



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE GUAYAQUIL**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE PINTADO DE  
CARROCERÍAS PARA AUTOMÓVILES UTILIZANDO PLC Y PANTALLA HMI

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Electrónico

**AUTOR:** CÉSAR ANTONIO VILLACÍS ROMERO

**TUTOR:** RAFAEL CHRISTIAN FRANCO REINA

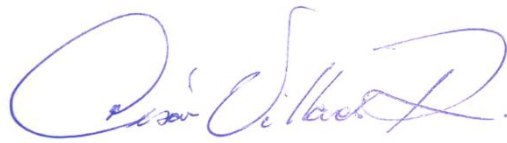
Guayaquil – Ecuador  
2024

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA**

Yo, César Antonio Villacís Romero con documento de identificación N°0930773973; manifiesto que: Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 22 de agosto del año 2024

Atentamente,



---

César Antonio Villacís Romero

C.I 0930773973

## CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, César Antonio Villacís Romero con documento de identificación N°0930773973 expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: **“Diseño y simulación de un Sistema automatizado de pintado de Carrocerías para Automóviles utilizando PLC y pantalla HMI”**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: **INGENIERO ELECTRÓNICO**, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Guayaquil, 22 de agosto del año 2024.

Atentamente,



---

**César Antonio Villacís Romero**

CI 0930773973

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Ing. Rafael Christian Franco Reina** con documento de identificación N°0923328629, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“Diseño y simulación de un Sistema automatizado de pintado de Carrocerías para Automóviles utilizando PLC y pantalla HMI”**, realizado por **César Antonio Villacís Romero** con documento de identificación N°0930773973 , obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 22 de agosto del año 2024

Atentamente,



---

**Ing. Rafael Christian Franco Reina**  
C.I 0923328629

## DEDICATORIA

Primero y, ante todo, a Dios, fuente inagotable de fuerza, sabiduría y guía en cada paso de este camino. Tal como lo expresa el Salmo 23:1, "El Señor es mi pastor; nada me faltará." En cada momento de duda y desafío, Su presencia ha sido mi refugio, iluminando el sendero y brindándome la serenidad necesaria para avanzar.

A mi querida madre, Bella Romero, una mujer incansable y valiente, la forjadora de un hombre que, pese a sus debilidades, ha aprendido a transformarlas en fortalezas. Tu ejemplo de perseverancia y amor incondicional ha sido la piedra angular de mi formación, inculcándome una autoestima sólida y un carácter firme. No hay palabras suficientes para expresar mi gratitud por cada sacrificio, cada consejo, y cada acto de amor que has entregado desinteresadamente. Eres el pilar sobre el cual se erige todo lo que soy.

A mi amada compañera de vida, Mayra, quien llegó a mi vida en un momento crucial y me brindó el aliento necesario para continuar mis estudios. Tu apoyo incondicional y tu amor inquebrantable han sido el motor que me impulsó para alcanzar este logro. Gracias a ti, he tenido la oportunidad de crecer, de enfrentar mis miedos y de convertirme en el hombre que soy hoy. Este logro no sería posible sin ti a mi lado, sosteniéndome y animándome a cada paso.

Finalmente, con profundo amor y eterna gratitud, dedico este logro a mis hijas, Isabella Villacís y Rebeca Villacís, mis dos pilares fundamentales y mi mayor fuente de inspiración. Su amor, su comprensión y su paciencia han sido la luz que ha guiado mis pasos en los momentos más oscuros. Gracias a ustedes, he aprendido a ser más paciente, a valorar las pequeñas cosas, y a enfrentar las dificultades con valentía. Su amor es el combustible que me motiva a seguir adelante, siempre buscando ser un mejor padre y un mejor ser humano.

César Antonio Villacís Romero

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza a lo largo de este camino.

A mi madre, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser siempre mi fuente de inspiración.

A mi compañera de vida, por su comprensión, paciencia y por estar a mi lado en cada paso de este proceso.

A mi hermana, por su apoyo y por creer en mí en todo momento.

A mis hijas, Isabella Villacís y Rebeca Villacís, quienes son mis dos mayores tesoros y la razón de mis más grandes esfuerzos.

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana por brindarme la oportunidad y los recursos necesarios para llevar a cabo el proyecto de titulación.

Al Ing. Rafael Christian Franco Reina, mi tutor, por su valioso apoyo, guía y asesoría en la realización de este proyecto.

A mis compañeros, Freddy, Bolívar y José, por sus palabras de aliento que me ayudaron a no perder la fe en este proceso. Su apoyo ha sido fundamental para alcanzar esta meta.

A todos ustedes, dedico esta gran victoria. Este logro no es solo mío, sino de cada persona que ha estado conmigo en este viaje. Gracias por su inquebrantable apoyo, por creer en mí y por ser parte de este capítulo tan importante de mi vida.

César Antonio Villacís Romero

## RESUMEN

| AÑO  | ALUMNOS                                                                       | DIRECTOR DE PROYECTO TÉCNICO       | TEMA DE PROYECTO TÉCNICO                                                                                                |
|------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2024 | <ul style="list-style-type: none"><li>César Antonio Villacís Romero</li></ul> | Ing. Rafael Christian Franco Reina | DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE PINTADO DE CARROCERÍAS PARA AUTOMÓVILES UTILIZANDO PLC Y PANTALLA HMI |

Este proyecto se enfoca en el diseño, desarrollo y simulación de un sistema automatizado para el proceso de pintado de carrocerías de automóviles. Se utilizó el PLC Siemens S7-1500 y una pantalla HMI, implementados a través del software TIA Portal, para controlar y monitorear cada fase del proceso. El sistema cubre todas las etapas necesarias, comenzando con la limpieza y desengrase, donde se asegura que la superficie de la carrocería esté libre de contaminantes. Luego, en la etapa de fosfatado, se aplica una capa protectora que mejora la adherencia de la pintura. A continuación, se lleva a cabo la imprimación, donde se prepara la superficie para recibir las capas de pintura finales. Finalmente, el proceso se completa con el secado, lo que garantiza que la pintura aplicada alcance los niveles de resistencia y durabilidad requeridos.

El desarrollo de este proyecto incluyó la configuración inicial del hardware y software, la programación de los PLCs para controlar cada etapa, y la creación de una interfaz HMI que permite al operador supervisar y controlar el proceso de manera efectiva. Para garantizar la precisión del sistema y su funcionamiento confiable, se realizaron pruebas simuladas en condiciones reales. Al proporcionar a los estudiantes un entorno de aprendizaje práctico, este enfoque ayudó a los estudiantes a aprender sobre la automatización industrial.

**Palabras claves:** Automatización, pintado de carrocerías, TIA Portal, HMI, fosfatado, pasivado.

ABSTRACT

| YEAR | STUDENTS                                                                      | DIRECTOR OF TECHNICAL PROJECT      | TECHNICAL PROJECT THEME                                                                        |
|------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2024 | <ul style="list-style-type: none"><li>César Antonio Villacís Romero</li></ul> | Ing. Rafael Christian Franco Reina | DESIGN AND SIMULATION OF AN AUTOMATED AUTOMOTIVE BODY PAINTING SYSTEM USING PLC AND HMI SCREEN |

This project focuses on the design, development, and simulation of an automated system for the painting process of automobile bodies. The Siemens S7-1500 PLC and an HMI screen were used, implemented through TIA Portal software, to control and monitor each phase of the process. The system covers all necessary stages, starting with cleaning and degreasing, ensuring that the car body surface is free of contaminants. Next, in the phosphating stage, a protective layer is applied to improve paint adhesion. This is followed by priming, where the surface is prepared to receive the final paint coats. Finally, the process is completed with drying, ensuring that the applied paint achieves the required levels of strength and durability.

The development of this project included the initial configuration of hardware and software, programming of the PLCs to control each stage, and the creation of an HMI interface that allows the operator to effectively monitor and control the process. To ensure the system's accuracy and reliable operation, simulated tests were conducted under real conditions. By providing students with a practical learning environment, this approach helped them learn about industrial automation.

**Keywords:** Automation, body painting, TIA Portal, HMI, phosphating, passivation.

## ÍNDICE GENERAL

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| INTRODUCCIÓN .....                                  | 1  |
| 1. EL PROBLEMA .....                                | 2  |
| 1.1. Antecedentes .....                             | 2  |
| 1.2. Importancia y Alcances.....                    | 2  |
| 1.3. Delimitación.....                              | 3  |
| 1.3.1. Temporal .....                               | 3  |
| 1.3.2. Espacial .....                               | 3  |
| 1.3.3. Académica.....                               | 3  |
| 2. OBJETIVOS .....                                  | 3  |
| 2.1. Objetivo general.....                          | 3  |
| 2.2. Objetivos específicos .....                    | 3  |
| 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....                        | 4  |
| 3.1. Conceptos generales de la automatización ..... | 4  |
| 3.2. Industria Automotriz.....                      | 5  |
| 3.2.1. Proceso de pintado de carrocerías.....       | 6  |
| 3.2.2. Detección de la Carrocería.....              | 7  |
| 3.2.3. Limpieza y Desengrase .....                  | 7  |
| 3.2.4. Fosfatado.....                               | 8  |
| 3.2.5. Imprimación.....                             | 9  |
| 3.2.6. Sellado.....                                 | 9  |
| 3.2.7. Recubrimiento medio.....                     | 10 |
| 3.2.8. Recubrimiento superior.....                  | 11 |
| 3.2.9. Secado .....                                 | 12 |

|         |                                                                             |    |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.10. | Inspección final .....                                                      | 12 |
| 3.3.    | Software De Automatización Tía Portal .....                                 | 12 |
| 3.4.    | PLC S7-1500.....                                                            | 13 |
| 3.5.    | Pantalla Táctil HMI KTP-700.....                                            | 14 |
| 3.6.    | Conexión de red Profinet .....                                              | 15 |
| 3.7.    | Pirámide De Automatización.....                                             | 16 |
| 3.8.    | Programación Ladder.....                                                    | 18 |
| 3.9.    | Elementos Básicos de la Programación Ladder.....                            | 19 |
| 3.9.1.  | Contactos (NO y NC).....                                                    | 19 |
| 3.9.2.  | Bobinas (Salidas) .....                                                     | 19 |
| 3.9.3.  | Temporizadores.....                                                         | 19 |
| 3.9.4.  | Comparadores .....                                                          | 20 |
| 3.9.5.  | Contadores .....                                                            | 22 |
| 4.      | MARCO METODOLÓGICO.....                                                     | 25 |
| 4.1.    | Diagrama de flujo del proceso de pintado de carrocerías de automóviles..... | 25 |
| 4.1.    | Detección de la Carrocería.....                                             | 26 |
| 4.2.    | Limpieza y Desengrase .....                                                 | 26 |
| 4.3.    | Fosfatado e Imprimación .....                                               | 26 |
| 4.4.    | Revestimiento Medio (Middle Coating) .....                                  | 26 |
| 4.5.    | Revestimiento Superior (Top Coating).....                                   | 27 |
| 4.6.    | Secado .....                                                                | 27 |
| 4.7.    | Crear un Proyecto en TIA Portal .....                                       | 27 |
| 4.7.1.  | Crear un Nuevo Proyecto.....                                                | 27 |
| 4.7.2.  | Configuración de Hardware.....                                              | 28 |
| 4.7.3.  | Configurar PLC:.....                                                        | 29 |

|         |                                                                  |    |
|---------|------------------------------------------------------------------|----|
| 4.7.4.  | Agregar Módulos de Entrada/Salida (I/O):.....                    | 30 |
| 4.8.    | Configuración de la Pantalla HMI .....                           | 30 |
| 4.8.1.  | Agregar HMI:.....                                                | 30 |
| 4.8.2.  | Configurar HMI: .....                                            | 31 |
| 4.8.3.  | Configurar credenciales de usuario:.....                         | 31 |
| 4.9.    | Diseño de la interfaz de simulación y modelado del sistema ..... | 33 |
| 4.10.   | Uso de TIA Portal para la Simulación .....                       | 36 |
| 4.10.1. | Segmento 1: Condiciones de inicio.....                           | 37 |
| 4.10.2. | Segmento 2: Inicio y Detección de Carrocería .....               | 37 |
| 4.10.3. | Segmento 3: Limpieza y Desengrase .....                          | 38 |
| 4.10.4. | Segmento 4: Fosfatado e Imprimación .....                        | 40 |
| 4.10.5. | Segmento 5: Sellado .....                                        | 42 |
| 4.10.6. | Segmento 6: Revestimiento medio .....                            | 43 |
| 4.10.7. | Segmento 7: Revestimiento superior .....                         | 44 |
| 4.10.8. | Segmento 8: Secado .....                                         | 45 |
| 4.11.   | Implementación del proyecto en laboratorio .....                 | 46 |
| 4.11.1. | Configuración de Hardware y Software .....                       | 46 |
| 4.11.2. | Configuración de la HMI:.....                                    | 46 |
| 4.11.3. | Implementación de Sensores y Actuadores .....                    | 47 |
| 5.      | RESULTADOS.....                                                  | 49 |
| 5.1.    | Análisis de Resultados .....                                     | 49 |
| 5.1.1.  | Simulación de detección de carrocería .....                      | 49 |
| 5.1.2.  | Simulación de limpieza y desengrasado .....                      | 50 |
| 5.1.3.  | Simulación de fosfatado.....                                     | 51 |
| 5.1.4.  | Simulación de imprimación .....                                  | 53 |

|                                          |                                           |    |
|------------------------------------------|-------------------------------------------|----|
| 5.1.5.                                   | Simulación de sellado .....               | 54 |
| 5.1.6.                                   | Simulación de revestimiento medio.....    | 55 |
| 5.1.7.                                   | Simulación de revestimiento superior..... | 56 |
| 5.1.8.                                   | Simulación de secado.....                 | 57 |
| CRONOGRAMA.....                          |                                           | 58 |
| PRESUPUESTO .....                        |                                           | 59 |
| CONCLUSIONES .....                       |                                           | 60 |
| RECOMENDACIONES.....                     |                                           | 61 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....          |                                           | 62 |
| ANEXOS .....                             |                                           | 66 |
| ANEXO A: Detección de la Carrocería..... |                                           | 66 |
| ANEXO B: Limpieza y Desengrase .....     |                                           | 66 |
| ANEXO C: Fosfatado e Imprimación.....    |                                           | 67 |
| ANEXO D: Secado .....                    |                                           | 68 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Principio de la aplicación electrostática (Rojas, 2021)..... | 6  |
| Figura 2: Esquema del proyecto. ....                                   | 7  |
| Figura 3: Lavado inicial (Toyota Global, 2023). ....                   | 8  |
| Figura 4 Limpieza y desengrase (Toyota Global, 2023).....              | 8  |
| Figura 5: Baño de Electrodeposición (Toyota Global, 2023). ....        | 9  |
| Figura 6: Proceso de sellado (Toyota Global, 2023). ....               | 10 |
| Figura 7: Recubrimiento medio pintura (Toyota Global, 2023). ....      | 10 |
| Figura 8: Acabado vibrante (Toyota Global, 2023).....                  | 11 |
| Figura 9: Capa superior pintura final (Toyota Global, 2023). ....      | 11 |
| Figura 10: Secado en horno (Toyota Global, 2023). ....                 | 12 |
| Figura 11: Inspección final (Toyota Global, 2023). ....                | 12 |

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 12: INTERFAZ TIA PORTAL V16 (siemens.com, 2020). .....    | 13 |
| Figura 13: PLC S7-1500 (siemens.com, 2023).....                  | 14 |
| Figura 14: Pantalla HMI (siemens.com, 2023). .....               | 15 |
| Figura 15: Configuración de red profinet (RealPars, 2022). ..... | 16 |
| Figura 16: Pirámide de automatización (INCIBE, 2023). .....      | 16 |
| Figura 17: Contacto NO/NC .....                                  | 19 |
| Figura 18: Bobina PLC. ....                                      | 19 |
| Figura 19: TON: temporizador Q10 .....                           | 20 |
| Figura 20: Comparador de igualdad. ....                          | 20 |
| Figura 21: Comparador mayor que. ....                            | 21 |
| Figura 22: Comparador menor que. ....                            | 21 |
| Figura 23: Comparador mayor o igual que. ....                    | 21 |
| Figura 24: Comparador menor o igual que. ....                    | 22 |
| Figura 25: Contador ascendente.....                              | 22 |
| Figura 26: Contador descendente.....                             | 23 |
| Figura 27: Contador ascendente y descendente. ....               | 23 |
| Figura 28: Diagrama del proceso. ....                            | 25 |
| Figura 29: Crear nuevo proyecto en TIA Portal. ....              | 28 |
| Figura 30: Agregar dispositivo. ....                             | 29 |
| Figura 31: Configuración direccionamiento IP.....                | 29 |
| Figura 32: Módulos Entrada/Salida. ....                          | 30 |
| Figura 33: Agregar HMI. ....                                     | 30 |
| Figura 34: Configuración HMI. ....                               | 31 |
| Figura 35: Configuración credenciales. ....                      | 31 |
| Figura 36: Pantalla de inicio. ....                              | 32 |
| Figura 37: Pantalla emergente de login. ....                     | 32 |
| Figura 38: Validación de usuario conectado.....                  | 33 |
| Figura 39: Imagen HMI en blanco.....                             | 33 |
| Figura 40: Herramientas básicas para el diseño.....              | 34 |
| Figura 41: Imagen HMI base. ....                                 | 34 |
| Figura 42: Diseño HMI de solución.....                           | 36 |

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 43: Condiciones Iniciales. ....                               | 37 |
| Figura 44: Detección de la pieza.....                                | 37 |
| Figura 45: Contadores CTUD.....                                      | 38 |
| Figura 46: Segmento para el proceso de limpieza. ....                | 39 |
| Figura 47: Etapa de fosfatado. ....                                  | 40 |
| Figura 48: Lógica Ladder para imprimación. ....                      | 41 |
| Figura 49: Etapa de sellado.....                                     | 42 |
| Figura 50: Etapa de revestimiento medio. ....                        | 43 |
| Figura 51: Etapa de revestimiento superior. ....                     | 44 |
| Figura 52: Etapa de secado. ....                                     | 45 |
| Figura 53: Modulo PLC S7-1500. ....                                  | 46 |
| Figura 54: HMI en modulo. ....                                       | 47 |
| Figura 55: Lamina de mando y señalización PLC.....                   | 47 |
| Figura 56: Implementación de configuración física del proyecto. .... | 48 |
| Figura 57: Implementación completa del sistema. ....                 | 48 |
| Figura 58: Detección de la carrocería. ....                          | 49 |
| Figura 59: Simulación de la etapa de detección.....                  | 50 |
| Figura 60: Diagrama de flujo de limpieza. ....                       | 50 |
| Figura 61: Simulación de la etapa de limpieza. ....                  | 51 |
| Figura 62: Diagrama de flujo de fosfatado. ....                      | 52 |
| Figura 63: Simulación de fosfatado. ....                             | 52 |
| Figura 64: Diagrama de flujo de la imprimación.....                  | 53 |
| Figura 65: Simulación de imprimación.....                            | 53 |
| Figura 66: Diagrama de flujo de sellado.....                         | 54 |
| Figura 67: Simulación de sellado.....                                | 54 |
| Figura 68: Diagrama de flujo de revestimiento medio. ....            | 55 |
| Figura 69: Simulación de revestimiento medio. ....                   | 55 |
| Figura 70: Diagrama de flujo de revestimiento superior. ....         | 56 |
| Figura 71: Simulación de revestimiento superior. ....                | 56 |
| Figura 72: Diagrama de flujo de secado. ....                         | 57 |
| Figura 73: Simulación de proceso de secado.....                      | 57 |

**INDICE DE TABLAS**

Tabla 1. .... 18

Tabla 2. .... 58

Tabla 3. .... 59

## INTRODUCCIÓN

La automatización de procesos industriales ha sido fundamental en la evolución de la industria moderna, especialmente en el contexto de la Industria 4.0. La automatización no solo mejora la eficiencia y la precisión de los procesos, sino que también reduce los costos operativos y minimiza los errores humanos. En la industria automotriz, uno de los procesos más críticos es el pintado de carrocerías, el cual requiere un control riguroso de diversas variables operativas como temperatura, presión y tiempo (Schmidt, Korzenowski, Goecks, Gomes, & Benetti, 2023).

Este proyecto se centra en desarrollar un sistema automatizado para el pintado de carrocerías de automóviles, utilizando tecnologías avanzadas como el PLC Siemens S7-1500 y pantallas HMI, implementadas y simuladas a través del software TIA Portal.

El proyecto se desarrolla en varias etapas, la primera etapa es la Limpieza y Desengrase, donde se asegura una superficie libre de contaminantes mediante la aplicación de aspersión de agua a temperaturas controladas de 50-60°C y presiones de 2-3 bar. La segunda etapa es el Fosfatado, donde la carrocería se sumerge en una solución a 50°C durante 2-4 minutos para formar una capa protectora que mejora la adherencia de la pintura. La tercera etapa es la Imprimación, en la cual la carrocería se sumerge en un baño de imprimación, asegurando una base adecuada para las capas posteriores de pintura.

Posteriormente, se realizan las etapas de Revestimiento Medio y Superior, donde se aplican capas adicionales de pintura para asegurar durabilidad y estética. En la etapa de Secado, se utilizan hornos a 150°C durante 20 minutos para curar la pintura y asegurar un acabado duro y duradero. Finalmente, se lleva a cabo una Inspección Final para verificar la calidad del recubrimiento, asegurando que no haya imperfecciones y que el acabado cumpla con los estándares de la industria.

Cada etapa del proceso ha sido programada y simulada utilizando TIA Portal, permitiendo a los estudiantes visualizar y controlar las variables de operación en tiempo real. Este enfoque educativo facilita la comprensión y aplicación de los sistemas de automatización en escenarios industriales reales, proporcionando una plataforma flexible y accesible para desarrollar habilidades prácticas en programación de PLCs, configuración de HMI y control de procesos industriales.

## **1. EL PROBLEMA**

### **1.1. Antecedentes**

Debido a la creciente importancia de adquirir competencias en medios industriales, la automatización y el control han surgido como elementos fundamentales. Los estudiantes de Electrónica y Automatización se encuentran con la problemática de que no existe una división clara entre los conceptos teóricos y las aplicaciones prácticas en el campo laboral, especialmente en sistemas avanzados como SCADA, que son esenciales en diversas industrias. Esta brecha educativa se hace evidente en procesos industriales complejos, como el pintado de carrocerías para automóviles, que involucran múltiples fases de programación de PLC y HMI (Vitali Vansovits, 2022).

### **1.2. Importancia y Alcances**

Automatizar procesos industriales, específicamente en la industria automotriz, mejora significativamente la eficiencia y calidad. Este proyecto se enfoca en desarrollar y simular un sistema automatizado para el pintado de carrocerías de automóviles usando el PLC Siemens S7-1500 y pantallas HMI con el software TIA Portal. Automatizar el pintado permite una aplicación precisa y controlada de cada capa de pintura, garantizando mayor consistencia y reducción de errores humanos, esto se traduce en mejor protección contra la corrosión y otros factores ambientales, resultando en un producto final de mayor calidad. Además, el proyecto de ofrecer a los estudiantes una plataforma práctica para aprender y experimentar con sistemas de control industrial avanzados, preparándolos mejor para el mundo laboral.

El alcance del proyecto incluye varias etapas: configuración de hardware y software, desarrollo del sistema de pintado, simulación y validación, y documentación y evaluación. Se instalarán y configurarán el PLC y las pantallas HMI, se programarán las etapas del proceso de pintado, y se integrarán sensores y actuadores para simular condiciones reales. Las pruebas preliminares garantizarán la precisión de las simulaciones, ajustando los parámetros según los resultados obtenidos. Finalmente, se documentará todo el proceso y se evaluará el desempeño del sistema automatizado, estableciendo un marco para futuras investigaciones y desarrollos en el ámbito de la automatización industrial.

### **1.3. Delimitación**

#### **1.3.1. Temporal**

Se considera un período máximo de 2 meses para completar el desarrollo del proyecto. Este tiempo incluye todas las fases, desde la planificación inicial hasta la implementación y pruebas finales.

#### **1.3.2. Espacial**

El proyecto se desarrolla en el laboratorio de automatismo 2 de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS), el espacio está equipado con los recursos necesarios para realizar las actividades programadas.

#### **1.3.3. Académica**

Este proyecto se basa en los conocimientos adquiridos en las materias de Automatización I y II, así como en Redes de Computadoras. Estas disciplinas proporcionan las bases teóricas y prácticas necesarias para el desarrollo del sistema automatizado.

## **2. OBJETIVOS**

Se plantean los objetivos del proyecto tanto general como específicos detallados a continuación:

### **2.1. Objetivo general**

Diseñar y simular un sistema automatizado de pintado de Carrocerías para Automóviles utilizando PLC y pantalla HMI.

### **2.2. Objetivos específicos**

Diseñar la programación del proceso de pintado de carrocerías en el software de programación TIA PORTAL.

Simular las variables de proceso en la pantalla HMI para visualizar el sistema automatizado de pintado.

Evaluar las etapas simuladas del sistema automatizado de pintado en el laboratorio de automatismo 2 de la UPS.

### **3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

#### **3.1. Conceptos generales de la automatización**

La automatización ha contribuido de manera significativa a mejorar la eficiencia, calidad y seguridad en el proceso de pintado de carrocerías de automóviles. Históricamente, el proceso de pintado manual ha presentado diversas desventajas como la falta de uniformidad en su aplicación, largos tiempos necesarios para completar el trabajo y riesgos para los trabajadores debido a la exposición a productos químicos (Noura Almansoori, 2020 ).

Con el surgimiento de la automatización, las empresas han adoptado tecnologías como los PLC y HMI para optimizar dichos procesos. A partir de los años 60, el control de procesos industriales ha experimentado un cambio radical gracias a la incorporación de los PLCs. Estos dispositivos han permitido una programación más versátil y una integración mucho más eficiente de sensores y actuadores (Sánchez, 2022).

El uso de software como TIA Portal de Siemens ha simplificado aún más la integración y simulación de estos sistemas. Usando TIA Portal, los ingenieros pueden diseñar, programar y probar sistemas automatizados en un entorno virtual antes de implementarlos físicamente. Esto significa una disminución tanto en los costos como en el tiempo requerido para el desarrollo. La simulación provee un ambiente seguro en el cual se pueden detectar y solucionar fallos, además de mejorar la configuración del sistema y entrenar a los operadores de manera controlada (Álvarez Serrano & Guevara Toledo, 2021).

En el campo educativo, es imprescindible incluir proyectos de automatización en los programas académicos para garantizar una preparación adecuada de los estudiantes frente a las exigencias actuales del mercado laboral. Los estudiantes obtienen destrezas fundamentales para adaptarse a las tecnologías en desarrollo y desempeñar un papel importante en sus futuras carreras profesionales, gracias a la práctica real que adquieren al programar PLCs, configurar HMIs y simular procesos industriales (Reyes Ávila & Roldan Sarango, 2021).

Para el desarrollo del marco de la teoría efectiva a establecer, se han consultado diferentes fuentes, citando conceptos referentes a las aplicaciones necesarias para el desarrollo virtual del proyecto, dando a conocer el funcionamiento y simbología de los siguientes elementos electrónicos y eléctricos a utilizar, además de ciertos aspectos obtenidos en el estudio académico impartido en la Universidad Politécnica Salesiana.

### **3.2. Industria Automotriz**

El proceso de pintado de vehículos es un conjunto de procedimientos altamente especializados que se realizan para proporcionar una capa de pintura duradera, estéticamente agradable y protectora en la carrocería de los vehículos. Este proceso no solo es vital para la apariencia del vehículo sino también para su protección contra factores ambientales y mecánicos (Milla-León Rodríguez, 2020).

Inicialmente, se comienza con la limpieza y desengrasado de la carrocería para eliminar toda grasa, polvo e impurezas acumuladas. Esto se lleva a cabo mediante aspersión, rociado o inmersión, seguido de un lavado con agua desmineralizada que asegura la remoción completa de residuos (Arcos Bonilla, 2022).

Posteriormente, la carrocería es sometida a un proceso de fosfatado, donde se sumerge en una solución con ácido fosfórico y fosfatos de zinc, junto con aditivos acelerantes, formando así una capa de fosfato de zinc. Esta capa es crucial ya que mejora la adherencia de la pintura y proporciona una protección inicial contra la corrosión (Solís Bazán & Mendoza Vera, 2022).

El siguiente paso es el pasivado, donde la superficie tratada se lava con una solución acuosa que incrementa aún más la adherencia y protección anticorrosiva. Un lavado final con agua desionizada es esencial para eliminar cualquier resto de electrolitos o productos químicos anteriores (Bernabeu & Azkargorta, 2023). Después del pasivado, la carrocería pasa por un proceso de secado utilizando aire caliente, que tiene como fin endurecer las capas formadas y preparar la superficie para los tratamientos posteriores (Ruidias Almeida & Terán Sánchez, 2019).

La cataforesis es el tratamiento subsecuente, y en él la carrocería actúa como cátodo dentro de un baño de pintura cargada eléctricamente que contiene pigmentos anticorrosivos. La aplicación de una corriente eléctrica hace que la pintura se deposite de manera uniforme sobre la carrocería. Un lavado posterior con agua desionizada garantiza la eliminación de residuos del proceso (Gómez Sánchez de Rojas, 2021).

Una vez que se establece la capa base anticorrosiva, se procede con el sellado y hermetización de las zonas de unión, para prevenir filtraciones de agua. En este punto, también se aplican paneles insonorizantes y antigraillas para reducir ruido y vibraciones, y proteger contra impactos de piedras (Alejandro López Martínez, 2019).

El aparejado se lleva a cabo mediante la aplicación electrostática de un material que proporciona una superficie lisa y uniforme, fundamental para la correcta adherencia de la pintura de acabado. En estos casos, se realiza un suave lijado y limpieza posterior al secado para asegurar la remoción de cualquier defecto superficial (M H Yosri, 2019).

Finalmente, la pintura de acabado es aplicada siguiendo el principio de aplicación electrostática, comúnmente a través de sistemas electrostáticos, y luego curada en hornos a temperaturas entre 120 y 160°C. Este es el paso que confiere al vehículo su aspecto final y propiedades estéticas deseadas (GARCIA, Uribe, & LEMUS, 2022).

Para garantizar una carga electrostática homogénea y eficiente durante el proceso de aplicación electrostática, es necesario un tamaño de partícula adecuado, generalmente de alrededor de 40 micras. Las partículas cargadas se adhieren bien a las superficies metálicas aterrizadas, lo que permite un recubrimiento uniforme y reduce la cantidad de polvo que va al sistema de recuperación tal como se ve en la figura 1.

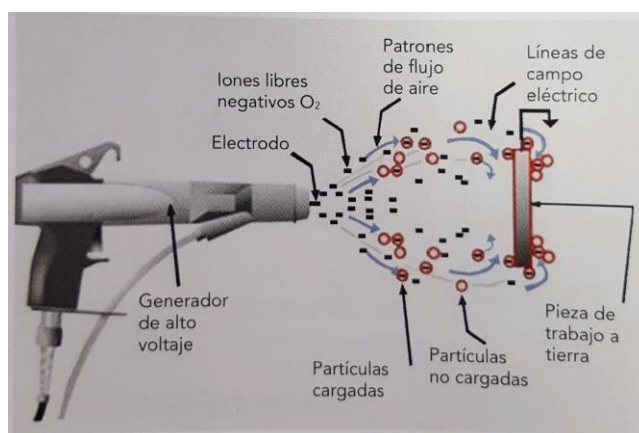


Figura 1: Principio de la aplicación electrostática (Rojas, 2021).

### 3.2.1. Proceso de pintado de carrocerías

Para el desarrollo de este apartado en el marco de la teoría efectiva a establecer, se han consultado diferentes fuentes, citando conceptos referentes a las aplicaciones necesarias para el desarrollo virtual del proyecto, dando a conocer el funcionamiento y simbología de los siguientes elementos electrónicos y eléctricos a utilizar como se ve en la figura 2, además de ciertos aspectos obtenidos en el estudio académico impartido en la Universidad Politécnica Salesiana.

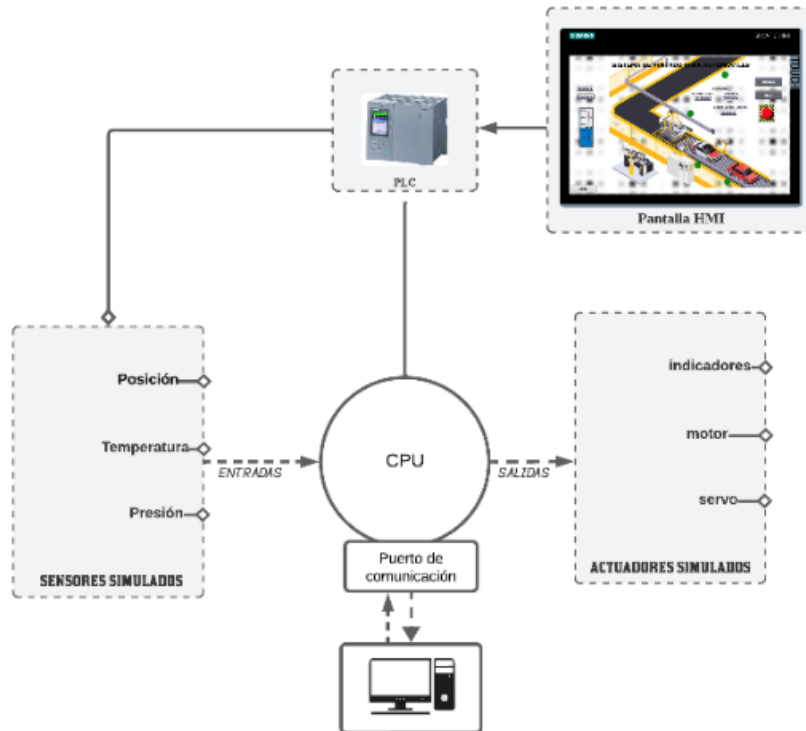


Figura 2: Esquema del proyecto.

### 3.2.2. Detección de la Carrocería

La detección de la carrocería es el primer paso en el proceso automatizado de pintado de automóviles. Este paso utiliza un sensor de posición simulado por un botón que aseguran la correcta alineación y ubicación de la carrocería para las etapas siguientes. El sensor para una implementación real puede ser de ultrasonido, láser o fotocélulas, detectan la presencia y posición exacta de la carrocería en la línea de producción.

La precisión en la detección sirve para evitar fallos en el alineamiento que podrían resultar en aplicaciones de pintura defectuosas. Estudios recientes han mostrado que el uso de sensores avanzados mejora la eficiencia operativa y reduce el margen de error en la detección de carrocerías (Vieira, 2023).

### 3.2.3. Limpieza y Desengrase

La limpieza y desengrase de la carrocería aseguran la calidad de la pintura aplicada. Este proceso comienza con una evaluación del estado de la superficie para identificar contaminantes como grasa, aceite y polvo. El proceso incluye las siguientes un lavado inicial donde se utiliza una solución de detergente automotriz para eliminar contaminantes grandes, figura 3. Este

lavado inicial garantiza que cualquier residuo suelto sea removido ya que una pequeña cantidad de residuos o película de aceite puede afectar significativamente la calidad de la pintura (Toyota Global, 2023).



Figura 3: Lavado inicial (Toyota Global, 2023).

Luego para el desengrase se aplica un desengrasante especializado mediante aspersión a temperaturas controladas entre 50-60°C, figura 4. con una presión de 2-3 bar para asegurar una cobertura completa y efectiva para evitar problemas con la pintura (Abrasives, 2023).



Figura 4 Limpieza y desengrase (Toyota Global, 2023).

#### **3.2.4. Fosfatado**

El fosfatado mejora la adherencia de la pintura y proporcionan protección contra la corrosión. En la etapa de fosfatado, la carrocería se sumerge en una solución fosfatada que reacciona con la superficie metálica, formando una capa de fosfato de zinc.

En la primera inmersión la solución se mantiene a 50°C y la carrocería se sumerge durante 2-4 minutos. Esta inmersión forma una capa uniforme y adherente (Balasubramanian, 2023).

### 3.2.5. Imprimación

El proceso de imprimación utiliza la tecnología de electrodeposición, que implica el uso de electricidad para adherir una capa de pintura a la carrocería, figura 5.

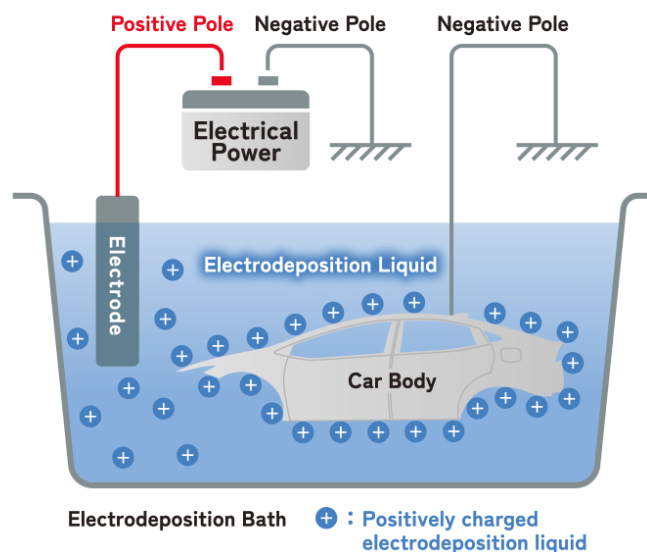


Figura 5: Baño de Electrodeposición (Toyota Global, 2023).

La carrocería se sumerge en un baño de pintura cargada eléctricamente. Un electrodo positivo se coloca en el tanque de agua y un electrodo negativo en la carrocería del automóvil. La electricidad hace que la pintura cargada positivamente se adhiera a la carrocería (Vishesh Aggarwal, 2022).

### 3.2.6. Sellado

El proceso de sellado en la pintura de carrocerías de automóviles tiene como objetivo principal la impermeabilización, protección contra la corrosión y mejora del aislamiento acústico. Este proceso también se utiliza para mejorar la apariencia de las áreas como los guardabarros. La aplicación de Sellador en uniones de placas de acero lo que facilita la impermeabilización y protección contra la Corrosión (Jiyue Qin, 2023).

El sellador se aplica en las uniones de las placas de acero tal como se ve en la figura 6 para prevenir la entrada de agua y la formación de óxido. Esta etapa permite asegurar la durabilidad y longevidad de la carrocería del vehículo. El sellador actúa como una barrera protectora,

evitando que el agua y otros elementos corrosivos entren en contacto con el metal (Xingli Wang, 2022).



Figura 6: Proceso de sellado (Toyota Global, 2023).

### 3.2.7. Recubrimiento medio

La aplicación de la capa intermedia proporciona una base uniforme para las capas superiores de pintura, mejorando la adherencia y ofreciendo protección adicional.

En primer lugar, se realiza la aplicación de la Capa Intermedia donde, se utiliza pulverización electrostática para asegurar una cobertura uniforme de la pintura. Esta técnica carga eléctricamente las partículas de pintura para que se adhieran eficientemente a la superficie metálica, figura 7.

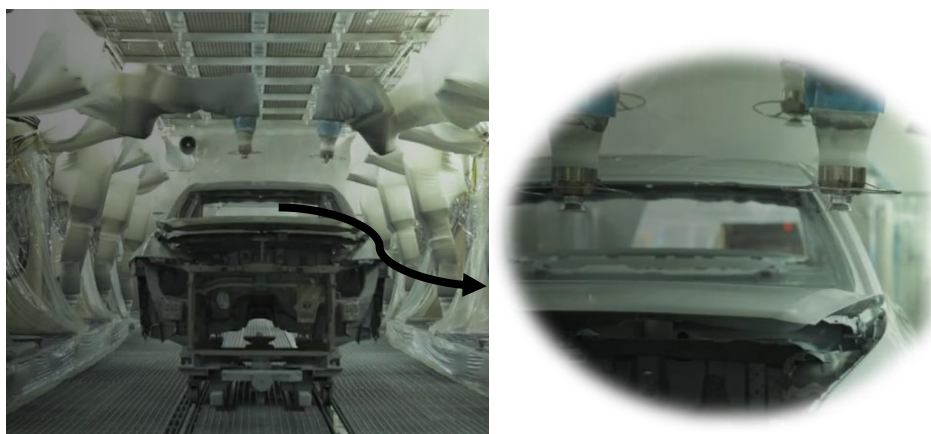


Figura 7: Recubrimiento medio pintura (Toyota Global, 2023).

El color de la capa intermedia se determina en función del color exterior de la carrocería deseado, con la combinación correcta para ayudar a que se destaque, figura 8.

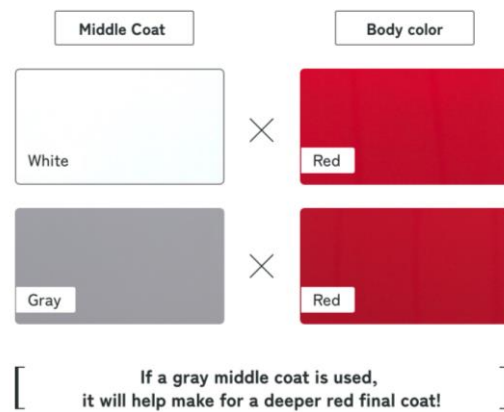


Figura 8: Acabado vibrante (Toyota Global, 2023).

### 3.2.8. Recubrimiento superior

La aplicación de la capa superior proporciona el acabado final, incluyendo la apariencia estética y la protección contra factores ambientales, es decir, figura 9. la aplicación de la Capa Superior se emplea la pulverización electrostática para aplicar la capa superior de pintura, asegurando una cobertura uniforme (Erfan Rezvani Ghomi, 2020).



Figura 9: Capa superior pintura final (Toyota Global, 2023).

### **3.2.9. Secado**

El secado es una etapa que asegura que la carrocería esté completamente libre de humedad antes de la inspección final y la entrega se hace con aire caliente y se utiliza una temperatura de 150°C durante 20 minutos para asegurar que la carrocería esté completamente seca. El control preciso de la temperatura sirve para evitar la formación de condensación o imperfecciones en la superficie y proporciona un acabado bonito y resistente, figura10.



Figura 10: Secado en horno (Toyota Global, 2023).

### **3.2.10. Inspección final**

La inspección final es una etapa determinante en el proceso de pintado de carrocerías de automóviles, asegurando que el acabado cumpla con los estándares de calidad exigidos. Durante esta fase, se revisa meticulosamente la superficie pintada, utilizando tanto la vista como el tacto para identificar cualquier imperfección, figura11.



Figura 11: Inspección final (Toyota Global, 2023).

## **3.3. Software De Automatización Tía Portal**

Con lo que respecta a la programación del HMI, se requiere la ayuda del software TIA PORTAL, el cual es un sistema de ingeniería moderna, que permite configurar de manera intuitiva y eficiente todos los procesos de producción que se desee implementar en autómatas programables de la marca Siemens aprovechando los distintos lenguajes de programación para

automatizar procesos manuales e incluso desde sistemas automáticos para producción en cada hasta sistemas de control y monitoreo en red.

Además, TIA PORTAL ofrece herramientas de diagnóstico y simulación que permiten a los usuarios probar y verificar sus configuraciones antes de la implementación final, asegurando así que los sistemas funcionen correctamente desde el inicio tal como se ve en la figura 12. (siemens.com, 2020)

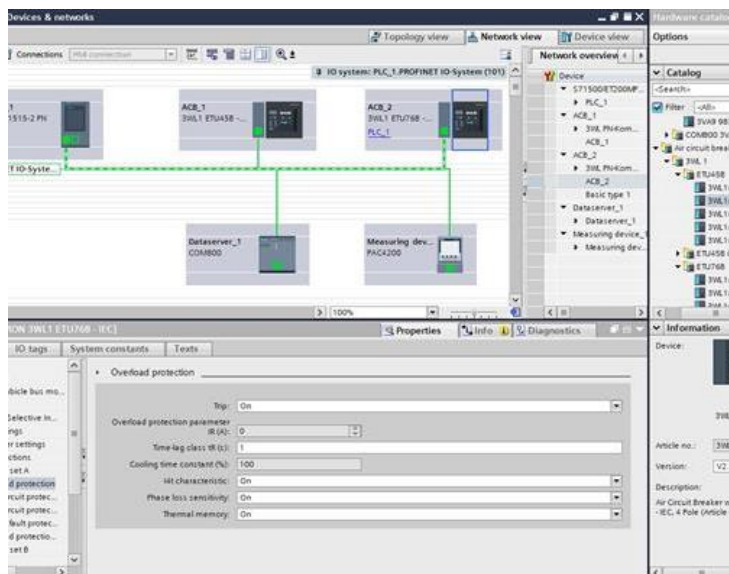


Figura 12: INTERFAZ TIA PORTAL V16 (siemens.com, 2020).

### 3.4. PLC S7-1500

El PLC S7-1500 de Siemens es un controlador lógico programable que se destaca en el ámbito industrial por su capacidad de manejar aplicaciones complejas con una notable eficiencia y precisión. Diseñado para sistemas de automatización avanzados, este dispositivo es fundamental en ámbitos que exigen rapidez y comunicación avanzada.

Equipado con un procesador de alta velocidad, el plc tal como se ve en la figura 13 ejecuta ciclos de operación muy breves, esenciales para mantener la precisión y rapidez en procesos industriales. Su diseño modular permite una fácil adición y modificación de módulos, adaptándose a las necesidades específicas de cada proyecto y facilitando la escalabilidad del sistema.



| Característica             | Descripción                                                                  |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Familia de Procesadores    | CPU 1511, 1513, 1515, 1516, 1517, 1518                                       |
| Memoria de Trabajo         | 512 KB a 13 MB                                                               |
| Velocidad de Procesamiento | Hasta 1 ns por instrucción booleana (dependiendo del modelo)                 |
| Interfaces de Comunicación | PROFINET, PROFIBUS, OPC UA, Modbus TCP/IP, Ethernet/IP                       |
| Módulos de Expansión       | Entradas/salidas digitales y analógicas, módulos de comunicación, módulos de |
| Pantalla                   | Pantalla LCD integrada para diagnóstico y configuración                      |
| Funciones de Seguridad     | Protección de acceso, copias de seguridad, diagnósticos avanzados            |
| Diagnóstico                | Diagnóstico en tiempo real, alarmas automáticas, historial de errores        |
| Programación               | TIA Portal (Totally Integrated Automation)                                   |
| Voltaje de Operación       | 24V DC, 230V AC (dependiendo del modelo)                                     |
| Normas y Certificación     | CE, UL, CSA, ATEX, IECEx, entre otros                                        |

Figura 13: PLC S7-1500 (siemens.com, 2023).

La pantalla integrada del dispositivo es una de sus características más útiles. Ofrece diagnóstico y monitoreo en tiempo real, permitiendo a los operadores supervisar el estado del sistema y detectar problemas de inmediato. Esto reduce significativamente el tiempo de inactividad y mejora la productividad general (siemens.com, 2020).

### 3.5. Pantalla Táctil HMI KTP-700

Comúnmente llamada Interfaz Humano-Máquina, en otras palabras, es la interfaz entre el proceso y los operadores de la planta, línea de producción, empresa o cualquier sistema que requiera la intervención humana. Es en sí mismo, una pantalla de herramientas que un operador puede manipular e interactuar para controlar una determinada tarea (Calero Gozávez, 2021) .

El HMI cumple una función especial la misma que se basa en monitorear en tiempo real, de manera gráfica y animada, dependiendo de la programación del usuario, el proceso a controlar ya sea, control de válvulas, estado de motores, niveles y demás parámetros de un determinado proceso, figura 14.



| Característica             | Descripción                                                 |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Tamaño de Pantalla         | 7 pulgadas (16:9, widescreen)                               |
| Resolución                 | 800 x 480 píxeles                                           |
| Tipo de Pantalla           | TFT, color, táctil (resistiva)                              |
| Número de Colores          | 64K colores                                                 |
| Interfaces de Comunicación | PROFINET, MPI/PROFIBUS DP, Ethernet                         |
| Memoria de Proyecto        | 10 MB                                                       |
| Entradas/Salidas           | 2 x puertos Ethernet, 1 x puerto USB, 1 x puerto serie      |
| Fuente de Alimentación     | 24V DC                                                      |
| Funciones de Diagnóstico   | Alarmas, registros de errores, visualización en tiempo real |
| Software de Configuración  | TIA Portal (WinCC)                                          |
| Grado de Protección        | IP65 (frontal), IP20 (trasera)                              |
| Montaje                    | Empotrado (panel)                                           |
| Certificaciones            | CE, UL, CSA                                                 |

Figura 14: Pantalla HMI (siemens.com, 2023).

### 3.6. Conexión de red Profinet

La red PROFINET permite conectar dispositivos individuales o grupos de dispositivos mediante cables. Si es necesario, se pueden instalar múltiples cables para asegurar una conexión adecuada de todos los dispositivos a la red. Los switches PROFINET juegan un papel crucial en lograr esta conectividad y gestionar el tráfico de la red de manera eficiente.

Se utilizan switches PROFINET para facilitar la comunicación entre los dispositivos, permitiendo un intercambio de datos rápido y sencillo. Estos switches están equipados con características avanzadas, como protección contra fallos del sistema, control inteligente del ancho de banda y compatibilidad con múltiples protocolos de fabricantes, garantizando así un rendimiento óptimo de las redes industriales.

La figura 15, ilustra una configuración típica de una red PROFINET, mostrando cómo diferentes dispositivos pueden conectarse a través de un switch industrial Ethernet SCALANCE:

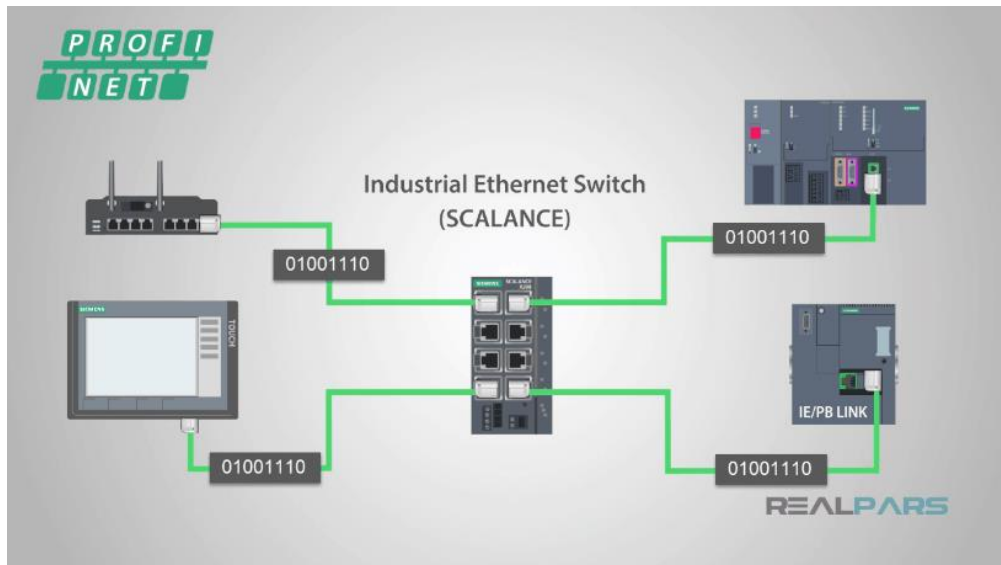


Figura 15: Configuración de red profinet (RealPars, 2022).

En esta imagen, se observa cómo los dispositivos están interconectados mediante un switch central, permitiendo una comunicación eficiente y gestionada entre ellos.

### 3.7. Pirámide De Automatización

Para los niveles de la pirámide de automatización se conectan mediante distintos protocolos de comunicación, también conocidos como lenguajes de comunicación (Barona López, 2021). Estos protocolos se adaptan a las necesidades de cada nivel en condiciones por cantidad de datos y velocidad de transmisión, figura 16.



Figura 16: Pirámide de automatización (INCIBE, 2023).

Los protocolos más utilizados en la industria incluyen Profibus DP, Devicenet, Modbus, Can Open, AS-i, Ethernet/IP y Modbus TCP/IP. Esta estructura permite controlar y supervisar sistemas de automatización de diferentes tamaños, lo que a su vez reduce los tiempos de

mantenimiento y mejora los niveles de productividad. Los niveles de la pirámide son los siguientes:

1. Nivel de campo: En este nivel se encuentran los sensores y actuadores que interactúan directamente con el proceso físico. En esta capa se suelen utilizar protocolos como, PROFINET, DeviceNet y AS-Interface (Barona López, 2021).
2. Nivel de control: Aquí es donde se encuentra la lógica de control y supervisión del sistema. En este nivel se utilizan controladores programables como los PLC (Controladores Lógicos Programables) para controlar y supervisar el proceso. Los protocolos de red comunes utilizados en este nivel incluyen PROFINET, Modbus, Ethernet/IP y EtherCAT (Elías Soto, 2022).
3. Nivel de supervisión: En este nivel se lleva a cabo la visualización y supervisión del sistema de automatización. Aquí se encuentran los sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) y los HMI (Interfaces de Usuario de Máquina). Los protocolos de red utilizados en este nivel son OPC (OLE for Process Control), MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) y SNMP (Simple Network Management Protocol) (Mite, Cerezo, Anchundia, & Barragán, 2021).
4. Nivel de gestión: En este nivel se realiza la planificación y gestión del sistema de automatización en su conjunto. Aquí se encuentran los sistemas MES (Manufacturing Execution System) y ERP (Enterprise Resource Planning). Los protocolos de red utilizados en este nivel incluyen OPC-UA (OPC Unified Architecture) y RESTful APIs (Application Programming Interfaces) (Montes, Zamarreño, Pitarch, Oliveira da Silva, & Prada, 2021).

A continuación, en la tabla 1 se muestra la clasificación por niveles de los diversos protocolos de red utilizados en la automatización industrial.

Tabla 1.

Protocolos más comunes por nivel (León Guanochanga, 2020).

| Nivel                | Protocolos de Red                           |
|----------------------|---------------------------------------------|
| Nivel de campo       | PROFIBUS, PROFINET, DeviceNet, AS-Interface |
| Nivel de control     | PROFINET, Modbus, Ethernet/IP, EtherCAT     |
| Nivel de supervisión | OPC, MQTT, SNMP                             |
| Nivel de gestión     | OPC-UA, RESTful APIs, MQTT                  |

### 3.8. Programación Ladder

La lógica de escalera, conocida también como programación Ladder, se desarrolló a partir de una representación visual de los circuitos eléctricos basados en relés. En el diagrama Ladder, cada escalón representa una instrucción lógica que puede incluir componentes como entradas, salidas, temporizadores y contadores. En el diagrama, la ejecución de las instrucciones en secuencia se representa mediante el flujo de corriente que va desde el lado izquierdo (positivo) al derecho (negativo) (AG, 2023).

La programación Ladder se utiliza ampliamente en la automatización industrial para diseñar y controlar sistemas como transportadores, máquinas de embalaje, líneas de producción y sistemas de manejo de materiales. Su naturaleza visual permite una fácil interpretación y modificación de los circuitos de control, facilitando la solución de problemas y la optimización del sistema (AutomationDirect., 2023).

### 3.9. Elementos Básicos de la Programación Ladder

#### 3.9.1. Contactos (NO y NC)

Los contactos de la figura 17 representan dispositivos de entrada como interruptores y sensores. Pueden ser normalmente abiertos (NO) o normalmente cerrados (NC).

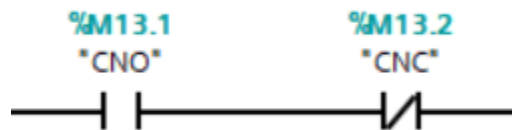


Figura 17: Contacto NO/NC

Funcionamiento: Un contacto NO permite el flujo de corriente cuando está cerrado (activado), mientras que un contacto NC permite el flujo de corriente cuando está abierto (desactivado). (AG, 2023)

#### 3.9.2. Bobinas (Salidas)

Las bobinas representan dispositivos de salida como relés, luces y motores tal como se ve en la figura 18.

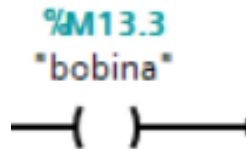


Figura 18: Bobina PLC.

Funcionamiento: Cuando la lógica de control activa una bobina, se cierra el circuito correspondiente, activando el dispositivo de salida (AG, 2023).

#### 3.9.3. Temporizadores

Los temporizadores son componentes que permiten la ejecución de operaciones de control basadas en el tiempo. El que más se usa en el proyecto será el TON. Ya que representa el

retardo a la conexión necesario para que funcione tal como se ve en la figura 19.

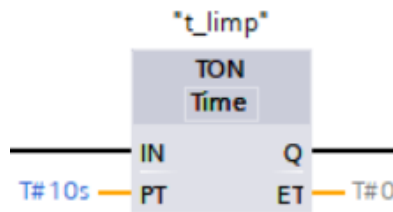


Figura 19: TON: temporizador Q10

También se tiene otros temporizadores como: TOF (Temporizador a la Desconexión), TP (Pulso Temporizado).

### 3.9.4. Comparadores

Los comparadores en la programación Ladder se usan para evaluar cómo se relacionan valores y tomar decisiones basadas en esas comparaciones. Estos componentes permiten ejecutar operaciones condicionales según el estado de las variables del sistema.

#### 3.9.4.1. Comparador de Igualdad (==)

El comparador de igualdad (==) se usa para determinar si dos valores son iguales en un sistema de control automatizado tal como se ve en la figura 20. Cuando los valores de entrada coinciden, este comparador activa salidas específicas o ejecuta acciones predefinidas. Por ejemplo, en un sistema de control de temperatura, si la temperatura medida iguala el valor de referencia, se puede activar una alarma.

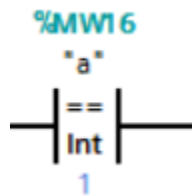


Figura 20: Comparador de igualdad.

#### 3.9.4.2. Comparador Mayor que (>)

El comparador mayor que (>) determina si el valor de una variable es superior al de otra tal como se ve en la figura 21. Este tipo de comparador se emplea comúnmente en sistemas donde se necesita activar procesos al superar ciertos umbrales. Por ejemplo, un ventilador de enfriamiento se puede activar automáticamente cuando la temperatura supera los 80°C.

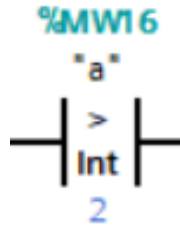


Figura 21: Comparador mayor que.

#### 3.9.4.3. Comparador Menor que (<)

El comparador menor que (<) evalúa si el valor de una variable es inferior a otro valor de referencia tal como se ve en la figura 22. Este tipo de comparador es útil para desactivar procesos o activar alarmas cuando una medida cae por debajo de un nivel específico.

Por ejemplo, un calentador podría desactivarse automáticamente cuando la temperatura desciende por debajo de 20°C.

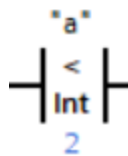


Figura 22: Comparador menor que.

#### 3.9.4.4. Comparador Mayor o Igual que (>=)

El comparador mayor o igual que (>=) verifica si el valor de una variable es mayor o igual que otro valor tal como se ve en la figura 23. Este comparador se utiliza para activar procesos cuando una variable alcanza o supera un límite predefinido. Por ejemplo, un sistema de seguridad puede iniciarse cuando el nivel de líquido en un tanque es mayor o igual al 90% de su capacidad.

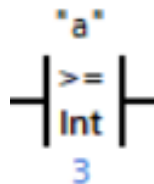


Figura 23: Comparador mayor o igual que.

#### 3.9.4.5. Comparador Menor o Igual que (<=)

El comparador menor o igual que (<=) evalúa si el valor de una variable es menor o igual que otro valor tal como se ve en la figura 24. Se utiliza para mantener las condiciones de operación dentro de límites seguros (AG, 2023).

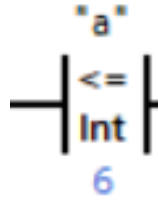


Figura 24: Comparador menor o igual que.

### 3.9.5. Contadores

Los contadores son componentes de los sistemas de control automatizados y en la programación Ladder utilizados en la automatización industrial. Un contador permite realizar operaciones de conteo, ya sea incrementando o decrementando su valor, basado en eventos de entrada. Estos valores se almacenan y pueden ser utilizados para tomar decisiones dentro del sistema de control (Cláudio Belo Lourenço, 2022).

#### 3.9.5.1. Contador Ascendente (CTU)

El contador ascendente (CTU) incrementa su valor cada vez que ocurre un evento de entrada. Este tipo de contador es útil para contar eventos en un proceso, como el número de piezas producidas. El diagrama de la figura 25 muestra un contador ascendente (CTU) en TIA Portal, utilizado para incrementar un valor con cada pulso recibido. Configurado con un valor de preajuste (PV) de 10, el contador incrementa su valor actual (CV) con cada pulso en la entrada CU. La salida Q se activa cuando CV alcanza el PV, permitiendo realizar acciones específicas, como activar una alarma. Además, una entrada de reinicio (R) permite restablecer el contador a cero. Este ejemplo ilustra cómo contar eventos en un sistema de control automatizado, como el número de productos en una cinta transportadora (AG, 2023).

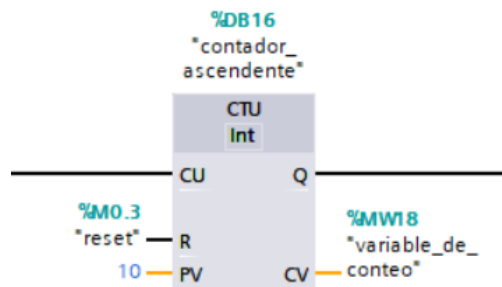


Figura 25: Contador ascendente.

#### 3.9.5.2. Contador Descendente (CTD)

El contador descendente (CTD) decrementa su valor cada vez que ocurre un evento de entrada. Es útil para contar hacia abajo, como en el seguimiento de la cantidad restante de un inventario.

El diagrama de la figura 26 muestra un contador descendente (CTD) configurado para iniciar en un valor preajustado de 10 y decrementar con cada pulso recibido.

Al llegar a cero, se activa la salida Q, permitiendo realizar acciones como activar una alarma.

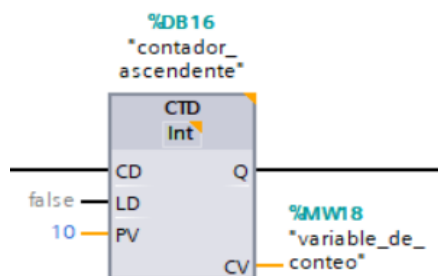


Figura 26: Contador descendente.

### 3.9.5.3. Contador Ascendente/Descendente (CTUD)

El contador ascendente/descendente (CTUD) permite tanto el incremento como el decremento de su valor, dependiendo del evento de entrada. Es útil en aplicaciones que requieren un seguimiento bidireccional de eventos. Por ejemplo, El diagrama de la figura 27 muestra un contador ascendente/descendente (CTUD) configurado para iniciar en un valor preajustado de 35, incrementando y decrementando con cada pulso recibido en CU y CD respectivamente. Al alcanzar el valor de preajuste, las salidas QU y QD se activan según el modo de conteo.

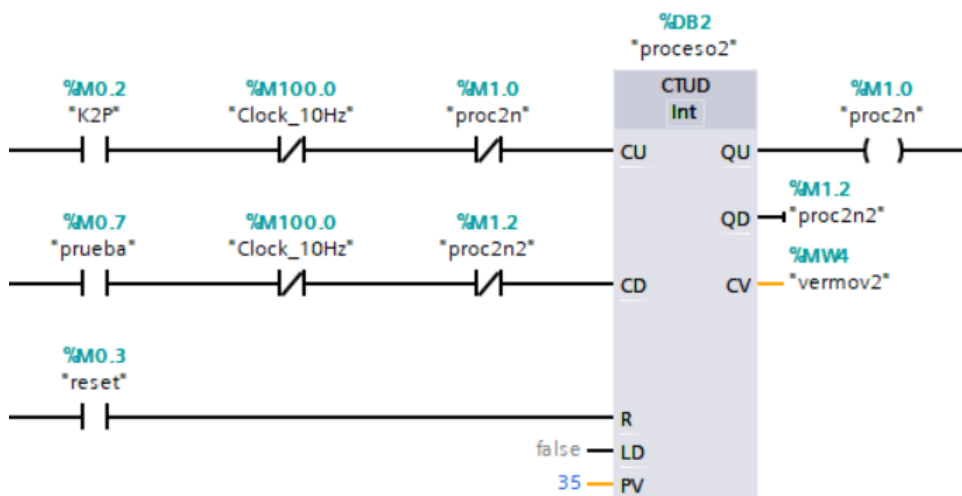


Figura 27: Contador ascendente y descendente.

## **Variables de Operación**

Es fundamental asegurar una adecuada configuración y supervisión de las variables operativas durante el proceso de pintado de los automóviles para garantizar que se obtenga un acabado duradero y de alta calidad. Es necesario controlar con precisión en cada etapa del proceso las variables de operación como la temperatura, presión y tiempo de tratamiento u operación.

### **Temperatura**

La temperatura es una variable crítica en diversas etapas del proceso, desde la limpieza y desengrase hasta el secado final. Por ejemplo, durante la limpieza y desengrase, el agua se utiliza a temperaturas controladas de 50-60°C para asegurar una eliminación efectiva de grasa y residuos. Durante el fosfatado, la solución debe mantenerse a 50°C para facilitar la formación de la capa protectora. En la etapa de secado, la temperatura del aire caliente se realiza a 150°C durante 20 minutos para asegurar un acabado duro y duradero (Toyota Global, 2023).

### **Presión**

La presión es otro parámetro, especialmente en la aplicación de desengrasantes y selladores. La presión de los aspersores debe ser suficiente para garantizar una cobertura completa y efectiva de la solución desengrasante, típicamente entre 2-3 bar (Toyota Global, 2023).

### **Tiempo de Operación**

El tiempo de tratamiento en cada etapa para asegurar la efectividad de los procesos químicos y físicos involucrados. Durante el fosfatado e imprimación, la carrocería se sumerge en la solución durante 2-4 minutos para formar una capa protectora adecuada. En la etapa de secado, el curado a 150°C durante 20 minutos es esencial para asegurar que la pintura alcance la dureza y adherencia necesarias (RealPars, 2022).

## 4. MARCO METODOLÓGICO

La metodología de investigación contemplada para este proyecto es experimental, dado que mantiene un enfoque científico que incluye un conjunto de variables conocidas y otras que se miden utilizando los sensores y actuadores. Para esto, se realizará el diseño y simulación del proceso lo que permitirá validar la factibilidad del proyecto y así enriquecer el aprendizaje colaborativo de los estudiantes de la UPS.

### 4.1. Diagrama de flujo del proceso de pintado de carrocerías de automóviles

El desarrollo del sistema automatizado de pintado de carrocerías de automóviles sigue un enfoque metódico. El primer paso en este enfoque es la creación de diagramas de flujo para cada etapa del proceso de pintado. Estos diagramas proporcionan una representación visual clara y estructurada de las diversas etapas y las condiciones que deben cumplirse para avanzar de una etapa a la siguiente, figura 28.

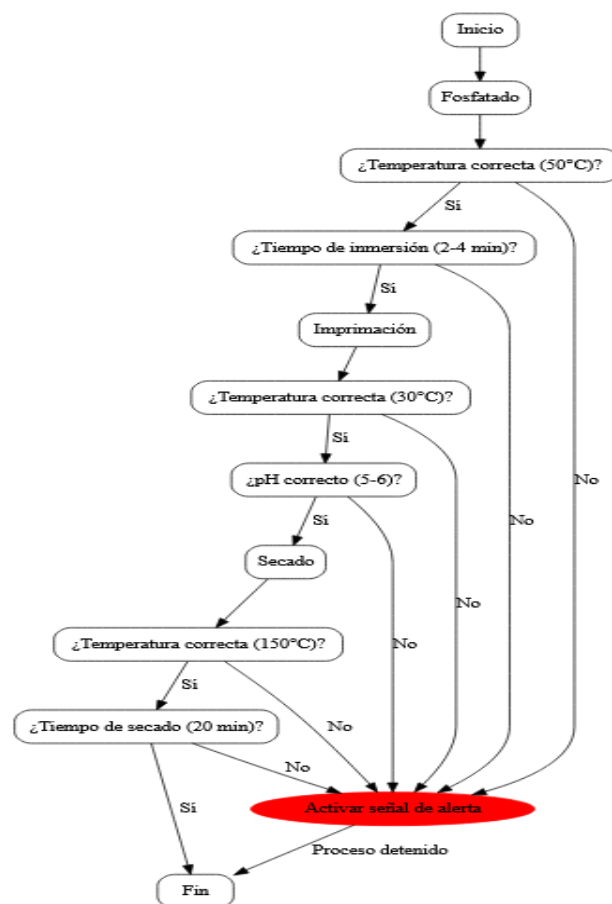


Figura 28: Diagrama del proceso.

Al incorporar variables de operación como la temperatura tanto en el proceso de limpieza y desengrasado, presión de los aspersores de pintura y tiempos de operación e inmersión, el proyecto no solo refleja la adopción de prácticas necesarias, sino como la coherencia en la representación del proceso de pintado para automóviles que muestra de forma general el diagrama del proceso.

#### **4.1. Detección de la Carrocería**

La primera etapa del proceso implica la detección de la carrocería utilizando un sensor de posición. Este sensor se encarga de detectar la presencia de la carrocería y activar el sistema de preparación. Es fundamental asegurar que la carrocería esté correctamente posicionada para iniciar el proceso de limpieza y desengrase. Si el sensor no detecta la carrocería, se activa una señal de alerta y se detiene el proceso para evitar errores en las etapas posteriores

#### **4.2. Limpieza y Desengrase**

En esta etapa, se aplica una aspersión de agua a temperatura controlada como máximo de 60°C y una presión adecuada de máximo 3 bar. La limpieza y desengrase son cruciales para eliminar grasa y suciedad de la carrocería, asegurando una superficie adecuada para los tratamientos posteriores. Se verifica la cobertura completa de la carrocería antes de proceder al enjuague final. Si no se cumple la cobertura necesaria, se activa una señal de alerta y se detiene el proceso. Esto garantiza que la limpieza sea efectiva y que la carrocería esté preparada para el siguiente paso.

#### **4.3. Fosfatado e Imprimación**

La carrocería se sumerge en un baño de fosfatado a 50°C durante 2-4 minutos para formar una capa protectora que mejora la adherencia de la pintura. Posteriormente, se realiza un pasivado con una solución específica, seguido de un lavado con agua desionizada para eliminar cualquier residuo químico.

#### **4.4. Revestimiento Medio (Middle Coating)**

El revestimiento medio es una etapa importante en el pintado de carrocerías. Este paso proporciona una capa extra de protección y mejora la adherencia de la capa superior de pintura. La carrocería, ya imprimada, se limpia para eliminar cualquier residuo de polvo o contaminantes, asegurando que la superficie esté libre de imperfecciones antes de aplicar el revestimiento medio.

#### **4.5. Revestimiento Superior (Top Coating)**

El revestimiento superior es la capa final de pintura aplicada a la carrocería, proporcionando la apariencia estética y protección contra factores ambientales, la carrocería con la capa intermedia se limpia nuevamente para asegurar que no haya polvo ni contaminantes que puedan afectar la calidad de la capa superior. La capa superior de pintura se aplica mediante técnicas de pulverización electrostática, conteniendo pigmentos y resinas que proporcionan el color y brillo deseados. Los robots de pulverización aplican la pintura de manera uniforme, logrando un acabado liso y brillante.

#### **4.6. Secado**

La etapa de secado utiliza aire caliente a una temperatura de 150°C para eliminar toda la humedad de la carrocería durante un tiempo aproximado de 20 min., este paso es esencial para evitar imperfecciones en la superficie antes de la aplicación de la pintura. La carrocería debe estar completamente seca para garantizar que las capas de pintura se adhieran correctamente. Si no se logra un secado completo, se activa una señal de alerta y se detiene el proceso para corregir la situación. Una vez realizada el diagrama de flujo del sistema, se debe comenzar con el desarrollo de este en el software TIA PORTAL.

#### **4.7. Crear un Proyecto en TIA Portal**

##### **4.7.1. Crear un Nuevo Proyecto**

Abrir TIA Portal:

Inicia el software TIA Portal desde tu escritorio o menú de inicio.

##### **1. Crear Proyecto:**

Selecciona la opción "Crear nuevo proyecto" en la pantalla de inicio del software, figura 29.

Introduce un nombre para tu proyecto en el campo "Nombre del proyecto".

*Opcionalmente, puedes agregar una descripción y especificar la ubicación donde se guardará el proyecto.*

##### **2. Haz clic en "Crear".**

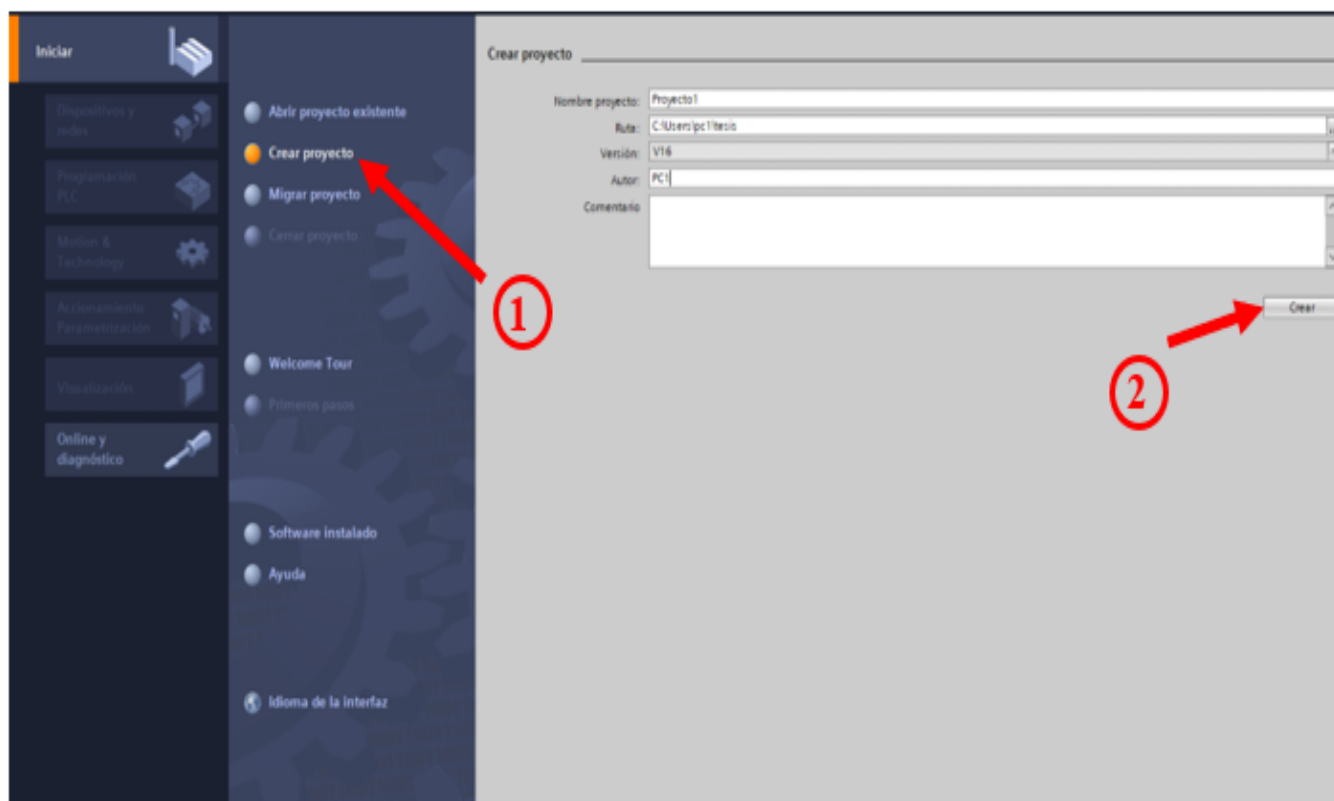


Figura 29: Crear nuevo proyecto en TIA Portal.

#### 4.7.2. Configuración de Hardware

Agregar PLC:

En el panel de "Árbol del proyecto", haz clic en "Agregar nuevo dispositivo".

1. Selecciona el apartado de Controladores para luego elegir la familia de PLC que se va a utilizar (por ejemplo, S7-1500).

2. En la figura 30 se muestra la opción que se debe seleccionar cuando se desconoce el CPU del PLC específico, por último, haz clic en "Aceptar"

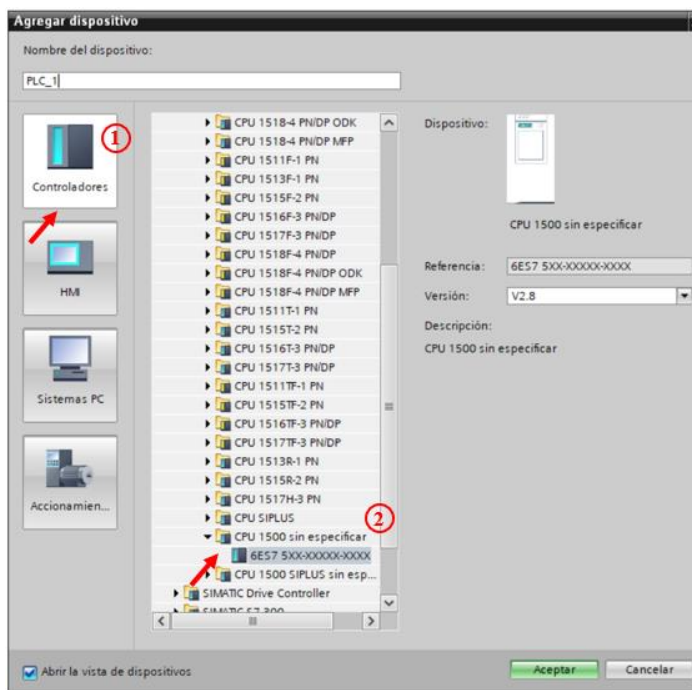


Figura 30: Agregar dispositivo.

#### 4.7.3. Configurar PLC:

Una vez agregado el PLC, configura sus propiedades (nombre del dispositivo, dirección IP, etc.). Según se observa en la figura 31, hay que asegurarse de asignar la dirección IP correctamente para la comunicación en red.

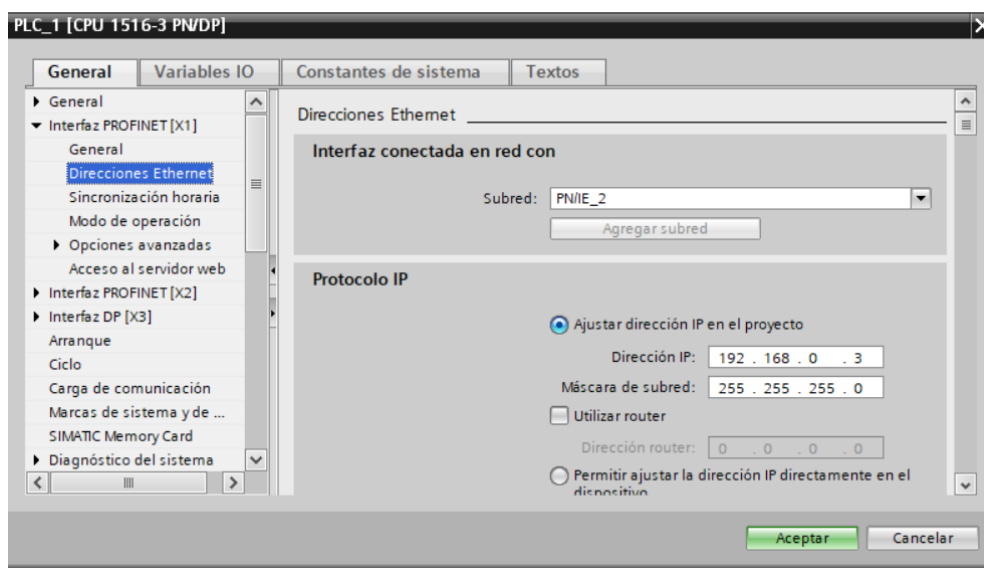


Figura 31: Configuración direccionamiento IP.

#### 4.7.4. Agregar Módulos de Entrada/Salida (I/O):

En el árbol del proyecto, selecciona el PLC y agrega los módulos de entrada y salida necesarios.

Configura las direcciones de los módulos según sea necesario, figura32.



Figura 32: Módulos Entrada/Salida.

#### 4.8. Configuración de la Pantalla HMI

##### 4.8.1. Agregar HMI:

En el árbol del proyecto, haga clic en "Agregar nuevo dispositivo", seleccione "HMI" y el modelo específico de la pantalla que utilizarás. Haga clic en "Aceptar", figura 33.

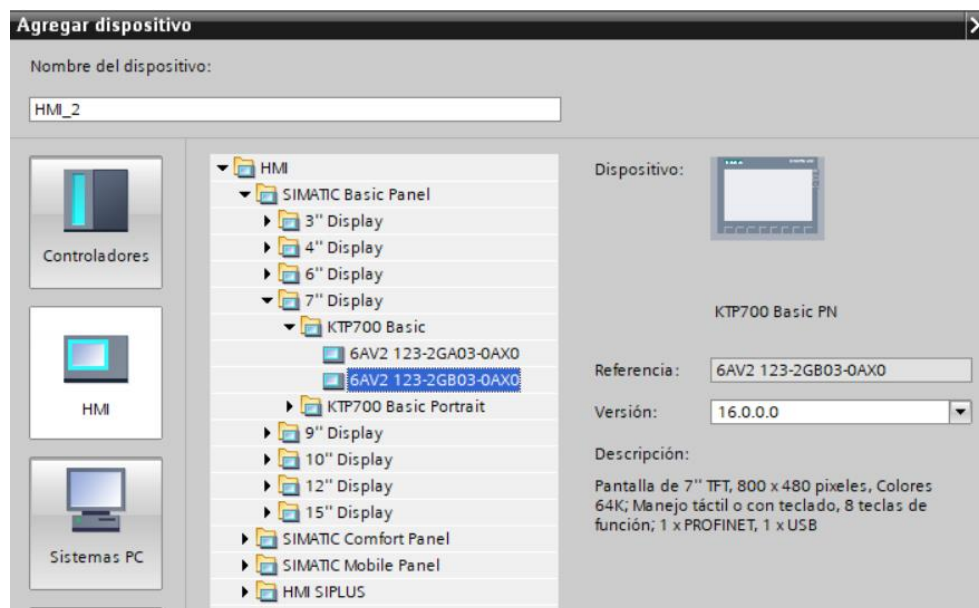


Figura 33: Agregar HMI.

#### 4.8.2. Configurar HMI:

Configura las propiedades de la HMI (nombre del dispositivo, dirección IP, etc.). Diseña la interfaz de usuario agregando botones, indicadores, gráficos, etc. En la figura 34 se asocia las variables de la HMI con las variables del PLC.

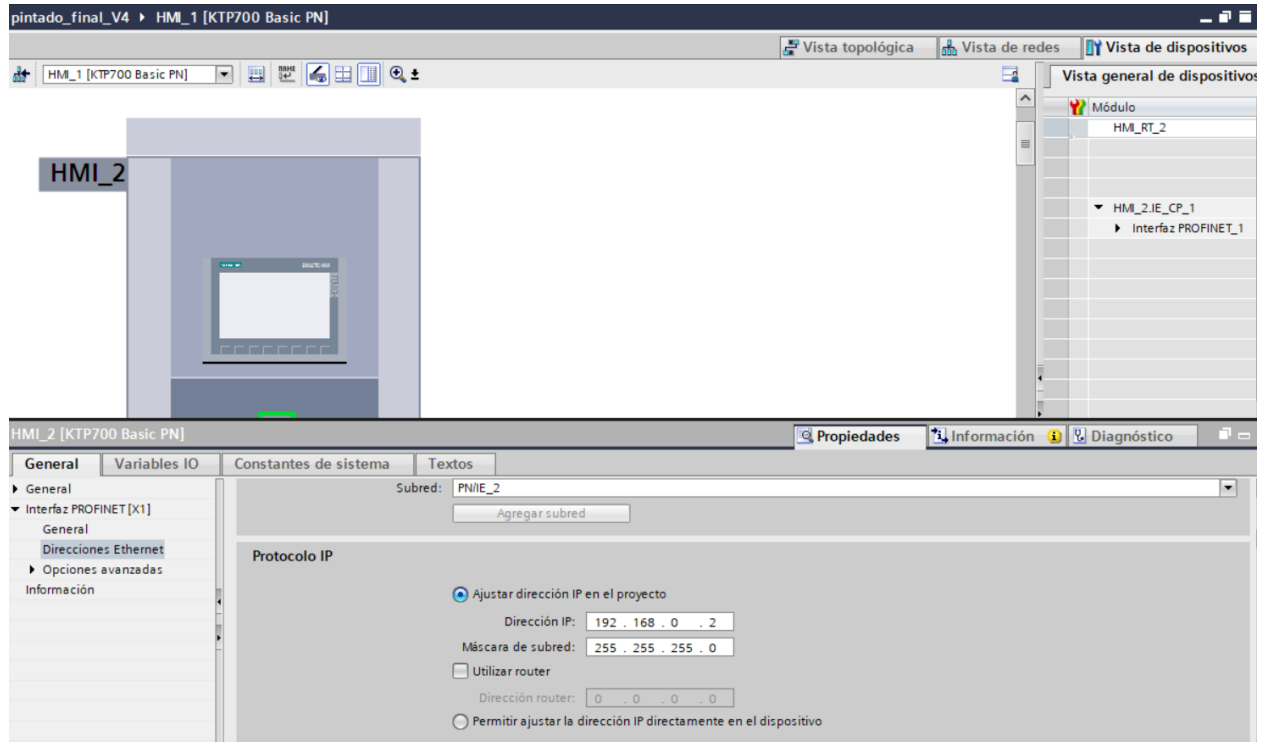


Figura 34: Configuración HMI.

#### 4.8.3. Configurar credenciales de usuario:

Se realiza en la opción de Administrador de usuarios del HMI, figura 35.

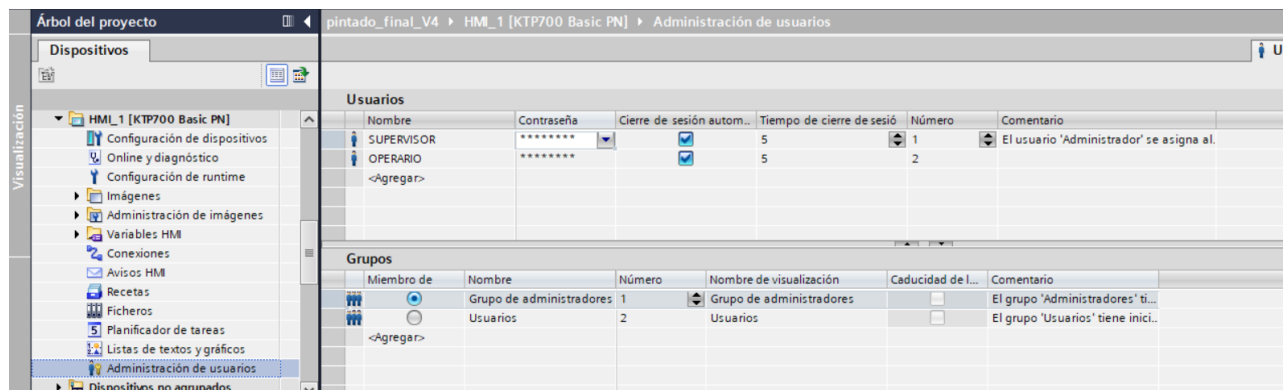


Figura 35: Configuración credenciales.

Una vez configurado los usuarios del sistema se debe realizar ajustes en la imagen de inicio del sistema para añadir el “login” del mismo, así como se ve en la figura 36.



Figura 36: Pantalla de inicio.

Luego de esto se valida el usuario y contraseña en la ventana emergente que se visualiza en la figura 37.



Figura 37: Pantalla emergente de login.

Según el usuario ingresado se pueden validar un mensaje de bienvenida personalizado para cada usuario tal como se ve en la figura 38.

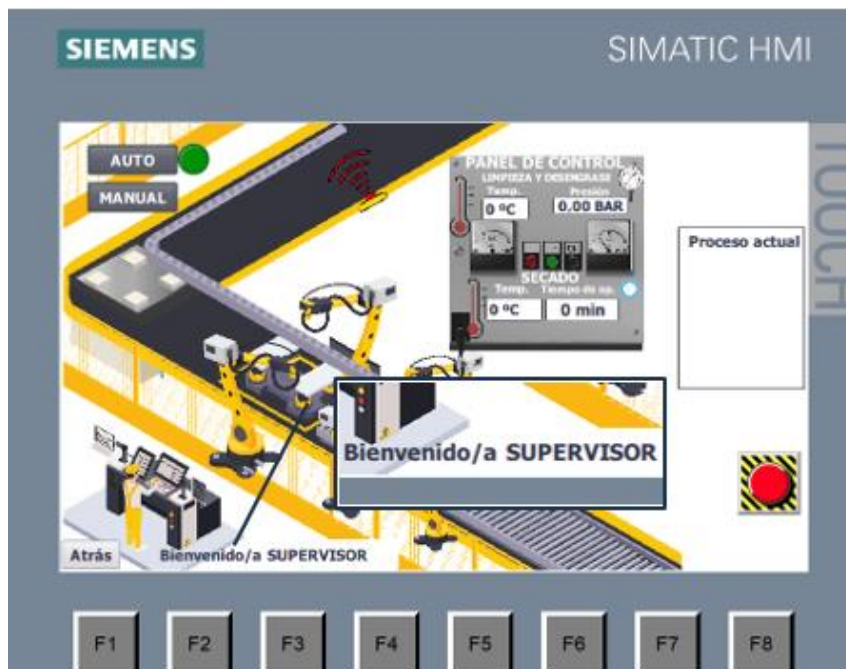


Figura 38: Validación de usuario conectado.

#### 4.9. Diseño de la interfaz de simulación y modelado del sistema

El proceso de diseño de la interfaz HMI comienza con una pantalla en blanco, que es el punto de partida, tal como se muestra en la Figura 39. En esta fase inicial, se tienen todas las opciones disponibles para configurar y personalizar los diferentes elementos visuales que compondrán la interfaz de usuario.

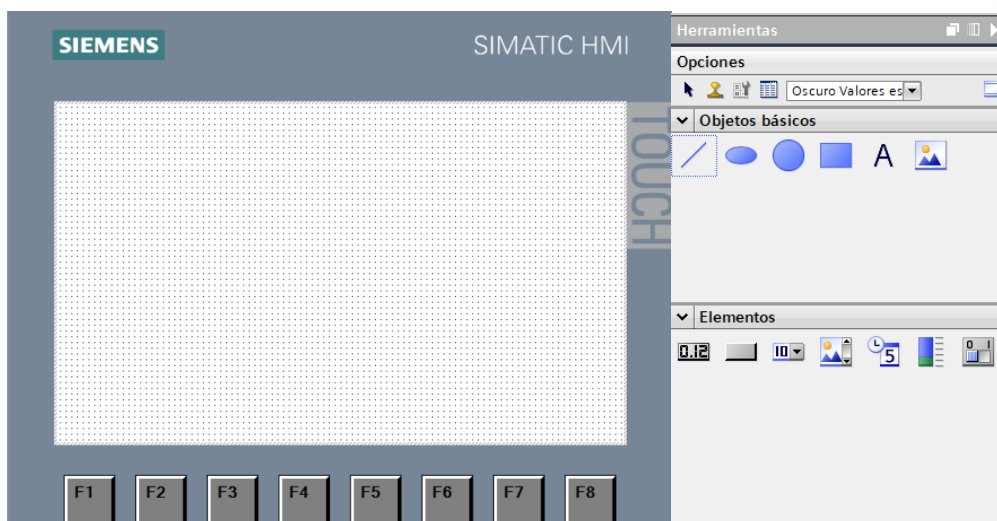


Figura 39: Imagen HMI en blanco.

Una vez configurada la pantalla, se comienzan a añadir los primeros elementos visuales, como botones de pulsador, luces piloto, interruptores y formas básicas como rectángulos y líneas, como se ilustra en la Figura 40.

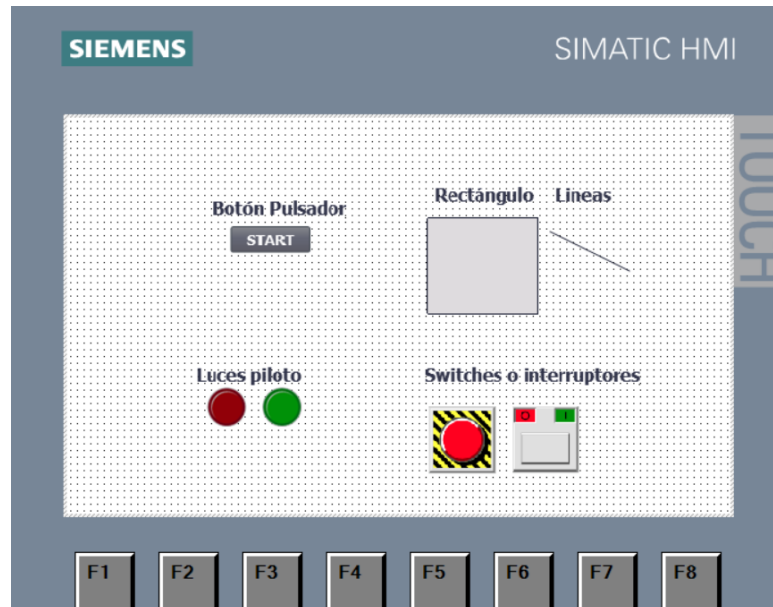


Figura 40: Herramientas básicas para el diseño.

Posteriormente, se añaden elementos gráficos más complejos que representen el sistema automatizado, como cintas transportadoras, robots, y estaciones de trabajo, lo cual se observa en la Figura 41. Estas imágenes proporcionan una representación visual del proceso en curso, mejorando la claridad y comprensión de la interfaz para el operador.

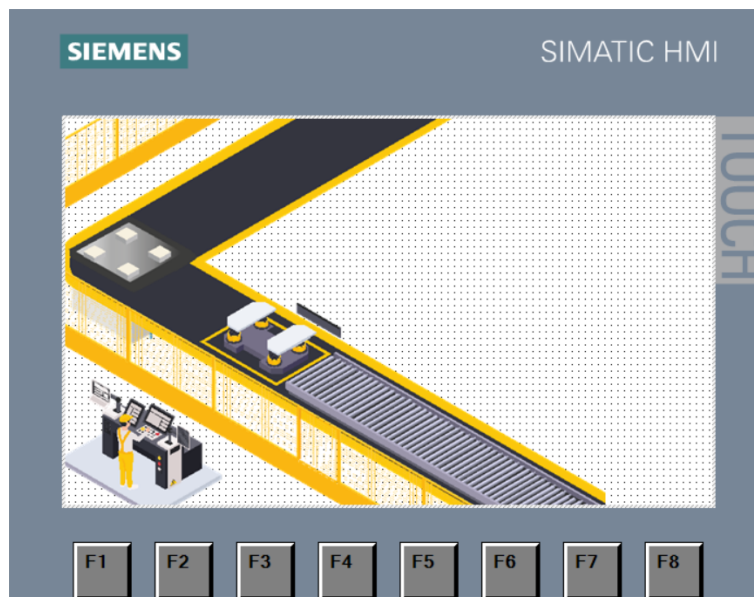


Figura 41: Imagen HMI base.

El diseño HMI inicia en la estación de carga donde las carrocerías son introducidas en la línea de producción. Desde este punto, las carrocerías se desplazan a través de una serie de estaciones automatizadas, cada una encargada de realizar un paso específico del proceso de pintura. El proceso continúa en una estación equipada con brazos robóticos, donde se aplica la primera capa de pintura base.

A medida que las carrocerías avanzan, estas son dirigidas hacia una cabina de secado, donde se asegura que la pintura aplicada se adhiera correctamente y alcance la dureza deseada. Luego, pasan por una estación de control de calidad, donde se revisa la aplicación de pintura para garantizar que cumple con los estándares establecidos. Finalmente, las carrocerías pintadas y secas son movidas hacia la estación de salida, completando así el ciclo de producción.

La interfaz HMI no solo se limita a mostrar controles básicos como los botones de inicio (verde) y parada (rojo) de emergencia, sino que también incluye indicadores del estado del proceso, proporcionando al operador una visión clara y completa de todo el sistema automatizado. Esto se observa en la figura 42, donde se integran elementos gráficos más complejos que representan el sistema automatizado, como cintas transportadoras, robots, y estaciones de trabajo.

Estos elementos visuales, que se pueden apreciar en la figura 42, proporcionan una representación precisa del proceso en curso, mejorando significativamente la claridad y comprensión de la interfaz para el operador. La disposición de estos gráficos no solo facilita el monitoreo, sino que también permite al operador intervenir de manera eficiente en caso de ser necesario, garantizando así un control óptimo del sistema.

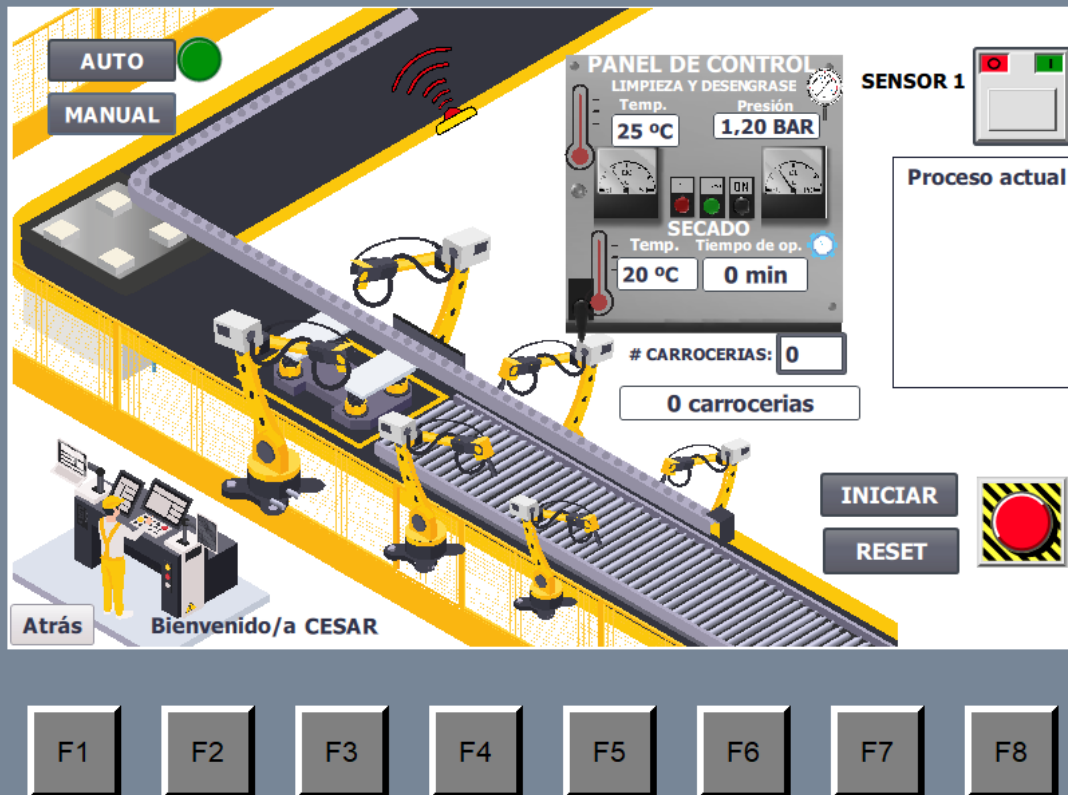


Figura 42: Diseño HMI de solución.

#### 4.10. Uso de TIA Portal para la Simulación

##### Programación Ladder por Segmentos

La programación Ladder se utiliza para definir la lógica de control del sistema de pintado. Esta técnica gráfica permite representar las operaciones lógicas y de control de manera similar a los circuitos eléctricos. El proyecto se implementó, utilizando un total de once segmentos, que organizan y secuencian las diferentes etapas del proceso. Estos segmentos abarcan desde las condiciones de inicio del sistema, detección de la carrocería, y las etapas críticas como la limpieza y desengrase, fosfatado e imprimación, sellado, revestimiento medio, revestimiento superior y secado. Adicionalmente, se han empleado un total de 29 bloques de datos y 1 bloque de organización. Los bloques de datos (Data Blocks, DB) se generan automáticamente al utilizar temporizadores y contadores, ya que estos elementos requieren un área de memoria específica para almacenar el tiempo acumulado, los estados y los valores de conteo. Esto asegura que el

sistema pueda llevar un registro preciso y continuo de las operaciones temporales y de conteo a lo largo del proceso automatizado. A continuación, se detalla la programación por segmentos del sistema.

#### 4.10.1. Segmento 1: Condiciones de inicio

Segmento donde se define cada condición necesaria previo al inicio del sistema, tal como se ve en la figura 43.

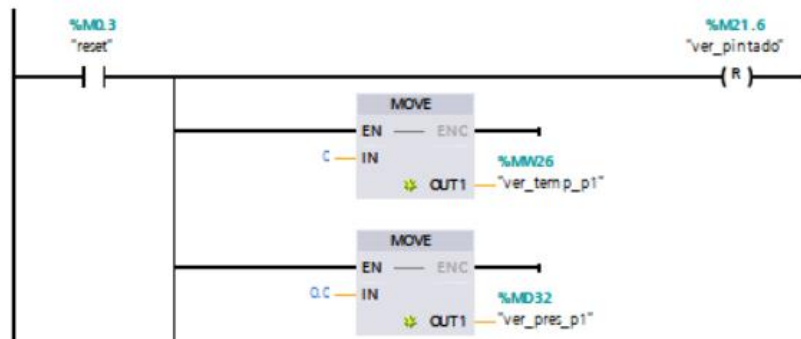


Figura 43: Condiciones Iniciales.

#### 4.10.2. Segmento 2: Inicio y Detección de Carrocería

En el segmento 2, la detección de Carrocería comienza con la programación del sensor de posición para iniciar el proceso de preparación tal como se ve en la figura 44, se valida una variable de entrada física, que representa un sensor de posición, en este caso para efectos prácticos se utiliza un botón físico para simular y validar su funcionamiento.

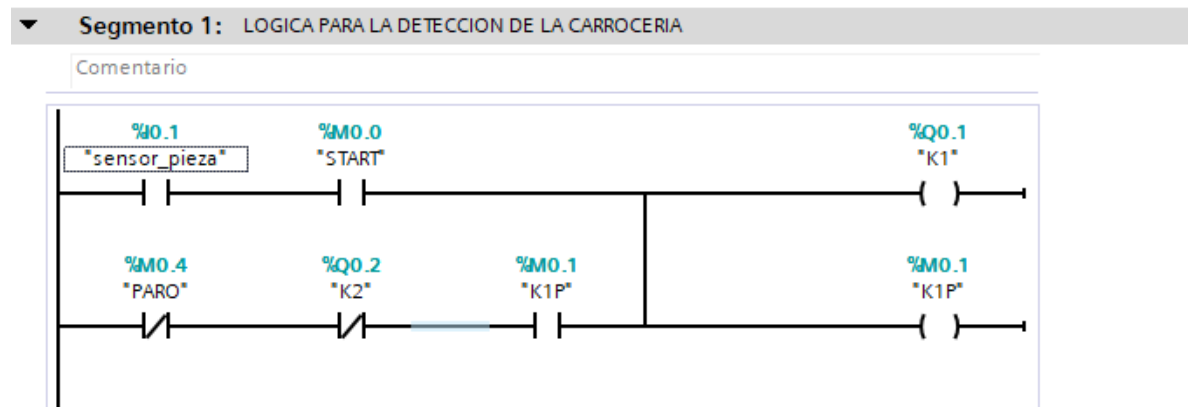


Figura 44: Detección de la pieza.

Para poder visualizar el movimiento de la carrocería por la banda superior del HMI, se utiliza contadores CTUD tal como se ve en la figura 45.

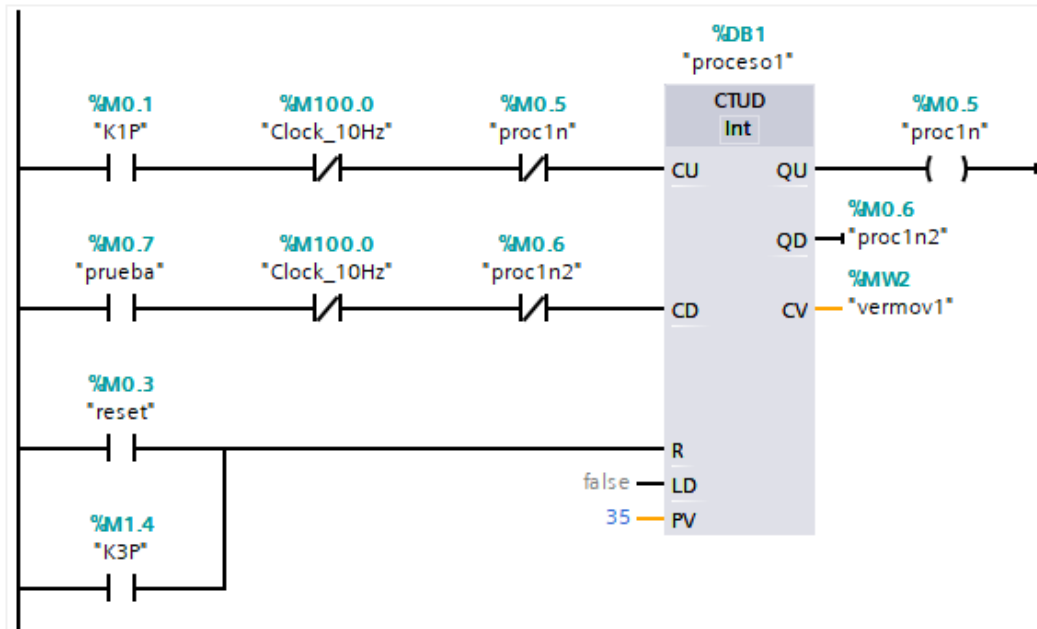


Figura 45: Contadores CTUD.

#### 4.10.3. Segmento 3: Limpieza y Desengrase

La etapa de limpieza y desengrase en el proceso de pintado permite asegurar una superficie libre de contaminantes, lo cual es esencial para la adherencia de la pintura. La lógica de control implementada en este segmento garantiza que tanto la temperatura del agua como la presión del aspersor se mantengan dentro de los rangos de limpieza efectiva.

##### 4.10.3.1. Control de Temperatura

La secuencia de control de temperatura comienza con la verificación de las condiciones de entrada mediante los contactos de memoria asignados a las direcciones (%M0.5.4), (%M0.5.6), y (%M1.0). Estos contactos se encargan de asegurar que las condiciones iniciales sean correctas antes de que se active el temporizador. En este caso, el temporizador TON asignado a la dirección (%M5.7) se activa una vez que los contactos confirman que las condiciones son las adecuadas. Este temporizador está configurado para mantener la temperatura del agua dentro del rango de 50-60°C, lo que es crítico para una limpieza efectiva. Además, el temporizador maneja el tiempo de operación requerido para que la temperatura se mantenga estable durante todo el ciclo de limpieza.

#### 4.10.3.2. Control de Presión

El control de presión se gestiona a través de la dirección de la marca de Word (%MW32), donde los comparadores verifican que la presión del aspersor se mantenga en el rango de 2-3 bar, necesario para asegurar una cobertura uniforme de la solución desengrasante sobre la superficie de la carrocería. Si la presión cae fuera de este rango, se activan alarmas específicas en las marcas (%M0.5.5) y (%M1.0), alertando sobre posibles desviaciones que podrían comprometer la efectividad del proceso de desengrase. Además, otro temporizador, gestionado a través de la marca (%M5.7), se encarga de asegurar que la presión se mantenga constante durante el tiempo necesario para completar el ciclo de limpieza.

#### 4.10.3.3. Verificación y Alarmas

En la lógica de control, se utilizan comparadores adicionales para realizar verificaciones continuas del estado de la presión y la temperatura. Por ejemplo, si la presión medida por el comparador asignado a (%MD32) muestra un valor fuera del rango establecido, se activa inmediatamente la alarma visualizada en (%M28.1) y (%M28.2), lo que detiene el proceso para evitar un tratamiento incorrecto de la carrocería. La figura 46, ilustra la lógica de control para esta etapa. Se utilizan varios temporizadores y comparadores para asegurar que las condiciones se mantengan adecuadas durante todo el proceso.

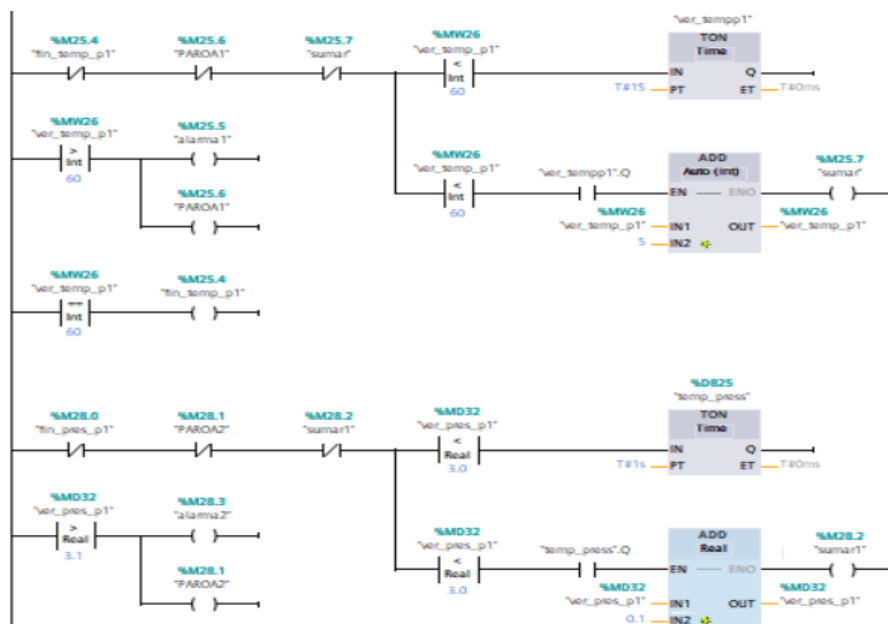


Figura 46: Segmento para el proceso de limpieza.

#### 4.10.4. Segmento 4: Fosfatado e Imprimación

##### Fosfatado

La primera parte de esta etapa es la programación de la secuencia de inmersión de la carrocería para el fosfatado. En el Segmento 4 del proceso de pintado, se desarrolla la lógica de control para la etapa de fosfatado, asegurando la calidad y durabilidad del recubrimiento en las carrocerías de los automóviles.

En la figura 47 ilustra la programación en Ladder diagram para la secuencia de inmersión de la etapa de fosfatado. La secuencia de fosfatado comienza con la verificación de las condiciones de entrada, gestionadas a través de las marcas de memoria (%M0.2), (%M0.5), (%M0.6), y (%M1.0). Estos contactos se utilizan para comprobar que todas las condiciones necesarias están en su lugar antes de proceder con la inmersión. Una vez que se verifican estas condiciones, se activa el temporizador TON, asignado a la dirección (%DB28). Este temporizador controla la duración del proceso de inmersión, que está configurado para 5 segundos en este caso de ejemplo, aunque en la práctica el tiempo podría variar entre 2-5 minutos dependiendo de los requisitos específicos del proceso.

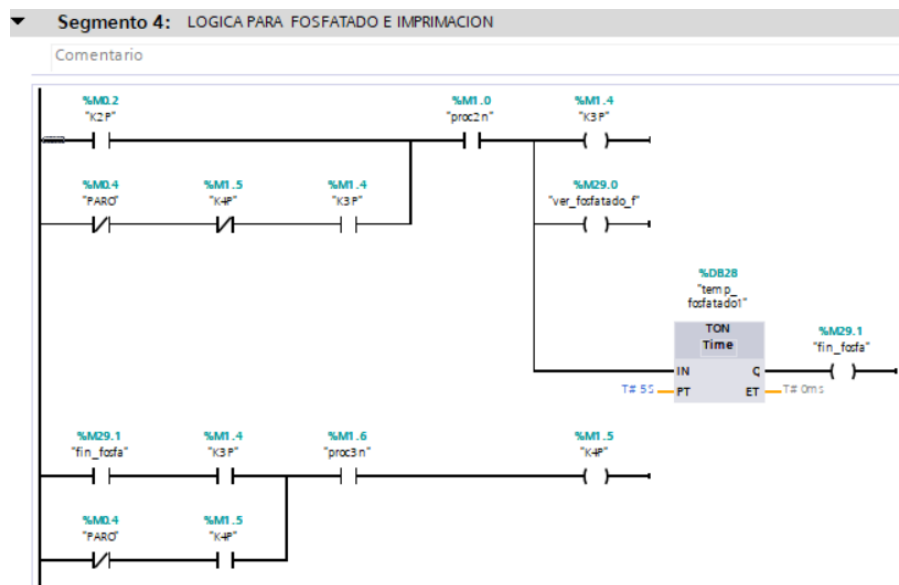


Figura 47: Etapa de fosfatado.

## Imprimación

La fase de imprimación es la siguiente en la secuencia de pintado, y su objetivo principal es preparar la superficie de la carrocería para las capas de pintura finales. La lógica de control de esta etapa se ilustra en la figura 48, donde se detalla el uso de temporizadores y contactos específicos para asegurar un proceso eficiente y controlado.

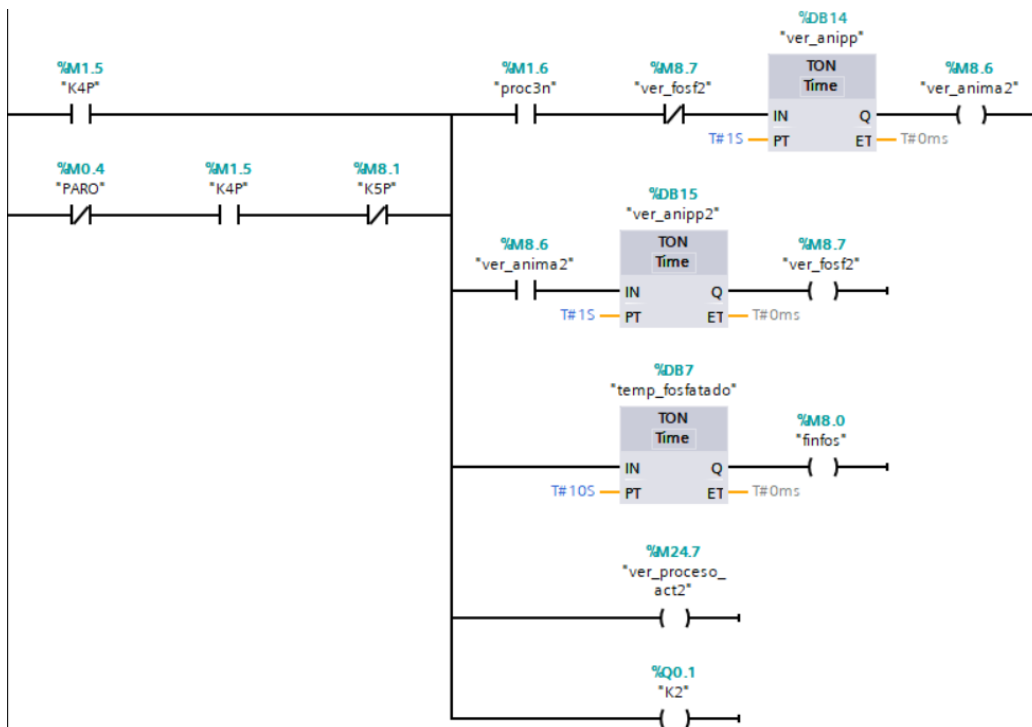


Figura 48: Lógica Ladder para imprimación.

La secuencia de imprimación comienza con la verificación de las condiciones iniciales mediante los contactos asignados a las direcciones (%M1.5), (%M0.4), (%M1.5), y (%M8.1). Estos contactos son críticos para asegurar que el proceso solo inicie si las condiciones de entrada son correctas, evitando así cualquier posible defecto en la aplicación de la imprimación.

El temporizador TON, ubicado en la dirección (%DB14), se encarga de controlar la animación del proceso, asegurando que la carrocería se mueva de manera sincronizada con el resto de la línea de producción. Adicionalmente, el temporizador configurado en (%DB15) controla el tiempo de permanencia de la carrocería en la solución de imprimación, lo cual es fundamental para garantizar que se aplique una capa uniforme y adecuada.

Durante este proceso, las marcas %M8.6 y %M8.7 desempeñan un papel clave al verificar que los pasos previos al proceso de imprimación se hayan ejecutado correctamente. Esto asegura

que la superficie esté debidamente preparada y que la imprimación se adhiera correctamente, proporcionando una base sólida para las capas de pintura posteriores.

#### 4.10.5. Segmento 5: Sellado

Durante el proceso de pintura de las carrocerías, se realiza la fase de sellado para garantizar que sean impermeables, estén protegidas contra la corrosión y tengan aislamiento acústico. Garantizar la protección de las uniones y áreas de la carrocería contra condiciones ambientales adversas y ruidos no deseados es importante en esta parte. El segmento describe la secuencia de sellado se muestra en la figura 49.

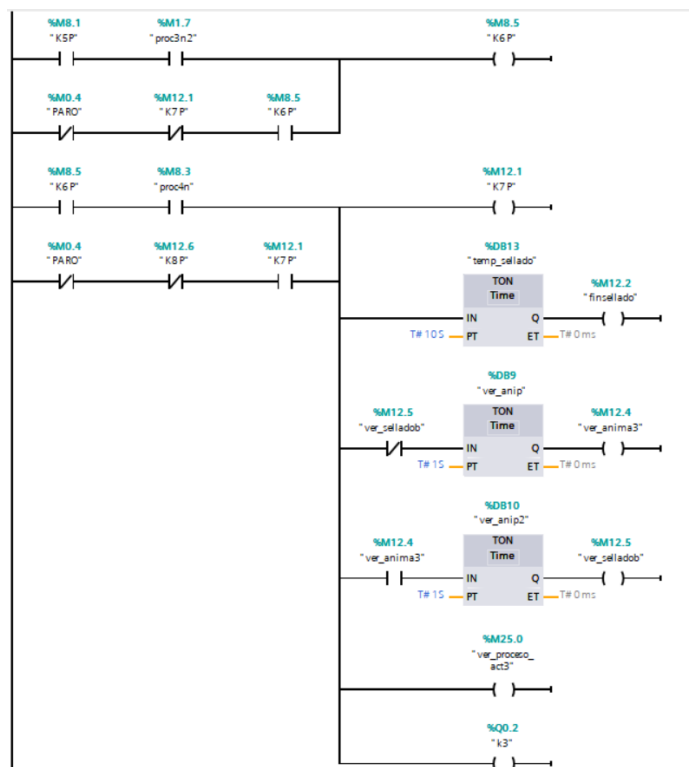


Figura 49: Etapa de sellado.

La secuencia de control del sellado comienza con la verificación de las condiciones iniciales de entrada (%M8.1, %M8.5, %M8.7, %M8.5). El temporizador TON (%DB9 y %DB10) controla el tiempo de muestreo de la animación del sellado. Durante la aplicación del sellador, el temporizador (%DB13) gestiona el tiempo de aplicación del sellado.

La transición al siguiente proceso se verifica mediante el contacto (%M12.5). Si todas las condiciones se cumplen, se procede a la siguiente etapa del proceso de pintado. Esta secuencia

asegura que el sellado se aplique de manera efectiva, proporcionando una protección duradera contra la humedad, la corrosión y el ruido, garantizando así la calidad y durabilidad del acabado final del vehículo.

#### 4.10.6. Segmento 6: Revestimiento medio

La secuencia de control que se valida en la figura 50 del revestimiento medio comienza con la verificación de las condiciones iniciales de entrada (%M12.1, %M20.4, %M12.6). El temporizador TON (%DB16) controla el tiempo de aplicación de la capa intermedia, asegurando que se mantenga dentro del rango requerido para una cobertura efectiva.

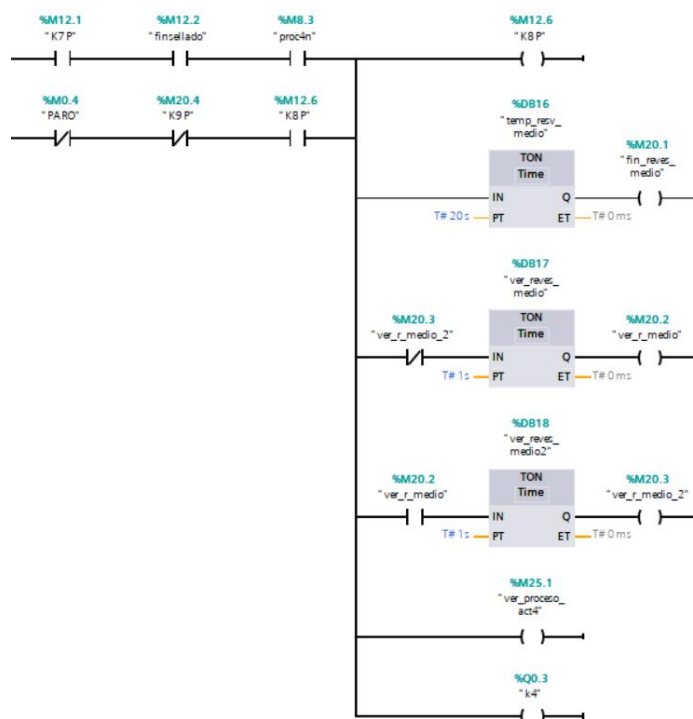


Figura 50: Etapa de revestimiento medio.

Durante la aplicación del revestimiento, se utilizan varios temporizadores (%DB17, %DB18) que gestionan la animación del proceso. El primer temporizador (%DB17) controla el inicio del proceso de animación del revestimiento medio. La transición al siguiente proceso se verifica mediante el contacto (%M25.1). Si todas las condiciones se cumplen, se procede a la siguiente etapa del proceso de pintado. De lo contrario, se activan las alarmas correspondientes (%Q0.3) y el proceso se detiene para evitar defectos en la carrocería. Esta secuencia asegura que el revestimiento medio se aplique de manera efectiva, proporcionando una base sólida y duradera

para las capas finales de pintura, garantizando así la calidad y durabilidad del acabado final del vehículo.

#### 4.10.7. Segmento 7: Revestimiento superior

La etapa de revestimiento superior en el proceso de pintado de carrocerías se encarga de aplicar la capa final de pintura que no solo proporciona la estética deseada, sino que también ofrece protección adicional contra factores ambientales y mecánicos. La figura 51 ilustra la lógica de control para esta etapa, asegurando que cada paso del proceso se realice de manera eficiente y con precisión.

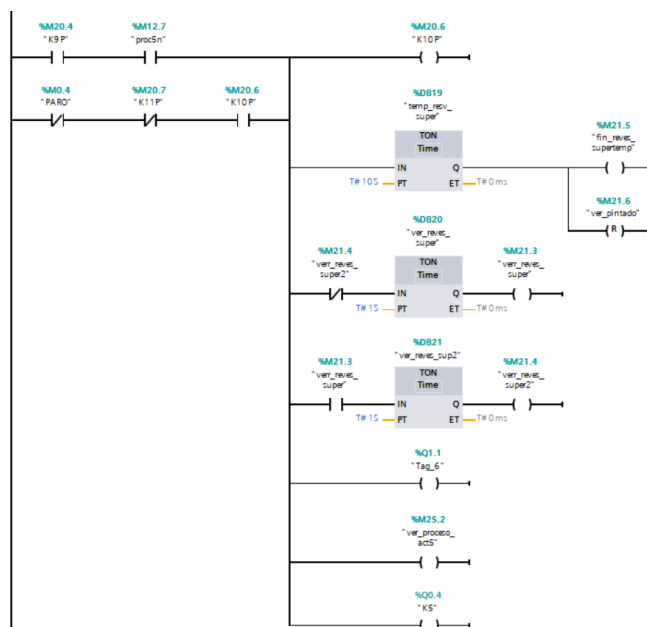


Figura 51: Etapa de revestimiento superior.

La secuencia de control para el revestimiento superior comienza con la verificación de las condiciones iniciales de entrada (%M20.4, %M20.7, %M20.6). El temporizador TON (%DB19, %T105) se utiliza para controlar el tiempo de aplicación del revestimiento superior, asegurando que se mantenga dentro del rango requerido para una cobertura uniforme y efectiva.

Durante la aplicación del revestimiento superior, se utilizan varios temporizadores (%DB20, %DB21) que gestionan las animaciones del proceso. La transición al siguiente proceso se verifica mediante el contacto (%Q0.1). Si todas las condiciones se cumplen, se procede a la siguiente etapa del proceso de pintado. De lo contrario, se activan las alarmas correspondientes (%Q0.4,

#### 4.10.8. Segmento 8: Secado

La etapa de secado en el proceso de pintado de carrocerías es fundamental para asegurar que las capas de pintura se curen adecuadamente, proporcionando durabilidad y resistencia a la corrosión. La figura 52, ilustra la lógica de control para esta etapa, detallando los pasos necesarios para mantener las condiciones óptimas de temperatura y tiempo.



Durante el secado, se monitorean continuamente las condiciones de temperatura y tiempo. Si la temperatura cae fuera del rango establecido, se activa una alarma (%M22.2), deteniendo el proceso para evitar defectos en el acabado de la pintura.

#### 4.11. Implementación del proyecto en laboratorio

La implementación del proyecto en un entorno de laboratorio implica una serie de pasos que aseguran que todas las partes del sistema automatizado funcionen correctamente y se integren de manera efectiva. A continuación, se describe el proceso de configuración de hardware y software, así como la implementación de sensores y actuadores.

##### 4.11.1. Configuración de Hardware y Software

La configuración de hardware y software es el primer paso en la implementación del proyecto. Esta etapa implica la preparación de todos los componentes necesarios, desde los controladores lógicos programables (PLC) hasta las interfaces hombre-máquina (HMI) y los dispositivos de red.

##### 1. Selección y Preparación del PLC:

Se selecciona un PLC Siemens S7-1516-3PN/DP. Se configura el PLC utilizando el software TIA Portal, que permite programar y simular el control del sistema de pintado de carrocerías tal como se ve en la figura 53.



Figura 53: Modulo PLC S7-1500.

##### 4.11.2. Configuración de la HMI:

Se diseña una interfaz HMI para el monitoreo y control del proceso. La HMI que se ve en la figura 54 se programa para mostrar datos en tiempo real, como las temperaturas, presiones y estados de los sensores y actuadores.



Figura 54: HMI en módulo.

#### 4.11.3. Implementación de Sensores y Actuadores

Los sensores y actuadores son componentes del sistema automatizado, ya que proporcionan los datos necesarios para controlar y ajustar el proceso de pintado en este se usan botones y luces piloto para simular el mecanismo de un sensor y mostrar cada etapa con el control on/off de luces piloto tal como se ve en la figura 55.

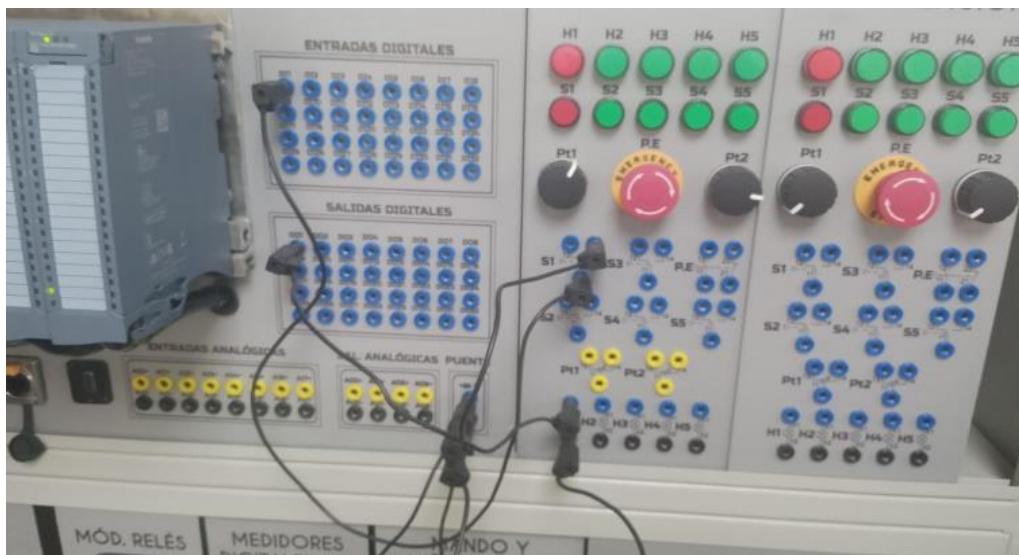


Figura 55: Lamina de mando y señalización PLC.

En la figura 56 se observa la implementación del proyecto en el entorno de laboratorio, donde se está trabajando en la configuración del PLC y la integración de los sensores y actuadores en el sistema automatizado de pintado de carrocerías. Esta etapa implica la verificación y ajuste de

todos los componentes del sistema para asegurar que cada parte funcione correctamente y en sincronía con las demás.



Figura 56: Implementación de configuración física del proyecto.

En la figura 57 se presenta el sistema automatizado completamente implementado en un módulo didáctico de redes industriales y sistemas de automatización. Este módulo incluye la configuración del PLC Siemens S7-1500, junto con la pantalla HMI y otros componentes esenciales que permiten la simulación del proceso de pintado de carrocerías de automóviles. La imagen evidencia la complejidad y el detalle del cableado y la conexión de dispositivos. Esta configuración proporciona a los estudiantes una visión práctica y tangible de cómo se lleva a cabo la automatización en un entorno industrial real, consolidando así el enfoque educativo del proyecto.



Figura 57: Implementación completa del sistema.

## 5. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de las pruebas y simulaciones realizadas en TIA Portal. Se documentan las mediciones y observaciones clave en cada etapa del proceso de pintado, incluyendo la detección de la carrocería, la limpieza y desengrase, el fosfatado y pasivado, y el secado. Los resultados se organizan de manera que se puedan identificar patrones y comportamientos del sistema bajo diferentes condiciones operativas.

### 5.1. Análisis de Resultados

En esta subsección se realiza un análisis de los resultados obtenidos de la ejecución de la simulación, evaluando el desarrollo del sistema automatizado en cada etapa del proceso de pintado.

#### 5.1.1. Simulación de detección de carrocería

En esta etapa inicial, se verifica la presencia de la carrocería antes de avanzar en el proceso. La figura 58 muestra el diagrama de flujo correspondiente, donde si se detecta la carrocería, el proceso continúa hacia la siguiente fase. En caso contrario, se bloquea el proceso para evitar errores.

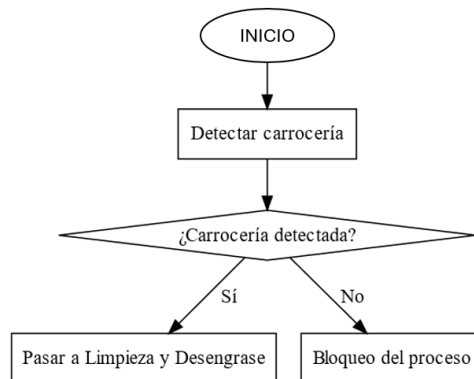


Figura 58: Detección de la carrocería.

La figura 59 muestra la simulación de la etapa de detección de carrocerías en el sistema automatizado de pintado. En esta etapa, un sensor simulado colocado al inicio de la línea de producción detecta la presencia de una carrocería que ingresa al proceso.

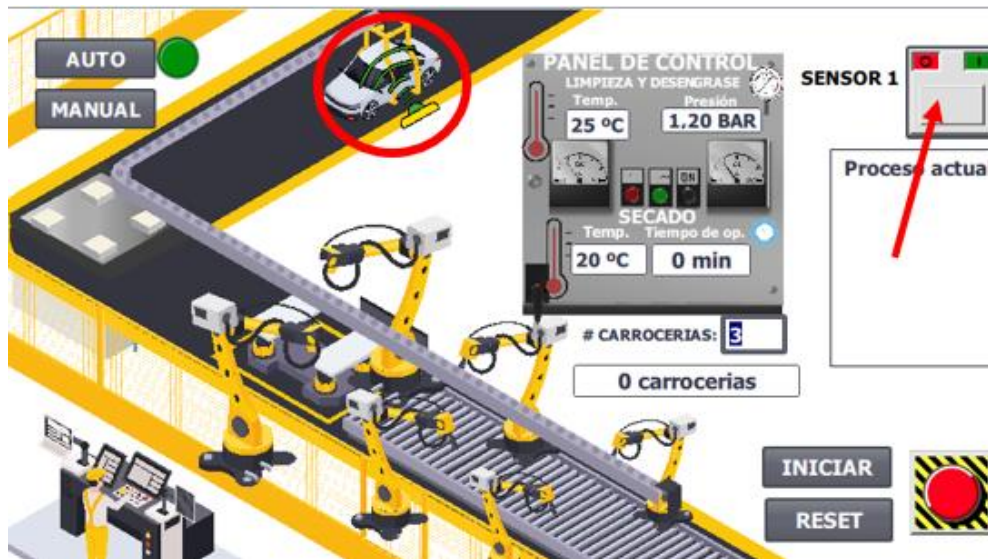


Figura 59: Simulación de la etapa de detección.

### 5.1.2. Simulación de limpieza y desengrasado

En la etapa de limpieza y desengrase, la carrocería procede a un lavado controlado para eliminar cualquier rastro de grasa y suciedad. Se verifican variables como la temperatura del agua y la presión de los aspersores. Este proceso se valida en el diagrama de la figura 60.

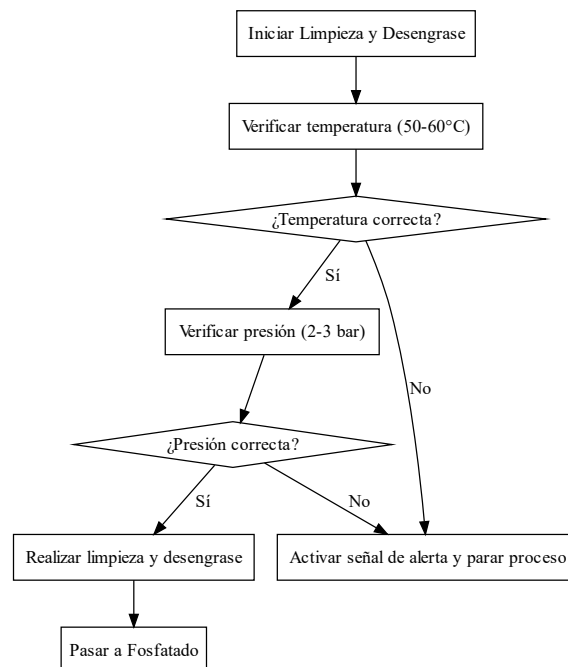


Figura 60: Diagrama de flujo de limpieza.

La figura 61, ilustra la simulación de la etapa de limpieza en el sistema automatizado de pintado de carrocerías. Durante esta fase, se observa cómo la carrocería es sometida a un proceso de

limpieza con agua a una temperatura controlada de 60°C y una presión de 1.90 bar hasta 3.10 bar, como se indica en el panel de control. La interfaz gráfica permite monitorear y controlar en tiempo real estas variables para asegurar una limpieza efectiva, eliminando cualquier contaminante que pueda afectar la calidad del pintado. Además, el sistema ofrece opciones para iniciar o reiniciar el proceso, mientras se mantiene un seguimiento del número de carrocerías en la línea de producción.

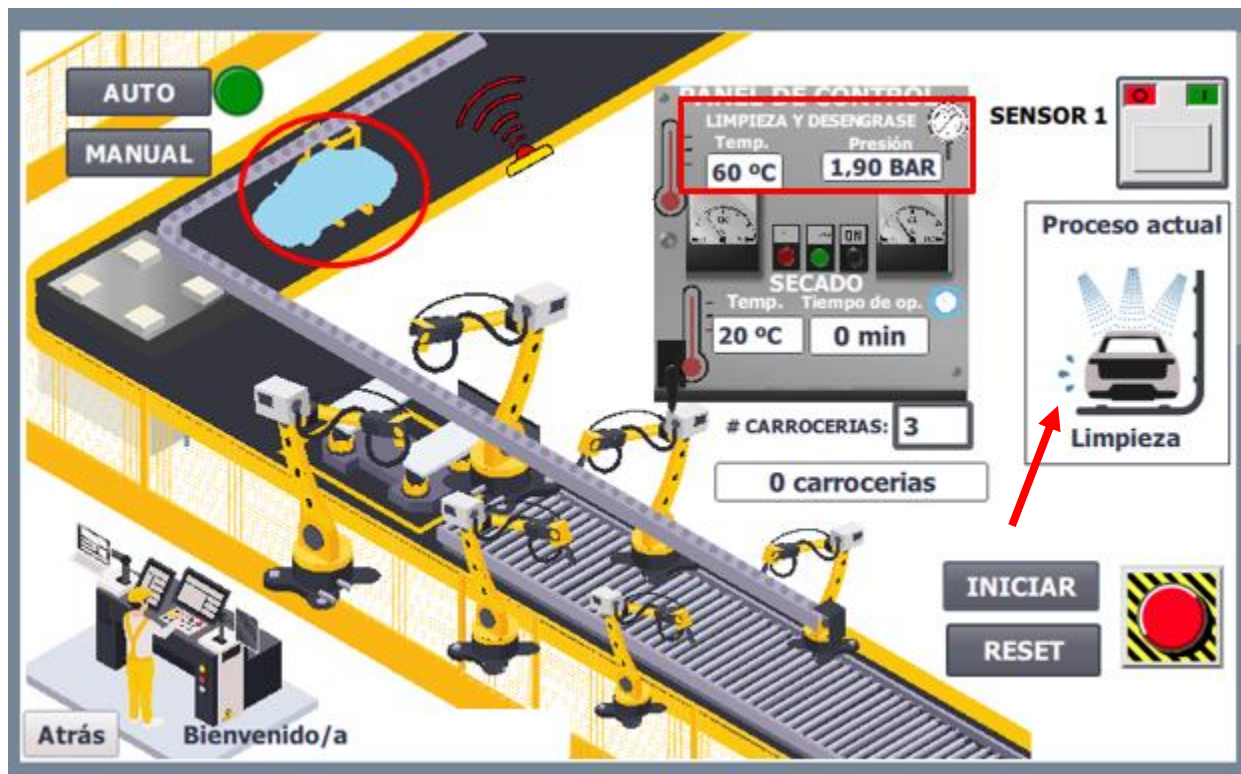


Figura 61: Simulación de la etapa de limpieza.

### 5.1.3. Simulación de fosfatado

La etapa de fosfatado, representada en la figura 62, se enfoca en preparar la superficie de la carrocería mediante la inmersión en una solución. Este paso asegura la adherencia de las capas posteriores. Se muestran parámetros como temperatura y tiempo de inmersión para garantizar la correcta formación de la capa protectora.

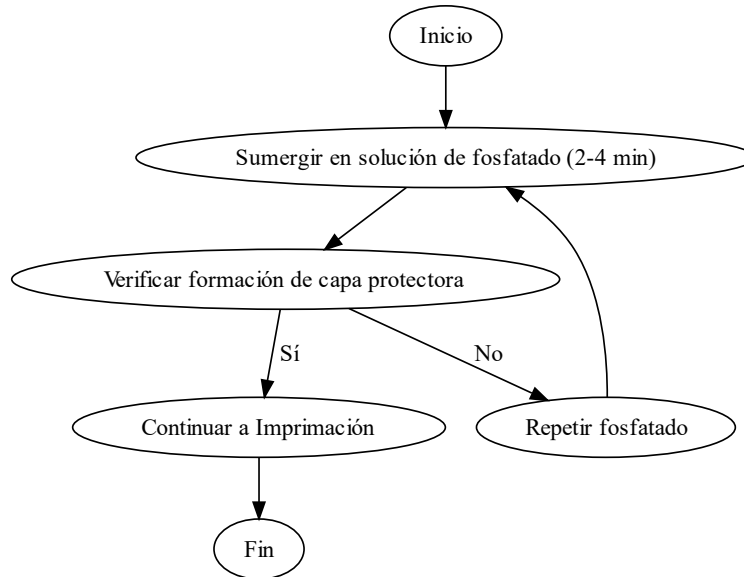


Figura 62: Diagrama de flujo de fosfatado.

En la simulación de la etapa de fosfatado, representada en la figura 63, se detalla el proceso en el que la carrocería del automóvil es sumergida en una solución de fosfatado para crear una capa protectora. El tiempo de operación, configurado para esta etapa, se visualiza mediante una ventana emergente, la cual se activa dando clic en el proceso actual. Este diseño permite un monitoreo específico del tiempo de fosfatado sin sobrecargar la interfaz principal, asegurando que el operador pueda enfocarse en otras tareas del sistema de manera eficiente.



Figura 63: Simulación de fosfatado.

#### 5.1.4. Simulación de imprimación

Posteriormente, la carrocería pasa por el proceso de imprimación, que consiste en la aplicación de una capa base que prepara la superficie para las capas finales de pintura. Este paso incluye la verificación de la temperatura y el pH de la solución de imprimación antes de proceder al sellado. La secuencia de este proceso se muestra en la figura 64.

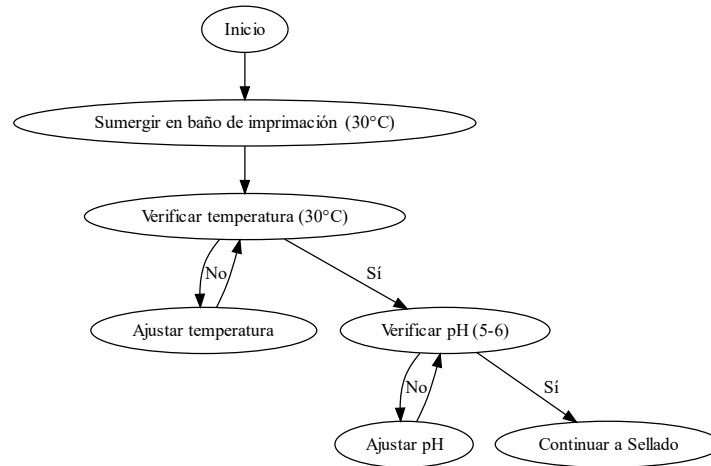


Figura 64: Diagrama de flujo de la imprimación.

En la simulación de la imprimación, ilustrada en la figura 65, se observa cómo la carrocería del automóvil pasa por el proceso de aplicación de la capa de imprimación. En el panel de control, se destacan las variables de temperatura y el pH de la solución de imprimación. En este caso, se han configurado una temperatura de 30°C y un pH de 6.0. Para no saturar la interfaz general, se utiliza una pantalla secundaria que muestra estas variables y se accede a ella mediante un botón específico en la interfaz principal.

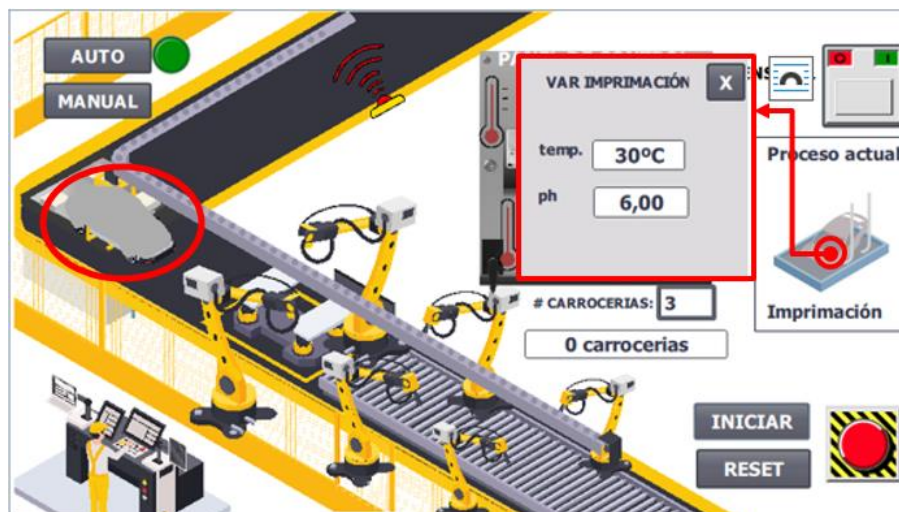


Figura 65: Simulación de imprimación.

### 5.1.5. Simulación de sellado

La etapa de sellado asegura que todas las uniones y áreas susceptibles a la entrada de humedad estén protegidas, es así que, se aplica un sellador que proporciona una barrera contra la corrosión y otros daños. El flujo de trabajo de este proceso se detalla en la figura 66, donde se verifica la cobertura completa antes de avanzar al revestimiento medio.

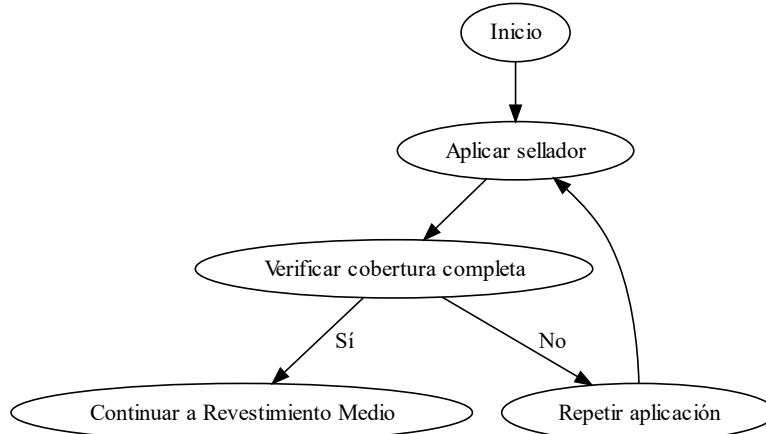


Figura 66: Diagrama de flujo de sellado.

En la figura 67 se muestra la simulación del proceso de sellado en la línea de pintado automatizado. Durante esta etapa, se aplica un sellador en las juntas de la carrocería para asegurar la protección contra la humedad y el polvo, mejorando además la adherencia de las capas de pintura posteriores. El panel de control presenta la variable operativa relevante de esta fase, que es el tiempo de operación, configurado en este caso para 6 minutos. Esta información se despliega en una pantalla emergente, accesible desde la interfaz principal para evitar saturar el panel de control general.

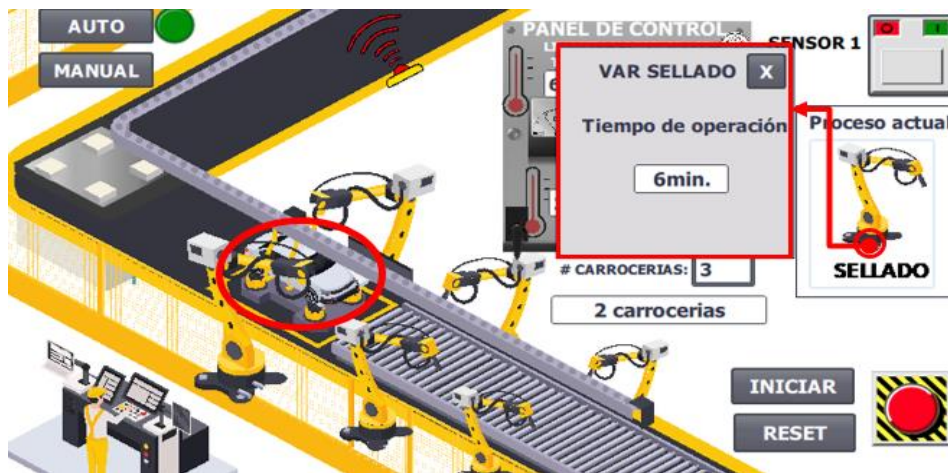


Figura 67: Simulación de sellado.

### 5.1.6. Simulación de revestimiento medio

El revestimiento medio añade una capa adicional de protección y prepara la carrocería para el revestimiento superior. Esta etapa garantiza que la aplicación del revestimiento sea uniforme y completa antes de proceder a la capa final. El flujo de este proceso se describe en la figura 68.

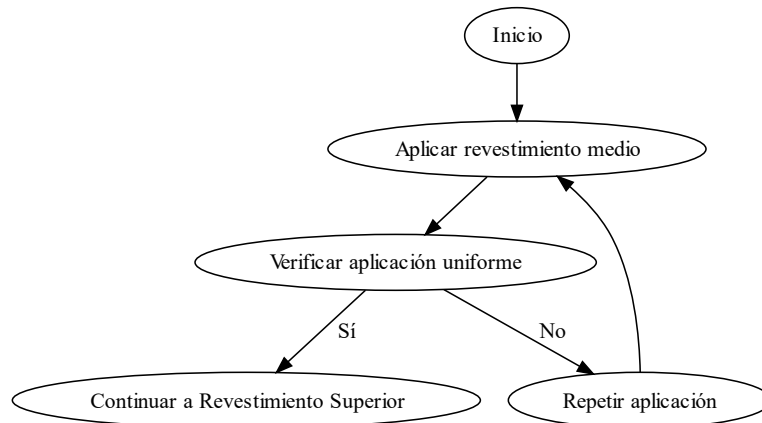


Figura 68: Diagrama de flujo de revestimiento medio.

En la figura 69 se presenta la simulación del proceso de revestimiento medio en la línea de pintado automatizado, esta etapa consiste en la aplicación de una capa intermedia de pintura que sirve como base para las capas superiores, mejorando la apariencia final del vehículo. El panel de control indica un tiempo de operación de 7 minutos, que es el tiempo transcurrido al momento de la captura, por tanto, este tiempo de operación se muestra en una pantalla emergente, que permite acceder a detalles específicos de cada etapa del proceso sin saturar la interfaz principal.

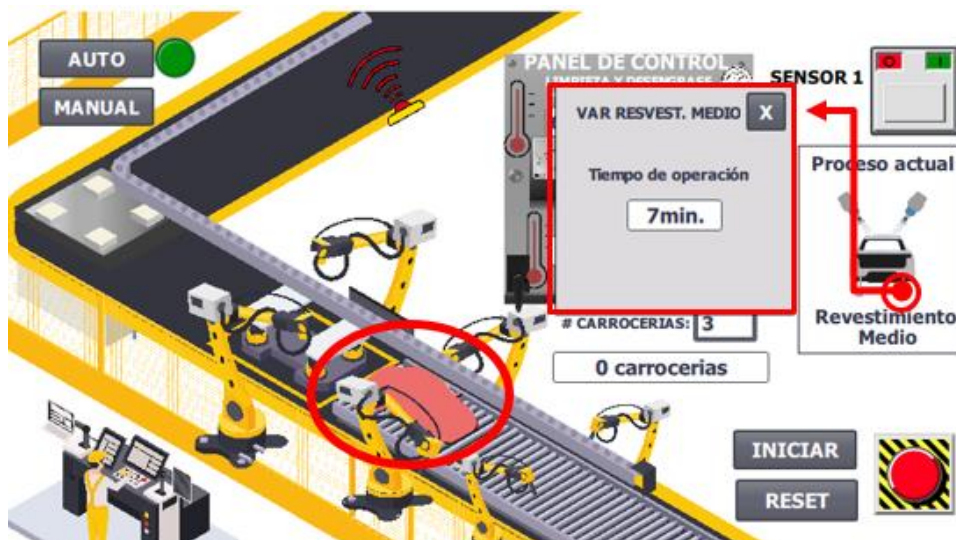


Figura 69: Simulación de revestimiento medio.

### 5.1.7. Simulación de revestimiento superior

El revestimiento superior es la etapa en la que se aplica la capa final de pintura que define la apariencia del vehículo, este paso es crucial para asegurar un acabado estéticamente agradable y duradero. El proceso de aplicación y verificación del revestimiento superior se muestra en la figura 70.

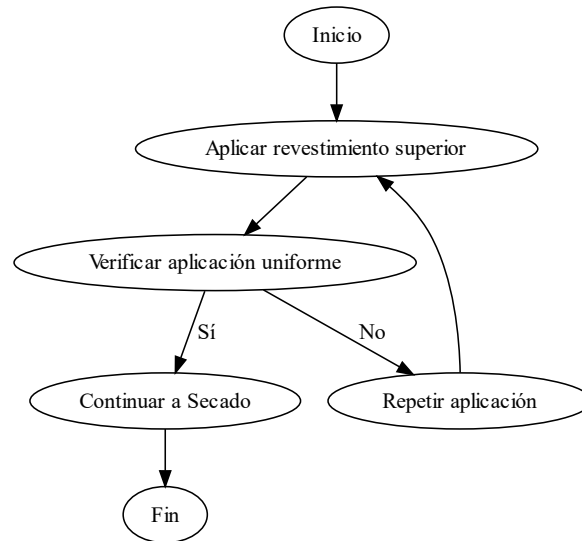


Figura 70: Diagrama de flujo de revestimiento superior.

En la figura 71 se muestra la simulación del proceso de revestimiento superior en la línea automatizada de pintado de carrocerías, esta etapa permite aplicar la capa final de pintura que dará el acabado estético al vehículo. El panel de control indica un tiempo de operación de 3 minutos, reflejando el tiempo requerido para que los brazos robóticos completen la aplicación de esta capa. Para visualizar este tiempo de operación sin saturar la interfaz general, se emplea una ventana emergente que detalla el tiempo de operación específico de la etapa.

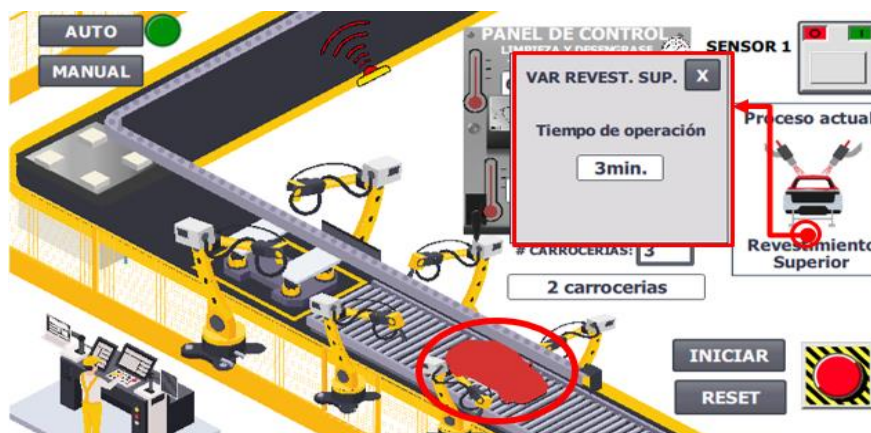


Figura 71: Simulación de revestimiento superior.

### 5.1.8. Simulación de secado

Finalmente, la carrocería pasa por la etapa de secado. Este proceso requiere un control estricto de la temperatura y el tiempo para garantizar la durabilidad del acabado. El diagrama de flujo de esta etapa se encuentra en la figura 72, mostrando cómo se manejan las verificaciones de temperatura y tiempo antes de finalizar el proceso.

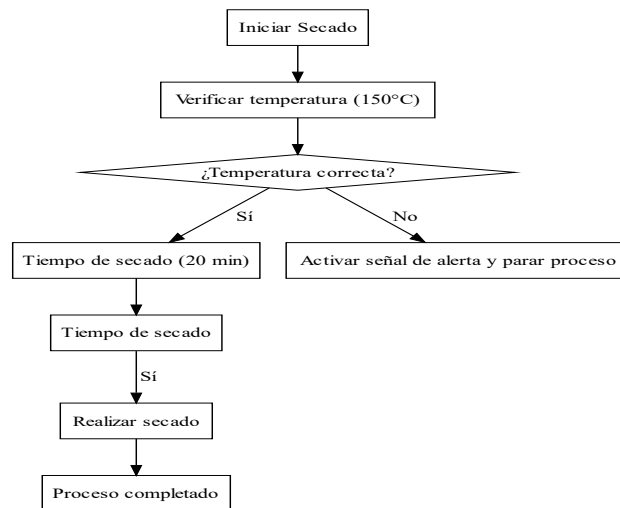


Figura 72: Diagrama de flujo de secado.

En la figura 73 se presenta la simulación del proceso de secado dentro de la línea automatizada de pintado de carrocerías, esta etapa asegura que la pintura aplicada en las fases anteriores se adhiera correctamente y alcance la dureza deseada. El panel de control muestra las condiciones operativas, indicando un tiempo de secado configurado de 20 minutos a una temperatura de 150°C. Estos parámetros son esenciales para asegurar un secado uniforme y efectivo de la pintura en toda la carrocería. La interfaz del panel de control utiliza una ventana emergente para mostrar el tiempo y la temperatura de secado.

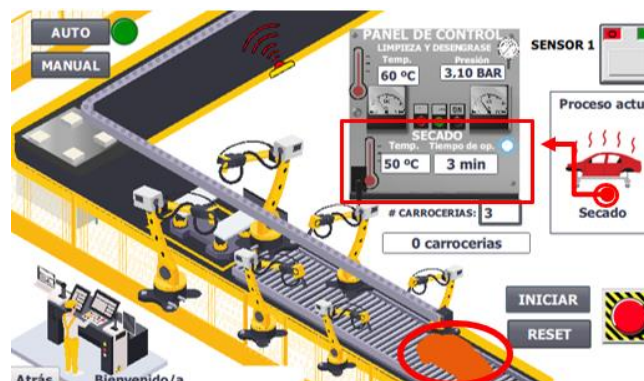


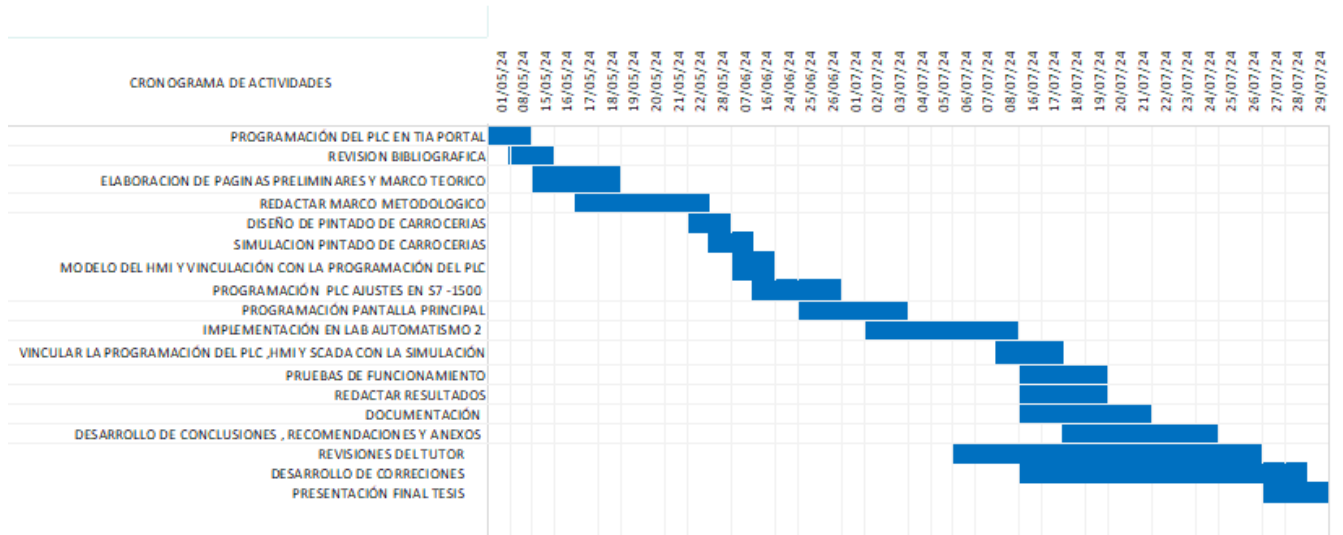
Figura 73: Simulación de proceso de secado.

## CRONOGRAMA

A continuación, en la tabla 2, se muestra el cronograma de las fases para el desarrollo de un sistema de automatización en la línea de pintado de carrocerías, desglosado por semanas.

Tabla 2.

Cronograma de actividades



## PRESUPUESTO

En la tabla 3 se expone a continuación el presupuesto detallado para el proyecto de automatización de la línea de pintado de carrocerías.

Tabla 3.

Presupuesto general del proyecto

| PRESUPUESTO GENERAL |                     |       |           |              |                  |
|---------------------|---------------------|-------|-----------|--------------|------------------|
| No.                 | DENOMINACION        | CANT. | UNIDAD    | COSTO U (\$) | COSTO TOTAL (\$) |
| 1                   | HORAS DE INGENIERIA | 1     | 320 Horas | \$2,81       | \$899,20         |
|                     |                     |       |           | Sub-Total    | \$899,20         |
|                     |                     |       |           | TOTAL        | \$899,20         |

Horas de ingeniería de lunes a viernes 8 horas diarias, 160 horas mensuales durante 2 meses.

## CONCLUSIONES

La programación realizada en el software TIA Portal permitió estructurar y controlar de manera didáctica cada etapa del proceso de pintado de carrocerías. Se lograron programar todas las secuencias lógicas y temporizadas necesarias para asegurar un funcionamiento coherente y automatizado del sistema, esta programación resultó esencial para el adecuado control de cada fase del proceso.

La implementación en el PLC Siemens S7-1500 se encuentra adecuada para gestionar los diferentes procesos simulados involucrados, desde la detección inicial de la carrocería hasta el secado final. Esta elección tecnológica permitió un control eficiente y confiable del sistema automatizado, asegurando la correcta ejecución de las operaciones.

La simulación de variables como temperatura, presión y tiempo en la pantalla HMI ofreció una visualización clara y detallada del sistema automatizado de pintado, esta simulación no solo facilitó la comprensión integral del proceso, sino que también permitió la identificación y corrección de posibles fallos en la configuración antes de la implementación física, optimizando el rendimiento del sistema.

La capacidad de interactuar con el sistema a través de la HMI reforzó la experiencia educativa, proporcionando un entorno de aprendizaje que imita de manera realista un proceso industrial, esta interacción permitió a los estudiantes y operadores comprender mejor el funcionamiento del sistema automatizado, contribuyendo a una formación práctica y efectiva.

La evaluación del sistema automatizado en el laboratorio de automatismo 2 de la Universidad Politécnica Salesiana permitió validar el correcto funcionamiento de todas las etapas simuladas del proceso de pintado bajo condiciones controladas. Durante las pruebas, se observó la diferencia entre la simulación y la implementación física, confirmando que el sistema es capaz de realizar el proceso de manera automática, además, se identificaron áreas de mejora que fueron corregidas, logrando una mejor visualización del proceso en el sistema.

## **RECOMENDACIONES**

Antes de energizar el sistema, es imperativo realizar una verificación exhaustiva de todas las conexiones eléctricas y componentes involucrados. Esto incluye confirmar que todos los cables estén correctamente conectados según el esquema de cableado, y que los dispositivos estén debidamente instalados y configurados. Este paso es crucial para prevenir fallos eléctricos y asegurar la integridad del sistema desde su puesta en marcha.

Al transitar de la simulación a la implementación física, se recomienda llevar a cabo pruebas graduales, evaluando cada etapa del proceso de forma individual en el laboratorio antes de activar el sistema completo. Este enfoque permite identificar y corregir cualquier discrepancia entre la simulación y la implementación real, lo que minimiza el riesgo de errores en la operación final del sistema.

Se sugiere la incorporación de sistemas adicionales de alerta y monitoreo en la interfaz HMI para detectar cualquier desviación en las variables críticas del proceso, como la temperatura y la presión. Estos sistemas permiten una intervención rápida y efectiva ante cualquier anomalía, lo que reduce significativamente el riesgo de daños en los equipos o defectos en el proceso de pintado. La implementación de estas herramientas de monitoreo fortalecerá la seguridad y la confiabilidad del sistema automatizado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abrasives, E. (2023). Retrieved from Surface Prepping a Car for Painting: Tools, Tips & Techniques for Automotive Painting Prep: <https://www.empireabrasives.com/blog/surface-prepping-car-painting-tools-tips-techniques-automotive-prep/>
- AG, S. (2023). *SIMATIC STEP 7 in TIA Portal - Programming Manual*.
- Alejandro López Martínez, M. G. (2019). *Tecnología de la fabricación: Apuntes de teoría*. Universidad Almería.
- Álvarez Serrano, J. L., & Guevara Toledo, C. J. (2021). *Diseño e implementación de un módulo de entrenamiento con PLC s7 1500 para aplicaciones de control de AVG*. Retrieved from <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20650>
- Arcos Bonilla, J. A. (6 de 10 de 2022). *Análisis y mejora del sistema de desengrase de chapas metálicas para reducir el índice de cráteres al final del proceso ELPO de la planta de pintura de CIAUTO*. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/18214>
- AutomationDirect. (2023). *LC Ladder Logic Programming Training*. Retrieved from <https://www.plcacademy.com/>
- Balasubramanian, J. K. (2023). A Study on Automotive Sheetmetal Surface Pretreatment: Liquid Activation and Low Temperature Phosphating. *SAE Technical Paper*, 2023-28-1324. doi:<https://doi.org/10.4271/2023-28-1324>
- Barona López, G. &. (2021). Automatización de procesos industriales mediante Industria 4.0. *AlfaPublicaciones*, 3(3.1), 98–115.
- Bernabeu, J. N., & Azkargorta, A. E. (2023, 06 02). *SURFACE TREATMENT METHODS FOR METAL COMPONENTS TRAYS AND FRAMES*. Retrieved from <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:his:diva-22941>
- Calero Gozávez, C. (2021, 10 21). *Control de nivel de un sistema de tanques acoplados mediante un autómata programable y una pantalla HMI*. Retrieved from <https://idus.us.es/handle/11441/126752>
- Cláudio Belo Lourenço, D. C. (2022). Automated formal analysis of temporal properties of Ladder programs. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, 977–997.
- Elías Soto. (2022, 06). *Diseño e implementación de controladores Beckhoff en maquetas de procesos de control*. Retrieved from <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/28749>
- Erfan Rezvani Ghomi, R. E. (2020). Development of an epoxy self-healing coating through the incorporation of acrylic acid-co-acrylamide copolymeric gel. *Progress in Organic Coatings*, 105948.

- GARCIA, J. M., Uribe, L. E., & LEMUS, V. H. (2022). *Modificación de línea de pintura para mejora del desempeño del recubrimiento en autopartes*.
- Gómez Sánchez de Rojas, P. (2021). *Análisis medioambiental en una planta de fabricación de automóviles*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/11531/51633>
- INCIBE. (2023, 08 10). *Configuraciones seguras en dispositivos industriales*. Retrieved from <https://www.incibe.es/incibe-cert/blog/configuraciones-seguras-en-dispositivos-industriales>
- Jiyue Qin, Z. W. (2023). Revealing the role of sealing treatment on the electrochemical corrosion properties of HVOF-sprayed WC–20Cr3C2–7Ni/MWCNTs coating. *Journal of Materials Research and Technology*, 2486-2497. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.267>
- León Guanochanga, L. G. (2020, 10). *Implementación de un HMI mediante el uso del software WinCC Professional para prácticas de comunicación Profinet entre dos PLC's siemens S7-300*. Retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/25885>
- M H Yosri, P. M. (2019). Air ionizer application for electrostatic discharge (ESD) dust removal in automotive painting industry. *iopscience*.
- Milla-León Rodríguez, R. F. (2020). *Desarrollos tecnológicos en el pretratamiento químico de piezas de acero laminado para un posterior proceso de pintado en polvo electrostático*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12815/154>
- Mite, L. B., Cerezo, J. B., Anchundia, D. C., & Barragán, G. Y. (2021, 11). Niveles de automatización de los procesos industriales de la empresa alimenticia. doi:<https://doi.org/10.37955/cs.v4i2.63>
- Montes, D., Zamarreño, J. M., Pitarch, J. L., Oliveira da Silva, E., & Prada, C. d. (2021). *híbrida, Implementación de capas superiores de la pirámide de automatización en una planta piloto*. Retrieved from <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/28340>
- Noura Almansoori, S. A. (2020 , 03). *Manual spray painting process optimization using Taguchi robust design*. Retrieved from <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IJQRM-07-2019-0248/full/html>
- pf-mex. (2019). *Transportadores y sistemas de pintura*. Retrieved from <https://www.pf-mex.com/articulos/transportadores-y-sistemas-de-pintura>
- RealPars. (2022). Industrial Ethernet Switch (SCALANCE).
- Reyes Ávila, A. D., & Roldan Sarango, G. D. (2021, marzo). *Diseño e implementación de un controlador de nivel utilizando lógica difusa con PLC S7-1500*.

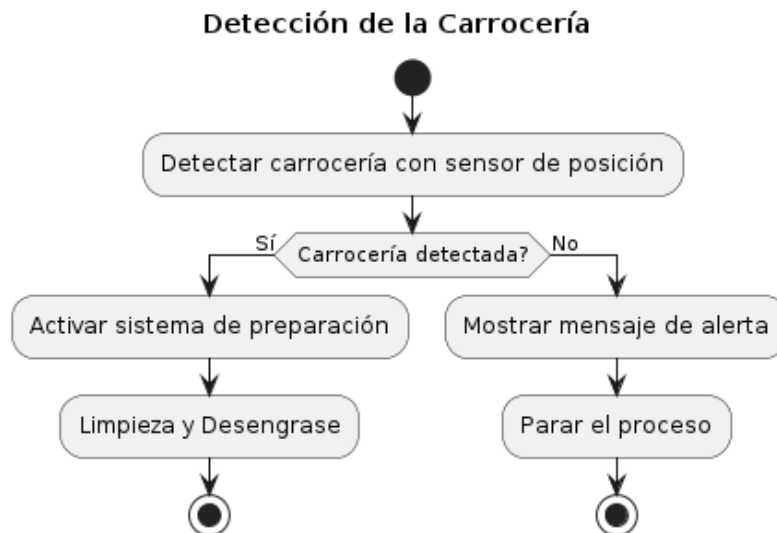
- Rojas, J. T. (2021, 01 01). *Pintura en polvo reciclada*. Retrieved from <https://www.zonadepinturas.com/202101017282/articulos/pinturas-y-recubrimientos/pintura-en-polvo-reciclada.html>
- Ruidias Almeida, Y. M., & Terán Sánchez, D. P. (2019). *Optimización del proceso de acabado de pintura en la empresa talleres Terán*. Retrieved from <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/5435>
- Sánchez, R. V. (2022, 01 27). *Control y simulación de un proceso industrial*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2117/363580>
- Schmidt, F. C., Korzenowski, A. L., Goecks, L. S., Gomes, I. B., & Benetti, V. G. (2023). A Production System for the auto parts industry with elements of Industry 4.0. e20220005. siemens.com. (2020, 01 07). *Delivery release: Integration in TIA Portal V16 of 3WLx, 3VA2/3VA6 and PAC3200/PAC4200*. Retrieved from <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109773682/delivery-release-integration-in-tia-portal-v16-of-3wlx-3va2-3va6-and-pac3200-pac4200?dti=0&lc=en-BD>
- siemens.com. (2023, 11 23). *Liberación para el suministro: SIMATIC HMI Unified Basic Panel* . Retrieved from <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109826192/liberaci%C3%B3n-para-el-suministro-simatic-hmi-unified-basic-panel?dti=0&lc=es-WW>
- Solís Bazán, E. R., & Mendoza Vera, G. (2022). *Diseño de un horno para el secado de la pintura epóxica aplicada en las estructuras metálicas en el sector metalmecánico*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12867/7973>
- Toyota Global. (2023). *Painting Process*. Retrieved from <https://global.toyota/en/company/plant-tours/painting/>
- Vieira, T. A. (2023). A Computational Fluid Dynamics Methodology to Predict Automotive Painting Process Using Simcenter STAR-CCM+. *SAE Brasil 2023 Congress*. doi:10.4271/2023-36-0056
- Vishesh Aggarwal, T. P. (2022). Electro-Dip Simulation of a Car BIW using Volume-of-Fluid Model with Hybrid Time Advancement Scheme. *The 7th World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer*. doi:10.11159/icmfht22.121
- Vitali Vansovits, E. P. (2022). Bridging the Gap in Technology Transfer for Advanced Process Control with Industrial Applications. *Intelligent Control and Digital Twins for Industry 4.0*. doi:<https://doi.org/10.3390/s22114149>

Xingli Wang, M. H. (2022). Preliminary studies on detonation sprayed W/W-steel composite coating materials on steel substrates for the first wall of blanket. *Surface and Coatings Technology*, 128693. doi:<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128693>

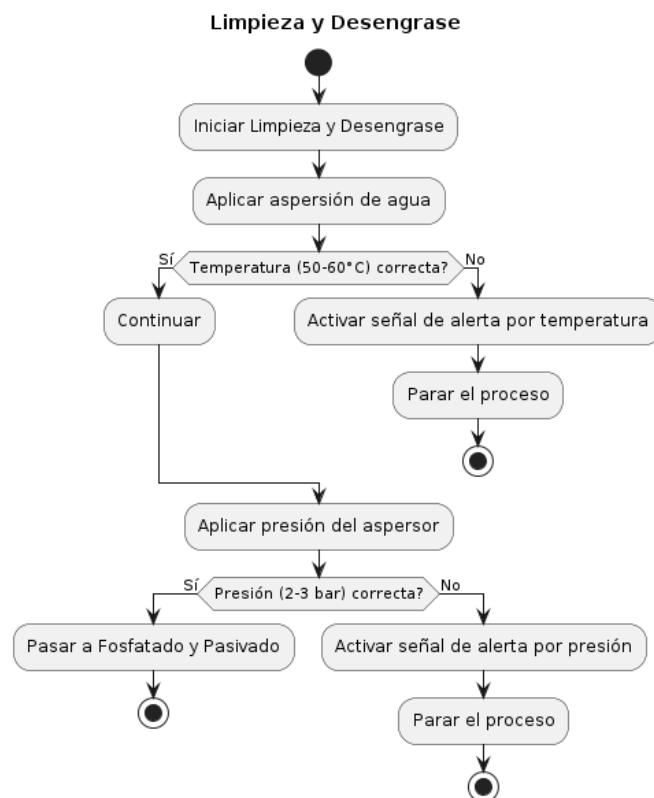
## ANEXOS

### Diagrama secuencial por etapas

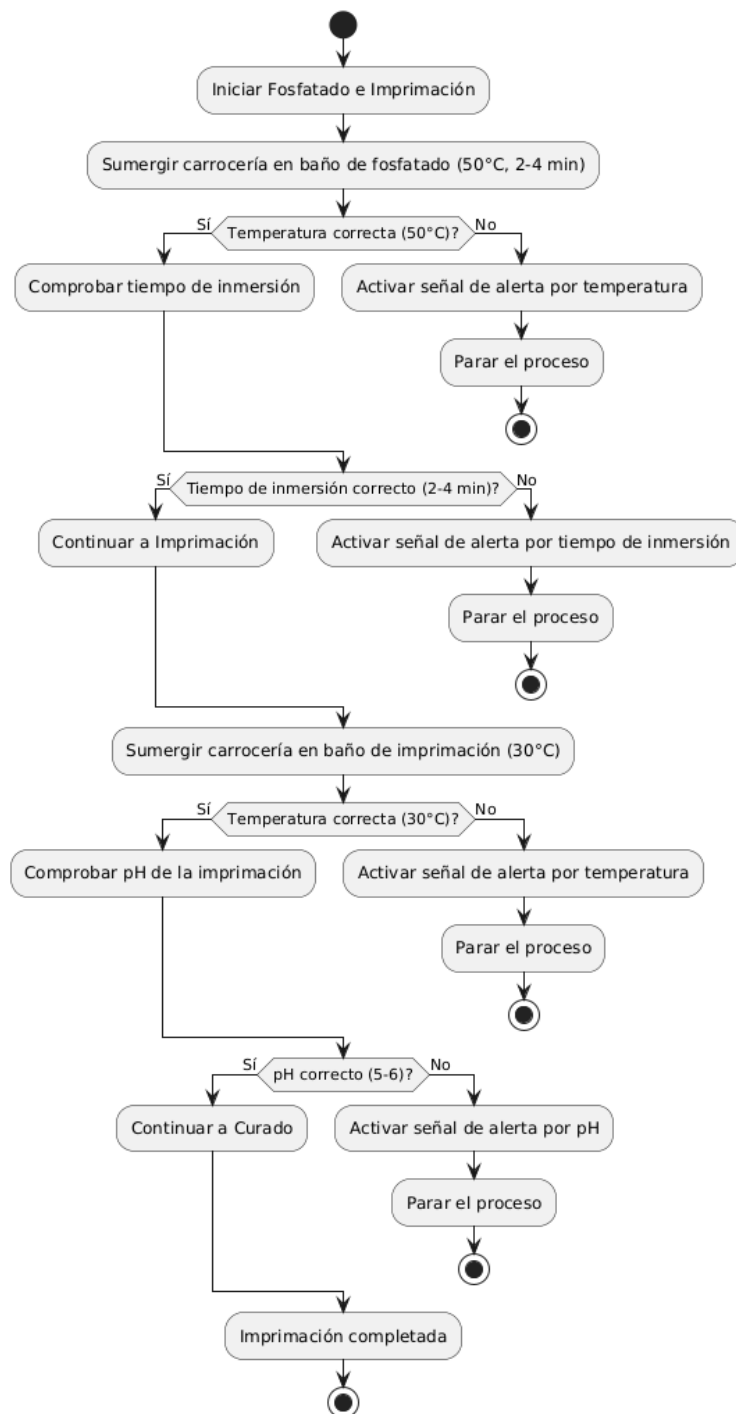
#### ANEXO A: Detección de la Carrocería



#### ANEXO B: Limpieza y Desengrase



## ANEXO C: Fosfatado e Imprimación



## ANEXO D: Secado

