



ESCUELA DE INGENIERÍA DE FUENLABRADA

GRADO EN INGENIERÍA DE ROBÓTICA SOFTWARE

TRABAJO FIN DE GRADO

**Automatización de línea de producción robotizada
para simulación didáctica**

Autor/a: Álvaro Alonso Alosete

Tutor: Julio S. Lora Millán

Curso académico 2024 / 2025



Este trabajo se distribuye bajo los términos de la licencia internacional CC BY-SA International License (Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0). Usted es libre de (*a*) *compartir*: copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato para cualquier propósito, incluso comercialmente; y (*b*) *adaptar*: remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente. La licenciatante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia:

- *Atribución.* Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatante.
- *Compartir igual.* Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original.
No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, quienes han sido el pilar fundamental para avanzar en este largo camino que ahora llega a su fin. Siempre han estado ahí cuando lo he necesitado y me han dado todo tipo de facilidades para que mi única preocupación fuesen los estudios, Por todo ello, siento que este trabajo también es suyo, nunca podré expresar con palabras lo agradecido que estoy por todo lo que han hecho por mí.

También quiero dar las gracias a todos mis compañeros de clase que he tenido la suerte de conocer a lo largo de estos años. A todos, tanto a quienes conocí en los primeros años como a quienes se unieron en los últimos, gracias por acompañarme en este viaje. Cada uno de vosotros ha dejado una huella en esta etapa, y sé que no os olvidaré nunca.

Mención especial a mi tutor, Julio, por su apoyo, orientación y paciencia a lo largo de todo este proyecto. Gracias por tu ayuda en la configuración de los equipos, la resolución de imprevistos y por facilitarme siempre, con rapidez y disposición, las herramientas necesarias para poder avanzar en el proyecto.

Y por último, no quiero olvidarme de mi familia y amigos de la infancia, por estar siempre ahí, incluso cuando no entendían del todo qué hacía. Su apoyo incondicional en el día a día, sus consejos, el simple hecho de pasar rato con ellos tiempo con ellos me ayudaba a desconectar y a ser feliz, dándome las fuerzas necesarias para seguir adelante.

Madrid, 30 de Junio de 2025
Álvaro Alonso Alosete

Resumen

La automatización industrial y la robótica colaborativa han transformado los entornos productivos modernos, mejorando notablemente la eficiencia, reduciendo errores humanos y ofreciendo nuevas oportunidades en la formación técnica especializada. En este contexto, los sistemas didácticos permiten simular entornos reales para preparar adecuadamente a los futuros profesionales del sector industrial y tecnológico.

Este trabajo aborda la automatización de una línea de producción didáctica, compuesta por dos estaciones de Festo y un robot colaborativo UR5e. El objetivo principal ha sido integrar todos los elementos mediante comunicaciones industriales PROFINET y control mediante PLCs y HMI, reproduciendo un entorno industrial realista, funcional, escalable y aplicable en múltiples escenarios educativos y demostrativos.

Se ha utilizado TIA Portal para la programación de las estaciones, aplicando metodologías como GrafCet y la Guía GEMMA para lograr un resultado robusto, profesional y estructurado. Además, el robot UR5e ha sido programado para realizar tareas de paletizado e integrado en la red PROFINET, permitiendo una operación sincronizada y eficiente dentro del ciclo completo de producción simulado.

Las pruebas se realizaron en un entorno físico real, logrando una automatización estables y eficaz del sistema completo en diversas condiciones. Los resultados obtenidos validan su utilidad como herramienta didáctica, adaptable a diferentes prácticas formativas, accesible para estudiantes y con gran potencial para la formación en automatización y robótica industrial avanzada.

Acrónimos

IA *Inteligencia artificial*

ERP *Enterprise resource planning*

MES *Manufacturing execution system*

PLC *Controlador lógico programable*

PAC *Controlador automatizado programable*

HMI *Human-machine interface*

E/S *Entradas y salidas*

EOAT *Endo of arm tooling*

TCP *Tool center point*

ROS *Robot operating system*

Índice general

1. Introducción	1
1.1. La automatización industrial	1
1.1.1. Conceptos básicos de la automatización industrial	1
1.1.2. Tipos de automatización industrial	4
1.1.3. Ventajas y desventajas de la automatización industrial	5
1.1.4. Equipos para la automatización industrial	6
1.2. La robótica	9
1.2.1. Robótica industrial	10
1.3. Unión entre la automatización y la robótica	12
1.3.1. Comunicaciones entre los dispositivos	12
1.3.2. Metodología de la automatización industrial	14
1.4. Motivación del trabajo	18
2. Objetivos	21
2.1. Descripción del problema	21
2.2. Requisitos	22
2.3. Competencias	22
2.4. Metodología	23
2.5. Plan de trabajo	23
3. Plataforma de desarrollo	25
3.1. Estación distribución	25
3.2. Estación unión	28
3.3. PLCs Siemens 1200s	31
3.4. HMI	32
3.5. TIA Portal	34
3.6. Cobot UR5e	35
3.7. Switch ethernet industrial	37

4. Diseño	38
4.1. Descripción general	38
4.2. Conectividad de los dispositivos	40
4.3. Funcionamiento estación distribución	47
4.4. Funcionamiento estación unión	51
4.5. Aplicación de la Guía GEMMA	54
4.6. Funcionamiento cobot UR5e	62
4.7. Resultado final	69
5. Conclusiones	71
5.1. Conclusiones	71
Bibliografía	73
A. Anexo	77
A.1. Ecuaciones lógicas estación distribución	78
A.2. Ecuaciones lógicas estación unión	80

Índice de figuras

1.1. Ejemplo de aplicación de automatización industrial.	2
1.2. Niveles de la pirámide de automatización. [Omnielectric Web, 2024]	4
1.3. PLC de la serie Siemens S7-1500.	7
1.4. Ejemplo del lenguaje de programación Ladder.	8
1.5. HMI Siemens.	9
1.6. RB-WATCHER de Robotink.	10
1.7. Partes de un brazo robótico industrial.	11
1.8. Ejemplo básico de dus de campo. [aula 21, 2020]	13
1.9. Ejemplo básico de red de ethernet industrial. [PRECISION, 2023]	14
1.10. Ejemplo básico de GRAFCET.	16
1.11. Ejemplo de guía gemma complejo. [José A. Rodríguez Mondéjar, 2022]	17
1.12. Ejemplo de un diagrama básico con sistema SCADA. [aula21, 2023]	18
1.13. Tendencias del mercado global de automatización industrial. [Data Bridge Market Research, 2025]	19
3.1. Estación distribución. [Frank Ebel, 2020a]	26
3.2. Características generales de la etación distribución. [Frank Ebel, 2020a]	26
3.3. Componentes de la estación distribución.	28
3.4. Estación unión. [Frank Ebel, 2020b]	29
3.5. Características generales de la estación unión. [Frank Ebel, 2020b]	29
3.6. Componentes de la estación unión. [Frank Ebel, 2020b]	30
3.7. Componentes de la estación unión.	31
3.8. PLC Siemens 1215 AC/DC/RLY. [Siemens, 2025a]	32
3.9. SIMATIC HMI KTP700 Basic PN.	33
3.10. Captura de pantalla de la aplicación TIA Portal.	34
3.11. Robot UR5e de Universal Robots. [Robots, 2019]	35
3.12. Pantalla táctil PolyScope. [Universal Robots, 2025a]	36
3.13. Switch industrial 6GK5005-0GA10-1AB2 de Siemens [Siemens, 2025b] .	37

4.1. Estación distribución y estación unión unidas.	40
4.2. Representación de conexiones entre los dispositivos del proyecto.	41
4.3. Representación de conexiones entre los dispositivos dentro del proyecto de Tia Portal.	41
4.4. Estructuras de datos utilizadas en la comunicación entre los PLCs. . .	42
4.5. Funciones SEND y RECV entre los PLCs.	43
4.6. Configuración de los módulos de comunicación del UR en Tia Portal. .	44
4.7. Configuración de los módulos de comunicación del UR en Tia Portal. .	45
4.8. Conexión establecida entre el UR y el PLC dentro del PolyScope. [Universal Robots, 2024]	45
4.9. Graficet del funcionamiento de la estación distribución.	49
4.10. Pantalla del modo funcionamiento en el HMI.	50
4.11. Graficet de funcionamiento de la estación unión.	53
4.12. Aviso de pieza defectuosa en el modo funcionamiento en el HMI. . . .	54
4.13. Estado inicial del HMI.	56
4.14. Vista del HMI dentro de la opción Modo Test.	56
4.15. Visualización del modo Test de la estación distribución dentro del HMI.	57
4.16. Vista del HMI dentro de la opción Modo Test 1 de la estación unión. .	58
4.17. Vista del HMI dentro de la opción Modo Test 2 de la estación unión. .	58
4.18. Esquema de transiciones de la aplicación de la Guía Gemma en el sistema.	61
4.19. UR5e junto con la pinza como herramienta.	62
4.20. Resultado final del paletizado de bricks de leche por el UR5e.	63
4.21. Mensaje del número pieza siendo colocada por el UR en la pantalla de funcionamiento del HMI.	67
4.22. Botón para la confirmación de pale recogido en la pantalla de funcionamiento del HMI.	68

Listado de códigos

4.1. Programa de robot en Polyscope	65
4.2. Programa de robot en Polyscope	66

Listado de ecuaciones

Índice de cuadros

4.1.	Intercambio de mensajes en el ciclo global del sistema.	46
4.2.	Entradas y salidas de la estación distribución conectadas al PLC 1 . . .	47
4.3.	Entradas y salidas de la estación unión conectadas al PLC 2	51
4.4.	Salidas de la estación unión conectadas al PLC 2	52
4.5.	Estados de la Guía Gemma utilizados en el sistema.	55
4.6.	Coordenadas de colocación de las piezas en el palé utilizando el UR5e..	64
4.7.	Registros utilizados para la comunicación entre el UR5e y el PLC 1. .	64
A.1.	Ecuaciones de transición de estados de la estación distribución.	78
A.2.	Ecuaciones de transición de estados de la estación distribución.	79
A.3.	Ecuaciones lógicas de las acciones de la estación distribución.	79
A.4.	Ecuaciones de transición de estados de la estación unión.	80
A.5.	Ecuaciones de transición de estados de la estación unión.	81
A.6.	Ecuaciones lógicas de las acciones de la estación distribución.	81

Capítulo 1

Introducción

La automatización no es el enemigo del trabajador, sino la clave para su evolución

La automatización ha sido un pilar fundamental en el desarrollo de la industria moderna, permitiendo mejoras significativas en eficiencia, calidad y seguridad [I-MAS, 2022]. Desde la revolución Industrial hasta la actualidad, la evolución de las tecnologías ha dado paso a sistemas cada vez más sofisticados, donde la integración de robots ha transformado los entornos de producción, ofreciendo resultados de mayor calidad y reduciendo costes y tiempos de producción [I-MAS, 2022]. En particular, la robótica industrial ha desempeñado un papel clave en sectores como la automoción, la electrónica y la manufactura, ofreciendo soluciones flexibles y altamente eficientes para la producción en serie [I-MAS, 2022].

En este capítulo se presentará el contexto en el que se desarrolla este trabajo, proporcionando una visión general de la automatización en la industria y su evolución hasta la actualidad. Posteriormente, se acotará el enfoque hacia la robótica industrial, destacando su impacto en la optimización de procesos productivos. Finalmente, se delimitará el ámbito específico de este estudio, centrado en la automatización de una línea de producción robotizada, analizando sus beneficios, retos y las tecnologías empleadas.

1.1. La automatización industrial

1.1.1. Conceptos básicos de la automatización industrial

La automatización industrial consiste en la implementación de sistemas de control, como computadoras, controladores lógicos programables (computadora industrial la cual graba la información de las entradas en memoria, las procesa

y escribe en las salidas las acciones oportunas), robots y tecnologías de la información, para gestionar maquinaria y procesos productivos en el sector industrial [Centro de la formación técnica para la industria, 2024]. Su propósito principal es reducir la intervención humana, reemplazando tareas manuales, especialmente aquellas que implican riesgos, por procesos automatizados .

Este concepto surge como una evolución de la mecanización industrial, incorporando dispositivos con gran capacidad de control para optimizar la eficiencia en la fabricación. Con los avances tecnológicos y la llegada de la Industria 4.0, las empresas están modernizando sus sistemas de producción mediante el uso de control informatizado, lo que les permite mejorar la precisión, calidad y rendimiento de sus operaciones [Centro de la formación técnica para la industria, 2024].

El término “automatización” tiene su origen en las palabras griegas “auto” (por sí mismo) y “matos” (movimiento), y se aplica a mecanismos capaces de funcionar de manera autónoma. Los sistemas automatizados ofrecen un rendimiento superior a los manuales en términos de precisión, potencia y velocidad [Centro de la formación técnica para la industria, 2024]. En el ámbito del control industrial, es posible monitorizar y regular simultáneamente diversas variables de proceso, como temperatura, flujo, presión, distancia y niveles de líquido, mediante el uso de PLCs, PACs (Controladores Automatizados Programables que integran PLC y PC), o PCs. [Centro de la formación técnica para la industria, 2024].



Figura 1.1: Ejemplo de aplicación de automatización industrial.

La estructura de un sistema de automatización industrial se puede representar mediante un triángulo jerárquico de cinco niveles como se observa en la imagen 1.2:

1. **Nivel de gestión:** La alta gerencia usa sistemas ERP (Enterprise Resource Planning) para controlar y monitorear todos los procesos de la empresa, desde la producción hasta ventas, compras y proyectos, asegurando eficiencia y alineación entre equipos.[SDI, 2022].
2. **Nivel de operación:** Este nivel está controlado por el sistema MES (Manufacturing Execution System). Un sistema MES conecta el mundo digital con la producción, permitiendo supervisar, sincronizar cada fase del proceso y monitorear la producción [aula 21, 2019]. Este sistema integra datos de operaciones, mantenimiento, seguridad, logística y calidad, permitiendo a la gerencia tomar decisiones informadas sobre todo el proceso, desde las materias primas hasta el producto final. [SDI, 2022].
3. **Nivel supervisor:** Compuesto por un ordenador industrial que utiliza software especializado para el control de procesos. Su principal objetivo es la parametrización y visualización del proceso y se utiliza el protocolo de comunicación Ethernet industrial [Sunt Automatización, 2024].
4. **Nivel de control:** Incluye dispositivos como PLCs que ejecutan las órdenes del nivel supervisor y controlan directamente la maquinaria en tiempo real. Estos pueden estar conectados a varios dispositivos de E/S (entradas y salidas) y se comunican mediante protocolos industriales [Sunt Automatización, 2024].
5. **Nivel de campo:** Constituido por sensores y actuadores que interactúan directamente con el proceso físico conectados al PLC a través de un bus de campo. Los actuadores ejecutan acciones según las instrucciones recibidas normalmente a través de una conexión punto a punto con el PLC. [Sunt Automatización, 2024].

Esta estructura permite una gestión eficiente y organizada de los procesos industriales, asegurando que cada componente funcione de manera integrada para optimizar la producción.

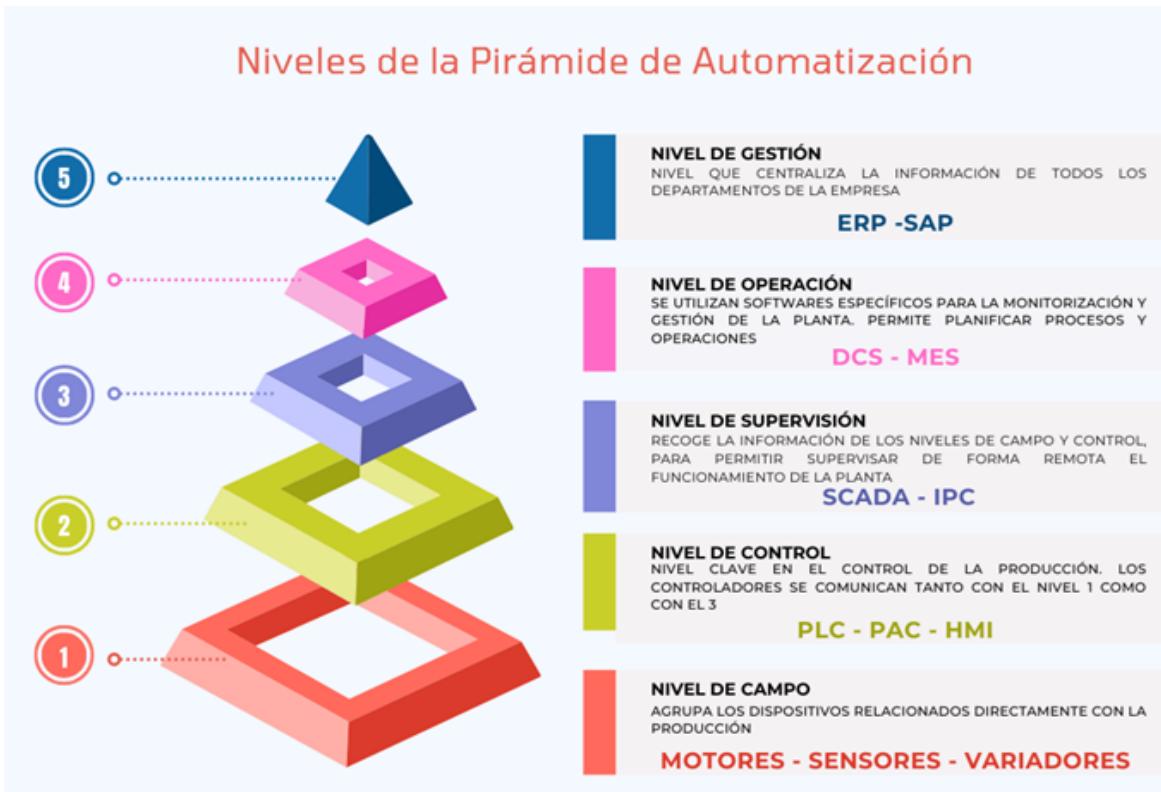


Figura 1.2: Niveles de la pirámide de automatización. [Omnielectric Web, 2024]

1.1.2. Tipos de automatización industrial

Los sistemas de automatización industrial se clasifican principalmente en cuatro tipos según su nivel de flexibilidad y aplicación en los procesos productivos:

1. **Automatización fija**: Utilizada en procesos específicos y repetitivos donde no se requieren modificaciones en el diseño del producto debido a que aplicar modificaciones resulta casi imposible. Es ideal para la producción a gran escala de productos estables [neobotikstg, 2021].
2. **Automatización programable**: Aplicada en la fabricación por lotes, permite modificar el proceso mediante reprogramación, aunque esto puede consumir tiempo [neobotikstg, 2021].
3. **Automatización flexible**: Variante más avanzada de la automatización programable, que facilita cambios rápidos y automáticos en la producción sin interrupciones significativas [neobotikstg, 2021].

4. **Sistema Integrado de Automatización:** Conjunto de máquinas, procesos y datos sincronizados bajo un único sistema de control. Integra herramientas como CAD, CAM, robots y sistemas de transporte automatizados para optimizar la producción [neobotikstg, 2021].

1.1.3. Ventajas y desventajas de la automatización industrial

La automatización industrial ha transformado profundamente los procesos de producción, introduciendo tecnologías avanzadas que permiten aumentar la eficiencia, mejorar la calidad y reducir los costos operativos [MCR, 2016]. A continuación, se presentan las principales ventajas:

- **Mayor productividad laboral:** La automatización acelera los procesos de producción, permitiendo fabricar más productos con una mejor calidad. Las nuevas tecnologías pueden operar de manera continua sin perder precisión, lo que incrementa la eficiencia y el rendimiento por hora de trabajo [MCR, 2016].
- **Mejora en la calidad del producto:** Uno de los principales beneficios de la automatización es la reducción de la cantidad de unidades defectuosas. Los sistemas automatizados garantizan una mayor uniformidad y precisión en la fabricación, cumpliendo con los estándares de calidad [Automatizacionindustrial360, 2020].
- **Reducción de costos de producción:** La automatización permite disminuir el gasto en mano de obra al reemplazar tareas repetitivas con maquinaria, lo que reduce el costo unitario de producción. Los sistemas automatizados operan de manera constante, aumentando la eficiencia y proporcionando un alto retorno de inversión al minimizar costos laborales, ausencias y otros gastos operativos [MCR, 2016].
- **Menos trabajo manual repetitivo:** En muchas industrias, es necesario supervisar constantemente variables como temperatura, presión o nivel de líquidos. Un sistema automatizado permite gestionar estas tareas mediante controladores de lazo cerrado, reduciendo la necesidad de intervención humana en actividades rutinarias [MCR, 2016].
- **Mayor seguridad:** Al implementar un sistema automatizado, los trabajadores pasan de realizar tareas directamente en el proceso a supervisarlas, lo que disminuye los riesgos laborales. Las máquinas pueden operar en entornos

peligrosos o extremos, sustituyendo a los empleados en situaciones de alto riesgo, reduciendo así los accidentes laborales [Automatizacionindustrial360, 2020].

- **Facilita la monitorización remota:** Muchas operaciones industriales requieren ser controladas a distancia para una supervisión más eficiente. Los sistemas automatizados permiten la comunicación entre el área de producción y el centro de control, permitiendo a los operadores gestionar los procesos de manera remota [Automatizacionindustrial360, 2020].

Sin embargo, junto con estos beneficios, como sucede en cualquier ámbito, también surgen desafíos y limitaciones que deben ser considerados por las empresas antes de implementar estos sistemas. Por eso, seguidamente se muestran algunas desventajas de la automatización industrial:

- **Aumento de la contaminación:** Muchas máquinas requieren motores que funcionan con combustibles o productos químicos que pueden generar emisiones contaminantes [MCR, 2016].
- **Menor flexibilidad:** Una máquina automatizada está diseñada para realizar tareas específicas, lo que limita la capacidad de adaptación a nuevas funciones en comparación con un trabajador humano. Actualmente, ciertas tareas, como el ensamblaje de productos con formas irregulares, siguen dependiendo del trabajo manual [MCR, 2016].
- **Altos costos de implementación:** La inversión inicial para adoptar un sistema automatizado es elevada. Además de los gastos en investigación y desarrollo, es necesario considerar los costos de mantenimiento, formación del personal y servicio técnico, lo que suma un desafío económico para las empresas que buscan automatizar sus procesos [Automatizacionindustrial360, 2020].

1.1.4. Equipos para la automatización industrial

La automatización industrial se apoya en una amplia gama de dispositivos diseñados para controlar, supervisar y optimizar procesos dentro de entornos productivos. Entre estos equipos, destacan los Controladores Lógicos Programables (PLCs) y las Interfaces Hombre-Máquina (HMI), los cuales cumplen un papel fundamental en la implementación y operación de sistemas automatizados modernos.

Controladores lógicos programables (PLCs)

Un PLC (Controlador Lógico Programable) es una computadora diseñada específicamente para automatizar procesos industriales. Su tarea principal es controlar de manera eficiente y segura los sistemas que conforman una máquina o proceso, lo cual es clave para el avance tecnológico de las industrias. Estos dispositivos operan mediante un ciclo en el que se realiza un autodiagnóstico, se leen las entradas, se ejecuta el programa y finalmente se actualizan las salidas, lo que les permite adaptarse rápidamente a las condiciones cambiantes del entorno [GSL industrias, 2021].

Existen distintos tipos de PLC, cada uno adaptado a las necesidades particulares de cada industria. Entre los más comunes se encuentran los modelos compactos, modulares o de banda estrecha. Marcas como Siemens y Allen Bradley son líderes en este mercado, ofreciendo una amplia variedad de productos y accesorios para mejorar la automatización de los procesos. Los PLCs se usan en una gran variedad de sectores, incluyendo la fabricación de cemento, plásticos, muebles, automotriz, transporte, energía y seguridad, ayudando a mejorar la eficiencia y reducir los costos operativos [GSL industrias, 2021].



Figura 1.3: PLC de la serie Siemens S7-1500.

Una de las principales características de los PLC es su capacidad para leer datos de las entradas y controlar las salidas de manera segura. Además, son compatibles con varios lenguajes de programación, lo que permite su fácil integración con sistemas de supervisión y control. Estos dispositivos pueden ser reprogramados según las necesidades del proceso, lo que les da gran flexibilidad y adaptabilidad en entornos industriales que están en constante cambio [GSL industrias, 2021].

Uno de los lenguajes de programación más utilizados utilizado para los PLCs, y el empleado en este proyecto es el lenguaje KOP, también conocido como **Ladder**. Su popularidad se debe a su antigüedad, disponibilidad, mantenibilidad y facilidad de uso. Diseñado para imitar los diagramas eléctricos tradicionales, permite a técnicos e ingenieros familiarizados con estos esquemas adaptarse fácilmente a la programación en este lenguaje. Su naturaleza gráfica permite una comprensión rápida de la lógica del programa, lo que simplifica el proceso de mantenimiento y resolución de problemas [Iñigo Gútiez, 2024].

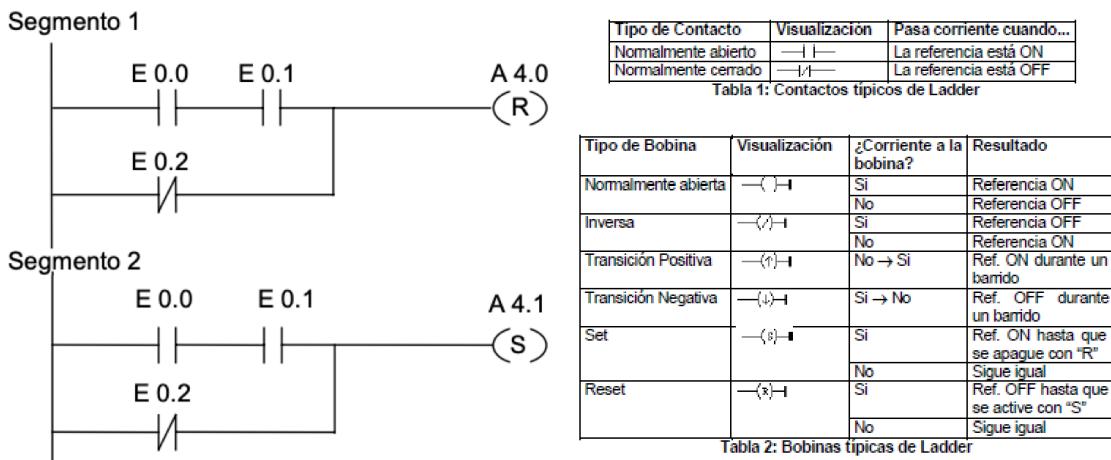


Figura 1.4: Ejemplo del lenguaje de programación Ladder.

Interfaz humano máquina (HMI)

Una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) es un dispositivo que permite a los operarios comunicarse con sistemas automatizados dentro de un entorno industrial. Básicamente, actúa como una pantalla o panel táctil desde el cual se puede supervisar, controlar y ajustar el funcionamiento de una máquina o proceso. Los HMI permiten visualizar datos en tiempo real, como temperaturas, velocidades o estados de operación, y también enviar comandos para modificar parámetros o detener procesos si es necesario [Siemens, 2024].

Además, estos dispositivos están pensados para funcionar en condiciones industriales exigentes, con diseños robustos y duraderos [Siemens, 2024]. También soportan múltiples idiomas y pueden adaptarse a distintos sectores y tipos de máquinas [Siemens, 2024]. En resumen, un HMI es una herramienta fundamental para mejorar la comunicación entre las personas y los sistemas automatizados, permitiendo un control más intuitivo, rápido y preciso de los procesos industriales.



Figura 1.5: HMI Siemens.

1.2. La robótica

La robótica es la disciplina científica que integra conocimientos de electrónica, mecánica e informática para desarrollar sistemas automatizados capaces de realizar tareas de manera autónoma o semiautónoma [ferrovial, 2022].

La robótica, en términos generales, abarca el diseño, construcción y programación de sistemas capaces de percibir su entorno, procesar información y ejecutar acciones de manera autónoma [esneca, 2024]. A diferencia de la robótica industrial, que se centra principalmente en tareas repetitivas, de alta precisión y en entornos estructurados como fábricas, la robótica tradicional se caracteriza por la diversidad de aplicaciones y la necesidad de adaptarse a contextos más variables y no estructurados. Esto implica la utilización de componentes versátiles, diseñados específicamente para cumplir funciones concretas en ámbitos como la robótica móvil, de exploración, educativa o de asistencia personal [esneca, 2024].

En estos sistemas robóticos, los sensores juegan un papel crucial al proporcionar información del entorno que permite la adaptación del comportamiento del robot. Estos sensores, que pueden medir variables como luz, distancia, posición, velocidad, temperatura o fuerza, actúan como los "sentidos" del sistema robótico, y son fundamentales para su interacción efectiva con entornos complejos y no predecibles [esneca, 2024]. En contraste, en la robótica industrial los sensores suelen estar

optimizados para tareas concretas dentro de procesos controlados y altamente repetitivos, donde las condiciones del entorno apenas varían.

Por su parte, el software y los algoritmos que controlan el comportamiento del robot en la robótica de servicios deben ser especialmente robustos, adaptativos y, en muchos casos, incorporar técnicas de inteligencia artificial o aprendizaje automático [esneca, 2024]. Esto permite al robot reaccionar de forma flexible a situaciones no previstas, algo menos común en la robótica industrial, donde los algoritmos suelen estar más orientados a la eficiencia, estabilidad y cumplimiento exacto de ciclos de producción [esneca, 2024]. Finalmente, los actuadores son los responsables de ejecutar las decisiones del sistema de control y deben estar diseñados para responder con precisión y versatilidad, siendo capaces de adaptarse a tareas muy variadas, a diferencia de los actuadores industriales, que suelen estar optimizados para movimientos repetitivos y bien definidos en líneas de montaje automatizadas [esneca, 2024].



Figura 1.6: RB-WATCHER de Robotink.

1.2.1. Robótica industrial

Según la norma internacional ISO 8373:2021 un robot industrial se define como “un manipulador multifuncional, reprogramable y controlado automáticamente, programable en tres o más ejes que puede estar fijo en un área o móvil para su uso en aplicaciones de automatización industrial” [ISO, 2021]. Todo ello a partir de trayectorias variables para ejecutar diversas tareas cíclicas y adaptables.

La robótica industrial es una disciplina de la ingeniería robótica dedicada al diseño, desarrollo y fabricación de robots industriales con el propósito de automatizar tareas repetitivas tradicionalmente realizadas por seres humanos. Estos sistemas robóticos se caracterizan por seguir una secuencia de instrucciones predefinidas, ejecutando ciclos de

trabajo continuos en líneas de producción de diversos sectores industriales. Estos robots son considerados industriales debido a que se utilizan en la industria manufacturera en sectores como la automoción, electrónica, alimentación, farmacéutico... En ellos contribuyen significativamente a mejorar la eficiencia, la velocidad y la calidad de los procesos productivos [Unir, 2021].

A diferencia de los robots de servicio, los robots industriales operan en entornos altamente controlados, lo que simplifica su programación y control. Debido a estas condiciones estables, estos robots suelen tener más de tres grados de libertad, permitiéndoles realizar movimientos complejos con gran precisión. Aunque su aplicación principal ha sido históricamente en entornos industriales, su uso se ha expandido hacia sectores como la minería, la agricultura, el comercio y la salud, demostrando su versatilidad y adaptabilidad.

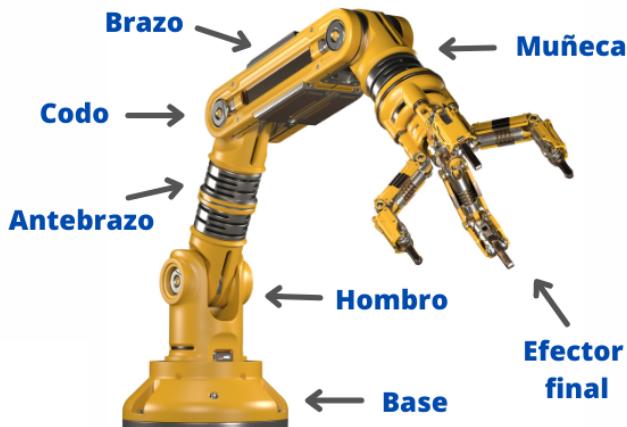


Figura 1.7: Partes de un brazo robótico industrial.

Para que un brazo robótico sea considerado industrial, debe cumplir con una serie de características técnicas y funcionales que lo hagan adecuado para entornos de producción. Entre ellas, destacan la precisión y la repetibilidad, que permiten realizar tareas con tolerancias muy ajustadas. También debe tener una estructura robusta y una capacidad de carga suficiente según la aplicación, así como al menos seis grados de libertad para poder ejecutar movimientos complejos [MME, 2023].

Otra característica fundamental es la velocidad de operación, ya que en entornos industriales es clave mantener ritmos de trabajo altos. Además, debe ser fácilmente programable y compatible con sistemas de automatización como PLCs o entornos como ROS (Robot Operating System. middleware utilizado para desarrollar, simular y controlar sistemas robóticos), y permitir la integración con sensores, cámaras

o herramientas específicas [MME, 2023]. Desde el punto de vista de seguridad y conectividad, debe cumplir con normativas como la ISO 10218 y ser compatible con protocolos industriales como PROFINET o EtherCAT [MME, 2023].

Desde la aparición de los primeros prototipos de robots industriales, ha surgido un debate sobre su impacto en el empleo humano, con preocupaciones respecto a una posible sustitución de la mano de obra. Sin embargo, numerosos estudios sostienen que, lejos de desplazar a los trabajadores, estos sistemas robóticos buscan mejorar las condiciones laborales, eliminando tareas monótonas o peligrosas [Computing, 2023].

1.3. Unión entre la automatización y la robótica

En los años 2010, la Industria 4.0 emergió como una nueva fase en la manufactura, caracterizada por la digitalización y la interconexión de sistemas de producción [MONDRAGON ENRIQUEZ, 2023]. Los robots industriales se convirtieron en componentes clave de las fábricas inteligentes, colaborando estrechamente con humanos y otros sistemas automatizados para optimizar la eficiencia y la flexibilidad en la producción [MONDRAGON ENRIQUEZ, 2023].

Entrando al siglo XXI se desarrollan los primeros robots colaborativos, conocidos como cobots, concebidos para cooperar de manera directa con las personas [MONDRAGON ENRIQUEZ, 2023]. Estos dispositivos se caracterizan por su seguridad, adaptabilidad y facilidad de programación, convirtiéndose en una solución ideal para entornos industriales donde es necesario combinar tareas manuales y automatizadas [MONDRAGON ENRIQUEZ, 2023].

1.3.1. Comunicaciones entre los dispositivos

Las comunicaciones entre dispositivos industriales son fundamentales para que los procesos de producción actuales funcionen de forma segura, eficiente y automatizada [Centro de la formación técnica para la industria, 2021]. Gracias a ellas, sensores, actuadores, controladores y sistemas de gestión pueden intercambiar datos constantemente, asegurando que todo el proceso esté coordinado y optimizado. El objetivo principal de estas comunicaciones es transformar la información captada del entorno en datos útiles que faciliten la toma de decisiones rápidas y eficaces [Centro de la formación técnica para la industria, 2021]. Esto no solo mejora la eficiencia de la producción, sino que también ayuda a prevenir errores, optimizar el uso de recursos y mantener los procesos en marcha sin interrupciones. A diferencia de las redes convencionales, las comunicaciones industriales deben cumplir con requisitos muy

exigentes: alta fiabilidad, resistencia a condiciones adversas, capacidad para operar en tiempo real y determinismo. [Centro de la formación técnica para la industria, 2021].

La tecnología de **bus de campo** apareció a finales de los años 80 con el objetivo de ofrecer un método estandarizado para conectar múltiples dispositivos de campo en entornos industriales. El bus de campo es una red de comunicación industrial bidireccional y multipunto que conecta dispositivos de campo inteligentes, sustituyendo los sistemas de control centralizados por redes distribuidas [aula 21, 2020]. Existen múltiples variantes desarrolladas por fabricantes para diferentes nichos destacando: PROFIBUS en automoción y control de procesos, CANbus en el sector automotriz y maquinaria y Foundation Fieldbus en industrias de petróleo y gas entre otros [Maisvch, 2023].

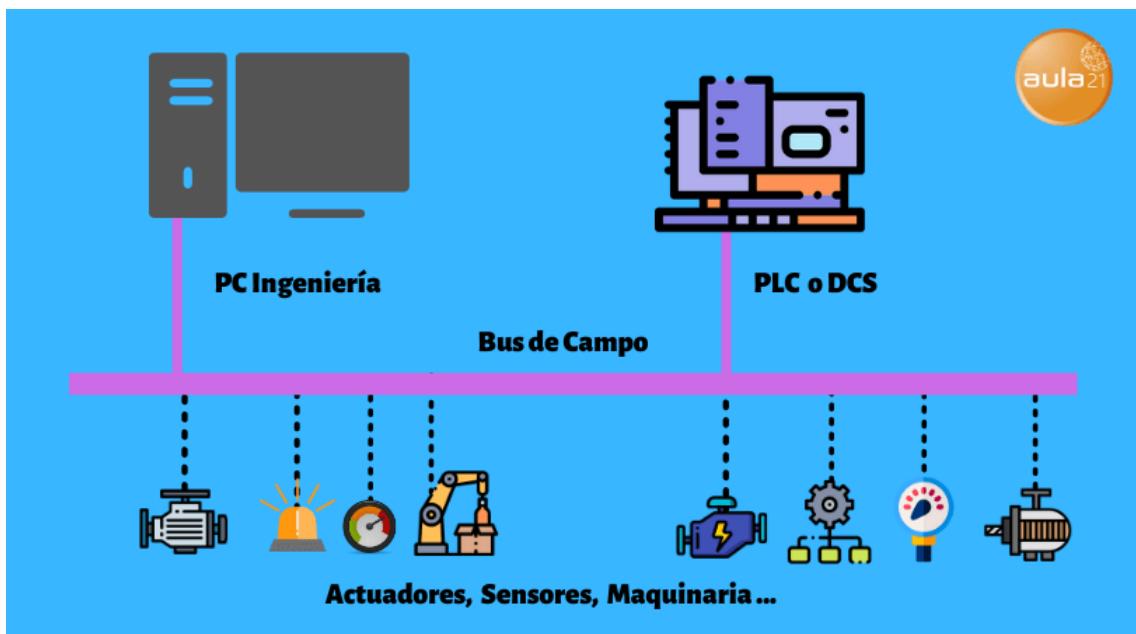


Figura 1.8: Ejemplo básico de dus de campo. [aula 21, 2020]

Por otro lado, la tecnología **Ethernet industrial** surge como una evolución de Ethernet tradicional, adaptándose a los estrictos requerimientos de entornos industriales donde la robustez, el intercambio de datos en tiempo real y la resistencia a interferencias son esenciales. A partir del estándar IEEE 802.3, Ethernet industrial integra mejoras específicas para la automatización, soportando protocolos como Modbus TCP/IP, PROFINET y EtherCAT [Maisvch, 2023].

Entre sus principales ventajas frente a los sistemas de bus de campo tradicionales destacan sus altas velocidades de comunicación (desde 10 Mbps hasta 10 Gbps), su apertura e interoperabilidad, la escalabilidad de la red y su rentabilidad. Estas características permiten su uso tanto en el monitoreo en tiempo real como en la

integración de sistemas de gestión y supervisión de plantas industriales, convirtiéndolo en la base de las redes industriales modernas [Maisvch, 2023].

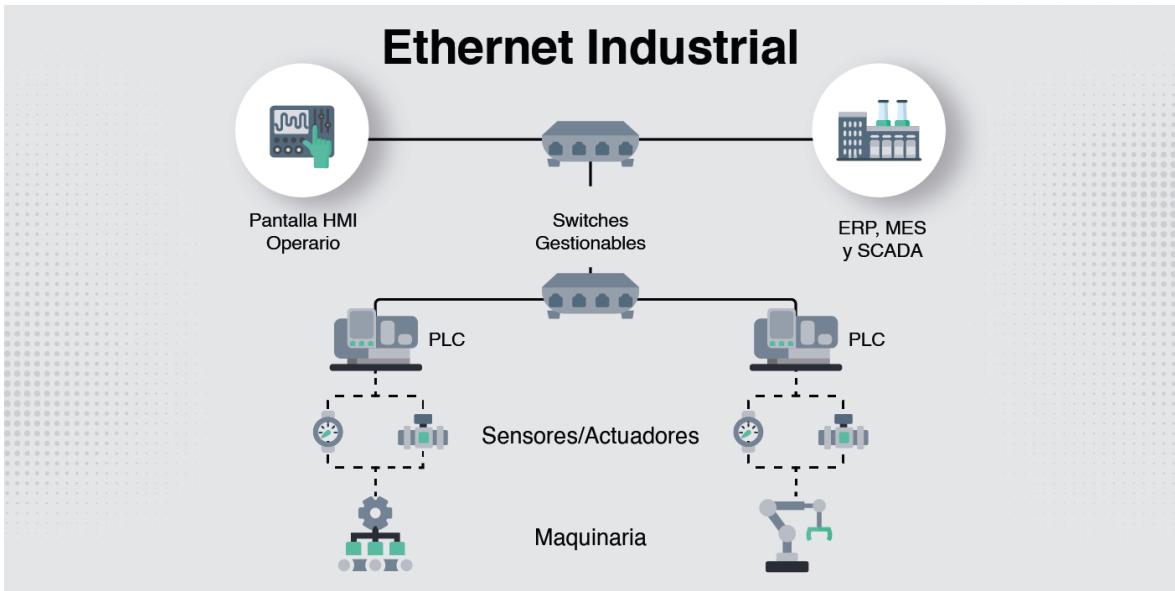


Figura 1.9: Ejemplo básico de red de ethernet industrial. [PRECISION, 2023]

1.3.2. Metodología de la automatización industrial

En la automatización industrial, es fundamental seguir una metodología clara que permita diseñar, implementar y controlar los procesos de forma ordenada y eficiente. Para ello, existen herramientas y enfoques que ayudan a representar el comportamiento del sistema, identificar sus distintos modos de funcionamiento y supervisar su estado en tiempo real.

Una de las herramientas más utilizadas es el GRAFCET, un método gráfico que permite describir de forma sencilla el funcionamiento secuencial de un sistema. Junto a él, la guía GEMMA ayuda a identificar los distintos modos de operación del sistema (como arranque, parada o fallo), y sirve como complemento al GRAFCET para organizar mejor el control general del proceso. Por último, los sistemas SCADA juegan un papel clave en la supervisión de procesos industriales, permitiendo al operador visualizar en tiempo real lo que ocurre en planta, modificar parámetros y detectar posibles errores de forma rápida.

GRAFCET

El modelo GRAFCET (Graphe Fonctionnel de Commande Étape Transition) es un método gráfico que se utiliza en la automatización industrial para representar y controlar procesos secuenciales. Creado en 1977 por la AFCET (Asociación Francesa para la Cibernética Económica y Técnica), su objetivo es describir el comportamiento de los sistemas de control mediante un diagrama de etapas y transiciones [infoPLC.net, 2020]. Esto no es un lenguaje de programación, sino una forma de resolver el problema de automatización secuencial previo a su programación en el PLC. A continuación, se describen los distintos elementos que conforman un GRAFCET:

1. **Etapas:** Se representan como cuadros numerados en el diagrama. Cada etapa indica un estado específico del sistema y las acciones que deben llevarse a cabo cuando esa etapa está activa. La etapa inicial se representa con un doble cuadrado.
2. **Transiciones:** Son las condiciones que deben cumplirse para que el sistema pase de una etapa a otra. Estas condiciones se representan por líneas que cruzan de manera perpendicular las etapas. Las transiciones se activan cuando se cumple una condición lógica, como el final de un proceso o la llegada de una señal.
3. **Uniones:** Representan las conexiones entre varias etapas y permiten que se ejecuten acciones simultáneas en diferentes partes del sistema. Las uniones facilitan la ejecución de procesos en paralelo.
4. **Acciones:** Son las operaciones que se realizan cuando una etapa está activa. Estas acciones están directamente vinculadas a la etapa correspondiente.

Este modelo resulta muy útil en procesos industriales donde las operaciones siguen una secuencia lógica y estructurada. Se utiliza comúnmente en la programación de PLCs (Controladores Lógicos Programables), ya que permite controlar sistemas paso a paso y asegura que las acciones se realicen de manera secuencial [infoPLC.net, 2020].

Una vez creado el Grafcet, para poder introducir la lógica pensada en el PLC, hay que traducir la información al lenguaje ladder, que es el cual entiende el PLC. Para ello se deben asignar direcciones de memoria en el PLC a cada etapa, entradas, salidas y demás elementos como contadores o temporizadores. Una vez traducido el Grafcet al lenguaje Ladder e introducido en el PLC ya se puede ejecutar la secuencia realizada del sistema.

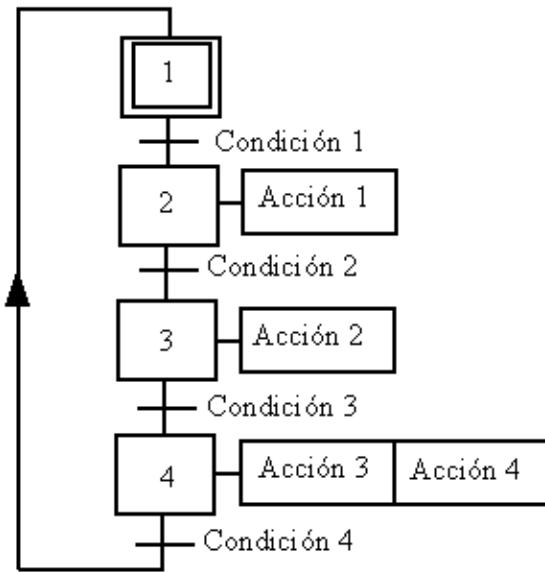


Figura 1.10: Ejemplo básico de GRAFCET.

Guia GEMMA

La Guía GEMMA (Guía para la Elaboración de los Modelos de los Modos de Marcha y Parada de una Automatización) es una metodología utilizada en el ámbito de la automatización industrial para representar de forma clara y estructurada los diferentes modos de funcionamiento de una máquina o sistema [José A. Rodríguez Mondéjar, 2022]. La guía GEMMA está compuesta por bloques que representan cada uno de estos modos y sus posibles transiciones, lo que proporciona una visión global y ordenada del comportamiento del sistema [José A. Rodríguez Mondéjar, 2022].

El núcleo de la guía se basa en tres grandes categorías: funcionamiento, parada o puesta en marcha, y defecto. En cada categoría se pueden identificar varios subestados como:

- **Funcionamiento:** La producción en curso o marcha de cierre [José A. Rodríguez Mondéjar, 2022].
- **Parada o puesta en marcha:** La parada al estado inicial o de final de ciclo [José A. Rodríguez Mondéjar, 2022].
- **Defecto:** La parada de emergencia [José A. Rodríguez Mondéjar, 2022].

Además de su valor como herramienta de planificación, GEMMA se integra fácilmente con otras metodologías como el GRAFCET, permitiendo diseñar

automatismos más seguros y eficientes. Al normalizar los distintos modos de operación y facilitar la interpretación de los estados de una automatización, la Guía GEMMA se ha convertido en un recurso esencial para la automatización de procesos.

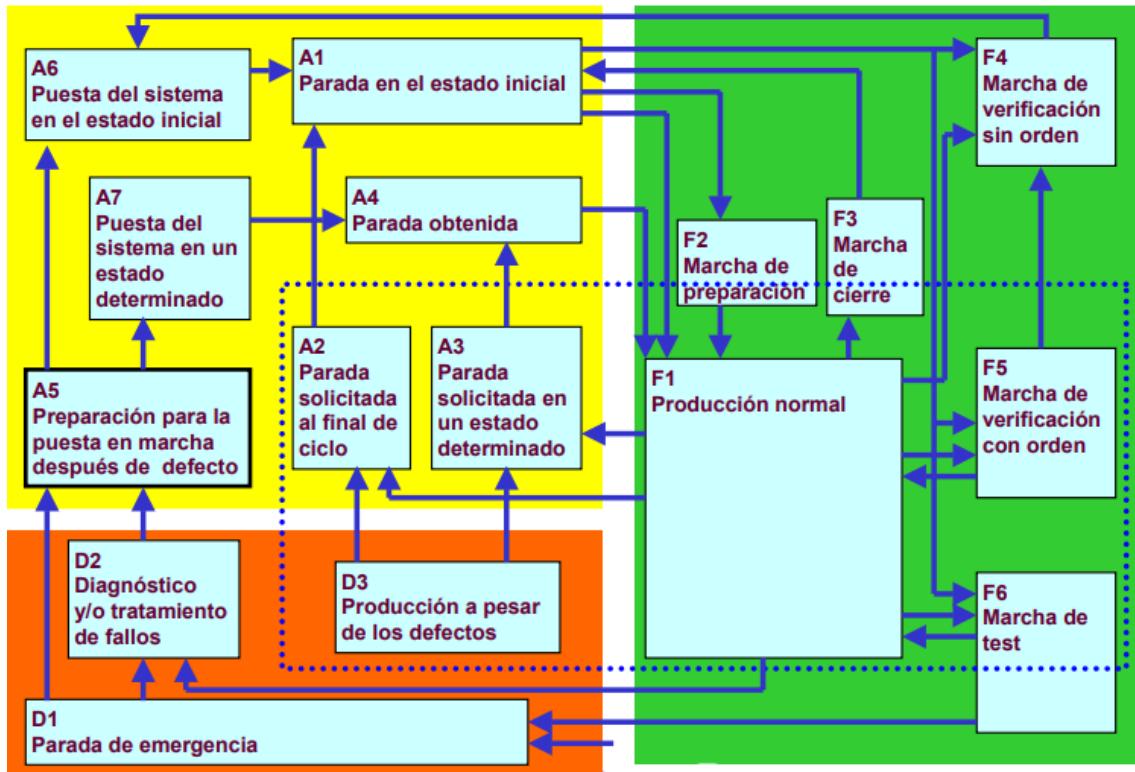


Figura 1.11: Ejemplo de guía gemma complejo. [José A. Rodríguez Mondéjar, 2022]

Sistemas SCADA

Un sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) es una herramienta clave en la automatización industrial, diseñada para supervisar y controlar procesos a distancia mediante la recopilación y análisis de datos en tiempo real [Autexopen, 2022]. Estos sistemas permiten monitorear variables críticas como temperatura, presión o caudal, facilitando una operación eficiente y segura de plantas industriales, líneas de producción, redes eléctricas o infraestructuras inteligentes [Autexopen, 2022].

Los sistemas SCADA recopilan información a través de sensores y dispositivos conectados a una red de comunicaciones, ya sea cableada o inalámbrica. Esta información se procesa en un software especializado que permite visualizar los datos, generar alarmas ante anomalías y controlar equipos de forma remota [Autexopen, 2022]. Entre sus funciones principales se incluyen la monitorización en tiempo real, análisis de datos, generación de alertas y control de dispositivos como válvulas o motores [Autexopen, 2022].

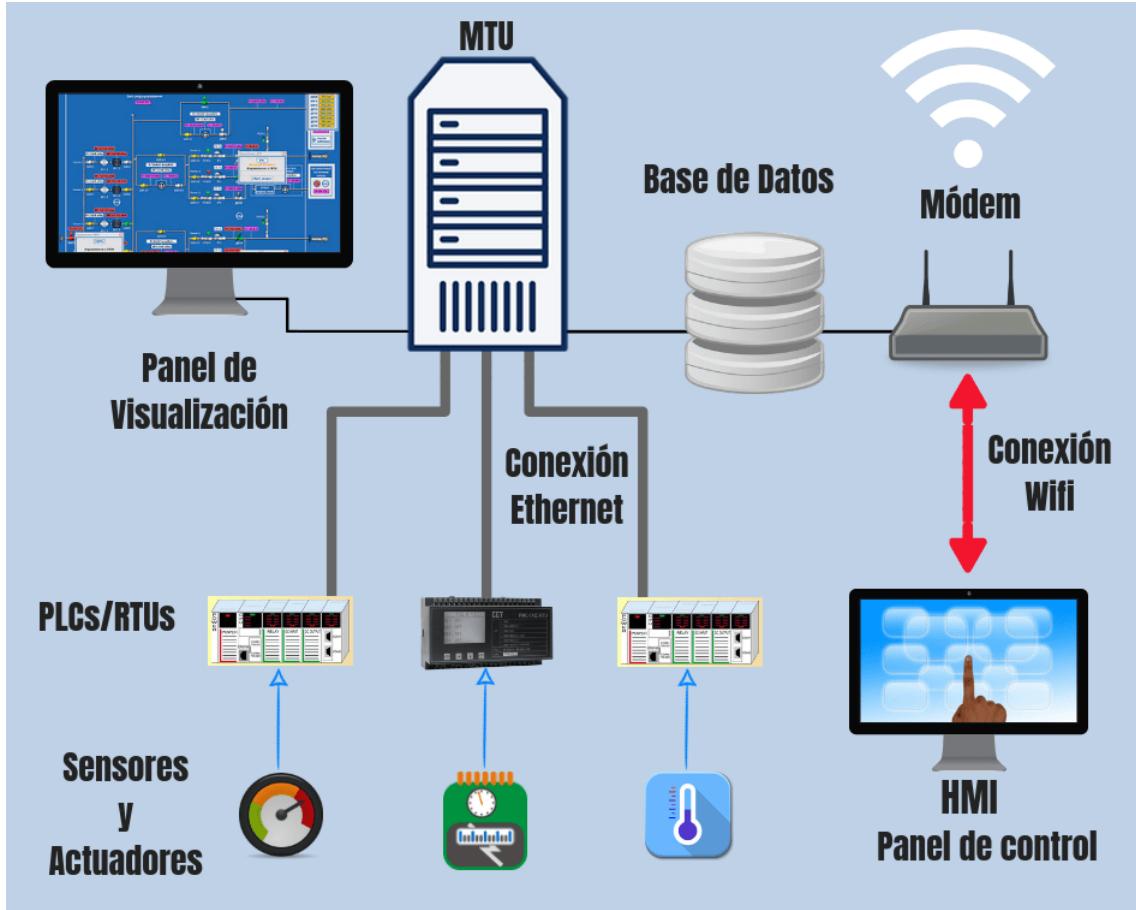


Figura 1.12: Ejemplo de un diagrama básico con sistema SCADA. [aula21, 2023]

Existen diferentes tipos de sistemas SCADA según su arquitectura: centralizados, donde todos los componentes están en una misma ubicación; distribuidos, con componentes separados conectados por una red; y híbridos, que combinan características de ambos [Autexopen, 2022]. Implementar un sistema SCADA adecuado puede mejorar significativamente la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta ante incidencias en entornos industriales.

1.4. Motivación del trabajo

La automatización industrial representa una opción laboral muy atractiva, con la transformación digital impulsada por la Industria 4.0 y el auge de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), la robótica o la inteligencia artificial, la demanda de profesionales cualificados en este ámbito no ha dejado de crecer. Sectores como la automoción, la alimentación o la logística están apostando cada vez más por la automatización para mantenerse competitivos en un mercado globalizado.

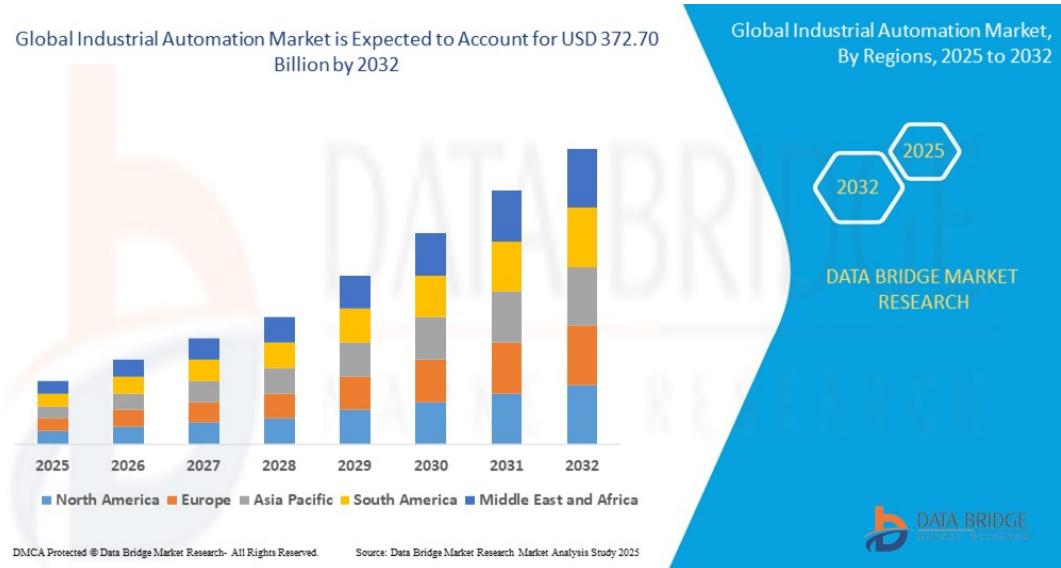


Figura 1.13: Tendencias del mercado global de automatización industrial.
[Data Bridge Market Research, 2025]

Como se observa en la figura 1.13, se preveé que cada año se invierta más dinero en la automatización industrial, por lo que este campo tiene un gran futuro. La producción industrial en masa seguirá siendo clave para satisfacer la demanda del mercado, impulsada por el crecimiento demográfico y el alto nivel de consumo. Por otro lado, el desarrollo continuo de nuevas tecnologías y robots hace que el sector esté en constante evolución, tal y como viene ocurriendo desde sus orígenes en la década de 1940.

La creciente escasez de perfiles especializados en el ámbito de la automatización y la robótica incrementa notablemente las oportunidades laborales para quienes cuentan con formación en estas áreas. La familiaridad con simuladores durante la etapa académica puede representar un valor añadido en los procesos de selección, al proporcionar una ventaja comparativa frente a candidatos sin experiencia práctica con sistemas físicos. A ello se suma la existencia de salarios de entrada competitivos, que tienden a incrementarse con la experiencia y que, en general, permiten acceder a una buena calidad de vida.

Este trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una aplicación basada en el uso de dos simuladores didácticos, concebida como una herramienta de apoyo para facilitar el aprendizaje de contenidos relacionados con la robótica industrial y la automatización. La utilización de este tipo de recursos permite fomentar un aprendizaje más interactivo y dinámico, lo cual contribuye a una mayor motivación del alumnado y a una mejor asimilación de los conceptos teóricos. Asimismo, la combinación de entornos virtuales

con prácticas reales constituye una estrategia eficaz para reforzar la formación técnica y preparar al estudiante para los desafíos propios del ámbito profesional.

A lo largo de la formación académica de los ingenieros, se adquieren conocimientos en diferentes disciplinas, tanto desde el punto de vista teórico como práctico. Una característica común en numerosas asignaturas es la utilización de simuladores, los cuales permiten aplicar los conocimientos adquiridos en entornos virtuales controlados. Estos entornos ofrecen múltiples ventajas, entre las que se incluyen la posibilidad de programar sin riesgo de dañar un robot físico, la personalización del entorno de trabajo en función de la aplicación deseada, y la experimentación con distintas configuraciones de forma sencilla y sin incurrir en costes adicionales.

Aun así, trabajar solo con simuladores no es lo mismo que hacerlo con sistemas reales. La experiencia práctica que se obtiene al enfrentarse a un entorno físico es mucho más rica y completa. En la realidad, hay que lidiar con errores de sensores, fallos en los actuadores, problemas mecánicos o situaciones imprevistas que obligan a pensar y reaccionar. Estas experiencias ayudan a desarrollar habilidades muy valiosas, como la capacidad de resolver problemas, tomar decisiones rápidas y adaptarse a los cambios, cosas que un simulador, por muy avanzado que sea, no siempre puede ofrecer.

Capítulo 2

Objetivos

La automatización bien aplicada no es una amenaza, sino una oportunidad para rediseñar el trabajo, mejorar la productividad y humanizar la industria

Peter F. Drucker, *Management: Tasks, Responsibilities, Practices*

Tras haber contextualizado en el capítulo anterior los fundamentos de la automatización industrial y su relación con la robótica industrial, en esta sección se abordará el problema específico que se pretende resolver con este Trabajo Fin de Grado. Se definirá con precisión el objetivo principal del proyecto, centrado en la automatización de una línea de producción didáctica, y se establecerán las bases sobre las que se desarrollará la solución propuesta. Esta descripción permitirá entender el enfoque adoptado y servirá como punto de partida para detallar los requisitos, las competencias aplicadas y la metodología empleada en el desarrollo del sistema.

2.1. Descripción del problema

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es automatizar una línea de producción robotizada utilizando estaciones didácticas de Festo, incorporando un robot colaborativo (UR5e) y estableciendo un sistema de comunicaciones eficiente entre los distintos elementos que componen la celda. Se pretende lograr una integración realista y funcional que sirva tanto como entorno de pruebas para prácticas docentes como demostrador de capacidades en automatización industrial y robótica colaborativa.

Este desarrollo se centra en crear una interacción fluida entre los diferentes componentes del sistema (PLCs, HMIs y cobot), garantizando una comunicación segura, así como un control intuitivo y robusto de todo el proceso productivo.

2.2. Requisitos

Durante el desarrollo del proyecto, se han definido y alcanzado los siguientes requisitos técnicos y funcionales:

- Automatización del funcionamiento de las estaciones didácticas (distribución y unión) mediante programación en TIA Portal.
- Diseño y configuración de una interfaz HMI para el control del sistema y visualización de estados.
- Integración del robot colaborativo UR5e en el flujo de trabajo automatizado, realizando tareas de paletizado.
- Creación de una red de comunicaciones PROFINET entre PLCs, HMI y cobot, asegurando el intercambio de datos en tiempo real.
- Implementación de lógica de control secuencial utilizando Grafcet y guía GEMMA como base metodológica.
- Montaje, conexionado y validación del sistema completo en condiciones reales de funcionamiento.

2.3. Competencias

Las competencias desarrolladas y aplicadas en este proyecto están contenidas dentro del grado en Ingeniería Robótica Software, y en particular con las asignaturas de robótica industrial, redes de ordenadores, y la asignatura propia de trabajo de fin de grado. A continuación se enumeran las competencias adquiridas:

- **CB2, CB4, CB5, SE28:** Se han aplicado los conocimientos adquiridos de forma profesional, resolviendo problemas y elaborando argumentos dentro del ámbito de la robótica. Se ha demostrado capacidad para comunicar información, ideas y soluciones a públicos especializados y no especializados, y se ha fomentado la autonomía en el aprendizaje. Todo ello ha culminado en la realización y defensa de un proyecto que integra y sintetiza las competencias del grado.
- **CE10:** Capacidad de diseñar y programar sistemas en red aplicando conceptos de arquitectura de red, protocolos e interfaces de comunicaciones.

- **CE22:** Capacidad de diseñar, planificar y programar sistemas de manipulación robóticos.
- **CE12:** Capacidad de diseñar robots y sistemas inteligentes atendiendo a los elementos de sensorización y actuación más adecuados dependiendo de la aplicación, los requerimientos del sistema y las condiciones del entorno.

2.4. Metodología

El desarrollo del presente trabajo se ha basado en una metodología estructurada y secuencial, orientada a la automatización industrial y fundamentada en los estándares Grafcet y Guía GEMMA, los cuales ya fueron explicados en el capítulo 1.

Para definir el comportamiento lógico del sistema automatizado, se utilizó el modelo GRAFCET, que permitió representar de forma clara y estructurada la secuencia de funcionamiento de cada estación, identificando las diferentes etapas del proceso, las transiciones entre ellas basadas en condiciones lógicas, y las acciones asociadas a cada estado. Después se procedió a su traducción al lenguaje Ladder para su implementación en los PLCs. De forma complementaria, se empleó la Guía GEMMA para estructurar los distintos modos de operación del sistema, incluyendo funcionamiento normal, parada, arranque y gestión de fallos, lo que permitió definir una lógica de control más robusta y segura, especialmente ante condiciones anómalas o situaciones de emergencia.

Respecto a la programación del cobot UR5e, se empleó una metodología centrada en la programación mediante la interfaz gráfica PolyScope y ayudándose de la herramienta de paletizado de esta. Una vez desarrollada la lógica, se trasladó directamente al entorno físico y se integró con las estaciones didácticas utilizando comunicación PROFINET.

2.5. Plan de trabajo

El desarrollo del proyecto comenzó con la instalación del primer PLC y la interfaz HMI, así como su correspondiente configuración en el entorno TIA Portal. A continuación, se procedió a la integración de la estación de distribución, realizando el conexionado de todas las entradas y salidas al PLC para su control. Una vez completada esta etapa, se inició la programación de la lógica de control de dicha estación en el PLC y el diseño de la interfaz gráfica del HMI, una fase que se extendió durante aproximadamente un mes hasta alcanzar un funcionamiento completo y estable.

Finalizada la primera estación, se abordó la instalación del segundo PLC y de la estación unión, los cuales se integraron en el mismo proyecto de TIA Portal y se

añadieron a la red PROFINET común, permitiendo así la comunicación entre todos los dispositivos del sistema. Del mismo modo, se conectaron las entradas y salidas de la estación de unión, y se comenzó con la programación de su lógica de control. Transcurrido otro mes de trabajo, ambas estaciones estaban totalmente automatizadas y operativas. En esta fase también se implementó la comunicación entre los dos PLCs, permitiendo así una coordinación eficiente que dio lugar a un proceso automatizado conjunto.

Finalmente, una vez completada la automatización de las estaciones, se procedió a la programación del robot colaborativo UR5e. Se desarrolló una secuencia de paletizado de piezas, manipulados mediante una pinza hidráulica capaz de apilar hasta cuatro capas. Una vez definida la secuencia de trabajo del cobot, este fue incorporado a la red PROFINET del sistema, permitiendo su comunicación directa con los PLCs. Se implementó el intercambio de señales de control entre el UR5e y los controladores, integrando al robot dentro del mismo ciclo de operación automatizada. Esta última fase requirió aproximadamente un mes adicional.

En cuanto a la redacción de la memoria, se ha llevado un trabajo progresivo en el que se establecían pequeños objetivos para avanzar de forma continuada y detallada. Gracias a este método de trabajo, se logró mantener una organización constante, facilitar la revisión de contenidos y asegurar la coherencia global del documento final.

También se han realizado tutorías presenciales con el tutor cada martes y jueves durante el primer mes del trabajo debido a que eran necesarias para configurar y empezar el proyecto correctamente. Una vez que ya se habían entendido todos los conceptos y objetivos necesarios para trabajar de forma autónoma, únicamente se tuvo alguna tutoría online para aclarar dudas de funcionamiento y orientación del trabajo.

Capítulo 3

Plataforma de desarrollo

Cualquier cosa que pueda ser automatizada, será automatizada..

Robert Cannon

En este capítulo se detallan los recursos hardware y software empleados para llevar a cabo el desarrollo de la aplicación. A nivel hardware, se han utilizado dos estaciones didácticas de automatización industrial del fabricante FESTO, cada una equipada con un PLC. Además, el sistema completo incluye una interfaz HMI de SIEMENS y un brazo robótico colaborativo de la empresa Universal Robots (UR). En cuanto al software, se han utilizado distintos entornos de desarrollo específicos para cada dispositivo: el software TIA Portal para la programación de los PLCs y la configuración de la HMI, y la plataforma URSim para la simulación y control del brazo robótico. Además, se han empleado librerías propias de los fabricantes, sistemas operativos compatibles con las herramientas utilizadas y conexiones mediante protocolos estándar de comunicación industrial como Profinet. También se ha realizado el montaje completo y el conexionado de todos los elementos.

3.1. Estación distribución

La estación de distribución con cinta transportadora de Festo Didactic¹ es un módulo del sistema MPS (Modular Production System) que simula una parte de una línea de producción automatizada. Su función principal es clasificar, alinear y transportar piezas de trabajo desde un punto de alimentación hacia otras estaciones del sistema [Frank Ebel, 2020a]. Este sistema está diseñado para la formación técnica en automatización industrial, permitiendo a estudiantes aprender a manejar sensores,

¹Image retrieved from Festo.com. (N.d.). Retrieved June 4, 2025, from https://www.festo.com/es/es/p/estacion-de-distribucion-id_PROD_DID_8034566/

actuadores, sistemas neumáticos, cintas transportadoras y PLCs.

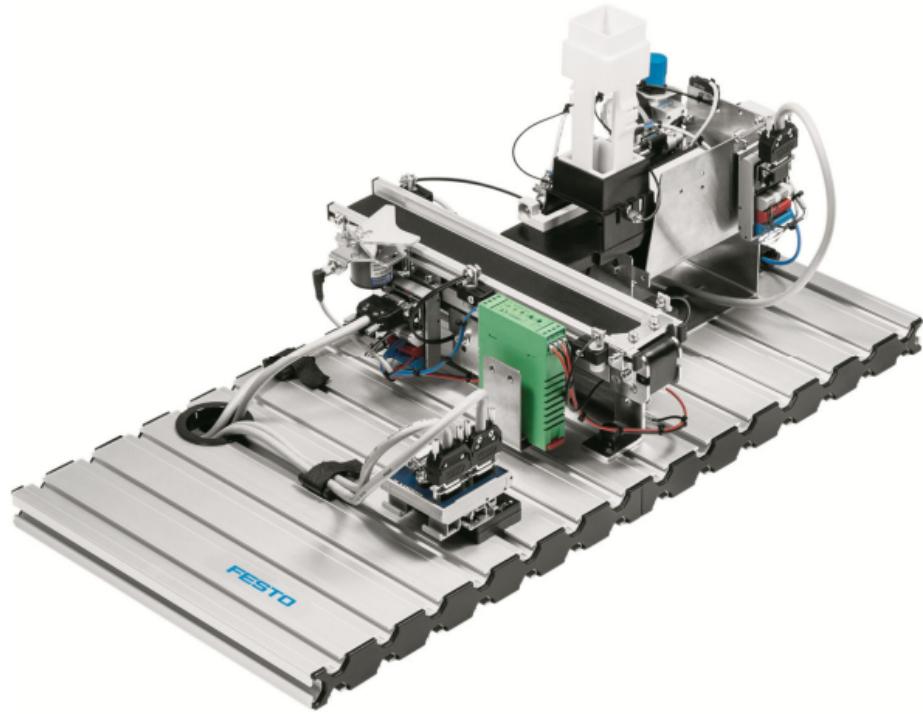


Figura 3.1: Estación distribución. [Frank Ebel, 2020a]

En la tabla 3.2 se detallan las características generales del sistema:

Parámetros	Valor
Presión de trabajo	600 kPa (6 bar)
Tensión de funcionamiento	24 V DC, 4,5 A
Entradas/salidas digitales	máx. 24 V DC Entradas: 6 Salidas: 4 máx. 2 A por salida máx. 4 A en total
Conector eléctrico	Conector IEEE-488 de 24 polos (SysLink)
Conexión neumática	Tubo flexible de material sintético de diámetro exterior de 6 mm
Consumo de aire comprimido con 600 kPa (ciclo continuo)	3 l/min
Dimensiones	350 mm x 700 mm x 200 mm
Reservado el derecho de modificación	

Figura 3.2: Características generales de la etación distribución. [Frank Ebel, 2020a]

Las piezas utilizadas en las estaciones MPS de Festo Didactic están divididas en tres colores: rosa, negro y metálico. Estas piezas representan distintos tipos de materiales o componentes, lo que permite que los sensores (como óptico o inductivo) las distingan fácilmente facilitando su clasificación, inspección o tratamiento diferenciado por el sistema automatizado. Cada pieza mantiene dimensiones normalizadas para un manejo preciso y repetible y vienen equipadas con una tapa la cual puede ser colocada en estas para ofrecer mayor libertad al crear el proceso automático

La estación distribución está formada por los siguientes componentes:

- **Almacén de piezas:** Sistema de alimentación que permite introducir piezas de trabajo de manera ordenada a mitad de la cinta transportadora. Funciona como un cargador vertical donde las piezas se apilan y se liberan una a una mediante un actuador neumático (máximo 7 piezas) [Frank Ebel, 2020a]. Está diseñado para asegurar una alimentación controlada y repetible en los procesos de automatización [Frank Ebel, 2020a].
- **Cinta transportadora:** Encargada de desplazar las piezas entre las estaciones. Puede moverse en ambas direcciones.
- **Separador:** Actuador neumático situada al inicio de la cinta cuya función es controlar el flujo de piezas en la cinta transportadora. Si se activa, retiene las piezas provenientes del inicio de la cinta y da paso a las almacenadas en el almacén de piezas [Frank Ebel, 2020a].
- **Sensor para la distinción de piezas:** El sistema viene equipado con un módulo extra situado a la mitad de la cinta el cual es capaz de distinguir el color y material de la pieza. Este sensor distingue entre tres tipos de piezas dependiendo de cuantos bits se activen. Cada bit que se activa es la salida de un sensor, el primero es un sensor óptico que detecta presencia y se activa siempre (pieza negra), el segundo es óptico también y se enciende si la pieza rebota luz de color (pieza rosa) y el tercero es un sensor inductivo el cual se activa si la pieza es metálica. [Frank Ebel, 2020a].
- **Sensores láser:** La estación posee sensores ópticos y de proximidad que detectan la presencia de las piezas, funcionan mediante un láser el cual le proporciona datos al PLC.

- **Estructura mecánica modular:** Bastidor de perfiles de aluminio que soporta todos los componentes y permite su integración con otras estaciones del sistema MPS [Frank Ebel, 2020a].

A continuación, se muestra una imagen en la que se observan todos los componentes:

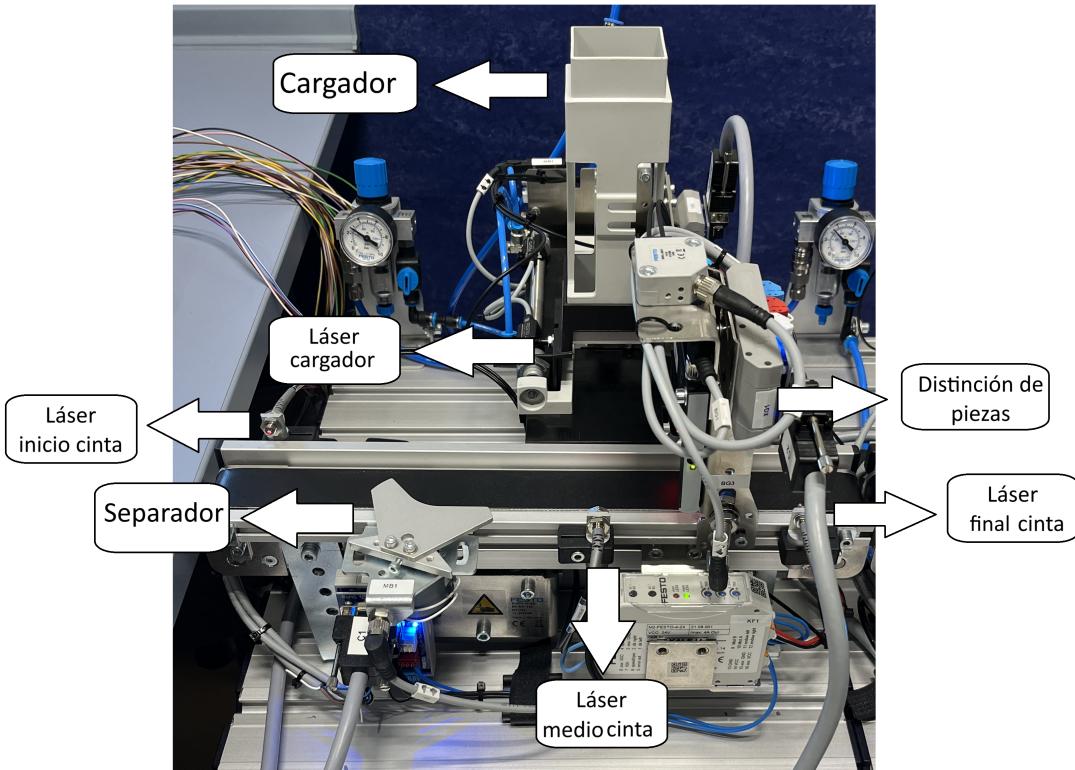


Figura 3.3: Componentes de la estación distribución.

3.2. Estación unión

La estación de unión de Festo Didactic² simula un proceso industrial en el que se unen dos piezas mediante un actuador neumático equipado con una ventosa (Pick&Place) [Frank Ebel, 2020b]. El objetivo de esta estación es colocarle o retirarle las tapas a las piezas que estén correctamente orientadas y así terminar la secuencia. La estación está compuesta por un brazo neumático, dos cintas para mover las piezas y tapas, sensores que detectan su presencia y adicionalmente un sensor cuya función es detectar la orientación de las piezas [Frank Ebel, 2020b]. Esta estación permite realizar prácticas de automatización como control secuencial, posicionamiento y verificación del montaje. Es ideal para formación técnica en tareas típicas de

²Image retrieved Festo.com. (N.d.). Retrieved June 4, 2025, from https://www.festo.com/es/es/p/estacion-de-union-id_PROD_DID_8063910/

ensamblaje automatizadas. Se adjuntan las características generales de la estación como se puede ver en el gráfico 3.5:

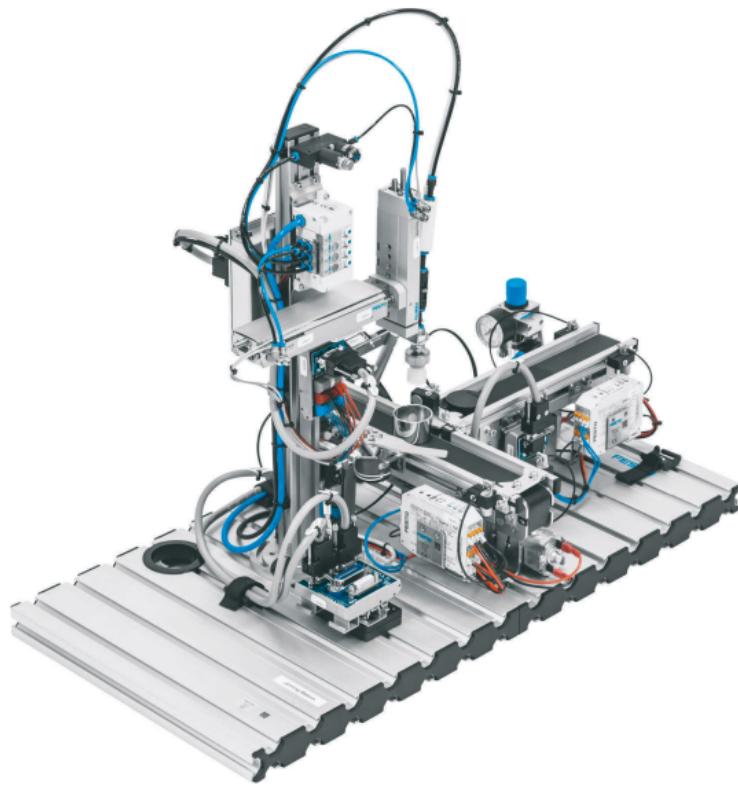


Figura 3.4: Estación unión. [Frank Ebel, 2020b]

Parámetro	Valor
Presión de funcionamiento	600 kPa (6 bar)
Tensión de alimentación	24 V CC 4 A, ≤ 100 W potencia de salida, PELV fuente de alimentación limitada de energía (LPS)
Entradas/salidas digitales Entradas: 9 (10) Salidas: 10	máx. 24 V DC máx. 2 A por salida máx. 4 A en total
Entradas/salidas analógicas Entradas: 1 (0) Salidas: 0	0...10 V DC 0 ± 10 V DC
Conector eléctrico	Conector IEEE 488 de 24 polos (SysLink) Conector D-Sub de 15 polos
Conexión neumática	Tubo flexible de material sintético de diámetro exterior de 6 mm
Consumo de aire comprimido con 600 kPa (ciclo continuo)	3 l/min
Dimensiones	350 mm x 700 mm x 450 mm
Reservado el derecho de modificación	

Figura 3.5: Características generales de la estación unión. [Frank Ebel, 2020b]

La estación unión está compuesta principalmente por tres módulos:

- El Módulo de **Cinta Transportadora 1** transporta, separa y acumula piezas de hasta 40 mm de diámetro. Está impulsado por un motor de corriente continua con control de velocidad y dirección, y utiliza sensores ópticos para detectar la presencia de piezas al inicio, medio y al final de la cinta [Frank Ebel, 2020b]. Un electroimán que actúa como retenedor permite detener y liberar piezas individualmente a la altura del brazo, y un sensor difuso con salida digital y analógica identifica la orientación de las piezas el cual se ayuda de un retenedor para poder hacerlo correctamente sin que se mueva la pieza [Frank Ebel, 2020b].
- El Módulo de **Cinta Transportadora 2** tiene funciones similares, pero está diseñado para manejar tanto cuerpos de piezas como tapas. También utiliza un motor de corriente continua y sensores ópticos para controlar el flujo de materiales [Frank Ebel, 2020b].
- El Módulo **Pick&Place** es un manipulador de dos ejes que utiliza carros deslizantes de precisión y sensores de proximidad para detectar las posiciones finales. La fuerza del eje vertical puede ajustarse mediante un regulador de presión con una ventosa de fuelle y cuenta con un filtro de vacío y un presostato para asegurar una sujeción fiable [Frank Ebel, 2020b].

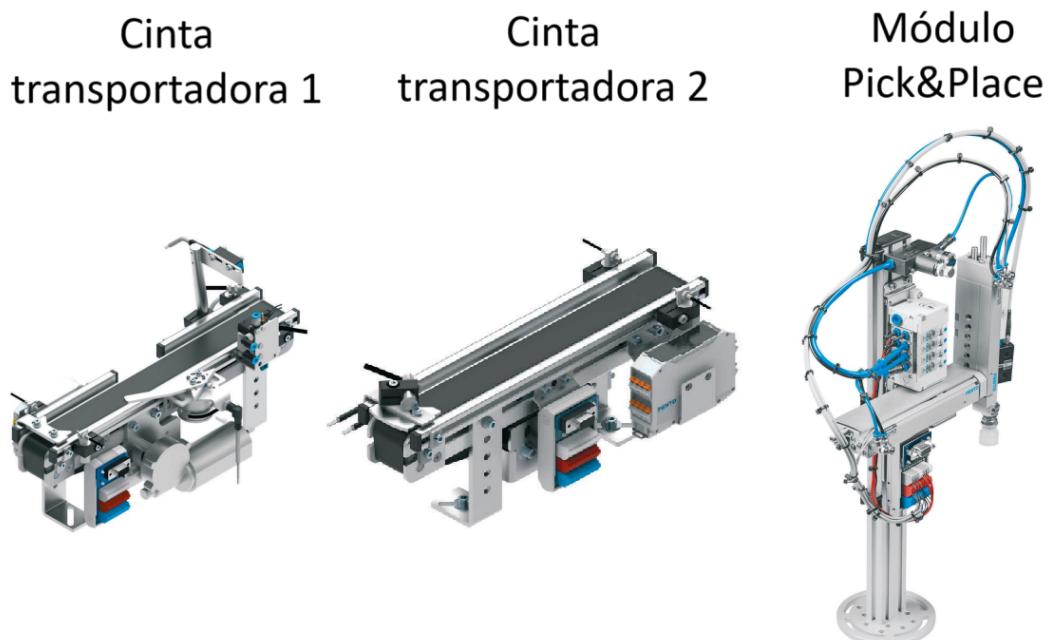


Figura 3.6: Componentes de la estación unión. [Frank Ebel, 2020b]

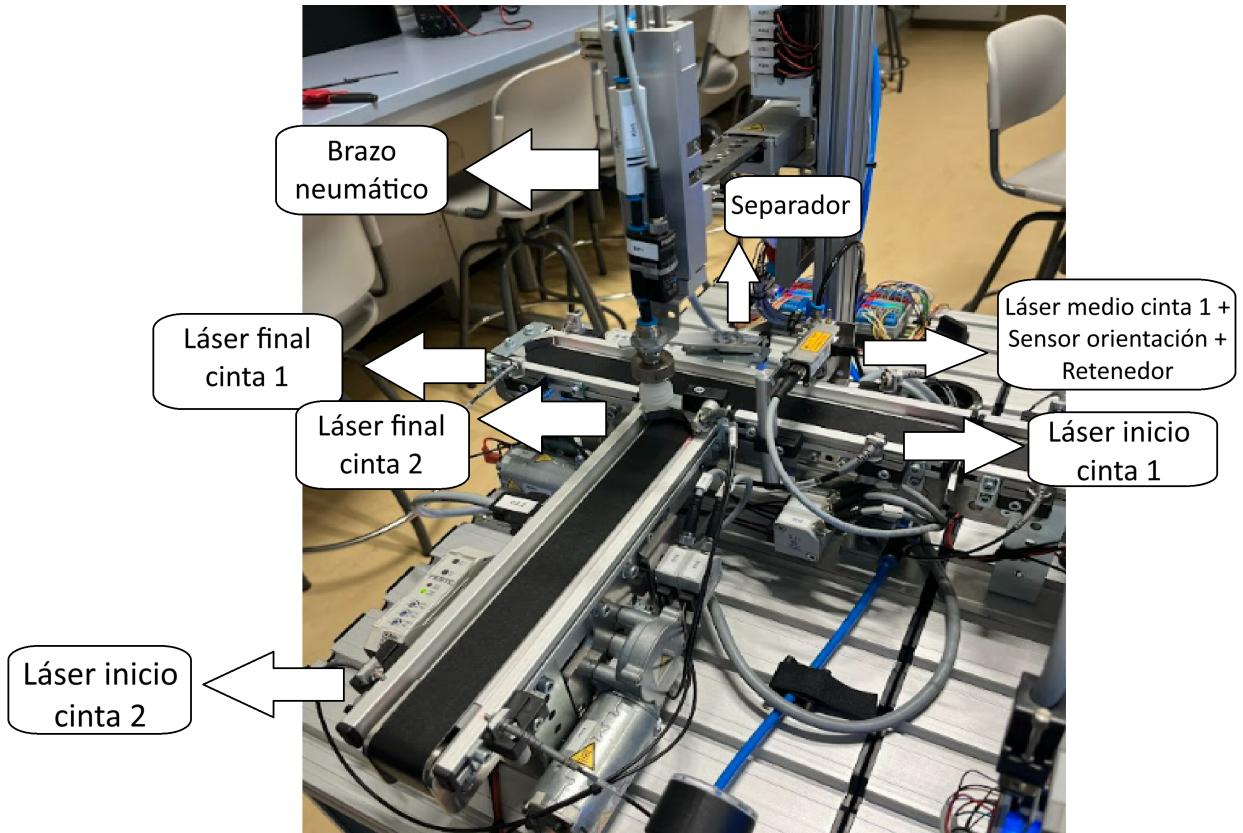


Figura 3.7: Componentes de la estación unión.

3.3. PLCs Siemens 1200s

Para la elaboración de este trabajo se ha utilizado el PLC Siemens S7-1200, concretamente el modelo **6ES7 215-1BG40-0XB0**. Este modelo forma parte de la familia de controladores compactos de Siemens, ampliamente utilizados en aplicaciones de automatización industrial. El PLC corresponde a la CPU 1215C con alimentación AC/DC y salidas a relé, lo que le otorga una gran versatilidad para controlar y supervisar sistemas de pequeña y mediana escala [Siemens, 2025a].

Entre sus características más destacadas se encuentran sus 14 entradas digitales de 24 V DC, 10 salidas digitales tipo relé de 2 A, 2 entradas analógicas (0–10 V DC) y 2 salidas analógicas (0–20 mA DC) [Siemens, 2025a]. Esta combinación de entradas y salidas permite conectar una gran variedad de sensores y actuadores directamente al PLC sin necesidad de módulos adicionales, y además, su módulo de E/S es compatible eléctricamente con las E/S de las estaciones.

En términos de comunicación, esta CPU incorpora dos puertos PROFINET con función de switch integrado, lo que facilita su integración en redes industriales y la comunicación con dispositivos HMI, otros PLCs o sistemas SCADA [Siemens, 2025a].

Además, es compatible con protocolos de comunicación abiertos como TCP/IP, ISO-on-TCP, UDP y MODBUS, y permite el uso de servidor OPC UA mediante licencia, una característica clave para entornos de Industria 4.0 [Siemens, 2025a].



Figura 3.8: PLC Siemens 1215 AC/DC/RLY. [Siemens, 2025a]

Su programación se realiza a través del software **STEP 7 (TIA Portal)** versión V20 o superior, ofreciendo compatibilidad con lenguajes como KOP (diagrama de contactos), FUP (diagrama de funciones) y SCL (lenguaje estructurado) [Siemens, 2025a]. También dispone de funciones tecnológicas avanzadas como control PID, contadores de alta velocidad (hasta 100 kHz), y posicionamiento, lo cual amplía sus capacidades para aplicaciones más exigentes [Siemens, 2025a].

En cuanto a su hardware, presenta una memoria de trabajo de 200 kB y una memoria de carga de 4 MB, además de la posibilidad de insertar una tarjeta SIMATIC Memory Card para ampliar almacenamiento o realizar copias de seguridad [Siemens, 2025a]. El diseño compacto ($130 \times 100 \times 75$ mm) y el grado de protección IP20 lo hacen ideal para entornos industriales controlados.

3.4. HMI

El HMI utilizado para este proyecto es el **SIMATIC HMI KTP700 Basic PN**. Este es un panel HMI de la segunda generación de Basic Panels de Siemens, diseñado para ofrecer una interfaz hombre-máquina eficiente, compacta y rentable en tareas de visualización y operación dentro de entornos industriales. Este modelo cuenta con una pantalla táctil de 7 pulgadas, con una resolución de 800×480 píxeles (WVGA) y

una profundidad de color de 64.000 colores, lo que proporciona una visualización clara, detallada y moderna de los procesos industriales [Siemens, 2024].

Una de sus principales ventajas es la combinación de pantalla táctil y teclas de función (8 teclas de función programables), lo cual permite al operador interactuar de forma rápida e intuitiva con el sistema, incluso con guantes o en entornos con condiciones difíciles. El panel también está equipado con una interfaz PROFINET integrada, lo que lo hace ideal para la comunicación directa con controladores SIMATIC S7-1200 y otros dispositivos de automatización compatibles [Siemens, 2024].

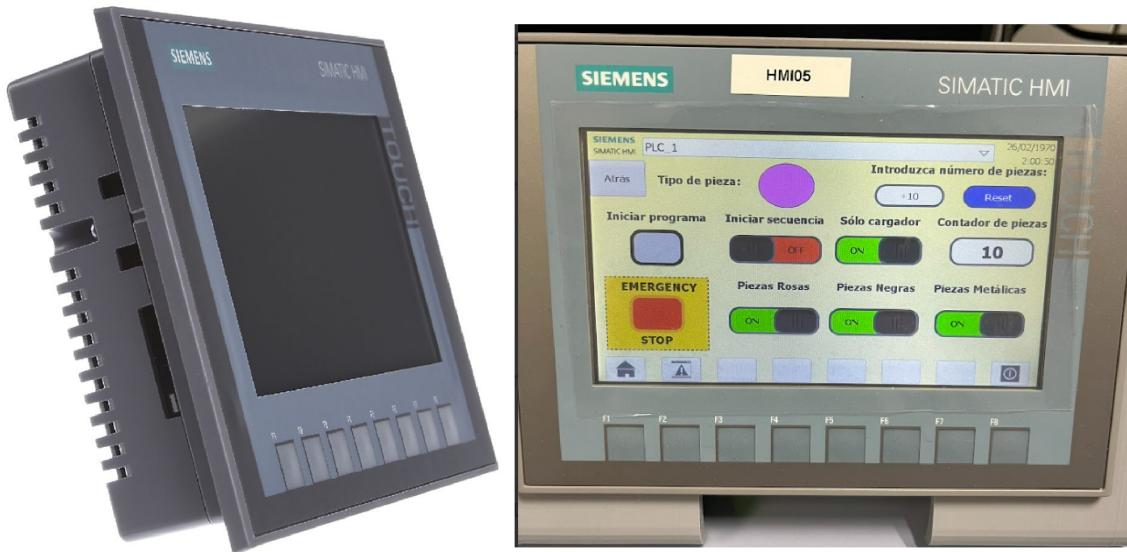


Figura 3.9: SIMATIC HMI KTP700 Basic PN.

El KTP700 Basic PN dispone de una interfaz USB que permite conectar dispositivos periféricos como ratones, teclados o memorias USB para la transferencia de recetas, actualizaciones de firmware o copias de seguridad de datos de usuario [Siemens, 2024]. Además, este HMI admite la configuración y programación a través del entorno de desarrollo TIA Portal (Totally Integrated Automation) con WinCC Basic, lo que asegura una integración coherente y eficiente con el resto de componentes del sistema de automatización [Siemens, 2024].

En cuanto a su diseño físico, el dispositivo tiene unas dimensiones compactas de $214 \times 158 \times 39$ mm y está pensado para montaje en panel [Siemens, 2024]. Cuenta con una protección frontal IP65, lo que le confiere resistencia frente a polvo y chorros de agua, haciéndolo apto para condiciones industriales exigentes [Siemens, 2024]. También incluye funciones como alarmas, tendencias, gestión de recetas y multilenguaje, lo que lo convierte en una solución versátil para aplicaciones industriales básicas.

3.5. TIA Portal

TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) es una plataforma de ingeniería desarrollada por Siemens que integra en un único entorno todas las herramientas necesarias para la configuración, programación, supervisión y mantenimiento de sistemas de automatización industrial. Fue diseñado con el objetivo de unificar y simplificar la ingeniería de proyectos, mejorando la eficiencia en el desarrollo, la puesta en marcha y la operación de sistemas de control.

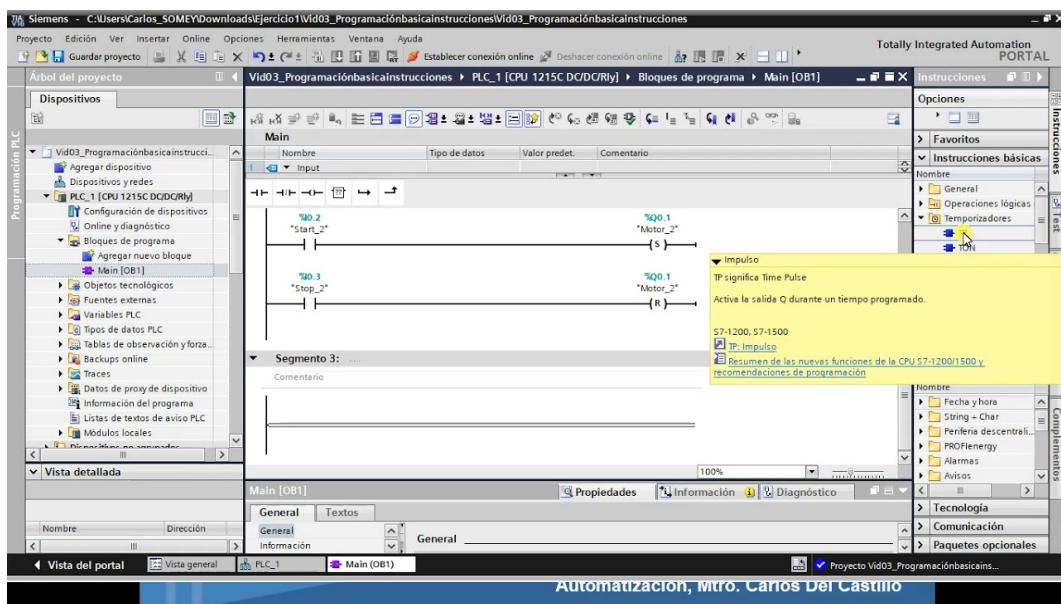


Figura 3.10: Captura de pantalla de la aplicación TIA Portal.

Esta plataforma permite trabajar de forma integrada con controladores PLC, interfaces HMI, sistemas SCADA, variadores de velocidad, dispositivos de seguridad y redes industriales, todo desde una única interfaz [Siemens, 2019]. El entorno TIA Portal combina software como STEP 7 (para programación de PLC), WinCC (para interfaces HMI y SCADA), Startdrive (para variadores SINAMICS), Safety Advanced (para funciones de seguridad) y Energy Suite (para gestión energética) [Siemens, 2019].

En este proyecto se ha utilizado la versión **TIA Portal V16**, la cual permite dividir los proyectos en unidades de software independientes, permitiendo una programación modular con interfaces definidas [Siemens, 2019]. Esto facilita la colaboración entre varios ingenieros, mejora la reutilización de código y simplifica la gestión de proyectos complejos.

En cuanto a la programación de PLCs, TIA Portal V16 ofrece soporte completo para los controladores SIMATIC S7-1200, S7-1500, S7-300 y S7-400, así como para soluciones

de seguridad integradas mediante STEP 7 Safety [Siemens, 2019]. La integración con WinCC permite el diseño y configuración de interfaces HMI.

La plataforma también incluye herramientas de simulación como PLCSIM y HMISIM, que permiten probar y validar la lógica de control y las interfaces HMI sin necesidad de hardware físico [Siemens, 2019]. Esto reduce los tiempos de desarrollo y facilita la detección temprana de errores. Además, la compatibilidad con estándares abiertos y protocolos de comunicación como PROFINET, OPC UA y Modbus garantiza una integración fluida con otros sistemas y dispositivos en entornos de automatización industrial [Siemens, 2019].

3.6. Cobot UR5e

El UR5e es un brazo robótico colaborativo de seis ejes desarrollado por Universal Robots, diseñado para automatizar tareas industriales de forma segura y eficiente. Con una capacidad de carga útil de hasta 5 kg y un alcance de 850 mm, el UR5e es especialmente adecuado para aplicaciones que requieren precisión y flexibilidad, como ensamblaje, manipulación de materiales, soldadura ligera y pruebas de calidad [Robots, 2019].



Figura 3.11: Robot UR5e de Universal Robots. [Robots, 2019]

Una de las características distintivas del UR5e es su diseño colaborativo, que permite su integración en entornos donde comparte espacio con operadores humanos sin necesidad de barreras de seguridad, siempre que se realice una evaluación de riesgos adecuada [Robots, 2019]. Esto es posible gracias a sus sensores de fuerza y par integrados, que detectan contactos inesperados y detienen el movimiento del robot para evitar lesiones o daños [Robots, 2019].

El UR5e se controla mediante el software PolyScope, una interfaz intuitiva que se opera a través de un panel de enseñanza con pantalla táctil. PolyScope permite programar el robot de manera sencilla, incluso sin experiencia previa en programación, mediante la guía manual del brazo para enseñar posiciones y trayectorias [Robots, 2019]. Para usuarios avanzados, también se ofrece la posibilidad de programar utilizando el lenguaje URScript, lo que proporciona un mayor control y flexibilidad en aplicaciones complejas.

Su diseño ligero, con un peso total de aproximadamente 20,6 kg, permite montarlo en diversas orientaciones y ubicaciones, adaptándose a diferentes necesidades de producción [Robots, 2019]. Además, el UR5e es compatible con una amplia gama de accesorios y herramientas a través del ecosistema UR+, que ofrece soluciones certificadas para tareas específicas, como pinzas, cámaras y sensores adicionales [Robots, 2019].

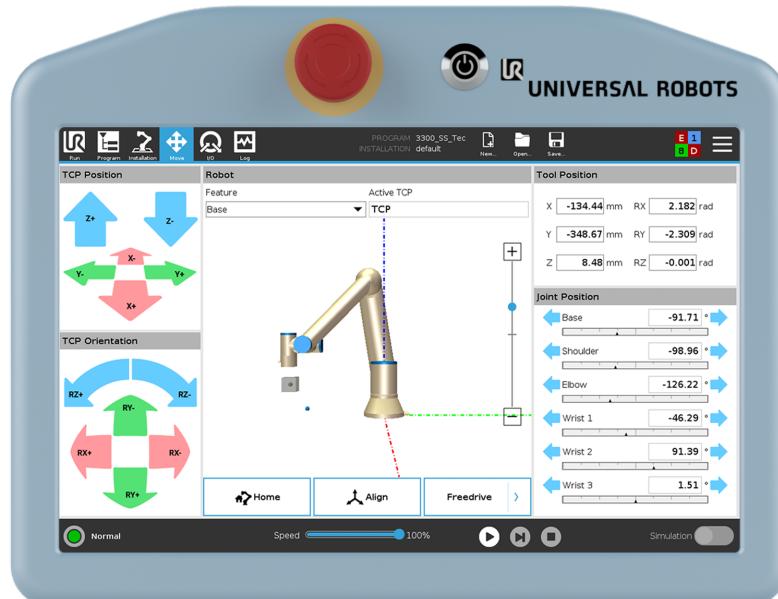


Figura 3.12: Pantalla táctil PolyScope. [Universal Robots, 2025a]

3.7. Switch ethernet industrial

En el sistema se ha utilizado el modelo 6GK5005-0GA10-1AB2 de Siemens, un switch Ethernet industrial de tipo no gestionado perteneciente a la gama SCALANCE XB005³ [Siemens, 2025b]. Este dispositivo proporciona cinco puertos RJ-45 con soporte para velocidades de 10/100/1000 Mbit/s, lo cual lo hace adecuado para redes industriales donde se requiere una comunicación eficiente y estable entre distintos equipos, como controladores, paneles HMI o dispositivos de supervisión [Siemens, 2025b].

Su diseño está orientado a aplicaciones industriales, funciona con una tensión de alimentación de 24 V DC y presenta un consumo reducido, lo cual es beneficioso en términos de eficiencia energética [Siemens, 2025b]. A pesar de no ser gestionable, incorpora indicadores LED que permiten supervisar el estado de los enlaces y la actividad de red en tiempo real [Siemens, 2025b]. Además, ofrece compatibilidad con PROFINET, siendo una solución adecuada para pequeñas topologías dentro de entornos industriales controlados [Siemens, 2025b].



Figura 3.13: Switch industrial 6GK5005-0GA10-1AB2 de Siemens [Siemens, 2025b]

³SCALANCE XB-000 unmanaged. (2025).<https://mall.industry.siemens.com/mall/es/es/Catalog/Product/6GK5005-0BA00-1AB2>

Capítulo 4

Diseño

En la industria, la precisión no es un lujo: es la esencia de la automatización.

Anónimo

En este capítulo se abarca y explica el diseño completo del sistema automatizado desarrollado. En él se describen tanto los aspectos físicos de la instalación como la lógica de control implementada, abordando la selección de componentes, la configuración de la red de comunicación, y el funcionamiento de cada estación: distribución, unión y brazo robótico colaborativo. Se explican las conexiones entre los dispositivos, incluyendo los sensores, actuadores, PLCs, la interfaz HMI y el UR, así como la implementación de los distintos modos de operación mediante la Guía GEMMA, que ha servido de base para estructurar el comportamiento del sistema. Para terminar se hará un pequeño resumen del resultado final obtenido como consecuencia del trabajo realizado.

4.1. Descripción general

El objetivo de este trabajo es lograr que el ciclo de producción comience en la estación de distribución, donde se filtra el tipo y número de piezas que se quieren producir, después pasan a la estación unión donde se le colocará una tapa encima de las piezas bien orientadas, y finalmente, el brazo UR cogerá la pieza y la colocará en un palé para su posterior almacenamiento.

En la sección 2.1 ya se presentó una visión general del objetivo del proyecto, pero en esta se profundizará en él con una descripción más detallada y específica. El sistema global está compuesto por dos PLCs, una interfaz HMI y un robot colaborativo UR5e. Una parte fundamental del trabajo es garantizar una comunicación fluida y fiable entre todos los componentes para asegurar un funcionamiento coordinado y realista. El trabajo va a ser desarrollado en TIA portal y la comunicación via PROFINET.

El objetivo final es desarrollar un ciclo de producción en el que intervengan todos los componentes mencionados, simulando una aplicación industrial realista. Para ello, el ciclo debe iniciarse en la estación de distribución, donde se introducen las piezas en el proceso productivo y se identifica el tipo de material que las compone, con el fin de determinar el tratamiento correspondiente en función de sus características. Los parámetros de distinción de piezas se establecen en el HMI por el operario, si se descarta la pieza, se acabará el ciclo y se empezará de nuevo, pero si es aceptada pasará a la estación unión continuando el proceso.

Para que la estación unión comience su proceso dentro del ciclo, es necesario que el PLC que controla la estación distribución le envíe un mensaje al segundo PLC (el que controla la estación unión) para informarle de que debe empezar. Una vez recibido el mensaje, la segunda estación inicia el proceso tomando la pieza y deteniéndola para verificar su orientación. Si la orientación es correcta, la pieza continúa su avance en el ciclo; en caso contrario, se genera un mensaje de error en el HMI y la pieza es descartada, regresando a la estación de distribución, donde se requerirá una nueva comunicación para reiniciar el proceso. Si la pieza está bien orientada continuará su camino hasta que se pare en un punto donde la tapa proveniente de otra cinta será colocada encima de la pieza con el módulo pick & place. Una vez terminado el ciclo la estación vovlerá a comunicarse con la estación unión para hacerla saber que terminó su proceso.

Una vez que el PLC de la estación unión recive el mensaje de fin de ciclo del otro PLC, el último paso es comunicarse con el UR para que termine el proceso global. El PLC asociado a la estación distribución es el encargado de mandar el mensaje vía Profinet al UR, quién iniciará una secuencia de paletizado simulando la ordenación de las piezas. Como físicamente las estaciones Festo y el UR están separadas, el proceso de paletizado del brazo robótico se realiza con bricks de leche como elemento manipulable. En el momento que el UR termine su proceso, el PLC será notificado terminando con el ciclo global y volviendo a empezar.

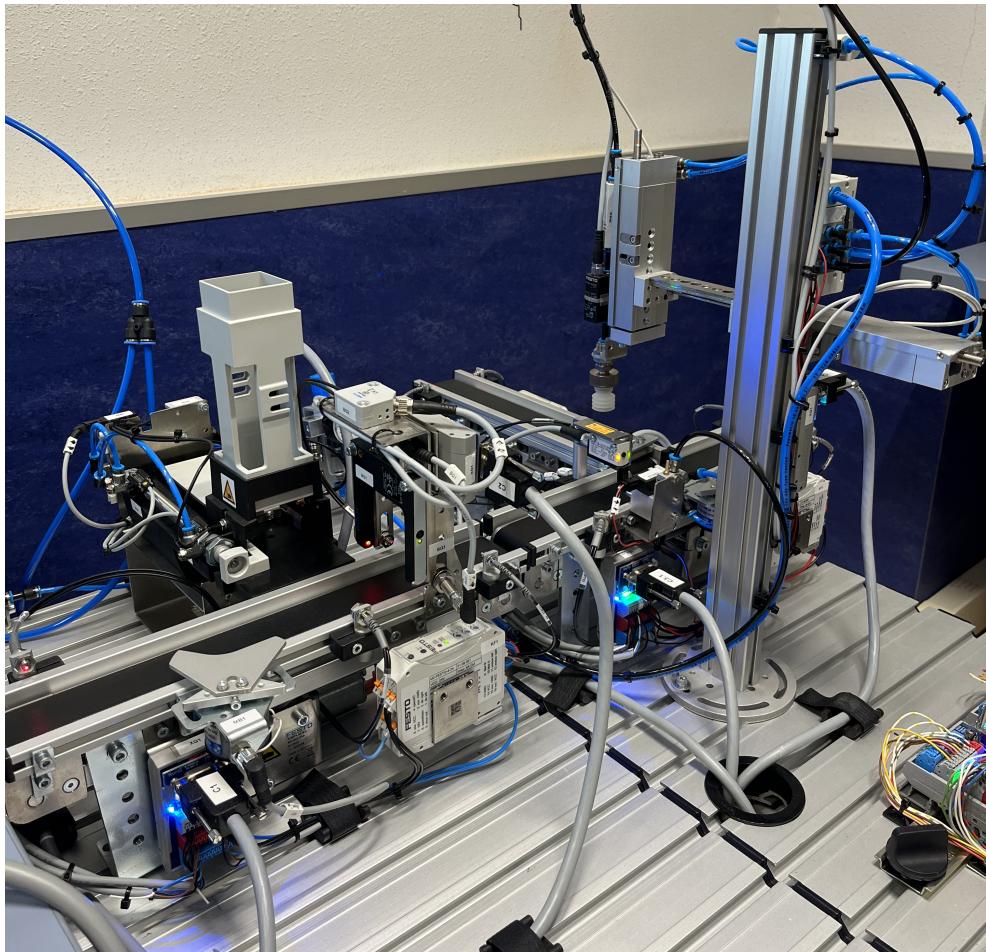


Figura 4.1: Estación distribución y estación unión unidas.

4.2. Conectividad de los dispositivos

Para realizar la conexión de todos los dispositivos entre si, se ha utilizado el switch Ethernet industrial SCALANCE XB005 y el protocolo PROFINET, los cuales ya se ha explicado en el capítulo 3. Este dispositivo cuenta con 5 puertos, soporta conexiones PROFINET y está pensado para usarse en fábricas o instalaciones automatizadas donde se requiere una red estable y confiable. El switch es ideal para el proyecto ya que se necesita comunicar 4 dispositivos más el ordenador que los programa entre ellos, ocupando los 5 puertos disponibles. Los cables Ethernet utilizados son el modelo 6XV18703QN10¹ los cuales están especialmente diseñados para este tipo de aplicaciones industriales.

¹6XV18703QN10. (n.d.). Radwell.eu. Retrieved June 10, 2025, from <https://www.radwell.eu/es/buy/siemens-6xv18703qn10/1018547.html>

A continuación, se muestra un diagrama de conexiones de todos los dispositivos:

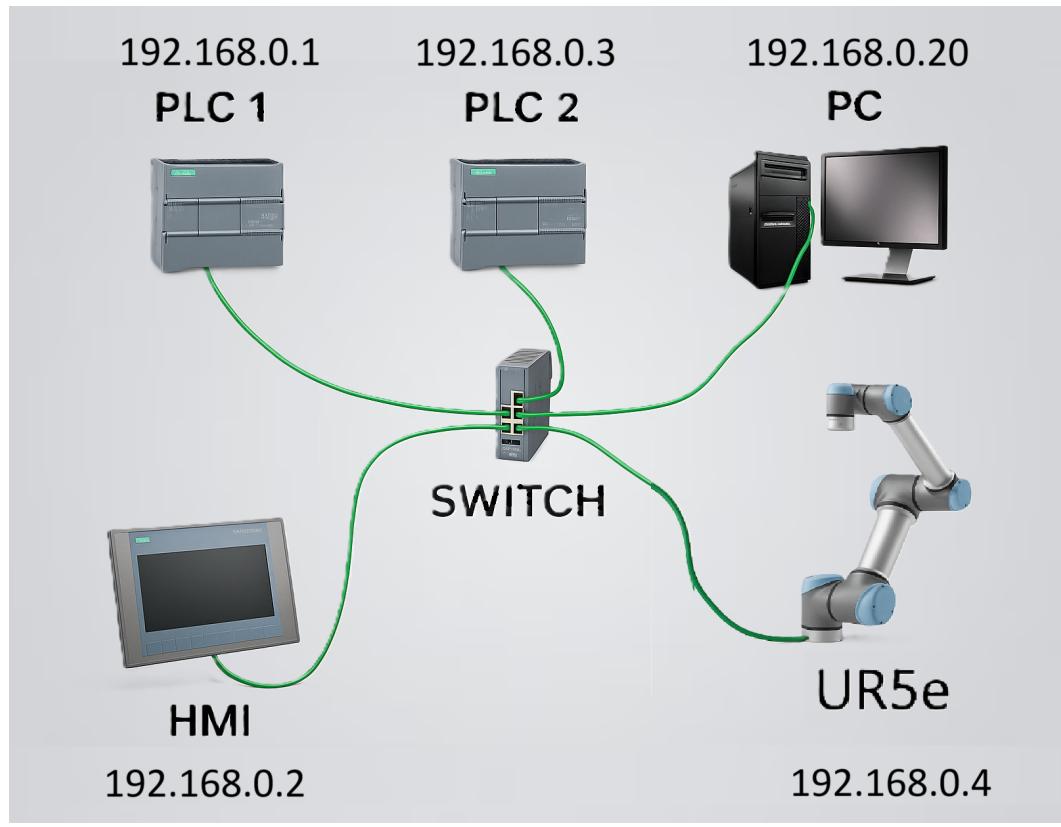


Figura 4.2: Representación de conexiones entre los dispositivos del proyecto.

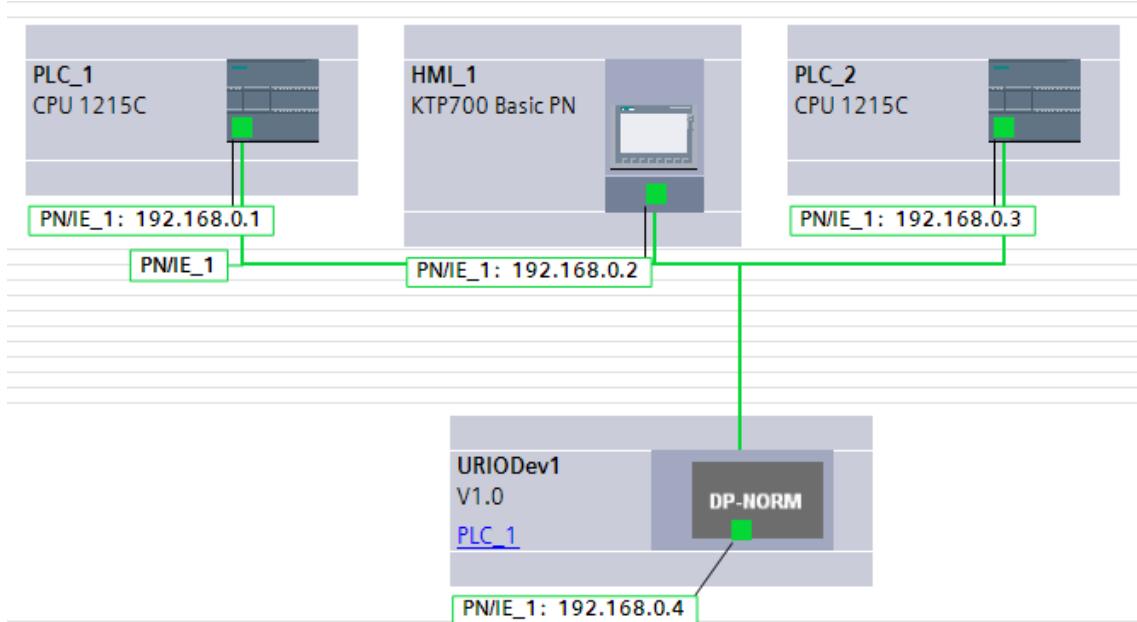


Figura 4.3: Representación de conexiones entre los dispositivos dentro del proyecto de Tia Portal.

Para intercambiar mensajes y datos entre los dos PLCs se han utilizado las funciones de comunicación RECV y SEND. SEND permite enviar información desde un PLC a otro, mientras que RECV se encarga de recibir esos datos en el destino. Estas funciones son muy útiles para coordinar procesos distribuidos y compartir datos en tiempo real en redes como Ethernet/IP o Profinet. Para la comunicación entre los PLCs, se ha definido una estructura de datos específica para cada uno, la cual se utiliza en el intercambio de mensajes. Las estructuras mostradas en la imagen 4.4 incluyen variables booleanas utilizadas para la comunicación de tres posibles finalizaciones de ciclo, así como una variable entera que indica el tipo de pieza detectada. Contienen toda la información necesaria para el proceso, permitiendo compartir y sincronizar los datos de forma eficiente entre los distintos controladores. Cada PLC envía y recibe mensajes a una frecuencia de 5Hz y van activando o desactivando los campos de la estructura según en la etapa que se encuentren. Seguidamente se muestra una imagen de las estructuras de datos y las funciones de comunicación de los PLCs:

Comunicacion_PLC_1								
	Nombre	Tipo de datos	Valor de arranq...	Remanen...	Accesible d...	Escrib...	Visible en ..	Valor de a...
1	Static	Struct						
2	Message	Struct						
3	Send_fase_1	Bool	false					
4	Receive_fase_1	Bool	false					
5	Tipo_de_pieza	Int	0					
6	Secuencia_acabada	Bool	false					
7	Secuencia_ACK	Bool	false					
8	Pieza_mal_orientada	Bool	false					
9	Pieza_mal_ACK	Bool	false					

Comunicacion_PLC_2								
	Nombre	Tipo de datos	Valor de arranq...	Remanen...	Accesible d...	Escrib...	Visible en ..	Valor de a...
1	Static	Struct						
2	Message	Struct						
3	Receive_fase_1	Bool	false					
4	Send_fase_1	Bool	false					
5	Tipo_de_pieza	Int	0					
6	Secuencia_acabada	Bool	false					
7	Secuencia_ACK	Bool	false					
8	Pieza_mal_orientada	Bool	false					
9	Pieza_mal_ACK	Bool	false					

Figura 4.4: Estructuras de datos utilizadas en la comunicación entre los PLCs.

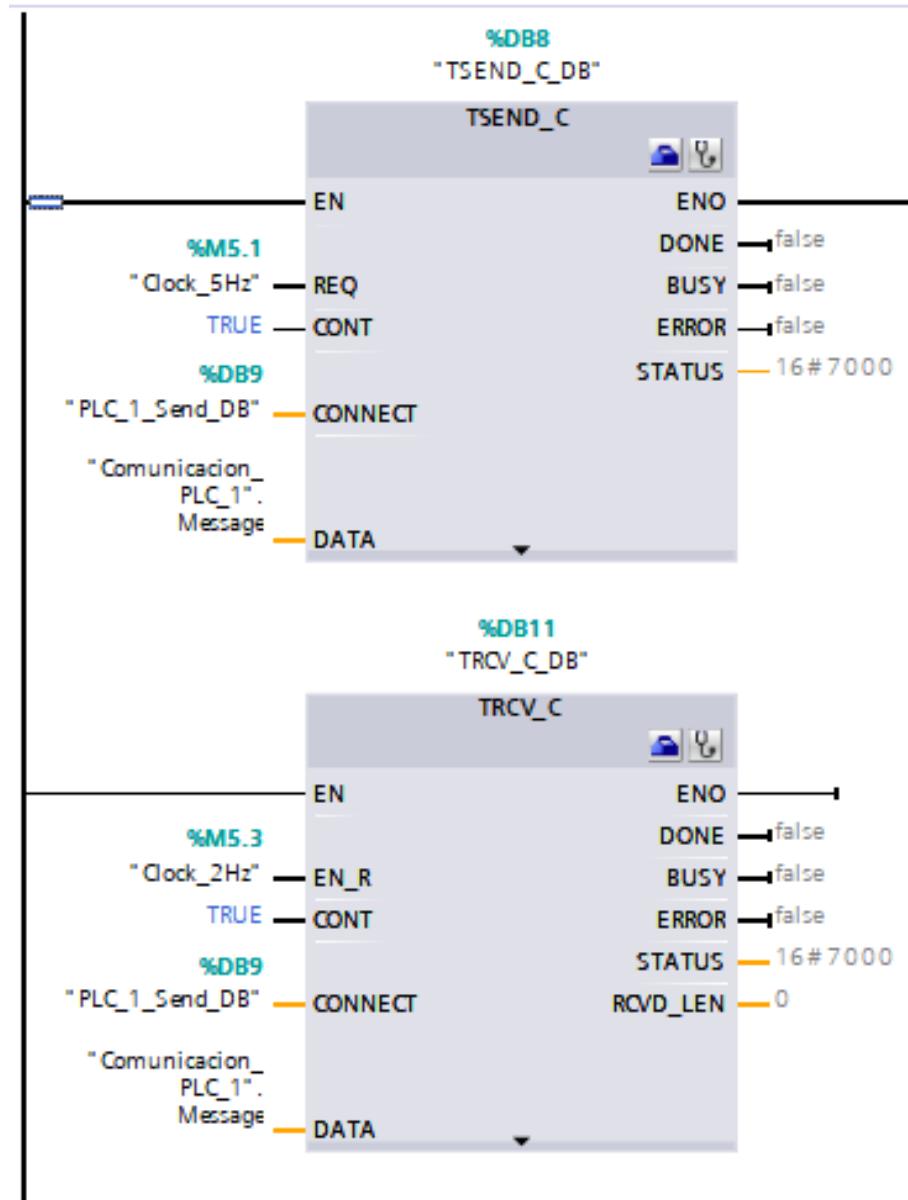


Figura 4.5: Funciones SEND y RECV entre los PLCs.

Para establecer la comunicación entre el UR y el PLC (el conectado a la estación distribución) a través de PROFINET, se ha seguido la guía oficial de UR PROFINET². Configurar la comunicación entre estos dispositivos ha sido una de las partes más difíciles de este trabajo debido a que se tuvieron muchos problemas para poder seguirlo.

El primer paso es activar la funcionalidad PROFINET en el UR, accediendo a la pestaña “Instalación” de este y guardando la configuración. Esta acción activa un LED amarillo en el controlador, indicando que la función está habilitada pero aún

²Profinet Guide - 20596.
(n.d.). Universal-robots.com. Retrieved June 25, 2025, from <https://www.universal-robots.com/articles/ur/interface-communication/profinet-how-to-guide-e-series/>

no conectada. A continuación, en el entorno de programación TIA Portal, se debe actualizar la lista de dispositivos accesibles en red, y cuándo el UR aparezca en ella, se le asignan tanto la dirección IP como el nombre del dispositivo al robot. Seguidamente, se importa el archivo GSD proporcionado por Universal Robots en la misma página de la guía, que permite al TIA Portal reconocer al robot como un dispositivo PROFINET compatible. Tras esto, el robot se agrega a la red en la vista de dispositivos y se enlaza con el PLC seleccionando y configurando los módulos de entrada y salida desde el catálogo, definiendo las direcciones de E/S. Este paso fue el más complicado de lograr, ya que no tenía claro que direcciones de memoria eran las correctas para los módulos (ya que si escribía en la dirección incorrecta el mensaje que le llegaba al UR iba vacío), pero finalmente se configuraron las correctas. Las direcciones de memoria de la imagen 4.6 deben coincidir con las mismas de las variables de los datos utilizadas para la comunicación representadas en la imagen 4.7 para poder modificar los registros de propósito general utilizados en la comunicación (las entradas empiezan en la dirección %I100 y las salidas en la %Q100, coincidiendo con las de las variables UR_IN y UR_OUT).

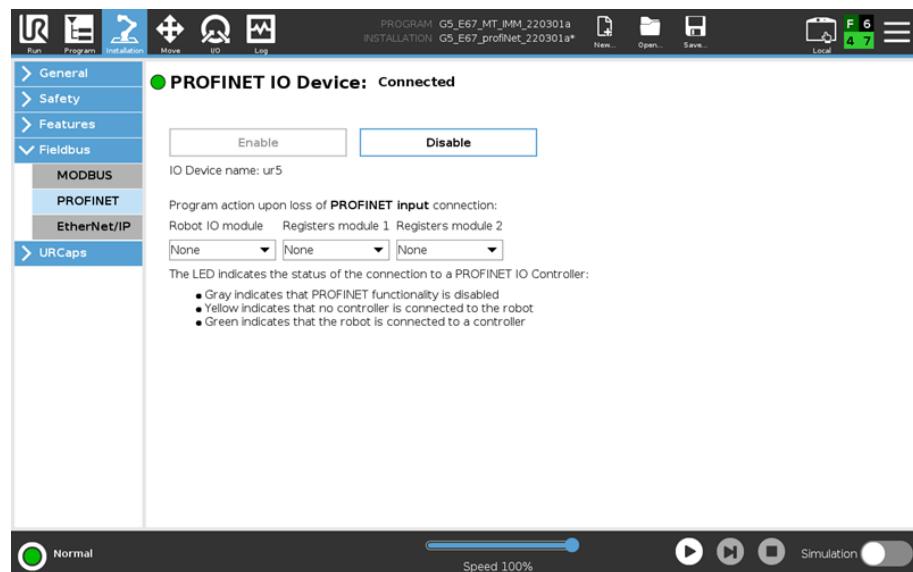
Módulo	Rack	Slot	Direcció...	Direcció...	Tipo
URIODev1	0	0			V1.0
▶ Interface	0	0 X1			URIODev1
1_T2O State_1	0	1	100...131		1_T2O State
2_T2O IO_1	0	2	132...199		2_T2O IO
3_T2O Joints_1	0	3	200...303		3_T2O Joints
4_T2O TCP_1	0	4	304...379		4_T2O TCP
5_T2O General Purpose Bit R...	0	5	380...387		5_T2O General Pur...
6_T2O General Purpose Int R...	0	6	388...483		6_T2O General Pur...
7_T2O General Purpose Floa...	0	7	484...579		7_T2O General Pur...
8_O2TRobot IO_1	0	8		100...123	8_O2TRobot IO
9_O2T General Purpose Regi...	0	9		124...223	9_O2T General Pur...
10_O2T General Purpose Re...	0	10		224...323	10_O2T General Pu...
▼ PROFIsafe_1	0	11			PROFIsafe
Module Access Point	0	11 1			Module Access Point
	0	11 2			

Figura 4.6: Configuración de los módulos de comunicación del UR en Tia Portal.

	Nombre	Tipo de datos	Dirección	Rema...	Acces...	Escribi...	Visibl...
1	UR_IN	"UR_T2O"	%I100.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	State	UR_1_T2O_State	%I100.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	IO	UR_2_T2O_IO	%I132.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Joints	UR_3_T2O_Joints	%I200.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	TCP	UR_4_T2O_TCP	%I304.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Bits	UR_5_T2O_BitR...	%I380.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Ints	UR_6_T2O_IntR...	%I388.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	FLOATS	UR_7_T2O_Floa...	%I484.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	UR_OUT	"UR_O2T"	%Q100.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
10	Robot IO	UR_8_O2T_Rob...	%Q100.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11	Reg 1	UR_9_O2T_Regis...	%Q124.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
12	Bits	UR_O2T_bits	%Q124.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
13	Ints	UR_O2T_ints	%Q128.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
14	FLOATS	UR_O2T_floats	%Q176.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
15	Reg 2	UR_9_O2T_Regis...	%Q224.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 4.7: Configuración de los módulos de comunicación del UR en Tia Portal.

Finalmente, una vez que las estructuras de datos definidas por el usuario permiten mapear adecuadamente los registros de entrada y salida del robot, se pueden modificar los registros booleanos, enteros o flotantes para enviarle información desde el PLC al UR. La configuración completa se descarga al PLC y se verifica que todos los bloques estén correctamente cargados. Cuando la comunicación entre el robot y el PLC se establece con éxito, el LED del controlador del robot cambia a verde como se observa en la siguiente imagen:

Figura 4.8: Conexión establecida entre el UR y el PLC dentro del PolyScope.
[Universal Robots, 2024]

Seguidamente se muestra una tabla que resume todos los mensajes intercambiados entre los dispositivos en el ciclo global:

Emisor	Receptor	Mensaje	Explicación
PLC 1	PLC 2	Send_fase_1 (Bool)	Se envía si el tipo de pieza es aceptado y pasa de la estación distribución a la estación unión.
PLC 2	PLC 1	Send_fase_1 (Bool)	Confirmación de que la pieza pasó exitosamente de la estación distribución a la estación unión.
PLC 1	PLC 2	Tipo_de_pieza (Int)	Indica el tipo de pieza detectado: Pieza negra: 1 Pieza rosa: 2 pieza metálica: 3
PLC 2	PLC 1	Secuencia_acabada (Bool)	Se le indica a la estación unión que la estación distribución terminó su ciclo con éxito.
PLC 1	PLC 2	Secuencia_ACK (Bool)	Confirmación de la recepción del mensaje Secuencia_acabada.
PLC 2	PLC 1	Pieza_mal_orientada (Bool)	Se le indica a la estación unión que la pieza actual está mal orientada y se debe descartar.
PLC 1	PLC 2	Pieza_mal_ACK (Bool)	Confirmación de la recepción del mensaje Pieza_mal_orientada.
PLC 1	UR5e	Start Registro GPbi [0] (Bool)	Indica el inicio de la secuencia de colocación de la pieza en el palé del UR.
PLC 1	UR5e	num_capas Registro GPii [0] (Int)	Número de capas elegido en el HMI que se quieren para el paletizado.
UR5e	PLC 1	piezas_paletizadas Registro GPio [0] (Int)	Número de piezas paletizadas actualmente.
UR5e	PLC 1	ejecutando_proc Registro GPbo [0] (Bool)	Infomrma que el UR todavía está ejecutando su ciclo.
UR5e	PLC 1	pale_completo Registro GPbo [1] (Bool)	Aviso de que el palé está completo.
PLC 1	UR5e	pale_recogido Registro GPbi [2] (Bool)	Informa de que el palé ha sido reogido.
UR5e	PLC 1	Pale_ACK Registro GPbo [2] (Bool)	Confirmación de la recepción del mensaje pale_recogido.
PLC 1	UR5e	parada_emergencia Registro GPbi [1] (Bool)	Parada de emergencia pulsada, parada obligatoria de la secuencia.

Cuadro 4.1: Intercambio de mensajes en el ciclo global del sistema.

4.3. Funcionamiento estación distribución

La estación distribución es la encargada de iniciar la secuencia del proceso automático. Está conectada al primer PLC y tiene como función principal suministrar piezas al sistema, ya sea a través de su cinta transportadora o mediante el dispensador de piezas. Además, permite el paso únicamente de aquellas piezas que cumplen con un número y tipo determinados, seleccionados previamente por el usuario a través del HMI. En caso de que la pieza no cumpla con las condiciones establecidas en la interfaz de usuario, esta será devuelta al inicio del recorrido y descartada. Si cumple los requisitos, continuará su avance hacia la siguiente estación. También se ha implementado un modo de prueba que permite verificar el funcionamiento individual de cada sensor y actuador, facilitando así la detección de posibles errores. A continuación, se presenta una tabla que recoge todas las entradas y salidas de la estación, así como su correspondencia con las conexiones al PLC:

Sensor	Entrada al PLC	Tipo de salida (normalmente)
Láser inicio cinta	%I0.0	abierta
Láser medio cinta	%I0.1	abierta
Láser final cinta	%I0.2	cerrada
Identificador de piezas (pieza negra)	%I0.4	abierta
Sensor de color (pieza rosa)	%I0.5	abierta
Sensor metálico (pieza metálica)	%I0.6	abierta
Corredera retraída	%I0.7	abierta
Corredera extendida	%I1.0	abierta
Pieza en el cargador	%I1.1	cerrada

Actuador	Salida del PLC
Avance cinta	%Q0.0
Retroceso cinta	%Q0.1
Separador	%Q0.2
Avance corredera	%Q0.3

Cuadro 4.2: Entradas y salidas de la estación distribución conectadas al PLC 1

El Grafcet de la figura 4.9 describe la secuencia automatizada de funcionamiento de la estación de unión. El sistema se inicializa con la variable de conteo de piezas a cero y permanece en espera hasta recibir una orden de arranque desde la interfaz HMI. En función del modo de carga seleccionado (manual o automático), se activa el avance de la cinta transportadora mediante un separador temporizado o a través de la corredera que realiza un movimiento de extensión y retracción para depositar la pieza retenida en el cargador. A continuación, se lleva a cabo una etapa de identificación

en la que se determina el tipo de pieza (negra, rosa o metálica), registrándose dicha información en el sistema y actualizándose el contador de piezas correspondiente. El HMI cuenta con una interfaz para seleccionar el tipo de pieza que se quiere aceptar y la que se quiere descartar, como se observa en la imagen 4.10, con la configuración mostrada, los tres tipos de piezas serían descartados. Si se ha alcanzado el número total de piezas especificado por el operador o el tipo de pieza no está permitida por el operario, el sistema ejecuta un retroceso de la cinta para descartar la pieza y repetir el ciclo hasta que se reseté el contador de piezas o se amplíe el número desde el HMI. Puede haber otro caso de descarte en la estación unión, por lo que si sucede, el PLC 1 recibirá un mensaje de error procedente del PLC 2 comunicándole que le devuelve la pieza expulsándola por la zona inicial de la cinta y terminando el ciclo global. En caso contrario, se da por finalizado el proceso de carga al recibir un mensaje del PLC 2 de éxito, se envía una señal al PLC 2 para confirmar la recepción de su mensaje, y a continuación se procede a comunicar al robot UR el inicio de su secuencia de colocación de la pieza en el palé (siempre y cuando no esté colocando ya una pieza). Esta comunicación se realiza mediante la activación de un registro booleano global a través del canal PROFINET, acompañado por un registro entero que indica el número de capas de paletizado definidas previamente en el HMI. En este punto hay dos posibles estados diferentes a los que transitar, si el UR indica que está ejecutando su secuencia, se da por terminado el ciclo global y se inicia de nuevo permitiendo comenzar el siguiente ciclo sin la necesidad de esperar a que el brazo termine su proceso. Por otro lado, si el UR indica que el palé está completo y salta un aviso en la pantalla del HMI para retirarlo como se observa en la figura 4.22 la cual ya se explicará más adelante. Tras retirar el palé, se pulsa el botón correspondiente en el HMI y, al recibir el mensaje de confirmación (ACK), el ciclo concluye.

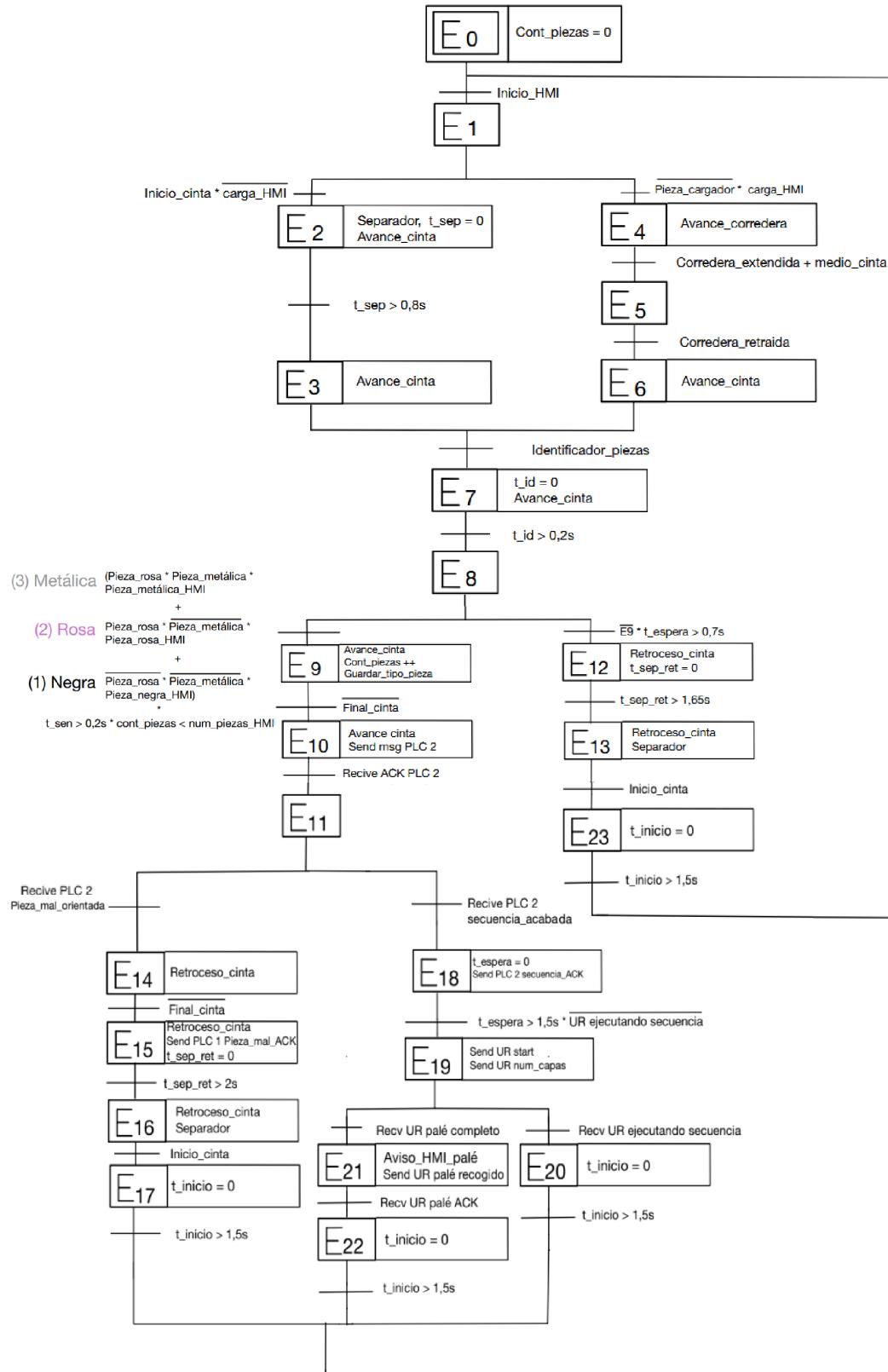


Figura 4.9: Grafcet del funcionamiento de la estación distribución.

En el anexo A.1 se detallan las ecuaciones lógicas del Grafcet de la estación distribución.

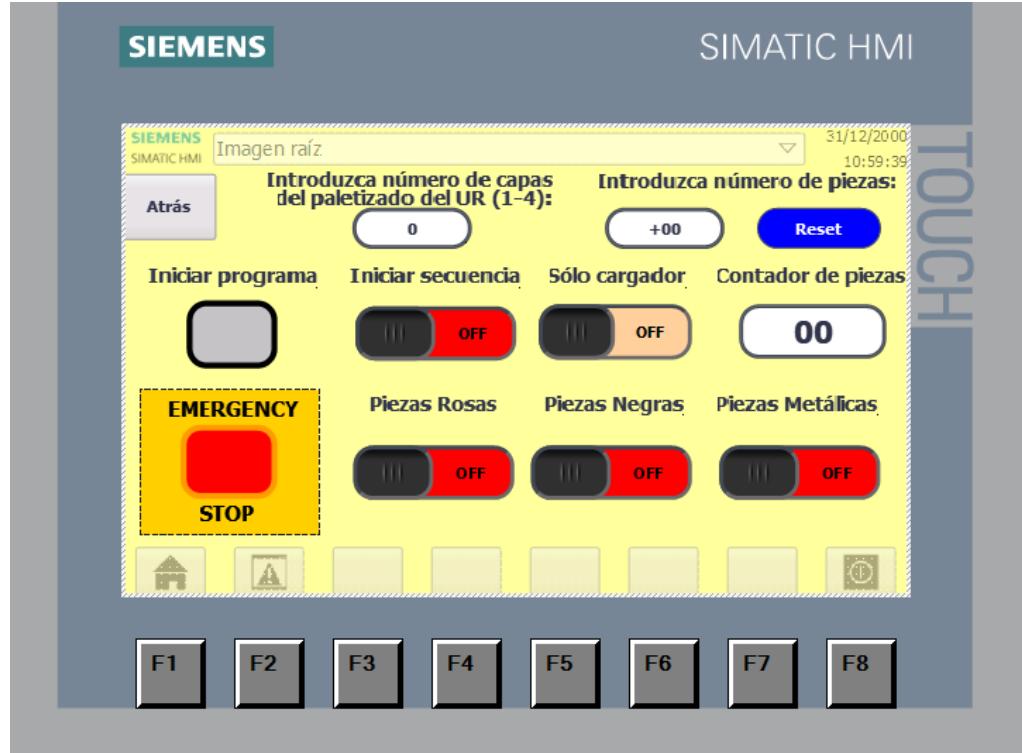


Figura 4.10: Pantalla del modo funcionamiento en el HMI.

En la foto anterior se muestra la pantalla del modo funcionamiento del sistema, en la que cada botón tiene el siguiente funcionamiento:

- **Número de capas:** Introducir el número de capas de paletizado deseado, siendo 1 el mínimo y 4 el máximo de capas.
- **Número de piezas:** Introducir el número de piezas que se desean permitir en el proceso. El botón azul “Reset” reinicia el contador a 0.
- **Iniciar programa:** Inicia el programa después de una parada de emergencia.
- **Iniciar secuencia:** Inicia la secuencia global de producción.
- **Sólo cargador:** Indica que sólo se quieren utilizar piezas provenientes del cargador. De lo contrario, las piezas serán introducidas al sistema desde el inicio de la cinta transportadora.
- **Contador de piezas:** Muestra un contador con el número de piezas producidas hasta el momento.
- **Parada de emergencia:** Botón de seguridad que provoca que todos los elementos del proceso se paren instantáneamente.

- **Piezas Rosas:** Permite el paso de piezas rosas, de lo contrario se descartan.
- **Piezas Negras:** Permite el paso de piezas negras, de lo contrario se descartan.
- **Piezas Metálicas:** Permite el paso de piezas metálicas, de lo contrario se descartan.

4.4. Funcionamiento estación unión

La estación de unión es la encargada de ensamblar las diferentes piezas que llegan desde las estaciones anteriores. Dicha estación se encuentra conectada al segundo PLC del sistema y tiene como objetivo principal la unión de una base con una tapa, verificando previamente que ambas piezas estén correctamente posicionadas. El proceso de unión se lleva a cabo mediante un actuador neumático equipado con una ventosa, el cual puede desplazarse entre las dos cintas transportadoras para ascender o descender con el fin de recoger o depositar las tapas. En caso de que alguna de las piezas se encuentre mal posicionada, el sistema detiene el ciclo, notifica el error a través de un mensaje mostrado en la pantalla del HMI y, posteriormente, descarta la pieza afectada. Esta estación, al igual que la estación de distribución, dispone de un modo de prueba que permite revisar de forma individual el funcionamiento de cada sensor y actuador, lo cual facilita la identificación de posibles fallos tanto mecánicos como de programación. A continuación, se presenta la tabla 4.5, en la que se detallan todas las entradas y salidas de la estación, así como su correspondiente conexión con el PLC.

Sensor	Entrada al PLC	Tipo de salida (normalmente)
Láser inicio cinta 1	%I0.0	abierta
Láser medio cinta 1	%I0.1	abierta
Láser final cinta 1	%I0.2	cerrada
Orientación correcta	%I0.3	abierta
Láser final cinta 2	%I0.4	abierta
Láser inicio cinta 2	%I0.5	cerrada
Carro retraido	%I0.6	abierta
Carro extendido	%I0.7	abierta
Ventosa arriba	%I1.0	abierta
Pieza succionada	%I1.1	abierta

Cuadro 4.3: Entradas y salidas de la estación unión conectadas al PLC 2

Actuador	Salida del PLC
Avance cinta 1	%Q0.0
Retroceso cinta 2	%Q0.1
Extender separador	%Q0.2
Retraer tope	%Q0.3
Avance cinta 2	%Q0.4
Retroceso cinta 2	%Q0.5
Retroceso carro	%Q0.6
Avance carro	%Q0.7
Bajar ventosa	%Q1.0
Vacio conectado	%Q1.1

Cuadro 4.4: Salidas de la estación unión conectadas al PLC 2

El Grafset de la estación distribución se muestra en la figura 4.11, cuyo proceso inicia activando el avance de la cinta 1 al recibir un mensaje del PLC 1 hasta que la pieza proveniente de la estación distribución es detectada por el láser del inicio, luego se envía un mensaje de confirmación de que la pieza llegó al segundo sistema. La cinta continúa moviéndose hasta que la pieza es detectada en el centro de la cinta por el segundo láser y se extiende el retenedor para poder así comprobar correctamente la orientación de la pieza. A continuación se verifica la orientación de la pieza utilizando un sensor capacitivo que responde de forma inversa a las piezas metálicas: si la pieza está correctamente orientada, el sensor no la detecta, mientras que si está invertida, el sensor la activa, indicando una orientación incorrecta. Si se confirma que la orientación es válida, paralelamente se dan dos sucesos: en el primero se vuelve a activar la cinta 1, se extiende el derivador y se espera el tiempo necesario para que la pieza llegue hasta este último y el segundo consiste en que la cinta 2 avanza hasta que en el láser del inicio de esta detecta una tapa.

Una vez la pieza está parada y la tapa lista para recogerse, el carro se extiende, desciende la ventosa, succiona la pieza, se eleva y se retrae colocándola encima. Después la ventosa se desactiva, se activa la cinta 1 nuevamente y se retrae el separador permitiendo a la pieza llegar al final de la cinta, que, cuando es detectada por el último láser, manda un mensaje al PLC 1 indicando que la secuencia ha terminado. Si la orientación es incorrecta, se activa un proceso de rechazo y una notificación al operario en el HMI mostrando un mensaje y contador de piezas defectuosas. El sistema esperará hasta que el operario pulse el botón de “descartar pieza” como se ve en la imagen 4.12. Una vez pulsado, se activa el retroceso de la cinta y el envío de un mensaje de error al PLC 1 avisando que debe descartar la pieza. El ciclo finaliza tras la confirmación de recepción de la secuencia completada o de pieza defectuosa por parte del PLC 1.

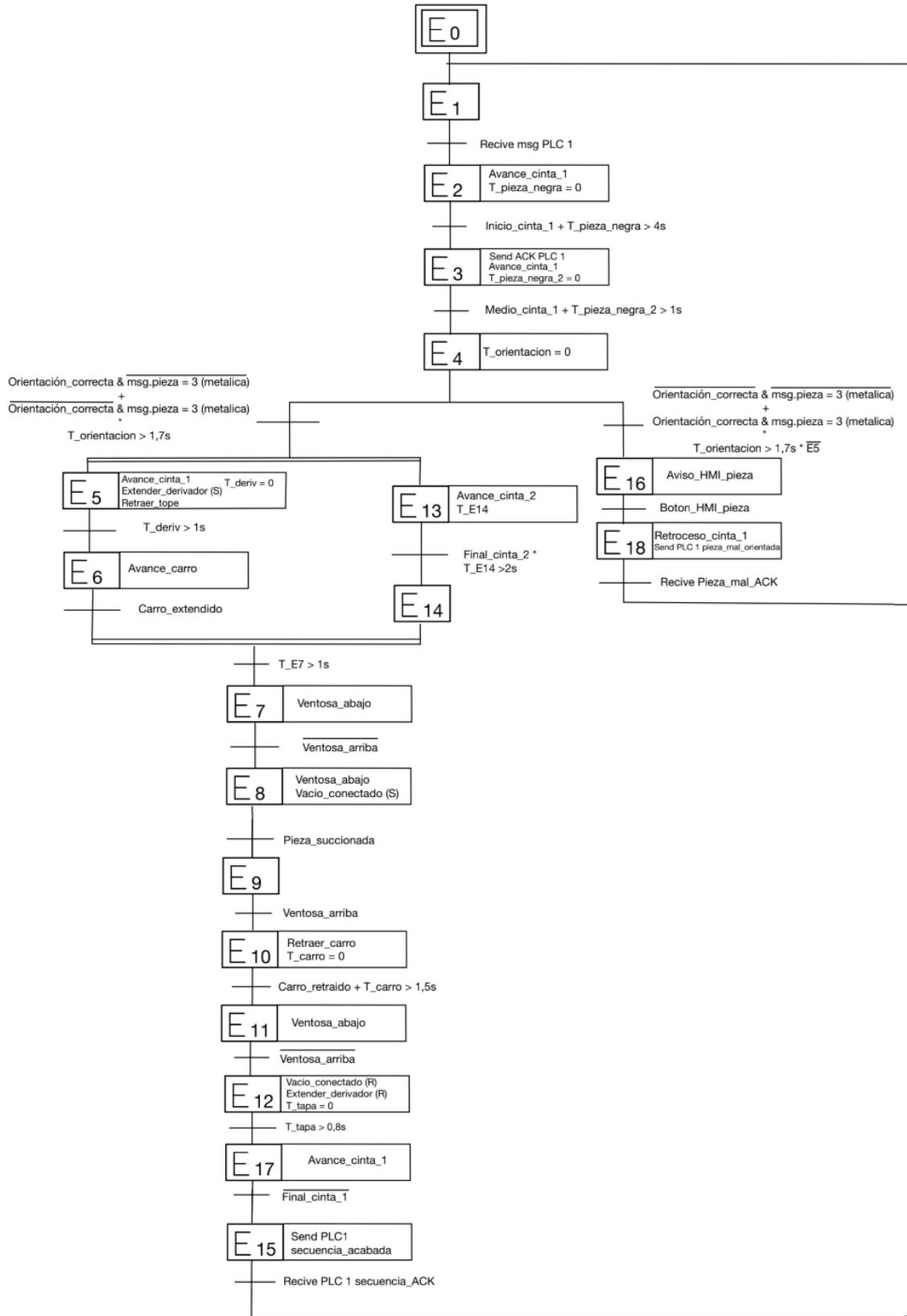


Figura 4.11: Grafcet de funcionamiento de la estación unión.

En el anexo A.2 se detallan las ecuaciones lógicas del Grafcet de la estación distribución.

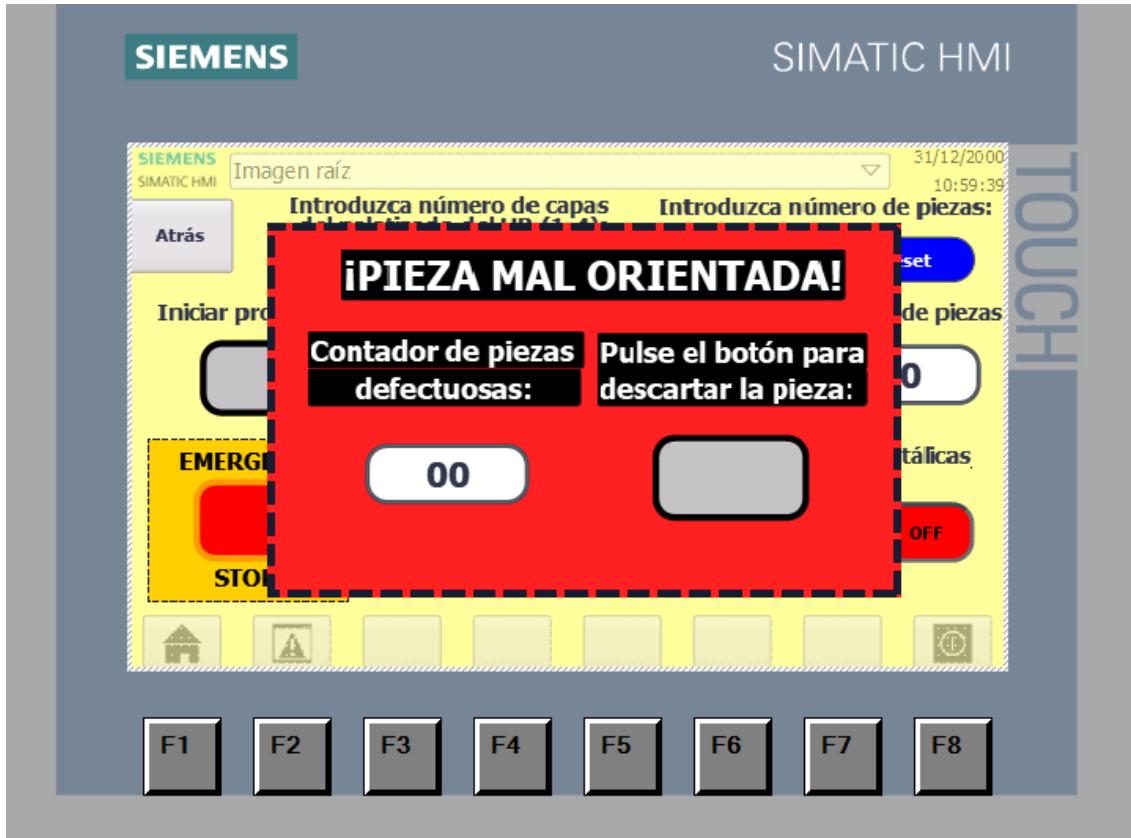


Figura 4.12: Aviso de pieza defectuosa en el modo funcionamiento en el HMI.

4.5. Aplicación de la Guía GEMMA

La aplicación de la Guía GEMMA, explicada previamente en la sección 1.3, representa un elemento clave en el desarrollo de sistemas automatizados, especialmente en entornos industriales. En el contexto del proyecto, la Guía GEMMA ha sido de gran utilidad para estructurar de forma lógica y ordenada las distintas estaciones que componen el ciclo global de producción. Gracias a su enfoque, ha sido posible identificar de manera precisa las condiciones iniciales, las etapas activas del proceso y las posibles interrupciones. Esta clasificación favorece la implementación de programas más robustos y fácilmente mantenibles, además de mejorar la comprensión del funcionamiento general del sistema por parte de otros desarrolladores o técnicos. Para su correcta aplicación, se han definido y utilizado en el proyecto los siguientes estados operativos:

Modo	Tipo	Objetivo
Proceso de funcionamiento	F1: Producción normal	Se realizan las tareas principales del sistema.
	F4: Marchas de verificación sin orden	Se realiza un control manual de los actuadores y la comprobación del funcionamiento de los sensores.
Proceso de parada o puesta en marcha	A1: Parada en el estado inicial	Estado de reposo de la máquina.
	A2: Parada solicitada al final de ciclo	Estado al que se llega cuando se termina el ciclo y pasa al estado inicial
	A3: Parada solicitada en un estado determinado	Estado al que llega la máquina alternativo el cual no coincide con el final de ciclo.
	A4: Parada obtenida	Estado de reposo diferente al principal.
	A5: Puesta en marcha después de defecto	Estado posterior a un defecto y necesario para restablecer el sistema.
Proceso en defecto	D1: Parada de emergencia	Estado al que llega el sistema tras una parada de emergencia. Se para el funcionamiento de todo el sistema.

Cuadro 4.5: Estados de la Guía Gemma utilizados en el sistema.

Proceso de funcionamiento

En el proceso de funcionamiento hay configurados dos estados distintos, El primer estado es el F1 o producción normal, estado en el que el sistema repite constantemente el ciclo de producción que ha sido programado. En este estado y como se puede observar en la figura 4.10, se pueden configurar los parámetros del sistema desde el HMI con aspectos clave como: seleccionar el tipo de pieza que se quiere dejar pasar, introducir el número de piezas que se quieren producir, iniciar o parar la secuencia o decidir si se quiere utilizar el cargador o no. El sistema estará dentro de este estado principal, siempre y cuando no surja algún imprevisto o comportamiento extraño.

En cuanto al estado F4 o marcha de verificación sin orden, tiene como objetivo realizar un control manual de los actuadores y sensores para comprobar su correcto funcionamiento. Para este estado se han creado dos modos de test a cada estación física (distribución y unión, Estos modos de pruebas son seleccionables en el menú principal del HMI antes de entrar en el estado de producción F1 como se aprecia en

la imagen 4.13. Una vez dentro del modo test, y por lo tanto, dentro del estado F4, se puede acceder a una vista de diagnóstico de errores general o se puede escoger entre el modo de pruebas de la estación distribución o unión. La estación distribución sólo cuenta con un modo test, en cambio la estación unión cuenta con dos modos debido a que tiene más sensores y actuadores para probar el funcionamiento.

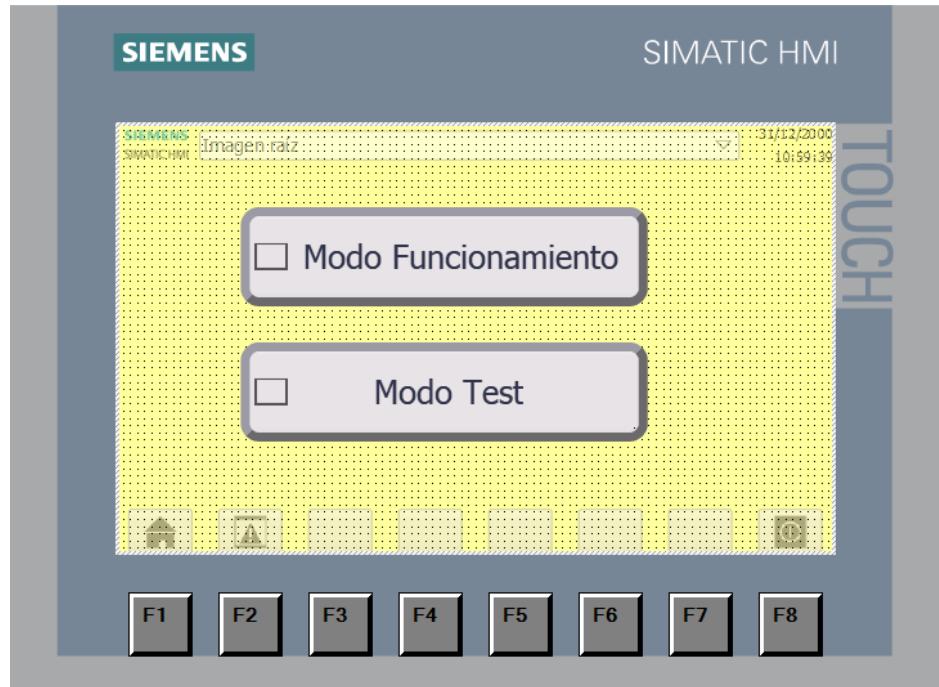


Figura 4.13: Estado inicial del HMI.

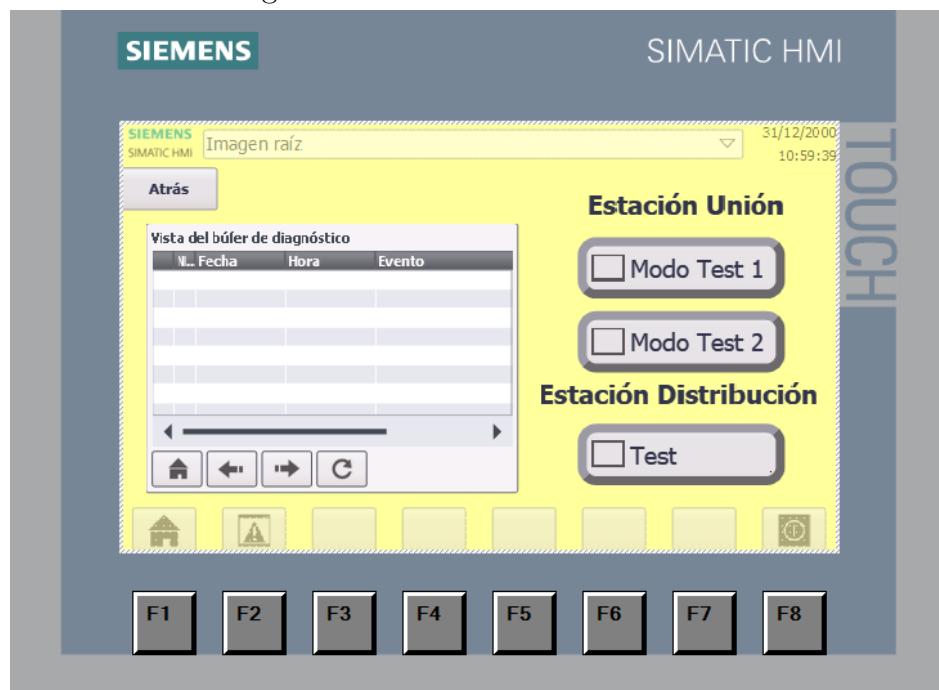


Figura 4.14: Vista del HMI dentro de la opción Modo Test.

En la figura 4.15 se pueden ver todos los test que se le pueden realizar en la estación distribución. Es posible activar y desactivar manualmente los actuadores del sistema, como la cinta transportadora, el separador o el cargador, con el fin de verificar su correcto funcionamiento. Además, se muestran tres columnas y tres filas de círculos que representan visualmente todos los sensores de la estación de distribución, así como el tipo de pieza detectado por el módulo adicional de dicha estación. Cuando un sensor está activo, su indicador aparece en verde; en caso contrario, se muestra en rojo. En cuanto al tipo de pieza, solo se activa el correspondiente al detectado durante el ciclo de trabajo en curso. Esta visualización facilita la comprobación del estado de los sensores y permite monitorizar el proceso para detectar posibles errores como se muestra en la siguiente imagen:

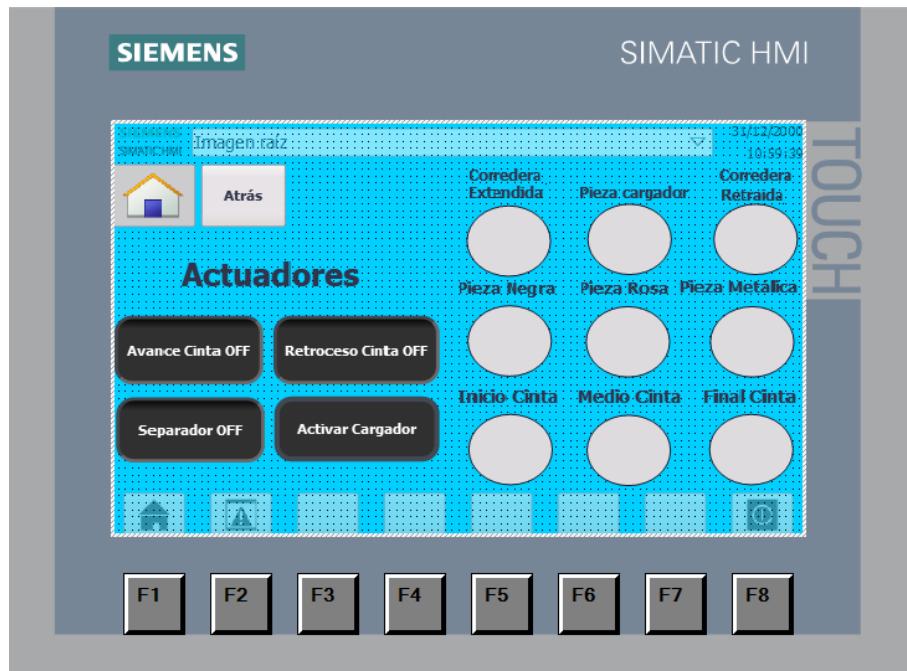


Figura 4.15: Visualización del modo Test de la estación distribución dentro del HMI.

Por otro lado, el modo test de la estación de unión se ha distribuido en dos pantallas distintas, ya que el elevado número de sensores y actuadores impide representarlos todos de forma clara en una sola vista. La estructura de este modo sigue el mismo esquema que en la estación de distribución: se emplean botones para activar o desactivar los actuadores, y se utilizan círculos de colores para indicar visualmente el estado de los sensores. Un círculo verde señala un sensor activo, mientras que el rojo indica que está desactivado y también se cuenta con un botón que al presionarlo el HMI abre la pantalla del otro test programado para esta estación. A continuación se muestra el modo test para la estación unión:

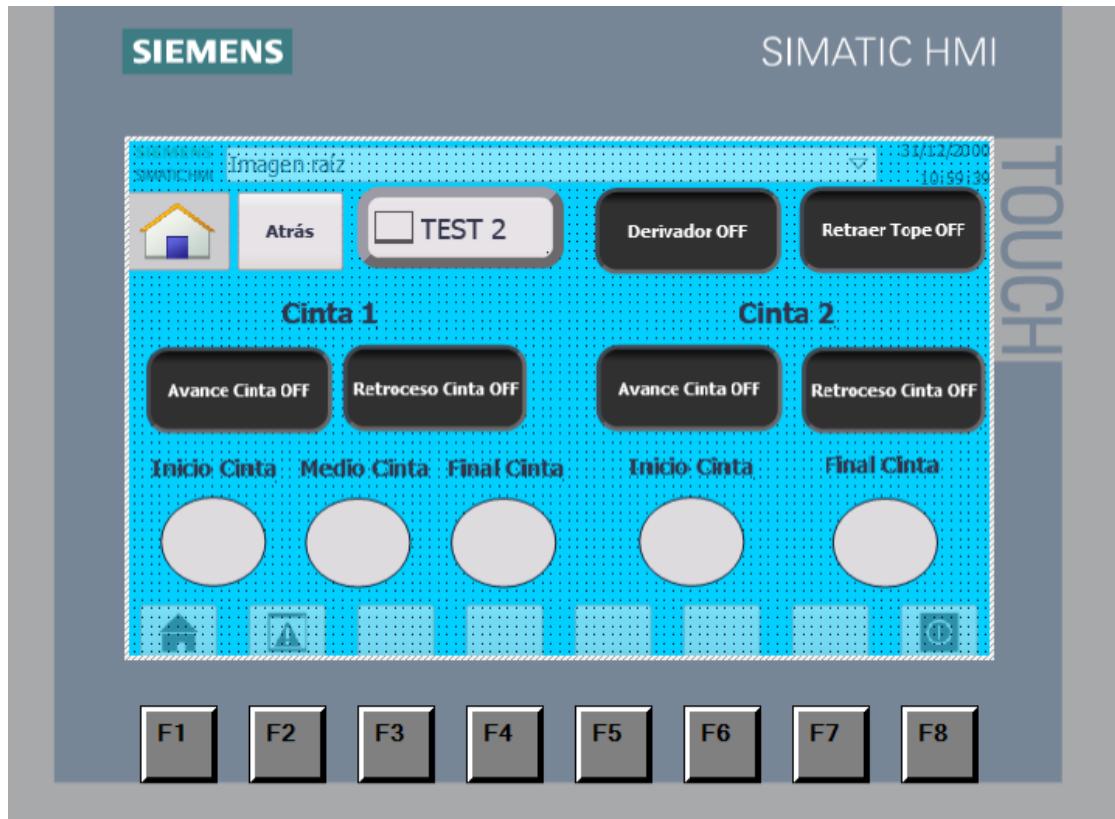


Figura 4.16: Vista del HMI dentro de la opción Modo Test 1 de la estación unión.

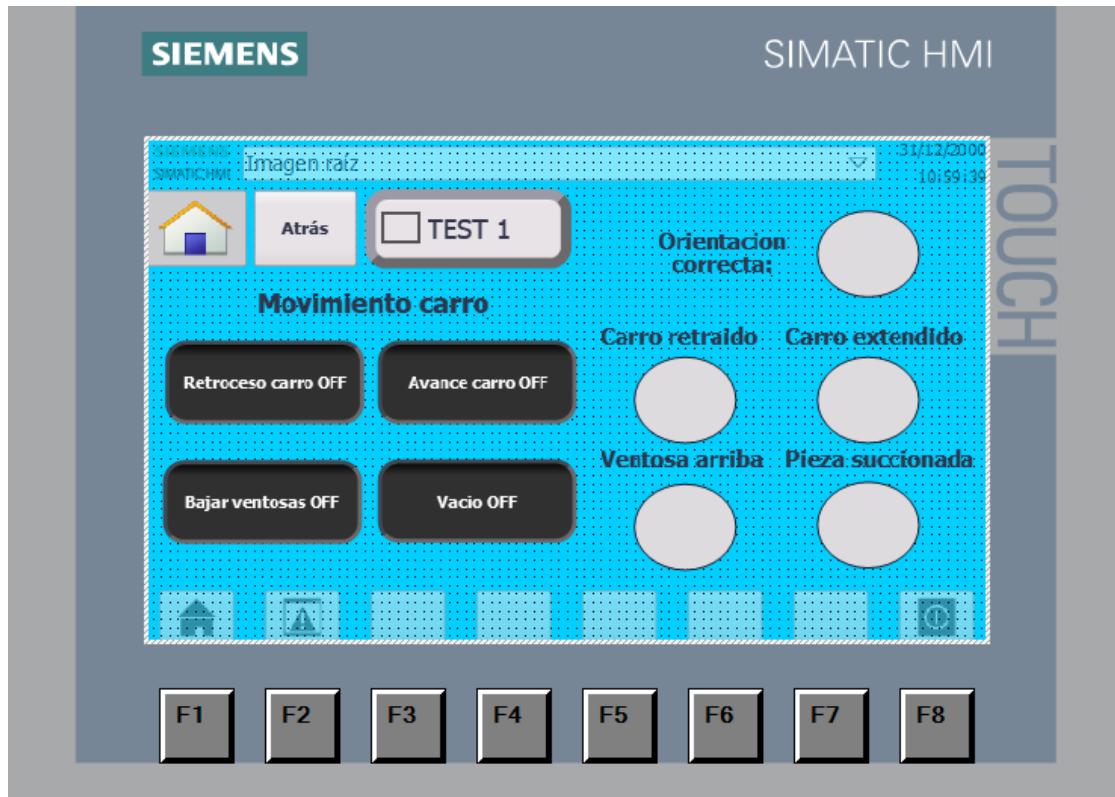


Figura 4.17: Vista del HMI dentro de la opción Modo Test 2 de la estación unión.

Proceso de parada o puesta en marcha

Este conjunto de estados definidos por la Guía GEMMA describe las distintas situaciones en las que una máquina puede encontrarse durante la detención o reactivación del proceso. Son fundamentales para garantizar transiciones seguras y controladas entre ciclos de funcionamiento. A continuación, se explican los cuatro estados que componen este proceso:

- **A1: Parada en el estado inicial**

Representa el estado de reposo principal de la máquina. Es el punto de partida al que se regresa tras completar un ciclo [José A. Rodríguez Mondéjar, 2022]. En este estado, no hay procesos activos y la máquina está lista para comenzar un nuevo ciclo de forma segura una vez se pulse dentro de la interfaz del HMI el botón “Iniciar secuencia”.

- **A2: Parada solicitada al final de ciclo**

Este estado funciona como transición entre la producción normal del sistema a la parada del estado inicial cuando se termina el ciclo principal [José A. Rodríguez Mondéjar, 2022]. Cada vez que el sistema termina su ciclo, se queda parado y transiciona al estado A1 de forma automática para volver a empezar la secuencia. Esta parada permite volver al estado inicial de parada una vez ha terminado el ciclo de producción si no está activado el botón “iniciar secuencia” en el HMI, permitiendo así parar el ciclo de producción.

- **A3: Parada solicitada en un estado determinado**

Corresponde a una parada anticipada, en un punto concreto del ciclo, distinto del final [José A. Rodríguez Mondéjar, 2022]. Se emplea cuando es necesario interrumpir el proceso en un estado específico, por razones de control, mantenimiento o condiciones externas [José A. Rodríguez Mondéjar, 2022]. Este estado se alcanza cuando le llega a la estación unión una pieza mal orientada, por lo que el estado se queda detenido hasta que el operario descarta la pieza en el HMI, la imagen 4.12 representa este estado.

- **A4: Parada obtenida**

Indica que la máquina ha alcanzado un estado de reposo diferente al inicial A1 y proveniente del A3 [José A. Rodríguez Mondéjar, 2022]. Este estado alternativo está asociado a situaciones específicas, como pruebas, diagnóstico o pausas no planificadas [José A. Rodríguez Mondéjar, 2022].

■ A5: Puesta en marcha después de defecto

En este estado se realizan las acciones necesarias para la reanudación del correcto funcionamiento del sistema después de un defecto [José A. Rodríguez Mondéjar, 2022].

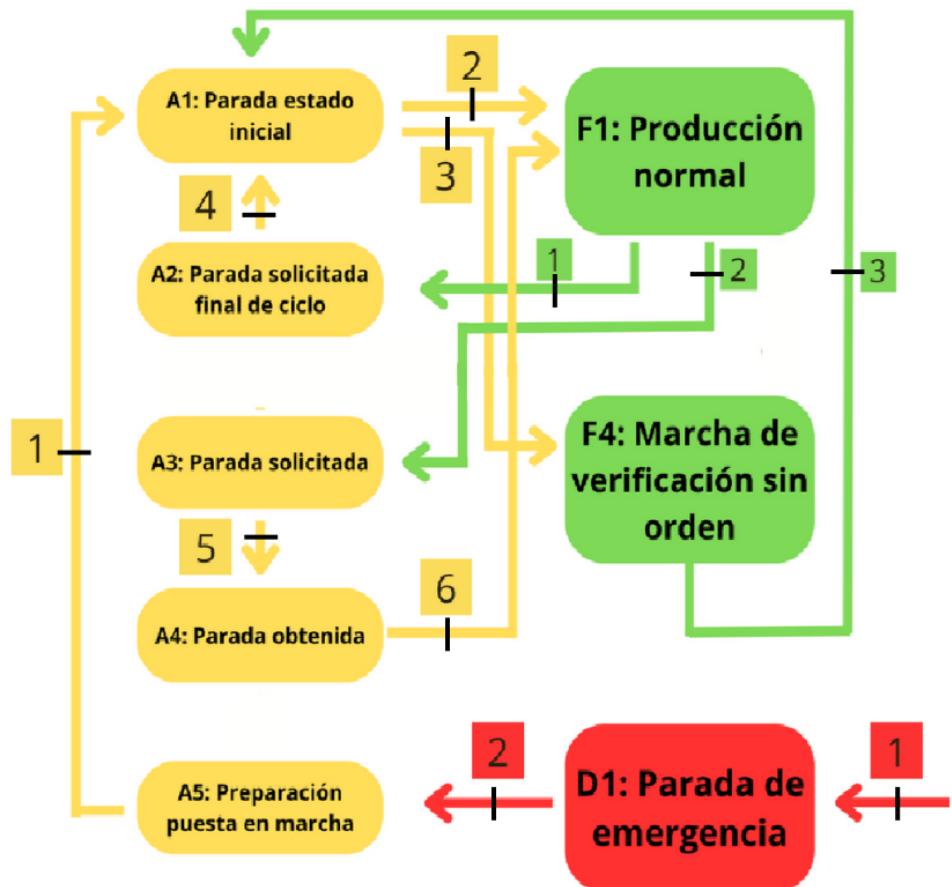
A este estado se llegará después de una parada de emergencia y será necesario pulsar el botón “iniciar programa” en la interfaz HMI de modo funcionamiento para transicionar al estado A1.

Proceso en defecto

Dentro del proceso de defecto sólo se ha programado el estado D1 de parada de emergencia. Este estado representa una situación crítica en la que el sistema se detiene de forma inmediata debido a una emergencia [José A. Rodríguez Mondéjar, 2022]. La parada se realiza sin esperar a que finalice el ciclo, con el objetivo de garantizar la seguridad de las personas, del sistema o del entorno [José A. Rodríguez Mondéjar, 2022]. Este estado puede ser alcanzado en cualquier momento que se presione el botón “parada de emergencia” desde el HMI en el modo de funcionamiento. Una vez pulsado el botón se para el funcionamiento de todo el sistema para ser revisado por un operario, y una vez resuelto el problema, se podrá volver a comenzar con el ciclo de producción desde 0.

Aplicación de la Guía Gemma

Una vez descritos en detalle todos los posibles estados que puede adoptar el sistema a lo largo de su funcionamiento, se presenta a continuación la imagen 4.18 representa gráficamente todas las transiciones entre dichos estados. Esta representación visual resulta especialmente útil para comprender de forma global el comportamiento del sistema automatizado en sus distintas fases operativas. En la figura, los elementos de color verde corresponden al proceso de funcionamiento normal, los de color amarillo al proceso de parada o de puesta en marcha, y los de color rojo al proceso de detección de defectos o fallos. La imágen también cuenta con una leyenda explicando las acciones necesarias para transicionar entre estados.



- | | | | | | |
|---|---|---|---|---|--|
| 1 | Finalizar el ciclo y tener el botón "iniciar secuencia" desactivado | 2 | Botón "iniciar secuencia" pulsado en el HMI | 6 | Botón "descartar pieza" pulsado en el HMI |
| 2 | Pieza mal orientada detectada en la estación unión | 3 | Cambio a modo test en el HMI | 1 | Botón "parada de emergencia" pulsado en el HMI |
| 3 | Cambio a modo funcionamiento a en el HMI | 4 | Transición automática al estado inicial | 2 | Transición automática a parada |
| 1 | Botón "iniciar programa" pulsado en el HMI | 5 | Transición automática a parada debido a fallo | | |

Figura 4.18: Esquema de transiciones de la aplicación de la Guía Gemma en el sistema.

4.6. Funcionamiento cobot UR5e

El cobot UR5e es un brazo robótico colaborativo diseñado para trabajar de forma segura junto a operarios. En este proyecto, su función principal es comunicarse con los PLCs para ejecutar una secuencia de paletizado en la fase final del ciclo global del sistema. Una vez que la estación de unión completa su ciclo, el PLC 1 envía una señal al UR5e indicándole que inicie su secuencia. Al finalizar la operación de colocación de la pieza en el palé, el cobot notifica al PLC 1 que ha concluido, permitiendo así reiniciar el ciclo completo. El propósito de integrar el brazo en la ejecución del sistema es simular su uso dentro del proceso automático (aunque físicamente no se pudo integrar debido a la distancia entre estaciones) para ordenar las piezas , aportando así mayor realismo y complejidad al resultado final.

El cobot viene equipado con una pinza neumática como herramienta. Esta pinza permite sujetar, mover y soltar objetos de forma rápida y eficiente. Es ideal para tareas repetitivas como ensamblaje, paletizado, manipulación de piezas o carga de máquinas, especialmente cuando no se requiere un control preciso de la fuerza. Esta pinza se ha utilizado para la secuencia de paletizado, la cual sigue el esquema llamado **paletizado por capas**. Este tipo de paletizado por capas consiste en organizar productos sobre un palé formando niveles horizontales uniformes agrupando varios elementos alineados o alternos para lograr estabilidad [Álex Rossell, 2024]. Es ideal para cargas regulares y facilita la automatización, optimizando espacio, transporte y manipulación en entornos industriales [Álex Rossell, 2024].

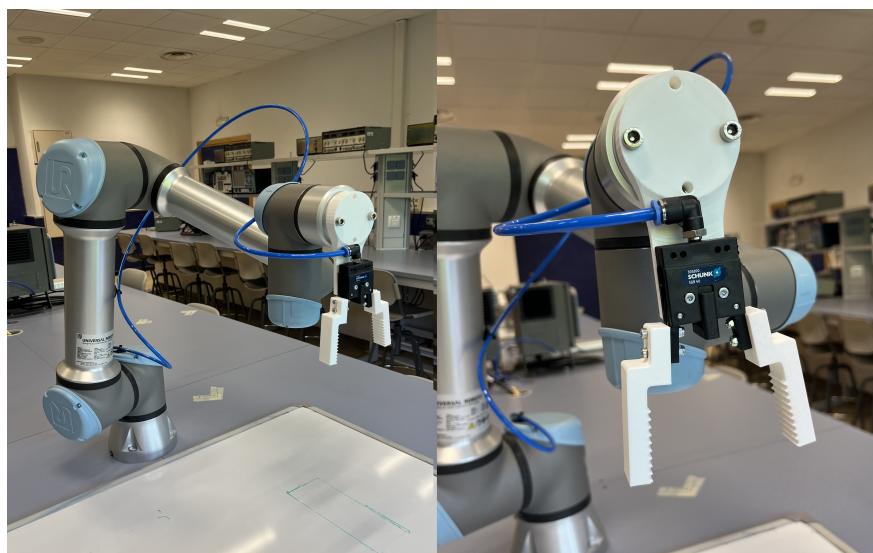


Figura 4.19: UR5e junto con la pinza como herramienta.

Como ya se ha visto en la sección 4.2, el PLC 1 le envía un mensaje al UR para iniciar el programa de paletizado. En este programa se ha utilizado la herramienta de paletizado integrada en Polyscope. Esta funcionalidad permite crear un palé de cualquier tipo de elemento indicando únicamente el número de capas deseadas y las coordenadas de la posición de cada uno. Tal como se ha mencionado anteriormente, se ha llevado a cabo un paletizado por capas, utilizando bricks de leche como elementos a colocar, simulando una secuencia real en un entorno industrial. Se han configurado cuatro capas en total: dos con una disposición determinada y las otras dos con una diferente, obteniendo el siguiente resultado:



Figura 4.20: Resultado final del paletizado de bricks de leche por el UR5e.

Las coordenadas de la posición de las piezas en el paletizado se han tomado de forma relativa a la coordenada del primer brick de leche. La primera coordenada se definió en la posición que se quería colocar el primer elemento del palé, y a partir de esta y tomándola de referencia, se han definido las 5 coordenadas restantes. Al utilizar el sistema de coordenadas del primer punto se han podido colocar elementos paralelos y perpendiculares al primero, ayudando a aportar gran estabilidad y orden al palé. Esta técnica también ha ayudado mucho a establecer la misma altura de todos los bricks de leche y asegurarse así que no se coloquen de forma uniforme. Adicionalmente, se han establecido algunos puntos de paso también utilizando este sistema de coordenadas para intentar establecer los movimientos lo más rectilíneos posibles. Seguidamente se muestra una tabla que refleja las coordenadas de los puntos de cada pieza, tomando como referencia la primera posición:

Coordenada	Sistema de coordenadas	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	RX (rad)	RY (rad)	RZ (rad)
Punto 1	Base	-333,63	270,96	70,04	0	3,15	0
Punto 2	Punto 1	0	-128	0	0	0	0
Punto 3	Punto 1	198,3	-82,3	0	0	0	1,57
Punto 4	Punto 1	-43,3	-24,8	0	0	0	4,715
Punto 5	Punto 1	90	0	0	0	0	0
Punto 6	Punto 1	90	-128	0	0	0	0

Cuadro 4.6: Coordenadas de colocación de las piezas en el palé utilizando el UR5e.

En cuanto a la comunicación PROFINET entre el UR y el PLC 1 ya explicada en la sección 4.2, se han utilizado los siguientes registros de propósito general para el intercambio de información en los mensajes entre ambos:

Nombre variable	Número de registro	Dirección para el UR5e	Dirección para el PLC	Tipo de dato
Start	GPbi [0]	Entrada	Salida	Bool
parada_emergencia	GPbi [1]	Entrada	Salida	Bool
pale_recogido	GPbi [2]	Entrada	Salida	Bool
num_capas	GPii [0]	Entrada	Salida	Int
piezas_paletizadas	GPio [0]	Entrada	Salida	Int
ejecutando_proc	GPbo [0]	Salida	Entrada	Bool
pale_completo	GPbo [1]	Salida	Entrada	Bool
pale_ACK	GPb0 [2]	Salida	Entrada	Bool

Cuadro 4.7: Registros utilizados para la comunicación entre el UR5e y el PLC 1.

En el cuadro 4.1 ya se ha explicado el objetivo y significado de la utilización de estos registros en el código del UR; sin embargo, en este apartado se va a profundizar aún más en su funcionamiento, describiendo detalladamente la lógica implementada, comentando el código del brazo robótico que se muestra a continuación, y explicando cómo se gestionan las señales de comunicación y sincronización de tareas.

```

# AntesDeIniciar
capa_controller := 0
contador_piezas := 0
num_capas := numero_capas*3
if num_capas>12
    num_capas:=12

# Programa de robot
Bucle num_capas>contador_piezas:
    Ajustar ejecutando_proc= False
    Ajustar pale_ACK= False
    Esperar: start:=Hi
    Ajustar piezas_paletizadas= contador_piezas + 1
    if contador_piezas + 1 >= num_capas:
        Ajustar pale_completo= True
    Else:
        Ajustar ejecutando_proc= True
    Moverj
        Punto_inicio
        Recogida_alto
# Coger pieza
Moverj
    Recogida_leche
    Ajustar_pinza := Encender
    Esperar: 1.5
    Recogida_alto
# Punto de paso de coordenada 3
if capa_controller == 2
    Moverj
        base_colocar_3
# Punto de paso de coordenada 4
Elseif capa_controller == 3:
    Moverj
        base_colocar_1
        base_colocar_2
# Punto de paso del resto de coordenadas
Else:
    Moverj
        base_colocar_1
# Coordenadas de las posiciones de las piezas
Pallet
    Irregular Pattern 1
        Item_1
        Item_2
        Item_3
    Irregular Pattern 2
        Item_4
        Item_5
        Item_6

```

Código 4.1: Programa del UR5e exportado desde Polyscope.

```

# Dentro de la capa actual
Capas
    for articulo in articulos:
        Moverj
            ToolActionPoint
        MoverL
            ToolActionPoint
        # Soltar la pieza
        Tool action
            Ajustar pinza= Apagar
            Esperar: 1.0
        MoverL
            if capa_controller != 3
                Exit
        # En la coordenada 4 subir de forma manual
        if capa_controller == 3:
            MoverL
                Salida_coord_4
        # Actualizar contadores
        capa_controller += 1
        contador_piezas += 1
        if capa_controller > 5:
            capa_controller := 0
        Ajustar ejecutando_proc= False
    # Fin del programa
    contador_piezas := 0
    capa_controller := 0
    Moverj
        Punto_inicio
    Esperar: pale_recogido:=Hi
        Ajustar pale_completo= False
        Ajustar pale_ACK= True
    Esperar: 3.0

```

Código 4.2: Programa del UR5e exportado desde Polyscope.

El código del UR5e define un programa de control que ejecuta un ciclo de recogida y colocación de piezas en distintas coordenadas de un pallé. Al inicio, se inicializan variables de control: `final_programa` se pone en falso, `capa_controller` y `contador_piezas` se inicializan en cero, y se calcula `num_capas` multiplicando `numero_capas` (información leída del registro GPii [0] cuyo valor es introducido por el operario en el HMI) por tres debido a que cada capa consta de tres elementos, limitándolo a un máximo de 12.

El programa del robot se repite en bucle constantemente, y dentro de él, el ciclo principal se ejecuta siempre y cuando `contador_capas` sea menor que `num_capas`. Dentro del bucle, primero se escriben a cero los registros `ejecutando_proc` y `pale_ACK`

para informar al PLC que el UR está a la espera de la orden para iniciar su secuencia. Cuando el PLC activa el registro `start`, el programa verifica si la pieza a colocar es la última del palé. En ese caso, se activa el registro `pale_completo` para indicar al sistema que, una vez colocada esta pieza, el palé debe ser retirado por estar completo mediante un mensaje en el HMI como se observa en la figura 4.21. Si no se trata de la última pieza, se activa el registro `ejecutando_proc` para indicar al PLC que el UR ha iniciado su ciclo. Además, se muestra en la pantalla del HMI un contador que indica el número de pieza colocada, comunicándolo mediante el registro `piezas_paletizadas`.

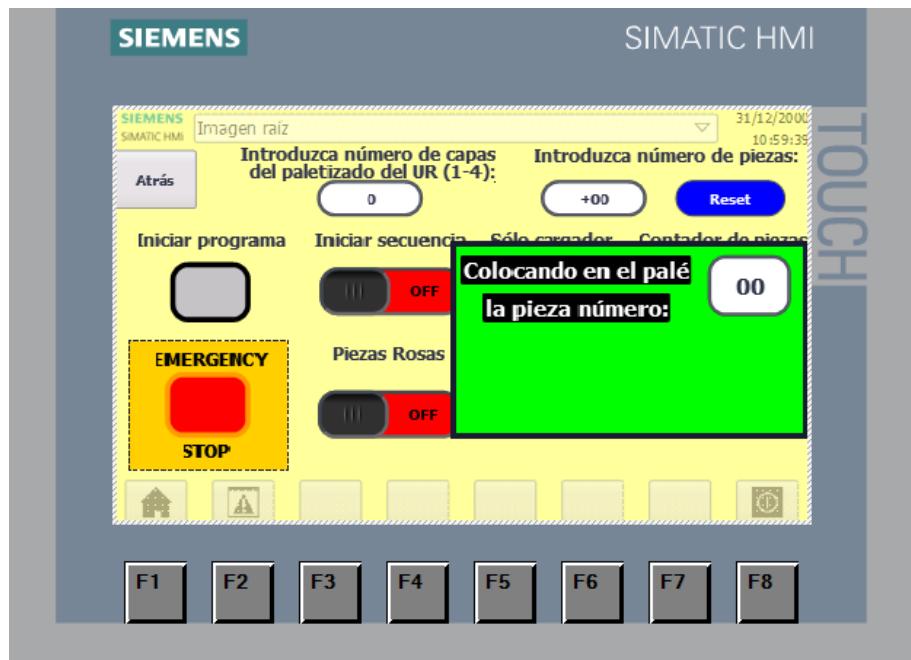


Figura 4.21: Mensaje del número pieza siendo colocada por el UR en la pantalla de funcionamiento del HMI.

Una vez la comunicación con el PLC realizada, el robot se mueve a la posición inicial, se aproxima a la posición de recogida de piezas, baja con cuidado hasta la pieza, activa la pinza para agarrarla, espera 1,5 segundos y la sube ligeramente. Siempre que el brazo lleva la pieza sujetada se mueve más lento que cuando no la tiene. Según el valor de `capa_controller` (la posición de la pieza actual), el robot ajusta su trayectoria para pasar por distintas coordenadas definidas para optimizar el recorrido. Estos puntos de paso que sigue el UR5e también han sido definidos utilizando la posición de la coordenada 1 de colocación de la pieza como referencia para conseguir trayectorias lo más seguras posibles.

Luego, mediante la estructura de datos del palé previamente definida, el robot coloca las piezas en posiciones específicas dentro de la capa actual. En el momento que el brazo coloca la pieza en su posición, abre la pinza y sube hacia arriba en línea recta para

no golpear a las demás piezas ya colocadas. En el caso de la pieza 4, el brazo ejecuta un movimiento programado manualmente para elevarse, ya que, al hacerlo de forma automática, el TCP quedaba demasiado cerca del codo del robot, lo que provocaba la activación del estado de parada de emergencia por razones de seguridad.

Después, se actualizan los contadores de piezas y capa, si se superan cinco capas, el controlador de capa se reinicia (ya han sido colocadas todas las piezas en las dos capas). También se desactiva el registro `ejecutando_proc` para indicar que la pieza ya ha sido colocada finalizando así el ciclo del UR.

Si el UR ya ha colocado todas las piezas en sus respectivas coordenadas y el pale está completo, se resetean los contadores, se mueve a su posición de inicio y se queda esperando a que el PLC le confirme que el pale ha sido retirado con éxito. En el momento que le llega el mensaje, cuando el operario presione el botón “pale recogido” en el HMI de la figura 4.21, le confirma la recepción del mismo a través de la activación del registro `pale_ACK` y esperará 3 segundos para asegurarse de que la información le llega correctamente al PLC. El estado de espera del UR cuando el pale ha sido completado ha sido diseñado para aportar seguridad al sistema, asegurándose de que no coloca una nueva pieza cuando todavía no se ha retirado el pale anterior, si se dispusiese de una cinta transportadora se podría retirar el pale automáticamente en vez de forma manual.

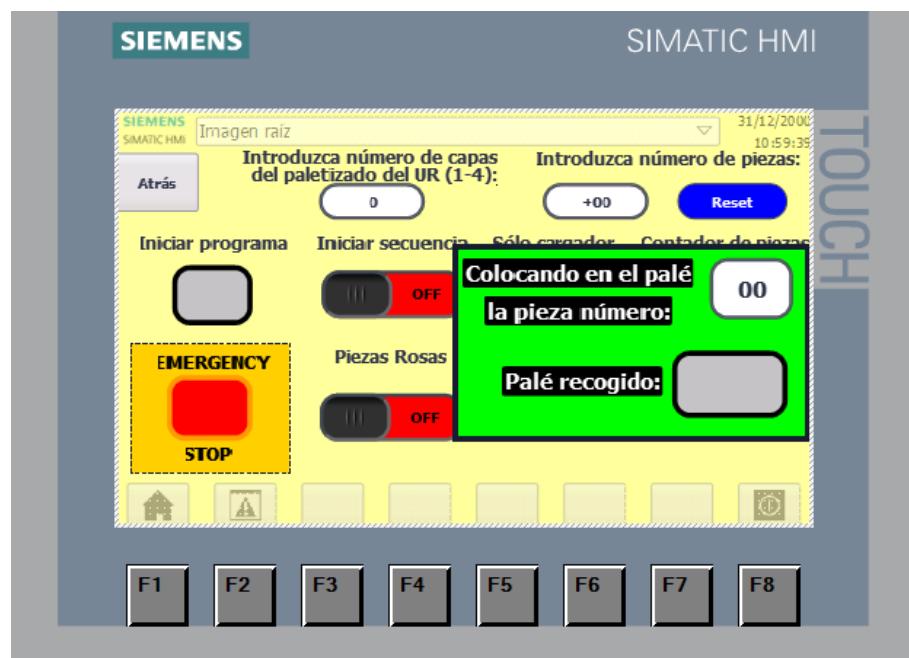


Figura 4.22: Botón para la confirmación de pale recogido en la pantalla de funcionamiento del HMI.

4.7. Resultado final

En este apartado se presentan los resultados finales obtenidos tras el desarrollo e implementación del proyecto. Se incluyen videos demostrativos en los que se puede observar el funcionamiento del sistema automático industrial en condiciones reales de operación. Estos videos ilustran el comportamiento del proceso completo, mostrando cómo el sistema responde a las diferentes señales de control, coordina sus componentes y ejecuta de forma autónoma las tareas para las que fue diseñado.

Funcionamiento estación distribución

Vídeo: <https://youtu.be/nUW7nG6U8uE>

En el vídeo se observa el funcionamiento de la estación distribución junto con la interfaz del HMI. El proceso inicia cuando se pulsa el botón “iniciar secuencia”, pero la pieza rosa no es aceptada por el sistema porque el botón “Piezas rosas” está desactivado. Una vez se activa, se observa como la pieza ahora si es aceptada, pero otra de otro material como la metálica no hasta que se activa su respectivo botón “Piezas metálicas”. Finalmente se cambia el valor del contador de piezas, pasando de permitir 8 piezas a 0, por lo que aunque se permita el paso de todo tipo de materiales de piezas, no lo harán ya que no cumplen la condición del número máximo de piezas permitido.

Descarte de pieza mal orientada

Vídeo: <https://youtu.be/pbC6FhVJhaw>

Este ejemplo se enfoca en el funcionamiento de la detección de la orientación de las piezas en la estación unión. En este caso una pieza rosa llega hasta el sensor capacitivo después de pasar los filtros de la estación distribución, pero al detectar que su orientación no es la correcta (está al revés y la tapa no puede colocarse encima de ella) es descartada. Cuando su orientación incorrecta es detectada por el sensor, salta un mensaje en el HMI mostrando el contador de piezas defectuosas y el botón para descartarla. Hasta que el botón no es pulsado el sistema se queda en espera, y una vez presionado, la pieza es descartada pasando por la estación distribución. Después se ejecuta otra vez la secuencia con la pieza bien orientada y esta vez si es aceptada por el sistema y continúa con su ciclo.

Secuencia de paletizado completa

Vídeo: https://youtu.be/vDtNlI_9-sc

El vídeo muestra la secuencia completa de paletizado realizada por el robot UR. En esta demostración se omite el proceso de las dos estaciones para enfocarse exclusivamente en el paletizado de las piezas, partiendo de la premisa de que estas llegan correctamente posicionadas para que el brazo las recoja. El sistema está configurado para realizar cuatro capas de paletizado, que es el máximo permitido. Se puede observar que las capas 1 y 3 presentan la misma disposición, mientras que las capas 2 y 4 tienen una configuración distinta que complementa a las anteriores, formando una estructura más sólida en comparación con otras configuraciones posibles.

Funcionamiento global del proceso

Vídeo: <https://youtu.be/w0F8mmgS1rM>

Este vídeo muestra el ciclo global del sistema funcionando correctamente, sin presentar ningún imprevisto. En él se integran las dos estaciones junto con el robot UR. Según la configuración establecida, el sistema acepta todo tipo de piezas, las cuales son dispensadas por el cargador, pasan por la estación de unión para la colocación de las tapas y finalmente llegan al extremo de la cinta transportadora. En un momento del vídeo se observa que, cuando la pieza está lista para recibir la tapa pero no hay ninguna disponible, el sistema permanece en espera hasta que una nueva tapa es suministrada para poder continuar con el proceso.

Cuando la pieza llega al final de la cinta, comienza la secuencia del robot UR, que simula la recogida y colocación de la pieza en la posición correspondiente para formar el pale. . En la pantalla del HMI aparece un mensaje sobre la secuencia en curso. Además, antes de finalizar este ciclo, se inicia un nuevo ciclo global, optimizando el tiempo al permitir que una nueva pieza entre al sistema mientras se coloca la anterior. El ciclo global se ejecuta tres veces hasta completar el paletizado (con solo una capa configurada), momento en el que aparece en el HMI el mensaje de "recoger el pale". En el vídeo se muestra cómo se pulsa dicho botón antes de que el UR coloque la última pieza (que realmente no lo hace porque no hubo tiempo de preparar el brik de leche a recoger), sin embargo, el sistema no responde hasta que el brazo termina de colocar la pieza. En ese instante, al pulsar el botón y confirmar la retirada del palé, el ciclo comienza nuevamente desde el inicio.

Capítulo 5

Conclusiones

La robótica industrial convierte lo imposible en rutinario

Anónimo

En este último capítulo se presenta una síntesis de todo el trabajo realizado a lo largo de este proyecto. Se repasan los principales problemas abordados, las soluciones propuestas para cada uno de ellos y los experimentos desarrollados para validar dichas soluciones. Este capítulo ofrece una visión global de los retos enfrentados, los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas del proceso de diseño, implementación y evaluación de la automatización industrial estudiada.

5.1. Conclusiones

Durante el desarrollo de este trabajo se ha logrado cumplir con todos objetivos propuestos: se ha llevado a cabo el montaje, conexión y validación del sistema completo en condiciones reales, comprobando su funcionamiento y fiabilidad. Se ha automatizado el funcionamiento de las estaciones didácticas mediante la programación en TIA Portal, implementando una lógica de control robusta. Se ha diseñado y configurado una interfaz HMI que permite al operario controlar el sistema y supervisar sus estados en tiempo real, facilitando su trabajo y proporcionando una abstracción de bajo nivel que simplifica la interacción con los procesos automatizados. Se ha integrado con éxito el robot colaborativo UR5e en el flujo de trabajo, realizando operaciones de paletizado coordinadas. Además, se ha creado una red de comunicaciones PROFINET entre PLCs, HMI y el cobot, asegurando un intercambio de datos fiable y continuo. Por último, la lógica de control secuencial se ha desarrollado utilizando Grafset y la guía GEMMA como referencia metodológica, integrándose de manera coherente con el resto de la programación y contribuyendo a garantizar un funcionamiento ordenado y seguro del sistema.

A lo largo de este trabajo, se ha conseguido desarrollar un sistema de automatización integral que reúne control, comunicación y robótica colaborativa, lo que representa un avance significativo respecto al estado inicial, donde los procesos estaban fragmentados y carecían de integración eficiente. La implementación de una red PROFINET y la utilización de metodologías estructuradas como Grafcet y GEMMA han permitido mejorar la coordinación y fiabilidad del sistema, facilitando su escalabilidad y mantenimiento. Además, se ha logrado programar y dejar preparadas las estaciones físicas en el laboratorio para que puedan servir como plataforma de pruebas y aprendizaje para futuras generaciones de estudiantes que cursen asignaturas relacionadas con este ámbito, facilitando su comprensión de la materia y ofreciéndoles un entorno práctico para desarrollar sus competencias.

No obstante, el sistema presenta ciertas limitaciones, como la separación física entre las estaciones y el robot colaborativo, lo que impide una integración completa del brazo robótico en el proceso de producción y limita su capacidad para recoger las piezas utilizadas en las estaciones durante la secuencia de paletizado. Además, la complejidad de la integración entre diferentes dispositivos obliga a un conocimiento especializado para su operación y mantenimiento. A nivel personal, este proyecto ha sido una oportunidad valiosa para profundizar en la programación industrial de PLCs y del brazo robótico, protocolos de comunicación y diseño de interfaces, consolidando habilidades prácticas y teóricas que serán fundamentales en mi desarrollo profesional.

De cara al futuro, este trabajo podría ampliarse integrando nuevas estaciones de producción o adaptando el sistema para entornos industriales reales con mayor variabilidad y exigencia de seguridad tanto física como virtual. También sería posible profundizar en la optimización de las secuencias de paletizado y en la comunicación entre dispositivos para obtener ciclos de producción más cortos y eficientes. Por otro lado, se podrían explorar técnicas de inteligencia artificial aplicadas al control del sistema y al reconocimiento de objetos como las piezas utilizadas, abriendo así nuevas líneas de investigación que conectan la automatización industrial con los desarrollos más recientes en Industria 4.0.

Bibliografía

[aula 21, 2019] aula 21 (2019). Sistema mes: La clave para una producción industrial eficiente. Accessed on April 7, 2025.

[aula 21, 2020] aula 21 (2020). Qué es un bus de campo y para qué sirve. Accessed on April 23, 2025.

[aula21, 2023] aula21 (2023). Qué es un sistema scada, para qué sirve y cómo funciona. Accessed on May 18, 2025.

[Autexopen, 2022] Autexopen (2022). Qué es un sistema scada? información completa. Accessed on May 18, 2025.

[Automatizacionindustrial360, 2020] Automatizacionindustrial360 (2020). Ventajas y desventajas de la automatización industrial. Accessed on March 25, 2025.

[Centro de la formación técnica para la industria, 2021] Centro de la formación técnica para la industria (2021). Redes de comunicación industrial: todo lo que debes saber. Accessed on April 23, 2025.

[Centro de la formación técnica para la industria, 2024] Centro de la formación técnica para la industria (2024). Automatización industrial: Qué es y cómo funciona. Accessed on March 10, 2025.

[Computing, 2023] Computing (2023). Robótica industrial: Qué es, usos y aplicacioness. Accessed on March 26, 2025.

[Data Bridge Market Research, 2025] Data Bridge Market Research (2025). Informe de análisis del tamaño, la participación y las tendencias del mercado global de automatización industrial: panorama general del sector y pronóstico hasta 2032. Accessed on May 18, 2025.

[Esneca, 2020] Esneca (2020). Tipos de robots industriales: clasificación y características. Accessed on April 5, 2025.

- [esneca, 2024] esneca (2024). ¿cuáles son las partes de un robot? Accessed on May 26, 2025.
- [ferrovial, 2022] ferrovial (2022). Robótica. Accessed on May 6, 2025.
- [Frank Ebel, 2020a] Frank Ebel, M. E. (2020a). Distributing/conveyor station. Documento en formato PDF.
- [Frank Ebel, 2020b] Frank Ebel, M. E. (2020b). Joining station. Documento en formato PDF.
- [GSL industrias, 2021] GSL industrias (2021). ¿qué es un plc y cómo funciona? Accessed on April 17, 2025.
- [I-MAS, 2022] I-MAS (2022). La evolución de la automatización industrial: del 2005 a la actualidad. Accessed on March 12, 2025.
- [infoPLC.net, 2020] infoPLC.net (2020). Lenguaje grafcat - sfc. Accessed on April 17, 2025.
- [ISO, 2021] ISO (2021). iso 8373:2021(en) robotics — vocabulary. Accessed on June 4, 2025.
- [Iñigo Gútiez, 2024] Iñigo Gútiez (2024). Lenguaje kop o ladder: el más usado para programar plc. Accessed on April 19, 2025.
- [José A. Rodríguez Mondéjar, 2022] José A. Rodríguez Mondéjar (2022). Guía gemma. Accessed on April 23, 2025.
- [Maisvch, 2023] Maisvch (2023). Ethernet industrial frente a bus de campo: cómo navegar por el futuro de la comunicación industrial. Accessed on April 23, 2025.
- [MCR, 2016] MCR (2016). Ventajas y desventajas de la automatización industrial. Accessed on March 25, 2025.
- [MME, 2023] MME (2023). Brazo robótico industrial: características y aplicaciones. Accessed on April 10, 2025.
- [MONDRAGON ENRIQUEZ, 2023] MONDRAGON ENRIQUEZ (2023). Línea de tiempo: Evolución de la robótica industrial. Accessed on April 10, 2025.
- [neobotikstg, 2021] neobotikstg (2021). ¿qué tipos de automatización industrial hay y cuáles necesitas? Accessed on March 16, 2025.

[Omnielectric Web, 2024] Omnielectric Web (2024). La pirámide de automatización: Clave para la integración de sistemas en plantas industriales. Accessed on April 29, 2025.

[PRECISION, 2023] PRECISION (2023). La evolución de las redes industriales. Accessed on April 29, 2025.

[Robots, 2019] Robots, U. (2019). Universal robots e-series manual de usuario. Documento en formato PDF.

[SDI, 2022] SDI (2022). ¿qué es la pirámide de la automatización? Accessed on March 10, 2025.

[Sicma21, 2021] Sicma21 (2021). Robots industriales: tecnología y aplicaciones. Accessed on April 5, 2025.

[Siemens, 2019] Siemens (2019). Step 7 y wincc engineering v16. Documento en formato PDF.

[Siemens, 2024] Siemens (2024). Human machine interface systems/pc-based automation. Accessed on May 6, 2025.

[Siemens, 2024] Siemens (2024). Paneles de operador basic panels 2nd generation. Documento en formato PDF.

[Siemens, 2025a] Siemens (2025a). 6es7215-1bg40-0xb0. Accessed on May 26, 2025.

[Siemens, 2025b] Siemens (2025b). 6gk5005-0ga10-1ab2. Accessed on June 23, 2025.

[Sunt Automatización, 2024] Sunt Automatización (2024). 3 niveles del proceso de automatización industrial. Accessed on March 16, 2025.

[Unir, 2021] Unir (2021). Robótica industrial: concepto, objetivo y principales aplicaciones. Accessed on March 26, 2025.

[Universal Robots, 2024] Universal Robots (2024). Profinet how-to guide e-series. Accessed on June 24, 2025.

[Universal Robots, 2025a] Universal Robots (2025a). Descubre polyscope. Accessed on May 28, 2025.

[Universal Robots, 2025b] Universal Robots (2025b). Descubre polyscope. Accessed on May 28, 2025.

[Universal Robots, 2025c] Universal Robots (2025c). Descubre polyscope. Accessed on May 28, 2025.

[Álex Rossell, 2024] Álex Rossell (2024). Paletización: qué es, tipos que existen y paletizadores. Accessed on June 17, 2025.

Apéndice A

Anexo

A.1. Ecuaciones lógicas estación distribución

Ecuaciones de transición de etapas

Etapa	Set	Reset
E0	FSM + Iniciar_programa	E1 + Parada_emergencia
E1	Inicio_HMI * (E0 + (t_inicio * (E17 + E20+ E22 + E23)))	E2 + E4 + Parada_emergencia
E2	E1 * Inicio_cinta * Cargador_HMI	E3 + Parada_emergencia
E3	E2 * Tiempo_separador	E7 + Parada_emergencia
E4	E1 * Pieza_cragador * <u>Cargador_HMI</u>	E5 + Parada_emergencia
E5	E4 + (Corredera_extendida * Medio_cinta)	E6 + Parada_emergencia
E6	E5 * Corredera_retraida	E7 + Parada_emergencia
E7	(E3 + E6) * Identificador_piezas	E8 + Parada_emergencia
E8	E7 * Tiempo_sensor_piezas	E9 + E12 + Parada_emergencia
E9	E8 * espera_sensor_piezas * Contador_pieza * (Pieza_metalica_HMI * Pieza_metalica * Pieza_rosa) + (Pieza_rosa_HMI * <u>Pieza_metalica</u> * Pieza_rosa) + (Pieza_negra_HMI * <u>Pieza_metalica</u> * <u>Pieza_rosa</u>))	E10 + Parada_emergencia
E10	E9 * <u>Final_cinta</u>	E11 + Parada_emergencia
E11	E10 * Comunicacion_PLC_-1.Receive_fase_1	E14 + E18 + Parada_emergencia

Cuadro A.1: Ecuaciones de transición de estados de la estación distribución.

Etapa	Set	Reset
E12	E8 * $\overline{E9}$ * espera_sensor_piezas_2	E13 + Parada_emergencia
E13	E12 * tiempo_separador_ret	E23 + Parada_emergencia
E14	E11 * Comunicacion_PLC_- 1.Pieza_mal_orientada	E15 + Parada_emergencia
E15	E14 * $\overline{\text{Final_cinta}}$	E16 + Parada_emergencia
E16	E15 * T_sep_2	E17 + Parada_emergencia
E17	E16 * Inicio_cinta	E1 + Parada_emergencia
E18	E11 * Comunicacion_PLC_- 1.Secuencia_acabada	E19 + Parada_emergencia
E19	E18 * UR_IN.Bits.Register[0] * t_espera	E20 + E21 + Parada_emergencia
E20	E19 * UR_IN.Bits.Register[0]	E1 + Parada_emergencia
E21	E19 * UR_IN.Bits.Register[1]	E22 + Parada_emergencia
E22	E21 * UR_IN.Bits.Register[2]	E1 + Parada_emergencia
E23	E13 * Inicio_cinta	E1 + Parada_emergencia

Cuadro A.2: Ecuaciones de transición de estados de la estación distribución.

Ecuaciones de ejecución de acciones

Acción	Lógica de activación
Avance_cinta	E2 + E3 + E6 + E7 + E9 + E10
Retroceso_cinta	E12 + E13 * E14 + E15 + E16
Separador	E2 + E13 + E16
Avance_corredera	E4

Cuadro A.3: Ecuaciones lógicas de las acciones de la estación distribución.

A.2. Ecuaciones lógicas estación unión

Ecuaciones de transición de etapas

Etapa	Set	Reset
E0	FSM + Iniciar_programa_2	E1 + Parada_emergencia_2
E1	E0 + (Comunicacion_PLC_2.Secuencia_ACK * E15) + (Comunicacion_PLC_2.Pieza_mal_ACK * E18)	E2 + Parada_emergencia_2
E2	E1 * Comunicacion_PLC_2.Receive_fase_1	E3 + Parada_emergencia_2
E3	E2 * (Inicio_cinta_1 + T_pieza_negra)	E4 + Parada_emergencia_2
E4	E3 * ((Medio_cinta_1 * T_espera) + (T_pieza_negra_2))	(E5 * E13) + E16 + Parada_emergencia_2
E5	E4 * T_orientacion_2 ((Comunicacion_PLC_2.Tipo_de_pieza ≤ 2 * Orientacion_correcta) + (Comunicacion_PLC_2.Tipo_de_pieza == 3 * Orientacion_correcta))	E6 + Parada_emergencia_2
E6	E5 * T_derivador	E7 + Parada_emergencia_2
E7	E6 * E14 * Carro_extendido * T_E7	E8 + Parada_emergencia_2
E8	E7 * Ventosa_arriba	E9 + Parada_emergencia_2
E9	E8 * Pieza_sucionada	E10 + Parada_emergencia_2
E10	E9 * Ventosa_arriba	E11 + Parada_emergencia_2
E11	E10 * (Carro_retraido + T_carro)	E12 + Parada_emergencia_2
E12	E11 * Ventosa_arriba	E17 + Parada_emergencia_2
E13	E4 * ((Comunicacion_PLC_2.Tipo_de_pieza ≤ 2 * Orientacion_correcta) + (Comunicacion_PLC_2.Tipo_de_pieza == 3 * Orientacion_correcta))	E14 + Parada_emergencia_2

Cuadro A.4: Ecuaciones de transición de estados de la estación unión.

Etapa	Set	Reset
E14	E13 * Final_cinta_2 * T_E14	E7 + Parada_emergencia_2
E15	E17 * $\overline{\text{Final_cinta_1}}$	E1 + Parada_emergencia_2
E16	E4 * $\overline{E5}$ * T_orientacion * (Comunicacion_PLC_2.Tipo_de_pieza \leq 2 * Orientacion_correcta) + (Comunicacion_PLC_2.Tipo_de_pieza == 3 * Orientacion_correcta)	E18 + Parada_emergencia_2
E17	E12 * T_tapa	E15 + Parada_emergencia_2
E18	E16 * Boton_HMI_pieza	E1 + Parada_emergencia_2

Cuadro A.5: Ecuaciones de transición de estados de la estación unión.

Ecuaciones de ejecución de acciones

Acción	Lógica de activación
Avance_cinta_1	E2 + E3 + E5 + E17
Avance_cinta_2	E13
Retroceso_cinta_1	E18
Extender_separador	E5 + E6 + E7 + E8 + E9 + E10 + E11
Retraer_tope	E5
Avance_carro	E6
Retroceso_carro	E10
Ventosa_abajo	E7 + E8 + E10
Vacio_conectado	E8 + E9 + E10 + E11

Cuadro A.6: Ecuaciones lógicas de las acciones de la estación distribución.