sigma_3 \sin(Q_5)) + d_5 \cos(Q_1) \sigma_2 \\ d_5 \sin(Q_1) \sigma_2 - d_4 \cos(Q_1) - d_6 (\cos(Q_1) \cos(Q_5) + \sigma_3 \sin(Q_1) \sin(Q_5)) - \sin(Q_1) \sigma_1 \\ d_1 - a_3 \sin(Q_2 + Q_3) - d_5 \sigma_3 - a_2 \sin(Q_2) - d_6 \sin(Q_5) \sigma_2 \end{pmatrix}$$

where

$$\sigma_1 = a_3 \cos(Q_2 + Q_3) + a_2 \cos(Q_2)$$

$$\sigma_2 = \sin(Q_2 + Q_3 + Q_4)$$

$$\sigma_3 = \cos(Q_2 + Q_3 + Q_4)$$

A partir de la matriz que relaciona las posiciones se puede calcular la velocidad lineal y la velocidad angular, unificando estas dos se obtiene la matriz que relaciona el jacobiano sobre el robot, para calcular el jacobiano se utiliza el comando *jacobian* en Matlab, esta matriz se muestra

en la Ecuación 4 la cual representa a cada termino en la Ecuación 3 y en donde sus valores están la Tabla 11.

$$O_{TE} = \begin{pmatrix} s_x & n_x & a_x & t_x \\ s_y & n_y & a_y & t_y \\ s_z & n_z & a_z & t_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$J = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & \sigma_7 + \sigma_3 & 4 & 0 \\ 5 & 6 & 7 & \sigma_6 + \sigma_2 & 8 & 0 \\ 9 & 10 & 11 & d_5 \sigma_8 - \sigma_5 & 12 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

**Tabla 11.**

Valores de la matriz jacobiana(J) robot UR3

N	Valor
1	$\sin(Q_1) \sigma_4 + d_4 \cos(Q_1) + d_6 (\cos(Q_1) \cos(Q_5) + \sigma_{10} \sin(Q_1) \sin(Q_5)) - d_5 \sin(Q_1) \sigma_8$
2	$\cos(Q_1) \sigma_1 + \sigma_7 + \sigma_3$
3	$\sigma_7 + a_3 \sin(Q_2 + Q_3) \cos(Q_1) + \sigma_3$
4	$-d_6 (\sin(Q_1) \sin(Q_5) + \cos(Q_1) \cos(Q_5) \sigma_{10})$
5	$(d_4 \sin(Q_1) - \cos(Q_1) \sigma_4 + d_6 (\cos(Q_5) \sin(Q_1) - \cos(Q_1) \sigma_{10} \sin(Q_5))) + d_5 \cos(Q_1) \sigma_8$
6	$\sin(Q_1) \sigma_1 + \sigma_6 + \sigma_2$
7	$\sigma_6 + a_3 \sin(Q_2 + Q_3) \sin(Q_1) + \sigma_2$
8	$d_6 (\cos(Q_1) \sin(Q_5) - \cos(Q_5) \sigma_{10} \sin(Q_1))$
9	0
10	$d_5 \sigma_8 - a_2 \cos(Q_2) - \sigma_9 - \sigma_5$
11	$d_5 \sigma_8 - \sigma_9 - \sigma_5$
12	$-d_6 \cos(Q_5) \sigma_8$
$\sigma_1$	$a_3 \sin(Q_2 + Q_3) + a_2 \sin(Q_2)$
$\sigma_2$	$d_6 \sin(Q_1) \sin(Q_5) \sigma_8$
$\sigma_3$	$d_6 \cos(Q_1) \sin(Q_5) \sigma_8$
$\sigma_4$	$\sigma_9 + a_2 \cos(Q_2)$
$\sigma_5$	$d_6 \sigma_{10} \sin(Q_5)$

---


$$\begin{aligned}
 \sigma_6 & d_5 \sigma_{10} \sin(Q_1) \\
 \sigma_7 & d_5 \cos(Q_1) \sigma_{10} \\
 \sigma_8 & \sin(Q_2 + Q_3 + Q_4) \\
 \sigma_9 & a_3 \cos(Q_2 + Q_3) \\
 \sigma_{10} & \cos(Q_2 + Q_3 + Q_4)
 \end{aligned}$$


---

Con el modelo matemático calculado se puede realizar el control *Resolved Motion Rate Control* (RMRC) que permite el control del robot manipulador gracias a la relación que existe entre las coordenadas de las articulaciones y las coordenadas en el espacio de trabajo del robot, la relación se muestra en la Ecuación 5 en donde  $\delta q$  corresponde a un conjunto de desplazamientos infinitesimal de las articulaciones,  $\delta x$  corresponde a un conjunto de desplazamientos infinitesimal de las coordenadas operacionales y  $J^{-1}(q)$  la inversa del jacobiano.

$$\delta q = J^{-1}(q)\delta x \quad (5)$$

Utilizando la Ecuación 5 es posible dirigir el movimiento del robot desde su posición actual  $q$ , hacia una posición deseada,  $q + \delta q$ , especificando una trayectoria para el efector final. La obtención de  $q$  se lleva a cabo mediante la misma Ecuación. Este control se realizó mediante Simulink en donde se encuentran los diferentes tipos de bloques para su correcto funcionamiento en la Tabla 12 se muestran los bloques y su función al igual que en la Figura 35 se muestra el Modelo de simulink realizado.

La ley de control empleada es Proporcional Integral Derivativa (PID), la cual se presenta en la Ecuación 6. En donde  $u(t)$  es la salida del controlador,  $K_p, K_d, K_i$  son constantes positivas que corresponden a la acción proporcional, derivativa e integral,  $q(t)$  es el error de posición y  $\dot{e}(t)$  la derivada con respecto al tiempo de la señal de error.

$$u(t) = K_p e(t) + k_d \dot{e}(t) + k_i \int_0^t e(T) dT \quad (6)$$



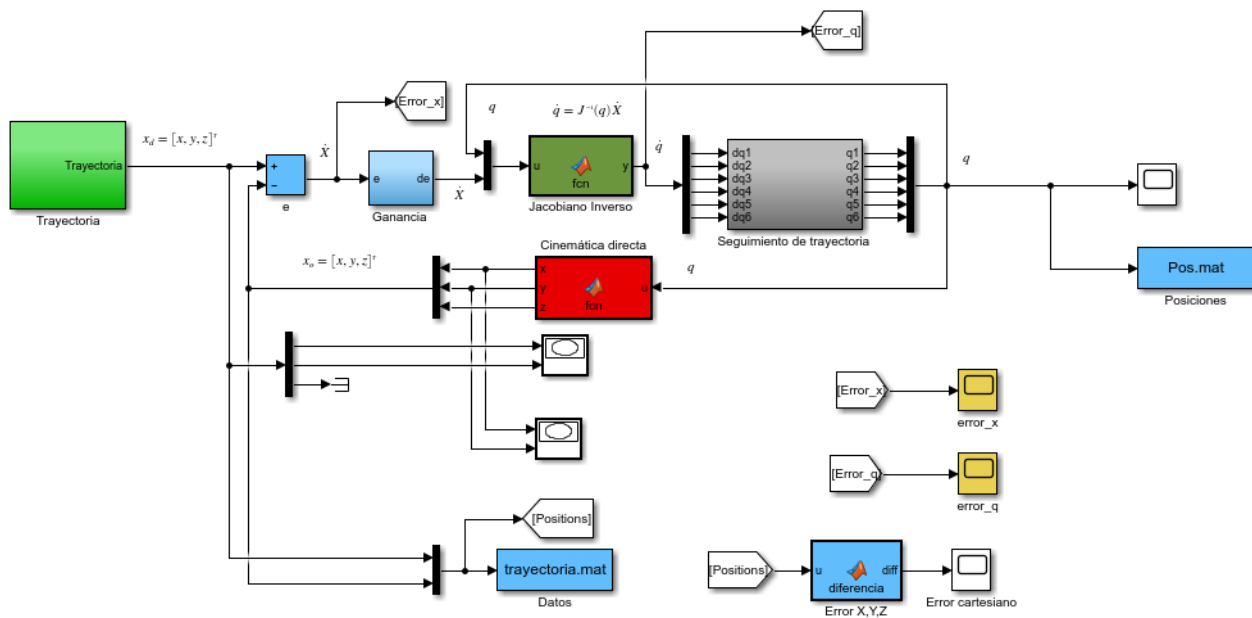
**Tabla 12.**

*Bloques del modelo de Simulink*

Bloque	Función
Trayectoria	Se genera la trayectoria circular que se desea que siga el efector final del robot. Esta señal debe estar en el espacio de trabajo es decir (X, Y, Z)
Cinemática directa	Este bloque calcula los valores actuales de posición $\mathbf{x}$ , utilizando los valores de las variables de las articulaciones $\mathbf{q}$ .
Diferencia	Se obtiene la resta entre la posición deseada y la posición actual de la herramienta final del robot, obteniendo el error cartesiano.
Jacobiano Inverso	En este bloque se emplea la <b>Ecuación 5</b> para obtener el valor deseado $\delta\mathbf{q}$ . Estos mismos datos de $\delta\mathbf{q}$ se utilizan como señal de error para controlar la posición deseada de cada articulación del robot UR3.

**Figura 35.**

*Modelo simulink*



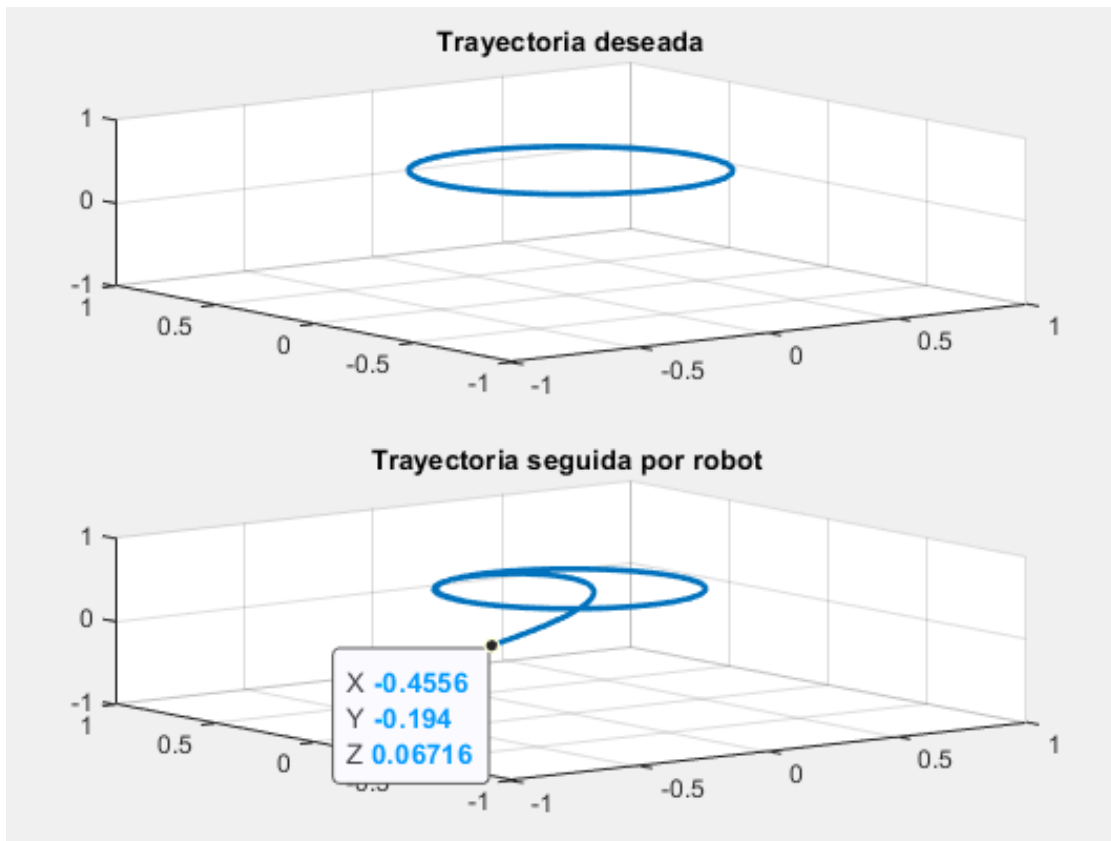
Empleando las dimensiones del robot, se consideran una trayectoria deseada, que corresponde a un círculo centrado en el origen del sistema de referencia {0}. La descripción matemática de la trayectoria se presenta en la Ecuación 7.

$$\begin{bmatrix} x^0 \\ y^0 \\ z^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.3 \cos(t) \\ 1.3 \sin(t) \\ 0.3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

En la Figura 36 se puede observar la trayectoria circular deseada y la trayectoria circular realizada por el robot, se envió una trayectoria circular de diámetro de 1m. En la trayectoria seguida por el robot se puede observar que parte de unas coordenadas (X, Y, Z) las cuales corresponden al origen del robot y de estas posiciones se desplaza a las posiciones para iniciar la trayectoria circular, se puede evidenciar que el robot sigue la trayectoria deseada.

**Figura 36.**

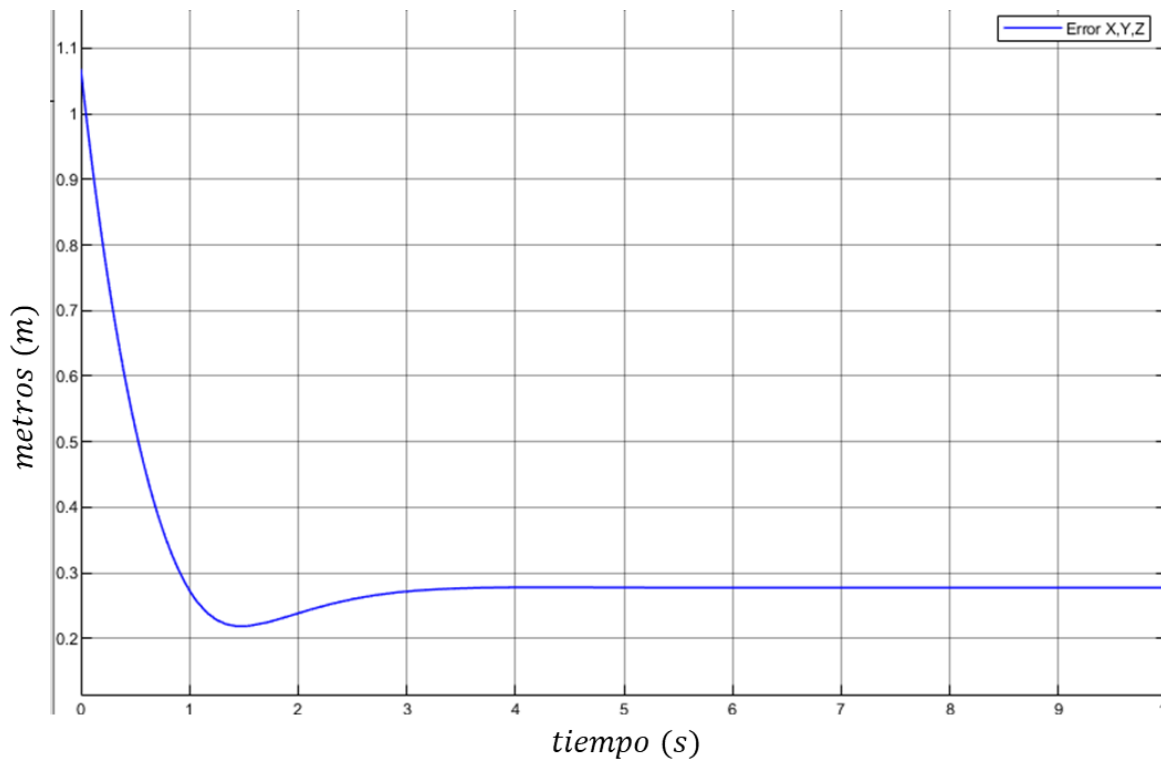
*Trayectoria enviada vs trayectoria obtenida UR3*



En la Figura 37 se encuentra el error cartesiano el cual es la diferencia de las posiciones en x,y y z de la trayectoria deseada vs la trayectoria realizada por el robot UR3, como se puede observar la gráfica inicia con un pico de error la cual corresponde a cuando el robot inicia en la posición de origen en (X,Y,Z), después de esto el error se estabiliza y se encuentra en 0.2757 m.

**Figura 37.**

*Error cartesiano*



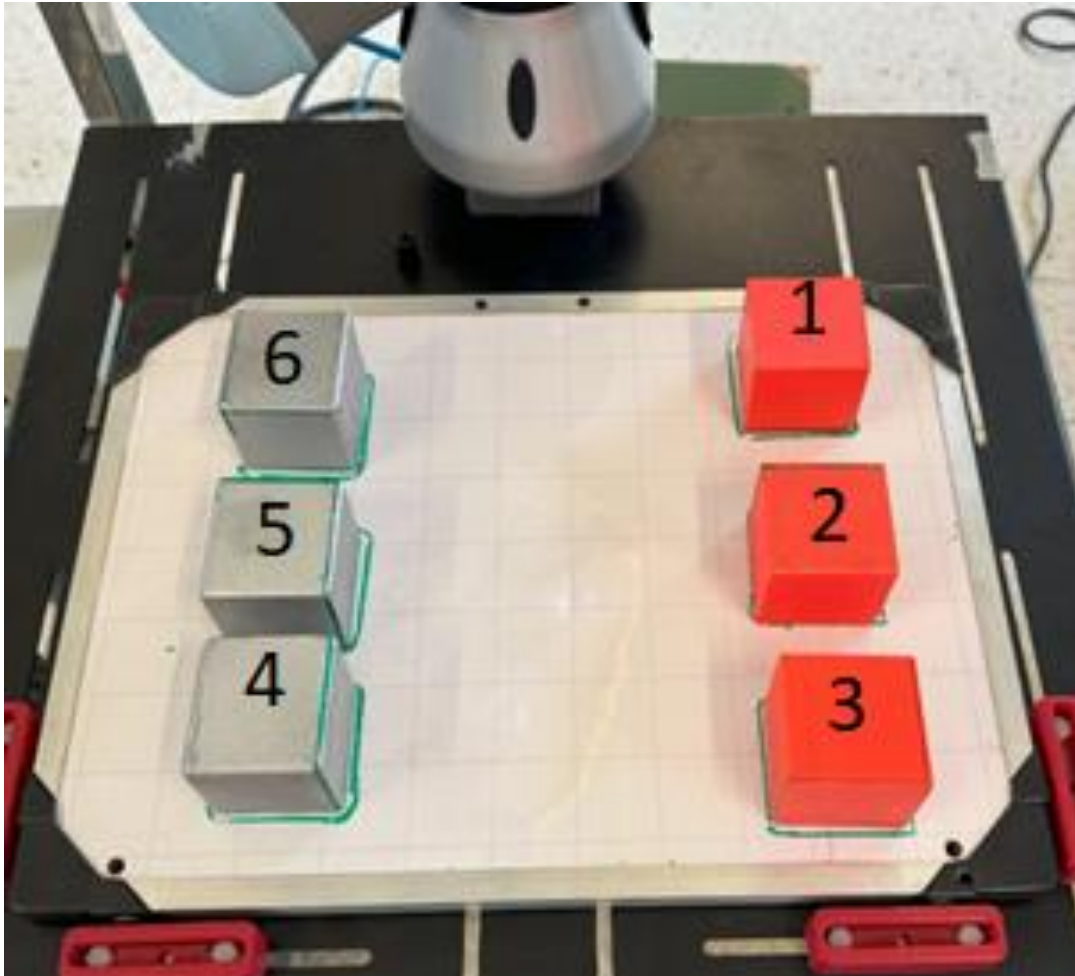
## 2.3. Resultados objetivo 3

### 2.3.1. Validación interna

La validación interna se realizó mediante un ejercicio de repetibilidad con el programa de clasificación 2, este programa se repitió 5 veces para determinar la repetibilidad de la clasificación, como se puede visualizar en la Figura 38 se marcó en el tablero de trabajo del robot UR3 las ubicaciones en donde el robot debe ubicar cada elemento.

**Figura 38.**

*Ejercicio de repetibilidad*

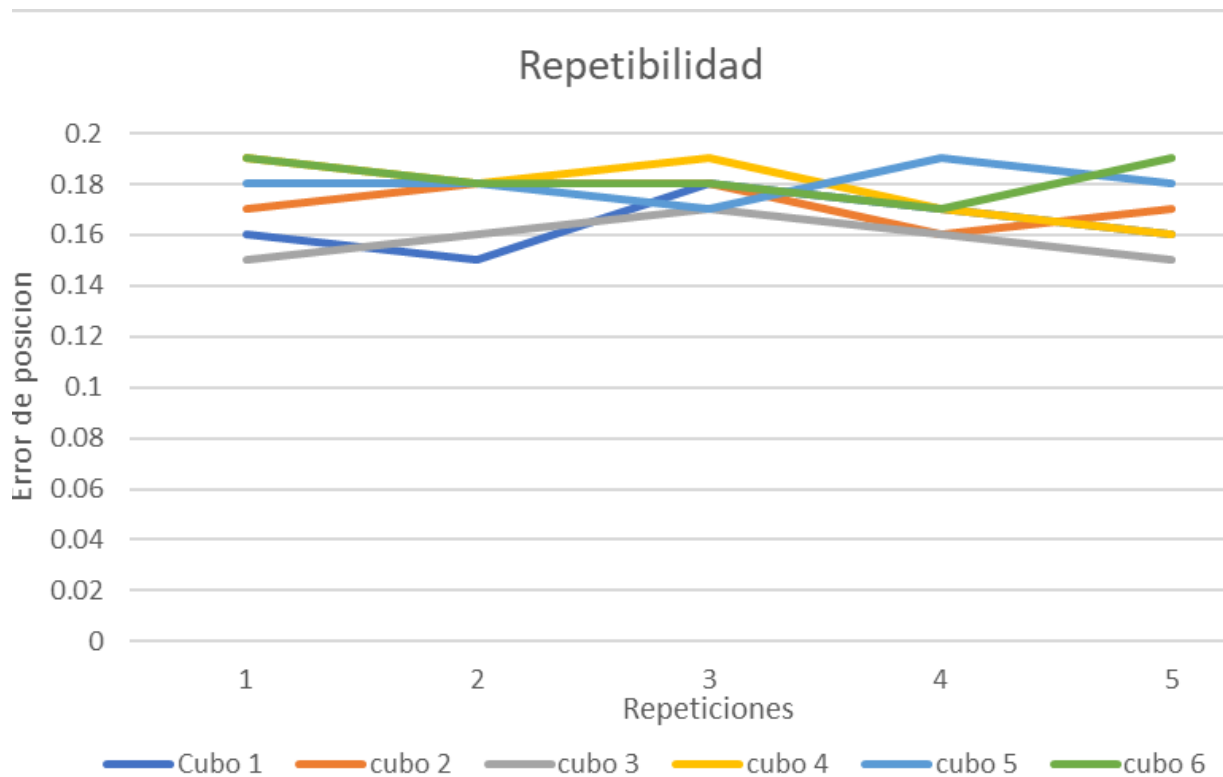


De esta manera podemos encontrar el error en la ubicación de las piezas en las ubicaciones deseadas encontrando una repetibilidad de  $\pm 0.19\text{mm}$  esta repetibilidad encontrada es muy cercana al dato proporcionado por el fabricante la cual corresponde a  $\pm 0.1\text{mm}$ . Esto nos transmite que el programa de clasificación con el robot puede volver a la misma posición con una precisión de hasta 0,19 milímetros después de realizar varios movimientos.

De igual manera en la Figura 39 se puede observar la gráfica de la repetibilidad medida en el ejercicio durante las 5 repeticiones con los 6 diferentes tipos de cubos.

**Figura 39.**

*Gráfica repetibilidad*



### 2.3.2. Estrategia en las prácticas de laboratorio (Validación externa)

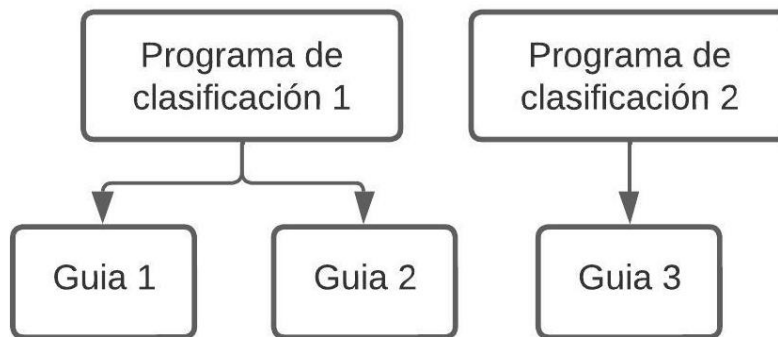
Las prácticas de laboratorio se llevaron a cabo en el laboratorio de automatización de la universidad Mariana sede Alvernia, específicamente con los 25 estudiantes de la materia de robótica del programa de ingeniería mecatrónica, que cursan el octavo semestre de la carrera, se eligieron estos estudiantes debido a que en el semestre anterior cursaron la materia de autómatas programables lo cual les otorga los conocimientos necesarios de autómatas. Así entonces los estudiantes cuentan con los conocimientos básicos de robótica y autómatas programables.

En la Figura 40 se muestra la estrategia utilizada para las prácticas de laboratorio de los dos programas de clasificación, debido a su larga extensión y a que es el primer contacto de los estudiantes con la práctica, el programa de clasificación 1 se lo dividió en dos guías de duración de 40 minutos por grupo para cada guía y se explicó todo el proceso del laboratorio minuciosamente.

En cuanto al programa de clasificación 2 aunque es más complejo lo que se busca es que los estudiantes con la experiencia adquirida en el programa 1 sean capaces de desarrollar el programa 2.

**Figura 40.**

*Desarrollo de las prácticas de laboratorio*



**2.3.3. Desarrollo del primer programa de clasificación**

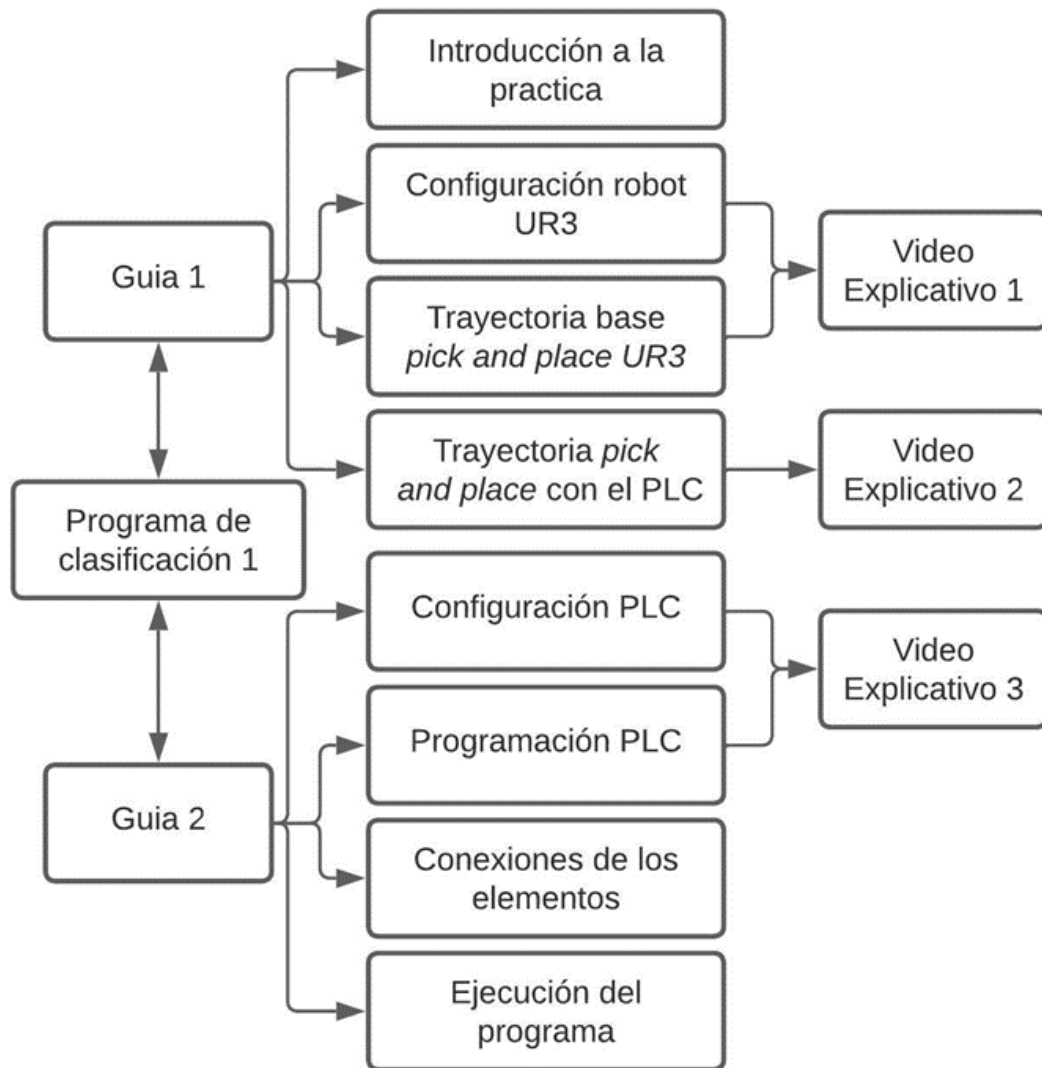
En la Figura 41 se muestra el contenido que abarca la guía 1 y 2 que corresponden al desarrollo del primer programa de clasificación. En estas dos guías lo que se busca es introducir al estudiante al laboratorio y explicar los procedimientos minuciosamente paso a paso, adicionalmente se crearon ayudas audiovisuales en cada guía, en los cuales se realiza todo el procedimiento que el estudiante debe hacer en el laboratorio.

Finalmente, para el desarrollo de la práctica del programa de clasificación uno se empleó el diagrama didáctico para las conexiones eléctricas que se muestra en la Figura 42 como una estrategia didáctica para facilitar a los estudiantes las conexiones entre los diferentes elementos.

En la Figura 43 se puede evidenciar la participación activa de los estudiantes en las prácticas de laboratorio, específicamente, realizando la manipulación del robot para su ubicación.

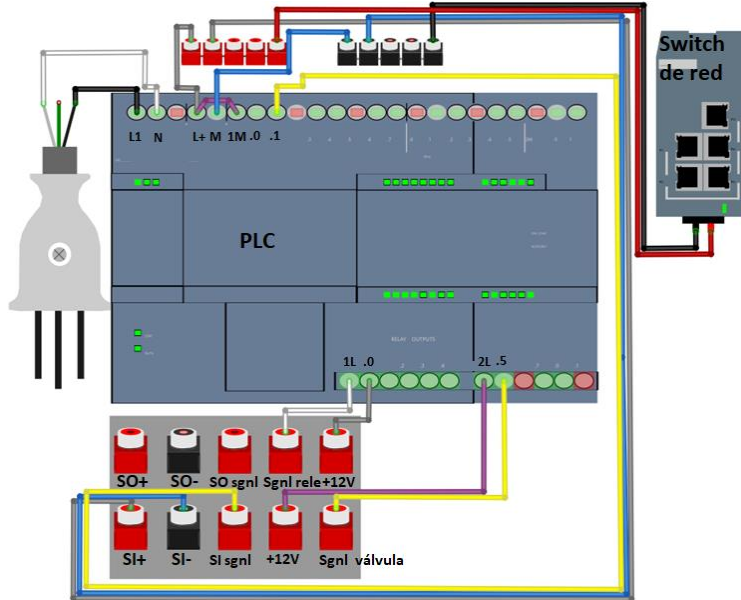
**Figura 41.**

*Desarrollo del primer programa de clasificación*



**Figura 42.**

*Diagrama didáctico conexiones eléctricas pg-1*



**Figura 43.**

*Desarrollo de la guía 1 en laboratorio*



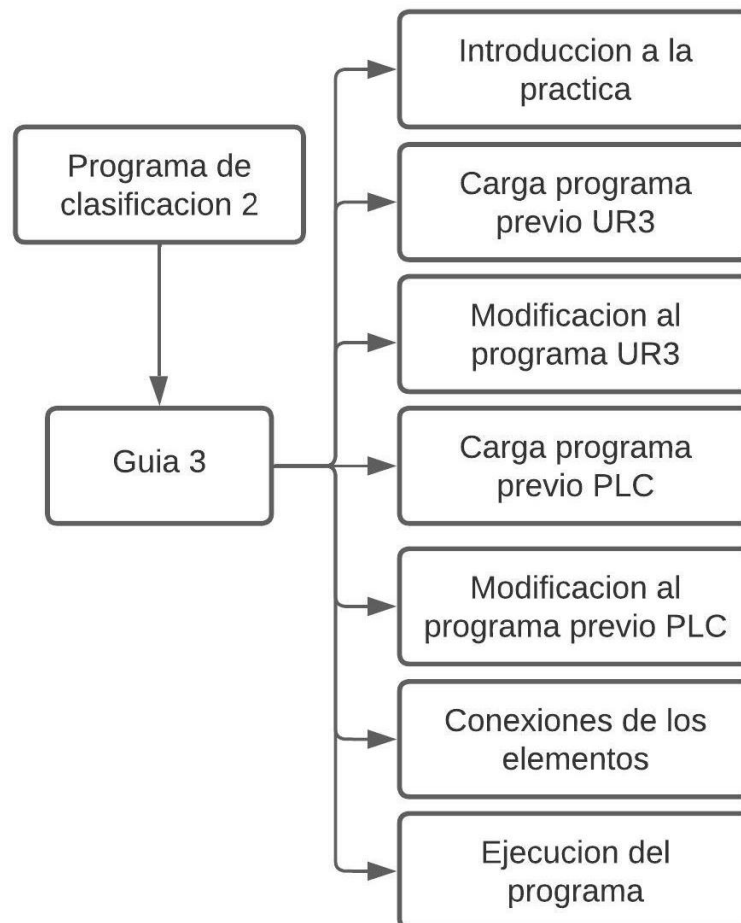


### 2.3.4. Desarrollo del segundo programa de clasificación

En la Figura 44 se muestra el contenido que abarca la guía 3 que corresponden al desarrollo del segundo programa de clasificación. En esta guía lo que se busca es afianzar los conocimientos adquiridos por los estudiantes en la guía 1 y 2, por esta razón esta guía es menos minuciosa y proporciona al estudiante los pasos necesarios sin alargarse más de lo necesario, por todo esto el estudiante partirá desde los programas y configuraciones ya realizadas en las guías previas, modificando los programas para cumplir con la clasificación requerida.

**Figura 444.**

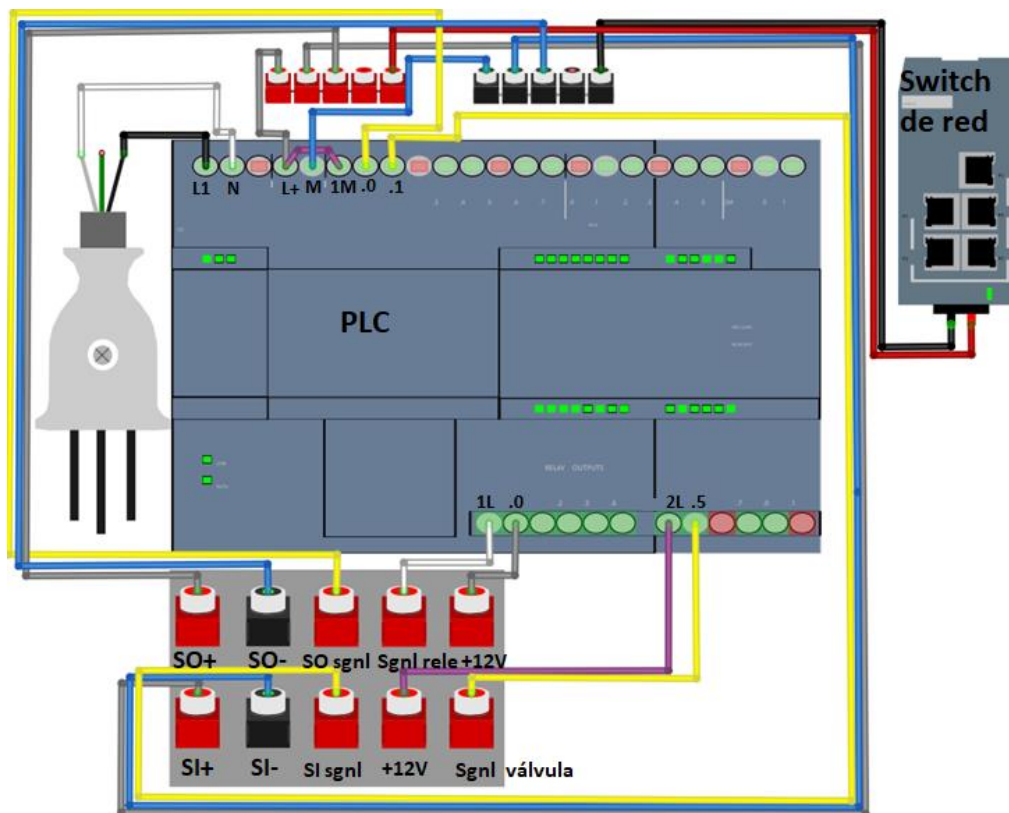
*Desarrollo del segundo programa de clasificación*



Finalmente, para el desarrollo de la práctica del programa de clasificación dos se empleó el diagrama didáctico para las conexiones eléctricas que se muestra en la Figura 45 como una estrategia didáctica para facilitar a los estudiantes las conexiones entre los diferentes elementos.

**Figura 455.**

*Diagrama didáctico conexiones eléctricas pg-2*



### 2.3.5. Encuesta de satisfacción de la practica

Se realizó una encuesta de satisfacción destinada a los estudiantes que realizaron la práctica para obtener una retroalimentación y así mismo validar la clasificación del banco de laboratorio, la encuesta se divide en tres secciones, información personal, preguntas de escala de Likert y preguntas abiertas. Estas preguntas se ilustran en la Tabla 13.

**Tabla 13.**

*Preguntas encuesta de satisfacción*

<b>Preguntas de escala de Likert</b>	<b>Preguntas abiertas</b>
1. De 1 a 5 ¿Cómo calificarías tu experiencia general con la práctica?	7. ¿Encontraste algún aspecto técnico especialmente desafiante durante el desarrollo de la práctica?
2. De 1 a 5 ¿Qué tan entendible fue la guía para usted?	8. ¿Experimentaste alguna dificultad relacionada con la compatibilidad de los componentes o el protocolo de comunicación PROFINET?
3. De 1 a 5 ¿Qué tan entendible fueron los videos para usted?	9. ¿Cuáles crees que fueron los principales beneficios obtenidos al realizar esta práctica en términos de optimización de procesos o aprendizaje técnico?
4. De 1 a 5 ¿Qué tan beneficioso cree que fue la práctica de laboratorio para usted?	10. ¿Crees que se deberían implementar más prácticas como estas que implementen dos materias del programa?
5. De 1 a 5 ¿Cómo calificarías la facilidad de implementación de la práctica?	11. ¿Tienes algún comentario adicional sobre la práctica o alguna sugerencia para mejorarla en el futuro?
6. En una escala del 1 al 5, ¿Qué tan precisa encontraste la clasificación de elementos conductores y no conductores?	12. ¿Hay algún aspecto específico que te gustaría destacar o compartir sobre tu experiencia con esta práctica?

El objetivo de las preguntas de escala de Likert fue evaluar las herramientas proporcionadas a los estudiantes para el desarrollo de la práctica como las guías y videos; de igual manera evaluar su experiencia y funcionamiento del banco de laboratorio en la práctica de una manera cuantificable. En cambio, las preguntas abiertas buscan explorar dificultades, opiniones, beneficios obtenidos y desafíos técnicos a los que se hayan enfrentado los estudiantes al realizar la práctica de laboratorio.

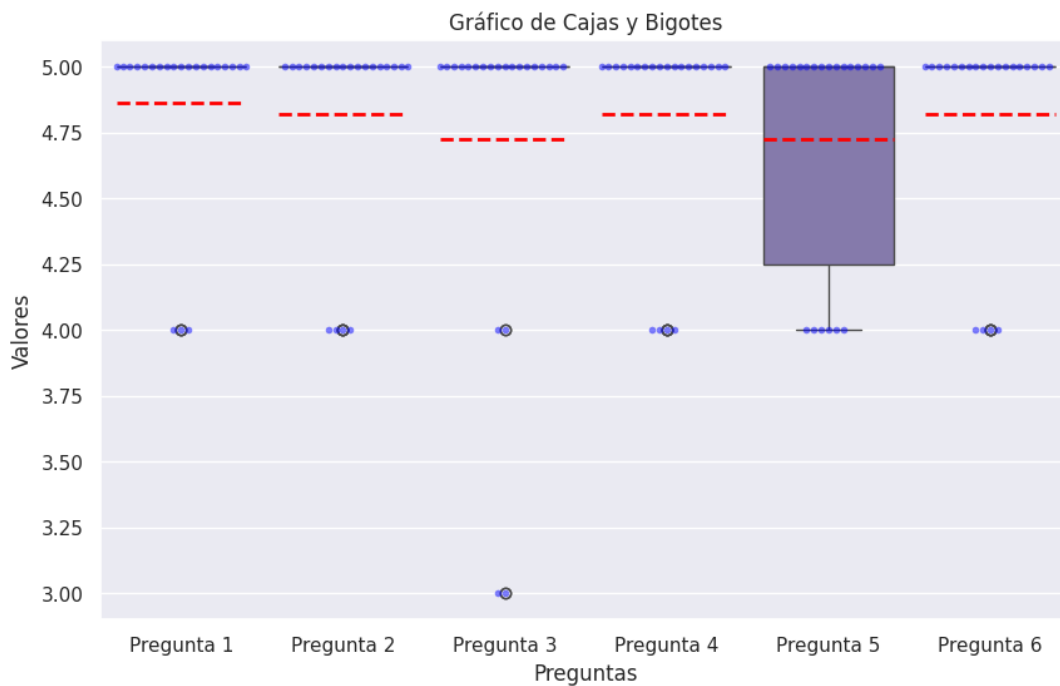
**2.3.6. Resultados obtenidos encuesta de satisfacción**

La encuesta fue completada por el 88% del total de estudiantes que llevaron a cabo la práctica, lo que equivale a 22 de los 25 participantes. La Figura 46 presenta el diagrama de cajas y bigotes de las respuestas proporcionadas por estos 22 estudiantes a las preguntas del 1 al 6, las cuales estaban

en una escala de Likert del 1 al 5, donde 1 indica "muy malo" y 5 "muy bueno". La gráfica muestra que la mayoría de las respuestas se ubicaron entre 4 y 5, lo que señala una evaluación mayoritariamente positiva. Encontrando valores atípicos en la pregunta 3 del valor de 3 en donde solo dos estudiantes evaluaron con este indicador en toda la encuesta. Cabe resaltar resultados como en la pregunta 1 en donde 19 estudiantes respondieron con el indicador de 5 y el resto de los estudiantes con el indicador de 4 teniendo un indicador de evaluación muy bueno.

**Figura 466.**

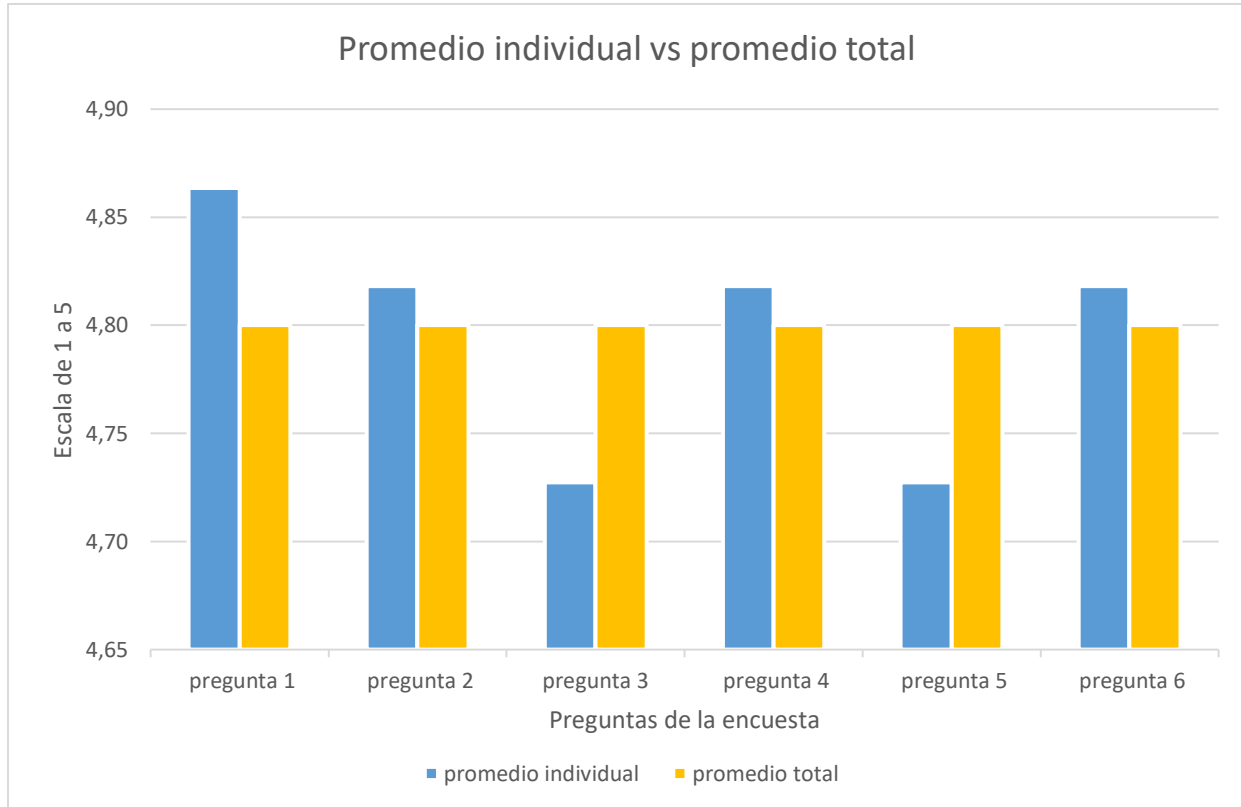
*Gráfico de cajas y bigotes*



La Figura 47 exhibe el gráfico de frecuencia de la encuesta, abarcando las preguntas del 1 al 6 en una escala de Likert. Este gráfico presenta el promedio de puntuación para cada pregunta en comparación con el promedio total de la encuesta. Se evidencia que el promedio de toda la encuesta es de 4.8 siendo una puntuación muy positiva. las preguntas con los promedios más bajos fueron la 3 y la 5, lo que sugiere una evaluación inferior al promedio global de la encuesta para dichas preguntas. También se puede evidenciar que las pregunta con mayor puntuación fueron la preguntas 1 y 2 siendo 4.86 y 4.82 respectivamente.

**Figura 47.**

*Gráfico de frecuencia*

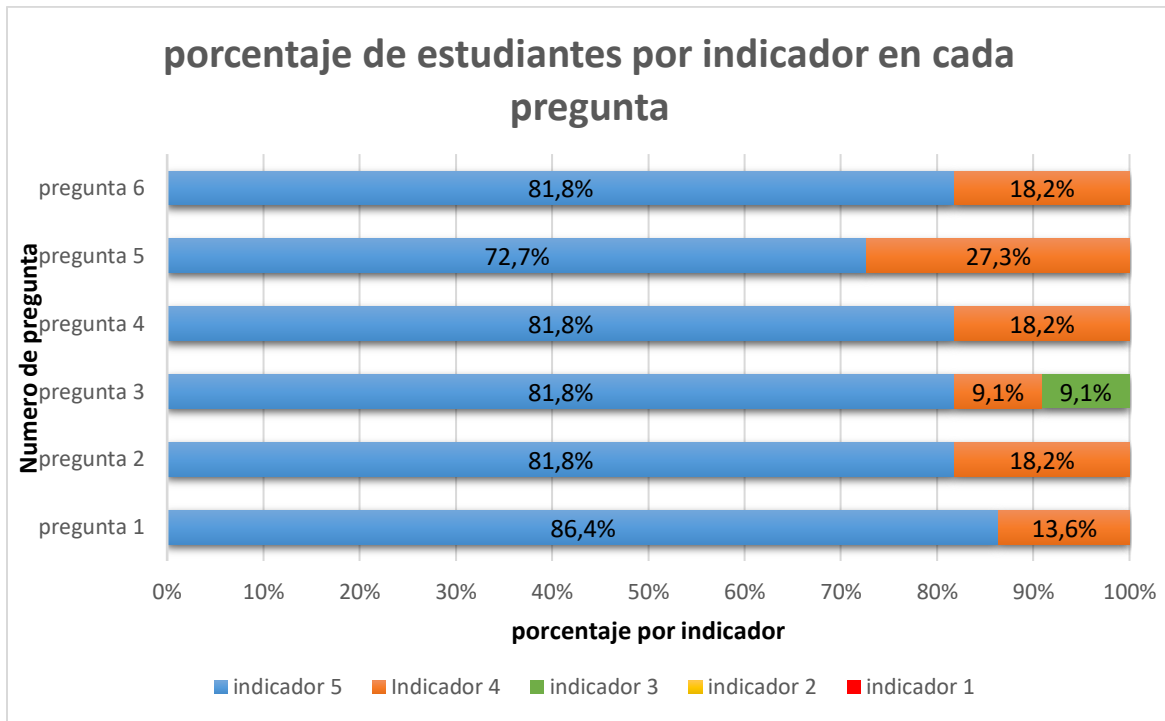


La Figura 48 presenta el diagrama porcentual de las respuestas a las preguntas en la escala de Likert de la encuesta. Se destaca que ninguna pregunta recibió respuestas con los indicadores 1 o 2, que representan los niveles más bajos de evaluación. Sin embargo, en la pregunta 3, solo un 9.1% de respuestas se clasificaron con el indicador 3, equivalente a 2 estudiantes, lo que significa que únicamente 2 estudiantes marcaron este indicador en toda la encuesta.

Además, se observa que la pregunta 1 obtuvo el mayor porcentaje positivo, con un 86.4% en el indicador 5, lo que demuestra una evaluación muy positiva. Del mismo modo, las preguntas 2, 3, 4 y 5 muestran un porcentaje de evaluación del 81.8% en el indicador 5, lo que indica una evaluación positiva en estas preguntas. Finalmente, en la pregunta 5 se encuentra el menor porcentaje de evaluación en el indicador 5 equivaliendo al 72.7%

**Figura 4847.**

Gráfico porcentual



Además, es relevante resaltar las respuestas obtenidas en la pregunta 10, donde el 95% de los estudiantes respondieron afirmativamente. Este resultado implica que 21 de los 22 estudiantes encuestados están de acuerdo con la implementación de más prácticas similares a la desarrollada en esta investigación, que integra dos áreas del programa: robótica y autómatas programables. Esto sugiere una clara preferencia por este enfoque entre los estudiantes.

También es importante resaltar las respuestas recopiladas para la pregunta número 9, dado que esta es una pregunta abierta. A través de las respuestas proporcionadas por los estudiantes, podemos comprender los beneficios adquiridos durante la realización de esta práctica. Algunas de las respuestas más destacadas se presentan en la Figura 49.

**Figura 4948.**

*Respuestas destacadas a la pregunta 9*

9. ¿Cuáles crees que fueron los principales beneficios obtenidos al realizar esta práctica en términos de optimización de procesos o aprendizaje técnico?

22 respuestas

- Aprendizaje orientado a la práctica y con mejores resultados en el desarrollo de las actividades a futuro
- Se implementó lo que podría llegar a ser una práctica profesional con equipos que se utilizan en la industria actualmente
- Muy didáctica, precisa, acercamiento real a posibles escenarios laborales futuros.
- Retomar temas que ya miramos, para recordarlos y fortalecerlos al incluir la comunicación con el robot

Por último, es crucial resaltar las respuestas recopiladas para la pregunta número 12, ya que se trata de una pregunta abierta. A través de las respuestas proporcionadas por los estudiantes, podemos encontrar comentarios sobre la práctica por parte de los mismos. Algunas de las respuestas más destacadas se muestran en la Figura 50.

**Figura 490.**

*Respuestas destacadas a la pregunta 12*

12. ¿Hay algún aspecto específico que te gustaría destacar o compartir sobre tu experiencia con esta práctica?

22 respuestas

- Muy interesante debido a lo que tuvimos que desarrollar para la práctica
- la explicación y orientación de los tutores a cargo de la práctica fue muy clara
- Es muy chévere trabajar con el robot y ponerlo en práctica con el Plc, sería interesante llevarlo más a fondo y también usar la pantalla del plc para manejar trabajos simultáneos con el robot
- Las guías fueron muy fáciles de entender y considero que son lo más destacable
- Me gusto la explicación del proceso y la práctica fue muy constructiva para mi aprendizaje
- Me pareció muy bueno las instrucciones a través de videos ya que se puede estudiar con anterioridad
- la motivación a poder crear desde cero un proyecto propio con bases para mejorar la educación de los siguientes ingenieros mecatrónicos

### **3. Conclusiones**

Al trabajar con el PLC S7-1200, es crucial elegir sensores con la misma configuración de conmutación, ya sean NPN o PNP, para garantizar su correcto funcionamiento. En el diseño y selección de componentes del sistema de clasificación, se debe considerar el objetivo final del sistema para facilitar la comprensión de los estudiantes. La interconexión por PROFINET entre el PLC S7-1200 y el robot UR3 fue exitosa, permitiendo una comunicación bidireccional segura y eficiente. Es fundamental seguir estrictamente la documentación y versiones de software proporcionadas por Universal Robots para lograr una interconexión exitosa. El sistema demostró una precisión del 100% en la clasificación de elementos conductores y no conductores en pruebas de laboratorio. Al elaborar guías para prácticas de laboratorio, es importante ser claro y conciso para no abrumar a los estudiantes y facilitar su comprensión. Las prácticas se llevaron a cabo exitosamente, aportando gran valor en experiencia y aprendizaje, con un 86,4% de aprobación por parte de los estudiantes. Los videos utilizados como herramientas didácticas obtuvieron un 81,8% de aprobación. Finalmente respondiendo a la pregunta de investigación podemos concluir que para implementar un banco de laboratorio que incluya la interconexión entre el robot ur3 y un autómata programable para acercar a los estudiantes a un entorno industrial mediante la clasificación de elementos conductores y no conductores se puede realizar mediante el protocolo de comunicación PROFINET y con el uso de diferentes elementos como sensor óptico sensor inductivo, electro válvula cilindro neumático cinta transportadora entre otros, debido a que con estos elementos se pueden implementar diferentes programas de clasificación dependiendo de su conductividad de esta manera en este proyecto de investigación se presentan dos programas de clasificación sin embargo con los elementos actuales se pueden diseñar diferentes programas de clasificación lo cual lo convierte en un banco muy versátil para las prácticas de laboratorio.



#### **4. Recomendaciones**

Los programas desarrollados para el PLC se llevaron a cabo en el software TIA Portal V15 con versión de firmware 4.1, por lo que se recomienda mantener el programa en esta misma versión para asegurar su correcto funcionamiento. Uno de los errores más frecuentes en la interconexión entre el PLC y el UR3 por PROFINET es la conexión Ethernet; si el PLC no se conecta adecuadamente al UR3, entrará en error al no encontrar el dispositivo UR3, por lo que es vital que la conexión sea correcta y que la opción PROFINET esté habilitada en el UR3. Aunque el sistema de clasificación funciona correctamente en lazo abierto, se recomienda agregar retroalimentación al robot UR3 en el futuro para convertirlo en un sistema de lazo cerrado, siendo una posible herramienta una cámara de visión artificial incorporada al robot UR3 para proporcionar retroalimentación al sistema. Además, la incorporación de una pantalla HMI para futuras prácticas de laboratorio sería una herramienta valiosa. Aunque el objetivo principal de este sistema de clasificación es para prácticas de laboratorio, también podría utilizarse en escenarios como centros de reciclaje, donde se busca clasificar y reciclar elementos con capacidad conductora que pueden ser reutilizados en la industria. El sistema de clasificación puede seguir mejorándose de muchas maneras y constituye una excelente base para futuros trabajos de investigación, como la integración de visión artificial para la clasificación de elementos y el control IoT del proceso de clasificación de elementos conductores y no conductores, entre otros.

## Referencias bibliográficas

- Arntz, M., Gregory, T., y Zierahn, U. (2016). The risk of automation for jobs in OECD countries: A comparative analysis. *OECD Social, Employment and Migration Working Papers*, 189, 39-43.
- Ávila-Rodríguez, A. M., y Pulido-González, R. A. (2015). Diseño e implementación de un módulo didáctico con base en una banda transportadora, para la implementación de sensores de proximidad en el área de automatización. *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*. <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1917>
- Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., y Aracil, R. (1997). *Fundamentos de robótica*. McGraw-Hill.
- Bolton, W. (2015). *Programmable logic controllers*. Pearson.
- Braglia, M., Castellano, R., y Zavanella, L. (2006). A Methodology to Improve Operations Efficiency in Manufacturing SMEs. *International Journal of Production Research*, 12, 23-41.
- Flórez-Ruiz, J. F., Díaz-Rodríguez, J. G., Ramírez-Dueñas, A., y Pérez-Rondón, F. A. (2021). Diseño, simulación y construcción de un modelo de laboratorio de transporte de pellets. *Iteckne*, 16(2), 7-17.
- García-Zarate, R. A., y Mardini-García, I. D. (2019). Sistema para la automatización y la telegestión de la banda transportadora del laboratorio de automatización industrial. *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Proceedings*, 20-23.
- Inzunza-Villagomez, H. I., Pérez-Arce, B., Hernández-Ruiz, S. I., López-Corella, J. A., Herrera-Velarde, M., Meranza-Castillón, M. O., y Vázquez-Cuevas, I. J. (2021). Diseño de un sistema de automatización e integración SCADA entre un Robot Colaborativo (Cobot UR) y la

plataforma HT-PLC. *LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*. <https://laccei.org/LACCEI2021-VirtualEdition/meta/FP49.html>

Jarro-Patiño, J. B., y Pesántez-Zúñiga, F. X. (2021). Desarrollo de un laboratorio remoto de un banco PLC en la Universidad Politécnica Salesiana con IoT. *Repositorio Universidad Politécnica Salesiana*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21399>

Lim, Y. (2012). PLC-Controlled of a Conveyor System I. *Journal of Automation and Control Engineering*, 1(1), 15-18.

Rahimi, M., Zhang, F., y Fainekos, G. (2019). Safe Human-Robot Interaction: Challenges and Opportunities. *IEEE Transactions on Robotics*, 35(3), 615-630

Reyes, F. (2011). *Robótica: Control de Robots Manipuladores*. Alfaomega Grupo Editor.

Safont, A. (2022). Control distribuido del robot colaborativo UR3. *Universitat Politècnica de València*. <http://hdl.handle.net/10251/188863>

Salimbeni, S. (2022). Análisis de viabilidad técnica para el uso de Cobots en pymes manufactureras. *Revista Internacional de Ingeniería Industrial (Riii)*, 1(3), 5-20.

Santini, A., Favi, C., y Mandorli, F. (2016). Design for recycling and life cycle assessment of end-of-life refrigerators. *Procedia CIRP*, 55, 243-248.

Sarmiento, G. (2016). *Plc Programacion: Aprende Todo Sobreplc y Su Programacion*. CreateSpace Independent Publishing Platform.

Siemens. (2021). SIMATIC S7 Controlador programable S7-1200. Recuperado de <https://support.industry.siemens.com/cs/ww/es/>

Universal Robots. (2015). Universal Robots e-Series Manual de usuario UR3e: Traducción de las instrucciones originales (es). Recuperado de [https://www.cfzcobots.com/wp-content/uploads/2017/03/ur3\\_user\\_manual\\_es\\_global.pdf](https://www.cfzcobots.com/wp-content/uploads/2017/03/ur3_user_manual_es_global.pdf)

Universal Robots. (2024). PROFINet How-To Guide CB3. Recuperado de <https://www.universal-robots.com/articles/ur/interface-communication/profinet-how-to-guide-cb3/>

**Anexos**

**Anexo A.** Video funcionamiento primer programa de clasificación

<https://youtu.be/zhdH1jFm62I>

**Anexo B.** Video de funcionamiento segundo programa de clasificación

<https://youtu.be/PFx4dXG3iPw>

**Anexo C. Programas desarrollados**

[https://drive.google.com/drive/folders/1n1-wISG\\_ReNAKVLGPKeAPenzNxRjYQUG?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1n1-wISG_ReNAKVLGPKeAPenzNxRjYQUG?usp=sharing)



**Anexo D.** Guías de laboratorio desarrolladas

<https://drive.google.com/drive/folders/1AOxbrvjROTMJuypKVzct0Q8kxmg2WLTy?usp=sharing>

g

**Anexo E.** Evidencias prácticas de laboratorio

[https://drive.google.com/drive/folders/1dXiTXuuc-pq55ilUiKKlVycLGUW\\_B1jl?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1dXiTXuuc-pq55ilUiKKlVycLGUW_B1jl?usp=sharing)