



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN PROCESO DE LLENADO,
PESAJE Y SELLADO DE RECIPIENTES PARA LUBRICANTES
INDUSTRIALES MEDIANTE PLC, HMI Y PASARELA IOT2040.

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Electrónica

AUTORES: BRYAN FERNANDO SOLÍS GALARZA
JOHAN ISAAC MEJÍA VERA

TUTOR: ING. GENARO ELICEO DÍAZ SOLÍS

Guayaquil – Ecuador
2025 - 2026


**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN**

Nosotros, Bryan Fernando Solís Galarza con documento de identificación N° 0952976835 y Johan Isaac Mejía Vera con documento de identificación N° 0951907518; manifestamos que:


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

Guayaquil, 11 de febrero del año 2026

Atentamente,


Bryan Fernando Solís Galarza

0952976835


Johan Isaac Mejía Vera

0951907518


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

Nosotros, Bryan Fernando Solís Galarza con documento de identificación N° 0952976835 y Johan Isaac Mejía Vera con documento de identificación N° 0951907518, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Diseño y simulación de un proceso de llenado, pesaje y sellado de recipientes para lubricantes industriales mediante PLC, HMI y pasarela IoT2040.”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Electrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Guayaquil, 11 de febrero del año 2026.

Atentamente,



Bryan Fernando Solís Galarza
0952976835



Johan Isaac Mejía Vera
0951907518

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Genaro Eliceo Díaz Solís con documento de identificación N° 0912186467, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: Diseño y simulación de un proceso de llenado, pesaje y sellado de recipientes para lubricantes industriales mediante PLC, HMI y pasarela IoT2040, realizado por Bryan Fernando Solís Galarza con documento de identificación N° 0952976835 y Johan Isaac Mejía Vera con documento de identificación N° 0951907518, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 11 de febrero del año 2026.

Atentamente,



Ing. Genaro Eliceo Díaz Solís

0912186467

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo, en primer lugar, a mis padres, por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi formación académica, por los valores inculcados, el esfuerzo constante y la confianza brindada en cada una de las decisiones tomadas durante este proceso. Su ejemplo ha sido fundamental para perseverar ante las dificultades y alcanzar este objetivo.

A mis tíos, por su acompañamiento permanente, comprensión y palabras de aliento en los momentos más exigentes del desarrollo de este proyecto.

A mis abuelos, por su cariño, cuidado y apoyo constante desde las primeras etapas de mi vida, y por ser un pilar fundamental en mi crecimiento personal y académico.

Finalmente, dedico este trabajo a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, formaron parte de este proceso, brindando apoyo, motivación y confianza para la culminación de este proyecto de titulación.

Bryan Fernando Solis Galarza

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por darme fuerza cuando sentí que no podía más y por permitirme llegar hasta este momento. A mis padres, por su apoyo incondicional, por su paciencia y por no soltarme la mano en los días difíciles, incluso cuando yo mismo dudé.

De manera muy especial, lo dedico a mi madre, porque con sus palabras, su ejemplo y su fe en mí, me sostuvo cuando me faltaban ganas, y me recordó una y otra vez por qué elegí esta carrera y por qué valía la pena seguir.

Este logro también es para mi familia y para todas las personas que, con un consejo, una oportunidad o un gesto de confianza, aportaron a este camino.

Porque detrás de cada avance hubo apoyo, y detrás de este resultado hay esfuerzo, aprendizaje y mucha perseverancia.

Johan Isaac Mejía Vera.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, por su apoyo incondicional, por el esfuerzo constante y por el amor brindado a lo largo de mi formación académica, siendo el pilar fundamental que me impulsó a alcanzar este objetivo.

A mis hermanos, por su acompañamiento permanente, comprensión y apoyo en cada etapa de este proceso.

A mi familia y amigos, quienes siempre estuvieron presentes brindándome palabras de ánimo, confianza y motivación para continuar y culminar este trabajo.

A los docentes y a todas las personas que formaron parte de mi formación académica, por los conocimientos, enseñanzas y orientación recibidos, los cuales contribuyeron de manera significativa a mi desarrollo profesional.

Bryan Fernando Solis Galarza

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios por permitirme culminar mi carrera a pesar de las adversidades y dificultades que se presentaron en el camino. Agradezco profundamente a mis padres por impulsarme a seguir adelante; en momentos de duda y cansancio, mi madre, en especial, me recordó por qué escogí esta profesión y por qué valía la pena continuar.

Asimismo, agradezco a la universidad y a la carrera por los conocimientos adquiridos y por la oportunidad de aprender junto a docentes y personas valiosas que me motivaron a seguir creciendo. Aunque no siempre tuve el mejor desempeño, mantuve la constancia y la disciplina, y con honestidad puedo decir que esta etapa me dejó bases reales para seguir practicando, especializándome y profundizando en la Electrónica y Automatización.

Finalmente, agradezco a mi padre por una frase que me ha marcado desde el inicio: “Cualquiera puede tener un título de ingeniero, pero no cualquiera puede ser realmente un ingeniero”. Esa idea me recuerda que esta profesión exige aprendizaje permanente y también una mejora personal y social constante. Este trabajo no solo representa un logro, sino el comienzo de un camino de formación continua.

Johan Isaac Mejía Vera

RESUMEN

AÑO	ALUMNOS	DIRECTOR DEL PROYECTO	TEMA DE TRABAJO DE TITULACIÓN
2026	JOHAN ISAAC MEJÍA VERA BRYAN FERNANDO SOLÍS GALARZA	ING. GENARO ELICEO DÍAZ SOLÍS	DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN PROCESO DE LLENADO, PESAJE Y SELLADO DE RECIPIENTES PARA LUBRICANTES INDUSTRIALES MEDIANTE PLC, HMI Y PASARELA IOT2040.

En este Trabajo de Titulación se diseñó y simuló un proceso automatizado de llenado, pesaje y sellado de recipientes para lubricantes industriales. En contraste con los sistemas semiautomatizados habituales —que dependen en gran medida del operario—, la propuesta busca mejorar precisión, trazabilidad y supervisión del proceso. Para lograrlo, se desarrolló la lógica de control en un PLC, se construyó una HMI para visualizar y monitorear cada etapa y se integró una pasarela IoT2040 para la adquisición y gestión de datos en tiempo real. Finalmente, la simulación permitió comprobar la ejecución secuencial de las fases y evaluar el desempeño global del sistema bajo un enfoque alineado con la automatización industrial y la Industria 4.0.

Palabras Clave: Automatización industrial, PLC, HMI, IoT2040, llenado, pesaje, sellado.

ABSTRACT

YEAR	STUDENTS	PRJ. DIRECTOR	SUBJECT
2026	JOHAN ISAAC MEJÍA VERA BRYAN FERNANDO SOLÍS GALARZA	ING. GENARO ELICEO DÍAZ SOLÍS	DESIGN AND SIMULATION OF AN AUTOMATED FILLING, WEIGHING, AND SEALING PROCESS FOR INDUSTRIAL LUBRICANT CONTAINERS USING PLC, HMI, AND IOT2040

In this Degree Project, an automated process for filling, weighing, and sealing industrial lubricant containers was designed and simulated. In contrast to commonly used semi-automated systems—which rely heavily on the operator—the proposed solution aims to improve accuracy, traceability, and process supervision. To achieve this, the control logic was developed in a PLC, an HMI was built to visualize and monitor each stage, and an IoT2040 gateway was integrated for real-time data acquisition and management. Finally, the simulation made it possible to verify the sequential execution of the phases and to evaluate the system’s overall performance under an approach aligned with industrial automation and Industry 4.0.

Keywords: Industrial automation, PLC, HMI, IoT2040, filling, weighing, sealing.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	PROBLEMA	3
2.1.	IMPORTANCIA DE LA PROBLEMÁTICA	5
3.	OBJETIVOS.....	6
3.1.	OBJETIVO GENERAL.....	6
3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
4.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
4.1.	PLC.....	7
4.1.1.	PLC SIEMENS SIMATIC S7-1500.....	7
4.2.	Putty	8
4.3.	FileZilla	11
4.4.	HMI.....	13
4.4.1.	Pantalla HMI Modelo: KTP-700 Basic	14
4.5.	Lenguaje de programación Ladder o escalera KOP.....	15
4.6.	Motor eléctrico trifásico	16
4.6.1.	Arranque directo	17
4.6.2.	Arranque estrella-triángulo.....	19
4.7.	IoT Industrial.....	22
4.7.1.	Pasarela Siemens IoT-2040	23
4.8.	Node-Red	25

4.9.	Indicador de peso CAS modelo WTM-300.....	26
4.9.1.	Principio de funcionamiento.....	27
4.9.2.	Procedimiento de calibración	29
4.9.3.	Integración con PLC y HMI	30
4.9.4.	Justificación de selección	32
4.10.	Celdas de carga.....	33
4.10.1.	Celdas de carga: base física y parte matemática (galgas extensiométricas).....	35
4.10.2.	Puente de Wheatstone	38
4.10.2.1.	Puente de Wheatstone: principio, ecuación de equilibrio y sensibilidad (en instrumentación).....	39
4.10.3.	Celdas de Punto Único (Single-Point)	42
4.11.	Sensor inductivo.....	44
4.12.	Variador de frecuencia	45
4.12.1.	Variador de frecuencia SINAMICS V20	45
5.	METODOLOGÍA.....	47
5.1.	Descripción del proyecto.....	47
5.2.	Tipo de metodología.....	49
5.3.	Etapas del desarrollo del proyecto	50
5.3.1.	Etapa 1: Programación del PLC en TIA Portal (LAD) y estructura del control	51
5.3.2.	Etapa 2: Implementación de bloques de función para acondicionamiento de señales	70

5.3.3.	Etapa 3: Diseño e implementación de la interfaz HMI (KTP700) bajo ISA-101	75
5.3.4.	Etapa 4: Configuración de la pasarela IoT2040	82
6.	RESULTADOS	88
6.1.	Entorno de pruebas e implementación en laboratorio	89
6.2.	Resultados del subsistema de pesaje (WTM-300 + PLC).....	93
6.3.	Resultados de la secuencia operativa y lógica de control (STEP)	95
6.3.1.	Arranque/paro/emergencia (habilitación del sistema)	95
6.3.2.	Transporte a estación (motor) y confirmación por sensor	97
6.3.3.	Llenado con corte grueso (SP_GRUESO).....	98
6.3.4.	Llenado con corte fino (SP_FINO).....	99
6.3.5.	Transición a sellado y temporización (TSELLADO).....	100
6.3.6.	Conteo y retorno a espera	101
6.4.	Resultados de operación y supervisión en HMI.....	102
6.4.1.	Ingreso de SP grueso/fino y visualización de variables.....	103
6.4.2.	Validación/alarma por consignas inválidas (SP_INVALIDADO)	104
6.4.3.	Alarma enclavada por error de sellado (ERROR_SELLADO).....	105
6.4.4.	Indicadores de etapa/estado y actuadores/sensores	106
6.5.	Resultados de supervisión IoT2040 + Node-RED	107
6.5.1.	Publicación de variables desde PLC (DB2 NODE_RED)	108
6.5.2.	Dashboard: tendencia de peso, setpoints, estados	109
6.5.3.	Registro histórico (tabla fecha/hora/peso) y condición de disparo	110
6.5.4.	Observaciones de comunicación (coherencia PLC–HMI–Node-RED)	

6.5.5. Limitaciones por versión de la pasarela y compatibilidad de librerías

112

6.6.	Síntesis de resultados y observaciones finales	114
7.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	115
8.	PRESUPUESTO.....	116
9.	CONCLUSIONES.....	117
10.	RECOMENDACIONES	118
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

Figuras

Figura 1 PLC SIMATIC S7-1500	8
Figura 2 Putty	8
Figura 3 Interfaz de Putty	10
Figura 4 Uso de la barra de conexión rápida	12
Figura 5 Ejemplo de Diagrama de un HMI.	13
Figura 6 Pantalla HMI marca Siemens	14
Figura 7 Descripción de Lógica Ladder	16
Figura 8 Motor eléctrico de inducción	17
Figura 9 Arranque directo de un motor trifásico	18
Figura 10 Arranque estrella-triángulo de un motor trifásico.....	20
Figura 11 Conexión tipo Estrella.....	21
Figura 12 Conexión tipo Delta	22
Figura 13 Arquitectura de IoT	23
Figura 14 Interfaces externos IoT2040.....	24
Figura 15 Node-Red Dashboard para computadora y celular smartphone.....	26
Figura 16 Indicador de peso CAS modelo WTM-300	27
Figura 17 Programación de parámetros del sistema.....	28
Figura 18 Diagrama para el cableado del módulo.....	29
Figura 19 Indicaciones para calibrar el módulo	30
Figura 20 Integración del WTM-300 con PLC/HMI mediante salida analógica y E/S auxiliares.....	31
Figura 21 Comunicación RS485 para supervisión digital y comportamiento ante alarmas.....	32
Figura 22 Celda de carga.....	35

Figura 23 Puente de Weatstone	39
Figura 24 Celda Single Point.....	42
Figura 25 Sensor inductivo.....	44
Figura 26 SINAMICS V20.....	46
Figura 27 Diagrama de flujo general del proceso automatizado de llenado, pesaje y sellado	50
Figura 28 Enclavamiento de habilitación general del sistema	51
Figura 29 Escalado de señal de peso y publicación de setpoints	52
Figura 30 Reinicio de secuencia por paro/emergencia.....	53
Figura 31 Arranque del ciclo y transición inicial (STEP 0→10).....	54
Figura 32 Detección de estación de llenado (STEP 10→20).....	54
Figura 33 Conteo auxiliar en etapa de llenado	55
Figura 34 Corte de llenado grueso por peso (STEP 20→30).....	56
Figura 35 Corte de llenado fino por peso (STEP 30→40).....	57
Figura 36 Retardo de asentamiento/estabilización del peso.....	57
Figura 37 Transición a transporte hacia sellado (STEP 40→50).....	58
Figura 38 Detección de estación de sellado (STEP 50→60)	59
Figura 39 Conversión de setpoint de sellado a tiempo (FC2)	59
Figura 40 Temporización de sellado y confirmación de etapa.....	60
Figura 41 Fin de ciclo y estado de espera (STEP 60→70).....	61
Figura 42 Control de faja transportadora por etapa.....	62
Figura 43 Control de válvula: grueso continuo y fino pulsado	63
Figura 44 Piloto de espera con parpadeo.....	63
Figura 45 Piloto de marcha (proceso en ejecución)	64
Figura 46 Piloto de paro (sistema deshabilitado)	64

Figura 47 Validación de setpoints y alarma de inconsistencia.....	65
Figura 48 Detección de flanco para conteo de recipientes	66
Figura 49 Conteo acumulado de recipientes y envío a IoT	66
Figura 50 Conversión y salida analógica de referencia de velocidad (FC3).....	67
Figura 51 Generación de pulso de tara/reset de peso desde HMI	68
Figura 52 Captura de offset de tara (referencia de cero)	68
Figura 53 Cálculo de peso neto y publicación a IoT	69
Figura 54 Auto-tara en condición de reposo del sistema	69
Figura 55 Replicación de sensores de estación hacia IoT	70
Figura 56 Estructura de bloques del proyecto en TIA Portal (FC1–FC3 y DB2 Node-RED).....	71
Figura 57 FC1 – Normalización y escalado de señal de pesaje (CONVERSION_PESO_VOLTAJE)	72
Figura 58 FC2 – Conversión del setpoint de sellado a tiempo PT (CONVERSION_NUMERICA)	73
Figura 59 FC3 – Conversión de consigna a referencia para salida analógica (CONVERSION_VOLTAJE_FRECUENCIA)	74
Figura 60 Estructura de pantallas del proyecto HMI.....	76
Figura 61 Asignación de Tag_ScreenNumber en evento Loaded	76
Figura 62 Pantalla PROCESO: supervisión general y mando del ciclo.....	77
Figura 63 Pantalla PESAJE: peso y consignas de corte (grueso/fino).....	78
Figura 64 Pantalla SELLADO: parametrización y estado del sellado	78
Figura 65 Pantalla ESTADO: resumen del estado del sistema y señales.....	79
Figura 66 Configuración de autorización y control del operador en botones ...	80
Figura 67 Pulsador momentáneo RESET_PESO_HMI (Press/Release)	80

Figura 68 Tabla de tags HMI vinculados al PLC (parte 1)	81
Figura 69 Tabla de tags HMI vinculados al PLC (parte 2)	81
Figura 70 Estructura del DB2 “NODE_RED” para enlace PLC–Node-RED... 83	
Figura 71 Publicación del estado ACTV_SISTEMA hacia el DB2 para supervisión en Node-RED	83
Figura 72 Conversión de consigna a salida analógica y envío de frecuencia a Node-RED (FC3).....	84
Figura 73 Flujo Node-RED para adquisición y distribución de variables del proceso.....	85
Figura 74 Lógica de registro de peso basada en evento y actualización de tabla (Node-RED)	86
Figura 75 Dashboard de supervisión del proceso en Node-RED (IoT2040)	87
Figura 76 Implementación completa en el laboratorio.....	90
Figura 77 Esquema de la conexión realizada	91
Figura 78 Conexión Macro Cn002	92
Figura 79 Conexión estrella realizada en el motor trifásico.....	93
Figura 80 Conexión del transmisor de peso CAS WTM-300	94
Figura 81 Programación que habilita y pone en marcha el sistema	96
Figura 82 Activación del sensor de llenado	97
Figura 83 Punto de corte grueso	98
Figura 84 Punto de corte fino	99
Figura 85 Temporización de Sellado.....	101
Figura 86 Fin de la secuencia entro en (Espera)	102
Figura 87 Pantallas de HMI.....	103
Figura 88 Pantalla de pesaje	104

Figura 89 Alarma por consignas de corte inválidas	105
Figura 90 Alarma enclavada por error sellado	106
Figura 91 Pantalla de estados	107
Figura 92 Flujo y Dashboard.....	108
Figura 93 Variables que se envía del PLC a la pasarela.....	109
Figura 94 Acceso remoto a la pasarela IOT2040 mediante SFTP (FileZilla). 111	
Figura 95 Ubicación del directorio de módulos de Node-RED en la pasarela 112	
Figura 96 Transferencia manual de módulos hacia node_modules.....	113
Figura 97 Fotografías de la implementación	114

Tabla

Tabla 1 Cableado de una celda de carga de 4 hilos	43
Tabla 2 Cronograma de actividades	115
Tabla 3 Presupuesto general del proyecto	116

1. INTRODUCCIÓN

La automatización de operaciones de envasado en la industria de lubricantes reviste especial relevancia debido a que las etapas de llenado, verificación por pesaje y sellado condicionan la conformidad del producto con especificaciones técnicas, así como la estabilidad del proceso y la trazabilidad de los lotes. En este sentido, la implementación de sistemas de control industrial permite estructurar el comportamiento del sistema mediante secuencias definidas, interbloqueos y criterios de validación, lo cual favorece la repetibilidad de la operación y una respuesta controlada ante desviaciones. Además, la incorporación de conectividad industrial orientada al tratamiento de datos se alinea con los enfoques actuales de digitalización, donde la supervisión y el registro de variables adquieren valor para la verificación, el análisis y la documentación del desempeño del proceso.

A partir de estas consideraciones, la presente tesis desarrolla el diseño y la simulación de un proceso automatizado para el llenado, pesaje y sellado de recipientes destinados a lubricantes industriales, integrando componentes de control, supervisión e intercambio de información. En primer lugar, se define una arquitectura basada en un Controlador Lógico Programable (PLC) como unidad principal para la adquisición de señales, el secuenciamiento del ciclo de operación y la ejecución de condiciones de seguridad y diagnóstico. De manera complementaria, se incorpora una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) que permite la interacción operativa mediante la visualización de estados, variables del proceso, alarmas y selección de modos de funcionamiento. Asimismo, se integra una pasarela Siemens IOT2040, concebida como un elemento de enlace para la publicación y gestión de datos hacia entornos externos, facilitando la observación del proceso y el soporte a esquemas de trazabilidad y monitoreo.

En consecuencia, el trabajo se orienta a la definición formal del ciclo de trabajo y de las estrategias de control asociadas, considerando transiciones entre estados, condiciones de arranque y paro, enclavamientos, manejo de eventos anómalos y validación del llenado mediante criterios de peso. De igual modo, la simulación se emplea como recurso metodológico para contrastar el funcionamiento de la lógica programada y la coherencia de la interacción hombre-máquina, permitiendo identificar inconsistencias y ajustar la secuencia de operación antes de una implementación física. Por tanto, la investigación culmina con una propuesta técnica documentada que describe el comportamiento del sistema, su estructura de control y supervisión, y los mecanismos de comunicación orientados a la integración de datos en un contexto industrial.

2. PROBLEMA

En la actualidad, la industria manufacturera global se encuentra en plena transición hacia la Industria 4.0, caracterizados por la automatización, la interconectividad entre máquinas y sistemas y la digitalización de procesos. Este paradigma Integrado por nuevas tecnologías, como el Internet de las Cosas, la inteligencia Artificial (Basco, Beliz, Coatz, & Garnero, 2018).

En Latinoamérica, la adopción de procesos completamente automatizados aún es limitada, lo que hace que muchas plantas operen bajo esquemas semiautomáticos donde el operario debe trasladar físicamente productos entre estaciones, lo cual incrementa errores humanos, retardos en la producción, desperdicio de materia prima, y limita la supervisión centralizada del proceso. Esta brecha se acentúa debido a la infraestructura tecnológica y a la carencia de procesos integrados plenamente digitalizados, lo cual reduce la visibilidad del flujo productivo y dificulta la recopilación de datos confiables para la mejora continua. Esta situación dificulta la transición hacia operaciones donde el llenado, pesaje y sellado se realicen de forma integrada y monitoreada (Rueda-Carvajal, 2025).

La industria ecuatoriana reconoce la importancia de la transformación digital. Sin embargo, su implementación aún se encuentra en una etapa inicial. En particular, los procesos de producción están mayormente semiautomatizados, lo cual afecta la trazabilidad, la intervención del operario sigue siendo significativa y la supervisión en tiempo real es reducida. La carencia de infraestructura, personal capacitado y estrategia organizativa son barreras importantes para la adopción plena de Industria 4.0 (Arturo Benavides-Rodríguez, 2025).

Ante esta situación, en la Carrera de Ingeniería Electrónica y Automatización de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil, se evidencia una limitación en las

asignaturas Automatización Industrial I y Automatización Industrial II, referente a la formación práctica de los procesos de llenado, pesaje y sellado aplicados a la automatización industrial. Frente a esta necesidad formativa, el diseño y la simulación de un proceso automatizado que integre dichas etapas se presentan como una alternativa académica fundamental, ya que permitirían a los estudiantes visualizar el comportamiento del sistema en tiempo real, analizar la lógica de operación correspondiente a cada etapa y fortalecer sus capacidades técnicas en el manejo de tecnologías propias de la Industria 4.0.

2.1. IMPORTANCIA DE LA PROBLEMÁTICA

La propuesta integra en un solo modelo las tres etapas importantes del proceso de producción, bajo el dominio de un PLC que gestiona la lógica de control, un HMI que facilita la supervisión local y la interacción del operador, y una pasarela IoT2040 que permite el envío y visualización de datos en tiempo real (Bobinados Castel, 2025).

Desde el punto de vista formativo, el proyecto también se justifica porque ofrece un caso de estudio aplicado a la realidad ecuatoriana, donde los estudiantes e ingenieros pueden comprender cómo migrar de esquemas semiautomáticos, con alta dependencia del operario, hacia sistemas más autónomos, interconectados y alineados con la transformación digital. La combinación de PLC, HMI e IoT en un mismo proyecto fortalece competencias en automatización, comunicaciones industriales y análisis de datos, habilidades indispensables para afrontar los retos de la Industria 4.0 en el país (López, 2024).

La intención de este trabajo radica en que el diseño y simulación propuestos abordan directamente el problema de baja integración, limitada trazabilidad y escaso monitoreo en tiempo real en procesos de llenado, pesaje y sellado de recipientes de lubricantes industriales. Al ofrecer una solución automatizada y digitalmente conectada, el proyecto no solo responde a una necesidad operativa actual, sino que también se constituye en un modelo de referencia para futuras implementaciones en plantas reales, contribuyendo a la modernización tecnológica y a la mejora de la competitividad del sector manufacturero ecuatoriano.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL.

Simular un proceso de llenado, pesaje y sellado de recipientes para lubricantes industriales mediante PLC y una interfaz HMI, integrando IoT2040 para la visualización y monitoreo en tiempo real.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Desarrollar la programación del proceso automatizado de llenado, pesaje y sellado de recipientes en el PLC.
- Diseñar una interfaz HMI para el control y parametrización del proceso de control automático.
- Desarrollar un dashboard mediante IoT2040 para la supervisión y análisis en tiempo real.
- Implementar el funcionamiento del PLC, HMI e IoT2040 en un módulo del Laboratorio de Automatización Industrial II.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1. PLC

Un Controlador Lógico Programable, es un dispositivo electrónico industrial destinado a la automatización y supervisión de procesos industriales. Funciona como la unidad central de control de los sistemas automatizados en planta, ejecutando decisiones lógicas en tiempo real para garantizar el funcionamiento seguro, coordinado y eficiente de máquinas y procesos productivos (IMEPI S.A., 2024).

4.1.1. PLC SIEMENS SIMATIC S7-1500

El SIMATIC S7-1500 se presenta como la plataforma de automatización central para entornos industriales modernos, ya que integra en un solo equipo funciones de control, supervisión y gestión de datos orientadas a la producción inteligente. Funciona con una tensión de alimentación de 24 V CC, con la cual energiza la CPU y los módulos de E/S, e incorpora una arquitectura de hardware compacta con pantalla frontal, conmutador PROFINET multipuerto, ranura para tarjeta de memoria y módulos enchufables que simplifican el cableado y el mantenimiento (USABIMANA, 2025).

Desde el punto de vista operativo, el S7-1500 dispone de procesadores de alta velocidad y amplia memoria, permitiendo tiempos de ciclo reducidos, ejecución de algoritmos complejos y control de movimiento directamente desde la CPU. Su programación se realiza en TIA Portal, donde se integran PLC, HMI, variadores y redes en una sola plataforma, y complementa su funcionamiento con diagnósticos avanzados, funciones de ciberseguridad y comunicación nativa mediante PROFINET y OPC UA, convirtiéndose en una base tecnológica clave para que los estudiantes comprendan la automatización moderna en el marco de la Industria 4.0 (USABIMANA, 2025).

Figura 1

PLC SIMATIC S7-1500



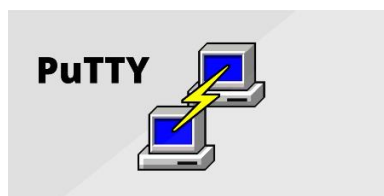
Nota. Tomado de (Xinje, 2024).

4.2. Putty

PuTTY se describe como un cliente de comunicaciones y emulador de terminal orientado, principalmente, a establecer sesiones interactivas de línea de comandos con equipos remotos mediante SSH (y, de forma adicional, mediante Telnet, Rlogin, conexiones “raw” TCP y también enlaces serie, según la configuración). En consecuencia, en entornos Windows se utiliza con frecuencia para la administración de servidores, equipos de red y plataformas embebidas, debido a que centraliza la apertura de sesiones remotas desde una interfaz ligera y configurable (Project PuTTY, 2025).

Figura 2

Putty



Desde una perspectiva funcional, PuTTY no se limita al ejecutable gráfico “putty.exe”, sino que forma parte de un conjunto de utilidades complementarias. Por ejemplo, la documentación oficial integra herramientas como PSCP y PSFTP para transferencia de

archivos de forma segura, Plink para conexiones por la línea de comandos (útil en automatización), PuTTYgen para generación y conversión de claves, y Pageant como agente de autenticación (gestión de llaves en memoria). Así, PuTTY se posiciona como una solución integral para operación remota basada en protocolos de acceso y transporte seguro (Project PuTTY, 2025).

En cuanto a su utilización básica, el flujo de trabajo habitual se estructura en etapas. En primer lugar, se recomienda obtener el instalador o binarios desde la página oficial de “latest release”, donde se publica la versión estable (por ejemplo, 0.83, liberada el 2025-02-08). Luego, al ejecutar PuTTY, se define la sesión indicando el host (nombre o IP), el puerto (típicamente 22 en SSH) y el tipo de conexión; posteriormente, se inicia la comunicación con “Open”. En el caso de SSH, se considera una práctica esperada verificar la clave del host en el primer contacto para reducir riesgos de suplantación; finalmente, se realiza el inicio de sesión con credenciales y, si aplica, se guarda el perfil para reutilizar la misma configuración en futuras conexiones (Tatham, 2025).

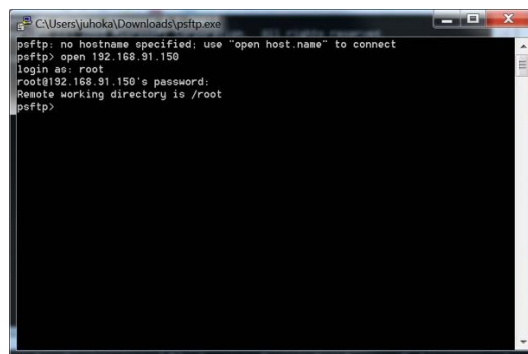
De manera complementaria, PuTTY permite un ajuste fino del canal de comunicación. Por consiguiente, se pueden parametrizar aspectos de terminal (comportamiento de teclado, codificaciones, scrollbar), habilitar registro (logging) de sesión para trazabilidad, definir proxy cuando el tráfico debe atravesar un intermediario, y configurar autenticación por clave pública (p. ej., generando llaves con PuTTYgen y gestionándolas con Pageant). Asimismo, el cliente contempla capacidades como reenvío X11 y port forwarding en SSH, además de la conexión a líneas seriales cuando el objetivo es interactuar con consolas de dispositivos industriales o de red (Tatham, 2025).

Finalmente, dado que PuTTY opera en el perímetro de acceso remoto, su uso técnico se apoya en consideraciones de seguridad y mantenimiento. En efecto, el proyecto publica un

registro de cambios donde se evidencian correcciones y mejoras, incluidas actualizaciones de seguridad; por ejemplo, se documentan mitigaciones asociadas a vulnerabilidades como CVE-2024-31497 (relacionada con firmas ECDSA P-521 en versiones previas a 0.81), lo cual refuerza la necesidad de mantener el software en versiones soportadas. En paralelo, la elección de protocolo resulta determinante: mientras SSH aporta confidencialidad e integridad, alternativas como Telnet carecen de cifrado, por lo que su uso suele restringirse a entornos controlados o propósitos específicos (Project, PuTTY Documentation Page, 2025).

Figura 3

Interfaz de Putty



Nota. Tomado de (SSH ACADEMY, 2025).

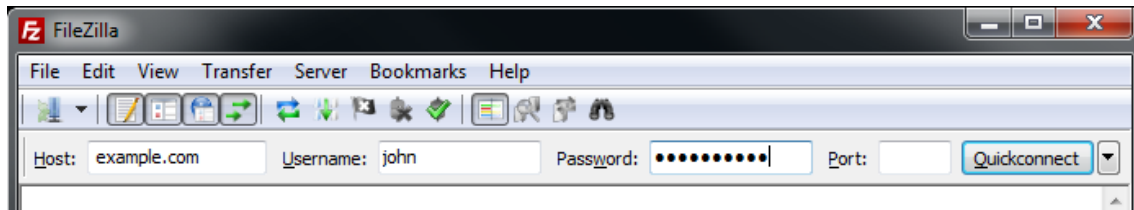
4.3. FileZilla

FileZilla (en particular, FileZilla Client) se caracteriza como una herramienta de transferencia de archivos orientada a establecer comunicación entre un equipo local y un servidor remoto para subir, descargar y administrar directorios de manera estructurada. En consecuencia, su uso es habitual en actividades de despliegue y mantenimiento de contenidos (p. ej., sitios web), ya que permite navegar por el árbol de carpetas remoto y ejecutar operaciones de transferencia de forma controlada. De forma adicional, el cliente contempla servidores “especiales” como SFTP y conexiones cifradas (FTPS), que se seleccionan explícitamente al indicar el protocolo de conexión (FileZilla, 2023).

En cuanto al uso operativo, se observa en la Figura 4 el flujo típico que se ejecuta por etapas. En primer lugar, se inicia una conexión rápida mediante la barra Quickconnect, ingresando el host, usuario, contraseña y, si aplica, el puerto. Luego, cuando se trata de un servidor SFTP o FTPS, se antepone el esquema correspondiente en el host (p. ej., sftp:// o ftps://) para que el cliente interprete correctamente el tipo de servicio; además, se consideran los puertos por defecto (21 para FTP y 22 para SFTP) cuando no existe una configuración distinta. Posteriormente, al conectarse, el listado de archivos remoto se presenta en el panel derecho y el local en el panel izquierdo, permitiendo transferencias por arrastrar y soltar o mediante acciones contextuales. Finalmente, si se busca reutilización y estandarización, la conexión activa puede copiarse al Site Manager para reconectar sin reescribir parámetros (FileZilla, 2023).

Figura 4

Uso de la barra de conexión rápida



Nota. Tomado de (FileZilla, 2023).

Dado que FileZilla opera en el perímetro de intercambio de información, su empleo técnico se vincula con prácticas de seguridad y actualización. En efecto, cuando se utiliza SFTP (basado en SSH), se han documentado escenarios donde versiones anteriores a ciertos umbrales pueden verse afectadas por vulnerabilidades criptográficas; por ejemplo, CVE-2024-31497 señala impacto en FileZilla antes de 3.67.0 bajo condiciones específicas asociadas a claves ECDSA P-521, lo que refuerza la necesidad de mantener versiones corregidas y revisar el uso de claves. De manera complementaria, también se ha reportado CVE-2022-29620 (marcada como disputed) respecto a la exposición de contraseñas en texto claro mediante volcados de memoria en una versión específica, lo cual subraya la importancia de proteger el entorno anfitrión (controles de acceso, endurecimiento del sistema y manejo prudente de credenciales), además de preferir canales cifrados frente a transferencias sin protección (Database, 2025).

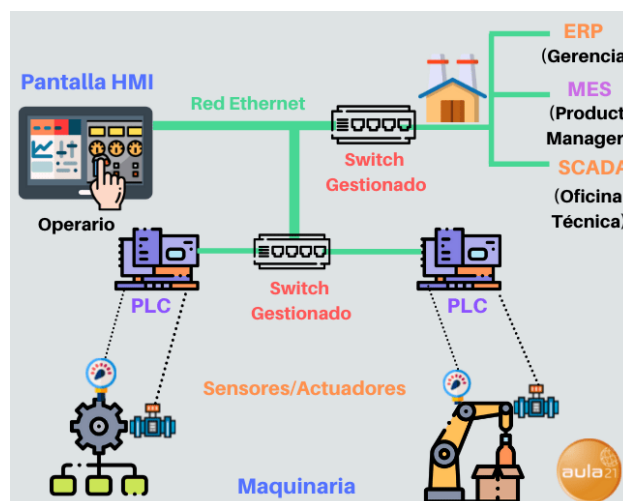
4.4. HMI

Human Machine Interface por sus siglas HMI; se entiende como el dispositivo o pantalla mediante el cual el operario interactúa con una máquina o con un proceso industrial, permitiendo supervisar y controlar en tiempo real variables como temperatura, presión, caudal o velocidad de producción. En el ámbito industrial, suele presentarse como pantallas táctiles o consolas de monitoreo remoto que muestran de forma gráfica el estado del sistema (Aula 21, 2020).

Estas interfaces se comunican habitualmente con los PLC, mostrando el estado de entradas, salidas y alarmas, lo que facilita a los estudiantes y técnicos la comprensión del comportamiento de la máquina y el diagnóstico de fallas. De este modo, el HMI se convierte en una herramienta fundamental para visualizar datos de proceso, seguir tiempos de producción, supervisar indicadores clave de desempeño KPI y apoyar el mantenimiento y la operación segura de los sistemas automatizados (Aula 21, 2020).

Figura 5

Ejemplo de Diagrama de un HMI.



Nota. Tomado de (Aula 21, 2020).

4.4.1. Pantalla HMI Modelo: KTP-700 Basic

El panel HMI SIMATIC KTP700 Basic que se observa en la Figura 3 dispone de una pantalla TFT de 7 pulgadas con resolución de 800×480 píxeles y visualización en color, diseñada para aplicaciones de supervisión básica. Internamente trabaja con un procesador tipo ARM y ofrece alrededor de 10 MB de memoria utilizable para proyecto y datos de usuario, además de memoria para recetas. En cuanto a comunicación, incorpora hasta tres puertos RS422/RS485 y USB, y según la versión, interfaz PROFIBUS DP o PROFINET para su integración con PLC SIMATIC. Su tensión nominal de alimentación es de 24 VDC, con un rango típico de 19,2V a 28,8 V, y el frontal presenta un grado de protección IP65, lo que le otorga resistencia al polvo y a chorros de agua en condiciones industriales exigentes (Siemens AG, 2025).

Figura 6

Pantalla HMI marca Siemens



Nota. Tomado de (Siemens AG, 2025).

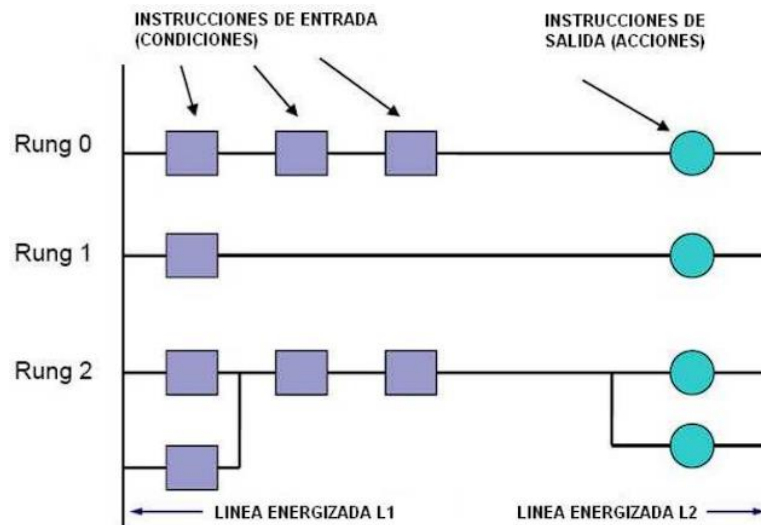
4.5. Lenguaje de programación Ladder o escalera KOP

El lenguaje de programación en escalera “Ladder Diagram” constituye uno de los métodos más empleados para la programación de PLC, ya que representa los circuitos de control mediante símbolos gráficos similares a los esquemas eléctricos tradicionales. Su estructura se basa en dos rieles verticales que simbolizan la alimentación y en una serie de líneas horizontales llamadas “escalones” o “rungs”, sobre las cuales se disponen contactos e instrucciones, construyendo así la secuencia lógica del programa (Alvarado, 2022).

Como se aprecia en la Figura 4, la lectura y ejecución de la lógica se realiza de izquierda a derecha. En el lado izquierdo se ubican las entradas, en general representadas por contactos normalmente abiertos (NO), cuando se desea que la corriente no circule hasta que se active la condición, o contactos normalmente cerrados (NC), cuando se requiere que la corriente circule por defecto y se interrumpa al activarse la condición. Las salidas se sitúan en el extremo derecho del escalón y se ejecutan únicamente si las condiciones de entrada establecidas en la parte izquierda se cumplen, lo que permite a los estudiantes visualizar de forma clara cómo las señales de entrada gobiernan el comportamiento de los actuadores en un sistema automatizado (Alvarado, 2022).

Figura 7

Descripción de Lógica Ladder



Nota. Tomada de (Alvarado, 2022).

4.6. Motor eléctrico trifásico

Un motor eléctrico tiene como finalidad transformar energía eléctrica en energía mecánica de giro. Su principio de funcionamiento se sustenta en la Ley de Lorentz, la cual establece que un conductor por el que circula corriente eléctrica, al ubicarse dentro de un campo magnético, experimenta una fuerza que genera un movimiento rotacional sobre el rotor. De esta manera, el motor produce trabajo mecánico aprovechable en diferentes aplicaciones. Este tipo de máquinas puede operar alimentado tanto con corriente continua (CC) como con corriente alterna (CA), lo que amplía su uso en diversos sistemas industriales y de automatización (Promelsa, 2023).

Un motor de inducción, como el representado en la Figura 5, corresponde a una máquina eléctrica de corriente alterna (AC) de tipo asincrónico, cuya operación se basa en la interacción de dos componentes principales. El estator se encarga de recibir la corriente alterna y generar un campo magnético giratorio, mientras que el rotor, dispuesto en el interior de dicho campo, es inducido por este fenómeno electromagnético. Como resultado, en el

rotor se produce una fuerza magnética que origina el movimiento de rotación, permitiendo la conversión de energía eléctrica en energía mecánica (Risoul, 2023).

Figura 8

Motor eléctrico de inducción



Nota. Tomado de (Sensoricx, 2024).

4.6.1. Arranque directo

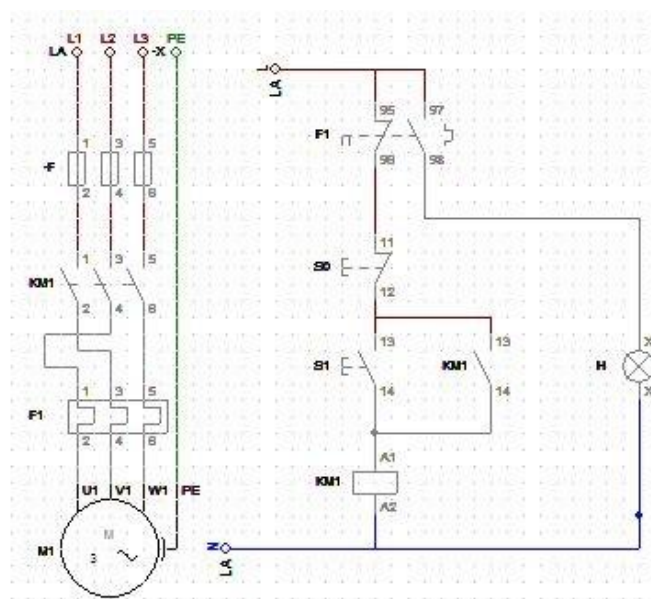
Es uno de los métodos más utilizados en la industria debido a su simplicidad de implementación y reducido costo. Este tipo de arranque se basa en la conexión directa del motor a la red eléctrica mediante un contactor, acompañado generalmente por dispositivos de protección como fusibles y relés térmicos (Caputo, 2022).

En un arranque directo al no existir elementos que limiten la tensión aplicada al motor durante el inicio de la operación, se produce una corriente inicial elevada, que puede alcanzar varias veces el valor de la corriente nominal. Esta condición permite obtener un par de arranque alto, suficiente para poner en funcionamiento cargas mecánicas simples; sin embargo, también genera esfuerzos eléctricos y mecánicos significativos tanto en el motor como en los componentes asociados al sistema. Asimismo, la parada del motor bajo este esquema se realiza de forma libre, sin control progresivo de desaceleración, lo que puede

ocasionar impactos mecánicos en determinadas aplicaciones. Por estas características, el arranque directo resulta adecuado principalmente para motores de baja y media potencia y para procesos donde las exigencias de control y suavidad de operación no son críticas, siendo reemplazado en aplicaciones más complejas por métodos de arranque controlados (Caputo, 2022).

Figura 9

Arranque directo de un motor trifásico



Nota. Tomado de (Figuerola, 2021).

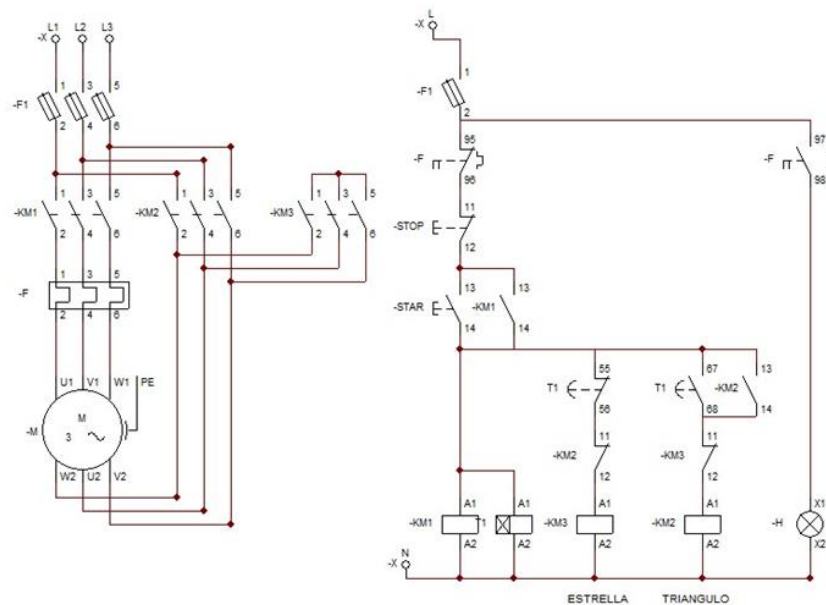
4.6.2. Arranque estrella-triángulo

El arranque estrella-triángulo es un método de arranque de motores trifásicos que permite reducir la intensidad de corriente durante el arranque del motor. En este método el motor arranca inicialmente con los bobinados conectados en configuración estrella, lo que reduce la tensión aplicada a cada devanado a un tercio de la tensión de línea, es decir, disminuye significativamente la corriente de arranque (Delgado, 2025).

Una vez que el motor alcanza una velocidad próxima a su régimen de trabajo, se conmuta la conexión de los bobinados a la configuración en triángulo, permitiendo al motor operar con la tensión nominal completa y con un par mayor. Esta transición entre las dos configuraciones se logra mediante un sistema de control que utiliza contactores y temporizadores, y está especialmente destinado a motores de potencia media y alta donde se requiere limitar la corriente inicial sin recurrir a métodos más complejos o costosos. El uso de este tipo de arranque ayuda a proteger tanto la instalación eléctrica como el propio motor, al reducir los esfuerzos térmicos y mecánicos que se generan durante el inicio del movimiento, favoreciendo además una mayor estabilidad del sistema de alimentación eléctrica (Delgado, 2025).

Figura 10

Arranque estrella-triángulo de un motor trifásico



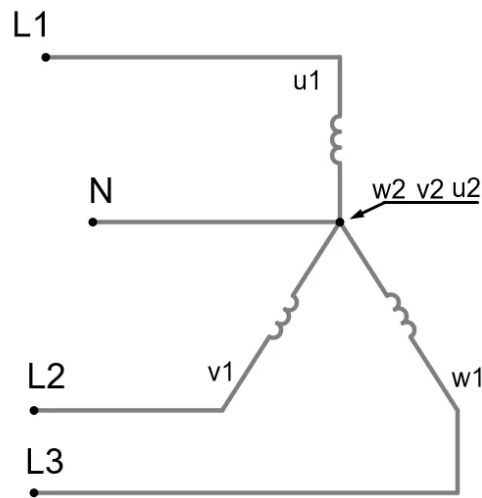
Nota. Tomado de (Santoyo, 2020).

4.6.2.1. Conexión en estrella.

La conexión en estrella (Y) es una forma de interconexión de los devanados de un motor trifásico en la cual los extremos de cada bobinado se unen en un punto común, conocido como punto neutro, mientras que los otros extremos se conectan a las fases del sistema eléctrico. Esta configuración hace que cada bobinado reciba una tensión menor en comparación con la tensión entre fases, dado que la tensión de fase es aproximadamente $1/\sqrt{3}$ de la tensión de línea. Como resultado, al aplicar esta configuración durante el arranque, la corriente inicial del motor disminuye, lo que reduce los picos de corriente en la red y limita las exigencias eléctricas sobre el motor y los elementos de protección (Joseph, 2025).

Figura 11

Conexión tipo Estrella



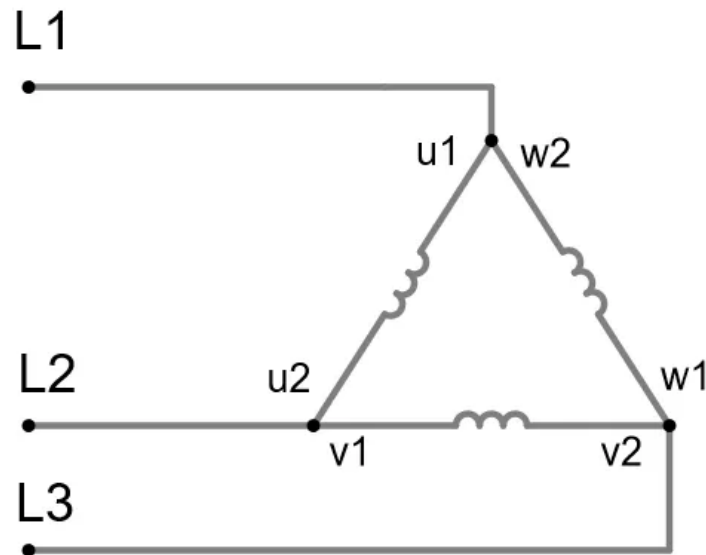
Nota. Tomado de (SIHMA, 2024)

4.6.2.2. Conexión en triángulo.

Es otra forma de interconexión de los devanados en sistemas trifásicos, en la que los extremos y comienzos de los bobinados se conectan de forma secuencial, formando un bucle cerrado que se asemeja a un triángulo. En esta configuración no existe un punto neutro, por lo que cada bobinado está sometido directamente a la tensión de línea, permitiendo al motor desarrollar su potencia y par nominales. Esta característica hace que la conexión en triángulo sea adecuada para la operación normal del motor, ya que asegura que las bobinas reciban la máxima tensión y, por ende, que el motor pueda entregar la potencia requerida por la carga (Joseph, 2025).

Figura 12

Conexión tipo Delta



Nota. Tomado de (SIHMA, 2024)

4.7. IoT Industrial

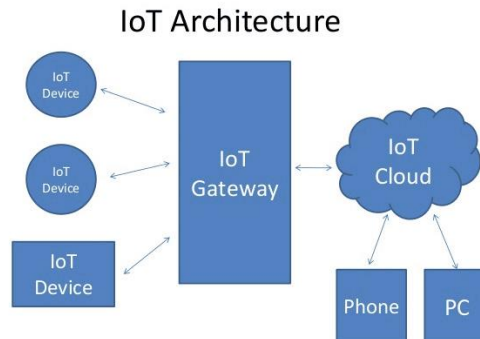
El término IoT industrial “IIoT” hace referencia a las soluciones de Internet de las Cosas específicamente desarrolladas para entornos productivos, como almacenes, fábricas y plantas de manufactura. En estos contextos, es indispensable disponer de una comunicación compleja y continua entre múltiples dispositivos y sistemas, con el fin de agilizar, automatizar y supervisar los procesos industriales en tiempo real (Duò, 2025).

A través del IIoT, los equipos pueden monitorear a distancia la calidad, eficiencia y estado de los componentes físicos de la maquinaria, así como el desempeño de los flujos de trabajo mecánicos. De igual manera, permite analizar la productividad de los procesos y sistemas, identificar cuellos de botella y evaluar los costes de fabricación, el consumo de recursos y el nivel de desperdicio, proporcionando información clave para la toma de decisiones y la mejora continua en el entorno industrial (Duò, 2025).

El Internet de las Cosas (IoT) se compone de cuatro elementos que trabajan de forma conjunta: sensores, que captan datos del entorno; conectividad, que permite enviar esa información a la nube u otros sistemas mediante tecnologías como WiFi, Bluetooth, redes celulares, satélite, LPWAN o Ethernet; procesamiento de datos, donde una aplicación recopila, gestiona y analiza la información, desde tareas simples como registrar temperaturas hasta procesos complejos como interpretar mensajes de voz; e interfaz de usuario, que muestra los datos de manera comprensible y permite al usuario visualizar la información en tiempo real, configurar alertas y ajustar el funcionamiento de los dispositivos, facilitando así la comprensión y el control de sistemas IoT en contextos académicos e industriales (Duò, 2025).

Figura 13

Arquitectura de IoT



Nota. Tomado de (Duò, 2025).

4.7.1. Pasarela Siemens IoT-2040

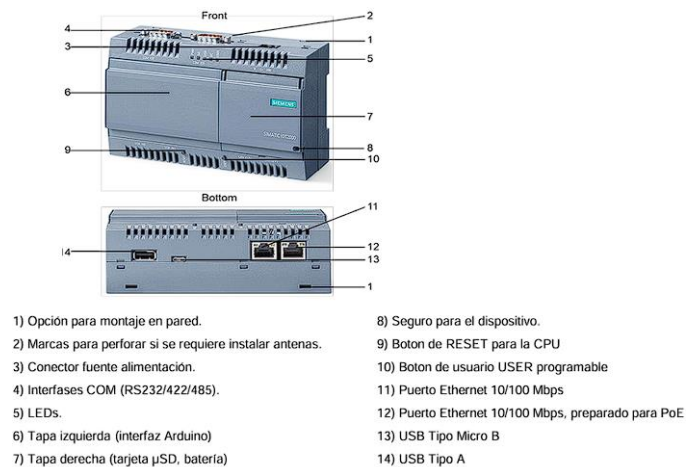
La pasarela SIMATIC IOT2040 se presenta como un gateway industrial programable diseñado para conectar el nivel de automatización “sensores, actuadores, PLC, variadores” con sistemas IT y plataformas en la nube dentro de proyectos de IIoT. Incorpora una CPU Intel Quark x1020 a 400 MHz, 1 GB de memoria RAM DDR3 y memoria FLASH interna, además de ranura para tarjeta microSD como almacenamiento masivo. Para la comunicación

dispone de dos puertos Ethernet 10/100 Mbps, interfaces serie RS232/RS485 conmutables y puertos USB, todo ello en una carcasa robusta para montaje en riel DIN, alimentada entre 9 y 36 V y preparada para operación 24/7 en entornos industriales. También permite ampliación mediante shields Arduino y ranura mPCIe, lo que facilita la conexión de módulos de radio “WLAN, LTE” y módulos de E/S adicionales (Siemens, 2021).

La IOT2040 está pensada para recoger y concentrar datos de producción desde distintas fuentes, realizar preprocesamiento y conversión de protocolos y, posteriormente, enviar esa información de forma segura a sistemas IT o a la nube mediante tecnologías como OPC UA, MQTT o AMQP. Se apoya en sistemas operativos Linux embebidos; por ejemplo, Yocto/Industrial OS y en lenguajes de alto nivel como C/C++, Java o Python, así como en herramientas open-source tipo Node-RED, lo que permite a los estudiantes desarrollar aplicaciones de mantenimiento predictivo, monitorización de energía, analítica de datos y enlace entre ERP y planta sin modificar el control original de la línea de producción (Siemens, 2021).

Figura 14

Interfaces externos IoT2040



Nota. Tomada de (Siemens, 2021).

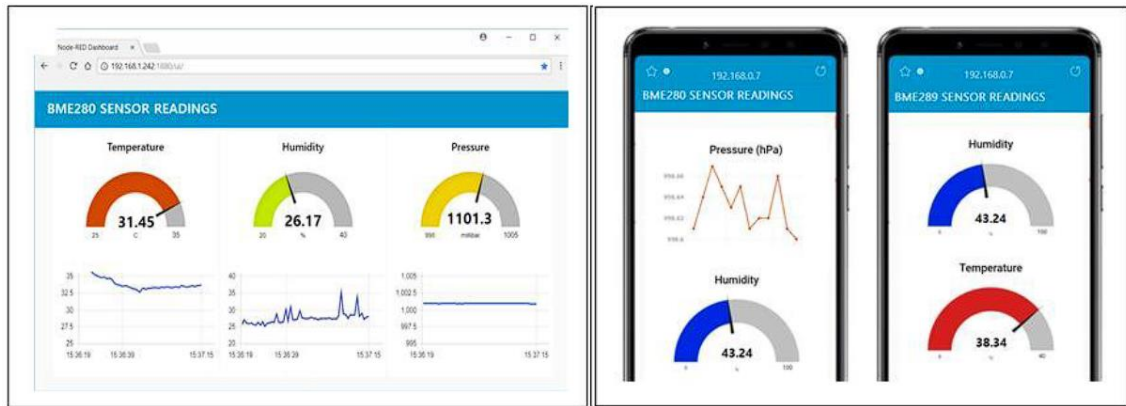
4.8. Node-Red

Node-RED es una plataforma de desarrollo visual de código abierto orientada a la creación de aplicaciones para el Internet de las Cosas. Se basa en un modelo de programación por flujos, en el que la lógica de la aplicación se construye enlazando nodos que representan distintas funciones. Cada nodo ejecuta una tarea específica, como la adquisición de datos desde un sensor, su transformación o el envío de la información hacia una base de datos u otro servicio. Estos nodos pueden configurarse y adaptarse con facilidad, y es posible desarrollar nuevos nodos personalizados mediante JavaScript, lo que brinda flexibilidad para abordar diferentes requerimientos de automatización y monitoreo (ONWUEGBUZIE, 2024).

Una de las principales ventajas de Node-RED es su interfaz gráfica sencilla e intuitiva, que permite diseñar, modificar y probar flujos de datos de forma rápida, convirtiéndolo en una herramienta muy adecuada para prototipado y experimentación en IoT. La plataforma soporta múltiples protocolos y formatos de comunicación, entre ellos MQTT, HTTP y JSON, lo que facilita la integración con una gran variedad de dispositivos y servicios en la nube. Además, dispone de una amplia biblioteca de nodos predefinidos para trabajar con bases de datos, servicios web y dispositivos IoT (sensores y actuadores), permitiendo construir soluciones completas sin necesidad de programar todo desde cero (ONWUEGBUZIE, 2024).

Figura 15

Node-Red Dashboard para computadora y celular smartphone



Nota. Tomado de (ONWUEGBUZIE, 2024).

4.9. Indicador de peso CAS modelo WTM-300

El modelo CAS WTM-300 es un transmisor de peso para montaje en riel DIN que recibe la señal de una o varias celdas de carga y la convierte en salidas normalizadas, tanto analógicas; por ejemplo 4–20 mA o 0–10 V como digitales mediante RS-485, para su integración con PLC y sistemas de control. Opera con alimentación de 12–24 VDC, incorpora excitación de 5 V para las celdas, un convertidor A/D de alta resolución y una velocidad de hasta 300 mediciones por segundo, lo que le proporciona precisión y respuesta rápida en aplicaciones de pesaje. Además, dispone de pantalla LED, teclas de configuración, entradas lógicas y salidas de relé, lo que facilita la calibración y el ajuste de parámetros, convirtiéndolo en un equipo didáctico para comprender el acondicionamiento y transmisión de señales de pesaje en automatización industrial (CAS, 2012).

Figura 16

Indicador de peso CAS modelo WTM-300



4.9.1. Principio de funcionamiento

En primer lugar, el funcionamiento del WTM-300 se fundamenta en la calibración teórica, donde se ingresan parámetros críticos del sistema de pesaje, tales como la sensibilidad (SEnSIb) de la celda en mV/V y el fondo de escala (FS-tEO) definido por la capacidad nominal del sensor y el número de celdas instaladas. De este modo, el equipo establece una relación cuantitativa entre la señal del puente extensométrico y la carga aplicada, garantizando coherencia entre la lectura mostrada y la respuesta del transductor. Posteriormente, la división o resolución (dIVS) determina el incremento mínimo de peso que se presenta en pantalla, por lo que el número de decimales observados es consecuencia directa de la resolución seleccionada y no de un ajuste independiente del “punto decimal”. Finalmente, el equipo dispone de recursos complementarios, como la visualización de la señal en mV y la conmutación bruto/neto, que permiten verificar el estado del sistema antes de utilizar el dato en control (CAS, 2012).

Figura 17

Programación de parámetros del sistema

PROGRAMMING OF SYSTEM PARAMETERS

From the weight display, press simultaneously keys **←** and **X** to access the parameter setting.

← : to enter a menu/confirm the data entry.
▲ : to modify the displayed value or menu item.
◀ : to select a new value or modify the displayed menu item.
X : to cancel and return to the previous menu.

THEORETICAL CALIBRATION

This function allows the load cell rated values to be set.

To perform the theoretical calibration set the following parameters in sequence:

- **FS-tED** (Default: **dE70**): The **system full scale** is given by one cell capacity multiplied by the number of cells used. Example of system full scale value calculation: 4 cells of 1000kg → FULL SCALE = 1000 X 4 = 4000. The instrument is supplied with a theoretical full scale value **dE70** corresponding to 10000. To restore factory values, set 0 as full scale.
- **5E751 b** (Default: 2.00000 mV/V): **Sensitivity** is a load cell rated parameter expressed in mV/V. Set the average sensitivity value indicated on the load cells. It's possible to set a value between 0.50000 and 7.00000 mV/V. Example of 4-cell system with sensitivity: 2.00100, 2.00150, 2.00200, 2.00250; enter 2.00175, calculated as (2.00100 + 2.00150 + 2.00200 + 2.00250) / 4.
- **dI U 5**: The **division** (resolution) is the minimum weight increment value which can be displayed. It is automatically calculated by the system according to the performed calibration, so that it is equal to 1/10000 of full scale. It can be changed and be variable between 0.0001 and 100 with x1 x2 x5 x10 increments.

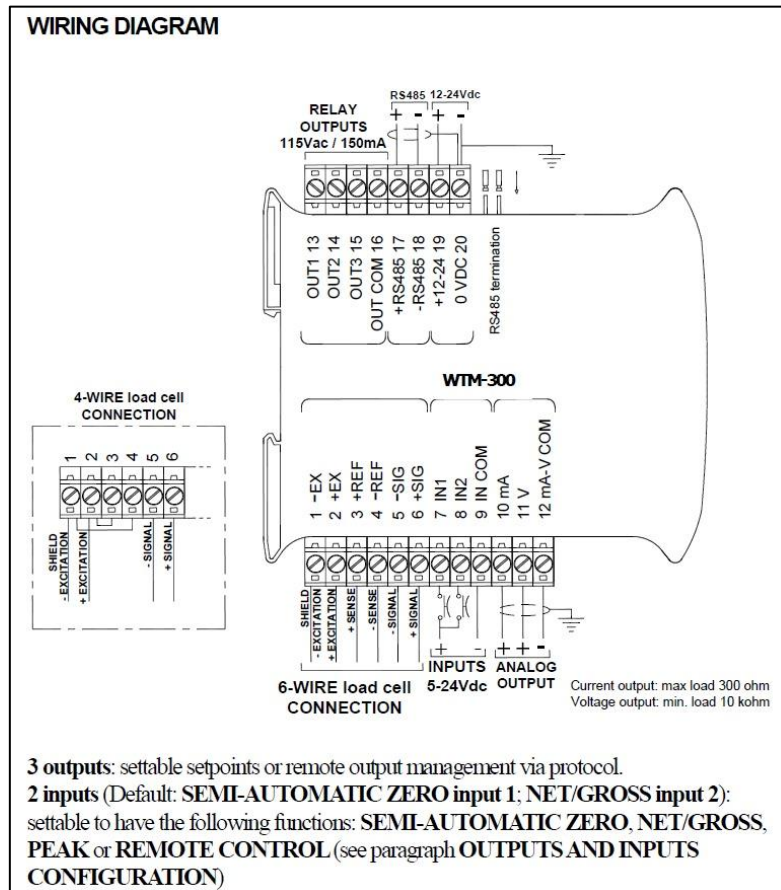
Nota. Tomado de (CAS, 2012).

La Figura 18 presenta el esquema de cableado del transmisor/indicador CAS WTM-300, evidenciando que el equipo centraliza la alimentación en 12–24 VDC, la comunicación RS-485 y las salidas a relé OUT1–OUT3 con su común (COM) en la bornera superior; en consecuencia, dichas salidas pueden emplearse para gestión de setpoints o maniobras remotas. Asimismo, en la bornera inferior se detalla la conexión de la celda de carga mediante bornes de excitación (EX±) y señal (SIG±), incorporando además líneas REF± para configuración de 6 hilos, mientras que para 4 hilos se simplifica el conexionado. Por otra parte, se incluyen dos entradas digitales (IN1, IN2) con su común, configurables para funciones como cero semiautomático o conmutación neto/bruto, y, adicionalmente, se dispone de salida analógica en corriente (mA) o voltaje (V) con COM, definiendo condiciones de carga típicas (máxima para corriente y mínima para voltaje), lo cual permite

la integración directa con PLC/HMI manteniendo la compatibilidad eléctrica del lazo de medición (CAS, 2012).

Figura 18

Diagrama para el cableado del módulo



Nota. Tomado de (CAS, 2012).

4.9.2. Procedimiento de calibración

En primer término, la calibración se inicia estableciendo la configuración teórica, ingresando el valor de sensibilidad de la celda (mV/V), el fondo de escala del sistema (FS-tEO) y la división (dIVS), con el propósito de asegurar que la conversión señal–peso sea consistente con el montaje. A continuación, se realiza el ajuste de cero (Tare Weight Zero Setting) para compensar el peso de la estructura vacía, estabilizando el punto de referencia del sistema y reduciendo offsets derivados del montaje mecánico. Posteriormente, cuando se requiere mayor exactitud, se ejecuta la calibración real con pesas patrón, en la cual el equipo

corrige desviaciones del valor indicado respecto a una carga conocida; adicionalmente, si el proceso exige una mejor linealidad, puede aplicarse una calibración multipunto utilizando diferentes cargas de referencia. En consecuencia, el conjunto queda ajustado para operar con mayor precisión dentro del rango de trabajo del proyecto (CAS, 2012).

Figura 19

Indicaciones para calibrar el módulo

<p>MAXIMUM CAPACITY</p> <p>000000 ← X [CALIB] ← [FS-EED] ← [TARE] ← [0.00] ← 20000</p> <p>NOTE: Maximum displayable weight (from 0 to max full scale; default: 0). When the weight exceeds this value by 9 divisions the following is displayed ' '. To disable this function, set 0.</p> <p>TARE WEIGHT ZERO SETTING</p> <p>000000 ← X [CALIB] ← [FS-EED] ← [TARE] ← 0.00 →</p> <p>→ 0 ←</p> <p>000000 X 3 sec → [TARE]</p> <p>This menu may also be accessed directly from the weight display, holding down the X key for 3 seconds.</p>	<p>ZERO VALUE MANUAL ENTRY</p> <p>000000 ← X [CALIB] ← [FS-EED] ← [TARE] ← 1.100 ←</p> <p>WARNING: Perform this procedure only if it's not possible to reset the weighed structure tare, for example because it contains product that can not be unloaded.</p> <p>REAL CALIBRATION (WITH SAMPLE WEIGHTS)</p> <p>000000 ← X [CALIB] ← [FS-EED] ← [TARE] ← 1499 →</p> <p>→ 1500 ←</p> <p>After having performed the THEORETICAL CALIBRATION and TARE WEIGHT ZERO SETTING, this function allows correct calibration to be done using sample weights of known value, if necessary, any deviations of the indicated value from the correct value to be corrected.</p>
--	---

Nota. Adaptado de (CAS, 2012).

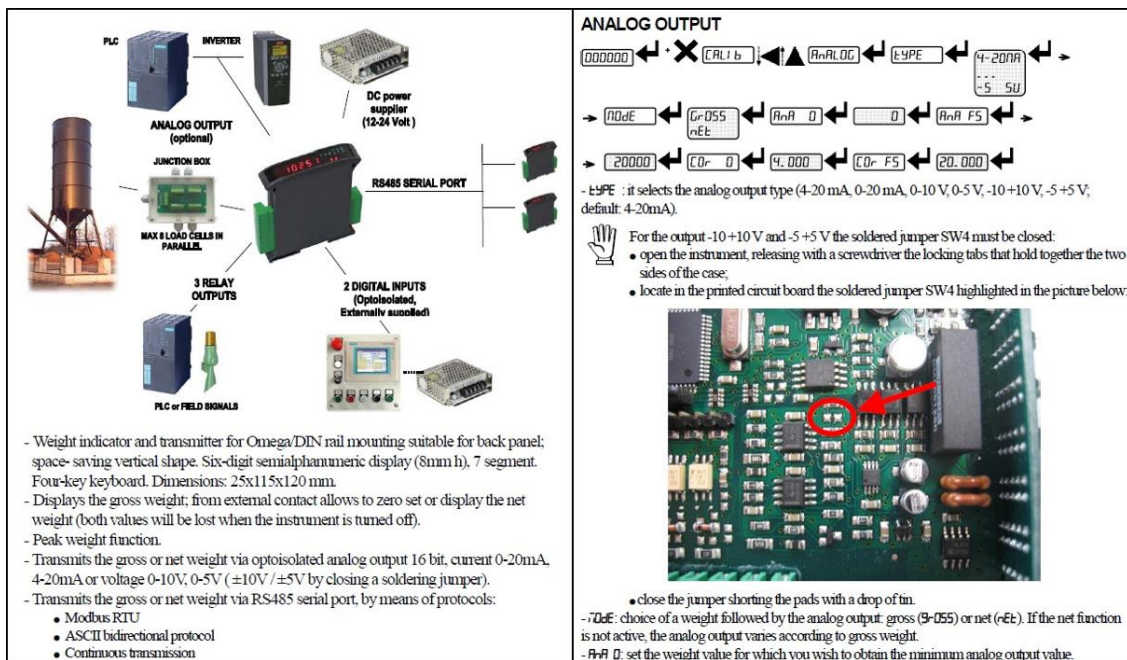
4.9.3. Intergación con PLC y HMI

En un sistema automatizado, el WTM-300 facilita la integración al proporcionar un valor de peso estable que puede ser utilizado por el PLC en decisiones de control y supervisado desde el HMI. En consecuencia, el transmisor permite que la variable de masa se incorpore a la lógica secuencial del proceso (por ejemplo, etapas de transporte, llenado y sellado), habilitando condiciones de corte y validaciones de estabilidad sin exigir que el PLC realice directamente el acondicionamiento metrológico de la señal mV/V. Asimismo, al contar con diagnóstico local (visualización directa y funciones de verificación), se mejora la puesta en marcha, ya que el operador puede contrastar el valor mostrado por el transmisor con el valor procesado por el PLC/HMI durante pruebas y comisionamiento. Por otra parte, la resolución (dIVS) y los filtros de lectura permiten ajustar la estabilidad del dato para evitar oscilaciones visuales o falsas conmutaciones en el control (CAS, 2012).

La Figura 20 muestra que el WTM-300 se inserta como interfaz entre la celda de carga y el sistema de automatización, ya que recibe la señal del sensor y, en consecuencia, entrega al PLC/HMI una variable de peso a través de salida analógica (corriente o voltaje). Asimismo, se evidencia la presencia de 3 salidas a relé para eventos de control (p. ej., setpoints) y 2 entradas digitales para funciones como cero semiautomático o conmutación neto/bruto, lo cual facilita la interacción con el proceso. Por otra parte, el panel derecho resume la parametrización del tipo de salida analógica (p. ej., 4–20 mA u 0–10 V) y señala que, para ciertos rangos de voltaje, puede requerirse el cierre de un jumper interno (SW4), asegurando compatibilidad eléctrica con el módulo analógico del PLC (CAS, 2012).

Figura 20

Integración del WTM-300 con PLC/HMI mediante salida analógica y E/S auxiliares



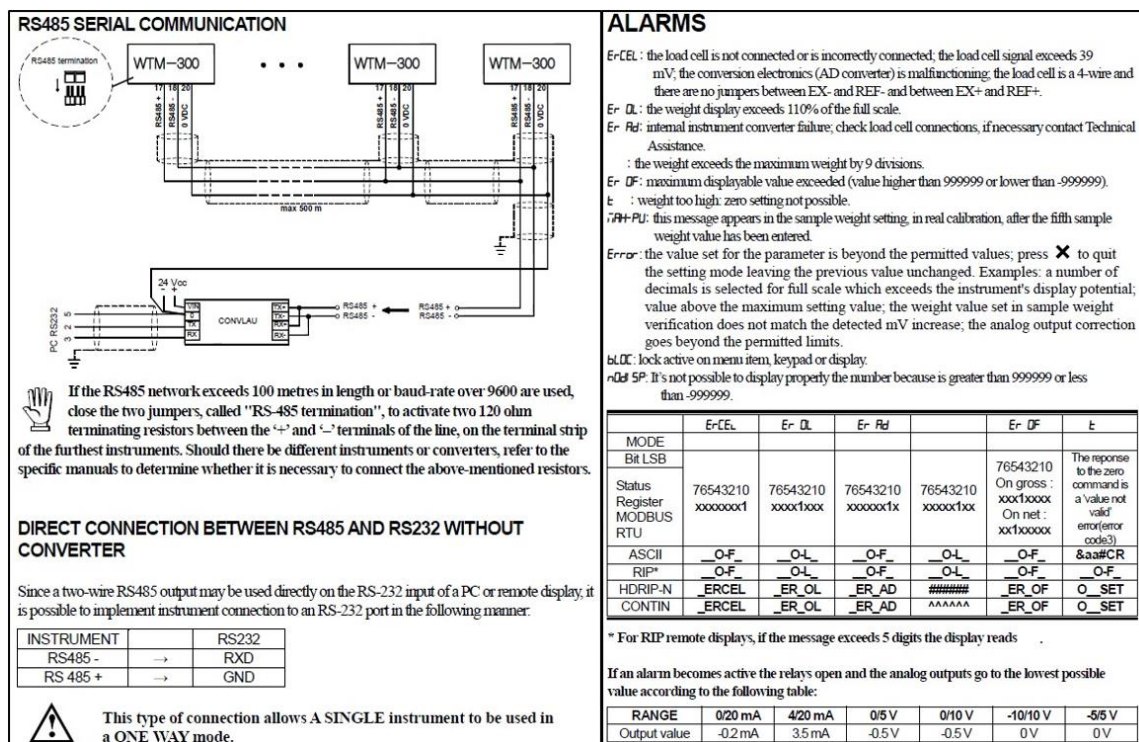
Nota. Adaptado de (CAS, 2012).

La Figura 21 se presenta la topología de comunicación RS485 del WTM-300, destacando que puede operar en red tipo bus con varios equipos y, en consecuencia, requerir terminación (resistencias) cuando la distancia o la velocidad de transmisión lo demanden para

conservar la integridad de la señal. Adicionalmente, se ilustra un esquema de conexión directa RS485–RS232 para un único instrumento (caso particular) y, por otro lado, se listan alarmas relevantes para la integración, tales como sobrecarga (ER_OL) o fallas de celda/conversión. En este sentido, el documento indica que, cuando una alarma se activa, los relés se abren y la salida analógica cae al valor mínimo, lo cual impacta directamente la lectura del PLC/HMI y debe considerarse en la lógica de diagnóstico y seguridad del proceso (CAS, 2012).

Figura 21

Comunicación RS485 para supervisión digital y comportamiento ante alarmas



Nota. Adaptado de (CAS, 2012).

4.9.4. Justificación de selección

La elección del WTM-300 se justifica porque concentra en un solo dispositivo las funciones que, de otro modo, requerirían instrumentación adicional o procedimientos más complejos de acondicionamiento. En primer lugar, su capacidad de parametrizar sensibilidad (mV/V), escala y resolución permite adaptar el sistema de pesaje al rango real de operación,

lo cual resulta especialmente relevante cuando se trabaja con una celda de alta capacidad y se utiliza solo una fracción del rango útil. En segundo lugar, la disponibilidad de ajuste de cero y calibración real con pesas patrón favorece la exactitud operativa en condiciones de montaje reales, mejorando la repetibilidad del proceso. Finalmente, al entregar una variable de peso estable, verificable y compatible con la automatización, el WTM-300 aporta trazabilidad de configuración, reduce tiempos de puesta en marcha y fortalece la confiabilidad de la etapa de pesaje dentro del sistema de llenado–pesaje–sellado.

4.10. Celdas de carga

Las celdas de carga se entienden como transductores electromecánicos cuya función es convertir una fuerza o peso aplicado en una señal eléctrica proporcional. Para ello, integran galgas extensiométricas adheridas a un elemento elástico diseñado para deformarse de forma controlada dentro del régimen elástico. En consecuencia, al aplicarse la carga, el elemento se deforma y las galgas experimentan variaciones microscópicas de longitud que se traducen en un cambio relativo de resistencia; posteriormente, al conectarse en un puente de Wheatstone, esas variaciones se convierten en una tensión diferencial de salida. Dado que esta señal es intrínsecamente pequeña (del orden de milivoltios), resulta necesario el acondicionamiento por parte del indicador/transmisor (excitación estable, amplificación y filtrado) para que el valor sea utilizable en PLC/HMI con estabilidad y repetibilidad. Por lo tanto, la exactitud global del pesaje depende tanto del diseño mecánico del elemento (rigidez, linealidad y distribución de esfuerzos) como de la calidad del arreglo extensométrico y su compensación frente a perturbaciones (Rick, 2023).

Desde la perspectiva de instrumentación, el desempeño de una celda se especifica típicamente mediante su sensibilidad nominal en mV/V, es decir, la relación entre la salida a carga nominal y el voltaje de excitación aplicado. En términos prácticos, si S representa la sensibilidad (mV/V) y V_{exc} la excitación (V), la salida a escala completa se aproxima como

$V_{out,FS} = S \cdot V_{exc}$ (en mV), mientras que para una fracción de carga $\alpha = F/F_{FS}$ la salida puede modelarse como $V_{out} \approx \alpha \cdot S \cdot V_{exc}$. Esta relación justifica por qué el sistema de medición requiere alta inmunidad al ruido: incluso con excitaciones típicas (p. ej., 10 V), la señal útil permanece en el rango de pocos a decenas de milivoltios (RICE LAKE, 2002).

En el manual de usuario se destaca que la confiabilidad no depende únicamente del circuito, sino también de decisiones de instalación y metrología. En particular, se resalta la diferencia entre cableado de 4 hilos ($\pm Exc, \pm Sig$) de 6 hilos, donde se incorporan líneas $\pm Sense$ para compensar caídas de tensión en el cable y asegurar que la celda reciba la excitación efectiva prevista, lo cual se vuelve relevante en tendidos largos o ambientes con variaciones térmicas. De forma complementaria, el certificado de calibración constituye la referencia técnica para verificación y diagnóstico, ya que incluye parámetros como salida mV/V, balance de cero, no linealidad, histéresis, efectos térmicos, resistencias de entrada/salida del puente y aislamiento, que permiten evaluar el estado del sensor y la coherencia del montaje durante la puesta en marcha y el mantenimiento (RICE LAKE, 2002).

La precisión puede degradarse por condiciones mecánicas no ideales; por ejemplo, cargas laterales (side load), impactos (shock load), fricción o restricciones en la estructura; debido a que alteran el campo de esfuerzos para el cual fue diseñado el elemento elástico y pueden introducir errores adicionales (deriva, no linealidad o histéresis). En consecuencia, el estudio de las galgas (4.10.1), del puente de Wheatstone y su sensibilidad (4.10.2–4.10.2.1), y de la aplicación en celdas de punto único (4.10.3) se presenta como base técnica para comprender el comportamiento del sistema de pesaje implementado.

Figura 22

Celda de carga



Nota. Tomado de (Rick, 2023).

4.10.1. Celdas de carga: base física y parte matemática (galgas extensiométricas)

Una celda de carga se conceptualiza como un transductor cuya función es convertir una fuerza en una señal eléctrica. Para lograrlo, el proceso inicia en el dominio mecánico: la fuerza aplicada provoca una deformación del elemento elástico, y dicha deformación es detectada por galgas extensiométricas (strain gauges), es decir, patrones resistivos adheridos al cuerpo deformable. En consecuencia, al deformarse la galga, su resistencia eléctrica cambia en proporción a la carga, y ese cambio se transforma en una señal utilizable por la instrumentación de medición (GONZALEZ, 2025).

Desde la base física, la resistencia eléctrica de la galga puede asociarse al modelo:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

donde ρ es la resistividad, L la longitud efectiva del conductor y A el área transversal.

Por lo tanto, ante una deformación, los cambios en L y A (y, en menor medida, en ρ) provocan una variación relativa de resistencia. En instrumentación de pesaje, dicha relación se resume mediante el factor de galga GF , que vincula la deformación unitaria ε con la variación relativa de resistencia:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \Rightarrow \frac{\Delta R}{R} = GF \cdot \varepsilon$$

De este modo, el sensor no “mide peso” directamente, sino que traduce deformación en un desbalance resistivo (GONZALEZ, 2025).

De este modo, el sensor no “mide peso” directamente, sino que traduce deformación a partir de la cadena mecánica, cuando la magnitud de interés se interpreta como “peso”, la fuerza asociada se modela como: en un desbalance resistivo

$$F = mg$$

donde m es la masa y g la aceleración de la gravedad. Luego sobre un elemento estructural, la fuerza induce un esfuerzo promedio:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

y, si el material trabaja en zona elástica, por Ley de Hooke se aproxima

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{A E}$$

donde ε es la deformación unitaria y E el módulo de Young. Por consiguiente, al sustituir ε en la ecuación de la galga, se obtiene una relación directa entre fuerza aplicada y variación resistiva:

$$\frac{\Delta R}{R} \approx GF \cdot \frac{F}{A E}$$

En términos prácticos, esto implica que la fuerza termina codificada como un cambio resistivo muy pequeño, coherente con la idea de que “la resistencia cambia en proporción a la carga” (GONZALEZ, 2025).

No obstante, el manual de Rice Lake enfatiza un aspecto decisivo para ingeniería de medición: el cambio ΔR es típicamente de fracciones de ohm respecto a resistencias nominales del puente del orden de cientos de ohmios, razón por la cual no resulta eficiente medir resistencia de manera directa. En su lugar, las galgas se conectan en un puente resistivo (comúnmente puente completo), de forma que el desbalance se transforme en una tensión diferencial proporcional a la carga y con buena inmunidad a perturbaciones. En consecuencia, la industria especifica el desempeño del sensor como sensibilidad en mV/V, es decir, salida por voltio de excitación, lo cual facilita predecir la señal disponible en función de la excitación aplicada y la fracción de carga (RICE LAKE, 2002).

Bajo este marco instrumental, si S representa la sensibilidad nominal de la celda en mV/V y V_{exc} el voltaje de excitación, la salida a escala completa puede expresarse como:

$$V_{out,FS} = S \cdot V_{exc} \text{ (en mV)}$$

y, para una fracción de carga $\alpha = \frac{F}{F_{FS}}$:

$$V_{out} \approx \alpha \cdot S \cdot V_{exc}$$

Por lo tanto, incluso con excitaciones típicas (p. ej., 10 V), la señal útil se mantiene en el orden de milivoltios, lo que justifica la necesidad de una excitación estable y de una etapa de acondicionamiento (amplificación/filtrado) para entregar una variable de proceso robusta hacia el sistema de control y supervisión (RICE LAKE, 2002).

Finalmente, Rice Lake resalta que la precisión del sistema no depende únicamente del modelo matemático, sino también del comportamiento real del conjunto sensor-estructura: factores como balance de cero, no linealidad, histéresis y efectos térmicos forman parte de la caracterización metrológica documentada en el certificado de la celda y se reflejan directamente en la estabilidad del pesaje. En consecuencia, la base física y matemática

descrita en este apartado se complementa con el análisis del puente de Wheatstone, ya que es la etapa que convierte el desbalance resistivo en una señal eléctrica diferencial medible (RICE LAKE, 2002).

4.10.2. Puente de Wheatstone

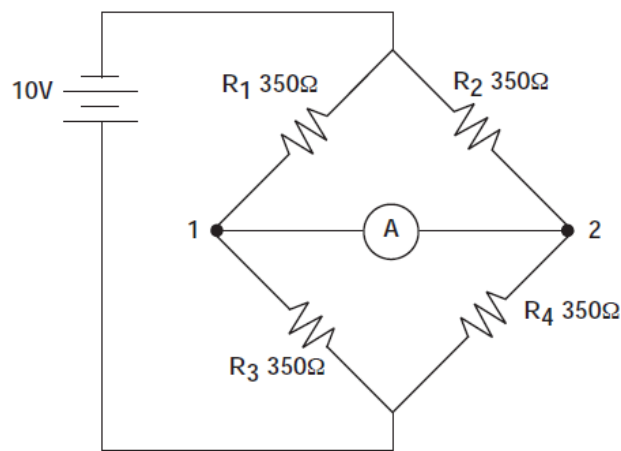
En la instrumentación de pesaje, la variación resistiva generada por las galgas extensiométricas es de magnitud reducida; por ello, no se interpreta como resistencia de forma directa, sino que se integra en un puente de Wheatstone, el cual permite convertir el desbalance ΔR en una tensión diferencial medible entre los terminales de señal. En este enfoque, se emplea una configuración equivalente a medio puente, donde una galga activa responde a la deformación del elemento elástico y una galga de referencia o “dummy” se mantiene sin deformación mecánica; en consecuencia, la galga dummy contribuye a compensar variaciones externas, principalmente efectos térmicos, al mantener un comportamiento resistivo similar sin aportar señal por carga. De esta manera, el puente entrega una diferencia de potencial proporcional a la fuerza aplicada, la cual posteriormente es acondicionada por un amplificador de instrumentación para elevar una señal inicialmente del orden de milivoltios a niveles adecuados para su adquisición y procesamiento en sistemas electrónicos de control y supervisión (Al-Dahiree, 2022).

Desde la perspectiva metrológica, el manual de Rice Lake destaca que la salida de un puente con galgas se expresa industrialmente como sensibilidad en mV/V , debido a que la señal depende directamente del voltaje de excitación aplicado al puente. Por lo tanto, una excitación estable se vuelve determinante para preservar la exactitud del sistema, ya que cualquier variación en V_{exc} se refleja proporcionalmente en la señal diferencial. Asimismo, en aplicaciones de pesaje industrial es común que las celdas comerciales incorporen configuraciones de puente que priorizan sensibilidad y estabilidad, precisamente porque la señal útil se mantiene en rangos bajos y debe ser robusta frente a ruido eléctrico, deriva

térmica y condiciones de instalación. En consecuencia, el uso del puente de Wheatstone junto con el acondicionamiento mediante amplificación diferencial constituye una etapa crítica para garantizar sensibilidad, repetibilidad y estabilidad en la medición de carga (RICE LAKE, 2002).

Figura 23

Puente de Weatstone



Nota. Tomado de (RICE LAKE, 2012)

4.10.2.1. Puente de Wheatstone: principio, ecuación de equilibrio y sensibilidad (en instrumentación)

El puente de Wheatstone se emplea como un método de alta exactitud para comparar resistencias, debido a que basa su medición en una condición de equilibrio eléctrico.

Operativamente, el circuito se alimenta con una fuente de tensión continua y se ajustan resistencias conocidas (por ejemplo, R_3 y el cociente R_2/R_1) hasta que el elemento detector (galvanómetro) indica corriente nula ($I_G = 0$); en ese instante, el puente se considera balanceado (Pozueta, 2025).

Bajo esta condición de equilibrio, se cumple la relación fundamental:

$$R_x = R_3 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)$$

lo que implica que, una vez anulada la corriente por el galvanómetro, la resistencia desconocida R_x se obtiene a partir de resistencias conocidas y de su ajuste relativo. Además, cuando el puente está balanceado, se cumple que los potenciales en los nodos intermedios son iguales ($V_A = V_B$), lo cual justifica físicamente la condición $I_G = 0$ y conduce nuevamente a la relación anterior (Pozueta, 2025).

No obstante, el interés principal del puente en instrumentación; y particularmente en celdas de carga; aparece cuando se utiliza como un convertidor de micro-variedades resistivas, más que como un método para medir un valor absoluto. En un puente inicialmente balanceado con $R_1 = R_2 = R_3 = R_x = R_0$, si R_x cambia una cantidad pequeña ΔR , la respuesta del detector resulta proporcional a $\Delta R_x / (4 R_0)$, evidenciando que el puente amplifica de manera efectiva variaciones relativas muy pequeñas (Pozueta, 2025).

En este punto, el manual de Rice Lake enfatiza que, en aplicaciones reales de pesaje, esas variaciones suelen ser extremadamente reducidas (cambios fraccionarios respecto a resistencias nominales de cientos de ohmios), razón por la cual el puente es la arquitectura más adecuada para traducir ΔR en una señal eléctrica utilizable (RICE LAKE, 2002).

En términos más directos para instrumentación, la sensibilidad del puente se expresa convenientemente mediante su salida diferencial. Para un puente balanceado donde una resistencia cambia en ΔR (con $|\Delta R| \ll R$), la tensión diferencial puede aproximarse como:

$$V_{out} \approx \frac{V_{exc}}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right)$$

De esta forma, la señal queda explícitamente ligada al voltaje de excitación V_{exc} , lo cual explica por qué la estabilidad de la excitación es crítica: cualquier variación en V_{exc} se

refleja proporcionalmente en V_{out} . En celdas de carga comerciales, la implementación suele extenderse a configuraciones de puente con múltiples galgas activas (por ejemplo, puente completo con galgas en tensión y compresión), lo que incrementa la sensibilidad efectiva y mejora el rechazo a perturbaciones; en ese escenario, el manual muestra que la relación puede escalar hasta aproximaciones del tipo:

$$\frac{V_{out}}{V_{exc}} \approx \frac{\Delta R}{R}$$

Cuando la distribución de $\pm \Delta R$ en los brazos del puente está optimizada para maximizar salida (RICE LAKE, 2002).

Bajo esta misma lógica, Rice Lake ilustra la magnitud real de la señal en un caso típico: con resistencias nominales cercanas a 350Ω , una variación del orden de $\Delta R \approx 0.5 \Omega$ y una excitación de $V_{exc} = 10V$, la salida resulta del orden de milivoltios (aprox. decenas de mV), lo cual confirma que la instrumentación debe medir señales pequeñas con alta inmunidad al ruido (RICE LAKE, 2002).

En consecuencia, en el ámbito industrial se estandariza la especificación de la celda mediante la sensibilidad mV/V, ya que:

$$V_{out,FS} = S_{(mV/V)} \cdot V_{exc}$$

Y para una fracción de carga $\alpha = \frac{F}{F_{FS}}$:

$$V_{out} = \alpha \cdot S_{(mV/V)} \cdot V_{exc}$$

Por lo tanto, el puente de Wheatstone no solo permite establecer una condición de equilibrio para medición precisa, sino que además actúa como un convertidor altamente sensible de pequeñas variaciones resistivas provocadas por galgas extensiométricas; de hecho, esta es la razón por la cual se adopta como etapa fundamental en la medición de

deformación y fuerza en celdas de carga, donde la señal final es diferencial, proporcional a la carga y dependiente de una excitación controlada (RICE LAKE, 2002).

4.10.3. Celdas de Punto Único (Single-Point)

Las celdas de carga de punto único se caracterizan por un diseño estructural que permite su instalación directa bajo plataformas de pesaje, proporcionando una respuesta estable incluso cuando la carga se aplica de forma descentrada dentro del área útil. En consecuencia, su geometría mecánica y la disposición del arreglo extensométrico están orientadas a minimizar el error por carga excéntrica, lo que las hace especialmente adecuadas en aplicaciones donde no siempre se garantiza que el peso actúe exactamente en el centro de la plataforma. Por esta razón, se emplean de manera extendida en básculas de laboratorio, balanzas comerciales y estaciones de dosificación/llenado, donde se requiere repetibilidad y exactitud en el pesaje de recipientes pequeños o medianos (Tina, 2024).

Figura 24

Celda Single Point



Nota. Tomado de (Tina, 2024).

Desde el punto de vista de instrumentación, estas celdas mantienen el mismo principio de conversión que el resto de las celdas extensométricas: su salida corresponde a una señal diferencial muy pequeña, típicamente especificada como sensibilidad en mV/V, por lo que requiere una excitación estable y un acondicionamiento apropiado para su lectura. En

términos de conexión eléctrica, el cableado estándar se organiza en dos pares funcionales: excitación y señal. La excitación se aplica mediante los terminales +Exc y –Exc, que suministran el voltaje continuo al puente de Wheatstone interno; mientras tanto, la medición se obtiene en los terminales +Sig y –Sig, que entregan la tensión diferencial proporcional a la carga. En consecuencia, el sistema de medición interpreta la diferencia $V_{+sig} - V_{-sig}$ como variable de peso, siendo su magnitud del orden de milivoltios y directamente dependiente del voltaje de excitación aplicado (RICE LAKE, 2002).

Tabla 1

Cableado de una celda de carga de 4 hilos

Cableado	
Red	+Input
Green	-Input
White	+Output
Black	-Output
	Shield

Nota. Tomado de (RICE LAKE, 2002)

Adicionalmente, el manual de Rice Lake resalta que algunas configuraciones industriales emplean celdas con 6 hilos, incorporando las líneas +Sense y –Sense además de $\pm Exc$ y $\pm Sig$. Estas líneas de realimentación permiten compensar caídas de tensión en el cableado, ya que el indicador/transmisor “detecta” el voltaje real que llega a la celda y ajusta la excitación efectiva, mejorando la exactitud cuando existen distancias apreciables o variaciones térmicas en el tendido. Por lo tanto, la selección entre 4 y 6 hilos se relaciona con criterios de ingeniería como longitud de cable, ambiente de operación y necesidad de estabilidad metrológica en la señal (RICE LAKE, 2002).

Finalmente, aunque la celda de punto único está diseñada para tolerar cargas descentradas dentro de límites definidos, el documento advierte que la precisión real también

depende del montaje mecánico: la presencia de cargas laterales (side load), impactos (shock load), fricción o restricciones estructurales puede introducir no linealidad e histéresis, afectando la repetibilidad del pesaje. En consecuencia, el correcto acoplamiento mecánico y el cableado adecuado (excitación, señal y, de ser el caso, sense) constituyen condiciones críticas para aprovechar la capacidad de compensación por excentricidad que caracteriza a este tipo de celda (RICE LAKE, 2002).

4.11. Sensor inductivo

Los sensores inductivos son dispositivos electrónicos diseñados para identificar la presencia de metales ferrosos sin requerir contacto físico directo. Su principio de operación se basa en la inducción electromagnética, mediante la cual un campo magnético generado por la bobina del sensor se ve modificado al aproximarse un objeto metálico, lo que produce una señal eléctrica detectable. Estos sensores permiten determinar si un objeto metálico se encuentra en una posición específica, siendo especialmente útiles para el conteo de piezas que atraviesan un punto determinado. En la Figura 16 se muestra un ejemplo de un sensor inductivo (Quispe Rojas, 2020).

Figura 25

Sensor inductivo



Nota. Tomado de (QBPROFE, 2021).

4.12. Variador de frecuencia

El variador de frecuencia es un equipo electrónico ampliamente utilizado en el ámbito industrial para regular la velocidad y el par de motores eléctricos de corriente alterna. Su funcionamiento se basa en la modificación controlada de la frecuencia y del voltaje suministrado al motor, lo que permite adaptar su operación a las necesidades reales del proceso. Al ubicarse entre la red eléctrica y el motor, el variador gestiona la energía antes de su aplicación, logrando que el sistema opere de manera más eficiente y reduciendo el desgaste prematuro de los componentes mecánicos y eléctricos involucrados (ABB, 2024).

Dentro de los sistemas de automatización industrial, el variador de frecuencia puede integrarse de manera eficiente con controladores lógicos programables, permitiendo un control más avanzado del motor. A través de esta integración, el PLC puede enviar consignas de velocidad, rampas de aceleración o comandos de operación al variador, asegurando una coordinación adecuada con el resto del proceso automatizado. Esta interacción mejora la flexibilidad operativa, la seguridad del sistema y la estabilidad general de la instalación industrial (Rogelio Delgado, 2025).

4.12.1. Variador de frecuencia SINAMICS V20

Es un variador de frecuencia desarrollado por Siemens para aplicaciones industriales que requieren un control confiable de la velocidad de motores eléctricos de corriente alterna. Su diseño compacto, su fácil instalación y su rápida puesta en marcha lo convierten en una solución adecuada para procesos donde se busca simplicidad operativa y estabilidad en el accionamiento, como sistemas de transporte, bombeo y mecanismos auxiliares en líneas automatizadas. Estas características permiten reducir tiempos de configuración y costos de implementación, manteniendo un funcionamiento seguro y eficiente del motor (serviurena, 2023).

Figura 26

SINAMICS V20



Nota: Tomado de (Grupo Elektra, 2026).

5. METODOLOGÍA

5.1. Descripción del proyecto

El presente proyecto se orienta al diseño y simulación de un proceso automatizado de llenado, pesaje y sellado de recipientes destinados a lubricantes industriales, integrando una arquitectura basada en PLC, interfaz HMI y una pasarela Siemens IoT2040 para supervisión. Dicho esto, el control se estructuró mediante una lógica secuencial por estados, de modo que el sistema ejecuta de forma ordenada el transporte del recipiente hacia cada estación, la dosificación del fluido, la verificación del peso y, finalmente, el sellado, garantizando que cada etapa se habilite únicamente cuando se cumplan las condiciones de proceso y de seguridad definidas.

Primeramente, la operación se inicia a partir de una habilitación general del sistema, gobernada por señales de marcha, paro y paro de emergencia, las cuales determinan el enclavamiento operativo y la detención inmediata ante cualquier condición de riesgo. A continuación, se acciona la faja transportadora para posicionar el recipiente en la estación de llenado, donde el control del PLC coordina de manera simultánea la apertura de la válvula de salida y la adquisición de la variable de peso, permitiendo que el llenado no se limite a una temporización fija, sino que responda a consignas cuantificables. El proceso incorpora dos puntos de corte; llenado grueso y llenado fino; que optimizan la dosificación: el primer umbral incrementa rápidamente la masa del contenido, mientras que el segundo ajusta el valor final con mayor precisión, reduciendo sobrellenados y mejorando la repetibilidad.

Para la etapa de pesaje, se emplea una celda de carga conectada a un transmisor de peso CAS WTM-300, encargado de acondicionar y convertir la señal del sensor a una magnitud apta para su interpretación en el PLC. De este modo, el controlador recibe el valor

escalado de peso y lo utiliza como referencia para la toma de decisiones en tiempo real, comparándolo con las consignas configuradas desde la HMI. Adicionalmente, se consideran rutinas de validación relacionadas con la coherencia de consignas y el estado general del sistema, a fin de evitar condiciones de operación incorrectas y asegurar una respuesta consistente ante paradas o emergencias.

Una vez finalizada y validada la fase de llenado–pesaje, el sistema habilitó la segunda etapa, correspondiente al sellado del recipiente, la cual fue modelada mediante una simulación en TIA Portal. En esta fase, el PLC ejecutó la secuencia asociada al sellado considerando tanto la confirmación de presencia en la estación por sensores inductivos como el tiempo de operación parametrizable, asegurando que el ciclo sea completado de forma controlada antes de reanudar el transporte o pasar a un estado de espera. Paralelamente, la HMI KTP700 Basic funciona como interfaz operador–máquina, permitiendo la visualización de estados, variables críticas, consignas y alarmas, además de habilitar acciones de operación como arranque, paro y supervisión del proceso conforme a criterios de diseño orientados a la claridad y seguridad.

Finalmente, la pasarela IoT2040 cumplió un rol complementario al facilitar la transmisión de variables relevantes hacia un entorno de monitoreo, lo que posibilitó la observación del comportamiento del proceso, el registro de eventos y el análisis del desempeño operativo. En conjunto, la solución propuesta integra la lógica de control, la interacción mediante HMI y la supervisión IoT en un esquema coherente, con el propósito de representar de manera técnica y verificable un proceso industrial típico de envasado, incorporando tanto simulación como validación funcional del subsistema de pesaje en el laboratorio de automatización industrial 2.

5.2. Tipo de metodología

Para el desarrollo del presente proyecto se adoptó una metodología que integró un enfoque experimental y un enfoque sistemático, con el fin de asegurar tanto la verificación funcional del subsistema crítico como la organización coherente de todo el trabajo de automatización. En primer lugar, se aplicó el enfoque experimental en la etapa de pesaje, debido a que constituyó el único componente implementado físicamente. En consecuencia, las pruebas se ejecutaron en el módulo del Laboratorio de Automatización Industrial II, donde se validó el desempeño de la cadena de medición conformada por la celda de carga y el transmisor CAS WTM-300, y, posteriormente, se realizaron los ajustes necesarios de parametrización y escalado en el PLC para garantizar que el valor de peso adquirido fuera estable, interpretable y utilizable dentro de la lógica de control del proceso.

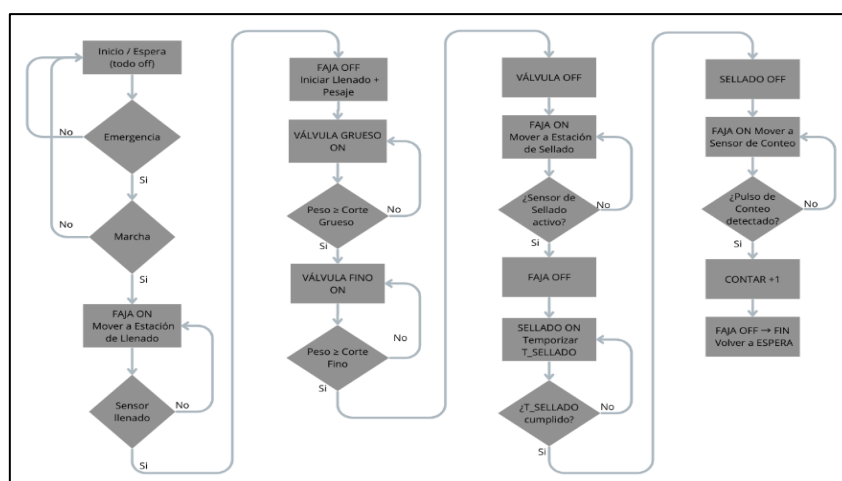
De manera complementaria, se empleó un enfoque sistemático para estructurar el desarrollo global del proyecto, dado que las etapas de llenado y sellado se ejecutaron mediante simulación en TIA Portal a través de la programación del PLC y el diseño de la HMI. Bajo este enfoque, se definieron de forma ordenada las actividades de levantamiento de requerimientos, secuenciación del proceso por estados, implementación de temporizaciones y enclavamientos de seguridad, integración de consignas operativas y verificación de funcionamiento en simulación. Asimismo, se incorporó la pasarela IoT2040 como soporte de supervisión, permitiendo organizar la transmisión y visualización de variables relevantes del proceso. En síntesis, la combinación de ambos enfoques permitió validar físicamente el pesaje y, a la vez, desarrollar de manera planificada y trazable la simulación integral del llenado y el sellado, asegurando consistencia técnica y cumplimiento de los objetivos del proyecto.

5.3. Etapas del desarrollo del proyecto

En el presente proyecto, el desarrollo se organizó por etapas consecutivas con el fin de asegurar trazabilidad técnica y coherencia entre la lógica de control, la interfaz de operación y la supervisión del proceso. En primer lugar, se implementó la programación del PLC en TIA Portal mediante lenguaje Ladder, estructurando la secuencia del ciclo y los enclavamientos de marcha, paro y emergencia, además del tratamiento de la variable de pesaje. Posteriormente, se diseñaron las pantallas HMI conforme a criterios de la norma ISA-101 para garantizar una operación clara y segura. A continuación, se configuró la pasarela Siemens IoT2040 con Node-RED para la adquisición y visualización de variables de proceso relevantes. Finalmente, se realizaron pruebas funcionales e integración, corrigiendo inconsistencias hasta estabilizar el ciclo; en paralelo, se ejecutó una validación física parcial en laboratorio, incorporando el subsistema de pesaje, el accionamiento del motor que simuló la faja a 10 Hz fijos y dos sensores inductivos, mientras que las etapas de llenado y sellado se verificaron principalmente mediante simulación en el entorno PLC-HMI

Figura 27

Diagrama de flujo general del proceso automatizado de llenado, pesaje y sellado



Nota. La figura resume la secuencia operativa del ciclo y las condiciones de transición (sensores, cortes de peso, temporización de sellado y conteo), utilizada como referencia para la implementación del control por estados en el PLC. De elaboración propia.

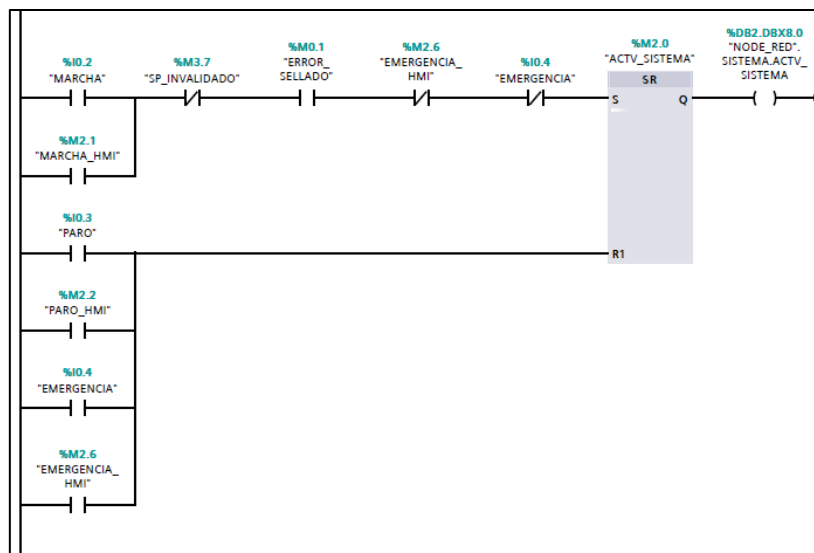
5.3.1. Etapa 1: Programación del PLC en TIA Portal (LAD) y estructura del control

Network 1 — Enclavamiento de habilitación general

En primer lugar, se implementó un enclavamiento tipo SR que gobernó la habilitación global del proceso mediante ACTV_SISTEMA (%M2.0). De este modo, la activación se realizó desde MARCHA (%I0.2) o MARCHA_HMI (%M2.1), mientras que el desenganche se ejecutó con PARO (%I0.3) o PARO_HMI (%M2.2); adicionalmente, se incorporaron condiciones de bloqueo por seguridad y diagnóstico, tales como EMERGENCIA (%I0.4), EMERGENCIA_HMI (%M2.6), SP_INVALIDADO (%M3.7) y ERROR_SELLADO (%M0.1), garantizando que el ciclo solo pudiera sostenerse cuando el sistema se encontraba en estado seguro. Asimismo, el estado de habilitación se replicó hacia Node-RED mediante DB2.DBX8.0 para supervisión remota.

Figura 28

Enclavamiento de habilitación general del sistema



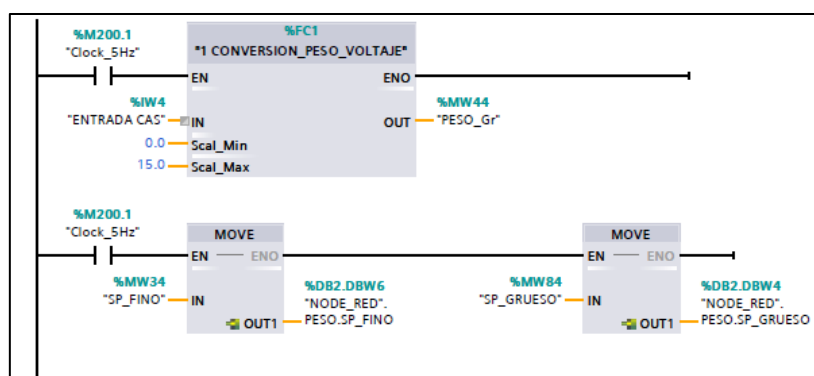
Nota. Esta red define el “permiso maestro” del proceso y concentra los interbloques críticos.

Network 2 — Escalado y publicación de variables de pesaje

A continuación, se realizó el acondicionamiento de la señal proveniente del transmisor CAS mediante el bloque FC1 (CONVERSION_PESO_VOLTAJE), el cual transformó la lectura analógica %IW4 en magnitudes de ingeniería, actualizando el valor de peso utilizado por el control (p. ej., PESO_Gr %MW44) y variables asociadas. En consecuencia, se obtuvo una representación coherente del pesaje para comparaciones de setpoints y, además, se sincronizó la transmisión de SP_GRUESO (%MW84) y SP_FINO (%MW34) hacia Node-RED a través de DB2.DBW4 y DB2.DBW6, respectivamente, facilitando ajuste y monitoreo en la pasarela IoT.

Figura 29

Escalado de señal de peso y publicación de setpoints



Nota. Esta red convierte la entrada analógica en variables operativas de peso y replica setpoints al sistema IoT.

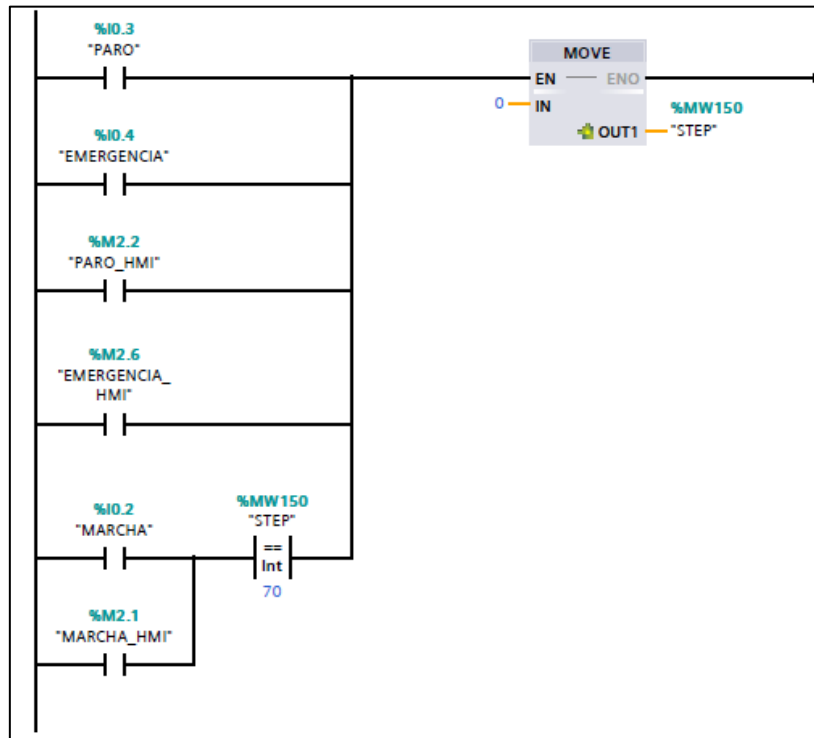
Network 3 — Paro forzado y retorno a estado seguro

Seguidamente, se estableció una lógica de paro que forzó el retorno del secuenciador STEP (%MW150) a cero ante eventos de detención. En particular, la red priorizó PARO, PARO_HMI y condiciones de emergencia para reinicializar el estado del proceso, evitando que la máquina permaneciera en un paso intermedio. De forma complementaria, se

contempló la situación de fin de ciclo (p. ej., STEP = 70) para permitir un reinicio controlado del diagrama de estados cuando se solicitara una nueva marcha.

Figura 30

Reinicio de secuencia por paro/emergencia



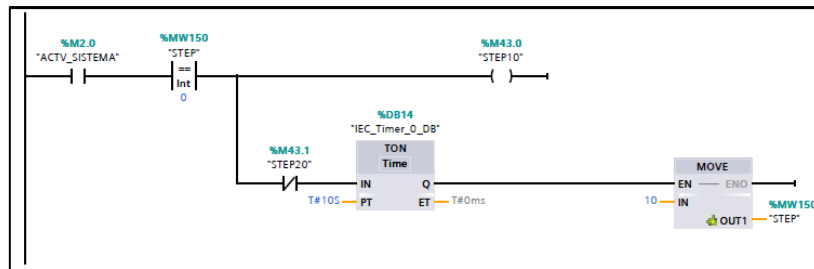
Nota. Esta red asegura que cualquier paro lleve el secuenciador a un estado determinístico.

Network 4 — Arranque del ciclo (0 → 10)

Posteriormente, se implementó la condición de inicio del ciclo, donde, al cumplirse la habilitación del sistema y encontrarse STEP = 0, se conmutó el proceso hacia el primer estado operativo (STEP = 10). Para robustecer la transición, se integró un temporizador TON que actuó como retardo/filtrado de arranque, reduciendo efectos de rebote o disparos espurios en la inicialización del secuenciador.

Figura 31

Arranque del ciclo y transición inicial (STEP 0→10)



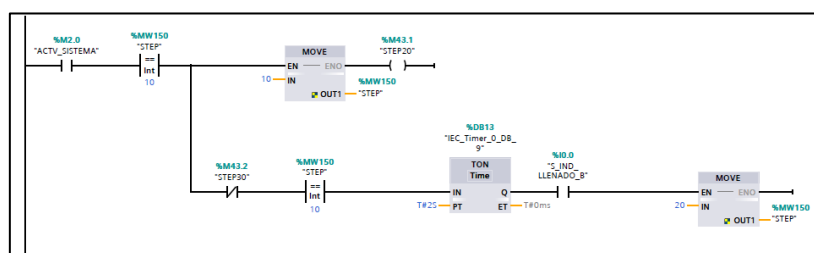
Nota. Esta red inicializa la secuencia y estabiliza el paso de reposo al primer estado de transporte.

Network 5 — Detección de estación de llenado (10 → 20)

Luego, durante STEP = 10, se evaluó el sensor de presencia en la estación de llenado S_IND_LLENADO_B (%I0.0). En consecuencia, al detectarse la llegada del recipiente, se ejecutó un cambio a STEP = 20, típicamente acompañado de un TON para confirmación temporal, lo cual mejoró la inmunidad a señales transitorias del sensor y aseguró que la transición ocurriera solo cuando la condición fuera persistente.

Figura 32

Detección de estación de llenado (STEP 10→20)



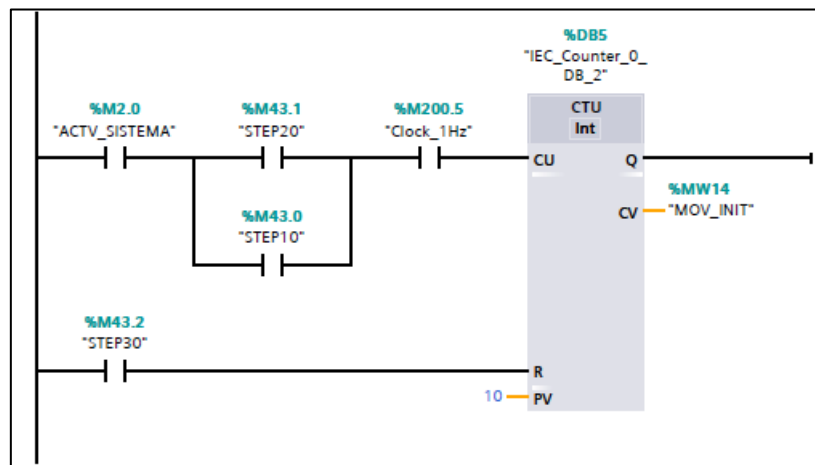
Nota. Esta red confirma la llegada a llenado y habilita el inicio del llenado por etapas.

Network 6 — Contabilización auxiliar en etapa de llenado

A su vez, se incorporó un contador CTU asociado a la etapa de llenado, habilitado por ACTV_SISTEMA y la condición de paso (STEP20). De esta manera, usando una señal periódica (Clock_1Hz), se cuantificó el tiempo o eventos discretos, almacenando el conteo en una variable auxiliar (p. ej., MOV_INIT %MW14), la cual resultó útil para diagnóstico, visualización o lógica complementaria, y se gestionó con condiciones de reset vinculadas a cambios de etapa.

Figura 33

Conteo auxiliar en etapa de llenado



Nota. Esta red añade una medición auxiliar de progreso/tiempo durante la fase de llenado.

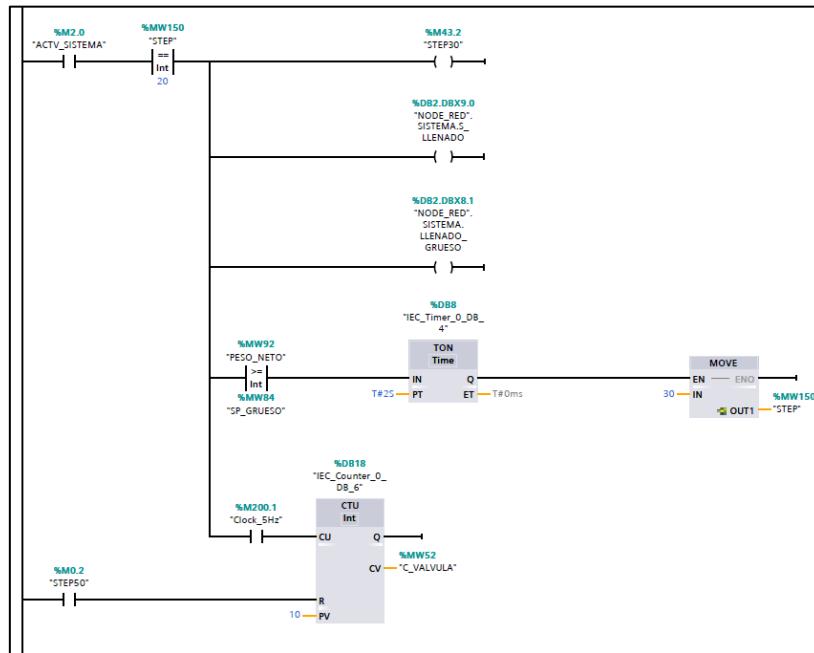
Network 7 — Corte grueso por peso (20 → 30)

En la etapa de llenado grueso (STEP = 20), se activó la señalización de estado hacia Node-RED (p. ej., S_LLENADO y LLENADO_GRUESO) y, simultáneamente, se comparó el peso neto calculado (PESO_NETO %MW92) contra el setpoint de corte grueso (SP_GRUESO %MW84). Por consiguiente, cuando se alcanzó o superó el umbral, se aplicó un retardo mediante TON antes de avanzar a STEP = 30, lo cual evitó conmutaciones inestables por oscilaciones de lectura. Adicionalmente, se empleó un CTU para contabilizar

conmutaciones/duración de la válvula (variable auxiliar C_VALVULA), aportando trazabilidad de la dosificación.

Figura 34

Corte de llenado grueso por peso (STEP 20→30)



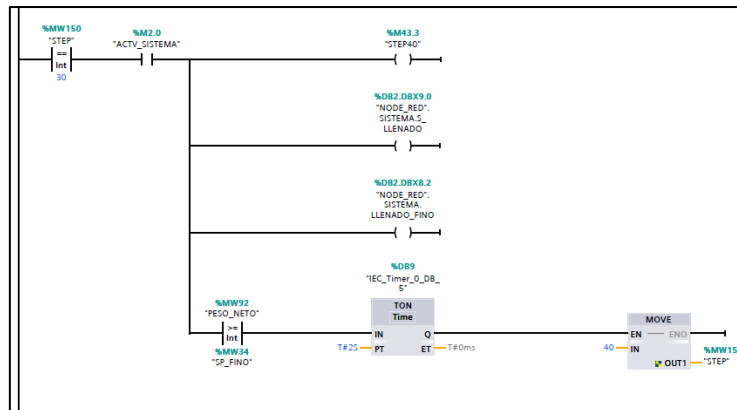
Nota. Esta red ejecuta el cambio de llenado grueso a fino basándose en el umbral de peso.

Network 8 — Corte fino por peso (30 → 40)

De forma análoga, durante STEP = 30 se habilitó la indicación de LLENADO_FINO hacia Node-RED y se verificó el cumplimiento del setpoint final (SP_FINO %MW34) respecto a PESO_NETO. En consecuencia, al alcanzarse el valor objetivo, un TON confirmó la condición y el secuenciador progresó a STEP = 40, asegurando una transición estable y reduciendo el riesgo de sobrellenado por ruido o inercia del flujo.

Figura 35

Corte de llenado fino por peso (STEP 30→40)



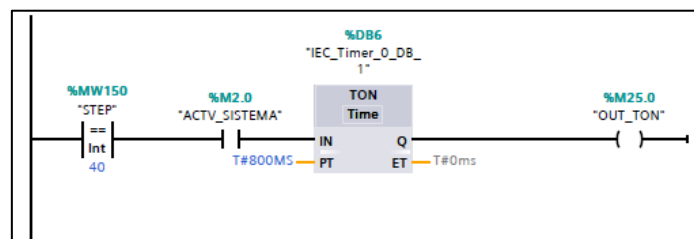
Nota. Esta red finaliza el llenado con verificación temporal para mayor estabilidad.

Network 9 — Asentamiento de lectura de peso

A continuación, en STEP = 40 se ejecutó un temporizador TON de corta duración (≈ 800 ms) que habilitó una ventana de estabilización del peso, generando una marca interna (OUT_TON %M25.0) una vez cumplido el retardo. De este modo, se minimizó la influencia de vibraciones o fluctuaciones residuales antes de retomar el transporte.

Figura 36

Retardo de asentamiento/estabilización del peso



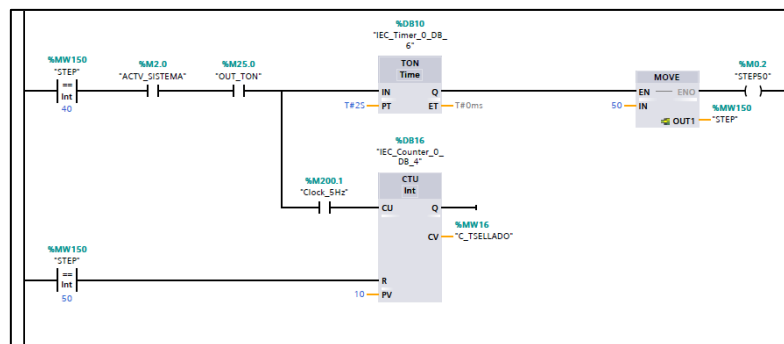
Nota. Esta red introduce un retardo para asegurar que la lectura de peso sea estable.

Network 10 — Fin de asentamiento y transición a transporte (40 → 50)

Posteriormente, con OUT_TON activo, se realizó la transición del secuenciador hacia STEP = 50, incorporando un retardo adicional mediante TON para ordenar la secuencia de salida. Asimismo, se utilizó un contador auxiliar (p. ej., C_TSELLADO) para registrar eventos o pulsos asociados a la fase posterior, aportando variables de diagnóstico/visualización para el tramo de transferencia hacia sellado.

Figura 37

Transición a transporte hacia sellado (STEP 40→50)



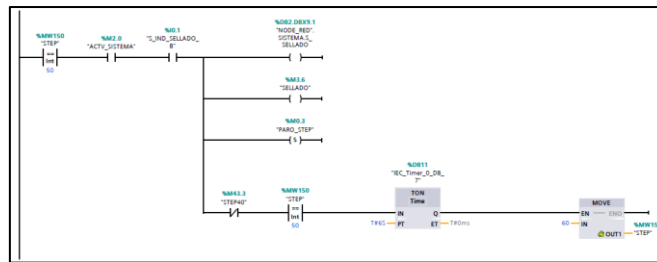
Nota. Esta red encadena el asentamiento con el inicio del transporte hacia la siguiente estación.

Network 11 — Detección de estación de sellado (50 → 60)

En STEP = 50, se supervisó el sensor de la estación de sellado S_IND_SELLADO_B (%I0.1) y, al confirmarse la presencia del recipiente, se publicó el estado de llegada (S_SELLADO) hacia Node-RED. En consecuencia, tras una confirmación temporal (temporizador TON), el sistema avanzó a STEP = 60, habilitando la fase de sellado únicamente cuando la condición de posicionamiento fue válida.

Figura 38

Detección de estación de sellado (STEP 50→60)



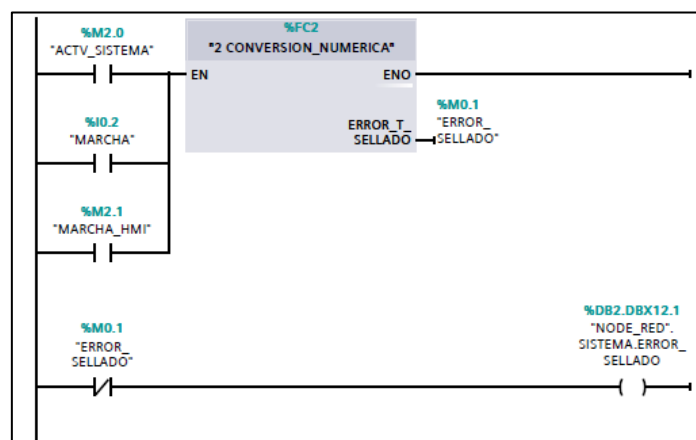
Nota. Esta red valida la llegada a sellado antes de iniciar el temporizado de sellado.

Network 12 — Mapeo numérico a tiempo y señalización de error

A continuación, se llamó al bloque FC2 (CONVERSION_NUMERICA) para convertir un setpoint numérico de sellado (p. ej., TSELLADO_RUN_S) en un valor de tipo TIME almacenado en PT_TSELLADO (p. ej., %MD20), el cual fue usado como parámetro PT del temporizador de sellado. De forma complementaria, se gestionó la indicación de ERROR_SELLADO y su publicación en Node-RED, de manera que la supervisión remota dispusiera de diagnóstico inmediato si el parámetro o la condición de sellado no resultaron válidos.

Figura 39

Conversión de setpoint de sellado a tiempo (FC2)



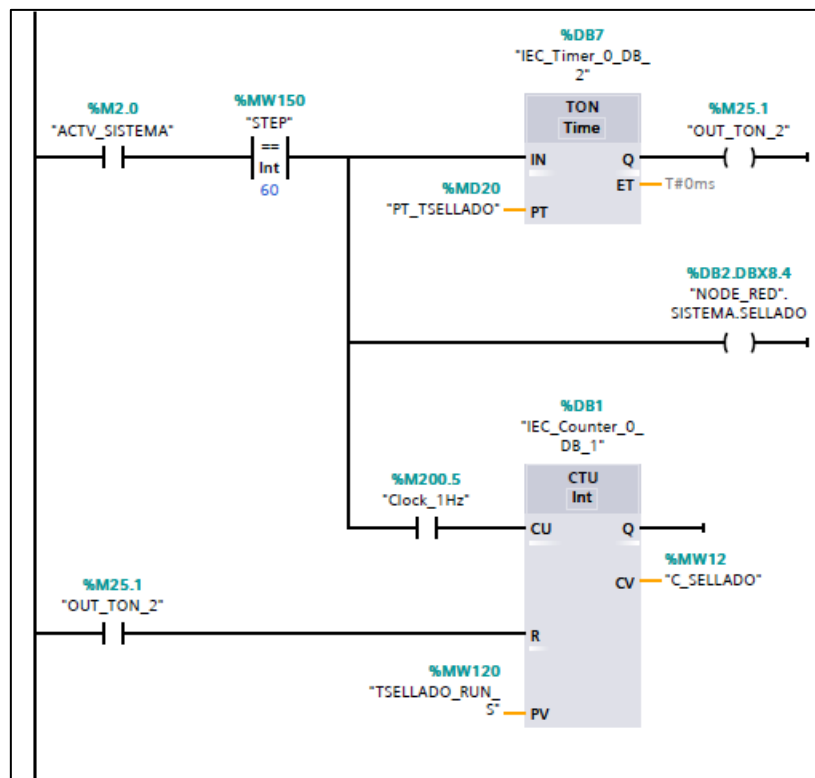
Nota. Esta red convierte el setpoint de sellado a un tiempo de control y expone el estado de error.

Network 13 — Temporización de sellado y confirmación de etapa

En STEP = 60, se ejecutó el TON con PT_TSELLADO, generando la señal OUT_TON_2 (%M25.1) al cumplirse el tiempo requerido. Por consiguiente, se habilitó la señal de estado SELLADO hacia Node-RED para monitoreo de la acción, y adicionalmente se implementó un CTU con Clock_1Hz que permitió contabilizar/visualizar el progreso temporal del sellado mediante variables auxiliares.

Figura 40

Temporización de sellado y confirmación de etapa



Nota. Esta red aplica el tiempo real de sellado configurado y produce la marca de fin de sellado.

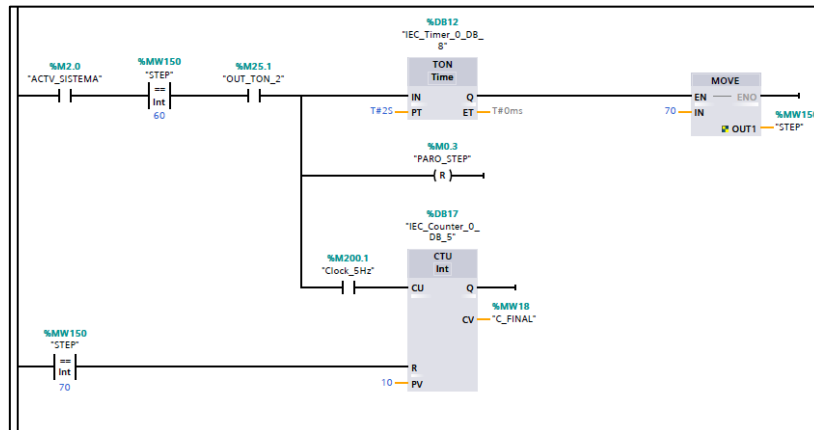
Network 14 — Cierre de ciclo y estado de espera (60 → 70)

Una vez finalizado el sellado (condicionado por OUT_TON_2), el secuenciador migró hacia un estado de fin/espera (STEP = 70) mediante un TON de transición, garantizando una salida ordenada de la etapa activa. Asimismo, se utilizaron contadores del

tipo RCTU/CTU para reinicializar o registrar variables de cierre (p. ej., C_FINAL), lo cual facilitó diagnóstico del final de ciclo y preparación para un reinicio posterior controlado.

Figura 41

Fin de ciclo y estado de espera (STEP 60→70)



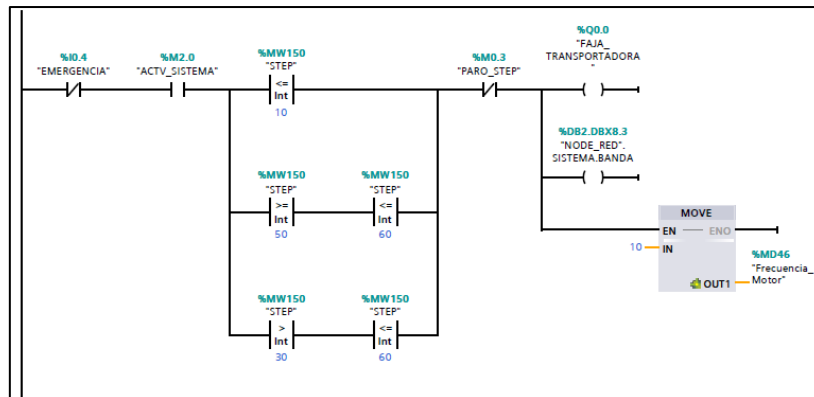
Nota. Esta red finaliza el ciclo y coloca el sistema en un estado de espera controlado.

Network 15 — Control de faja transportadora por etapa

En cuanto a salidas, se gobernó la FAJA_TRANSPORTADORA (%Q0.0) en función del estado del secuenciador, de modo que la banda operó únicamente en las etapas de traslado (por ejemplo, STEP 10 y STEP 50), y permaneció inhibida durante operaciones de llenado/sellado. Adicionalmente, se incorporaron interbloqueos por emergencia y paro de etapa (PARO_STEP), y se publicó el estado de banda en Node-RED (DB2.DBX8.3); en paralelo, se actualizó una referencia de velocidad (p. ej., Frecuencia_Motor %MD46) como valor operativo asociado al transporte.

Figura 42

Control de faja transportadora por etapa



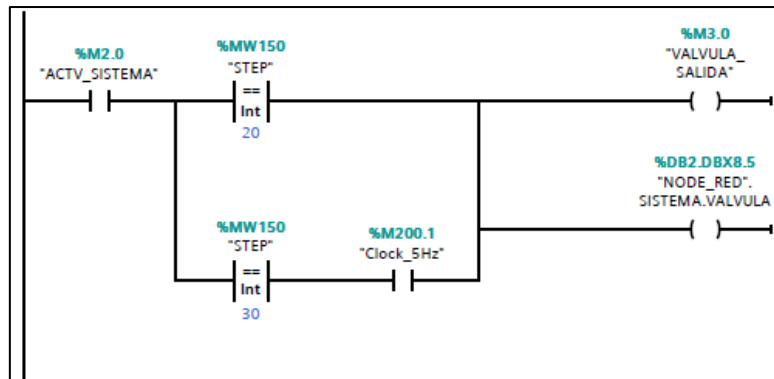
Nota. Esta red evita “conflictos” de movimiento, activando la faja solo cuando corresponde por secuencia.

Network 16 — Control de válvula (grosso continuo / fino pulsado)

De manera complementaria, se controló la salida de la válvula de llenado en función de la fase: en STEP = 20 se habilitó un llenado continuo (grosso), mientras que en STEP = 30 se aplicó una modulación por pulsos usando Clock_5Hz, logrando un llenado fino con mayor precisión. En consecuencia, el caudal se ajustó implícitamente por estrategia de mando (continuo vs. pulsado) y, además, se publicó el estado de válvula hacia Node-RED (DB2.DBX8.5) para supervisión.

Figura 43

Control de válvula: grueso continuo y fino pulsado



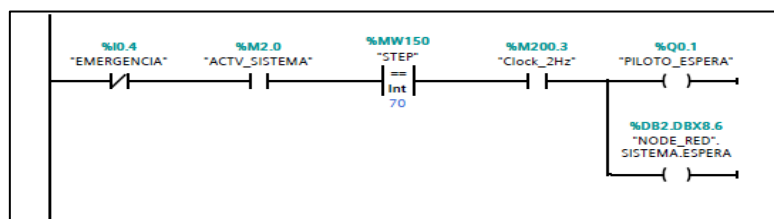
Nota. Esta red implementa la estrategia de dosificación: rápido en grueso y controlado por pulsos en fino.

Network 17 — Piloto de espera con parpadeo

En el estado de espera (STEP = 70), se comandó un piloto de señalización (PILOTO_ESPERA %Q0.1) con parpadeo mediante Clock_2Hz, siempre que el sistema estuviera habilitado y no existiera condición de emergencia. De este modo, se ofreció una indicación visual clara del modo “listo/espera”, además de su publicación en Node-RED (DB2.DBX8.6) para visualización remota.

Figura 44

Piloto de espera con parpadeo



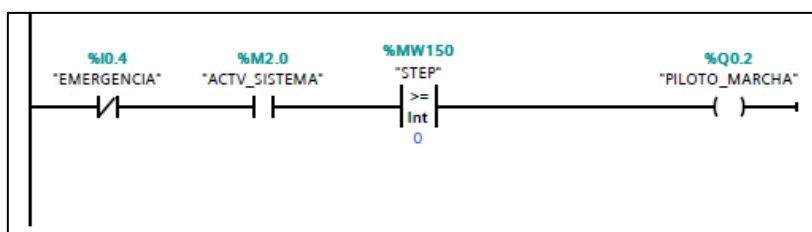
Nota. Esta red indica visualmente que el ciclo terminó y el sistema está en espera.

Network 18 — Piloto de marcha (proceso en ejecución)

Asimismo, se activó el PILOTO_MARCHA (%Q0.2) cuando el sistema se encontró habilitado y el secuenciador estuvo en un paso mayor a cero, lo cual representó que el proceso estuvo en ejecución. En consecuencia, el operador dispuso de una señal luminosa estable que diferenció operación activa de reposo, condicionada además por el estado de emergencia.

Figura 45

Piloto de marcha (proceso en ejecución)



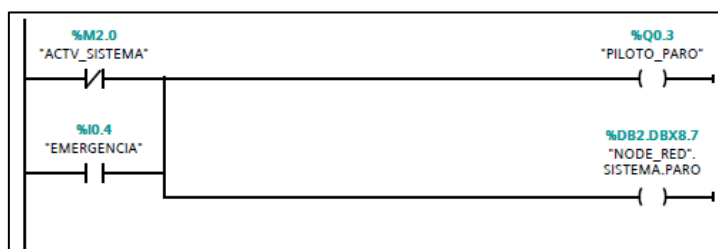
Nota. Esta red señala operación activa durante cualquier etapa distinta del reposo.

Network 19 — Piloto de paro (sistema deshabilitado)

Por otro lado, el PILOTO_PARO (%Q0.3) se gobernó como indicación de sistema desactivado o detenido, reflejando el estado de ACTV_SISTEMA y considerando condiciones de seguridad. Adicionalmente, esta señal se reportó a Node-RED (DB2.DBX8.7), facilitando diagnóstico remoto de paros.

Figura 46

Piloto de paro (sistema deshabilitado)



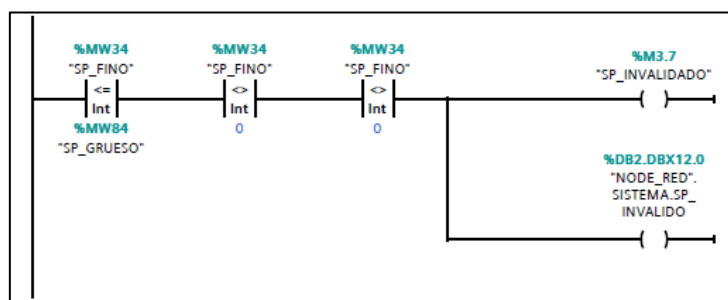
Nota. Esta red informa que el sistema está detenido o fuera de servicio.

Network 20 — Validación de setpoints y alarma de inconsistencia

A continuación, se validó la coherencia de setpoints de corte, verificando relaciones lógicas entre SP_GRUESO y SP_FINO y evitando configuraciones nulas o inválidas. En consecuencia, cuando se detectó una condición inconsistente (p. ej., valores en cero o incompatibilidad de jerarquía entre cortes), se activó SP_INVALIDADO (%M3.7) y se publicó el evento hacia Node-RED (DB2.DBX12.0), lo cual además impactó en el enclavamiento de habilitación para bloquear la operación bajo parámetros inseguros.

Figura 47

Validación de setpoints y alarma de inconsistencia



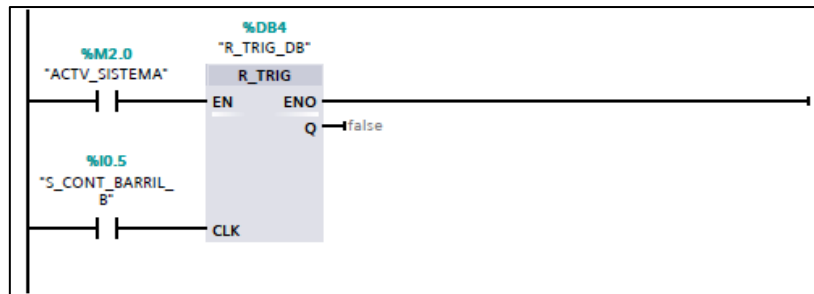
Nota. Esta red impide operar con setpoints incoherentes y fuerza una corrección previa.

Network 21 — Generación de pulso por flanco (conteo)

Posteriormente, se implementó un detector de flanco ascendente (R_TRIG) sobre el sensor de conteo S_CONT_BARRIL_B (%I0.5), habilitado por ACTV_SISTEMA. De este modo, se obtuvo un pulso único por evento físico, evitando múltiples incrementos por rebote o permanencia del sensor activado.

Figura 48

Detección de flanco para conteo de recipientes



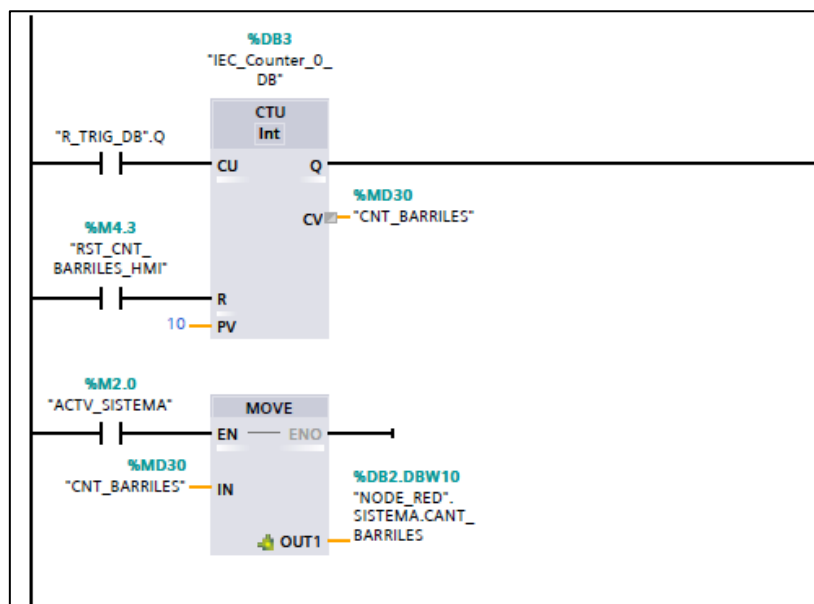
Nota. Esta red convierte una activación sostenida del sensor en un pulso unitario de conteo.

Network 22 — Conteo acumulado de barriles

En consecuencia, el pulso generado por R_TRIG alimentó un contador CTU que incrementó el total de recipientes (CNT_BARRILES %MD30) por cada unidad detectada. Asimismo, se incluyó un reset desde HMI (RST_CNT_BARRILES_HMI) y se replicó el conteo hacia Node-RED mediante DB2.DBW10, permitiendo trazabilidad del rendimiento del proceso.

Figura 49

Conteo acumulado de recipientes y envío a IoT



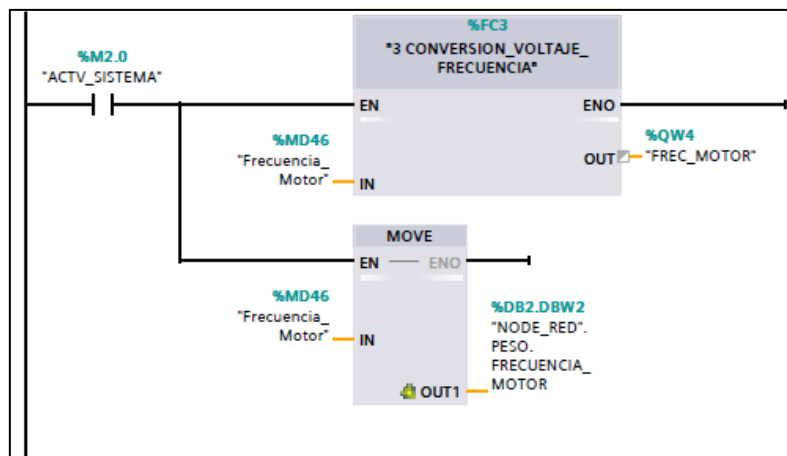
Nota. Esta red mantiene el conteo total de recipientes procesados y lo expone al sistema IoT.

Network 23 — Conversión y salida analógica de velocidad (VFD)

Se llamó al bloque FC3 (CONVERSION_VOLTAJE_FRECUENCIA) para convertir la referencia interna Frecuencia_Motor (%MD46) a la salida analógica FREC_MOTOR (%QW4), lo que permitió comandar el variador (o interfaz equivalente) con una señal proporcional. De este modo, la velocidad de la faja quedó parametrizable desde la lógica, y la referencia se publicó en Node-RED (DB2.DBW2) para supervisión y registro.

Figura 50

Conversión y salida analógica de referencia de velocidad (FC3)



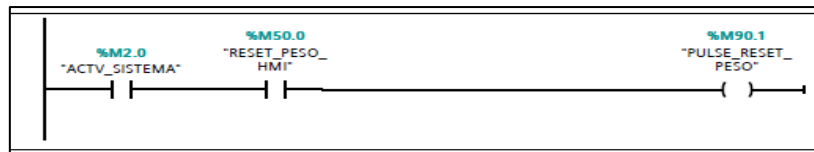
Nota. Esta red materializa el setpoint de velocidad en una señal analógica para el accionamiento.

Network 24 — Disparo de TARA/Reset de peso desde HMI

Luego, se implementó la solicitud de reset/tara desde HMI mediante **RESET_PESO_HMI (%M50.0)**, condicionada por **ACTV_SISTEMA**, generando una marca de pulso (**PULSE_RESET_PESO %M90.1**). En consecuencia, se aseguró que la operación de tara fuera explícita, controlada y fácil de integrar con la lógica de compensación de pesaje.

Figura 51

Generación de pulso de tara/reset de peso desde HMI



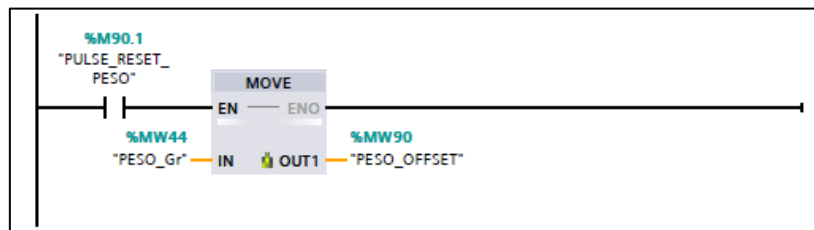
Nota. Esta red crea un pulso de “solicitud de tara” para ejecutar la compensación de peso.

Network 25 — Captura de OFFSET de tara

A continuación, cuando el pulso de reset estuvo activo, se transfirió el valor de peso actual (PESO_Gr %MW44) hacia una memoria de compensación (PESO_OFFSET %MW90). De este modo, se estableció el valor base que fue usado para corregir lecturas posteriores y obtener un peso neto coherente con “cero” operativo.

Figura 52

Captura de offset de tara (referencia de cero)



Nota. Esta red guarda el valor de referencia que se usará como tara (offset).

Network 26 — Cálculo de peso neto y publicación a Node-RED

Seguidamente, se calculó el PESO_NETO (%MW92) combinando el peso medido y el offset almacenado, implementando una compensación que permitió que la visualización/uso del peso partiera desde cero tras la tara. En consecuencia, el valor neto se publicó hacia Node-RED (p. ej., DB2.DBW0) para visualización, registro y explotación en la capa IoT.

Figura 53

Cálculo de peso neto y publicación a IoT



Nota. Esta red entrega el peso “operativo” compensado y lo envía al sistema de monitoreo.

Network 27 — Auto-tara en condición de sistema parado

Adicionalmente, se incorporó una auto-tara asociada al estado de sistema desactivado, de modo que, cuando el proceso no estaba en ejecución, se actualizó el PESO_OFFSET con la lectura vigente. De este modo, al iniciar un nuevo ciclo se redujo la deriva de cero y se favoreció que el peso neto arrancara desde un punto de referencia estable.

Figura 54

Auto-tara en condición de reposo del sistema



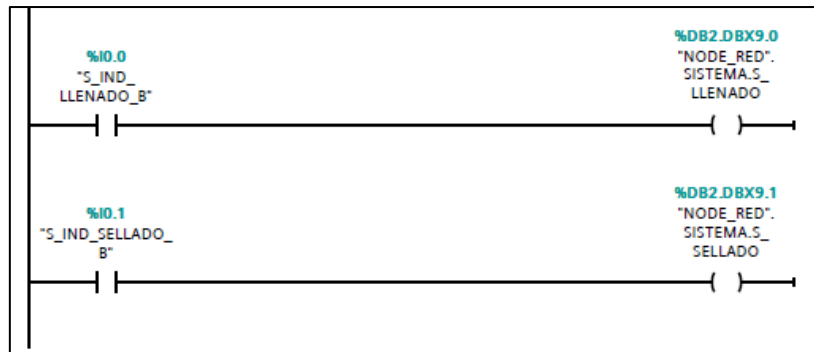
Nota. Esta red recalibra el “cero” en reposo para mejorar la estabilidad del pesaje al reiniciar.

Network 28 — Replicación de sensores de estación a Node-RED

Finalmente, se replicó el estado de los sensores de presencia de estación hacia Node-RED, mapeando S_IND_LLENADO_B (%I0.0) y S_IND_SELLADO_B (%I0.1) a marcas en el bloque de comunicación (por ejemplo, DB2.DBX9.0 y DB2.DBX9.1). En consecuencia, la pasarela IoT dispuso de señales discretas confiables para el dashboard, alarmas y trazabilidad del flujo del proceso.

Figura 55

Replicación de sensores de estación hacia IoT



Nota. Esta red expone a la supervisión remota los sensores clave de llenado y sellado.

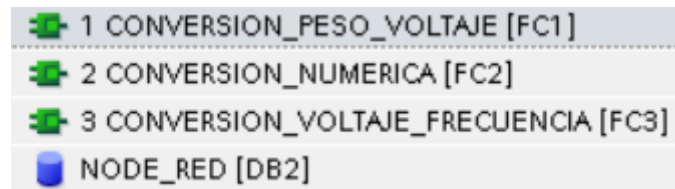
5.3.2. Etapa 2: Implementación de bloques de función para acondicionamiento de señales

En esta etapa se desarrolló la lógica de control del proceso en TIA Portal, utilizando el lenguaje Ladder (KOP) y una estructura secuencial basada en estados para coordinar el avance entre transporte, llenado/pesaje y sellado. En primer lugar, se establecieron las condiciones de habilitación del sistema (marcha/paro y criterios de seguridad), y posteriormente se implementó el tratamiento de variables críticas mediante bloques de función (FC), con el propósito de garantizar que las señales analógicas y los parámetros de operación fueran consistentes y utilizables por la secuencia. En particular, la programación incorporó:

- i. El acondicionamiento y escalado de la señal de pesaje proveniente del transmisor CAS.
- ii. La validación y conversión del tiempo de sellado a un formato compatible con temporizadores.
- iii. El mapeo de una consigna a una señal de salida analógica para referencia de velocidad; además, se previó el envío de variables seleccionadas a la estructura destinada a supervisión en Node-RED mediante la pasarela IoT2040.

Figura 56

Estructura de bloques del proyecto en TIA Portal (FC1–FC3 y DB2 Node-RED)



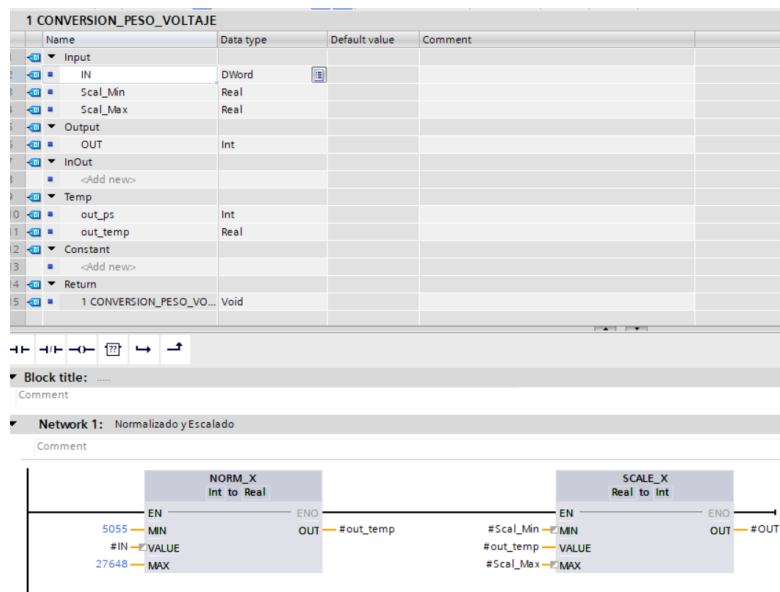
Nota. Se visualiza la organización modular del programa mediante bloques de conversión (FC) y el bloque de datos dedicado a supervisión.

FC1 – Acondicionamiento y escalado de la señal de pesaje (CONVERSION_PESO_VOLTAJE)

Con el fin de interpretar correctamente la lectura cruda proveniente de la entrada analógica del PLC, se implementó el FC1 (CONVERSION_PESO_VOLTAJE), el cual recibió la señal en formato digital y la convirtió a una magnitud escalada para control y visualización. En primer término, el bloque aplicó una normalización (NORM_X) considerando un límite inferior distinto de cero (MIN=5055), lo cual permitió compensar el offset típico presente cuando el transmisor no entregaba un valor “cero ideal” en ausencia de carga. A continuación, se ejecutó un escalado (SCALE_X) hacia unidades de ingeniería definidas por parámetros (Scal_Min y Scal_Max), entregando finalmente la variable de salida en un formato entero útil para el resto de la lógica. En la implementación del programa principal, el FC1 se invocó tomando como entrada %IW4 (ENTRADA CAS) y entregó el valor procesado como %MW44 (PESO_Gr), dejando la señal lista para las comparaciones de corte (grueso/fino) y para su publicación a supervisión.

Figura 57

FC1 – Normalización y escalado de señal de pesaje (CONVERSION_PESO_VOLTAJE)



Nota. El bloque acondiciona la entrada analógica del transmisor, aplicando normalización y escalado para obtener un valor de peso utilizable por el PLC.

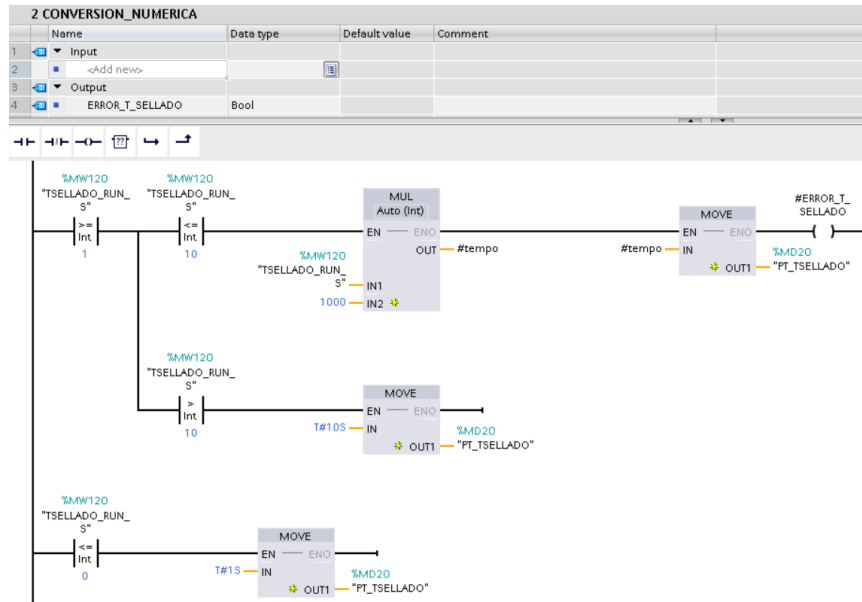
FC2 – Validación y conversión del tiempo de sellado a TIME (CONVERSION_NUMERICA)

Para asegurar un funcionamiento estable del sellado, se incorporó el FC2 (CONVERSION_NUMERICA) como un mecanismo de validación del setpoint TSELLADO_RUN_S (%MW120) y su conversión a un tiempo compatible con temporización. En consecuencia, el bloque verificó que el valor ingresado se encontrara dentro del rango permitido 1...10; si cumplió la condición, realizó la conversión multiplicando por 1000 para obtener milisegundos y almacenó el resultado en PT_TSELLADO (%MD20). Por el contrario, si el parámetro se ubicó fuera de los límites, el bloque aplicó una saturación de seguridad asignando valores extremos controlados (T#1S o T#10S) y activó una salida booleana de diagnóstico ERROR_T_SELLADO, evitando que un ajuste incorrecto degradara el comportamiento del ciclo. Este tratamiento se integró

directamente con la etapa de sellado, donde el tiempo convertido se utilizó como PT del temporizador asociado al estado de sellado.

Figura 58

FC2 – Conversión del setpoint de sellado a tiempo PT (CONVERSION_NUMERICA)



Nota. El bloque valida el rango del setpoint y lo convierte a un TIME compatible con el temporizador TON, asegurando un sellado estable.

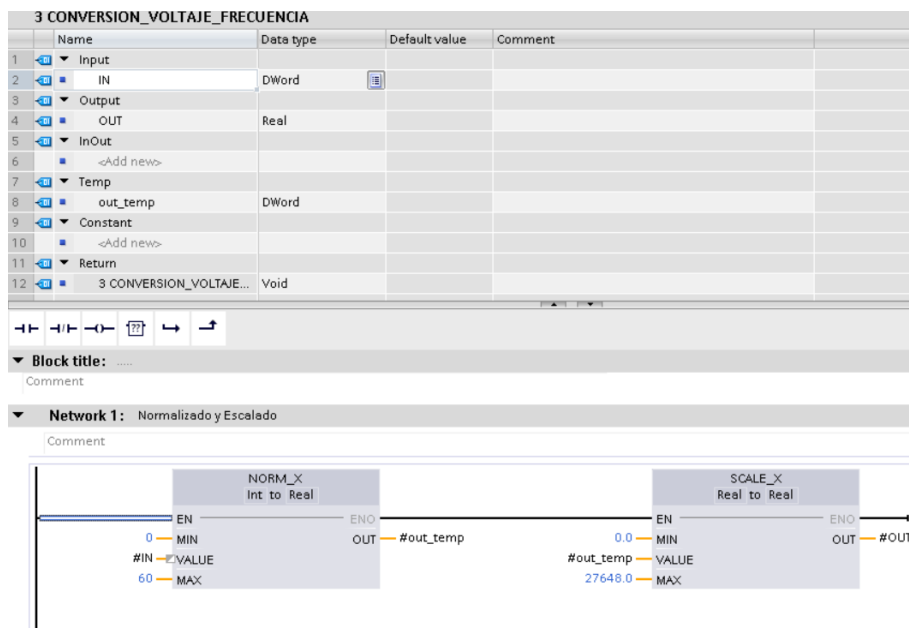
FC3 – Conversión de consigna a referencia para salida analógica (CONVERSION_VOLTAJE_FRECUENCIA)

Con el objetivo de disponer de una referencia analógica coherente para el accionamiento del motor, se implementó el FC3 (CONVERSION_VOLTAJE_FRECUENCIA), el cual transformó una consigna numérica a un valor escalado acorde con la resolución típica del sistema analógico del PLC. En primer lugar, se aplicó NORM_X para normalizar la entrada dentro de un rango definido (0...60), y, posteriormente, mediante SCALE_X, se realizó el escalado al intervalo 0...27648, equivalente a las “cuentas” de salida analógica. De este modo, la consigna quedó

acondicionada para ser utilizada como referencia de control y, paralelamente, pudo ser enviada a supervisión para contrastar el valor comandado con el comportamiento del proceso.

Figura 59

FC3 – Conversión de consigna a referencia para salida analógica (CONVERSION_VOLTAJE_FRECUENCIA)



Nota. El bloque normaliza la consigna y la escala al rango típico 0–27648 para generar una referencia analógica coherente hacia el accionamiento.

5.3.3. Etapa 3: Diseño e implementación de la interfaz HMI (KTP700) bajo ISA-101

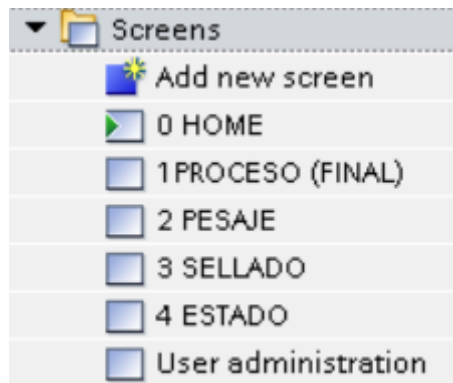
En esta etapa se diseñó e implementó la interfaz HMI en TIA Portal con el objetivo de concentrar la operación y la supervisión del proceso automatizado de llenado, pesaje y sellado. En primer lugar, la interfaz se organizó en un conjunto de pantallas funcionales que permitieron diferenciar la ejecución del ciclo, la visualización de variables críticas y la parametrización de consignas, manteniendo una navegación directa y consistente. De este modo, se garantizó que el operador dispusiera de información clara sobre el estado del sistema y de mandos puntuales que no comprometieran la integridad de la secuencia definida en el PLC.

a) Estructura y navegación de pantallas

La arquitectura de la HMI se construyó a partir de las pantallas HOME, PROCESO, PESAJE, SELLADO y ESTADO, configuradas en el entorno WinCC. En consecuencia, cada vista concentró información y acciones asociadas a una función específica: el acceso inicial y navegación (HOME), la supervisión integral del proceso (PROCESO), el monitoreo del pesaje y ajuste de consignas de corte (PESAJE), la parametrización y verificación del sellado (SELLADO) y el resumen de condiciones generales del sistema (ESTADO).

Figura 60

Estructura de pantallas del proyecto HMI

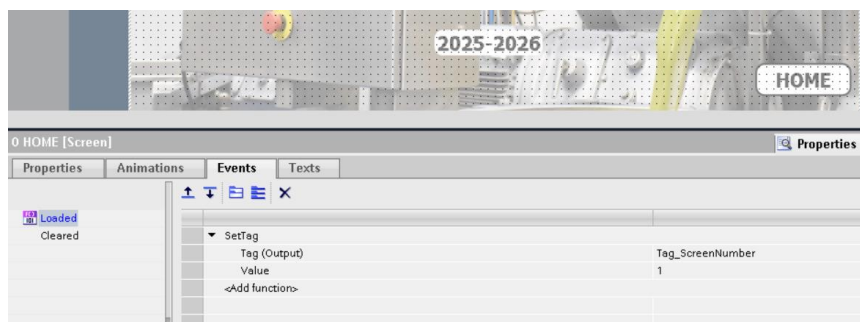


Nota. Se muestran las pantallas principales de operación y supervisión configuradas en WinCC.

Con el fin de asegurar trazabilidad de navegación y control interno, se incorporó el tag `Tag_ScreenNumber`, el cual se actualizó automáticamente al cargarse cada pantalla mediante el evento `Loaded`. En consecuencia, se obtuvo un identificador de pantalla activa que contribuyó a ordenar la lógica de interfaz y a mantener consistencia en la gestión de vistas.

Figura 61

Asignación de `Tag_ScreenNumber` en evento `Loaded`



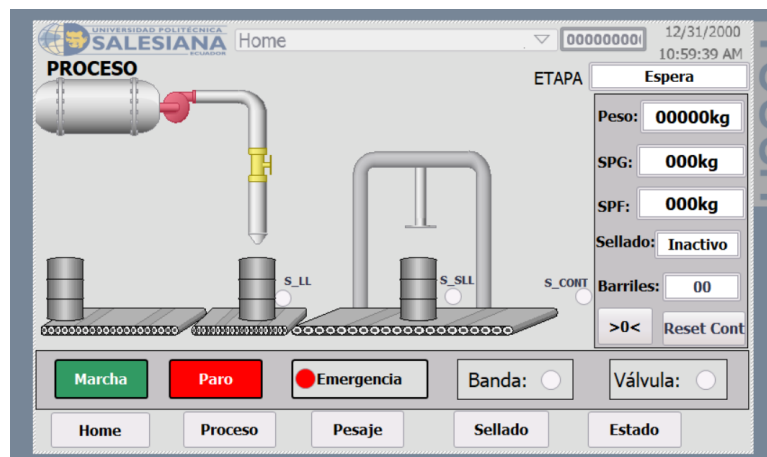
Nota. La pantalla actual se identifica mediante un tag interno para trazabilidad de navegación.

b) Diseño de operación y aplicación de criterios ISA-101

Posteriormente, las pantallas se diseñaron considerando criterios asociados a ISA-101, priorizando jerarquía visual, uniformidad de elementos y una disposición orientada al diagnóstico. En particular, la pantalla PROCESO presentó una vista global del sistema integrando variables de operación (etapa/estado, peso y setpoints), estados de entradas (sensores) y salidas (actuadores), así como mandos esenciales del ciclo (marcha/paro y condición de emergencia). De este modo, el operador interpretó el comportamiento del proceso de forma inmediata sin requerir acceso al nivel de programación del PLC.

Figura 62

Pantalla PROCESO: supervisión general y mando del ciclo



Nota. Vista global del proceso con variables críticas, entradas/salidas y comandos de operación.

De manera complementaria, la pantalla PESAJE se orientó al seguimiento del peso actual y a la gestión de los puntos de corte (SP_GRUESO y SP_FINO), permitiendo además identificar la fase de llenado (transporte, grueso, fino y asentamiento). Asimismo, se integró una advertencia visual cuando los parámetros no cumplieron la relación operativa esperada (por ejemplo, SP fino superior al SP grueso), reforzando la validación de consignas desde la interfaz y reduciendo la probabilidad de una configuración inadecuada.

Figura 63

Pantalla PESAJE: peso y consignas de corte (grueso/fino)



Nota. Supervisión del pesaje y validación de setpoints durante el llenado por etapas.

En la pantalla SELLADO, se habilitó la parametrización del tiempo de sellado y la supervisión del estado de la etapa, complementándose con indicadores de entradas y salidas relevantes. En consecuencia, el operador pudo ajustar el parámetro dentro del rango permitido y verificar el estado de activación o inactividad del sellado durante el ciclo.

Figura 64

Pantalla SELLADO: parametrización y estado del sellado

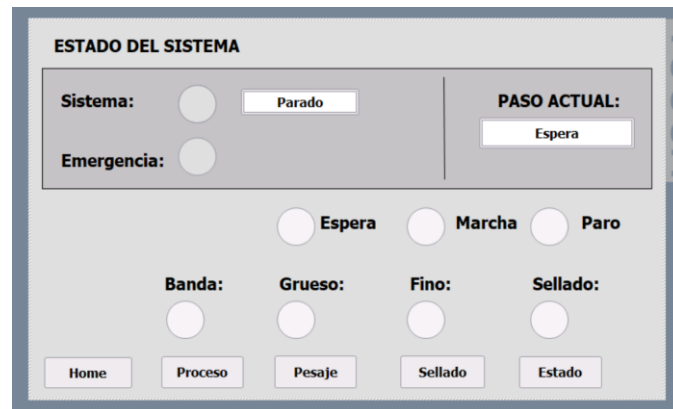


Nota. Ajuste del tiempo de sellado y visualización de entradas/salidas asociadas a la etapa.

Finalmente, la pantalla ESTADO resumió condiciones globales del sistema, tales como modo de operación, paso actual y señalización de estados/etapas, lo cual facilitó una lectura rápida durante pruebas, verificación y depuración del funcionamiento.

Figura 65

Pantalla ESTADO: resumen del estado del sistema y señales



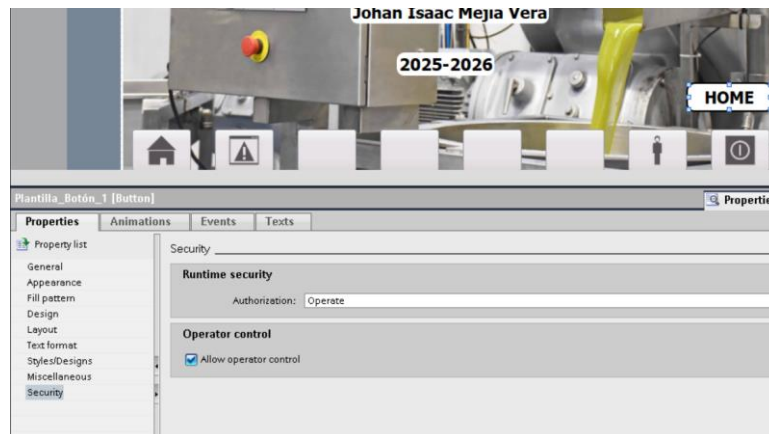
Nota. Presenta el paso actual, estado operativo y señalización de etapas/salidas.

c) Seguridad de operación y configuración de mandos

En lo relativo a seguridad operativa, los botones de navegación y control se configuraron con permisos de ejecución (por ejemplo, autorización de operación), de manera que la interfaz diferenció claramente entre objetos de visualización y elementos que efectuaron acciones directas sobre el proceso.

Figura 66

Configuración de autorización y control del operador en botones

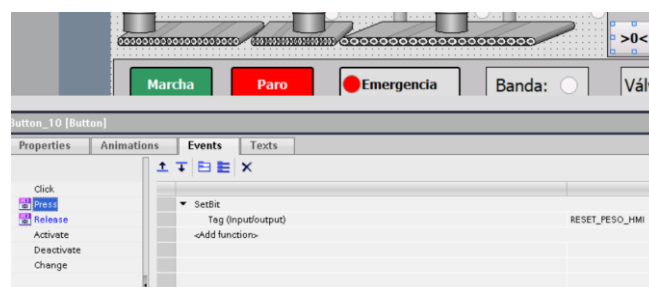


Nota. Se habilita el control de operador y permisos de ejecución para elementos de mando.

Adicionalmente, se implementaron mandos tipo pulsador momentáneo para acciones críticas. En particular, el comando RESET_PESO_HMI se configuró con eventos separados (Press y Release) para activar y desactivar el bit, evitando enclavamientos no deseados y garantizando una acción controlada sobre la función de tara/reset asociada al subsistema de pesaje. (Coloca aquí la Figura X: Press/Release → SetBit/ResetBit de RESET_PESO_HMI).

Figura 67

Pulsador momentáneo RESET_PESO_HMI (Press/Release)



Nota. El bit se activa al presionar y se libera al soltar, evitando activaciones sostenidas.

d) Definición de tags HMI y vinculación con el PLC

De forma complementaria, se definió la tabla de tags HMI vinculada al PLC, integrando variables de mando, estados, sensores, alarmas y parámetros. En consecuencia, la interfaz representó señales como ACTV_SISTEMA, MARCHA/MARCHA_HMI,

PARO/PARO_HMI, EMERGENCIA, PESO_Gr/PESO_NETO, SP_GRUESO/SP_FINO, SELLADO y el STEP del secuenciador, asegurando coherencia entre el control implementado en Ladder y la supervisión presentada al operador en el panel.

Figura 68

Tabla de tags HMI vinculados al PLC (parte 1)

HMI tags						
Name	Tag table	Data type	Connection	PLC name	PLC tag	
ACTV_SISTEMA	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	ACTV_SISTEMA	ACTV_SISTEMA
C_FINAL	Default tag table	Int	HMI_Connectio...	PLC_1	C_FINAL	C_FINAL
C_SELLADO	Default tag table	Int	HMI_Connectio...	PLC_1	C_SELLADO	C_SELLADO
C_TSELLADO	Default tag table	Int	HMI_Connectio...	PLC_1	C_TSELLADO	C_TSELLADO
C_VALVULA	Default tag table	Int	HMI_Connectio...	PLC_1	C_VALVULA	C_VALVULA
CNT_BARRILES	Default tag table	Dint	HMI_Connectio...	PLC_1	CNT_BARRILES	CNT_BARRILES
EMERGENCIA	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	EMERGENCIA	EMERGENCIA
EMERGENCIA_HMI	Default tag table	Bool	HMI_Conne...	PLC_1	EMERGENCIA_HMI	EMERGENCIA_HMI
FAJA_TRANSPORTADORA	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	FAJA_TRANSPORTADORA	FAJA_TRANSPORTADORA
MARCHA	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	MARCHA	MARCHA
MARCHA_HMI	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	MARCHA_HMI	MARCHA_HMI
MOV_INIT	Default tag table	Int	HMI_Connectio...	PLC_1	MOV_INIT	MOV_INIT
NombreUsuario	Default tag table	WString	<Internal tag>		<Undefined>	<Undefined>
PARO	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	PARO	PARO
PARO_HMI	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	PARO_HMI	PARO_HMI
PESO_Gr	Default tag table	Int	HMI_Connectio...	PLC_1	PESO_Gr	PESO_Gr
PESO_NETO	Default tag table	Int	HMI_Connectio...	PLC_1	PESO_NETO	PESO_NETO
PILOTO_ESPERA	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	PILOTO_ESPERA	PILOTO_ESPERA
PILOTO_MARCHA	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	PILOTO_MARCHA	PILOTO_MARCHA
PILOTO_PARO	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	PILOTO_PARO	PILOTO_PARO
PT_TSELLADO	Default tag table	Time	HMI_Connectio...	PLC_1	PT_TSELLADO	PT_TSELLADO
RESET_PESO_HMI	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	RESET_PESO_HMI	RESET_PESO_HMI
RST_CNT_BARRILES_HMI	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	RST_CNT_BARRILES_HMI	RST_CNT_BARRILES_HMI
S_CNT_BARRIL_B	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	S_CNT_BARRIL_B	S_CNT_BARRIL_B
S_IND_LLENADO	Default tag table	Int	HMI_Connectio...	PLC_1	S_IND_LLENADO	S_IND_LLENADO

Nota. Variables de mando, estados y mediciones principales utilizadas por la interfaz.

A continuación, en la Figura 67 se observa la segunda parte de las variables.

Figura 69

Tabla de tags HMI vinculados al PLC (parte 2)

HMI tags						
Name	Tag table	Data type	Connection	PLC name	PLC tag	
S_IND_LLENADO_B	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	S_IND_LLENADO_B	S_IND_LLENADO_B
S_IND_SELLADO_B	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	S_IND_SELLADO_B	S_IND_SELLADO_B
SELLADO	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	SELLADO	SELLADO
SP_FINO	Default tag table	Int	HMI_Connectio...	PLC_1	SP_FINO	SP_FINO
SP_GRUESO	Default tag table	Int	HMI_Connectio...	PLC_1	SP_GRUESO	SP_GRUESO
SP_INVALIDADO	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	SP_INVALIDADO	SP_INVALIDADO
SP_TSELLADO_S	Default tag table	Int	HMI_Connectio...	PLC_1	SP_TSELLADO_S	SP_TSELLADO_S
STEP	Default tag table	Int	HMI_Connectio...	PLC_1	STEP	STEP
STEP30	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	STEP30	STEP30
STEP40	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	STEP40	STEP40
Tag_ScreenNumber	Default tag table	UInt	<Internal tag>		<Undefined>	<Undefined>
TSELLADO_RUN_S	Default tag table	Int	HMI_Connectio...	PLC_1	TSELLADO_RUN_S	TSELLADO_RUN_S
VALVULA_SALIDA	Default tag table	Bool	HMI_Connectio...	PLC_1	VALVULA_SALIDA	VALVULA_SALIDA

Nota. Setpoints, banderas de etapa y variables complementarias de supervisión.

5.3.4. Etapa 4: Configuración de la pasarela IoT2040

En esta etapa se configuró la pasarela SIMATIC IOT2040 como capa de adquisición y supervisión, con el propósito de visualizar en tiempo real las variables del proceso y registrar eventos relevantes durante el ciclo de llenado, pesaje y sellado. En primer lugar, se definió un modelo de datos en el PLC mediante un bloque de datos dedicado a la pasarela, con el fin de centralizar señales de proceso, consignas, estados y alarmas en una única estructura. Posteriormente, se implementó en Node-RED el flujo de lectura, acondicionamiento y publicación de estas variables hacia un panel tipo dashboard, garantizando consistencia entre el control ejecutado en el PLC y la supervisión presentada al usuario.

a) Estructuración del intercambio de datos PLC → Pasarela (DB2)

Como base de la integración, se empleó el bloque DB2 “NODE_RED”, el cual agrupó variables del proceso en dos estructuras principales: PESO y SISTEMA. De este modo, se dispuso de campos específicos para el valor de peso (PESO_KG), frecuencia del motor, setpoints de corte y banderas de estado (por ejemplo, ACTV_SISTEMA, LLENADO_GRUESO, LLENADO_FINO, BANDA, SELLADO y VALVULA), además de señales de sensores y variables de diagnóstico como SP_INVALIDO y ERROR_SELLADO.

Figura 70

Estructura del DB2 “NODE_RED” para enlace PLC–Node-RED

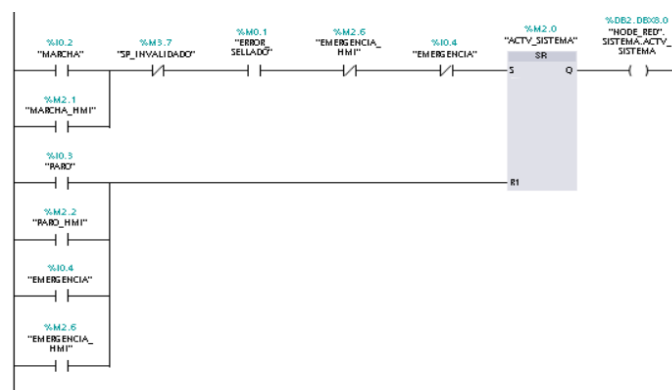
NODE_RED										
	Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessible ...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	S
1	Static									
2	PESO	Struct	0.0			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
3	PESO KG	Int	0.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
4	FRECUENCIA_MOT...	Int	2.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
5	SP_GRUESO	Int	4.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
6	SP_FINO	Int	6.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
7	SISTEMA	Struct	8.0			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
8	ACTV_SISTEMA	Bool	8.0	false		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
9	LLENADO_GRUESO	Bool	8.1	false		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
10	LLENADO_FINO	Bool	8.2	false		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
11	BANDA	Bool	8.3	false		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
12	SELLADO	Bool	8.4	false		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
13	VALVULA	Bool	8.5	false		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
14	ESPERA	Bool	8.6	false		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
15	PARO	Bool	8.7	false		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
16	S_LLENADO	Bool	9.0	false		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
17	S_SELLADO	Bool	9.1	false		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
18	CANT_BARRILES	Int	10.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
19	SP_INVALIDO	Bool	12.0	false		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
20	ERROR_SELLADO	Bool	12.1	false		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		

Nota. Se muestra la organización de variables en PESO y SISTEMA, incluyendo offsets para supervisión.

La lógica Ladder actualizó de forma explícita estos campos del DB para que la pasarela consumiera datos ya “listos para supervisión”. Por ejemplo, se publicaron al DB2 las consignas de corte SP_GRUESO y SP_FINO, así como el estado general ACTV_SISTEMA, asegurando que el dashboard reflejara el mismo criterio operativo utilizado por el secuenciador del PLC.

Figura 71

Publicación del estado ACTV_SISTEMA hacia el DB2 para supervisión en Node-RED

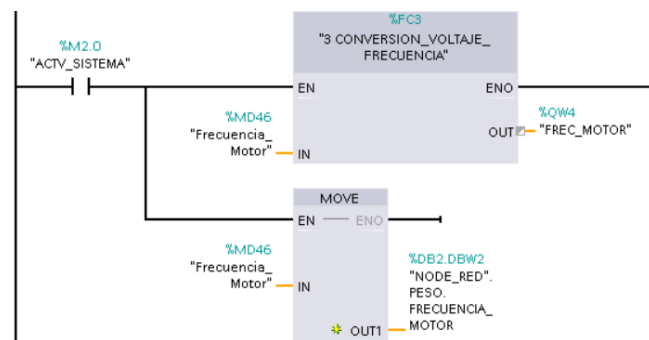


Nota. El enclavamiento de marcha/paro/emergencia gobierna ACTV_SISTEMA y replica su estado en DB2.DBX8.0 como variable base de monitoreo.

De manera complementaria, el peso visualizado y registrado se tomó del PESO_NETO calculado por el PLC y se transfirió al campo PESO_KG del DB2; además, la referencia de frecuencia del motor se publicó en FRECUENCIA_MOTOR y el conteo acumulado se envió a CANT_BARRILES.

Figura 72

Conversión de consigna a salida analógica y envío de frecuencia a Node-RED (FC3)



Nota. El bloque FC3 acondiciona la referencia de frecuencia para la salida analógica %QW4 y, adicionalmente, transfiere el valor a DB2.DBW2 para su visualización en el dashboard.

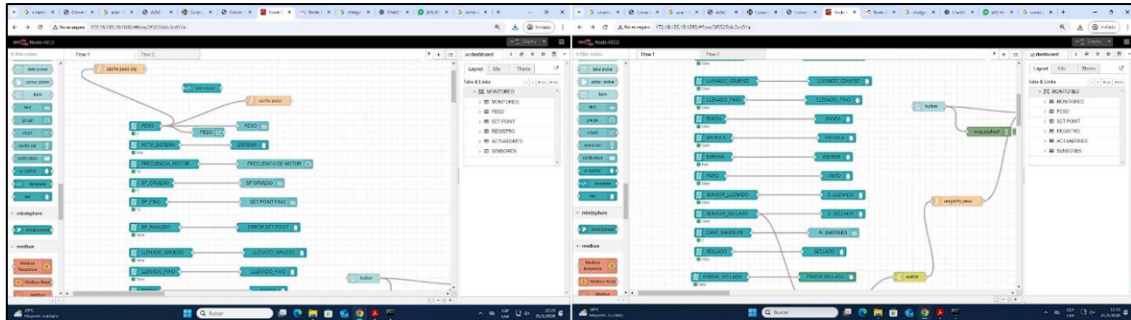
Finalmente, las señales de sensores empleadas en la secuencia (por ejemplo, presencia en llenado y sellado) se reflejaron también en el DB2, lo cual permitió correlacionar eventos físicos con la evolución del proceso en el dashboard.

b) Implementación del flujo en Node-RED (adquisición y distribución)

A continuación, en la pasarela IoT2040 se construyó el flujo de Node-RED para leer cíclicamente las variables publicadas por el PLC en DB2 y distribuirlas a los distintos elementos de interfaz. En este punto, la lógica se organizó por señales (peso, setpoints, estados, actuadores y sensores), de forma que cada variable alimentó un indicador específico (texto, LED, gauge o tendencia), manteniendo una separación funcional que facilitó el mantenimiento y la depuración durante pruebas.

Figura 73

Flujo Node-RED para adquisición y distribución de variables del proceso



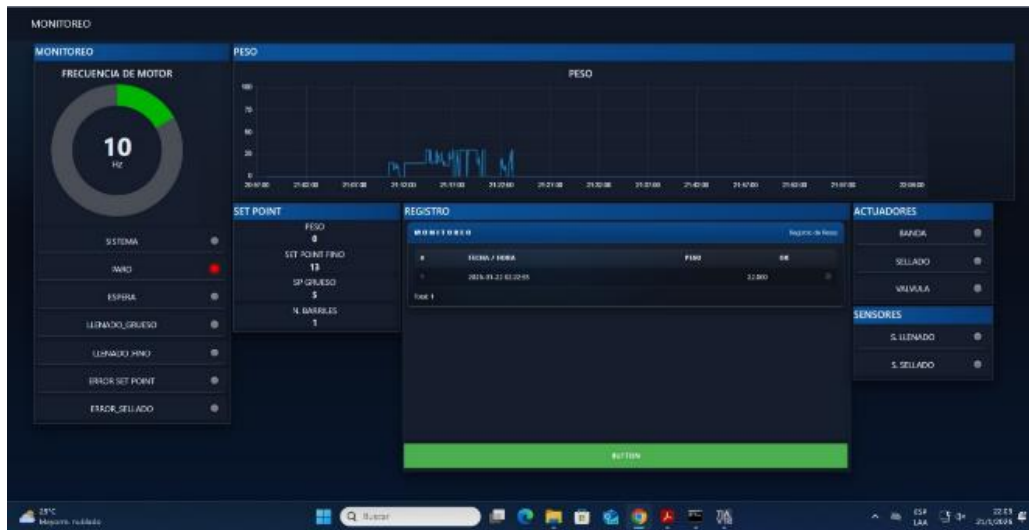
Nota. Se muestra la lectura de señales del PLC y su asignación a indicadores del dashboard, incluyendo estados del ciclo, actuadores, sensores y variables principales.

c) Supervisión y registro de eventos (tendencias y tabla)

Adicionalmente, se implementó una lógica de registro de peso orientada a eventos, con el objetivo de almacenar una muestra del peso junto con su marca de tiempo cuando ocurrió una condición de disparo (por ejemplo, un pulso/confirmación del PLC). Para ello, se emplearon nodos de acondicionamiento (p. ej., filtrado de cambios y conmutación por condición) y una función de registro que consolidó el dato antes de insertarlo en la tabla del dashboard. En consecuencia, el sistema no solo mostró el valor instantáneo, sino que conservó un histórico mínimo para análisis y verificación del proceso.

Figura 75

Dashboard de supervisión del proceso en Node-RED (IoT2040)



Nota. Interfaz de monitoreo que integra tendencia de peso, setpoints, registro histórico e indicadores de actuadores y sensores para validar el comportamiento del proceso.

Con base en las etapas descritas, la metodología del proyecto quedó estructurada de manera secuencial y verificable: en primer lugar, se implementó la lógica de control en el PLC mediante programación Ladder y bloques de funciones para acondicionamiento de señales y parametrización; posteriormente, se diseñó la interfaz HMI bajo criterios ISA-101 para operación y supervisión; y, finalmente, se configuró la pasarela IoT2040 con Node-RED para la adquisición, visualización y registro de variables del proceso. En consecuencia, se estableció un marco metodológico que permitió ejecutar la simulación del sistema y preparar la evidencia experimental y de validación que se presentó en el capítulo de resultados.

6. RESULTADOS

En el presente apartado se expusieron, de manera sistemática y sustentada en evidencias de prueba, los resultados obtenidos a partir de las evaluaciones realizadas en el Laboratorio de Automatización Industrial II, utilizando módulos didácticos integrados por un PLC Siemens S7-1500 y una pasarela industrial SIMATIC IOT2040. En primer término, se analizó el comportamiento global de la propuesta “Diseño y simulación de un proceso de llenado, pesaje y sellado de recipientes para lubricantes industriales mediante PLC, HMI y pasarela IOT2040”, verificando su ejecución conforme a la secuencia operativa establecida. Posteriormente, se comprobó el cumplimiento de las transiciones entre etapas y de las condiciones de habilitación, con la finalidad de garantizar consistencia entre el diseño lógico implementado, la simulación desarrollada y la respuesta observada durante la operación.

Asimismo, se validó el desempeño del subsistema de pesaje mediante la verificación de estabilidad de lectura, coherencia de la variable de proceso y respuesta del control ante escenarios operativos previstos, tales como variaciones de carga y acciones de reinicio/tara. De forma complementaria, se corroboró la integridad del intercambio de datos entre el PLC S7-1500 y la pasarela IOT2040, considerando que dicha interconexión resultó determinante para la adquisición, disponibilidad y trazabilidad de la información del proceso. Finalmente, se verificó la vinculación de la pasarela con el entorno de supervisión basado en Node-RED, constatando la visualización en tiempo real, el seguimiento del estado de las etapas y el registro de variables en el dashboard, lo cual permitió una verificación global del comportamiento del sistema automatizado.

6.1. Entorno de pruebas e implementación en laboratorio

En esta sección se describieron las condiciones bajo las cuales se efectuó la verificación experimental del sistema automatizado. Las pruebas se ejecutaron en el Laboratorio de Automatización Industrial II, empleando un módulo didáctico basado en un PLC Siemens S7-1500 y una HMI KTP700 Basic, complementado con una pasarela SIMATIC IOT2040 para supervisión mediante Node-RED. En primer lugar, el PLC se utilizó como unidad de control determinista para ejecutar la secuencia por etapas (STEP), mientras que la HMI se empleó como interfaz de operación para parametrización y monitoreo del proceso. De manera complementaria, la pasarela IOT2040 se destinó a la adquisición de variables desde el PLC y a su presentación en un dashboard de supervisión.

Respecto a la implementación física, el subsistema validado en laboratorio correspondió principalmente al pesaje, integrado por una celda de carga y el transmisor de peso CAS WTM-300, cuyo valor fue interpretado por el PLC para calcular el peso neto y aplicarlo dentro de la lógica de control. Adicionalmente, se implementó el accionamiento de un motor utilizado como representación del movimiento de una faja transportadora, operando a 10 Hz fijos, y se emplearon dos sensores inductivos para simular confirmaciones de presencia en estaciones del proceso. En consecuencia, el entorno experimental permitió comprobar el comportamiento del control y su coherencia con la supervisión, aun cuando las etapas de llenado y sellado se mantuvieron en modo simulado dentro del entorno de programación.

Como se observa en la Figura 75 la implementación completa en el módulo didáctico en el laboratorio de Automatización Industrial 2.

Figura 76

Implementación completa en el laboratorio

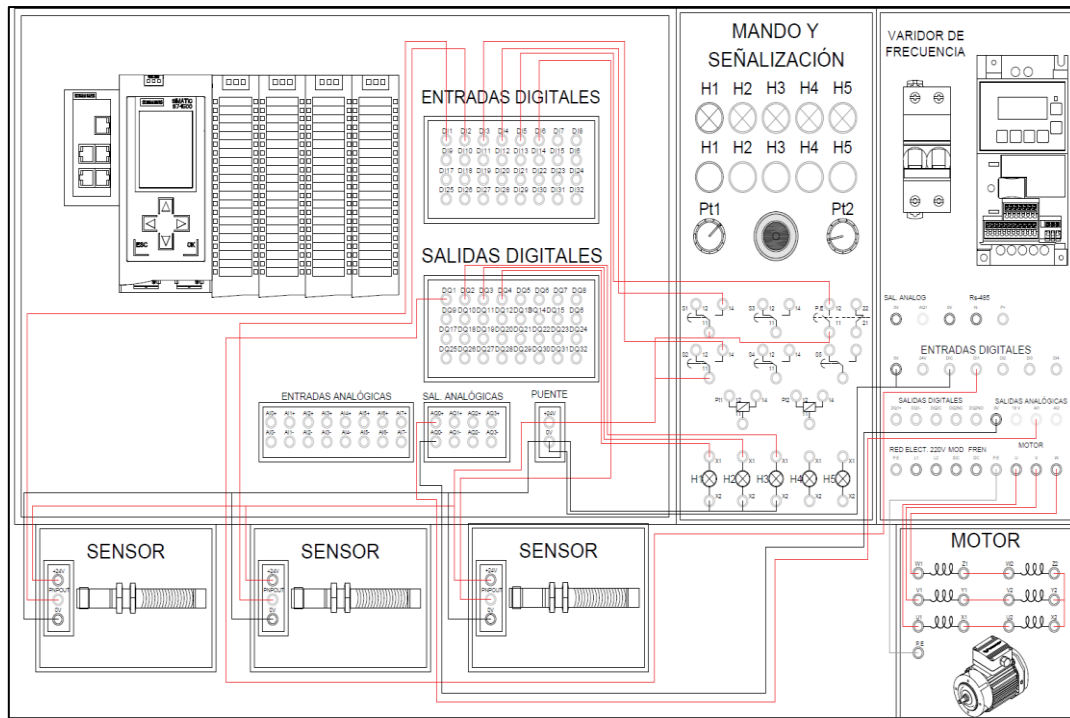


Nota. Se observa la implementación del proyecto en el módulo del laboratorio de automatización 2

En la Figura 77 se presentó la interconexión general implementada en el módulo didáctico del Laboratorio de Automatización 2. En primer lugar, el esquema consolidó la distribución de alimentación, referencias comunes y ruteo de señales entre el PLC, los dispositivos de campo y los equipos de potencia, lo cual permitió visualizar el sistema como un conjunto integrado. Así mismo, se identificaron las trayectorias de cableado asociadas a entradas/salidas y su correspondencia con bornes y terminales, garantizando coherencia entre el diseño y el montaje físico. En consecuencia, este plano funcionó como guía de verificación para validar continuidad, polaridades y asignación de señales antes de la puesta en marcha.

Figura 77

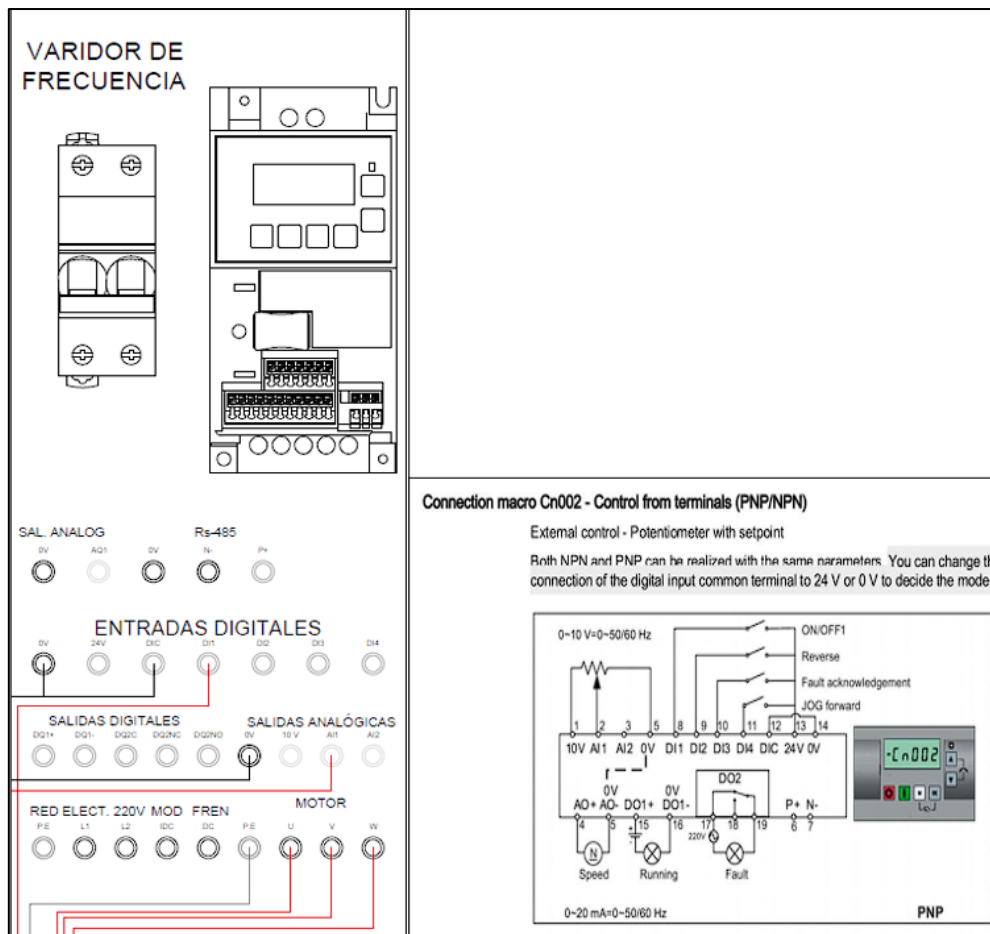
Esquema de la conexión realizada



En la siguiente Figura 78, la conexión asociada al variador de frecuencia SINAMICS V20 se describió de forma independiente debido a que concentró la interfaz principal de mando y potencia del accionamiento. En particular, se empleó la conexión macro CN002, ya que esta configuración permitió estandarizar el cableado del variador, integrando las señales necesarias para la habilitación y control del equipo desde el sistema de automatización. De este modo, se redujo la probabilidad de errores de conexión y se mejoró la facilidad de diagnóstico durante las pruebas en laboratorio.

Figura 78

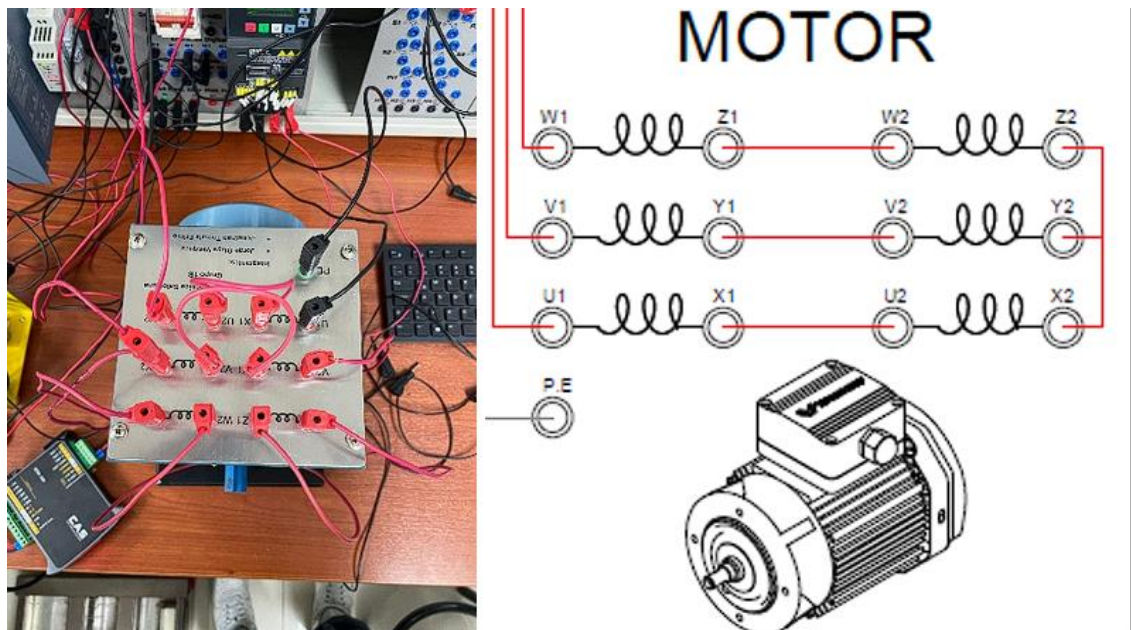
Conexión Macro Cn002



En la Figura 79, la conexión del motor trifásico se detalló por separado debido a su influencia directa en el comportamiento del accionamiento. En este caso, el motor se configuró en estrella, considerando que el ensayo se ejecutó a una frecuencia constante de 10 Hz, lo cual favoreció una operación estable bajo las condiciones de práctica definidas. En consecuencia, esta disposición mantuvo coherencia entre el esquema, el montaje físico y los parámetros de operación establecidos para el módulo.

Figura 79

Conexión estrella realizada en el motor trifásico



6.2. Resultados del subsistema de pesaje (WTM-300 + PLC)

En relación con el subsistema de pesaje, las pruebas permitieron verificar que la señal proveniente del transmisor CAS WTM-300 fue adquirida por el PLC y transformada a una variable de proceso utilizable para supervisión y control. En primer lugar, se constató que el valor de peso mostrado en la interfaz se mantuvo coherente con el comportamiento esperado ante variaciones de carga, lo cual evidenció que el acondicionamiento y la conversión aplicada en el PLC permitió interpretar de manera consistente la lectura entregada por el transmisor. Asimismo, la variable de peso neto se utilizó como referencia para el monitoreo del proceso, garantizando que el valor difundido hacia HMI y pasarela correspondiera al dato efectivamente empleado por el control.

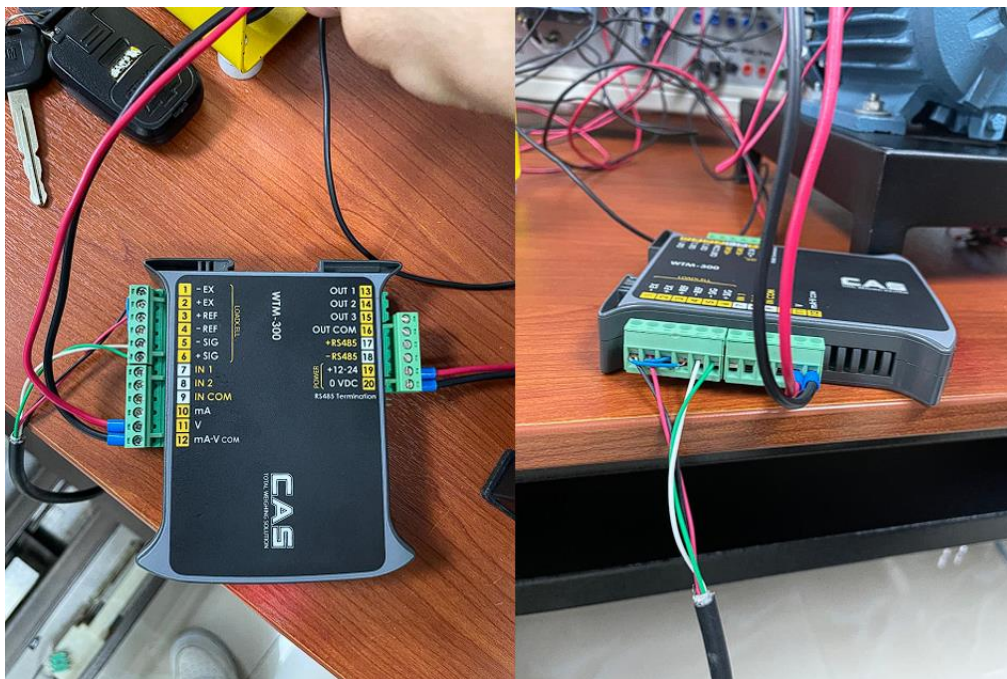
De forma complementaria, se comprobó que el sistema respondió a acciones operativas asociadas al pesaje, tales como reinicio/tara (cuando aplica), y que la lectura se mantuvo estable durante la ejecución del ciclo, sin generar fluctuaciones que comprometieran la lógica de corte por setpoints. En consecuencia, el subsistema de pesaje quedó validado

como fuente principal de realimentación para la toma de decisiones del proceso, particularmente en la comparación contra SP_GRUESO y SP_FINO, y como variable clave para su trazabilidad en la capa de supervisión.

Para la implementación del subsistema de pesaje, el transmisor CAS WTM-300 fue alimentado mediante una fuente 24 Vdc, conectando +24 V al borne 19 (+12–24 Vdc) y el 0 V al borne 20 (0 Vdc). Adicionalmente, se integró una celda de carga de 4 hilos, cableada en el bloque “LOADCELL” utilizando las terminales de excitación –EX (1) y +EX (2) y las terminales de señal –SIG (5) y +SIG (6); en consecuencia, al no disponer de líneas de referencia/sense, los bornes ±REF (3–4) se mantuvieron sin conexión conforme a la configuración de 4 hilos indicada por el fabricante. Finalmente, la adquisición en el PLC se realizó mediante salida analógica en 0–10 V, conectando el borne 11 (V) hacia AI0+ y el borne 12 (mA-V COM) hacia AI0, permitiendo el escalado posterior a unidades de ingeniería para supervisión y control.

Figura 80

Conexión del transmisor de peso CAS WTM-300



6.3. Resultados de la secuencia operativa y lógica de control (STEP)

En esta sección se presentaron los resultados asociados a la validación de la secuencia operativa implementada mediante un esquema por etapas (STEP). En primer lugar, se verificó que el sistema ejecutó el ciclo de forma ordenada, asegurando la transición entre fases únicamente cuando se cumplieron las condiciones de habilitación, seguridad y confirmación por sensores. Posteriormente, se comprobó que las acciones de proceso; transporte, llenado por corte grueso y fino, sellado temporizado y retorno a espera; se activaron de manera coherente con la lógica de control, manteniendo trazabilidad mediante banderas de estado y señales publicadas para supervisión en HMI y Node-RED. En consecuencia, la secuencia validada evidenció correspondencia entre la lógica determinista del PLC y el comportamiento esperado del proceso automatizado.

6.3.1. Arranque/paro/emergencia (habilitación del sistema)

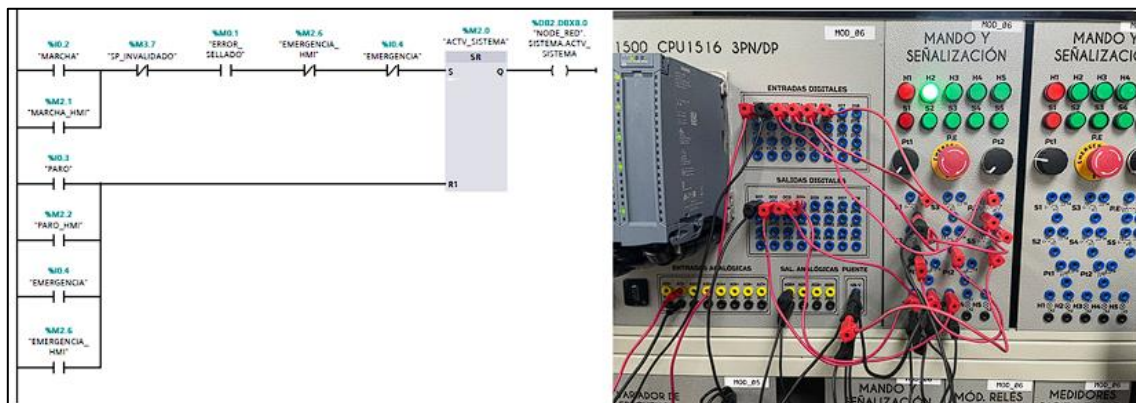
Durante la fase de pruebas se evidenció que el arranque del ciclo estuvo dominado a una habilitación general del sistema, implementada en el PLC mediante un enclavamiento SR asociado a la variable ACTV_SISTEMA (%M2.0). En primer término, la habilitación se estableció cuando se recibió la orden de marcha desde la botonera (%I0.2) o desde la HMI (%M2.1); sin embargo, dicha activación únicamente se permitió si el proceso se encontró en condiciones válidas, es decir, sin bloqueos activos como SP_INVALIDADO (%M3.7) y con el circuito de seguridad en estado correcto, incluyendo la señal de emergencia física y/o desde HMI. De esta manera, una vez que el sistema quedó habilitado, el controlador mantuvo el estado de operación para garantizar continuidad y estabilidad en la ejecución de la secuencia.

Por otro lado, como se ilustra en la Figura 81; cuando se accionó paro (%I0.3) o paro desde HMI (%M2.2), o bien cuando se presentó una condición de emergencia, se comprobó que el enclavamiento fue reseteado de forma inmediata, lo que inhibió la ejecución del ciclo y

forzó el retorno a un estado seguro. En consecuencia, la lógica de arranque/paro/emergencia actuó como el principal filtro de seguridad y control, ya que evitó que el proceso continuara bajo condiciones no permitidas y aseguró que la operación se mantuviera únicamente mientras los requisitos de integridad del sistema se encontraran satisfechos. Adicionalmente, el estado de habilitación se replicó hacia la capa de supervisión (por ejemplo, DB2.DBX8.0) para mantener coherencia entre el mando físico, la lógica del PLC y la visualización en HMI/Node-RED.

Figura 81

Programación que habilita y pone en marcha el sistema



Nota. La habilitación del proceso se implementa con un enclavamiento SR: MARCHA (%I0.2) / MARCHA_HMI (%M2.1) activan ACTV_SISTEMA (%M2.0) si no existen bloqueos (p. ej., SP_INVALIDADO %M3.7) y si el circuito de emergencia se encuentra en estado seguro (E_STOP_OK). El reset se ejecuta por PARO (%I0.3) / PARO_HMI (%M2.2) o condición de emergencia, y el estado se replica en DB2.DBX8.0 para supervisión.

6.3.2. Transporte a estación (motor) y confirmación por sensor

Posteriormente, se validó la etapa de transporte hacia la estación, en la cual el motor del sistema representó el desplazamiento de la faja transportadora. Durante la ejecución del ciclo se comprobó que la orden de transporte se activó al inicio de la secuencia y se mantuvo estable mientras no existiera confirmación de llegada, lo que aseguró un desplazamiento continuo y controlado. A continuación, cuando el sensor inductivo de estación detectó la presencia del recipiente, dicha señal se interpretó como condición de confirmación; en consecuencia, el PLC deshabilitó el motor e inmediatamente habilitó la transición hacia la siguiente fase del proceso, evitando cambios de etapa sin verificación física y reduciendo la posibilidad de solapamiento de acciones. Asimismo, para fines de repetibilidad en el entorno de pruebas, el motor se operó con frecuencia fija de 10 Hz, lo cual permitió observar un comportamiento consistente en cada ciclo y comparar de forma directa la respuesta entre arranque, desplazamiento y detención. Este comportamiento pudo apreciarse en la Figura 81, donde la HMI reflejó el estado del transporte y la confirmación de la estación asociada al sensor.

Figura 82

Activación del sensor de llenado



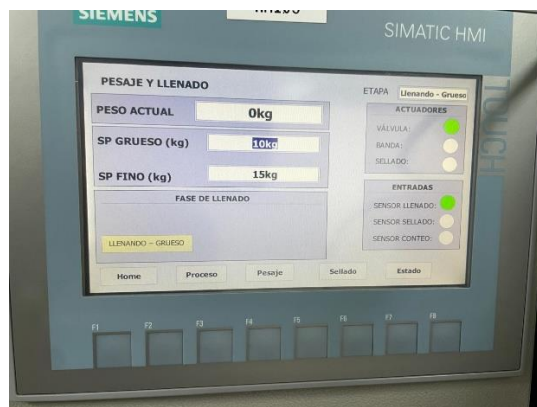
Nota. Se observa la activación del sensor de llenado y que el motor se detiene para llenar y a pesar.

6.3.3. Llenado con corte grueso (SP_GRUESO)

A continuación, se verificó la fase de llenado con corte grueso, en la cual la válvula de descarga permaneció habilitada con el objetivo de alcanzar el primer umbral de dosificación. En primer término, se constató que esta etapa se habilitó únicamente cuando el sistema recibió la confirmación de presencia del recipiente en la estación de llenado, evitando que el llenado se ejecutara sin condición física de proceso. Posteriormente, el PLC utilizó la señal de pesaje como realimentación y realizó de forma continua la comparación entre el peso actual y la consigna SP_GRUESO, manteniendo el actuador de válvula activo mientras la variable de proceso no alcanzara el valor programado. En consecuencia, una vez que el peso igualó o superó el setpoint de corte grueso, el controlador deshabilitó el llenado en este modo y efectuó la transición hacia la fase siguiente, asegurando un avance secuencial basado en medición y minimizando desviaciones por sobrellenado. Este comportamiento se apreció en la Figura 82, donde la HMI indicó la etapa “Llenando – Grueso”, presentó los valores de SP_GRUESO y SP_FINO, y reflejó el estado de los actuadores y señales de entrada asociados al proceso.

Figura 83

Punto de corte grueso



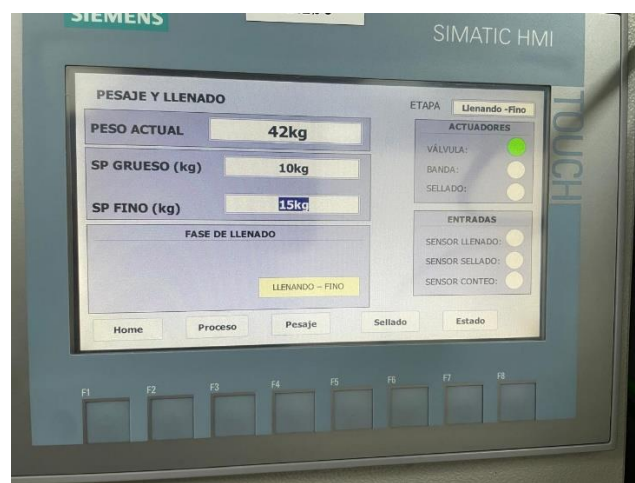
Nota. La pantalla de HMI muestra la etapa “Llenando–Grueso”, con visualización del peso y consignas; el corte se ejecuta cuando el peso alcanza SP_GRUESO, habilitando la transición a la siguiente fase.

6.3.4. Llenado con corte fino (SP_FINO)

De forma complementaria, se validó la etapa de llenado con corte fino, la cual actuó como mecanismo de ajuste para alcanzar la dosificación final con mayor precisión. En primer término, se comprobó que, una vez cumplida la condición de corte grueso (SP_GRUESO), el PLC conmutó el modo de control y habilitó el llenado fino con el propósito de aproximarse al setpoint final (SP_FINO) reduciendo el caudal efectivo. En este contexto, el actuador de válvula no permaneció energizado de forma continua, sino que operó mediante conmutaciones controladas (por ejemplo, pulsos asociados a temporización), lo que disminuyó el riesgo de sobrepaso y mejoró la estabilidad del punto de corte. En consecuencia, cuando el peso alcanzó o superó SP_FINO, el controlador inhibió la válvula y dejó preparada la transición hacia el transporte a la estación de sellado, manteniendo el criterio de avance estrictamente dependiente de la realimentación de pesaje. Este comportamiento se apreció en la Figura 83, donde la HMI indicó la etapa “Llenando – Fino”, visualizó el peso actual y los valores de consigna, además del estado del actuador asociado al llenado.

Figura 84

Punto de corte fino



Nota. La HMI evidencia el modo “Llenando–Fino”; el PLC conmuta a este régimen tras SP_GRUESO y detiene la válvula cuando el peso alcanza SP_FINO para continuar con la siguiente etapa.

6.3.5. Transición a sellado y temporización (TSELLADO)

Una vez finalizada la dosificación, se validó la transición hacia la etapa de sellado y el funcionamiento de su control temporizado. En primer término, el sistema habilitó nuevamente el transporte para desplazar el recipiente hasta la estación de sellado; posteriormente, al recibir la confirmación de llegada mediante el sensor inductivo de sellado, el PLC inhibió el movimiento y habilitó la etapa correspondiente, evitando que el sellado se ejecutara sin presencia confirmada. A continuación, se comprobó que la salida de SELLADO operó bajo un esquema temporizado, donde el tiempo de operación se definió mediante el parámetro ajustable TSELLADO (en segundos) desde la interfaz. De este modo, el valor ingresado fue previamente validado (acotado a un rango permitido) y luego convertido a un formato temporal compatible con el temporizador del PLC, garantizando una ejecución repetible. En consecuencia, el sellado se mantuvo activo durante el intervalo configurado y, al cumplirse el tiempo, el sistema deshabilitó la salida y avanzó hacia la condición de fin de ciclo/espera, manteniendo la secuencia bajo criterios de confirmación por sensor y control por temporización. Este comportamiento se apreció en la Figura 84, donde se observó la pantalla de “Transporte a sellado” y, posteriormente, el estado “Sellando” con la indicación de sellado activo y el tiempo configurado.

Figura 85

Temporización de Sellado



Nota. La HMI evidencia la transición a la estación de sellado por sensor y la activación del sellado bajo temporización; el parámetro TSELLADO se ajusta en segundos y se convierte internamente para controlar la duración del actuador.

6.3.6. Conteo y retorno a espera

Finalmente, se validó el cierre del ciclo y el retorno del sistema a condición de espera, junto con la actualización del conteo de recipientes procesados. En primer término, al concluir la última etapa del proceso, el controlador deshabilitó los actuadores y posicionó la secuencia en un estado estable, dejando el sistema listo para un nuevo arranque bajo las mismas condiciones de habilitación y seguridad. De forma paralela, se comprobó que el conteo incrementó únicamente cuando ocurrió el evento de detección definido (pulso del sensor de conteo), ya que la lógica de disparo se basó en un flanco de activación, lo que evitó incrementos indebidos por señal sostenida o rebotes. En consecuencia, el valor acumulado representó de manera consistente el número de ciclos completados y pudo ser supervisado desde la interfaz HMI y la capa de monitoreo, manteniendo coherencia entre campo, control y visualización. Este comportamiento se apreció en la Figura 85, donde la pantalla de “Estado del sistema” reflejó el modo En marcha/Espera, las etapas y actuadores, mientras que el banco de pruebas evidenció la implementación física de mando y señalización empleada durante la validación.

Figura 86

Fin de la secuencia entro en (Espera)



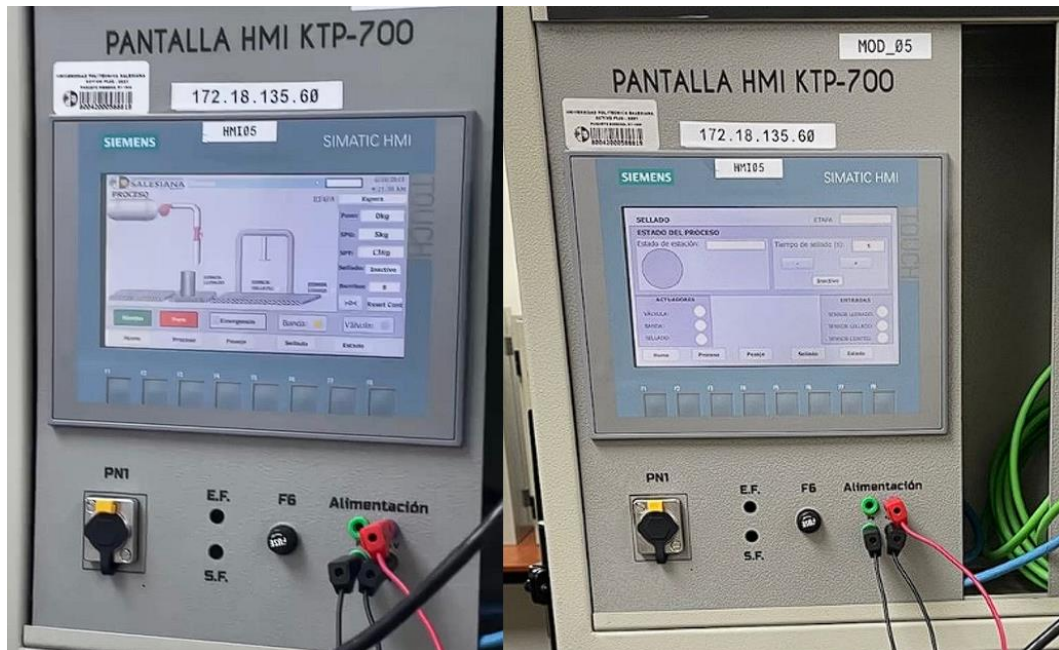
Nota. Al finalizar el sellado, el sistema retorna a “Espera” y el conteo se actualiza por pulso del sensor (detección por flanco), permitiendo supervisión del estado y del acumulado desde HMI/monitoreo.

6.4. Resultados de operación y supervisión en HMI

En esta sección se presentaron los resultados asociados al uso de la HMI KTP700 como interfaz de operación y supervisión del proceso. En primer lugar, se verificó que la HMI permitió al operador interactuar con el sistema de manera controlada, habilitando la parametrización de consignas, la visualización de variables críticas y el seguimiento del estado del ciclo. Posteriormente, se constató que la información mostrada en pantalla mantuvo coherencia con las variables ejecutadas por el PLC, lo cual facilitó la identificación de condiciones de operación, transiciones de etapa y estados de actuadores y sensores durante las pruebas. En consecuencia, la HMI se validó como elemento funcional para la conducción del proceso y como apoyo para la verificación del comportamiento del sistema.

Figura 87

Pantallas de HMI



Nota. Se observan las pantallas diseñadas en el HMI modelo KTP-700 BASIC

6.4.1. Ingreso de SP grueso/fino y visualización de variables

Durante las pruebas de operación se comprobó que la HMI permitió ingresar y ajustar los puntos de corte de dosificación correspondientes a SP_GRUESO y SP_FINO, los cuales fueron utilizados por el PLC para ejecutar el control por realimentación de peso. En particular, se observó que la parametrización se reflejó en las variables del sistema y se mantuvo disponible para el monitoreo durante la ejecución del ciclo. Asimismo, la pantalla de pesaje permitió visualizar el valor de peso en tiempo real y contrastarlo con las consignas configuradas, lo cual facilitó verificar el avance del llenado en sus etapas y el cumplimiento de los umbrales de corte. De este modo, la interfaz contribuyó a una supervisión operativa clara, reduciendo la posibilidad de configurar consignas sin verificación visual del comportamiento del proceso.

Figura 88

Pantalla de pesaje



Nota. Se observa la pantalla de pesaje y la digitación de los puntos de corte

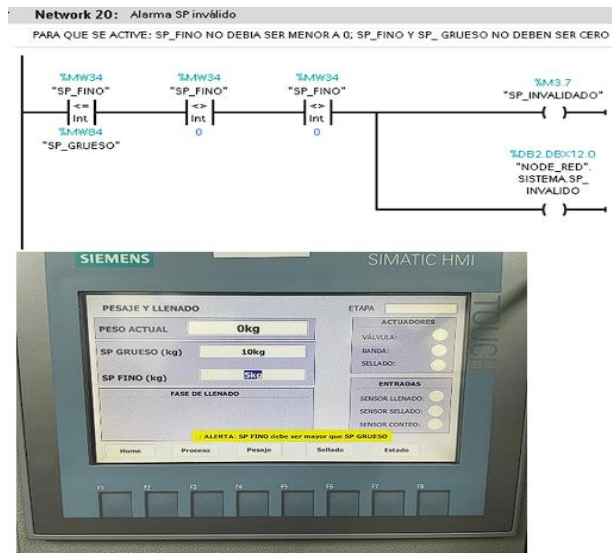
6.4.2. Validación/alarma por consignas inválidas (SP_INVALIDADO)

Durante las pruebas de parametrización desde la HMI se comprobó que el sistema incorporó un mecanismo de validación de consignas previo a la ejecución del ciclo de dosificación. En primer término, el PLC realizó una comparación lógica entre los puntos de corte SP_GRUESO y SP_FINO, verificando condiciones mínimas de operación, tales como que SP_FINO no fuera menor o igual a SP_GRUESO y que ambas consignas fueran distintas de cero. De este modo, cuando se detectó una configuración no válida, se activó la bandera SP_INVALIDADO (%M3.7), lo cual tuvo un efecto directo sobre la operación: se inhibió la habilitación general del sistema y, en consecuencia, se impidió el arranque o la continuidad del ciclo hasta que el operador corrigiera los valores ingresados. Asimismo, esta condición se reflejó en la HMI mediante un aviso de alarma, facilitando la identificación inmediata del error y reduciendo el riesgo de dosificación fuera de especificación. Este comportamiento se

apreció en la Figura 89, donde el Network de validación generó el estado SP_INVALIDADO y la pantalla de HMI mostró el mensaje de advertencia asociado a la relación entre consignas.

Figura 89

Alarma por consignas de corte inválidas



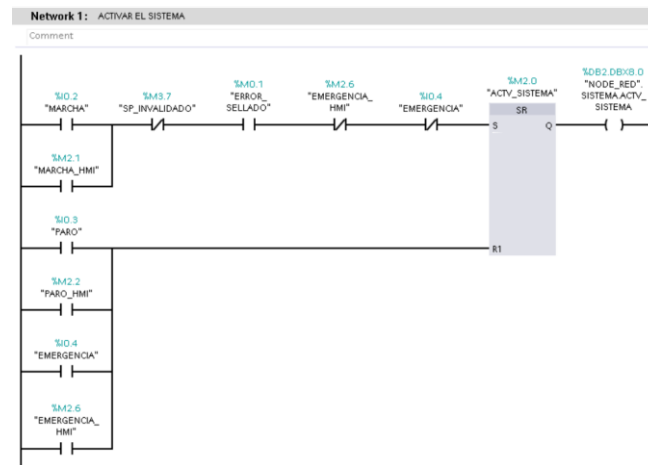
Nota. El PLC valida SP_GRUESO y SP_FINO; si $SP_FINO \leq SP_GRUESO$ o alguna consigna es 0, se activa SP_INVALIDADO (%M3.7), se bloquea la habilitación del sistema y la HMI despliega la alarma para corrección previa al reinicio.

6.4.3. Alarma enclavada por error de sellado (ERROR_SELLADO)

De forma complementaria, se comprobó el comportamiento de la condición ERROR_SELLADO como alarma retenida. Una vez activada, la señal permaneció enclavada y bloqueó el arranque del sistema, impidiendo la reanudación automática ante fallas intermitentes. De este modo, la recuperación requirió intervención intencional del operador, mejorando la seguridad y la confiabilidad operativa durante la validación.

Figura 90

Alarma enclavada por error sellado



Nota. La alarma ERROR_SELLADO queda retenida y bloquea la habilitación del sistema hasta su restablecimiento.

6.4.4. Indicadores de etapa/estado y actuadores/sensores

De forma complementaria, se validó la visualización de indicadores de estado del proceso, los cuales permitieron identificar la etapa activa del ciclo y el comportamiento de los principales elementos involucrados. En particular, durante la ejecución se comprobó que la HMI representó de manera consistente condiciones como habilitación del sistema, avance del secuenciador (STEP) y estados asociados a llenado, transporte y sellado. Asimismo, se observó que los indicadores de actuadores (por ejemplo, banda transportadora, válvula y sellado) y de sensores (presencia en estaciones) reflejaron el estado lógico que gobernó el PLC, lo cual permitió correlacionar eventos de detección con transiciones de etapa. En consecuencia, los indicadores de estado se consolidaron como un recurso útil para diagnóstico durante las pruebas, al permitir confirmar rápidamente si el proceso se encontraba en operación, detenido por condición de seguridad o en espera de una confirmación por sensor.

Figura 91

Pantalla de estados



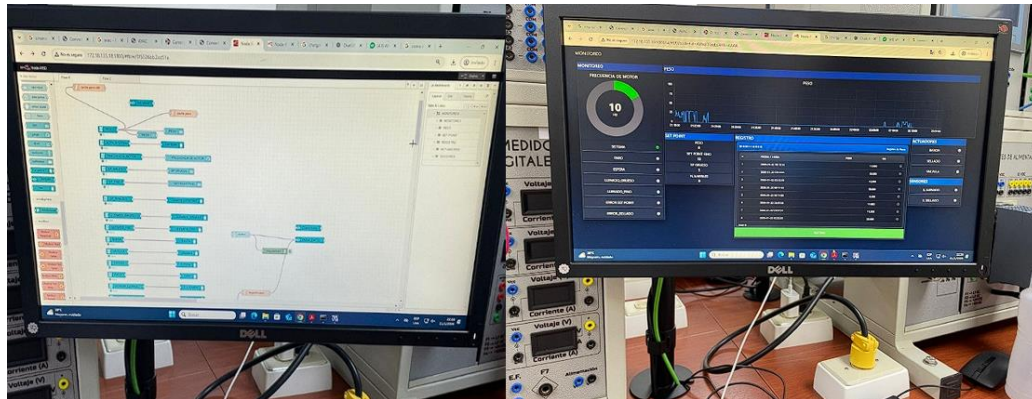
Nota. En esta pantalla de estados se muestra en qué estado se encuentra el proceso y por donde va.

6.5. Resultados de supervisión IoT2040 + Node-RED

En esta sección se presentaron los resultados obtenidos a partir de la integración entre el PLC S7-1500 y la pasarela SIMATIC IOT2040, orientada a la adquisición y supervisión de variables del proceso mediante Node-RED. En primer lugar, se verificó la publicación estructurada de señales del PLC hacia un bloque de datos dedicado, con el fin de mantener consistencia y trazabilidad de la información. Posteriormente, se comprobó que Node-RED logró consumir dichas variables y representarlas en un dashboard funcional, permitiendo observar estados de etapa, actuadores, sensores y magnitudes principales. En consecuencia, la supervisión implementada constituyó una evidencia complementaria a la HMI para validar el comportamiento del sistema durante las pruebas.

Figura 92

Flujo y Dashboard



Nota. Esta es la programación del flujo y la visualización del dashboard

6.5.1. Publicación de variables desde PLC (DB2 NODE_RED)

Durante la validación de la comunicación, se constató que el PLC concentró las variables requeridas para supervisión en el bloque de datos DB2 “NODE_RED”, el cual actuó como interfaz de intercambio con la pasarela. En particular, el DB se organizó en estructuras que agruparon magnitudes principales del proceso y señales discretas de estado, de manera que Node-RED pudiera leer información coherente sin acceder directamente a múltiples áreas del programa. De este modo, se publicaron variables asociadas al peso neto utilizado por el control, las consignas de operación (setpoints de corte), la referencia de frecuencia del motor, el conteo de recipientes procesados y banderas representativas del estado del ciclo (por ejemplo, habilitación del sistema, llenado grueso/fino, activación de banda, válvula y sellado). En consecuencia, la pasarela dispuso de un mapa de variables consistente que facilitó tanto el monitoreo como el diagnóstico del proceso.

Figura 93

Variables que se envía del PLC a la pasarela

NODE_RED										
	Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessible ...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	\$
1	▼ Static									
2	▼ PESO	Struct	0.0							
3	■ PESO KG	Int	0.0	0						
4	■ FRECUENCIA_MOT...	Int	2.0	0						
5	■ SP_GRUESO	Int	4.0	0						
6	■ SP_FINO	Int	6.0	0						
7	▼ SISTEMA	Struct	8.0							
8	■ ACTV_SISTEMA	Bool	8.0	false						
9	■ LLENADO_GRUESO	Bool	8.1	false						
10	■ LLENADO_FINO	Bool	8.2	false						
11	■ BANDA	Bool	8.3	false						
12	■ SELLADO	Bool	8.4	false						
13	■ VALVULA	Bool	8.5	false						
14	■ ESPERA	Bool	8.6	false						
15	■ PARO	Bool	8.7	false						
16	■ S_LLENADO	Bool	9.0	false						
17	■ S_SELLADO	Bool	9.1	false						
18	■ CANT_BARRILES	Int	10.0	0						
19	■ SP_INVALIDO	Bool	12.0	false						
20	■ ERROR_SELLADO	Bool	12.1	false						

Nota. Estos son las variables que se envían del PLC hacia la pasarela IOT2040

6.5.2. Dashboard: tendencia de peso, setpoints, estados

A continuación, se verificó el funcionamiento del dashboard implementado en Node-RED como interfaz de supervisión del proceso. En primer lugar, se comprobó la visualización en tiempo real de las variables principales, destacando el valor de peso y su evolución en formato de tendencia, lo cual permitió observar el comportamiento del pesaje durante la ejecución del ciclo. Asimismo, se presentaron los setpoints configurados para el llenado (corte grueso y corte fino), permitiendo contrastar el valor instantáneo de peso con las consignas activas. De manera complementaria, el tablero integró indicadores discretos para estados del proceso, actuadores y sensores, lo cual facilitó corroborar transiciones de etapa y confirmar condiciones de operación (por ejemplo, banda activa, válvula activa, sellado activo y detección por sensores de estación). En consecuencia, el dashboard proporcionó una validación visual adicional, coherente con la lógica del PLC y la supervisión en HMI, fortaleciendo la trazabilidad del comportamiento del sistema.

Adicionalmente, se implementó una función de registro orientada a capturar muestras del peso junto con marca temporal bajo una condición de disparo definida. De este modo, se obtuvo un historial básico que permitió respaldar la validación del proceso mediante

evidencias de operación, sin que esta función fuera crítica para el control, pero aportando valor para análisis y verificación.

6.5.3. Registro histórico (tabla fecha/hora/peso) y condición de disparo

De forma complementaria, se incorporó en el dashboard de Node-RED un mecanismo de registro histórico básico orientado a almacenar evidencias puntuales del proceso. En particular, se implementó una tabla de registros que consolidó el valor de peso junto con su marca temporal (fecha y hora) cada vez que ocurrió el evento definido para el almacenamiento. En consecuencia, además de la supervisión en tiempo real, el sistema dispuso de un historial mínimo que permitió respaldar la verificación del comportamiento del pesaje y la repetibilidad de la secuencia durante pruebas.

Respecto a la condición de disparo, el registro se ejecutó únicamente cuando se presentó una señal/evento de captura, evitando que el sistema almacenara valores de manera continua ante las fluctuaciones normales del peso. De este modo, la tabla se alimentó con muestras representativas asociadas a instantes relevantes del ciclo (por ejemplo, confirmación de etapa o pulso de registro), lo cual facilitó el análisis posterior y la trazabilidad del proceso sin afectar la operación principal del control.

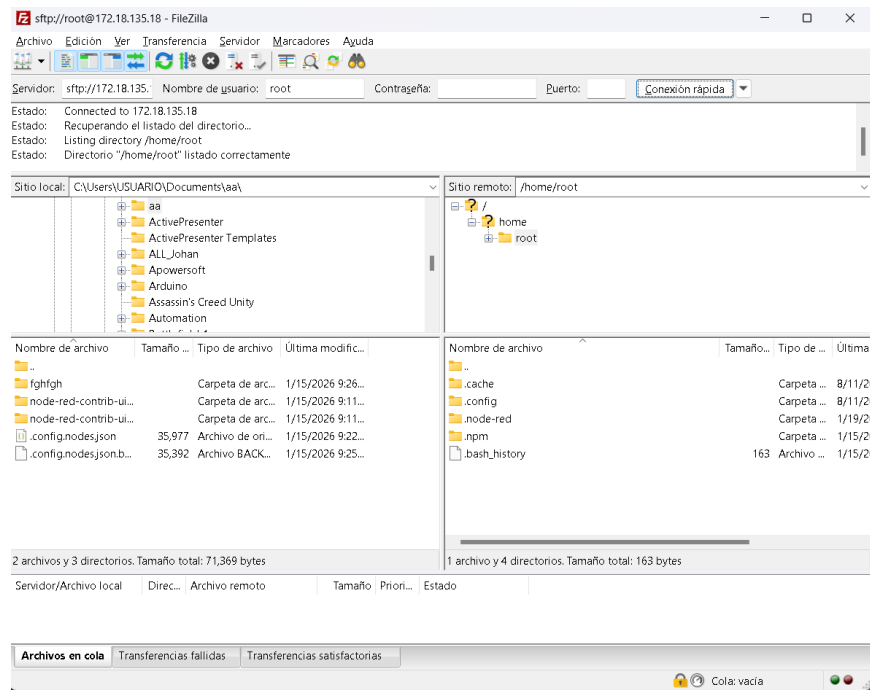
6.5.4. Observaciones de comunicación (coherencia PLC–HMI–Node-RED)

Durante las pruebas de integración se verificó la coherencia del intercambio de datos entre el PLC S7-1500, la HMI KTP-700 y la pasarela IOT2040 con Node-RED, empleando como referencia el bloque de datos dedicado a supervisión (DB2 “NODE_RED”). En primer lugar, se constató que las variables de estado publicadas por el PLC (por ejemplo, habilitación del sistema, etapa del secuenciador y banderas de proceso como llenado grueso/fino, banda, válvula y sellado) se reflejaron de manera consistente tanto en la HMI como en el dashboard, manteniendo correspondencia con la lógica de control ejecutada en el

programa Ladder. En consecuencia, la visualización en Node-RED representó el mismo criterio operativo aplicado por el controlador, lo cual permitió validar el seguimiento de la secuencia y la trazabilidad de eventos durante el ciclo.

Figura 94

Acceso remoto a la pasarela IOT2040 mediante SFTP (FileZilla)



Nota. Se evidencia la conexión remota a la pasarela y la navegación inicial por el sistema de archivos para ubicar el entorno de trabajo de Node-RED.

Así mismo, se observó que las consignas operativas ingresadas desde la HMI (tales como SP de corte grueso y fino, así como parámetros asociados a sellado) se mantuvieron sincronizadas con los valores manejados por el PLC y, posteriormente, con los valores presentados en Node-RED, evitando discrepancias entre interfaz de operación y supervisión. De forma complementaria, el valor de peso utilizado para monitoreo y registro fue el calculado por el propio PLC (peso neto), el cual fue transferido al DB2 y leído por la pasarela, garantizando que la supervisión no dependiera de conversiones externas y que el dato observado correspondiera a la variable de proceso efectiva. Finalmente, se evidenció que la supervisión por dashboard permitió identificar el comportamiento del sistema en tiempo

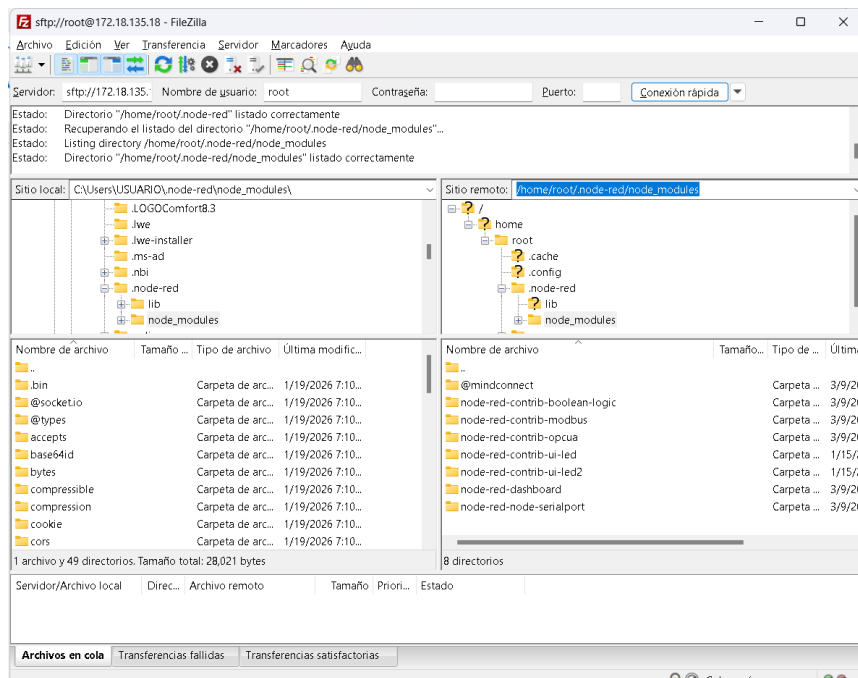
real, correlacionando cambios de estado con la activación de sensores y salidas, lo cual fortaleció la validación integral del proceso automatizado.

6.5.5. Limitaciones por versión de la pasarela y compatibilidad de librerías

Durante la implementación del entorno de supervisión en la pasarela SIMATIC IOT2040 se identificaron limitaciones asociadas a la versión de Node-RED y a sus dependencias, lo cual afectó la compatibilidad con módulos de terceros. En particular, al intentar instalar el paquete `node-red-ui-table` para la presentación tabular de registros, el proceso de descarga e instalación no pudo completarse debido a incompatibilidades del entorno (versión del runtime y dependencias requeridas). En consecuencia, la funcionalidad de tabla no pudo incorporarse mediante el mecanismo estándar de instalación de nodos, lo que obligó a replantear la estrategia de visualización de datos en el dashboard.

Figura 95

Ubicación del directorio de módulos de Node-RED en la pasarela

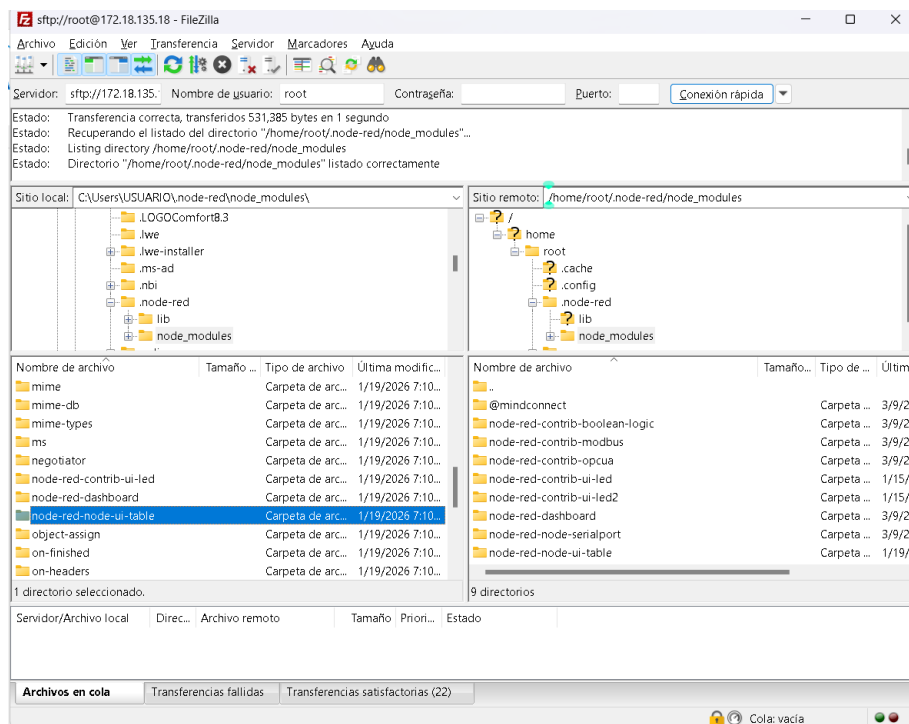


Nota. Se muestra el acceso al directorio `/home/root/.node-red/node_modules`, utilizado como ruta de instalación para desplegar dependencias y nodos adicionales en el entorno de la pasarela.

Ante esta restricción, se adoptó una solución alternativa orientada a preservar la funcionalidad de registro sin comprometer la estabilidad del sistema. En primer lugar, se implementó un componente `ui_template` del dashboard, el cual permitió construir interfaces personalizadas mediante código de plantilla basado en marcado (HTML/CSS y lógica embebida). Posteriormente, dicho componente fue adaptado y personalizado a nivel de estructura y estilo, con el propósito de emular el comportamiento de una tabla de registros y presentar datos relevantes del proceso (por ejemplo, peso y marca de tiempo) de manera ordenada. De este modo, aun cuando `node-red-ui-table` no resultó instalable en la pasarela, se logró mantener la visualización y el registro mínimo requerido para la validación del proceso, garantizando continuidad operativa bajo las restricciones de versión del entorno.

Figura 96

Transferencia manual de módulos hacia `node_modules`



Nota. Se observa la copia del módulo `node-red-ui-table` hacia el directorio de Node-RED en la pasarela como alternativa a la instalación directa, con el fin de habilitar funciones de visualización (tabla) en el dashboard.

6.6. Síntesis de resultados y observaciones finales

En síntesis, las pruebas realizadas permitieron verificar la operación coherente del sistema automatizado bajo la secuencia definida por etapas, validando la habilitación por condiciones de seguridad, las transiciones por confirmación de sensores y la ejecución de acciones de transporte, llenado y sellado conforme a la lógica implementada. Asimismo, se corroboró el desempeño del subsistema de pesaje mediante la adquisición y utilización del peso neto como variable de proceso para la comparación contra consignas, lo cual aportó realimentación efectiva para el control.

De forma complementaria, se comprobó la trazabilidad de variables mediante la integración PLC–IOT2040–Node-RED y la supervisión en dashboard, evidenciando coherencia entre lo mostrado en HMI y lo observado en la pasarela. Finalmente, se identificaron limitaciones propias del entorno de pruebas, principalmente asociadas a restricciones de red y compatibilidad de librerías por versión de la pasarela, las cuales fueron mitigadas mediante despliegue manual de módulos y el uso de `ui_template` como alternativa para representación tabular.

Figura 97

Fotografías de la implementación



Nota. Se observa la conexión y utilización de la pasarela, los sensores y el motor.

7. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

En la Tabla 2 se presentan las actividades previstas para los meses de Noviembre, Diciembre y Enero, organizadas en períodos de 4 semanas por mes, donde se puede visualizar cada una de las etapas sobre el diseño y la simulación del proceso de llenado, pesaje y sellado de recipientes para lubricantes industriales.

Tabla 2

Cronograma de actividades

<i>Actividades</i>	<i>Tiempo de duración</i>												
	<i>Meses</i>	<i>Noviembre</i>				<i>Diciembre</i>				<i>Enero</i>			
	<i>Semanas</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Elección del tema del proyecto de titulación.		X											
Definición de objetivos generales y específicos.		X											
Planteamiento e identificación del problema.			X	X									
Desarrollo de la programación en el PLC en el laboratorio de automatización industrial 2 y node red.					X	X	X						
Diseño de la interfaz HMI para la visualización de cada etapa.							X	X	X	X			
Simulación y pruebas finales del sistema automatizado.											X	X	X

Nota. En esta tabla se desglosa de manera semanal cada actividad que se va a llevar a cabo durante los tres meses mencionados.

8. PRESUPUESTO

En la Tabla 3 se presenta el presupuesto considerando las horas de ingeniería necesarias para el desarrollo del proyecto, tomando en cuenta el salario básico unificado, así como el costo estimado de equipos necesario, incluyendo la celda de carga, la estructura de soporte de la celda y el módulo Weight Transmitter WTM-300, los cuales son propiedad del estudiante Johan Isaac Mejía Vera.

Tabla 3

Presupuesto general del proyecto

<i>DETALLE</i>	<i>CANTIDAD</i>	<i>COSTO UNITARIO</i>	<i>COSTO TOTAL</i>
<i>Horas de ingeniería</i>	<i>80h</i>	<i>\$2,93</i>	<i>\$234,40</i>
<i>Celda de Carga Single Point 300kg</i>	<i>1</i>	<i>\$320,00</i>	<i>\$320,00</i>
<i>Estructura de hierro negro para el llenado</i>	<i>1</i>	<i>\$80,00</i>	<i>\$80,00</i>
<i>Weight Transmitter WTM-300 by CAS</i>	<i>1</i>	<i>\$850,00</i>	<i>\$850,00</i>
<i>TOTAL</i>			<i>\$1484,40</i>

Nota. Cuadro de presupuesto estimado.

9. CONCLUSIONES

i. Se validó la ejecución del control secuencial por etapas (STEP) en el PLC S7-1500, comprobándose transiciones coherentes entre las fases de transporte, llenado, pesaje y sellado, condicionadas por señales de seguridad y confirmación de sensores, lo cual aseguró una operación ordenada del ciclo.

ii. El subsistema de pesaje, integrado mediante celda de carga y transmisor CAS WTM-300, permitió obtener una variable de proceso estable e interpretable por el PLC, empleándose como realimentación para la comparación contra los setpoints de corte (SP_GRUESO y SP_FINO) y como referencia para la supervisión del proceso.

iii. La HMI KTP700 permitió centralizar la operación y el monitoreo del sistema, facilitando la parametrización de consignas y la visualización de variables críticas e indicadores de estado, lo cual contribuyó al diagnóstico y seguimiento del comportamiento del proceso durante las pruebas.

iv. La integración PLC–IOT2040–Node-RED evidenció trazabilidad de variables y coherencia entre la lógica de control y la supervisión, mediante la publicación estructurada de datos en un bloque dedicado; no obstante, se identificaron restricciones prácticas asociadas a conectividad y compatibilidad de librerías por versión de la pasarela, las cuales fueron mitigadas mediante alternativas de implementación.

10.RECOMENDACIONES

i. Formalizar un procedimiento de calibración y verificación del subsistema de pesaje (cero, span y estabilidad), incorporando criterios de aceptación y registro de resultados, a fin de mejorar la confiabilidad metrológica de la variable de peso utilizada por el control.

ii. Optimizar la precisión del llenado mediante estrategias de estabilización de lectura y control fino (por ejemplo, condición de “peso estable”, filtrado y/o modulación temporal de la válvula), reduciendo sobrepasos respecto al setpoint final.

iii. Para trabajos futuros, actualizar el entorno software de la pasarela IOT2040 (Node-RED, Node.js y dashboard) o migrar a una plataforma más reciente, con el propósito de garantizar compatibilidad con librerías modernas y facilitar funciones avanzadas de registro e historización.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bobinados Castel. (2025, Febrero 11). *Bobinados Castel*. Retrieved from Bobinados Castel: <https://bobinadoscastel.com/que-es-el-bobinado-de-motores-electricos-y-porque-es-clave/>
- ABB. (2024, Febrero 15). *Qué es un variador de frecuencia*. Retrieved from ABB: <https://new.abb.com/drives/es/que-es-un-variador>
- Al-Dahiree, O. S. (2022). Design and Shape Optimization of Strain Gauge Load Cell for Axial Force Measurement for Test Benches. *MDPI*, 7508. doi:<https://doi.org/10.3390/s22197508>
- Alvarado, M. (2022). *studocu*. Retrieved from studocu: <https://www.studocu.com/es-mx/document/instituto-tecnologico-de-durango/electricidad-y-electronica-industrial/programacion-ladder-material/56088521>
- Amazon. (2023, Agosto 22). Retrieved from <https://www.amazon.com/-/es/V%C3%A1lvula-proporcional-4-20mA-control-modulaci%C3%B3n/dp/B0CGB33LZX?th=1>
- Arturo Benavides-Rodríguez, R. A.-A.-T.-G.-P.-U.-P. (2025). ANALYSIS OF THE INTEGRATION OF INDUSTRY 4.0 IN INDUSTRIAL CLUSTERS: THE CASE OF ECUADOR. *lex-localis*.
- Aula 21. (2020). Retrieved from <https://www.cursosaula21.com/que-es-un-hmi/>
- Basco, A. I., Beliz, G., Coatz, D., & Garnero, P. (2018). *Industria 4.0; Fabricando el Futuro*. Buenos Aires: Inter-American Development Bank.
- Caputo, R. (2022). Motores, conceptos básicos y métodos de arranque. Parte II. *Revista Ingeniería Eléctrica*.
- CAS. (2012). Retrieved from https://cdn.komachine.com/media/product-catalog/cascor_31936_hmsite.pdf
- CAS. (2012). Total Weighing Solutions.
- Database, N. V. (2025, Noviembre 4). Retrieved from <https://nvd.nist.gov/vuln/detail/cve-2024-31497>
- Delgado, R. (2025, Septiembre 04). *Conexión y arranque de los motores trifásicos*. Retrieved from inesem.: https://www.inesem.es/revistadigital/gestion-integrada/conexion-arranque-motores-trifasico#Conexion_de_arranque_estrella-triangulo
- Duò, M. (2025, Octubre 1). *Kinsta*. Retrieved from <https://kinsta.com/es/blog/que-es-iot/>
- Figueroa, F. (2021, Agosto 23). *ARRANQUE DIRECTO DE MOTOR TRIFASICO*. Retrieved from sensoricx: <https://sensoricx.com/maquinas-electricas/arranque-directo-de-motor-trifasico/>
- FileZilla. (2023, Noviembre 3). Retrieved from <https://wiki.filezilla-project.org/Using>
- GONZALEZ, J. (2025, Junio 29). Celdas de carga. Retrieved from <https://www.logicbus.com.mx/pdf/articulos/Celdas-de-carga.pdf>
- Grupo Elektra. (2026). *SIEMENS SINAMICS V20*. Retrieved from <https://www.clientes.grupoelektra.es/catalogo/producto/610743/1>
- IMEPI S.A. (2024). Retrieved from <https://imepi.com.mx/que-es-un-plc-en-2025/>
- Joseph. (2025, Noviembre 08). *Conexión Estrella y Delta*. Retrieved from plantasdeluzmx.com: <https://plantasdeluzmx.com/conexion-estrella-y-delta-definicion-y-funcionamiento/>
- López, J. (2024, Agosto 29). *Inspenet*. Retrieved from Inspenet: <https://inspenet.com/articulo/aplicaciones-y-ventajas-de-un-servomotor/>
- ONWUEGBUZIE, I. U. (2024, Septiembre 24). *ResearchGate*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/384446107_Node-RED_and_IoT_Analytics_A_Real-Time_Data_Processing_and_Visualization_Platform

- Pozueta, M. A. (2025, Junio 20). PUENTE DE WHEATSTONE. Retrieved from <https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Puente%20de%20Wheatstone.pdf>
- Project PuTTY. (2025, Agosto 14). *PuTTY: a free SSH and Telnet client*. Retrieved from PuTTY: <https://www.chiark.greenend.org.uk/~sgtatham/putty/>
- Project, P. (2025, Febrero 8). *PuTTY Documentation Page*. Retrieved from PuTTY: <https://www.chiark.greenend.org.uk/~sgtatham/putty/docs>
- Project, P. (2026, Enero 11). *Download PuTTY: latest release (0.83)*. Retrieved from PuTTY: <https://www.chiark.greenend.org.uk/~sgtatham/putty/latest>.
- Promelsa. (2023, Noviembre 22). *Promelsa*. Retrieved from Promelsa: <https://www.promelsa.com.pe/blog/post/que-es-motor-electrico-tipos.html?srsltid=AfmBOoqJkm-Rt5BYC2Wx1X1OoGHnVwrOZ2jhM0ke6PZI-N2vLi8zIYkG>
- QBPROFE. (2021, Julio 23). *QBPROFE*. Retrieved from QBPROFE: https://www.qbprofe.com/automatizacion-instrumentacion-industrial/sensores-inductivos/#google_vignette
- Quispe Rojas, R. (2020, Marzo 3). *repositorio.une*. Retrieved from repositorio.une: <https://repositorio.une.edu.pe/handle/20.500.14039/7964>
- RICE LAKE. (2012). RICE LAKE WEIGHING SYSTEM.
- Rick, R. (2023, Enero 05). *¿Qué son las celdas de carga y cómo funcionan?* Retrieved from SISSAC: <https://www.sissac.com/noticias/que-son-las-celdas-de-carga/>
- Risoul. (2023, Diciembre 19). *Risoul*. Retrieved from Risoul: <https://www.risoul.com.mx/blog/que-es-un-motor-de-induccion-y-como-funciona>
- Rogelio Delgado. (2025, Enero 25). *Control de motores eléctricos con variador de frecuencia*. Retrieved from INESEM: <https://www.inesem.es/revistadigital/gestion-integrada/control-de-motores-electricos-con-variador-de-frecuencia>
- Rueda-Carvajal, G. D.-R.-Z.-B.-C. (2025). Opportunities and Challenges of Industries 4.0 and 5.0 in Latin America. *Sci*, 68.
- Santoyo. (2020, Agosto 20). *Arranque estrella – triangulo*. Retrieved from Santoyo: <https://santoyo.home.blog/semana-3-arranque-estrella-triangulo/>
- Sensoricx. (2024, Julio 4). Retrieved from <https://sensoricx.com/maquinas-electricas/motor-electrico-trifasico-que-es-como-funciona/>
- serviurena. (2023, septiembre 21). *SINAMICS V20 - Variador de frecuencia SIEMENS*. Retrieved from <https://www.serviurena.com/product/sinamics-v20-variador-de-frecuencia-siemens>
- Siemens. (2021, Febrero 16). Retrieved from <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:1c32c3de-4a78-4143-af7b-49422b471a82/webinar-simatic-iot-2040-2050.pdf>
- Siemens AG. (2025). Retrieved from <https://support.industry.siemens.com/cs/pd/302298?pdtdi=td&dl=es&lc=es-AR>
- SIHMA. (2024, Mayo 27). *Conexiones Estrella-Delta para arranque de motores*. Retrieved from SIHMA: <https://sihma.com.ve/conexiones-estrella-delta-arranque-motores/>
- SSH ACADEMY. (2025). *PuTTY Home - Free Downloads, Tutorials, and How-Tos*. Retrieved from <https://www.ssh.com/academy/ssh/putty>
- Tatham, S. (2025). *PuTTY User Manual*. Retrieved from PuTTY: <https://the.earth.li/~sgtatham/putty/0.83/html/doc/>
- Technology, N. I. (2024, Abril 15). *CVE-2024-31497 Detail*. Retrieved from National Vulnerability Database: <https://nvd.nist.gov/vuln/detail/CVE-2024-31497>
- Tina. (2024, Noviembre 11). *¿Qué es la celda de carga de un solo punto?* Retrieved from fibossensor: <https://www.fibossensor.com/es/what-is-single-point-load-cell.html>

USABIMANA, E. J. (2025, Agosto 22). *Linkedin*. Retrieved from <https://www.linkedin.com/pulse/deep-dive-plc-siemens-simatic-s7-1500-vs-legacy-usabimana-ebojc>

Xinje. (2024, diciembre 25). *Fundamentos del PLC de seguridad*. Retrieved from <https://xinje.com.my/plc/basics-of-safety-plc/>