



Escola Politécnica de Enxeñaría de Ferrol

UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Diseño, desarrollo y automatización de una planta virtual

Trabajo Fin de Máster 24/25

Máster en Informática Industrial y Robótica

AUTOR: NOELIA SUÁREZ TUÑAS

TUTOR: FRANCISCO ZAYAS GATO
ANTONIO JAVIER DÍAZ LONGUEIRA

TFM N°: 2425_MIIR_13

FECHA: SEPTIEMBRE 2025

Índice

Resumen	3
1 Introducción	6
1.1 Motivación	6
1.2 Alcance y objetivos del proyecto	7
1.3 Contexto y estado del arte	8
2 Desarrollo del proyecto	10
2.1 Metodologías	10
2.2 Planificación	10
2.3 Herramientas software	12
2.3.1 Factory I/O	12
2.3.2 Twincat	12
2.3.3 Comunicación entre entornos	13
3 Diseño planta industrial	20
4 Desarrollo software	30
5 Conclusiones	43
6 Bibliografía	44
7 Documentación de partida	45

Índice de figuras

1	Atributo para las variables de Twincat.	15
2	Descarga de archivos TMC.	16
3	Incorporar licencia TF6100.	16
4	Comandos en consola de Factory para OPC UA.	17
5	Acceso a los drivers de Factory I/O.	18
7	Selección del Servidor OPC en Factory I/O.	18
6	Selección del Client de OPC en Factory.	19
8	Cuadro de control en Factory I/O.	22
9	Sensor de visión en Factory I/O.	22
10	Báscula transportadora en Factory I/O.	23
11	Cilindro en Factory I/O.	23
12	Cintas de carga ligera Factory I/O.	23
13	Sensor fotoeléctrico en Factory I/O.	24
14	Escena filtrado en Factory I/O.	24
15	Escena prelavado, lavado y llenado en Factory I/O.	25
16	Barras posicionadoras en Factory I/O.	26
17	Escena ensamblado en Factory I/O.	26
18	Cinta carga pesada en Factory I/O.	27
19	Mesa giratoria en Factory I/O.	27
20	Escena paletizado en Factory I/O.	28
21	Cinta de carga pesada en Factory I/O.	28
22	Escena almacen en Factory I/O.	29
23	Etapas de la planta industrial.	30
24	Diagrama de flujo de la etapa de filtrado.	32
25	HMI de la etapa de filtrado.	33
26	HMI de la etapa de prelavado, lavado y llenado.	36
27	Diagrama de flujo de la etapa de prelavado, lavado y llenado.	36
28	HMI de la etapa de sellado.	38
29	Diagrama de flujo de la etapa de elaboración de producto final.	38
30	HMI de la etapa de paletizado.	39
31	Diagrama de flujo de la etapa de paletizado.	40
32	HMI de la etapa de paletizado.	42
33	Diagrama de flujo de la etapa de almacén.	42

Resumen

Este Trabajo Fin de Máster presenta el diseño, desarrollo e implementación de una planta industrial virtual, que simula un proceso productivo completo desde la recepción y filtrado de materiales hasta el llenado, sellado, paletizado y almacenamiento. Para ello, se utilizan las herramientas Factory I/O, como entorno de simulación, y TwinCAT 3, como plataforma de control en tiempo real. La comunicación entre ambos entornos se realiza mediante el protocolo estándar OPC UA, garantizando la interoperabilidad y la conectividad necesaria en el marco de la Industria 4.0.

El sistema incorpora un cuadro de control centralizado que permite gestionar las órdenes operativas mediante botones y un selector de modo. Este último habilita dos modos de funcionamiento: modo automático, donde la planta ejecuta la lógica programada de forma continua; y modo manual, en el que el operario puede controlar directamente la ejecución de los ciclos completos, facilitando tareas de prueba y mantenimiento. Además, se desarrollaron interfaces HMI (Human-Machine Interface) que permiten la supervisión en tiempo real de variables críticas, alarmas y estados de cada etapa del proceso, mejorando la interacción y el control del sistema.

La simulación ofrece un entorno seguro, flexible y realista, que contribuye a la formación en automatización industrial y a la validación de estrategias de control. Los resultados demuestran que esta plataforma virtual es una herramienta eficaz para la experimentación, formación y desarrollo de soluciones digitales en el ámbito industrial, favoreciendo la transición hacia la digitalización y la Industria 4.0.

Resumo

Este Traballo Fin de Máster presenta o deseño, o desenvolvemento e a implementación dunha planta industrial virtual que simula un proceso produtivo completo desde a recepción e filtrado de materiais ata o churrando, sellado, paletizado e almacenamento. Para isto, empreganse as ferramentas Factory I/O, como contorno de simulación, e TwinCAT 3, como plataforma de control en tempo real. A comunicación entre ambos contornos realizaase mediante o protocolo estándar OPC UA, garantindo a interoperabilidade e a conectividade necesarias no marco da Industria 4.0.

O sistema incorpora un cadro de control centralizado que permite xestionar as ordes operativas mediante botóns así como un selector de modo. Este último habilita dous modos de funcionamento: modo automático, onde a planta executa a lóxica programada de forma continua; e modo manual, no que o operario pode controlar a execución de ciclos completos, facilitando tarefas de proba e mantemento. Ademais, deseñáronse interfaces HMI (Human-Machine Interface) que permiten a supervisión en tempo real de variables críticas, alarmas e estados de cada etapa do proceso, mellorando a interacción e o control do sistema.

A simulación ofrece un contorno seguro, flexible e realista, que contribúe á formación

en automatización industrial e á validación de estratexias de control. Os resultados amosan que esta plataforma virtual é unha ferramenta eficaz para a experimentación, formación e desenvolvemento de solucíons dixitais no ámbito industrial, favorecendo a transición cara á dixitalización e a Industria 4.0.

Abstract

This Master's Thesis presents the design, development, and implementation of a virtual industrial plant that simulates a complete production process from material reception and filtration to filling, sealing, palletizing, and storage. To achieve this, Factory I/O is used as the simulation environment, and TwinCAT 3 as the real-time control platform. Communication between both environments is carried out via the standard OPC UA protocol, ensuring interoperability and connectivity within the Industry 4.0 framework.

The system features a centralized control panel that manages operational commands through start, stop, reset, emergency stop buttons, and a mode selector. The latter enables two operating modes: automatic mode, where the plant executes the programmed logic continuously; and manual mode, where the operator controls the execution of the entire cycle, facilitating testing and maintenance tasks. Additionally, HMI (Human-Machine Interface) screens were developed to enable real-time monitoring of critical variables, alarms, and process states, improving system interaction and control.

The simulation provides a safe, flexible, and realistic environment that contributes to training in industrial automation and the validation of control strategies. Results demonstrate that this virtual platform is an effective tool for experimentation, training, and developing digital solutions in the industrial field, supporting the transition toward digitalization and Industry 4.0.

1. Introducción

La creciente digitalización de los procesos industriales y la aparición de la Industria 4.0 han impulsado el uso de tecnologías de simulación y comunicación estandarizada para optimizar el diseño, la puesta en marcha y la monitorización de plantas industriales. En este contexto, surge la necesidad de contar con entornos virtuales que permitan recrear instalaciones industriales de manera realista, facilitando tanto la formación en automatización como la validación de estrategias de control sin necesidad de recurrir a costosos prototipos físicos.

El presente trabajo se centra en el diseño y simulación de una planta industrial mediante el software Factory I/O, su control a través del entorno TwinCAT 3 y la integración de la comunicación mediante el protocolo OPC UA. De este modo, se busca ilustrar cómo estas herramientas contribuyen a comprender y aplicar conceptos clave en automatización y digitalización industrial.

En los próximos apartados se presentarán la motivación del proyecto, así como su alcance y objetivos, y una breve contextualización que marcarán la hoja de ruta del desarrollo posterior.

1.1. Motivación

La motivación principal para llevar a cabo este proyecto radica en la posibilidad de simular y controlar procesos industriales complejos de manera segura y eficiente.

En primer lugar, la simulación antes de la implementación física permite probar el funcionamiento completo de la planta sin riesgos para la maquinaria o para los operarios, lo que reduce costes y tiempo asociado a pruebas en el entorno real. Además, este enfoque facilita iteraciones rápidas sobre el diseño y la programación, optimizando la secuencia de operaciones antes de su ejecución física.

Otro aspecto importante es la introducción a la automatización industrial, ya que el software proporciona un entorno controlado en el que tanto estudiantes como profesionales pueden familiarizarse con la lógica de control, la interacción entre sensores y actuadores, y la comunicación entre distintos sistemas automatizados. Este proyecto también contribuye al desarrollo de habilidades prácticas y teóricas, integrando conocimientos de programación, gestión de procesos, y fomentando la capacidad de diseñar o depurar sistemas de control entre otras.

La seguridad también es un factor clave, todas las pruebas se realizan en un entorno simulado, evitando la exposición a situaciones de riesgo que podrían afectar a los operarios o dañar la maquinaria y permitiendo ensayar incluso escenarios límite, como fallos de sensores o paradas de emergencia, sin consecuencias reales.

Por último, la flexibilidad para futuras aplicaciones hace que esta plataforma pueda adaptarse a otros procesos industriales similares, como paletizado, transporte o llenado, convirtiéndose en una base versátil para el aprendizaje y el desarrollo de nuevas soluciones automatizadas.

1.2. Alcance y objetivos del proyecto

Alcance del proyecto

El alcance de este proyecto comprende el diseño, simulación y control de una planta industrial virtual utilizando el software Factory I/O como entorno de modelado y TwinCAT 3 como plataforma de programación y control en tiempo real. Además, se aborda la integración del protocolo OPC UA como estándar de comunicación para la transmisión de datos entre sistemas, lo cual permite la conexión de la planta con otras aplicaciones externas y abre la posibilidad de desarrollar sistemas de monitorización o análisis en el marco de la Industria 4.0.

El proyecto se limita a una planta simulada, por lo que no se incluye la implementación física de los equipos ni la puesta en marcha sobre hardware real. Sin embargo, la simulación proporciona un entorno suficientemente realista para estudiar el comportamiento del sistema, validar la lógica de control y analizar escenarios de funcionamiento, incluyendo condiciones de fallo o emergencia.

Asimismo, el trabajo contempla el desarrollo de una documentación técnica que recoge las fases de diseño, programación y pruebas, de manera que sirva de referencia tanto para el aprendizaje académico como para posibles ampliaciones en proyectos futuros.

Objetivos del proyecto

Objetivo general

Desarrollar una planta industrial virtual que permita simular, controlar y monitorizar procesos automatizados, integrando tecnologías de simulación (Factory I/O), control (TwinCAT 3) y comunicación estandarizada (OPC UA), con el fin de proporcionar una herramienta práctica para el aprendizaje y la experimentación en el ámbito de la automatización y la Industria 4.0.

Objetivos específicos

- Diseñar y configurar una planta industrial en Factory I/O, representando un proceso productivo realista.
- Implementar la lógica de control en TwinCAT 3, utilizando lenguajes estándar PLC.
- Integrar la comunicación OPC UA para permitir el intercambio de datos entre la planta y aplicaciones externas.
- Desarrollar un HMI sencillo que permita visualizar el estado del sistema, monitorizar variables críticas y ejecutar pruebas de control de forma interactiva.
- Realizar pruebas de validación en el entorno simulado para comprobar la robustez del sistema ante diferentes escenarios operativos.
- Documentar de manera estructurada las fases del proyecto, incluyendo diseño, programación y pruebas.

Limitaciones

También es necesario comentar algunas de las limitaciones de este proyecto inherentes a las herramientas utilizadas para este proyecto, en especial a Factory I/O y su entorno de simulación:

- **Biblioteca de componentes predeterminada:** Factory I/O cuenta con una selección de partes industriales comunes (cintas transportadoras, sensores ópticos/inductivos, tanques, pick-and-place, etc.). Sin embargo, no incluye elementos como *barriles, estructuras complejas o grúas específicas*, lo que limita la fidelidad de simulación para ciertos procesos reales.
- **Incapacidad para importar partes personalizadas:** Actualmente no es posible crear o importar elementos 3D personalizados. Esto impide simular equipos específicos de una planta real o mecánicas industriales particulares.
- **Límite de puntos de E/S:** La herramienta impone una restricción sobre el número de señales físicas que se pueden simular simultáneamente; por ejemplo, alrededor de 256 digitales y 64 analógicas según el driver. Esto puede ser insuficiente para réplicas de instalaciones complejas con numerosos sensores y actuadores.
- **Sensibilidad al rendimiento del hardware:** La velocidad de respuesta y estabilidad del entorno simulado puede verse afectada por el rendimiento del equipo, especialmente en escenas complejas. Los retrasos o latencias por CPU limitado pueden afectar la precisión temporal del control real.
- **Ausencia de factores físicos reales:** El entorno virtual no reproduce efectos como la fatiga mecánica, variaciones de fricción, desgaste de componentes o fluctuaciones de sensores; aspectos que sí influyen significativamente en una planta real.

Estas limitaciones implican que, aunque la simulación permite validar la lógica de control de forma segura y eficiente, su equivalencia con la realidad del entorno industrial es aproximada.

1.3. Contexto y estado del arte

La automatización industrial constituye uno de los pilares fundamentales en la evolución de los sistemas productivos modernos. Desde la aparición de los primeros mecanismos automáticos en la Revolución Industrial hasta el desarrollo de los actuales sistemas ciberfísicos, las industrias han buscado optimizar sus procesos mediante la reducción de intervención humana, el aumento de la eficiencia y la mejora en la seguridad de las operaciones.

Un punto de inflexión se produjo en la década de 1960 con la creación del primer *Controlador Lógico Programable* (PLC, por sus siglas en inglés). Estos dispositivos sustituyeron la lógica cableada basada en relés por una lógica programable más flexible, fiable y fácilmente reconfigurable. Desde entonces, los PLC se han convertido en el estándar de facto en la automatización industrial, gracias a su robustez, modularidad y capacidad para operar en entornos exigentes.

Con el paso del tiempo, la evolución tecnológica permitió que los PLC incorporaran nuevas funcionalidades: comunicación mediante redes industriales, capacidad de integración con sistemas SCADA y MES, e interoperabilidad con distintos protocolos. Paralelamente, el desarrollo del software de simulación y los entornos virtuales ha impulsado el concepto de *gemelo digital*, ofreciendo la posibilidad de validar y optimizar la lógica de control sin necesidad de prototipos físicos.

En la actualidad, el paradigma de la *Industria 4.0* está redefiniendo la forma en que se diseñan y gestionan las plantas industriales. Este enfoque integra automatización avanzada, comunicación en tiempo real y análisis de datos, con el objetivo de lograr procesos más eficientes, flexibles y sostenibles. En este contexto, tecnologías como *OPC UA* han surgido como estándares de comunicación abiertos y seguros, garantizando la interoperabilidad entre dispositivos heterogéneos y facilitando la integración con plataformas en la nube o sistemas de supervisión avanzada.

Asimismo, herramientas de desarrollo como *TwinCAT 3* permiten programar la lógica de control en lenguajes estandarizados IEC 61131-3, ejecutar aplicaciones en tiempo real sobre hardware generalista y desplegar soluciones escalables en entornos industriales. Por su parte, los entornos de simulación como *Factory I/O* ofrecen escenarios virtuales en tres dimensiones que replican procesos productivos con un alto nivel derealismo, contribuyendo a la formación, el prototipado y la validación de sistemas automatizados.

Además, la simulación virtual de plantas industriales y la validación de estrategias de control permiten reducir costes y riesgos asociados a la implementación física, posibilitando iteraciones rápidas y seguras sobre el diseño y programación. La interoperabilidad garantizada por protocolos abiertos como *OPC UA* es crucial para integrar sistemas diversos y gestionar datos en entornos complejos, facilitando la adopción de soluciones escalables y seguras. No obstante, los retos en la representación fiel de fenómenos físicos, la gestión de grandes volúmenes de datos y la ciberseguridad siguen siendo áreas activas de investigación y desarrollo en la automatización avanzada.

De esta manera, la convergencia entre PLCs, protocolos de comunicación estandarizados, entornos de simulación y plataformas de control en tiempo real representa el marco actual de la automatización industrial, en el que se sitúa el presente Trabajo Fin de Máster.

2. Desarrollo del proyecto

En este capítulo se abordará y detallará todo lo relacionado con el planteamiento, desarrollo e implementación del software necesario para el proyecto. Se describirá el material requerido para llevar a cabo esta tarea, así como los procesos y estrategias empleados en cada etapa del desarrollo. Se explicará cómo se ha planificado y estructurado el desarrollo del software, incluyendo la selección de herramientas y tecnologías, la definición de requisitos y la arquitectura del sistema. Además, se proporcionará una visión general del flujo de trabajo seguido, desde la concepción de la idea hasta la entrega del producto final, destacando los principales hitos y desafíos encontrados en el camino.

2.1. Metodologías

En esta sección, se explicarán las metodologías seguidas para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto. Se detallarán tanto las estrategias a nivel individual como las colaborativas con los profesores directores del proyecto.

Metodología a Nivel Individual

Para la parte individual, se optó por utilizar GitHub como plataforma para el control de versiones. Esto garantizó un registro detallado de todos los cambios realizados en el código y los archivos del proyecto, minimizando el riesgo de pérdida de información y facilitando el acceso a las distintas versiones generadas a lo largo de todo el período de desarrollo del proyecto. Además, se llevó a cabo una documentación de cada prueba realizada, con descripciones de los procedimientos, los resultados obtenidos y observaciones. Junto con la documentación se recopilaron también pruebas fotográficas y de video sobre las pruebas realizadas y los comportamientos obtenidos, permitiendo una mayor claridad del progreso y desarrollo del proyecto.

Metodología en Colaboración con los Profesores

Las principales estrategias de trabajo colaborativo incluyeron reuniones presenciales, siempre que fue posible, y se realizaron reuniones cada dos semanas, dependiendo de la disponibilidad de cada parte. Estas reuniones permitieron discutir el progreso, revisar resultados y planificar las siguientes etapas del proyecto. Adicionalmente, se llevaron a cabo reuniones adicionales cuando surgían dudas o contratiempos específicos.

Además del contacto en persona, se mantuvo una comunicación constante a través de correo electrónico y de la plataforma de Teams. Esta combinación de métodos de comunicación permitió un seguimiento continuo del proyecto, facilitando la resolución de problemas y la toma de decisiones en tiempo real.

2.2. Planificación

En esta sección se describe cómo se planificó el desarrollo del proyecto, detallando las diferentes fases que lo conformaron. La planificación no se abordó mediante un cronograma

rígido, sino siguiendo una estrategia secuencial en la que cada etapa del proceso fue diseñada, programada, probada y documentada antes de avanzar a la siguiente.

Estudio y viabilidad de la propuesta

En esta fase inicial, se realizó un análisis detallado de la propuesta para determinar su viabilidad. Esto incluyó la investigación de tecnologías disponibles, la identificación de posibles desafíos y la estimación de recursos necesarios.

Diseño y planteamiento del proyecto

El diseño del proyecto se abordó en dos niveles: el de la planta industrial simulada y el de la arquitectura del software de control.

En primer lugar, se diseñaron diferentes propuestas de la planta en el entorno de Factory I/O, con el objetivo de representar de la forma más realista posible el proceso de recepción, llenado, sellado, paletización y almacenamiento de los barriles. Se evaluaron distintas configuraciones de distribución de cintas transportadoras, ubicación de sensores y disposición de los elementos de paletizado y almacén o utilización de diferentes estaciones. Finalmente, se seleccionó la disposición que permitía un flujo más eficiente y una mayor simplicidad en la programación y validación.

En paralelo, se definió la estructura del software de control en TwinCAT 3. Para ello, el proyecto se dividió en bloques individuales correspondientes a cada etapa del proceso.

Este enfoque modular permitió implementar y probar cada subsistema de forma independiente antes de integrarlo en el flujo global. Además, se estableció un esquema de variables globales que facilitó la comunicación entre módulos y una organización clara del código, favoreciendo su legibilidad y mantenimiento.

Programación del software de manera incremental

El desarrollo siguió una estrategia incremental y secuencial. Cada bloque del proceso fue implementado, probado en el entorno de simulación Factory I/O, y documentado antes de continuar con la siguiente etapa. Esto permitió detectar y corregir errores en fases tempranas, asegurando la estabilidad del sistema al integrar todos los módulos.

Pruebas y documentación continua

Durante el desarrollo del código, se llevó a cabo una documentación y pruebas constantes para verificar el correcto funcionamiento de cada nueva funcionalidad implementada. Incluso los cambios menores en la programación fueron sometidos a pruebas para asegurar su estabilidad y eficacia.

Documentación final

Una vez superadas las pruebas, se completó la documentación final del proyecto, detallando todos los aspectos del desarrollo y los resultados obtenidos.

2.3. Herramientas software

2.3.1. Factory I/O

Para el diseño, simulación y validación del sistema automatizado desarrollado en este proyecto se ha utilizado Factory I/O, un software de simulación en 3D desarrollado por *Real Games* y orientado a la enseñanza, el prototipado y la validación de sistemas de automatización industrial.

La herramienta permite crear plantas virtuales mediante una interfaz intuitiva basada en el principio de *drag and drop*, ofreciendo una amplia biblioteca de componentes (cintas transportadoras, brazos robóticos, paletizadores, grúas, sensores de distintos tipos, lectores RFID, etc.) que facilitan la construcción de líneas de producción completas y adaptadas a diferentes procesos. Además, incorpora escenarios prediseñados con distintos niveles de dificultad, lo que la hace útil tanto para la formación en conceptos básicos como para configuraciones industriales complejas.

Una de sus principales ventajas es la capacidad de interactuar en tiempo real con controladores externos, ya sean PLCs físicos o entornos de programación como *TwinCAT*, mediante protocolos estandarizados (*OPC UA*, *Modbus*) o interfaces de programación como *Python* o *Node-RED*. Esta interoperabilidad lo convierte en una herramienta adecuada para el aprendizaje o la experimentación.

En el marco de este proyecto, Factory I/O se emplea para modelar una planta que integra operaciones de transporte, empaquetado, paletizado y almacenamiento, incluyendo medidas de seguridad (setas de emergencia, paradas de seguridad) y diferentes modos de operación manual y automático. Con ello no solo se valida la lógica de control implementada en el PLC, sino que también se recrean escenarios de fallo y emergencia en un entorno seguro.

No obstante, presenta limitaciones: la biblioteca de elementos es cerrada y no admite importar modelos personalizados, el número de puntos de E/S es limitado y no se contemplan fenómenos físicos reales como fricción, desgaste o errores de sensores. Aun así, su equilibrio entre facilidad de uso, realismo y compatibilidad con tecnologías industriales lo consolida como una herramienta para la validación de sistemas automatizados y proyectos vinculados a la Industria 4.0.

2.3.2. Twincat

TwinCAT (*The Windows Control and Automation Technology*) es un software desarrollado por Beckhoff Automation que transforma cualquier PC con sistema operativo Windows en un controlador lógico programable (PLC), una estación de control numérico por computadora (CNC) o un sistema de automatización de movimiento (*Motion Control*). Su arquitectura

permite la integración de control, adquisición de datos y supervisión en un único entorno, facilitando el desarrollo y la ejecución de aplicaciones industriales complejas de manera eficiente y flexible.

Una de las características más destacadas de TwinCAT es su capacidad para soportar los lenguajes de programación estandarizados por la norma IEC 61131-3, incluyendo *Structured Text* (ST), *Ladder Diagram* (LD), *Function Block Diagram* (FBD), *Instruction List* (IL) y *Sequential Function Chart* (SFC). Esto permite a los desarrolladores programar la lógica de control de sistemas industriales con metodologías formales que aseguran la claridad, mantenimiento y escalabilidad del código.

TwinCAT funciona en modo *runtime* sobre Windows, pero dispone de un componente que opera en tiempo real para garantizar la ejecución puntual y constante de las tareas industriales críticas, minimizando interrupciones y asegurando un control preciso. Gracias a esta capacidad, es posible ejecutar programas PLC en un entorno virtual sin necesidad de hardware físicamente dedicado, facilitando el desarrollo y pruebas en entornos simulados o de gemelos digitales.

Una ventaja adicional de TwinCAT es su integración nativa con protocolos industriales, destacando la compatibilidad con OPC UA, lo que posibilita la comunicación segura y estándar con otros sistemas y dispositivos, como simuladores 3D (por ejemplo, *Factory I/O*), SCADA, sistemas ERP o plataformas en la nube. Esta interoperabilidad es fundamental para la implementación de soluciones Industria 4.0, donde la conectividad y el flujo de información en tiempo real son clave.

El entorno de desarrollo de TwinCAT ofrece herramientas avanzadas para la gestión de proyectos, incluyendo la creación y control de tareas, el mapeo de entradas y salidas, la depuración en tiempo real y la visualización de variables, facilitando el monitoreo y ajuste de sistemas automatizados durante su desarrollo y operación.

Además, TwinCAT incorpora herramientas integradas para el desarrollo de *HMI* (*Human-Machine Interface*), lo que permite crear interfaces gráficas personalizadas con funciones avanzadas de visualización y control en tiempo real. Estas interfaces pueden diseñarse empleando tecnologías estándar como HTML5 y JavaScript, garantizando su adaptabilidad a múltiples dispositivos y favoreciendo la implementación de soluciones modernas e intuitivas para la supervisión de procesos industriales.

2.3.3. Comunicación entre entornos

Para poder comunicar el entorno de desarrollo con el de simulación y viceversa se emplea el estándar OPC UA.

OPC UA: Estándar de comunicación para la automatización industrial [8]

OPC UA (OPC Unified Architecture) es un estándar abierto, extensible y multiplataforma diseñado para el intercambio seguro de información en sistemas industriales. Fue liberado en

2008 por la *Open Platform Communications Foundation* (OPC), que regula su desarrollo, protocolos y especificaciones de interoperabilidad.

A diferencia de su antecesor, el OPC clásico (años 90), que estaba limitado al uso de Windows y dependía de tecnologías propietarias como DCOM y OLE, la OPC UA fue concebida para ser independiente de la plataforma y más flexible, permitiendo su implementación en distintos sistemas operativos y arquitecturas.

Internamente, OPC UA opera bajo un modelo cliente-servidor, donde los servidores exponen datos, eventos y métodos, y los clientes los consumen o suscriben para recibir notificaciones en tiempo real. Los datos se organizan en un Address Space jerárquico compuesto por nodos, cada uno con un identificador único (Nodeld), tipo de dato y referencias a otros nodos. Este enfoque permite una representación semántica de la información y facilita la interoperabilidad entre sistemas heterogéneos, asegurando que los clientes puedan explorar y manipular datos de manera estructurada y segura. [7]

Compatibilidad y alcance tecnológico [5] [8]

OPC UA es compatible con Windows, macOS, Android y Linux, así como con sistemas embebidos e incluso sistemas *baremetal* (sin sistema operativo). Se utiliza en PC, PLC, microcontroladores, infraestructuras en la nube y sistemas ciberfísicos (CPS).

La arquitectura está basada en un modelo orientado a objetos, en el que los servidores representan los datos y los clientes los consumen bajo una estructura común y escalable. Además, se apoya en una arquitectura orientada a servicios (SOA) y en APIs, lo que facilita su integración en dispositivos y aplicaciones heterogéneas.

Objetivos y beneficios [5]

El principal objetivo de OPC UA es mejorar la interoperabilidad entre hardware, software y sistemas industriales, posibilitando la integración de tecnologías dispares. Esto permite la convergencia entre la tecnología operativa (OT) y la tecnología de la información (IT), un paso fundamental en la transición hacia la Industria 4.0.

Entre sus beneficios destacan:

- Interoperabilidad multiplataforma al eliminar la dependencia de DCOM.
- Escalabilidad, desde sensores hasta sistemas de gestión empresarial.
- Mayor seguridad mediante cifrado, autenticación y control de accesos.
- Flexibilidad en el transporte, ya que OPC UA puede funcionar sobre distintos protocolos como TCP, HTTPS, WebSockets o MQTT.
- Representación semántica de los datos, permitiendo no solo transmitir información, sino también contextualizarla.

OPC UA y Twincat [3]

TwinCAT (The Windows Control and Automation Technology) es un entorno de desarrollo de Beckhoff que convierte un PC en un PLC, un sistema de control de movimiento o un CNC. TwinCAT permite programar siguiendo la norma IEC 61131-3 y, gracias a su integración con OPC UA, puede actuar como servidor exponiendo variables de control, estados de sensores y actuadores en tiempo real. Esta comunicación permite supervisar, controlar y depurar procesos simulados en Factory I/O, así como conectar el sistema con otras aplicaciones industriales, SCADA o ERP. La integración TwinCAT-OPC UA permite realizar pruebas de control en entornos virtuales antes de implementarlas en hardware físico, reduciendo riesgos y optimizando el desarrollo de sistemas automatizados.

Configurar TwinCAT para comunicación mediante OPC UA

Para poder utilizar OPC con Twincat es necesario instalar algunas extensiones de Beckhoff y realizar ciertas configuraciones.

Respecto a las instalaciones, es necesario instalar los cuatro módulos, el orden es irrelevante y es recomendable ejecutar los instaladores como administrador. Tras la instalación será necesario realizar una configuración en Twincat 3 y otra en TwinCAT OPC UA Configurator. Los módulos a instalar se pueden encontrar en el buscador la web oficial de Beckhoff [4] y son los siguientes.

- TF6100 — TwinCAT 3 OPC UA Gateway
- TF6100 — TwinCAT 3 OPC UA Server
- TF6100 — TwinCAT 3 OPC UA Configurator
- TF6100 — TwinCAT 3 OPC UA Client

Configuración TwinCAT 3 para emplear protocolo de comunicación OPC UA

1. Configurar variables de PLC para acceso OPC UA:

a) Incluir el atributo {attribute 'OPC.UA.DA' := '1'} en cada una de las variables que deban ser accesibles desde el servidor.

```
{attribute 'qualified_only'}
VAR_GLOBAL
    // Cuadro
    {attribute 'OPC.UA.DA' := '1'}
    botonStart : BOOL;
    {attribute 'OPC.UA.DA' := '1'}
    botonStop : BOOL;
```

Figura 1: Atributo para las variables de Twincat.

2. Configurar la descarga del archivo de símbolos:

- Acceder a los ajustes del proyecto de PLC.
- Seleccionar los archivos de símbolos TMC para que sean exportados al servidor. 2

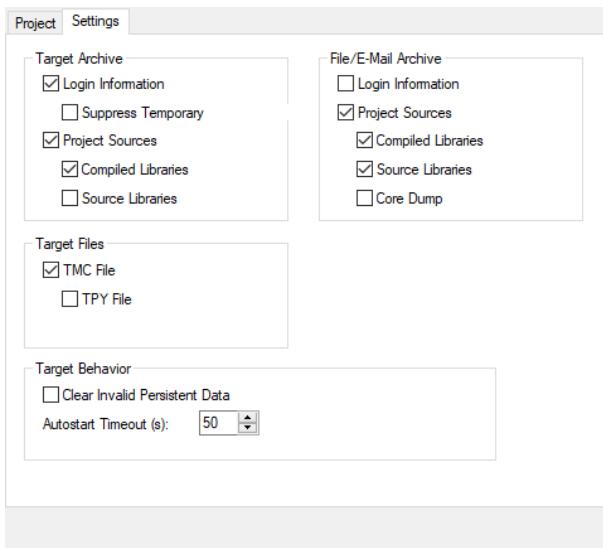


Figura 2: Descarga de archivos TMC.

3. Añadir licencia de OPC UA:

- Agregar la licencia *TC3 OPC-UA* con número de orden TF6100. Se puede hacer desde el *Solution Explorer* del proyecto, en el apartado de *License*. 3

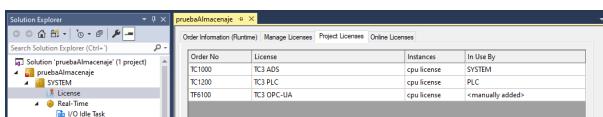


Figura 3: Incorporar licencia TF6100.

Configurar y activar el servidor OPC UA en TwinCAT OPC UA Configurator

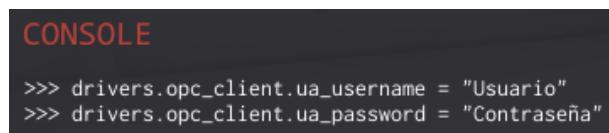
- Inicializar el servidor y añadir endpoints.
- Seleccionar el modo de seguridad *Basic256Sha256 - SignAndEncrypt*.
- Establecer nombre de usuario y contraseña para autenticación.
- Asociar el servidor con el proyecto de PLC comprobando:
 - AdsPort coincide con el puerto del proyecto de PLC (por defecto 851).
 - AmsNetId corresponde a la ID local del sistema.
- Seleccionar *Activate on Target* para guardar y aplicar la configuración en el destino.

OPC UA y Factory I/O [11]

Factory I/O, plataforma de simulación 3D de procesos industriales, soporta comunicación con OPC UA, lo que permite que los entornos de simulación interactúen con controladores externos como TwinCAT. Gracias a esta integración, se pueden enviar y recibir datos en tiempo real entre la simulación y el software de control, replicando de forma precisa el comportamiento de una planta industrial real sin necesidad de utilizar equipos físicos. Esto facilita la formación, la experimentación y la validación de algoritmos de control antes de su implementación en la industria.

Configurar el driver OPC UA de Factory I/O

1. Abrir *Factory I/O* y acceder a una escena.
2. Abrir la consola:
 - a) Pulsando la tecla \ o la de <
 - b) En la pestaña *Vista* acceder a *Consola*.
3. Introducir, mediante comandos, el nombre de usuario y la contraseña para conectarse al servidor. 4



```
CONSOLE
>>> drivers.opc_client.ua_username = "Usuario"
>>> drivers.opc_client.ua_password = "Contraseña"
```

Figura 4: Comandos en consola de Factory para OPC UA.

4. Acceder a los drivers de la aplicación: 5
 - a) Pulsando *F4*.
 - b) En la pestaña *Archivo* acceder a *Driver*.
5. Seleccionar *OPC Client DA/UA* y acceder a la configuración: 6
 - a) Buscar los servidores disponibles.
 - b) Seleccionar el que comienza por Tc0pcUaServer@. 7
 - c) Buscar los elementos disponibles en el servidor.
 - d) Se puede limitar el número máximo de elementos mostrados (32 en este caso).
 - e) Se puede filtrar los elementos a buscar. Si es necesario acceder a las variables de una lista global de variables llamada GVL, se escribe “GVL” en el campo de filtrado.

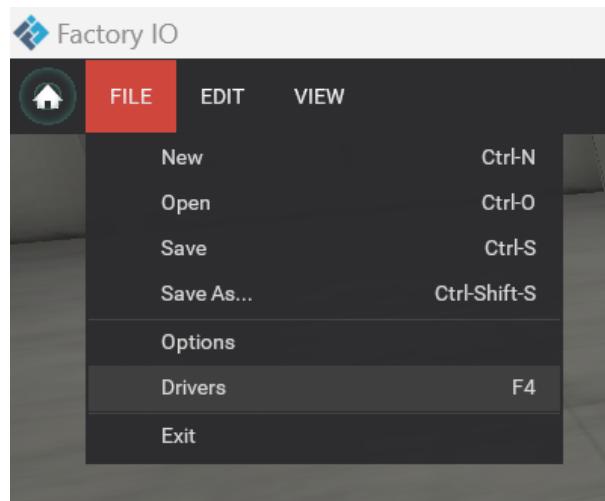


Figura 5: Acceso a los drivers de Factory I/O.

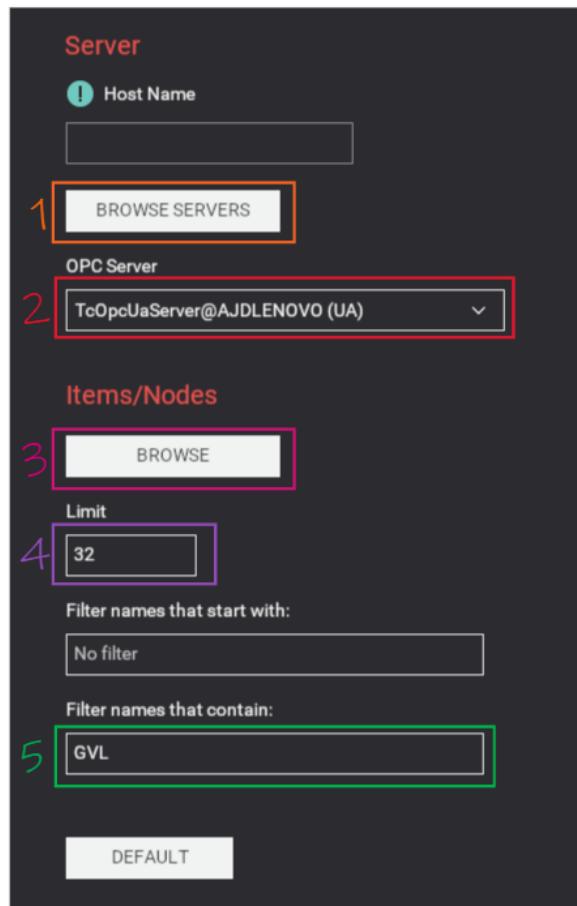


Figura 7: Selección del Servidor OPC en Factory I/O.

6. Enlazar cada sensor y actuador de la escena de *Factory I/O* con la variable correspondiente del proyecto en TwinCAT.

Relación con Industria 4.0 e IIoT [5]

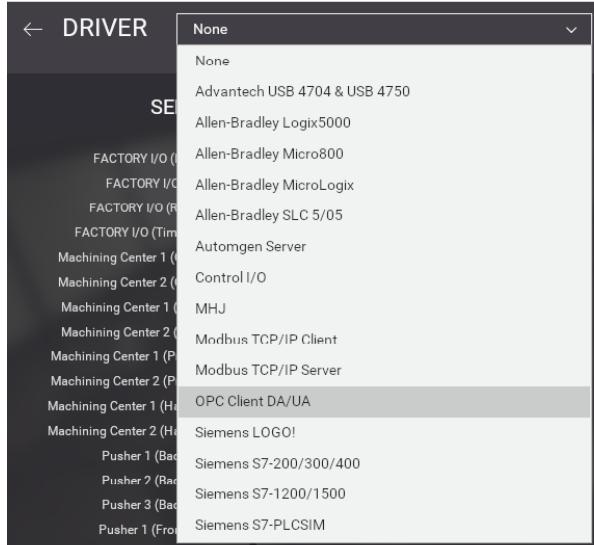


Figura 6: Selección del Client de OPC en Factory.

La Industria 4.0 y el Internet Industrial de las Cosas (IIoT) requieren comunicaciones seguras, escalables y abiertas. En este contexto, OPC UA se ha convertido en un estándar de referencia, reconocido por iniciativas como RAMI 4.0 en Alemania.

Permite la comunicación de máquina a máquina (M2M), de máquina a aplicación y de máquina a nivel de control, conectando dispositivos de producción con sistemas de análisis en la nube. Esto posibilita ciclos de vida más cortos, un uso más eficiente de los recursos y la implementación de tecnologías como mantenimiento predictivo, visión artificial, inteligencia artificial y aprendizaje automático.

Aplicaciones prácticas

Las organizaciones industriales utilizan OPC UA para crear centros de información centralizados de control y monitoreo en tiempo real, optimizando procesos y reduciendo tiempos de inactividad. Un ejemplo es la integración con herramientas de supervisión como PRTG, que a través de OPC UA ofrece múltiples vistas de información sobre dispositivos, anomalías de seguridad, flujos de trabajo y fallos de maquinaria.

[1], [2], [14]

Además, OPC UA facilita la integración con sistemas ERP (*Enterprise Resource Planning*). Esto permite que datos procedentes de líneas de producción o sistemas de visión artificial se integren directamente en los sistemas de gestión empresarial. La consecuencia es una mejora en la planificación, la reducción de errores y la adopción acelerada de Industria 4.0. [12], [13]

Comparación con otros protocolos

Existen otros protocolos de comunicación industrial, como PROFINET (Siemens), iQSS (Mitsubishi), Modbus o EtherCAT. Sin embargo, muchos de ellos son propietarios o dependientes de un fabricante concreto. En contraste, OPC UA es un protocolo abierto y neutral, lo que garantiza su interoperabilidad entre distintos proveedores y plataformas. Además, OPC UA ofrece ventajas significativas en términos de seguridad, flexibilidad y capacidad de integración con sistemas de análisis y entornos en la nube, siendo más adecuado para arquitecturas de Industria 4.0 y IIoT. [6]

Conclusión

OPC UA representa una evolución del estándar OPC original hacia un modelo seguro, escalable y verdaderamente independiente de la plataforma. Su papel como facilitador de la interoperabilidad y la digitalización industrial lo convierte en un pilar fundamental de la Industria 4.0, tanto para grandes fabricantes como para pymes que buscan aprovechar los datos generados en sus operaciones sin reemplazar sus inversiones previas.

En definitiva, OPC UA constituye la columna vertebral de la comunicación industrial moderna, permitiendo conectar máquinas, sistemas y aplicaciones en un entorno cada vez más complejo, dinámico y orientado a los datos.

3. Diseño planta industrial

Para este proyecto se propone un sistema que comprende la recepción y verificación de barriles, su llenado, paletización y almacenamiento posterior. Este tipo de proceso es común en plantas de productos alimenticios, de limpieza e incluso en otros sectores industriales con características similares. A continuación, se describen con mayor detalle las distintas etapas del proceso.

Como se comentó en la sección 2.3.1, el diseño, simulación y validación del sistema automatizado desarrollado en este proyecto se ha realizado utilizando el software Factory I/O. Dadas las limitaciones respecto a los elementos disponibles, los barriles serán simulados por bases de productos, y se comprobará que estos son los barriles correctos mediante la característica del color y peso, considerando que, en un caso real, los barriles pueden no estar vacíos a su llegada.

- **E_0. Cuadro de control:** Cuadro eléctrico común a todas las etapas, compuesto por botones de arranque (Start), paro (Stop), Reset, seta de emergencia, selector de modo e indicadores luminosos. Su finalidad es centralizar y supervisar el control de todo el sistema. [10]

- **Start:**

Botón que permite iniciar el funcionamiento del sistema. Al presionarlo, se activa un enclavamiento que pone en marcha las cintas y otros actuadores, dando inicio al ciclo productivo. Este botón solo tiene efecto si no se detecta ninguna condición de emergencia activa.

- **Stop:**

Utilizado para detener temporalmente el sistema en situaciones que no constituyen una emergencia, pero que requieren una parada rápida, como ajustes menores o intervenciones operativas. Al pulsar Stop, se detienen todas las cintas y actuadores, y se enciende una luz indicadora de parada. Para reanudar la operación es necesario presionar nuevamente el botón Start.

- *Seta de emergencia:*

Botón de seguridad vital para la protección del personal y del equipo. Su activación detiene de inmediato todas las operaciones, apagando las cintas y encendiendo una luz roja que indica estado de emergencia. Bloquea cualquier otra acción hasta que se desarme y se pulse Reset.

- *Reset:*

Botón que permite reanudar el funcionamiento normal del sistema después de una emergencia. Al pulsarlo, restablece el estado operativo, apaga la luz roja de emergencia y enciende la luz verde de sistema activo. Hasta que Reset no se pulse, el sistema permanecerá inactivo.

- *Selector de modo:*

Selector que permite elegir entre modo manual y automático. En modo automático, el sistema opera de manera continua sin intervención humana. En modo manual, tras completar cada ciclo, el operario debe accionar Start para iniciar un nuevo ciclo, alineándose con la guía GEMMA.

- *Indicadores luminosos:*

Tres luces que informan sobre el estado del sistema: verde para sistema activo (Start), amarilla para paro temporal (Stop) y roja para emergencia (Seta de emergencia).

El cuadro de control descrito anteriormente y sus componentes se ilustran en la figura 8.



Figura 8: Cuadro de control en Factory I/O.

- **E.1. Comprobación inicial del producto:** En esta etapa se asegura que solo los elementos correctos ingresen a la línea de producción, previniendo errores que puedan afectar la calidad y seguridad del proceso. La escena está compuesta por dos sensores principales: un sensor de visión y una báscula transportadora.

- *Sensor de visión:*

Detecta materias primas, tapas y bases según color y tipo en un rango de 0.3 a 2 m; proporciona codificaciones digitales o numéricas para clasificar piezas. Esto permite identificar las piezas de color no deseado, en nuestro caso verde y permite continuar a loa azules y metálicoas. El sensor se encuentra ilustrado en la figura 9 y el cilindro en ??



Figura 9: Sensor de visión en Factory I/O.

- *Báscula transportadora:*

Mide el peso de cada elemento con capacidad hasta 100 kg. Aquellos que exceden el peso permitido son descartados usando cilindros empujadores, simulando la verificación real de que los barriles o bases estén vacíos antes de continuar. Esta doble verificación garantiza que solo productos conformes continúen su procesamiento. La báscula se encuentra ilustrada en la figura 10 y el cilindro 11.

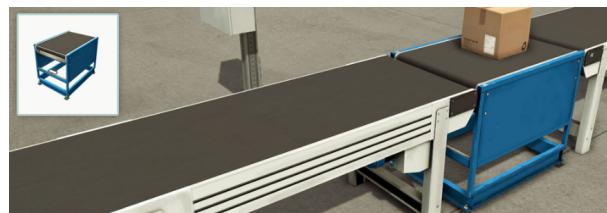


Figura 10: Báscula transportadora en Factory I/O.



Figura 11: Cilindro en Factory I/O.

Otros elementos relevantes incluyen cintas transportadoras y sensores fotoeléctricos para monitorear cada acción. Dichos elementos se pueden observar en las figuras 12 y 13 respectivamente y consultar en la documentación de Fcatoty i/o [9].



Figura 12: Cintas de carga ligera Factory I/O.



Figura 13: Sensor fotoeléctrico en Factory I/O.



Figura 14: Escena filtrado en Factory I/O.

- **E_2. Prelavado:** Simula la limpieza preliminar del producto mediante un tanque lleno de agua u otro fluido de baja agresividad, con el fin de eliminar suciedad o restos superficiales.

- *Tanque cilíndrico con válvulas de control:* El tanque (dimensiones aproximadas: 3 m de altura y 2 m de diámetro) está equipado con una válvula de entrada y otra de salida, reguladas digitalmente para gestionar el flujo de líquido. Aunque también admite configuración analógica —con sensores de nivel mínimo y máximo y entradas/salidas de válvulas de 0 a 10 V— en este proyecto se ha mantenido la configuración digital básica.
- *Cinta transportadora y sensores fotoeléctricos:* La cinta traslada el producto dal área de prelavado a la siguiente. Los sensores verifican la presencia del barril antes de activar las válvulas, evitando derrames o ciclos en vacío. 12 13

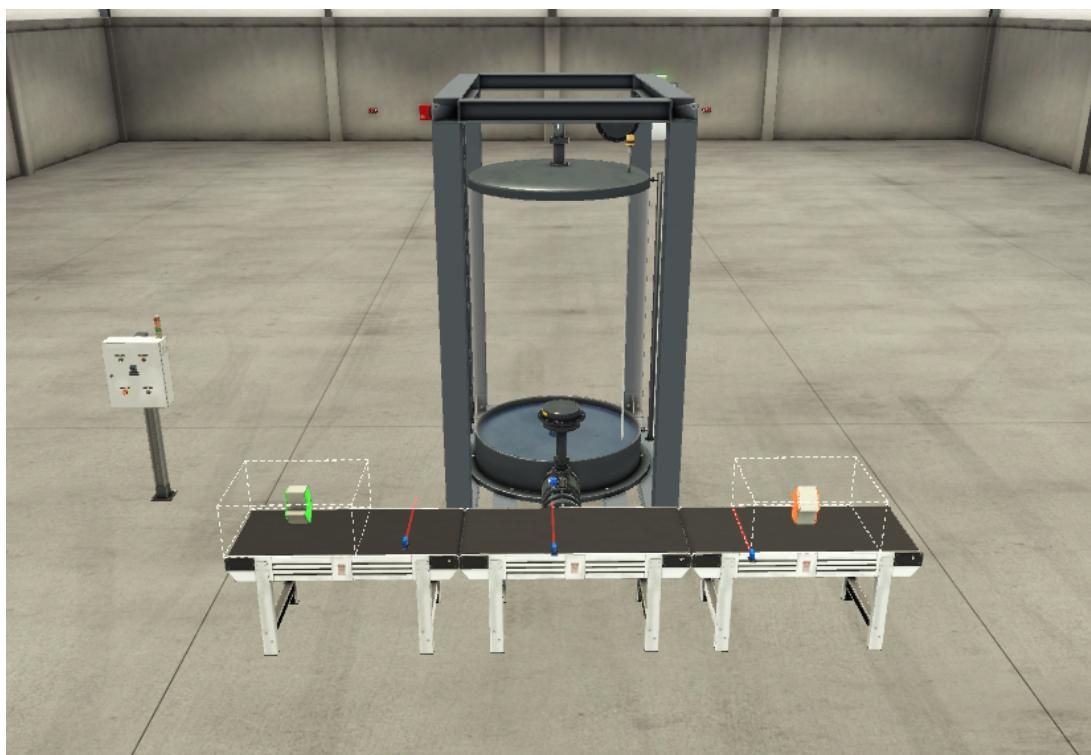


Figura 15: Escena prelavado, lavado y llenado en Factory I/O.

- **E_3. Lavado:** Etapa similar al prelavado, pero utilizando un fluido específico para limpieza profunda o desinfección. 15
 - *Tanque y válvulas:* Con las mismas características técnicas del prelavado, controlados digitalmente para apertura y cierre del flujo.
 - *Cinta transportadora y sensores fotoeléctricos:* La cinta traslada el producto del área de lavado a la de llenado. Los sensores verifican la presencia del barril antes de activar las válvulas, evitando derrames o ciclos en vacío. 12 13
- **E_4. Llenado:** Simula la etapa de envasado, en la que el fluido específico es depositado en el interior del barril. Los elementos de control son análogos a los utilizados en el prelavado y lavado. 15
 - *Tanque y válvulas:* Configuración idéntica a las etapas previas, con control digital para apertura y cierre del caudal.
 - *Cinta transportadora y sensores fotoeléctricos:* La cinta traslada el producto del área de llenado a la de sellado o embasado de producto final. Los sensores verifican la presencia del barril antes de activar las válvulas, evitando derrames o ciclos en vacío. 12 13
- **E_5. Ensamblado del producto final:** Simula el sellado y ensamblado automático de los barriles mediante un sistema *Pick and Place*. 17

- *Brazo Pick and Place (2 ejes)*: Dispone de movimientos en los ejes X (hasta 1.125 m) y Z (hasta 0.625 m), con una velocidad máxima de 2 m/s. Su control digital garantiza un posicionamiento rápido y repetible.
- *Pinza de vacío*: Sistema neumático que permite agarrar y soltar tapas con firmeza y delicadeza, evitando daños en los componentes.
- *Sensores fotoeléctricos difusos*: Verifican la posición de los elementos a manipular para evitar fallos durante el ensamblado. 13
- *Barras de posicionamiento*: Dispositivo que asegura la colocación consecutiva de los objetos en la misma posición mediante pinzado. Se encuentran disponibles en configuración izquierda y derecha. 16
- *Cintas transportadoras*: Se encargan de suministrar los barriles y retirar los productos ensamblados de la estación de trabajo. 12

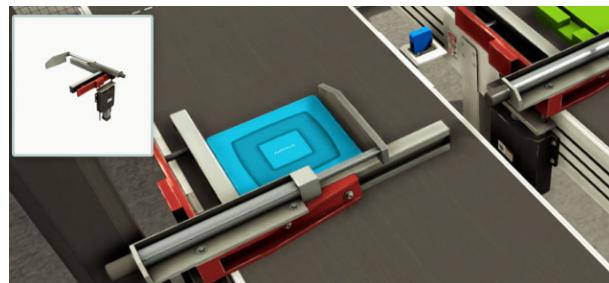


Figura 16: Barras posiconadoras en Factory I/O.

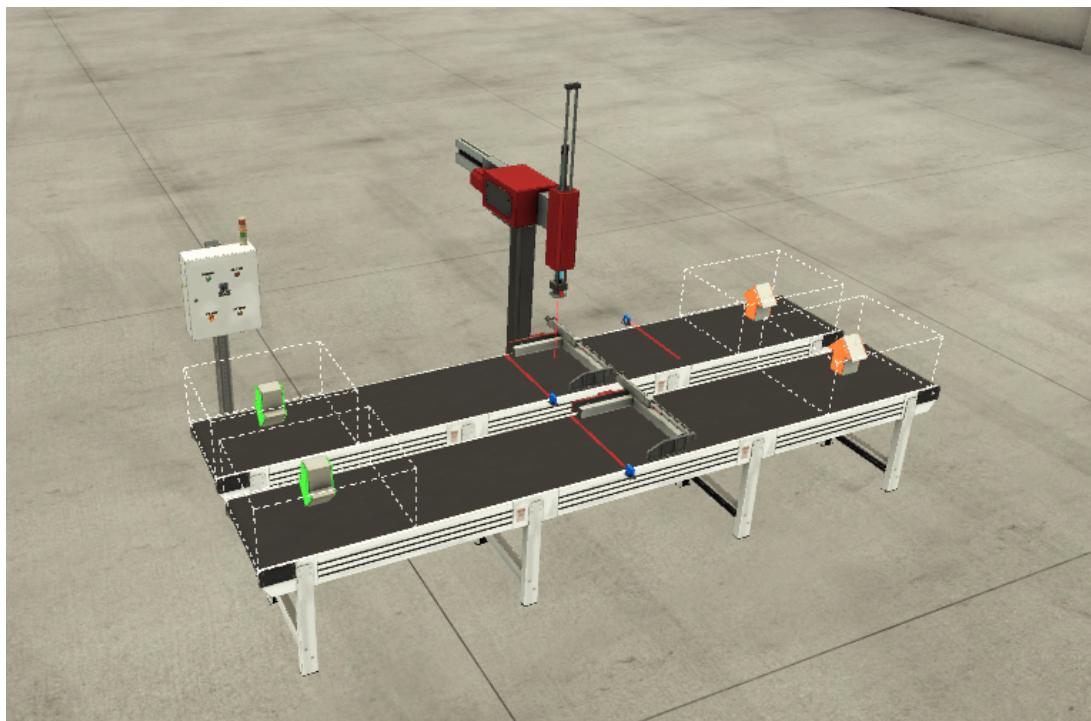


Figura 17: Escena ensamblado en Factory I/O.

- **E_6. Paletizado:** En esta fase, los productos terminados se organizan en palets para su transporte y almacenamiento. 20

- *Cinta de rodillos (Roller Conveyor):* Diseñada para cargas pesadas, con velocidad de hasta 0.45 m/s en control digital y 0.8 m/s en control analógico, lo que permite un transporte estable de palets. 18
- *Mesa giratoria:* Permite el giro controlado de los palets hasta 90°, con velocidad máxima de 0.7 rad/s. Incluye sensores capacitivos digitales para la detección de posición. 19
- *Empujadores neumáticos:* Controlados digitalmente, desplazan y posicionan los productos sobre el palet de forma segura.
- *Sensores fotoeléctricos:* Detectan la llegada y presencia de los productos, sincronizando el movimiento de los actuadores. 13
- *Estación de paletizado:* Sistema automatizado de alto nivel que apila productos (por ejemplo, materiales o bases) sobre los palets. Puede configurarse tanto en modo digital como analógico. 20



Figura 18: Cinta carga pesada en Factory I/O.



Figura 19: Mesa giratoria en Factory I/O.

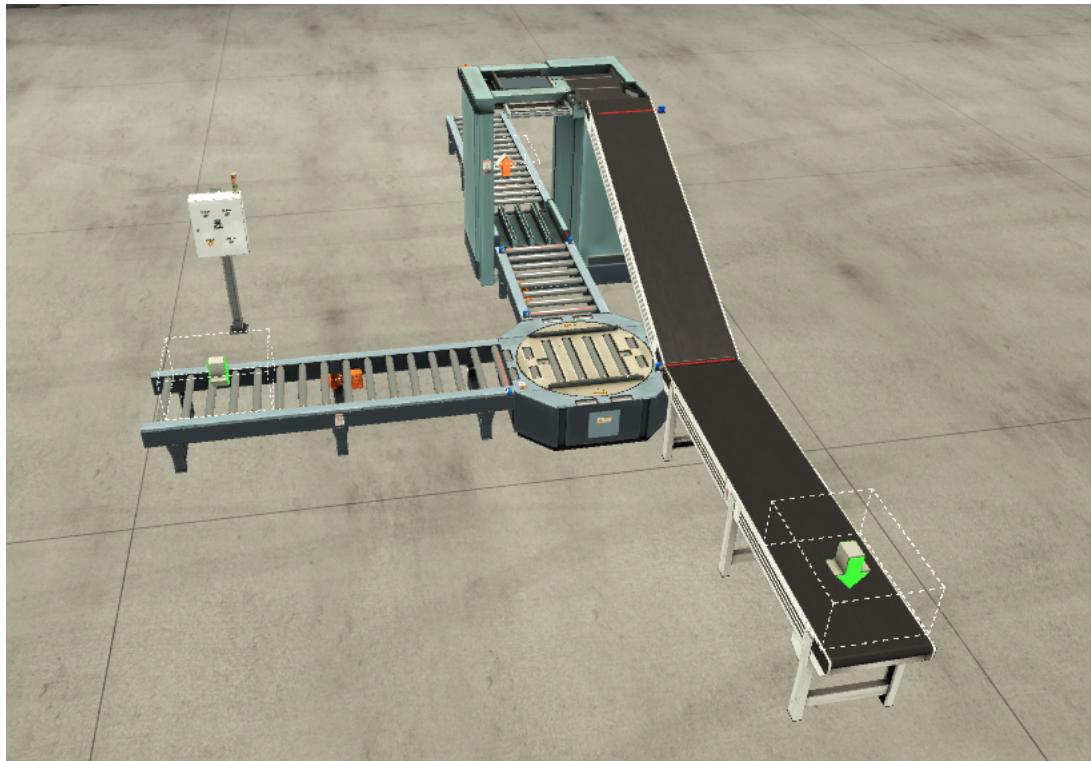


Figura 20: Escena paletizado en Factory I/O.

- **E_7. Almacenaje:** Los palets cargados son ubicados en estanterías mediante una grúa apiladora, optimizando el espacio y facilitando la logística. 22
 - *Cintas transportadoras (Roller y Loading):* Adaptadas para manipulación de cargas pesadas, con control digital y analógico para el traslado seguro hacia y desde la grúa. 18 21
 - *Grúa apiladora:* Dispone de desplazamiento en ejes X y Z, equipada con horquillas extensibles y sensores de posición para el control preciso del palet. Puede configurarse en modos digital o analógico; para este proyecto se empleó el modo analógico.



Figura 21: Cinta de carga pesada en Factory I/O.



Figura 22: Escena almacén en Factory I/O.

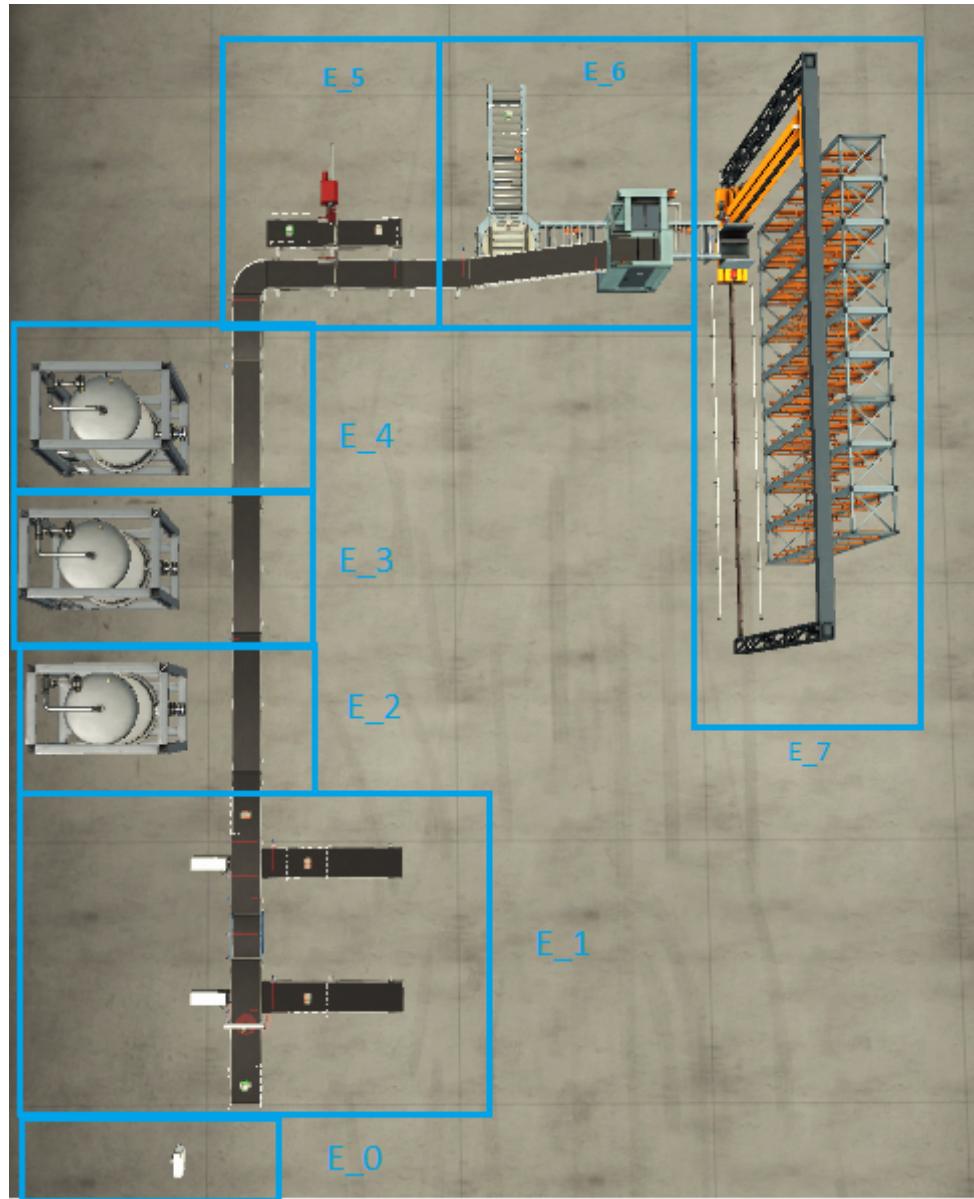


Figura 23: Etapas de la planta industrial.

Lo comentado anteriormente se refleja en la figura 23, donde se identifican las distintas etapas como E_X, siendo X el orden de ejecución. Factory I/O presenta ciertas restricciones tanto en los elementos disponibles como en el número de entradas, por lo que las etapas se implementaron individualmente, desarrollando proyectos separados en TwinCAT y en Factory I/O.

4. Desarrollo software

En esta sección se explica el software desarrollado para implementar las funcionalidades detalladas en la sección 3. El software se desarrolló utilizando TwinCAT 3 de Beckhoff 2.3.2.

Para facilitar la comprensión, la explicación de cada etapa se acompaña con su respectivo diagrama de flujo. El orden de explicación coincide con el orden de ejecución dentro del software, proporcionando una visión clara y estructurada del funcionamiento.

Como se mencionó en la sección 2.3.1, el software de simulación tiene ciertas limitaciones, por lo que se abordará cada etapa como un proyecto individual, permitiendo un análisis enfocado para cada funcionalidad.

Etapa 1. Filtrado

Finalidad: Descartar objetos que no cumplen con las características exteriores o de peso deseadas.

Implementación Esta etapa se divide en dos fases principales: la primera basada en el descarte a través del sensor de visión, y la segunda que utiliza el sensor de la báscula para el descarte por peso.

En primer lugar, se comprueba el estado de los botones de control situados en el cuadro. Si se pulsa el botón Start, las cintas emisoras del sistema comienzan a funcionar. Por el contrario, la pulsación del botón Stop detiene todos los actuadores y solo se reanuda si se pulsa nuevamente el botón Start. En el caso de activarse la seta de emergencia, será imprescindible realizar el procedimiento de desarme y luego pulsar Reset, ya que pulsar cualquier otro botón no tendrá efecto sobre el sistema.

En cuanto al modo de funcionamiento indicado por el selector, se distinguen dos posibilidades: manual y automático. La diferencia entre ambos radica en que, en el modo automático, el sistema ejecuta de forma continua cada secuencia de operación sin intervención del operario, mientras que en el modo manual es necesario accionar el botón Start al finalizar cada ciclo para iniciar un nuevo ciclo de ejecución.

Con las cintas de emisión en funcionamiento, se emplea un sensor fotoeléctrico próximo al sensor de visión para detectar la presencia de un objeto. En este punto, las cintas se detienen para poder tomar un valor estable en la lectura del sensor de visión. Los objetos con características específicas son procesados de la siguiente manera: aquellos con base azul (valor 3) o metálica (valor 9) continuarán el flujo normal, mientras que los objetos con base verde (valor 6) serán descartados mediante un cilindro dispuesto justo después del sensor de visión. Este cilindro dirige los objetos descartados hacia una cinta con un remover para eliminarlos del proceso.

Los objetos que continúan el recorrido llegan a la siguiente fase: la cinta de pesaje. Aquí otro sensor fotoeléctrico detecta la presencia del objeto, deteniendo la cinta por dos segundos para permitir una lectura precisa y estable del peso. Si este peso supera un umbral establecido en 4 u, el objeto es descartado mediante un sistema similar al de la fase anterior, utilizando un cilindro que lo dirige hacia la cinta de descarte. Se descartan principalmente los elementos metálicos, que tienen un peso aproximado de 4.5 u, mientras que los objetos azules, con un peso cercano a 3.5 u, continúan en la producción [9].

Para esta fase se diseñó una interfaz HMI que permite al operador interactuar con los botones del cuadro y visualizar la siguiente información: el valor medido por el sensor de visión, el estado de descarte del elemento, el peso registrado en la báscula y el respectivo descarte.. Esta pantalla está detallada en la figura 25.

Como resultado de este sistema, en la cinta de salida solo se encuentran los objetos azules, ya que los verdes y metálicos son descartados previamente durante las respectivas fases.

Durante las pruebas realizadas tanto en el entorno Factory como en el HMI implementado, se observó que en ocasiones la fase de descarte por peso elimina erróneamente objetos azules, cuyo peso está por debajo del umbral. Esta situación se atribuye principalmente a picos de peso que se generan mientras el objeto se desplaza por la báscula.

La explicación y funcionamiento detallado de esta etapa pueden observarse en el diagrama de flujo representado en la figura 24.

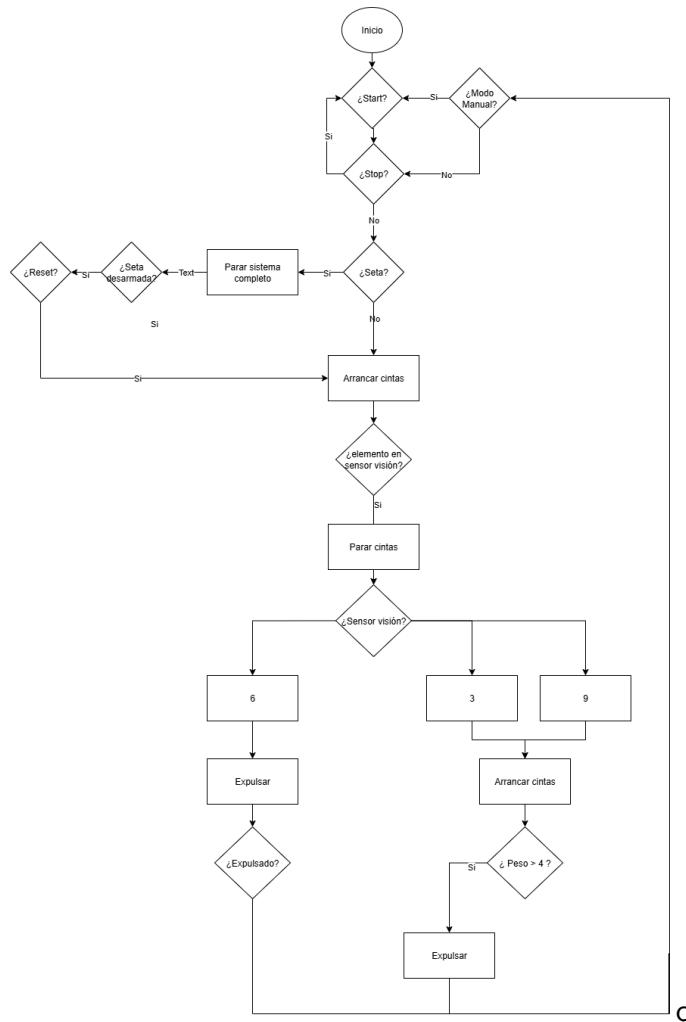


Figura 24: Diagrama de flujo de la etapa de filtrado.

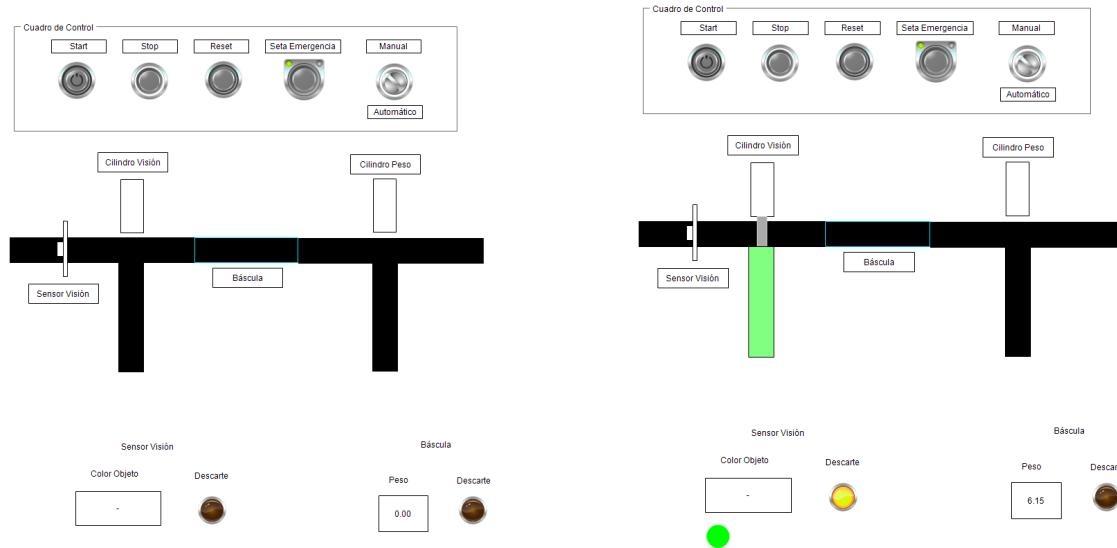


Figura 25: HMI de la etapa de filtrado.

Etapa 2. Llenado

Finalidad: Realizar el lavabo y carga de los barriles.

Implementación:

Al igual que en la etapa anterior, lo primero que se realiza es la comprobación del estado de los botones del cuadro. La secuencia de comprobaciones y las acciones resultantes así como los modos de funcionamiento siguen la misma lógica y procedimiento.

El sistema emplea una máquina de estados que controla el proceso de llenado y descarga del tanque, asegurando la correcta coordinación entre sensores, válvulas y temporizadores:

- **Estado 0:**

El sistema espera la detección de un objeto en la entrada al tanque mediante un sensor fotoeléctrico. En esta fase, las cintas de entrada, tanque y salida están activas, y la válvula de descarga permanece cerrada.

- **Estado 1:**

Cuando se detecta la presencia del objeto (flanco ascendente del sensor fotoeléctrico), se inicia la descarga, deteniendo las cintas y abriendo la válvula de descarga por un periodo determinado, medido mediante temporizador.

- **Estado 2:**

Tras finalizar la descarga, se reactivan las cintas para el siguiente ciclo, manteniendo un contador de descargas realizadas. Cuando este contador alcanza un límite preestablecido , el sistema detiene las cintas y se inicia el llenado del tanque.

Dado que el tanque se emplea con una configuración digital donde sólo se dispone de una válvula de entrada, una de salida, las medidas físicas del tanque y los caudales, es posible calcular el volumen del tanque y, junto con los caudales de las válvulas, estimar el tiempo que tomaría llenar un objeto de un determinado volumen.

En cuanto al llenado del tanque, se puede observar que el tiempo requerido para llenar o vaciar un volumen de líquido a través de una tubería con un caudal conocido se calcula utilizando la fórmula fundamental hidráulica, que relaciona el volumen con el caudal. Dichos cálculos de muestras a continuación :

$$t = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

donde:

- t es el tiempo en segundos (s),
- V es el volumen del líquido en litros (L),
- Q es el caudal volumétrico en litros por segundo (L/s).

Datos del tanque (según Factory IO):

- Altura $h = 3m$
- Diámetro $d = 2m$
- Radio $r = \frac{d}{2} = 1m$
- Caudal máximo de salida $Q_{\max} = 0.3543m^3/s = 354.3L/s$

1. Cálculo del volumen total del tanque:

El tanque es un cilindro, entonces el volumen se calcula con la fórmula:

$$V = \pi r^2 h \quad (2)$$

Sustituyendo:

$$V = \pi \times (1m)^2 \times 3m = 3.1416 \times 1 \times 3 = 9.4248m^3$$

Convertimos a litros ($1 m^3 = 1000$ litros):

$$V = 9.4248 \times 1000 = 9424.8L$$

2. Cálculo del tiempo máximo de vaciado del tanque:

Usando la fórmula (1):

$$t = \frac{V}{Q_{\max}} = \frac{9424.8 L}{354.3 L/s} \approx 26.6 s$$

Esto significa que, con la válvula abierta a caudal máximo, el tanque se vaciaría completamente en aproximadamente 26.6 segundos.

3. Tiempo de llenado del tanque

Considerando un caudal de entrada constante $Q_{in} = 0.25 m^3/s$, el tiempo de llenado del tanque se calcula como:

$$t_{fill} = \frac{V}{Q_{in}} = \frac{9.42478 m^3}{0.25 m^3/s} \approx 37.70 s$$

4. Cálculo del tiempo para llenar un barril pequeño:

Si queremos llenar un barril típico de 50L con el mismo caudal:

$$t_{barril} = \frac{50 L}{354.3 L/s} \approx 0.141 s$$

Este tiempo es muy corto, lo que indica que la válvula estaría abierta casi instantáneamente para llenar ese volumen. Por ello se empleará un tiempo de llenado de barril de 2 segundos para poder hacer las pruebas.

Como se puede apreciar en los cálculos presentados, el tanque tardaría aproximadamente 38 segundos en llenarse completamente si estuviera vacío. Esta condición se toma como referencia para la primera ejecución del programa. Sin embargo, tras un ciclo de vaciado, el tanque normalmente solo estará lleno alrededor del 20% de su capacidad, dado que su rango de operación es entre el 20% y el 80%, y no se llena en su totalidad.

Por esta razón, el tiempo real de llenado se reduce a unos 31 segundos. Para vaciar el tanque, considerando un tiempo de descarga por objeto de 2 segundos, se necesitarían aproximadamente 19 descargas para vaciarlo por completo, o 16 descargas para vaciarlo hasta el 80%.

En resumen, el sistema emplea un tiempo de llenado por objeto de 2 segundos, un máximo de 16 descargas por ciclo, y un tiempo estimado de carga del tanque de 31 segundos, a excepción de la primera ejecución, en la que el tiempo de llenado será de 38 segundos.

Para esta fase se diseñó una interfaz HMI que permite al operador interactuar con los botones del cuadro y visualizar la siguiente información de manera gráfica: el nivel de fluido del tanque y el estado de los acuyadores de la escena incluyendo cintas y válvulas. Dicho HMI puede apreciarse en la figura 25.

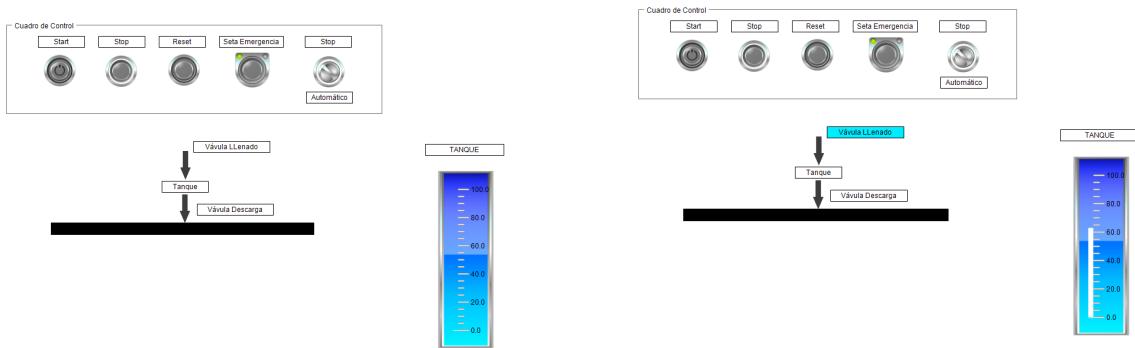


Figura 26: HMI de la etapa de prelavado, lavado y llenado.

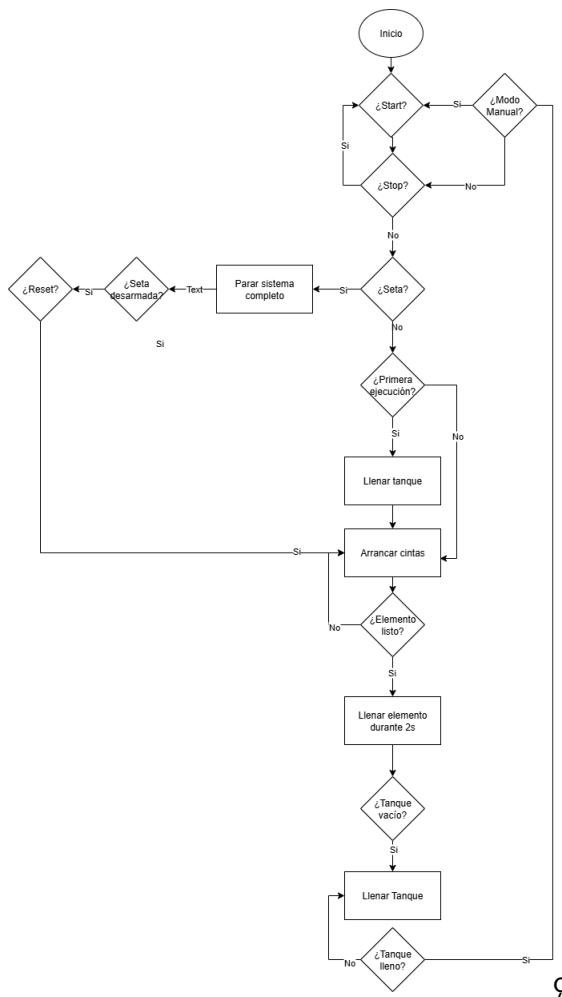


Figura 27: Diagrama de flujo de la etapa de prelavado, lavado y llenado.

La explicación y funcionamiento detallado de esta etapa pueden observarse en el diagrama de flujo representado en la figura 27.

Etapa 3. Sellado

Finalidad: Elaboración del producto final.

Implementación: Al igual que en la etapa inicial, lo primero que se realiza es la comprobación del estado de los botones del cuadro. La secuencia de comprobaciones y las acciones resultantes así como los modos de funcionamiento siguen la misma lógica y procedimiento.

Con el sistema activo y sin emergencia, el proceso de Pick and Place procede primero a arrancar las cintas de base y tapa, siempre que las piezas no estén posicionadas aún (baseOK y tapaOK en falso). Los sensores fotoeléctricos asociados detectan la llegada de las piezas a las barreras posicionadoras correspondientes. Al detectar la base, la cinta se detiene y se activa la abrazadera para sujetarla; el mismo procedimiento se realiza para la tapa.

En este punto se encuentra una máquina de estados:

- **Estado 0:** Inicio - espera que las piezas estén posicionadas y las abrazaderas cerradas. Se verifica que baseOK y tapaOK sean verdaderos, junto con los sensores de límite de sujeción.
- **Estado 1:** Despliegue horizontal - el mecanismo se desplaza horizontalmente para posicionarse frente al objeto. Se mantiene el movimiento horizontal activo y se espera un temporizador de 2 segundos para asegurar el movimiento completo.
- **Estado 2:** Bajada vertical - el mecanismo baja verticalmente sin detener el movimiento horizontal.
- **Estado 3:** Agarre del objeto - se activa la ventosa para tomar el objeto. El temporizador de 2 segundos asegura la sujeción.
- **Estado 4:** Recogida vertical - se levanta verticalmente el mecanismo con el objeto sujeto, manteniendo el movimiento horizontal activo.
- **Estado 5:** Recogida horizontal - el mecanismo se desplaza horizontalmente con el objeto sujeto mientras el movimiento vertical está detenido.
- **Estado 6:** Bajada vertical - el mecanismo baja verticalmente con el objeto aún sujeto.
- **Estado 7:** Soltar objeto - se desactiva la ventosa para liberar el objeto en la ubicación deseada.
- **Estado 8:** Preparación para retorno - se detienen los movimientos y se asegura que el descenso vertical haya terminado.
- **Estado 9:** Levantar abrazadera y reactivar cintas - se levantan las abrazaderas de la tapa, se reactivan las cintas de base y tapa, y se marca el producto como finalizado. Cuando el sensor post-sellado detecta el paso del objeto, se cierran las abrazaderas y el sistema vuelve al estado 0.

Para esta fase se diseñó una interfaz HMI que permite al operador interactuar con los botones del cuadro y visualizar la siguiente información de manera gráfica: el estado de las cintas, así como el estado de las barreras de posición y del brazo de la estación. En el lateral derecho se ilustra la estación de Pick&Place de dos ejes, lo que permite conocer el estado de su brazo. Esta pantalla está detallada en la figura 28.

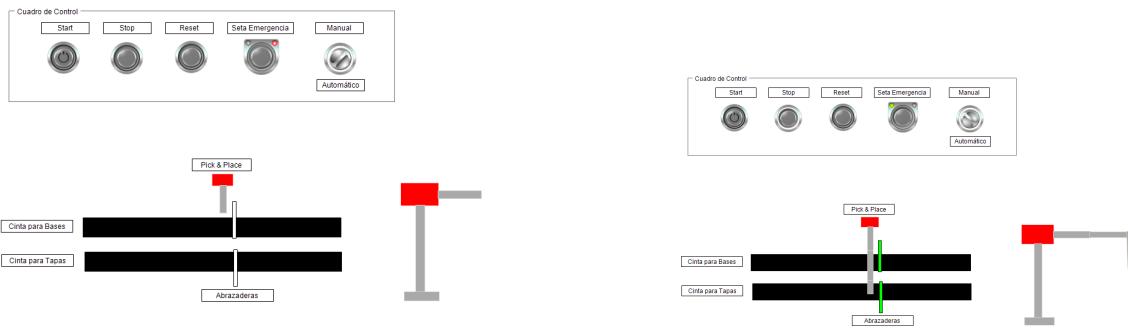


Figura 28: HMI de la etapa de sellado.

La explicación y funcionamiento detallado de esta etapa pueden observarse en el diagrama de flujo representado en la figura 29.

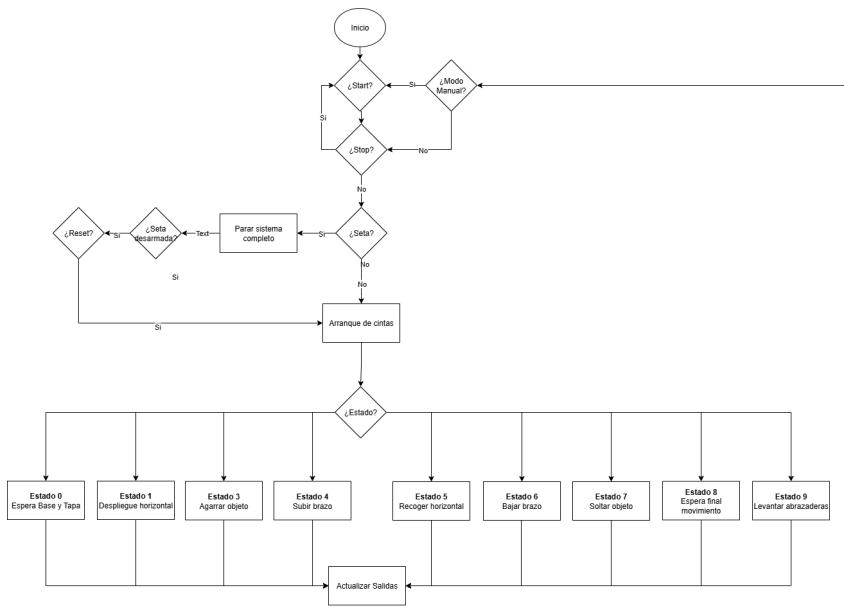


Figura 29: Diagrama de flujo de la etapa de elaboración de producto final.

Etapa 4. Paletizado

Finalidad: Gestionar la carga de productos finales sobre palets para su posterior almacenamiento.

Implementación: Al igual que en la etapa inicial, lo primero que se realiza es la comprobación del estado de los botones del cuadro. La secuencia de comprobaciones y las acciones resultantes así como los modos de funcionamiento siguen la misma lógica y procedimiento.

En la parte de manipulación de palets, un sensor detecta la presencia de palet en la mesa de rotación. Cuando esta detección se confirma, se inicia la rotación de la mesa hacia un ángulo de 90 grados, activada mediante el flanco descendente del sensor de entrada. La cinta de salida se pone en marcha paralelamente para facilitar el movimiento del palet. Cuando la mesa alcanza la posición rotada, se confirma con el sensor correspondiente, se detienen los movimientos y el palet se coloca en la base del paletizador.

Respecto a los objetos a paletizar, la cinta inclinada arranca cuando se detecta un objeto. Un contador incrementa cada vez que se detecta un objeto, y cuando se tienen dos objetos formados, se activa un empujador hidráulico (pusher). Al completar dos ciclos de empuje, el paletizador eleva el palet y abre el plato para depositar los objetos.

Tras colocar el palet cargado en la estación, el proceso baja el palet automáticamente y cierra el plato. Finalmente, se activa la cinta para remover el palet cargado de la estación, preparando el sistema para el siguiente ciclo.

Para esta fase se diseñó una interfaz HMI que permite al operador interactuar con los botones del cuadro y visualizar la siguiente información de manera gráfica: el estado de las cintas, así como el estado de la mesa de rotación, la presencia de elementos listos para sobreponer en el palet, que se indica mediante dos rectángulos blancos y un rectángulo naranja que señala si hay un palet en la base de la estación y su posición. Además, existen dos recuadros en los que se puede visualizar los elementos que están listos para ser empujados al plato y los elementos totales que han sido paletizados. Esta pantalla está detallada en la figura 28.

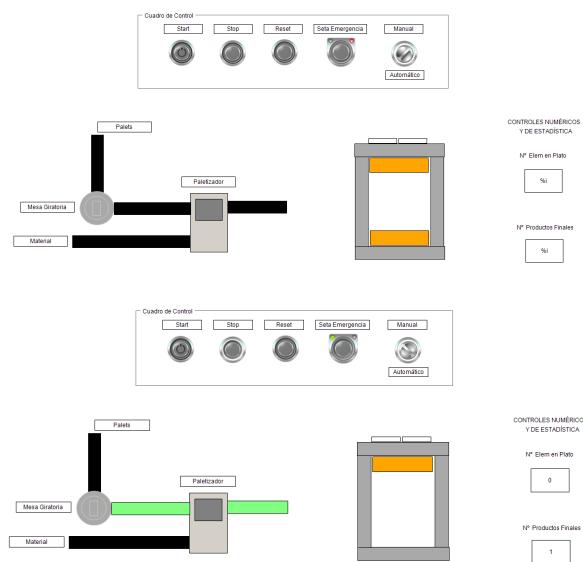


Figura 30: HMI de la etapa de paletizado.

La explicación y funcionamiento detallado de esta etapa pueden observarse en el diagrama de flujo representado en la figura 31.

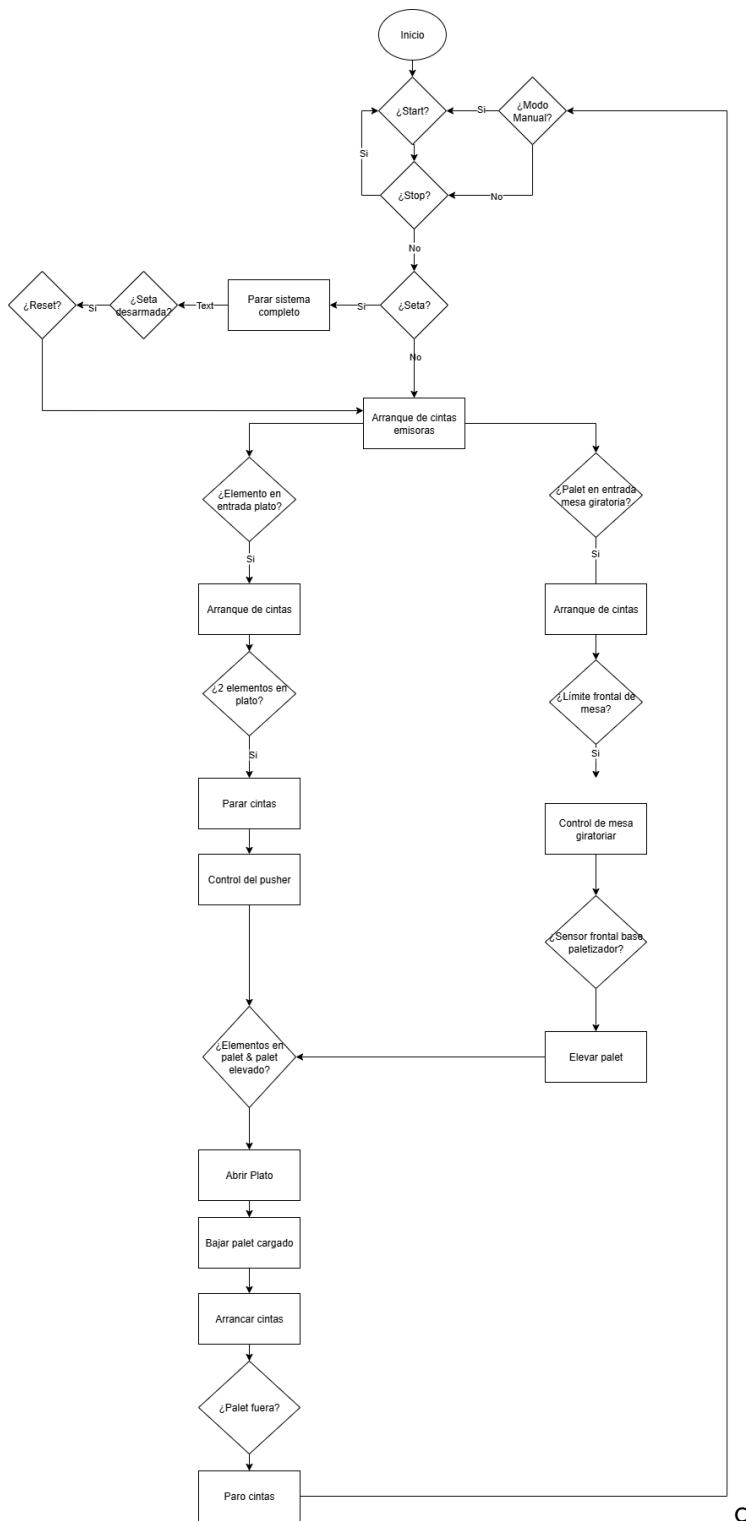


Figura 31: Diagrama de flujo de la etapa de paletizado.

Etapa 5. Almacen

Finalidad: Almacenar los productos previamente paletizados.

Implementación:

Al igual que en la etapa inicial, lo primero que se realiza es la comprobación del estado de los botones del cuadro. La secuencia de comprobaciones y las acciones resultantes así como los modos de funcionamiento siguen la misma lógica y procedimiento.

Para la implementación de esta etapa se emplea una maquinaria de estados:

- **Estado 1:** Esperando inicio - el sistema se encuentra inactivo esperando que se pulse el botón de start, momento en el cual se activan las cintas y se inicializan las posiciones y parámetros iniciales.
- **Estado 2:** Espera de palet - se detienen las cintas y se espera a detectar un palet en la entrada del área de manipulación mediante sensores.
- **Estado 3:** Despliegue de horquilla - la horquilla derecha se despliega para recoger el palet, con verificación mediante límite de horquilla y un temporizador de 2 segundos.
- **Estado 4:** Cálculo y desplazamiento - se calcula la posición libre en la estantería y se mueve el sistema a la posición X y Z indicada para almacenar el palet.
- **Estado 5:** Espera de llegada - el sistema espera confirmar la llegada a la posición objetivo en X y Z antes de continuar.
- **Estado 6:** Descenso de horquilla - la horquilla izquierda baja para depositar el palet, controlado mediante límites de posición y sensores.
- **Estado 7:** Descarga del palet - se confirma que el palet ha sido depositado en la estantería y se desactiva el movimiento de bajada de la horquilla.
- **Estado 8:** Retorno a posición inicial - la horquilla y el sistema regresan a la posición inicial y se reactivan las cintas para recibir un nuevo palet.
- **Estado por defecto:** En caso de estado inválido, el sistema se reinicia al estado 1 para garantizar seguridad y continuidad.

Para esta fase se diseñó una interfaz HMI que permite al operador interactuar con los botones del cuadro y visualizar la siguiente información sobre los actuadores y sensores de la escena. La pantalla se organiza de la siguiente manera: en la parte izquierda se muestra el estado de las cintas, así como la posición de la grúa de manera gráfica. En la parte central de la pantalla también se incorpora un indicador numérico de la posición de la grúa, junto con un indicador gráfico de la posición de la horquilla en la base de la grúa. En la parte derecha se puede ver una matriz que indica en blanco las posiciones no disponibles y en verde las que están libres. Esta pantalla está detallada en la figura 32.

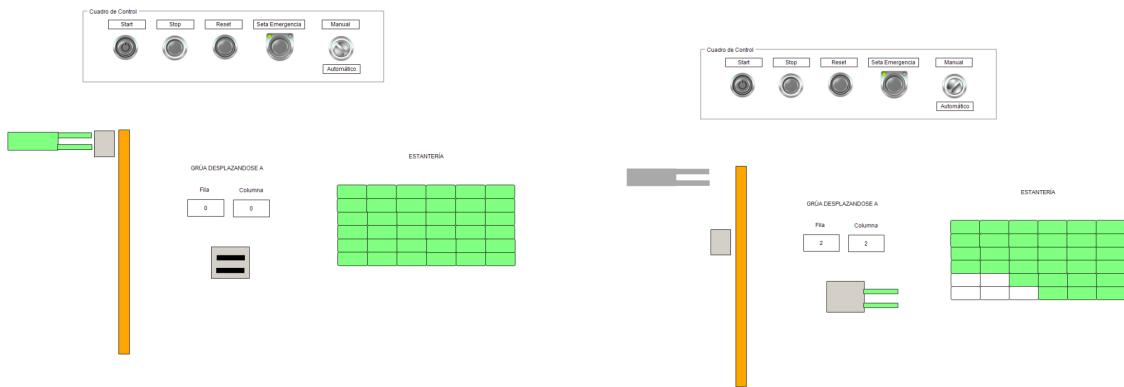


Figura 32: HMI de la etapa de paletizado.

La explicación y funcionamiento detallado de esta etapa pueden observarse en el diagrama de flujo representado en la figura 33.

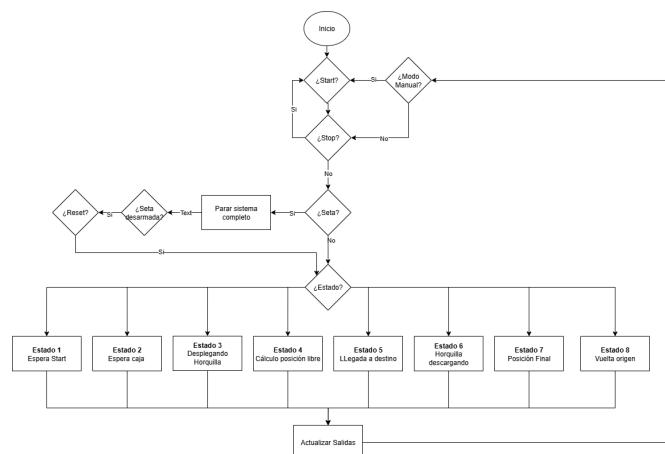


Figura 33: Diagrama de flujo de la etapa de almacén.

Repository del código

El software comentado hasta el momento se puede consultar en el repositorio público de GitHub <https://github.com/noeliast/TFM>

5. Conclusiones

Este proyecto de fin de máster ha demostrado la capacidad de diseñar, desarrollar y validar una planta industrial virtual mediante el uso de herramientas de simulación y control modernas, como Factory I/O y TwinCAT 3, integradas a través del protocolo OPC UA. La implementación ha permitido reproducir procesos productivos de manera realista, segura y eficiente, facilitando tanto la formación práctica como la validación de estrategias de control sin necesidad de recurrir a prototipos físicos costosos.

El desarrollo modular y secuencial del sistema garantizó la robustez y estabilidad del mismo, permitiendo la ejecución de cada etapa del proceso productivo —desde la recepción y filtrado de materiales hasta el almacenamiento de palets— con un alto nivel de detalle y control. La creación de interfaces HMI intuitivas mejoró la interacción del operador, proporcionando una visualización clara y en tiempo real de variables clave y el estado general de la planta.

Un aspecto especialmente relevante fue la incorporación de dos modos de funcionamiento diferenciados: manual y automático. Esta dualidad aporta flexibilidad al sistema y refleja con mayor fidelidad las condiciones de una planta industrial real. Mientras que el modo automático permite una operación continua y autónoma, el modo manual facilita la intervención del operador para pruebas, ajustes o tareas de mantenimiento.

No obstante, también se detectaron limitaciones propias de las herramientas utilizadas, como restricciones en la biblioteca de componentes, la imposibilidad de incorporar elementos personalizados y la falta de consideración de fenómenos físicos reales (fricción, desgaste, entre otros), que afectan la fidelidad respecto a un entorno industrial físico. Además, el rendimiento del hardware influye en la estabilidad y tiempo de respuesta de la simulación, aspecto a tener en cuenta en futuros desarrollos.

En conjunto, el proyecto logró constituir una base para desarrollos futuros, ya que la arquitectura implementada permite ampliar el sistema con nuevas funcionalidades sin necesidad de replantear todo el diseño. Entre las posibles evoluciones se encuentran la incorporación de operaciones adicionales en el almacén (como la retirada de palets ya almacenados), la ampliación de los procesos simulados, o la integración de módulos que aporten mayorrealismo y complejidad. De este modo, la planta virtual puede seguir evolucionando como entorno de prueba y aprendizaje, adaptable a diferentes necesidades industriales y académicas.

En definitiva, este proyecto ha demostrado cómo la integración de simulación, control y comunicación en un entorno virtual puede potenciar la formación, el análisis y el diseño de soluciones industriales, posicionándose como una herramienta versátil para el desarrollo de habilidades y la innovación en la Industria 4.0.

6. Bibliografía

- [1] Paessler AG. Monitoreo centralizado de opc ua con prtg. <https://www.paessler.com/monitoring/industrial-it/opc-ua-monitoring>.
- [2] Paessler AG. Prgt opc ua server: Extensión del software de monitoreo. <https://opcconnect.opcfoundation.org/2023/09/paessler-extends-prtg-monitoring-software-with-opc-ua/>.
- [3] Beckhoff Automation. Opc ua y twincat 3. <https://www.beckhoff.com/en-en/products/automation/twincat/tfxxxx-twincat-3-functions-tf6xxx-connectivity/tf6100.html>.
- [4] Beckhoff. Módulos opc ua de beckhoff. <https://www.beckhoff.com/es-es/support/download-finder/search-result/?c-1=26782567&c-2=26782572&c-3=97078210&search=TF6100%20OPC%20UA>.
- [5] Instituto Nacional de Ciberseguridad. Opc ua. instituo nacio-nal de ciberseguridad. <https://www.incibe.es/incibe-cert/blog/opc-ua-equilibrio-entre-ciberseguridad-y-rendimiento>.
- [6] OPC Foundation. Opc ua: Interoperabilidad para la industria 4.0 y el internet de las cosas. <https://opcfoundation.org/wp-content/uploads/2023/05/OPC-UA-Interoperability-For-Industrie4-and-IoT-EN.pdf>.
- [7] OPC Fundation. Modelo cliente-servidor de opc ua. <https://reference.opcfoundation.org/Core/Part1/v105/docs/>.
- [8] OPC Fundation. Opc ua. opc fundation. <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>.
- [9] Real games. Elementos disponibles en factory. <https://docs.factoryio.com/manual/parts/>.
- [10] Factory I/O. Elementos para cuadro de control de factory i/o. <https://docs.factoryio.com/manual/parts/operators/>.
- [11] Factory I/O. Opc ua y fcatory i/o. <https://docs.factoryio.com/manual/drivers/opc/>.
- [12] OPC Router. Casos de éxito: Stihl, herma y corratec. <https://www.opc-router.com/what-is-an-erp-system/>.
- [13] OPC Router. Opc router y sistemas erp. <https://www.opc-router.com/what-is-an-erp-system/>.
- [14] Techzine.eu. Prgt monitoring bridges the gap between it and ot. <https://www.techzine.eu/blogs/infrastructure/109469/paessler-prtg-monitoring-bridges-the-gap-between-it-and-ot/>.

7. Documentación de partida

Documento de asignación del TFM donde se refleja la descripción del trabajo a realizar y los objetivos planteados.

Número do traballo

2425_MIIR_13

Titulación

Mestrado Informática Industrial e Robótica

¿É unha proposta consensuada cun alumno para as súa asignación?

Si

Título do proxecto (Título en Galego)

Deseño, desenvolvemento e automatización dunha planta virtual

Título del proyecto (Título en Castelán)

Diseño, desarrollo y automatización de una planta virtual

Project Title (Título en Inglés)

Design, development and automation of a virtual plant

Nome do Titor/a

Francisco Zayas Gato

Nome do Titor/a (Só se hai dous titores)

Antonio Javier Díaz Longueira

Empresa do Titor (No caso de non ser da UDC)

Obxeto detallado do proxecto

Este Trabajo de Fin de Máster tiene como propósito el diseño y desarrollo de una planta industrial virtual, así como su posterior automatización mediante el uso de tecnologías avanzadas.

Alcance detallado do proxecto

- Estudio del proceso industrial, revisión de tecnologías de simulación y automatización, y evaluación de metodologías de integración.
- Desarrollo de planta industrial virtual mediante software de simulación 3D.
- Automatización de la planta mediante software específico para dicha tarea.
- Desarrollo de sistema de visualización o SCADA.