



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN PROCESO DE TERMOFORMADO
DE POLIESTIRENO EXTENDIDO (EPS) PARA EL CONTROL Y
MONITOREO MEDIANTE PLC Y HMI.**

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

AUTOR:

ENRIQUE GREGORIO MACÍAS ZHUNE

TUTOR:

ING. GEOVANNY XAVIER GARCÍA FLOR, MSc

Guayaquil – Ecuador

2025 – 2026

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

Yo, Enrique Gregorio Macías Zhune con documento de identificación N° 0920237922;
manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la
Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera
total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 26 de febrero del año 2026

Atentamente,



Enrique Macías Zhune
0920237922

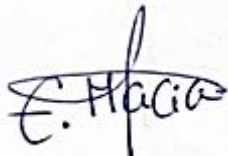
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Enrique Gregorio Macias Zhune con documento de identificación N° 0920237922, expreso la voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy el autor del Proyecto Técnico: "Diseño y simulación de un proceso de termoformado de poliestireno extendido (EPS) para el control y monitoreo mediante PLC y HMI.", 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, suscribo este documento en el momento que realice la entrega del trabajo final digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 26 de febrero del año 2026

Atentamente,



Enrique Macias Zhune

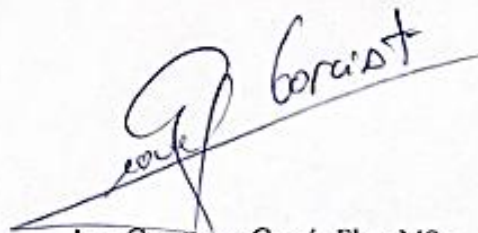
0920237922

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Geovanny Xavier García Flor con documento de identificación N° 0922357702, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: Diseño y simulación de un proceso de termoformado de poliestireno extendido (EPS) para el control y monitoreo mediante PLC y HMI, realizado por Enrique Gregorio Macías Zhune con documento de identificación N° 0920237922 , obtenido 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, 26 de febrero del año 2026

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Geovanny García Flor', is written over a horizontal line.

Ing. Geovanny García Flor, MSc

0922357702

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a todos mis seres queridos, por su apoyo incondicional y por ser el motor que impulsa cada uno de mis retos.

De la misma manera lo dedico a quienes creyeron en mí y me motivaron a seguir adelante en cada desafío.

Enrique Gregorio Macías Zhune

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a Dios y a los seres que me han acompañado y apoyado en esta etapa de formación.

Expreso también mi más profundo agradecimiento a mis docentes, por su guía y conocimientos compartidos; y a cada persona que, directa o indirectamente, contribuyó a este proceso.

Enrique Gregorio Macías Zhune

RESUMEN

AÑO		DIRECTOR DEL PROYECTO	TEMA DE TRABAJO DE TITULACIÓN
2026	ENRIQUE GREGORIO MACÍAS ZHUNE	ING. GARCÍA FLOR GEOVANNY XAVIER, MSc	DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN PROCESO DE TERMOFORMADO DE POLIESTIRENO EXTENDIDO (EPS) PARA EL CONTROL Y MONITOREO MEDIANTE PLC Y HMI.

En este trabajo de titulación se diseñó y simuló el control del proceso de termoformado de EPS. La falta de control representa una problemática en lo relacionado con el consumo energético en procesos industriales. El termoformado es uno de los más utilizados en la industria plástica, donde el control térmico interviene directamente en el resultado del producto y también el uso de energía.

La etapa de calentamiento dentro de una máquina termoformadora es la más crítica por el requerimiento de rangos de temperaturas específicos para obtener un buen producto sin alteraciones. El consumo energético también es parte importante del proceso por lo cual la supervisión es fundamental dentro del entorno industrial.

El desarrollo de este trabajo se estructuró en varias etapas en las cuales está incluida la investigación teórica, la programación PLC, el desarrollo de la interfaz HMI para la visualización de cada etapa del proceso, así como la implementación del dispositivo IoT2040 y un dashboard para el monitoreo de indicadores de desempeño. Estos elementos permitieron evaluar el comportamiento del proceso y perfil energético bajo diferentes condiciones.

Palabras clave: Termoformado, Consumo Energético, PLC, HMI, IoT2040.

ABSTRACT

YEAR	STUDENT	PRJ. DIRECTOR	SUBJECT
2026	ENRIQUE GREGORIO MACÍAS ZHUNE	ING. GARCÍA FLOR GEOVANNY XAVIER, MSc	DESIGN AND SIMULATION OF AN EXPANDED POLYSTYRENE (EPS) THERMOFORMING PROCESS FOR CONTROL AND MONITORING USING PLC AND HMI.

This project designed and simulated the control of an EPS thermoforming process. The lack of proper control represents a challenge related to energy consumption in industrial processes. Thermoforming is one of the most widely used processes in the plastic industry, where thermal control directly affects both the final product quality and energy usage.

The heating stage inside a thermoforming machine is the most critical as it requires a specific range of temperature to obtain a product without alterations. Energy consumption is also an important part of the processes which are fundamental inside the industrial field.

During the development of this project, the work was structured into different stages, which included theoretical research, PLC programming, and the development of an HMI for the visualization of each stage of the process, as well as the implementation of the IoT2040 device and a dashboard for monitoring key performance indicators. These elements allowed the evaluation of the process behavior and the energy profile under different operating conditions.

Keywords: Thermoforming, Energy Consumption, PLC, HMI, IoT2040.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.INTRODUCCIÓN.....	1
2.PROBLEMA	2
3.OBJETIVOS.....	5
3.1.OBJETIVO GENERAL.	5
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	5
4.FUNDAMENTOS TEÓRICOS	6
4.1 PLC.....	6
4.1.1 PLC SIEMENS Modelo: SIMATIC S7-1500	6
4.2HMI	7
4.2.1 Pantalla HMI Modelo: SIMATIC HMI KTP700 Basic DP.....	7
4.3 Termoformado	8
4.4 Sistema de Calentamiento	9
4.4.1 Conducción.....	10
4.4.2 Convección	10
4.4.3 Radiación	11
4.5 Calentamiento por radiación infrarroja.....	11
4.6 Polímeros apropiados para el termoformado.....	12
4.7 Poliestireno	13
4.7.1 Poliestireno Extendido (EPS).....	13
4.8 Punto de fusión	14
4.9 Temperatura de transición vítrea	14
4.10 PID.....	14
4.11 LIBRERÍA LSIM	15
4.12 Indicadores clave de desempeño (KPI)	17
4.13 Internet of Things (IoT).....	18
4.13.1 Internet Industrial of Things (IIoT)	19
4.13.2 SIMATIC IoT2040	19
4.14 Protocolo de comunicación: PROFINET	20
4.15 NODE-RED.....	21
4.16 Direccionamiento de variables	22
5. MARCO METODOLÓGICO	23
5.1 Descripción del proyecto	23
5.2 Tipo de metodología.....	23

5.3 Etapas del prototipo	24
5.3.1 Etapa 1: Análisis de requerimiento.....	24
5.3.2 Etapa 2: Programación del PLC	24
5.3.3 Etapa 3: Diseño de la interfaz HMI	44
5.3.4 Etapa 4: Configuración de los parámetros del control térmico	51
5.3.5 Etapa 5: Integración del dashboard y monitoreo de KPI.....	53
5.3.6 Configuración de flujo de nodos en Node-RED.....	59
5.3.7 Etapa 6: Pruebas finales del control automático.....	63
6. RESULTADOS	66
6.1 Programación del PLC	66
6.2 Interfaz HMI	70
6.2.1 Alarmas.....	72
6.2.2 Dashboard.....	73
6.3 Implementación	78
7. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	81
8. PRESUPUESTO.....	82
9. CONCLUSIONES.....	83
10. RECOMENDACIONES	84
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Proyección del termoformado 2023-2030.....	2
Figura 2	PLC Siemens.....	6
Figura 3	Diseño de pantalla HMI	7
Figura 4	Pantalla HMI de la marca Siemens	8
Figura 5	Máquina Termoformadora	9
Figura 6	Termoformado proceso	9
Figura 7	Conducción	10
Figura 8	Convección	10
Figura 9	Radiación	11
Figura 10	Horno industrial	12
Figura 11	Tabla de polímeros.....	12
Figura 12	Estructura química del poliestireno	13
Figura 13	Estructura química del poliestireno	14
Figura 14	Lazo de control PID	15
Figura 15	Bloques de la librería Sim.....	16
Figura 16	Lsim_Pt.....	16
Figura 17	Procesos auxiliares	17
Figura 18	Procesos principales.....	18
Figura 19	Estructura de IoT, IIoT e Industria 4.0.....	19
Figura 20	Simatic IoT2000 Series.....	20
Figura 21	Protocolo de comunicación PROFINET	20
Figura 22	Node-RED.....	21
Figura 23	Dashboard	22
Figura 24	Direccionamiento de variables entre Node-RED y PLC.	22
Figura 25	Estructura de bloques y librerías utilizadas en la programación del PLC. ...	25
Figura 26	Estructura general de las tablas de tags del PLC	25
Figura 27	Tabla de entradas del sistema.....	26
Figura 28	Tabla de memorias internas del sistema	26
Figura 29	Tabla de salidas del sistema	27
Figura 30	Programación del inicio y paro del proceso automático	28
Figura 31	Programación del sistema de alimentación de la lámina plástica	29
Figura 32	Programación del proceso de calentamiento del horno	30

Figura 33	Programación de la etapa de formado.....	31
Figura 34	Programación de etapa de corte.	32
Figura 35	Programación de enfriamiento.....	33
Figura 36	Programación de etapa de conteo y transporte.....	34
Figura 37	Bloque animaciones y network 1	35
Figura 38	Bloque de alarmas.....	36
Figura 39	Lógica de alarmas	37
Figura 40	Normalización y escalado de la entrada analógica	37
Figura 41	Escritura de la señal analógica escalada	38
Figura 42	Librería de lectura de entradas analógica.....	38
Figura 43	Librería de escritura de salida analógica.....	39
Figura 44	Lógica de cálculo del alimentador: amperaje, potencia y energía.....	40
Figura 45	Network 5- lógica de cálculo de potencia y energía del horno.....	41
Figura 46	Cálculo de la energía total acumulada.	42
Figura 47	Cálculo del KPI basado en piezas producidas y defectuosas.....	43
Figura 48	Cálculo del KPI de rendimiento.....	43
Figura 49	Diagrama de flujo del proceso de termoformado.....	44
Figura 50	Portada del diseño de la interfaz HMI	45
Figura 51	Interfaz de recetas	45
Figura 52	Pantalla general de supervisión del proceso de termoformado.....	47
Figura 53	Interfaz de etapa de alimentación.....	47
Figura 54	Interfaz de la etapa de calentamiento de horno.....	48
Figura 55	Interfaz para la selección de recetas.....	49
Figura 56	Interfaz de alarmas	49
Figura 57	Pantalla de tendencias de temperatura del proceso.....	50
Figura 58	Interfaz de la etapa de transporte.	50
Figura 59	Diagrama de lazo de control	51
Figura 60	Implementación de control PID y Lsim.....	52
Figura 61	Parámetros del controlador PID compact	53
Figura 62	Categorías y nodos principales en Node-RED.....	54
Figura 63	Configuración del layout del dashboard 2.0 en Node-RED grupo 1.....	55
Figura 64	Configuración del layout del dashboard 2.0 en Node-RED grupo 2.....	56
Figura 65	Panel de indicadores del sistema.....	57
Figura 66	Interfaz para la creación de variables en Node-RED.....	57

Figura 67	Configuración de las variables.....	58
Figura 68	Tabla de variables para la comunicación PLC-Node-RED	58
Figura 69	Nodo principal y nodos de control.....	59
Figura 70	Selección de recetas y envío de valor de temperatura al PLC	60
Figura 71	Lectura y visualización de horno en dashboard.....	60
Figura 72	Configuración del nodo template.....	61
Figura 73	Flujo de nodos de voltaje de etapas de termoformado.....	61
Figura 74	Flujo de nodo de corriente, change y gauge.....	62
Figura 75	Flujo de nodos de energía de cada etapa y del proceso.	62
Figura 76	Configuración de nodos para la visualización de KPI.	63
Figura 77	Módulo didáctico con PLC S7-1500 y HMI KTP-700.....	64
Figura 78	Motor de transporte y variador de frecuencia.	65
Figura 79	Lógica de inicio del proceso en el PLC.	66
Figura 80	Lógica de control del horno.	67
Figura 81	Comportamiento del controlador PID en la etapa de calentamiento.	68
Figura 82	Cálculo de potencia y energía del horno.....	69
Figura 83	Pantalla general de supervisión en HMI	70
Figura 84	Pantalla de supervisión de La etapa de horno.....	71
Figura 85	Tendencia de temperatura y setpoint del horno	72
Figura 86	Registro de alarma del sistema en HMI.....	73
Figura 87	Implementación del dashboard en Node-RED con PLC en línea.....	74
Figura 88	Dashboard principal del proceso de termoformado en Node-RED.	75
Figura 89	Interfaz de monitoreo eléctrico y energético del proceso de termoformado. 76	
Figura 90	Panel de indicadores KPI del Proceso de termoformado.	77
Figura 91	Indicador de calidad del proceso.....	78
Figura 92	Implementación física del sistema de automatización.....	79
Figura 93	Integración del Gateway IoT 2040.	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cronograma de actividades	81
Tabla 2 Cuadro de presupuesto	82

1. INTRODUCCIÓN

En el entorno industrial, las máquinas termoformadoras son importantes ya que son claves en el sector productivo. Forman parte de procesos térmicos críticos que deben alcanzar una temperatura adecuada para que el material pueda adaptarse a la forma requerida.

La etapa de calentamiento representa mayor demanda energética del proceso de termoformado. Por eso es importante el control y monitoreo de parámetros como la temperatura de calentamiento y tiempos de ciclo, además estas variables influyen directamente en el resultado final.

Este trabajo de Titulación tuvo como objetivo principal mostrar la simulación del proceso de termoformado utilizando PLC, HMI, e IoT2040 permitiendo la representación virtual sin la intervención en un sistema productivo real. Con base en este objetivo se considera la programación de las etapas del proceso en el PLC y su visualización en la pantalla HMI y la implementación del IoT2040 junto a un dashboard en Node-RED para supervisión del sistema en el Laboratorio de Automatización Industrial II.

La finalidad de este trabajo fue demostrar que, mediante un entorno de simulación, es posible configurar el proceso de termoformado industrial, brindando una visión técnica del comportamiento y aportando una comprensión sobre consumo energético como un factor importante en el proceso.

2. PROBLEMA

En el debate ambiental, gran parte del enfoque suele estar en las emisiones y otros impactos directos. No obstante, una parte relevante de esa problemática se deriva del alto consumo energético de procesos industriales. Existen empresas que carecen de monitoreo que permita identificar pérdidas y requieren indicadores clave de desempeño para controlar el consumo de energía (Schmidt, 2020).

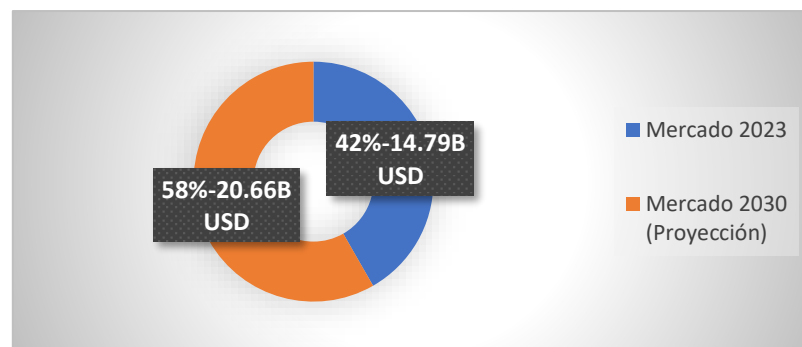
En algunas plantas se ha observado que solo un 30% de lazos de control muestra un buen desempeño mientras el resto presentan oscilaciones en los procesos. La implementación de buen monitoreo podría reducir el consumo energético en toda la planta hasta en un 1%, que representa 300 millones de dólares en ahorro anual en la industria de procesos de EE. UU (Simkoff, 2020).

Dentro de los procesos industriales se encuentra el termoformado, cuyo proceso involucra calentar láminas plásticas hasta volverlas maleables para moldearlas según las especificaciones del cliente. El control de temperatura tiene gran influencia en la calidad del producto (Afshariantorghabeh & Pesonen, 2023).

El mercado global del termoformado muestra un crecimiento estable y progresivo, alcanzando los 14.79 mil millones de dólares en 2023 y proyectándose 20.66 mil millones en 2030 (Grand View Research, 2024). También existe demanda alta del poliestireno extendido, requerido muy a menudo en el uso del proceso del termoformado y caracterizado por aislamiento térmico (Plástico, 2025). Como se observa en la figura 1, el mercado proyecta un crecimiento del termoformado para el periodo 2023-2030.

Figura 1

Proyección del termoformado 2023-2030



Nota. Adaptado de Grand View Research (2024).

El poliestireno extendido (EPS) requiere altas temperaturas, pero también controladas dentro del sistema de calentamiento. El punto de fusión del EPS debe acercarse a los 210 °C mientras que el punto de ablandamiento debe ser alrededor de 100 °C, valores que deben ser considerados en el termoformado de envases plásticos (CN Polychemer, 2025). Estas condiciones pueden representar un punto relevante en el sector industrial ecuatoriano.

El sector industrial ecuatoriano se posiciona como segundo mayor consumidor de energía en el país, con un 16.6% de la demanda nacional en 2023 y cuenta con una alta dependencia de electricidad (43.6%) para procesos térmicos como los hornos industriales (Ministerio de Energía y Minas, 2025). Y referente a la industria plástica, la Asociación Ecuatoriana de Plásticos (ASEPLAS) representa aproximadamente el 64% de 600 empresas. Representando más del 90 % de producción plástica en el país (ASEPLAS, Asociación Ecuatoriana de Plásticos, 2023).

Basándose en esta realidad, el sistema de calentamiento constituye gran parte de consumo total de energía dentro de una máquina termoformadora, por lo que su control es fundamental (Patil, 2021). Simular su comportamiento desarrolla habilidades para el control, monitoreo e interpretación de indicadores claves para futuros profesionales en el campo de la automatización industrial.

2.1 IMPORTANCIA DE LA PROBLEMÁTICA

El consumo energético y el termoformado son elementos importantes en la industria plástica, ya que dependen de operaciones térmicas donde variaciones de temperatura pueden generar pérdidas significativas de todo aspecto (Punina Guerrero, 2024). Estas variaciones afectan no solo la calidad del producto, sino también la estabilidad operativa e incluso a la elevación de costos.

Un monitoreo adecuado por medio de indicadores de desempeño (KPI) permite detectar desviaciones, identificar variaciones y evaluar un comportamiento real en sistemas que no son visibles de forma directa en el sistema. El análisis de datos de manera estructurada aporta a la reducción de fallas y mejorar la calidad del proceso (Chavarría Briceño, 2025). Este enfoque ayuda a comprender qué decisiones beneficiarían al sistema y también la posibilidad de planes preventivos.

Por lo que el diseño y monitoreo de un sistema de control térmico mediante PLC permitió acondicionar una temperatura estable en la etapa del calentamiento del termoformado. También la recopilación de datos mediante KPI facilita reconocer desviaciones que generen sobreconsumo. Adicionalmente la integración de una HMI ayuda con la visualización e interpretación del comportamiento del sistema.

En ingeniería es importante comprender el comportamiento de procesos y qué es lo que está provocando el uso innecesario de energía. Este proyecto permite aplicar herramientas prácticas de monitoreo, control que son importantes en los entornos productivos.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL.

Diseñar y simular un proceso de termoformado de poliestireno extendido (EPS) para el control y monitoreo mediante PLC y HMI.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Desarrollar la programación del PLC para el proceso automático de la máquina termoformadora.
- Diseñar una interfaz HMI para la visualización y monitoreo de la temperatura, alarmas y estados del proceso.
- Desarrollar un dashboard para monitoreo de indicadores clave de desempeño (KPI) mediante IoT2040.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 PLC

El PLC o controlador lógico programable se lo define como un tipo de computadora usada en entornos industriales para controlar procesos. Están diseñados para ser usados en entornos industriales donde hay altas temperaturas, vibraciones y ambientes contaminados. La función principal es recibir información de las entradas o sensores, luego procesarlas y emitir las en sus salidas lo cual ayuda a automatizar tareas complejas en la industria (Elecproy, 2024).

4.1.1 PLC SIEMENS Modelo: SIMATIC S7-1500

Es un autómata programable utilizado en sistemas industriales de control y automatización. Este modelo pertenece a la familia de productos Siemens. Funciona con un voltaje de 24 VDC, operando en rango permitido de 19,2 a 28,8 VDC, con una corriente de entrada de 8,85 A para 24V/COM. No posee entradas ni salidas integradas por lo que requiere módulos de expansión (Siemens, Hoja de datos 6ES7516-3AN01-0AB0, 2025). Como se muestra en la figura 2, se muestra el PLC SIMATIC S7-1500.

Figura 2

PLC SIEMENS



Nota. PLC de la marca SIEMENS modelo: SIMATIC S7-1500. Tomado de Siemens (2025).

4.2 HMI

HMI son las siglas de Interfaz Hombre-Máquina, es una herramienta muy utilizada por el operario en el ámbito industrial para controlar el proceso automatizado, posee una pantalla la cual permite visualizar los datos del sistema en tiempo real tal y como se observa en la figura 3 permitiendo que el operario tome acciones ya que se pueden incluir botones, indicadores o alarmas visuales (HMI: Human-Machine Interface, 2025).

Figura 3

Diseño de pantalla HMI



Nota. Ejemplo de diseño de HMI con visualización de información de gas para un medidor y monitores como niveles de tanque. Tomado de (HMI: Human-Machine Interface, 2025).

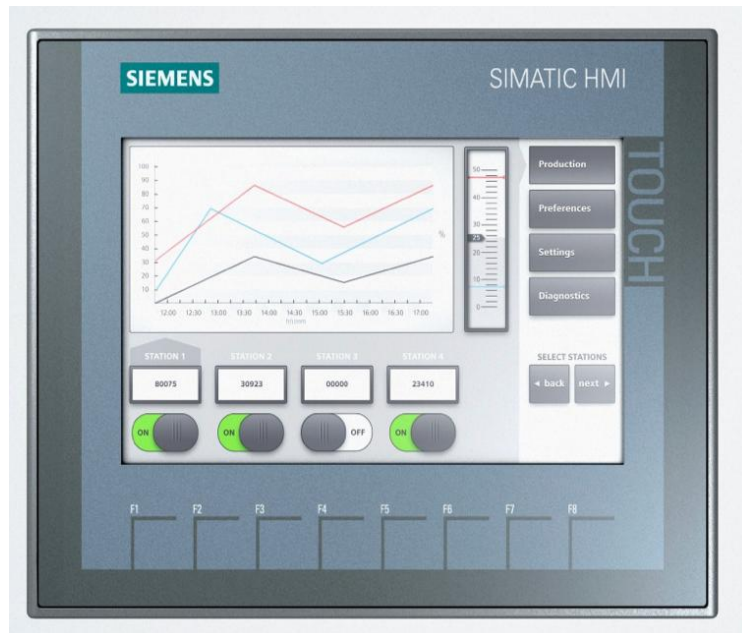
4.2.1 Pantalla HMI Modelo: SIMATIC HMI KTP700 Basic DP

El modelo que se observa en la figura 4 cuenta con una pantalla de 7 pulgadas y resolución de 800x480 píxeles. Funciona con una alimentación de 24 VDC, dentro de un

rango permitido de 19,2 a 28,8 V, con un consumo de 230 mA. Incorpora un procesador ARM y memoria interna para datos de usuario. Integra un puerto industrial ethernet y una interfaz USB para comunicación con controladores (Siemens, 2025b).

Figura 4

Pantalla HMI de la marca Siemens



Nota. Modelo de pantalla perteneciente a la SIMATIC KTP. Tomado de (Siemens, 2025b).

4.3 Termoformado

El termoformado funciona como un conjunto de procesos que moldean o estiran un producto de las láminas termoplásticas extruidas. Las láminas se ablandan mediante el calor logrando acoplarlas al molde con ayuda de vacío o baja presión. Por medio de este proceso se obtienen diversos productos, así como envases desechables (Group BMG, 2024).

Para llevar a cabo este procedimiento una máquina termoformadora automática integra varios sistemas que operan de manera coordinada entre ellos algunos de los más importantes son el sistema de calentamiento, sistema neumático, sistema de moldeo y sistema de troquelado (Afshariantorghabeh & Pesonen, 2023). En la figura 5 se presenta la máquina termoformadora con todo el sistema integrado.

Figura 5

Máquina Termoformadora

Thermoformer and Trim Press



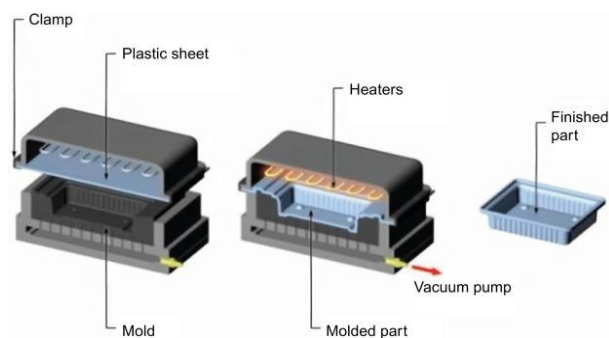
Nota. Modelo de máquina termoformadora para procesos industriales. Tomado de (Irwin Research & Development, Inc., s.f)

4.4 Sistema de Calentamiento

La operación de calentamiento es una de las etapas que invierte más tiempo y también se pueden presentar dificultades, ocasionando la mala utilización de los materiales. Durante el proceso de calentamiento de plásticos se presentan varios fenómenos como la conducción, convección, y radiación. En la figura 6 se ilustra el proceso esquemático del termoformado (Plastiglas, 2020).

Figura 6

Termoformado proceso



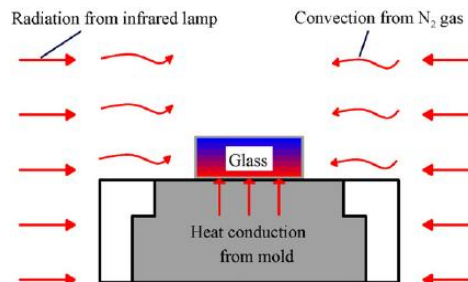
Nota. Proceso del termoformado donde se puede ver cómo la lámina plástica pasa la etapa de calentamiento por convección o radiación. Tomada de (Plastiglas, 2020).

4.4.1 Conducción

Se define como la transferencia de calor de una parte de un cuerpo a otra del mismo o bien de un cuerpo a otro que esté en contacto físico, sin que ocurra desplazamiento. En la figura 7 la gráfica explica este tipo de transferencia de calor (Wardhana, 2023)

Figura 7

Conducción



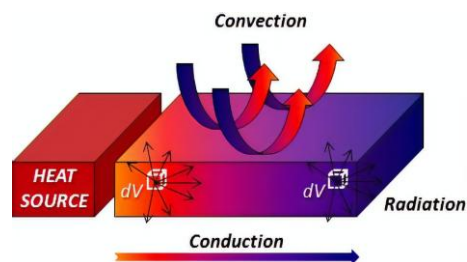
Nota. Dibujo esquemático de la transferencia de calor durante el proceso de calor. Tomado de (Wardhana, 2023).

4.4.2 Convección

Es la transferencia de calor de un punto a otro, dentro de un fluido, gas o líquido. Existe la convección natural y la forzada, en la natural, el movimiento del fluido se debe totalmente a la diferencia de densidad como resultado de diferencias de temperaturas mientras que en la forzada el movimiento se produce por medios mecánicos. La figura 8 permite observar el movimiento del calor por convección (Barreras Rios & Ramirez Leon, 2021).

Figura 8

Convección



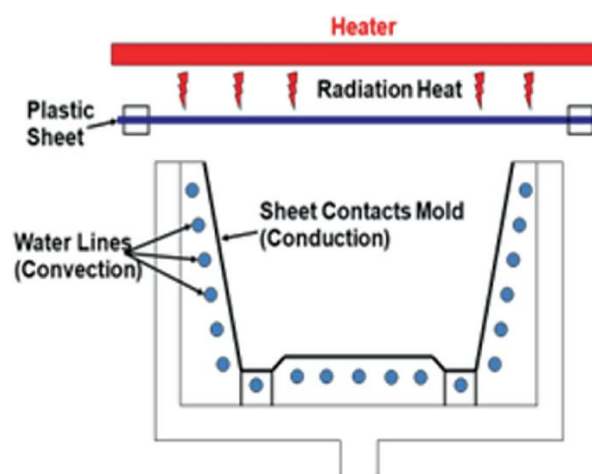
Nota. Dibujo esquemático de la convección. Tomada de (Plastiglas, 2020).

4.4.3 Radiación

Definida como la transferencia de calor de un cuerpo a otro que no se encuentra en contacto con el mismo, por medio del movimiento ondulatorio a través del espacio. En el termoformado se consideran tres medios, con un sólido, radiación infrarroja o excitación interna. Como se muestra en la figura 9 el calor se transmite mediante radiación (Kibishov, 2024).

Figura 9

Radiación



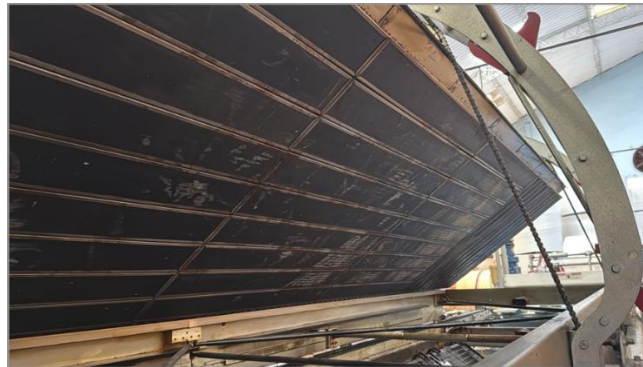
Nota. Dibujo esquemático de la radiación proveniente del calentador. Tomado de (Kibishov, 2024).

4.5 Calentamiento por radiación infrarroja

Este método puede proporcionar calentamiento instantáneo y, por lo tanto, sus ciclos de exposición son muy cortos, a veces basta con algunos segundos. Las principales fuentes que proporcionan este tipo de energía son las lámparas de cuarzo que emiten en el infrarrojo invisible y cercano o resistencias cerámicas o metálicas que emiten mayor energía y en el lejano infrarrojo. Existen hornos industriales que emplean paneles de calentamiento por radiación como se observa en la figura 10 (Gaspar-Cunha, 2021).

Figura 10

Horno industrial



Nota. Panel de calentamiento infrarrojo compuesto por barras de cuarzo. Elaboración propia.

4.6 Polímeros apropiados para el termoformado

Generalmente, todos los polímeros termoplásticos son adecuados para el proceso de termoformado. Pero cuando son sometidos a un calentamiento presentan una variación en su módulo de elasticidad, dureza y capacidad de resistencia. En la figura 11, se muestran los materiales con las respectivas temperaturas de deflexión al calor y correspondientes temperaturas de termoformado (Plastiglas, 2020).

Figura 11

Tabla de Polímeros

POLIMEROS	TEMPERATURA DE DEFLECCIÓN AL CALOR			TEMPERATURA DE TERMOFORMADO		
	A 264 PSI (°C)	A 66 PSI (°C)	SIN CARGA (°C)	TEMP. DE LA HOJA (°C)	TEMP DEL MOLDE (°C)	TEMP DE AYUDA (°C)
Acrílico extruido	94	98		135-175	65-75	
Acrílico cell-cast	96	110		160-180	65-75	
Acetobutirato de celulosa	65-75	75-80	120-150	140-160		
Poliétileno de alta densidad		60-80	100	145-190	95	170
Polipropileno	55-65	110-115	140	145-200		
Poliestireno	70-95	70-100	100	140-170	45-65	90
Poliestireno alto impacto	85-95	90-95	120	170-180	45-65	90
SAN	100	105		220-230		
ABS	75-115	80-120	95	120-180	70-85	90
Polivinilo de cloruro (RV.C.)	70	75	110	135-175	45	80
Policarbonato	130	140	160	180-230	95-120	140

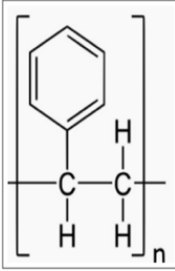
Nota. Polímeros termoplásticos más comunes y sus temperaturas de deflexión y de termoformado. Tomada de (Plastiglas, 2020).

4.7 Poliestireno

Es conocido por ser uno de los plásticos más usados a nivel mundial. No reacciona químicamente con otros elementos. Es elaborado a partir de monómeros de estireno que son compuestos orgánicos derivados del petróleo. Existen diferentes formas dependiendo de la necesidad industrial. En la figura 12 se muestra la estructura química del poliestireno compuesta por una cadena principal de carbonos saturados (URANY, 2023).

Figura 12

Estructura química del Poliestireno

Nombre IUPAC	Fórmula Estructural	Fórmula Molecular	Identificadores
Poly(1-phenylethene)		$(C_8H_8)_n$	Número CAS: 9003-53-61 ChEBY: 53276 KEGG: C19506

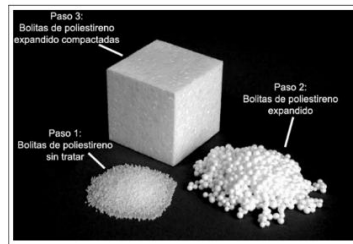
Nota. La tabla presenta la nomenclatura química del poliestireno de acuerdo con la nomenclatura IUPAC. Tomada de (URANY, 2023).

4.7.1 Poliestireno Extendido (EPS)

El poliestireno extendido es también conocido como unicel, es un material liviano que consta de pequeñas perlas de poliestireno que se expanden y fusionan. Tiene varios usos cotidianos tales como contenedores de alimentos frescos. Se forma a partir de pequeñas perlas que aumentan su volumen y posteriormente se compactan como se visualiza en la figura 13. (URANY, 2023).

Figura 13

Estructura química del Poliestireno



Nota. El poliestireno expandido en forma circular y compactado. Tomado de IUPAC (URANY, 2023).

4.8 Punto de fusión

El punto de fusión del poliestireno es un punto relevante porque define cómo responde el material al calentarse durante la fabricación. Es una temperatura que se refiere a la transición de sólido a líquido y en este caso puede ser aproximadamente de 210 °C a 249 °C dependiendo del tipo y aditivos agregados (CN Polychemer, 2025).

4.9 Temperatura de transición vítrea

Es fundamental no confundir el punto de fusión con la temperatura de transición vítrea (T_g), debe ser cerca de los 100 °C para el poliestireno. Por debajo de este valor el material se asemeja a la textura de un vidrio, mientras que por encima se ablanda sin llegar a licuarse, condición ideal para el termoformado (CN Polychemer, 2025).

4.10 PID

El trabajo de la automatización consiste en establecer un lazo de control que influye sobre variables físicas dentro de los procesos técnicos como se representa en la figura 14. Dentro de este marco, el bloque PID_Compact se define como la tecnología de control que toma el valor medido procesado y es comparado con un valor de referencia (setpoint) (Siemens AG, 2022).

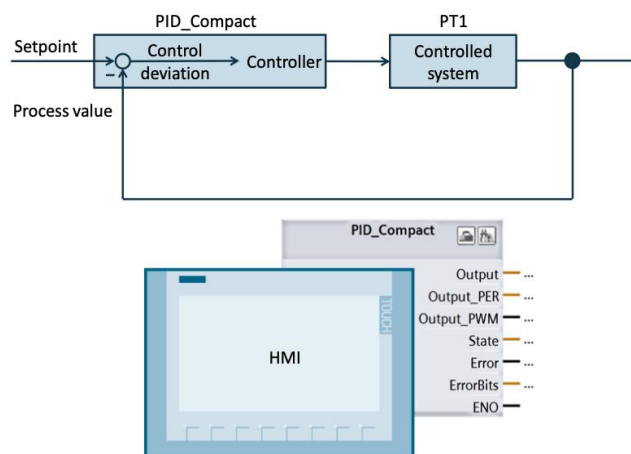
El valor de salida del controlador PID consiste en tres componentes:

- P, el componente P del valor de salida es proporcional al control de desviación o error.

- I, el componente I del valor de salida corresponde al valor integral. Aumenta siempre que exista desviación de control.
- D, el componente D es el componente derivativo que incrementa a medida que aumenta la velocidad de desviación del control (Siemens AG, 2022).

Figura 14

Lazo de control PID



Nota. Diagrama de lazo de control cerrado. Tomada de (Siemens AG, 2022)

4.11 LIBRERÍA LSIM

La librería LSIM (Library for Controlled System Simulation) creada por Siemens TIA Portal permite la implementación de procesos de modelos dinámicos dentro del entorno del PLC, facilitando la simulación de control en lazo cerrado sin necesidad de plantas físicas (Salazar et al., 2025).

La librería de la figura 23 ofrece distintos tipos de bloques de diferente comportamiento dinámico como sistemas autorregulados y sistemas sin regulaciones inherentes. Como se observa en la figura 15 estos bloques también abarcan modelos de primer, segundo y tercer orden (PT1, PT2, PT3) siendo útil para la simulación de procesos industriales.

Figura 15

Bloques de la Librería SIM

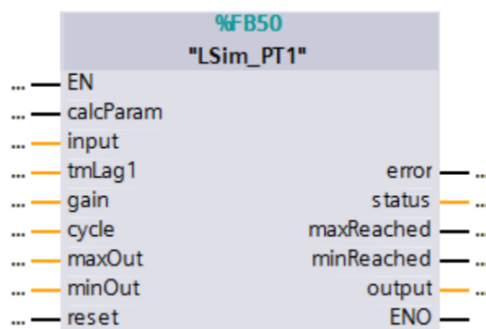
Block	Brief description	
LSim_PT1	Simulation of a PT1 system	Self-regulating systems
LSim_PT1asym	Simulation of an asymmetrical PT1 system	
LSim_PT2osc	Simulation of a PT2 system in the periodic case	
LSim_PT2aper	Simulation of a PT2 system in the aperiodic case	
LSim_PT3	Simulation of a PT3 system	
LSim_PDT1	Simulation of a PDT1 system	
LSim_TempProcess	Simulation of a temperature process	
LSim_DT1	Simulation of a DT1 system	
LSim_Allpass1OrdReal	Simulation of a first-order all-pass	
LSim_Allpass2OrdReal	Simulation of a second-order all-pass	
LSim_PT3HeatCool	Simulation of a PT3 system with separate inputs for heating and cooling	
LSim_Multizone	Simulation of thermally coupled zones	
LSim_I	Simulation of an I system	
LSim_IT1	Simulation of an IT1 system	
LSim_Valve	Simulation of a valve	
LSim_Lagging	Simulation of a lag element	

Nota. Bloques de simulación utilizados para modelar distintos tipos de sistemas de control. Tomada de (Siemens AG, 2023)

En la descripción de los bloques se observa la explicación de la función block (FB) “LSim_PT1” de la figura 16. El bloque PT1 tiene como característica ser un elemento de transferencia proporcional con retardo de primer orden y es utilizado para simular un sistema de temperatura (Salazar et al., 2025).

Figura 16

LSim_PT



Nota. Bloque de Función LSim_PT1. Tomada de (Siemens AG, 2023)

4.12 Indicadores clave de desempeño (KPI)

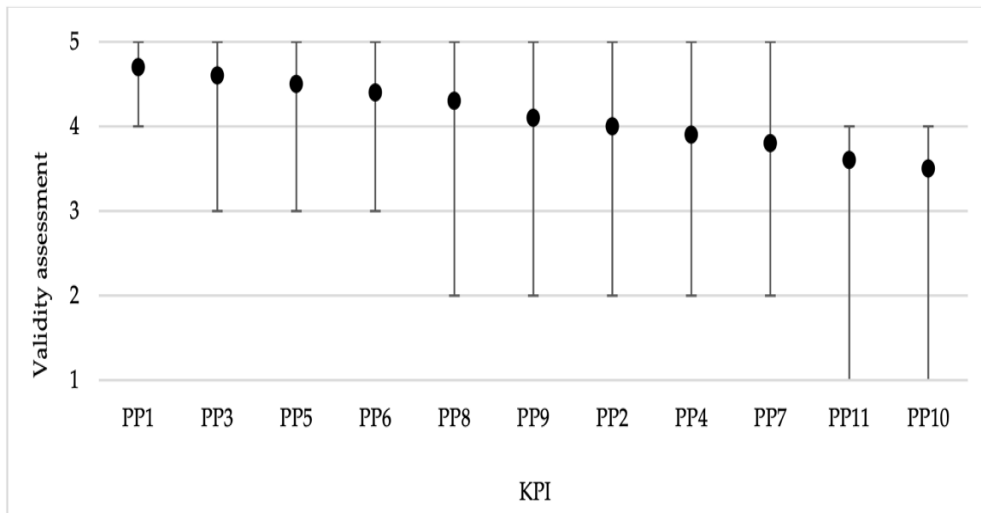
En el mundo de la producción existen varios tipos de industrias, así como la del termoformado también está la industria del aluminio. Se la conoce como una de las más intensivas en energía. Por esta razón de dependencia se condujo a la búsqueda de herramientas que permitan medir y controlar el consumo energético (Chavarría Briceño, 2025)

Con la llegada de la industria 4.0 los KPI se convirtieron en instrumentos estratégicos plasmados en visualización en tiempo real y análisis de datos. Clasifican y monitorean con precisión los procesos más intensivos, como electrólisis y hornos de fusión, que representan más del 60% de consumo total (Pacana et al., 2025).

Por ejemplo, en el caso de la industria de aluminio se controlaron los procesos auxiliares y los procesos principales. Los auxiliares presentan valores entre 4.7 y 3.5, donde el aire comprimido (PP1) obtiene 4.7, significando que es el más crítico para controlar. En cambio, cuando el tratamiento de gases (PP10) recibe 3.5, indicando que su impacto es menor. Esto se puede apreciar en la figura 17 (Pacana et al., 2025).

Figura 17

Procesos auxiliares



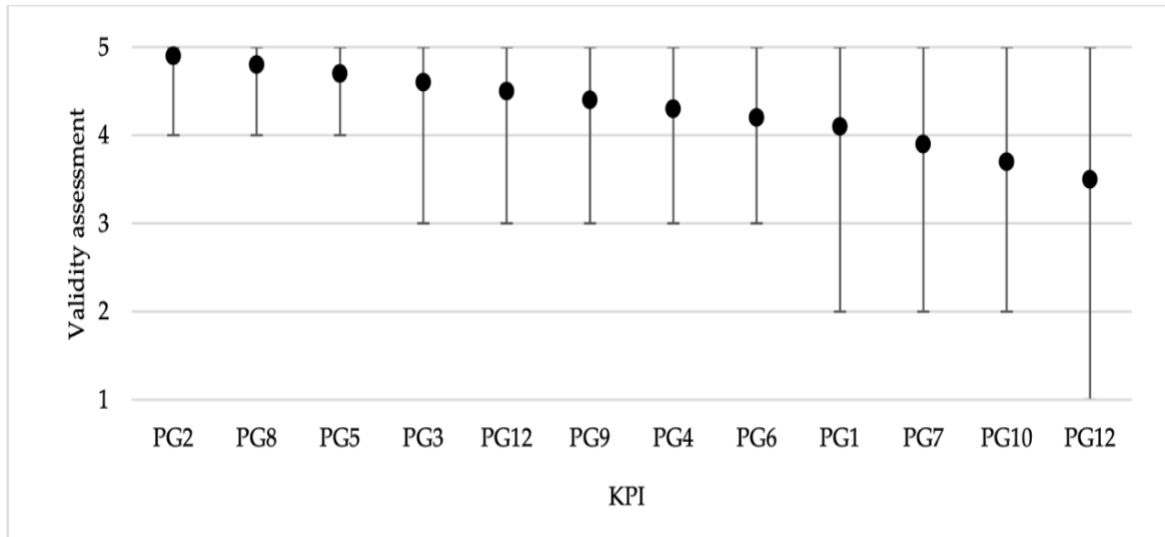
Nota. En la Figura se observa la clasificación y distribución de los auxiliares. Tomada de (Pacana et al., 2025)

Los principales, el KPI con mayor número corresponde a la electrólisis (PG2), alcanzando un promedio máximo de 4.9, lo que podría ser como 35 % de consumo.

Seguido por proceso de fusión o melting (PG8) con un aporte del 25 a 35%. Aquí se evidencian dos puntos críticos como lo indica en la figura 18 (Pacana et al., 2025).

Figura 18

Procesos principales



Nota. En la Figura se observa la clasificación y distribución de los procesos principales. Tomada de (Pacana et al., 2025).

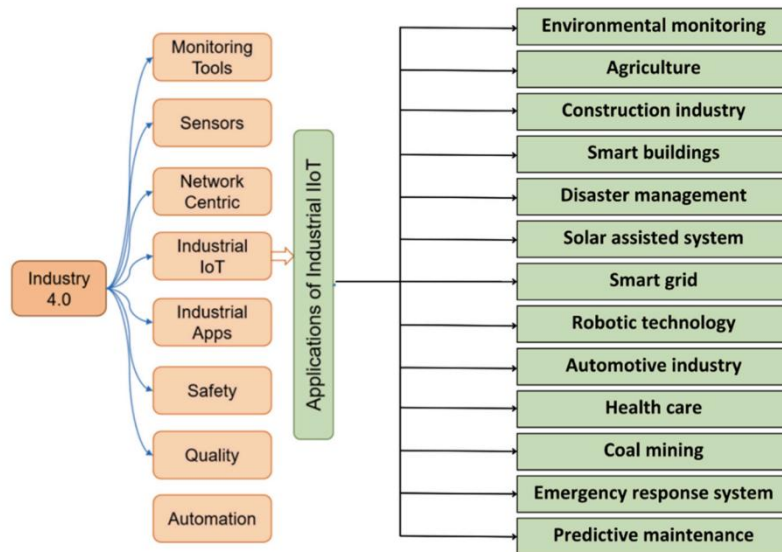
4.13 Internet of Things (IoT)

El Internet de las Cosas es conocido como una red de conectividad con el internet la cual transforma objetos cotidianos a dispositivos interconectados. Su función principal es la recolección de datos, el análisis, la transmisión y la obtención de los resultados de la información (Afrin & Rafa, 2025).

Existen casos de cómo la manufactura inteligente de Siemens, donde ha utilizado IoT, integración de datos y equipos inteligentes con el fin de mejorar sus procesos productivos y escalar en la automatización industrial. Las principales aplicaciones del uso de IoT se relacionan con la gestión energética y mantenimiento predictivo en la cual se identifican ineficiencias y prolongación de la vida útil de ciertos equipos. En la figura 19 se muestra la estructura de la manufactura inteligente o Industria 4.0. (Bhardwaj et al., 2025)

Figura 19

Estructura de IoT, IIoT e Industria 4.0.



Nota. Relación entre pilares de la industria 4.0 e IIoT. Tomada de (Bhardwaj et al., 2025).

4.13.1 Internet Industrial of Things (IIoT)

El Internet Industrial de las Cosas es un fragmento del IoT que es utilizado en entornos industriales donde se requiere mayor estándar de seguridad y confidencialidad. También existe la revolución industrial o cuarta revolución también conocida como la industria 4.0 la cual ha mostrado avances y desarrollos tecnológicos significativos. Este avance tecnológico incorpora la implementación de sistemas ciber físicos cuya función principal es que puedan comunicarse entre sí y tomar decisiones independientes (Afrin & Rafa, 2025).

4.13.2 SIMATIC IoT2040

El Simatic IoT2040 es un Gateway inteligente que actúa como un puente de comunicación entre diversas fuentes de datos, para después analizarlos y enviarlos a los destinatarios (Technews Publishing, 2024). Está diseñado para una operación continua y garantiza confiabilidad en la transmisión de datos. El dispositivo incorpora interfaces Ethernet y RS-232/485 y es una solución robusta para aplicaciones de IoT industrial (Technews Publishing, 2024). Como se muestra en la figura 20, el SIMATIC IoT2040 de Siemens se emplea como un gateway industrial.

Figura 20

Simatic IoT2000 SERIES



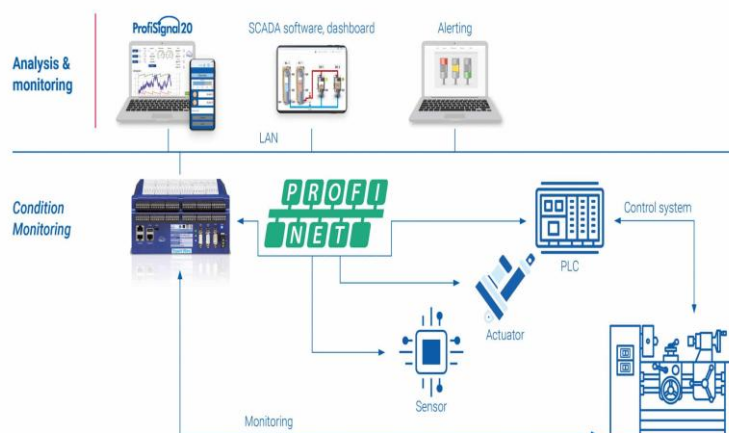
Nota. Dispositivo de comunicación continua entre dispositivos de campo y sistemas IoT industriales. Tomada de (Smart Factory, 2020)

4.14 Protocolo de comunicación: PROFINET

La función principal de PROFINET es la transmisión de procesos de datos que son transmitidos cíclicamente. El tiempo de ciclo es también llamado tiempo de actualización. También se transmite de forma no cíclica como las alarmas, parámetros, información de diagnóstico y estado. PROFINET integra dispositivos de campo con el sistema de control y las plataformas de supervisión como se aprecia en la figura 21 (Mutlu, 2025).

Figura 21

Protocolo de comunicación PROFINET



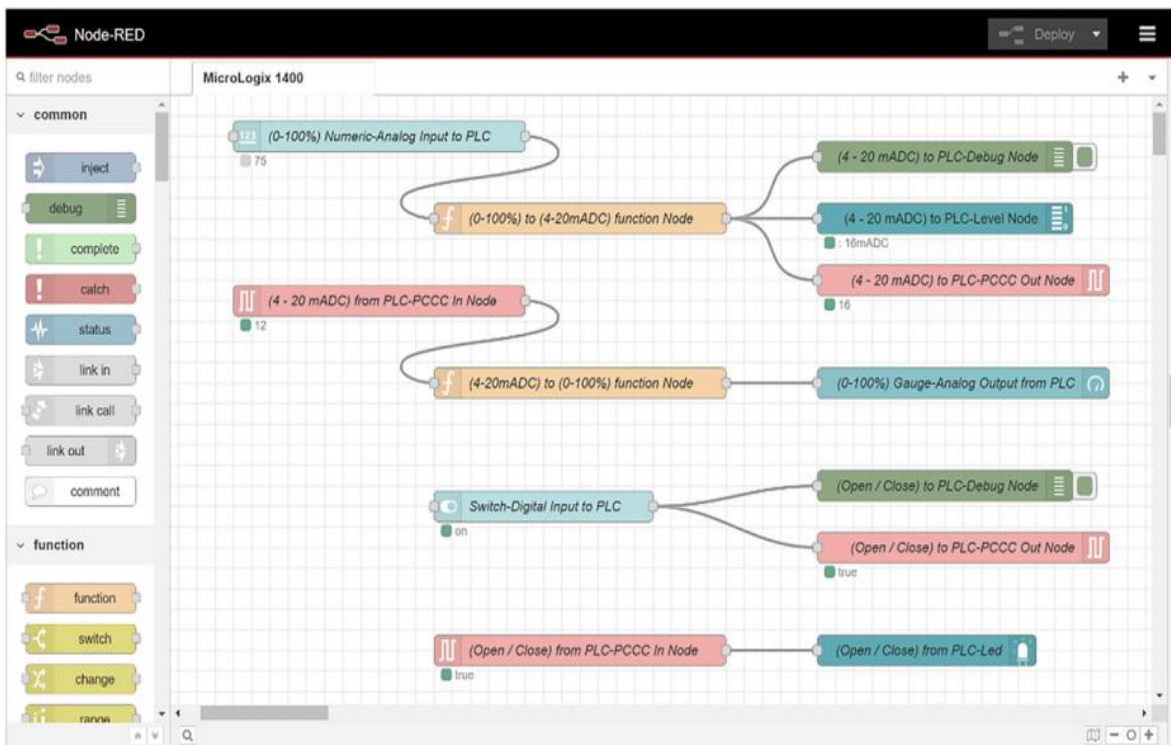
Nota. El protocolo PROFINET es utilizado en redes SCADA para la obtención de datos por medio de la conexión con una PC. Tomado de (Delphin Technology AG, n.d.).

4.15 NODE-RED

Node-RED es una herramienta de flujo de programación muy útil que conecta y automatiza servicios de internet, APIs, y dispositivos. Es una herramienta muy conocida en el mundo industrial por su interfaz visual, la cual es elaborada en la plataforma de JavaScript y Node.js y habilita un prototipo rápido y un diseño de lógica directa. Cada nodo realiza un trabajo específico como lectura de datos de un sensor, transforma datos o envía información a la base de datos (Hussein F. A., 2025). En la figura 22 se muestra la implementación desarrollada en Node-RED, el flujo de programación de conversión, y en la figura 23 presenta el panel de visualización tipo dashboard.

Figura 22

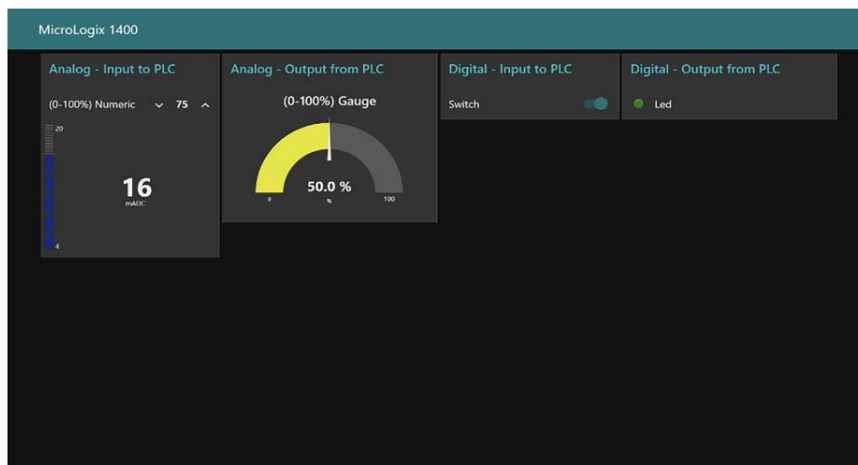
Node-RED



Nota. Programación para Node-RED. Tomada de (Hussein F. A., 2025)

Figura 23

Dashboard



Nota. Dashboard de Node-RED. Tomada de (Hussein F. A., 2025)

4.16 Direccionamiento de variables

Para una buena interpretación en Node-RED de los datos recibidos desde el PLC se usa notación diferente por ejemplo X para bits, B para bytes, Real, entre otros. En la figura 24 se presenta el esquema de direccionamiento de variables utilizado por el nodo *Node-RED-contrib-s7* (OpenJSFoundation, n.d.).

Figura 24

Direccionamiento de variables entre Node-RED y PLC

Address	Step7 equivalent	JS Data type	Description
DB5.X0.1	DB5.DBX0.1	Boolean	Bit 1 of byte 0 of DB 5
DB23.B1 or DB23.BYTE1	DB23.DBB1	Number	Byte 1 (0-255) of DB 23
DB100.C2 or DB100.CHAR2	DB100.DBB2	String	Byte 2 of DB 100 as a Char
DB42.I3 or DB42.INT3	DB42.DBW3	Number	Signed 16-bit number at byte 3 of DB 42
DB57.WORD4	DB57.DBW4	Number	Unsigned 16-bit number at byte 4 of DB 57
DB13.D15 or DB13.DINT5	DB13.DBD5	Number	Signed 32-bit number at byte 5 of DB 13
DB19.DW6 or DB19.DWORD6	DB19.DBD6	Number	Unsigned 32-bit number at byte 6 of DB 19
DB21.R7 or DB21.REAL7	DB21.DBD7	Number	Floating point 32-bit number at byte 7 of DB 21
DB2.S7.10 *	-	String	String of length 10 starting at byte 7 of DB 2
I1.0 or E1.0	I1.0 or E1.0	Boolean	Bit 0 of byte 1 of input area
Q2.1 or A2.1	Q2.1 or A2.1	Boolean	Bit 1 of byte 2 of output area
M3.2	M3.2	Boolean	Bit 2 of byte 3 of memory area
IB4 or EB4	IB4 or EB4	Number	Byte 4 (0 -255) of input area
QB5 or AB5	QB5 or AB5	Number	Byte 5 (0 -255) of output area
MB6	MB6	Number	Byte 6 (0 -255) of memory area

Nota. Equivalencia entre el direccionamiento de Node-RED S7 endpoint y TIA Portal (OpenJSFoundation, n.d.)

5. MARCO METODOLÓGICO

5.1 Descripción del proyecto

El proyecto consistió en la simulación de una máquina termoformadora de poliestireno expandido, haciendo énfasis en el sistema de calentamiento. Se utilizó un PLC como controlador principal y una interfaz HMI para la supervisión del proceso. De manera visual se representó el comportamiento térmico del material EPS durante su paso por el horno de calentamiento y también todas las etapas del ciclo completo del termoformado. Todo este sistema se desarrolló solo en un entorno simulado, el cual permitió observar el comportamiento del proceso sin necesidad de equipos físicos.

La primera fase consistió en la identificación y definición del proceso del termoformado, considerando las etapas de alimentación, calentamiento, corte y transporte, también los parámetros térmicos del material EPS. La segunda fase correspondió al diseño de la lógica de control en el PLC para la operación automática como las secuencias, condiciones de seguridad y alarmas.

La tercera fase correspondió al desarrollo de la interfaz HMI para la supervisión visual del proceso, temperaturas, estados y notificaciones. La cuarta fase se llevó a cabo mediante el modelado y la simulación del sistema de calentamiento para analizar la respuesta térmica del EPS bajo tres recetas predefinidas. Finalmente, en la quinta fase se realizó la integración del dashboard mediante un dispositivo IoT2040 para la recopilación y visualización de KPI, para así analizar el comportamiento del proceso en un entorno simulado.

5.2 Tipo de metodología

Para el desarrollo de este proyecto, se aplicó la metodología experimental, la cual consistió en realizar las pruebas del prototipo del sistema de calentamiento de una máquina termoformadora en un tablero del Laboratorio de Automatización Industrial II, ajustando los parámetros de configuración en el PLC y HMI según sea necesario.

También se aplicó la metodología sistemática, donde se estableció mediante un enfoque organizado, las fases sucesivas que se debían llevar a cabo para cumplir con los objetivos del prototipo simulado.

5.3 Etapas del prototipo

5.3.1 Etapa 1: Análisis de requerimiento

Fue importante analizar y comprender en detalle cada objetivo que se planteó en el proyecto, es decir, en esta etapa se estudió el funcionamiento de cómo es la aplicación de una termoformadora y las características del horno de calentamiento de la máquina.

5.3.2 Etapa 2: Programación del PLC

La programación se realizó en lenguaje Ladder o escalera, donde se estableció la lógica de control PID, la validación de entradas y salidas digitales del PLC, configuración de alarmas por sobre temperatura y estados del sistema.

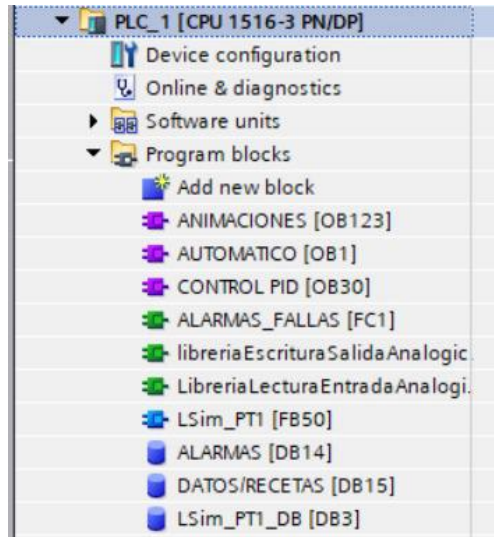
Como paso inicial de la programación en el PLC, se realizó la creación de bloques. El bloque de organización ANIMACIONES (OB123) creó las señales destinadas a la visualización del sistema. Complementariamente, el bloque Main (OB1) correspondió al ciclo principal del sistema, el cual es la secuencia automática del proceso de termoformado.

Del mismo modo, se creó un bloque CONTROL PID (OB30) que gestionó el control de temperatura y el cual generó una regulación independiente al ciclo principal. Luego está el bloque de ALARMAS_FALLAS (FC1) que identificó condiciones anómalas del sistema y no almacena estados.

Adicionalmente, para el manejo de señales analógicas dentro del PLC, se incorporaron los bloques de LibreríaEscrituraSalidaAnalógica y LibreríaLecturaEntradaAnalógica. Finalmente, para el almacenamiento de datos del sistema y parámetros adaptables del proceso, se utilizaron los bloques ALARMAS (DB14) Y DATOS/RECETAS (DB15). En la figura 25 se puede observar cómo se organizó de manera modulada cada bloque.

Figura 25

Estructura de bloques y librerías utilizadas en la programación del PLC.

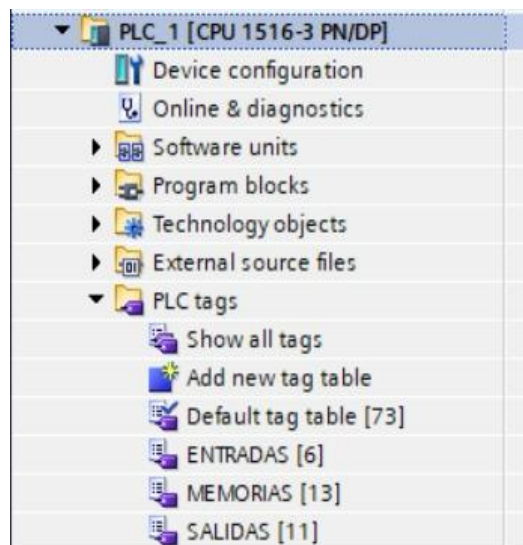


Nota. Organización de bloques de simulación, control, alarmas, señales analógicas y almacenamiento de datos para el proceso de termoformado.

Con el fin de generar un correcto funcionamiento se procedió a realizar la organización de variables del PLC S7-1500 mediante tablas de tags como se observa en la figura 26.

Figura 26

Estructura general de las tablas de tags del PLC



Nota. Estructura general de tablas.

En la figura 27 se presenta la tabla que definió las señales digitales como START y STOP, utilizadas para el arranque y detección del proceso. También se incorporó la variable TempHorno tipo real que registró la temperatura del horno. Asimismo, el potenciómetro permitió realizar ajustes manuales durante el proceso.

Figura 27

Tabla de entradas del sistema

ENTRADAS							
	Name	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...
1	START	Bool	%IO.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	STOP	Bool	%IO.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	TempHorno	Real	%MD26	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	SensorPresenciaLamina	Bool	%M0.5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	SelectorAuto	Bool	%M0.7	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	POTENCIOMETRO	Real	%MD4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	<Add new>			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Nota. Entradas.

Por otro lado, se creó la tabla de memorias internas que fueron utilizadas para el almacenamiento de variables lógicas y control para la coordinación del funcionamiento del termoformado. Por ejemplo, como se observa en la figura 28 el control térmico se apoyó en las variables HabilitarPID y SetPoint, que permitieron regular y definir la temperatura del horno.

Figura 28

Tabla de memorias internas del sistema

MEMORIAS								
	Name	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...	Supervision
1	INICIO	Bool	%M0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
2	START_HMI	Bool	%M0.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	STOP_HMI	Bool	%M0.4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	LP_START_HMI	Bool	%M0.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	LP_STOP_HMI	Bool	%M0.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	ESTADO	Int	%MW10	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	HabilitarPID	Bool	%M1.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
8	SetPoint	Real	%MD18	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
9	CONTADOR	Int	%MW12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
10	TempLista	Bool	%M2.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
11	Transporte	Int	%MW14	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
12	LP_ALIMENTADOR	Bool	%M2.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
13	TRIGGER	Bool	%M2.7	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
14	<Add new>			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Nota. Memorias internas.

Finalmente, se realizó la tabla de salidas del sistema, la cual permitió accionar los elementos del proceso de termoformado en la simulación como se observa en la figura 29. Por ejemplo, en la etapa de enfriamiento, las variables Turbinas se encendieron después del ciclo previo y son variables tipo bool que actúan como encendido o apagado.

Figura 29

Tabla de salidas del sistema

SALIDAS								
	Name	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...	Supervision
1	LP_START	Bool	%Q0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
2	LP_STOP	Bool	%Q0.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	Resistencia	Real	%MD22	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	MotorRodilloPlastico	Bool	%M0.6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	CompresorVacio	Bool	%M1.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	TurbinaEnfriamiento1	Bool	%M1.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	TurbinaEnfriamiento2	Bool	%M1.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
8	TurbinaEnfriamiento3	Bool	%M1.4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
9	TurbinaEnfriamiento4	Bool	%M1.5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
10	Cilindro_Corte	Bool	%M1.6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
11	Banda_Transportadora	Bool	%M1.7	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
12	<Add new>			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Nota. Salidas del sistema.

Bloque Main

Network 1: Automático

En la siguiente network se estableció la lógica de inicio y paro del proceso automático de la máquina termoformadora. En esta etapa la función principal consistió en habilitar la etapa inicial del sistema cuando se recibió una orden de arranque desde la interfaz HMI. En la figura 30 se puede observar la entrada digital %I0.0 (START) perteneciente al pulsador físico de arranque y %M0.3 (START_HMI) correspondiente al comando inicio desde la HMI. Ambas señales permiten activar el bloque SR, y memorizar el estado de inicio del proceso mediante la marca %M0.0 (INICIO).

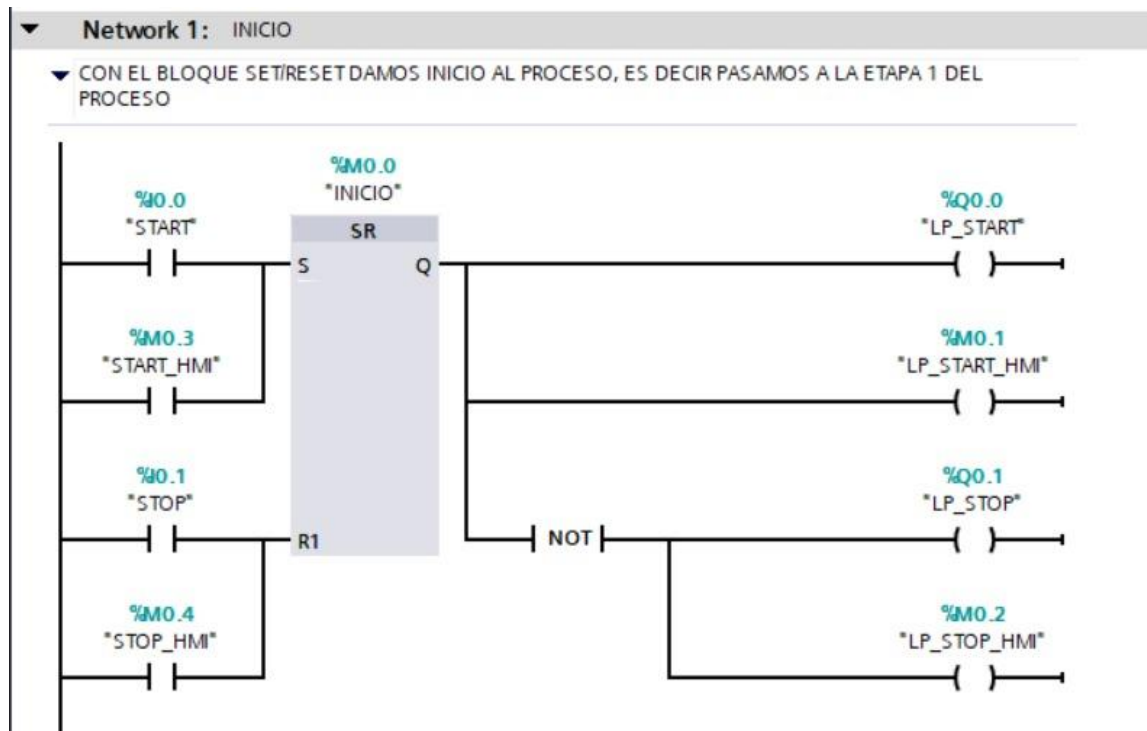
Se configuró el bloque SET/RESET (SR) el cual permitió mantener activo el estado de inicio sin necesidad de mantener el pulsador presionado. Cuando la marca %M0.0 se activó el sistema habilitó las salidas %Q0.0 (LP_START) y %M0.1 (LP_START_HMI).

También se configuró la detención del proceso con la entrada %I0.1 (STOP) y marca %M0.4 (STOP_HMI), ambas conectadas a la entrada R1 del bloque SR cuya

función consistió en resetear el estado de inicio y deshabilitar el proceso. Adicionalmente, se utilizó una lógica negada (NOT) para poder controlar las señales %Q0.1 (LP_STOP), y M0.2 (LP_STOP_HMI), las cuales indicaron el estado de paro del sistema.

Figura 30

Programación del inicio y paro del proceso automático



Nota. Secuencia lógica del control de arranque con el uso del bloque SET/RESET (SR) que permite la activación del proceso.

Network 2: Alimentador de lámina plástica

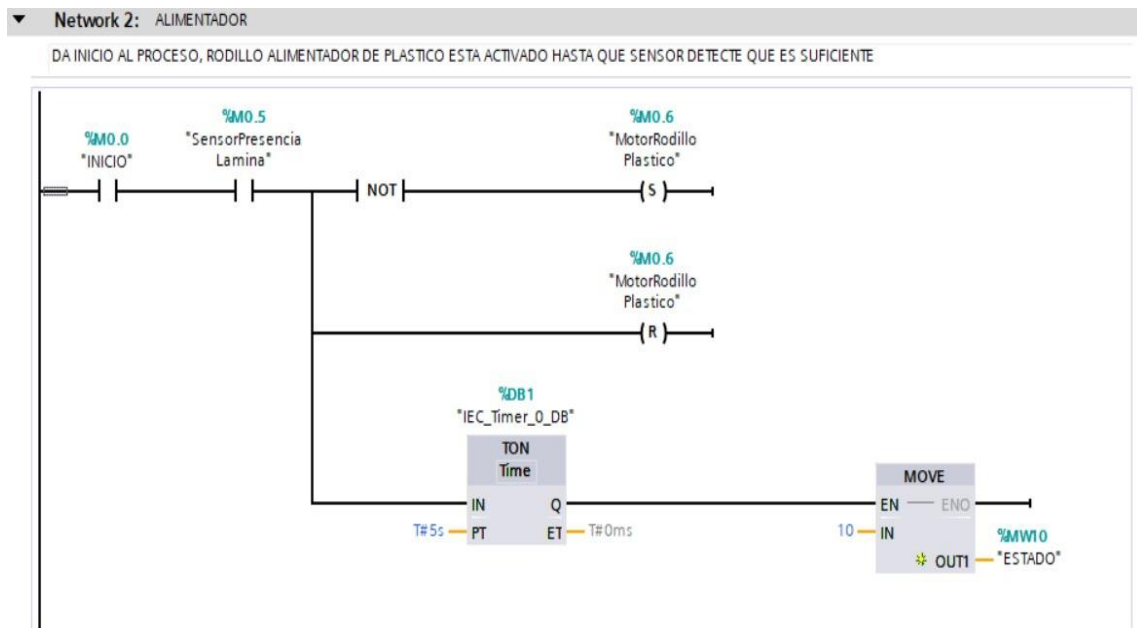
En esta network se realizó la lógica de alimentación de la lámina plástica que dirigió el área de calentamiento como se observa en la figura 31. La marca %M0.0 (INICIO) ejecutó esta etapa, asegurando que el rodillo funcionara cuando el proceso automático estuvo activo.

La marca %M0.5 (SensorPresenciaLámina) detectó la presencia de la lámina plástica, y se utilizó una lógica negada (NOT) para la activación del rodillo del alimentador. El encendido del motor se activó mediante la función SET (S) sobre la marca %M0.6 (MotorRodilloPlástico). Así, la marca %M0.6 se desactivó mediante la función RESET (R), lo que detuvo el rodillo alimentador.

También, se incorporó un temporizador TON (IEC_Timer_0_DB) con un tiempo preestablecido de 5 segundos, actuó como un tiempo mínimo de validación antes de la siguiente etapa.

Figura 31

Programación del sistema de alimentación de la lámina plástica



Nota. Lógica SET/RESET y temporización TON.

Network 3: Horno-Proceso de calentamiento

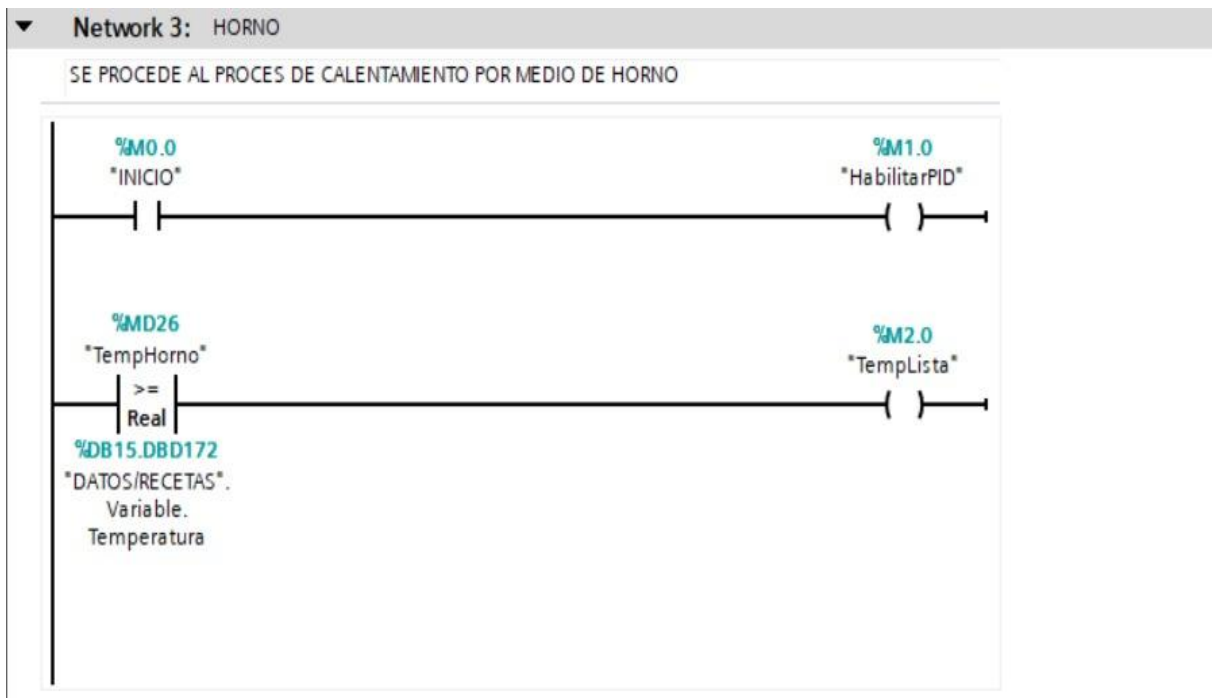
En esta etapa se desarrolló el proceso de calentamiento del termoformado mediante el horno. Este se habilitó con la marca %M0.0 (INICIO) cuando estuvo activa. La marca %M1.0 (Habilitar PID) permitió el funcionamiento de control PID, encargado de regular la temperatura del horno al setpoint predeterminado.

La variable %MD26 (TempHorno) representó el valor de la temperatura actual del horno y fue comparada con el bloque de datos DB15.DBD172, correspondiente a la temperatura de la receta seleccionada. Esta comparación se realizó con el uso de (\geq).

Cuando la temperatura del horno alcanzó o superó el valor de la receta se activa la marca %M2.0 (Templista). La cual indicó que la temperatura deseada ha sido alcanzada y habilita la siguiente etapa, como se observa en la figura 32.

Figura 32

Programación del proceso de calentamiento del horno



Nota. Lógica del proceso de calentamiento, donde se habilita el controlador PID.

Network 4: Formado

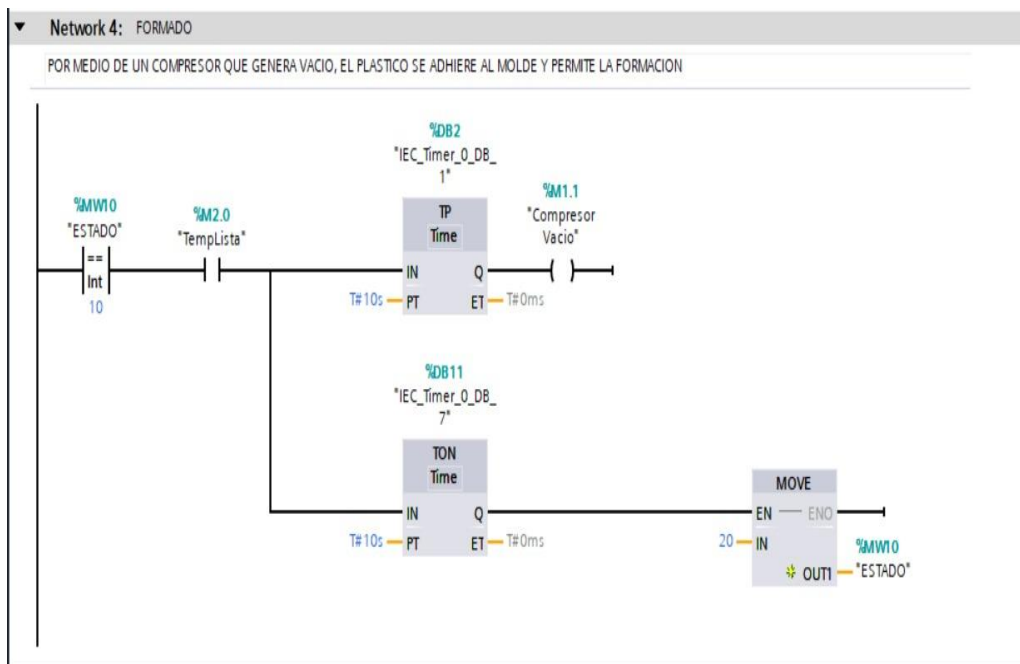
La etapa del formado del material plástico se diseñó para ejecutarse después de que la lámina ha alcanzado la temperatura adecuada para su moldeado. En la figura 33 se observa que se estableció la condicional inicial para el funcionamiento de la etapa con la variable %MW10 (ESTADO) la cual se definió igual a 10. Adicionalmente, la marca %M2.0 (TempLista) reafirmó que la lámina alcanzó la temperatura requerida para iniciar el proceso de formado.

Cuando estas condiciones se cumplen, se activa el temporizador de pulso TP (IEC_Timer_0_DB) con un tiempo de 10 segundos y energiza %M1.1 (Compresor Vacío). Este intervalo correspondió a la fase donde se aplicó vacío sobre el material.

También, de manera paralela, se utilizó un temporizador de retardo a la conexión TON (IEC_Timer_0_DB), configurado de 10 segundos, donde la salida Q habilitó la instrucción MOVE.

Figura 33

Programación de la etapa de formado



Nota. Lógica del proceso de formado plástico con temporizadores TP y TON.

Network 5: Corte de producto

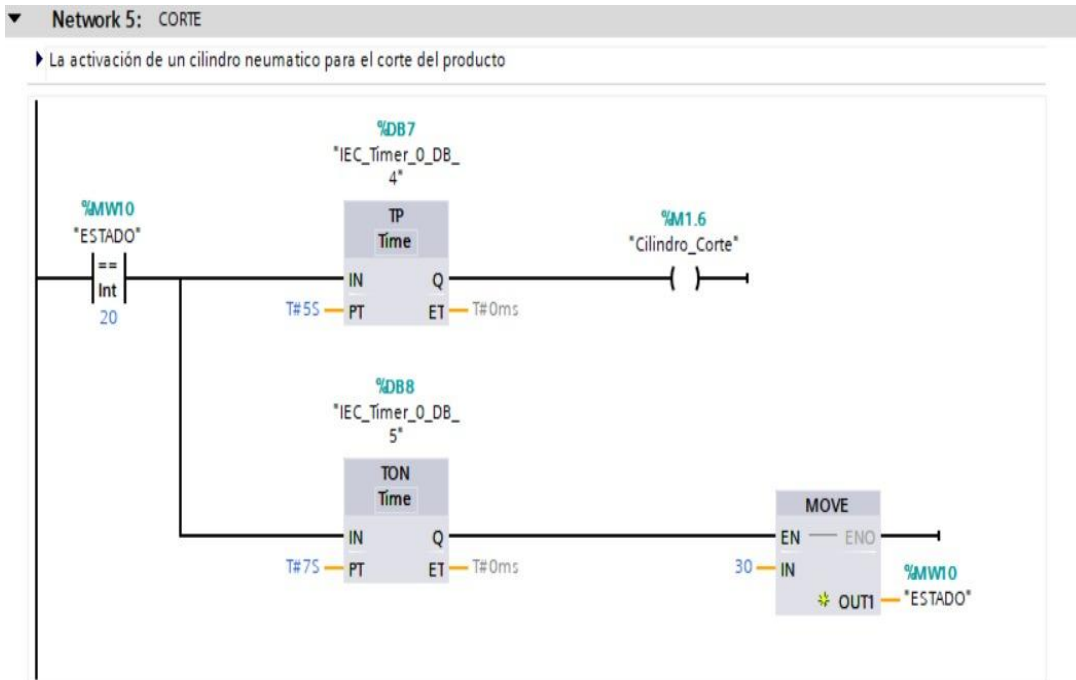
En esta etapa la lógica se enfocó en el corte del producto como se observa en la figura 34, mediante la activación de un cilindro neumático, mediante la variable %MW10 (ESTADO) que tomó el valor de 20 permitiendo la ejecución de la rutina de corte.

Una vez cumplida la condición de estado, se usó un temporizador de tipo TP (IEC_Timer_0_DB) con un tiempo preestablecido de 5 segundos, generando un pulso de duración definida. La salida Q de este temporizador controló la marca %M1.6 (Cilindro_Corte), que activó el cilindro neumático durante el tiempo necesario.

Después se configuró un temporizador tipo TON (IEC_Timer_0_DB) con un tiempo de 7 segundos, que estableció un retardo antes de ir a la siguiente etapa. Finalizado este tiempo, la salida Q del temporizador habilita MOVE, donde se asignó el valor 30 a la variable %MW10 (ESTADO).

Figura 34

Programación de etapa de corte



Nota. Lógica del proceso de activación del cilindro de corte con temporizadores TP y TON.

Network 6: Enfriamiento

En la siguiente network se implementó la etapa del enfriamiento de molde, cuya finalidad consistió en preparar el producto termoformado para su transporte y manipulación. La variable %MW10 (ESTADO) tomó el valor 30, lo que indica que la etapa de corte ha sido completada y que el sistema está listo para el enfriamiento.

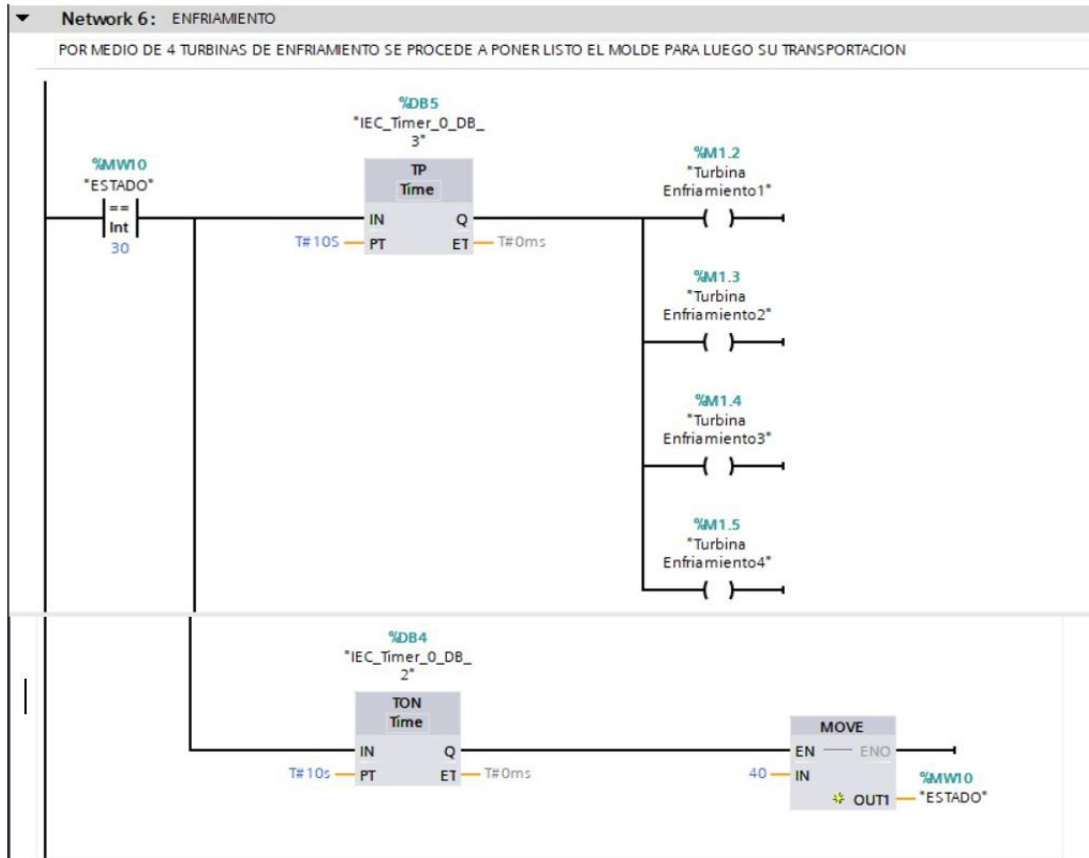
Cumplida la condición anterior, se empleó un temporizador tipo TP (IEC_Timer_0_DB) con tiempo preestablecido de 10 segundos, que generó pulso de activación. La salida Q de este temporizador se usó para controlar las turbinas de enfriamiento 1,2,3,4 de manera simultánea, correspondiente a las marcas %M1.2, %M1.3, %M1.4 y %M1.5.

Posteriormente, se utilizó otro temporizador de tipo TON (IEC_Timer_0_DB), también establecido con 10 segundos el cual establece el tiempo total de la etapa. Con la finalización de este tiempo programado, la salida Q del temporizador habilita el bloque

MOVE con un valor de asignación 40 a la variable %MW10 (ESTADO). En la figura 35 se puede observar la programación de la etapa de enfriamiento.

Figura 35

Programación de enfriamiento



Nota. Lógica del proceso de enfriamiento con cuatro turbinas con temporizadores TP y TON.

Network 7: Banda Transportadora y contador

En esta etapa se desarrolló el transporte del producto del termoformado. En la figura 36 se observa cuando la variable %MW10 (ESTADO) tomó el valor 40, se habilitó la condición que indica que ha concluido la etapa previa. Como siguiente paso se utilizó la marca %M1.7 (Banda Transportadora) que habilitó el sistema de transporte y en paralelo un enclavamiento para la activación física del motor %Q0.5 únicamente en esta etapa.

Para el control del tiempo se empleó el uso de un temporizador de tipo TON (IEC_Timer_0_DB) con tiempo predeterminado de 40 segundos. Finalizado el tiempo su salida Q habilita el bloque MOVE donde asignó el valor de 0 a la variable

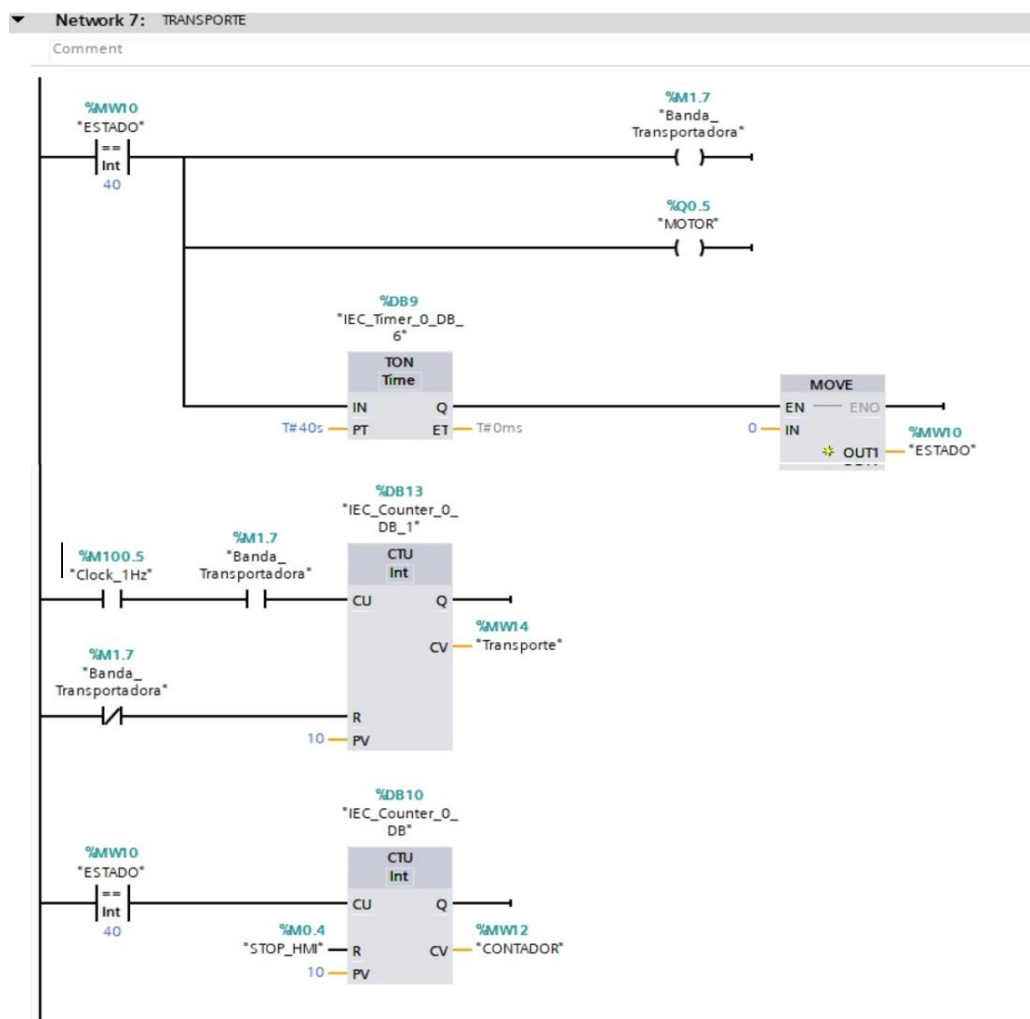
%MW10(ESTADO) cuya finalidad fue reiniciar la máquina de estados para un nuevo proceso.

Adicionalmente se configuró un contador CTU de transporte, para que sea representado de una manera cuantificable. Se utilizó una señal de pulso de referencia %M100.5 (Clock_1Hz) que permitió que el conteo incremente de manera periódica mientras %M1.7 estuvo activada. El valor contado se visualiza y se almacena mediante %MW14 (TRANSPORTE) que permitió observar el avance en la banda. El valor de PV se utilizó como límite de conteo.

También se estableció un contador CTU general asociado con el estado 40, cuyo valor se almacenó en %MW12 (CONTADOR) y además cuya función es un conteo del proceso. Además, se incluye la señal %M0.4 (STOP_HMI) que permitió reiniciar el sistema cuando es detenido desde el HMI.

Figura 36

Programación de etapa de conteo y transporte



Nota. Programación de la banda transportadora con temporizadores TP y contador CTU.

Bloque Animación

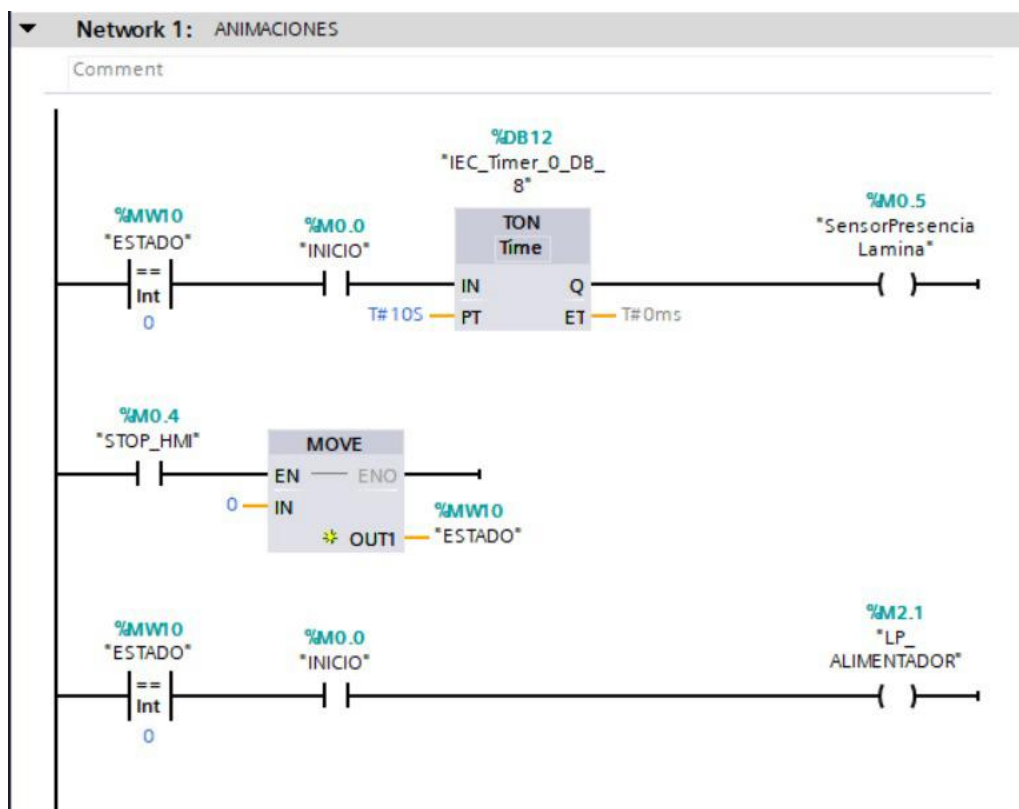
Como parte de la programación, el bloque de animación se creó con el fin de concentrar las señales que se enviaron al HMI, con el objetivo de visualizar cambios de colores, indicadores de presencia, estados del proceso y parámetros.

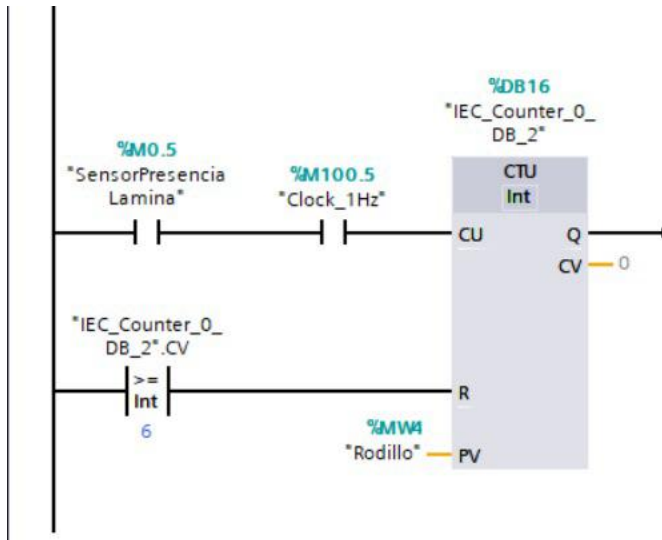
En la figura 37 muestra el bloque ANIMACIONES [OB123] y la Network 1, donde se emplearon comparaciones con la variable ESTADO de tipo INT y en serie, la memoria INICIO (%M0.0) con temporizador a la conexión TON para evitar que la animación se activara instantáneamente. Al final, se energizó el indicador SensorPresenciaLamina (%M0.5).

Y para volver al inicio se añadió una memoria STOP_HMI (%M0.4) con un bloque MOVE que escribió un valor hacia ESTADO (%MW10). Luego se realizó otra comparación con ESTADO y contacto INICIO que energizó LP_ALIMENTADOR (%M2.1) indicando si el sistema estuvo encendido o apagado.

Figura 37

Bloque ANIMACIONES y Network 1



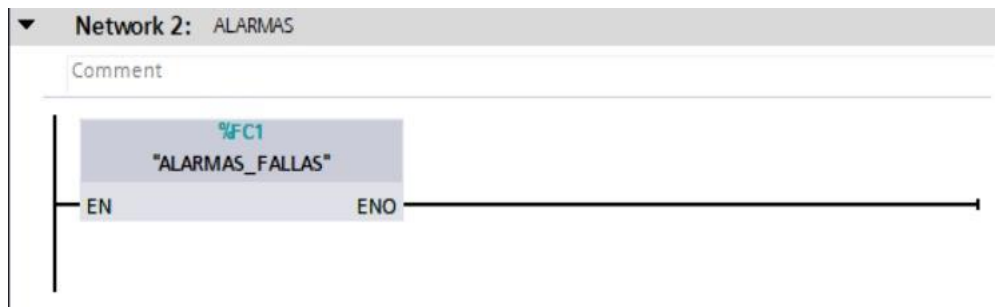


Nota. Bloque y señales orientadas a visualización.

Continuamente se integró el bloque funcional ALARMAS_FALLAS (%FC1) como se observa en la figura 38 que básicamente centralizó la detección de anomalías del proceso térmico.

Figura 38

Bloque de alarmas

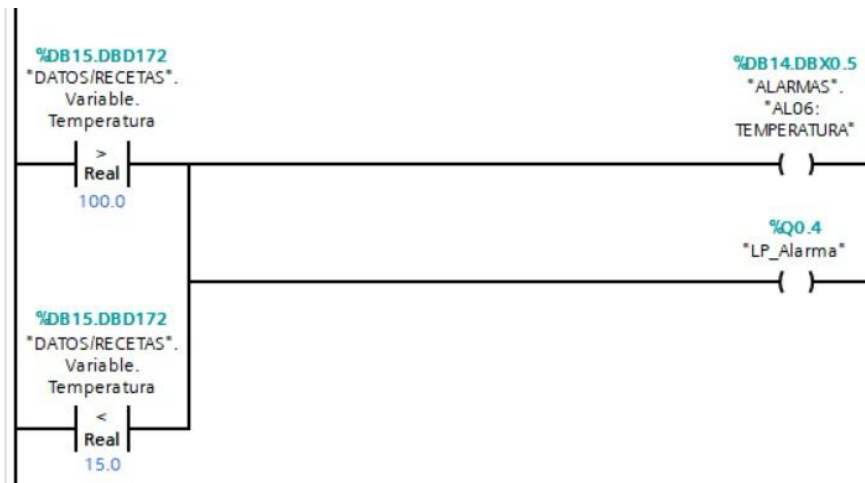


Nota. Programación de la banda transportadora

La lógica interna de previo bloque empieza con la comparación de la variable de temperatura %DB15.DBD172 con límite predefinido. Cuando la temperatura superó el umbral 100 °C o desciende por debajo de 15 °C, la alarma AL06_TEMPERATURA se activó, como se puede observar en la figura 39.

Figura 39

Lógica de alarmas

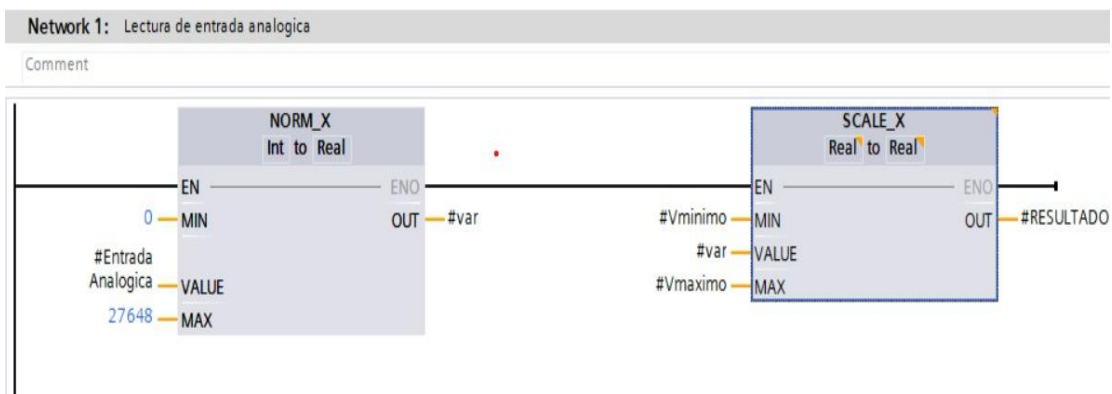


Nota. Alarmas para desviaciones críticas.

Para el valor de voltaje se utilizó el potenciómetro del módulo, por lo tanto, primero se implementaron los bloques estándar NORM_X y SCALE_X. El bloque NORM_X normalizó el valor crudo proveniente de la entrada analógica, mientras que SCALE_X convierte el valor al rango real, como se observa en la figura 40.

Figura 40

Normalización y escalado de la entrada analógica

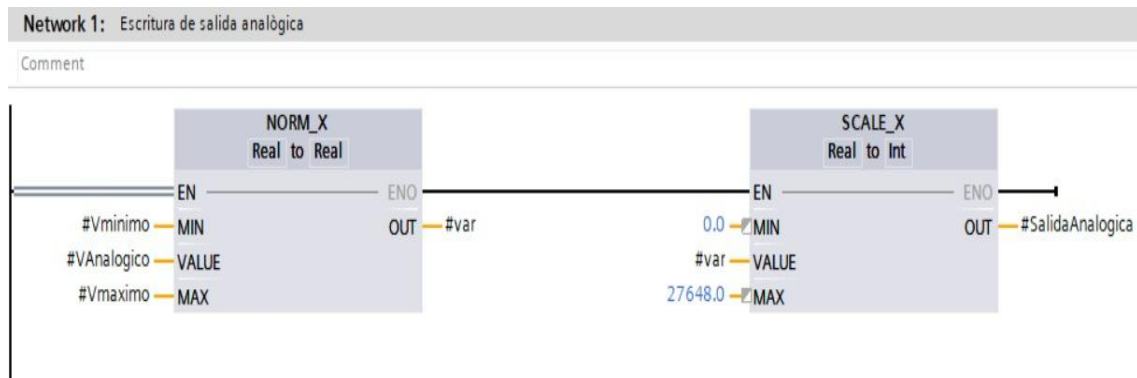


Nota. Bloques para correcta interpretación de la señal analógica.

Luego, para compatibilidad con la salida analógica el valor procesado fue nuevamente escalado como se muestra en la figura 41 de la librería de escritura de salida analógica.

Figura 41

Escritura de la señal analógica escalada

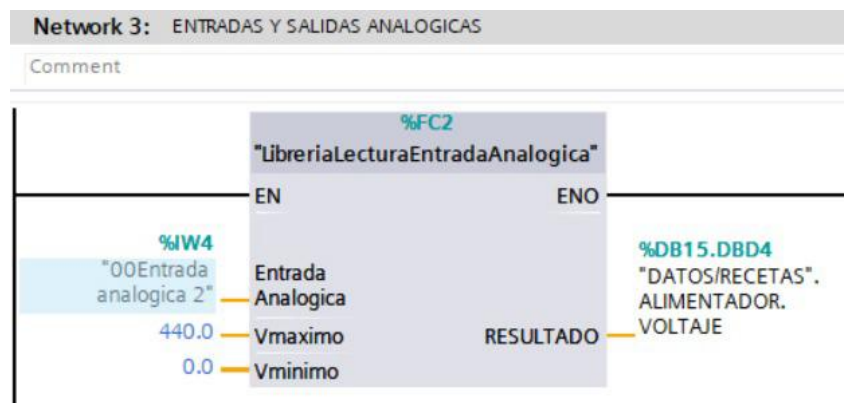


Nota. Bloques para correcta interpretación de la señal analógica.

Y posteriormente en la figura 42 se empleó el bloque funcional LibreríaLecturaEntradaAnalógica (FC2) para procesar la señal analógica proveniente del potenciómetro. Se recibió un valor de entrada analógica con límites de voltajes definidos (230,0 V y 46,0 V) y entregó una variable escalada que se utiliza dentro del sistema de las recetas.

Figura 42

Librería de lectura de entradas analógicas

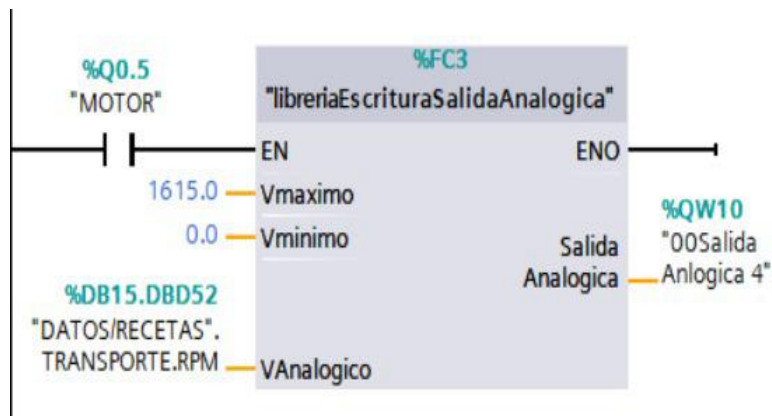


Nota. Bloque que convierte señales analógicas en valores para el sistema.

Por otra parte, se añadió el bloque funcional de LibreríaEscrituraSalidaAnalógica (FC3) el cual permitió escribir el valor de velocidad del motor (RPM) ingresado por el usuario. Se asignó un valor mínimo (0.0) y un valor máximo (1615.0) de tal manera que generó una señal proporcional en %QW10, como se observa en la figura 43.

Figura 43

Librería de escritura de salida analógica



Nota. Bloque que convierte señales analógicas en valores para el sistema.

La figura 44 muestra la network que corresponde al sistema del alimentador en la cual se implementó para el proceso energético. Se inició con un bloque ADD que permitió simular de forma progresiva el valor de corriente eléctrica. Continuamente, en serie se utilizó el bloque OUT_RANGE para verificar el rango operativo de amperaje en este caso de 5.0 A a 12.0 A y en caso de que el valor salga del rango definido el bloque MOVE lo fuerza al mínimo de 5 A entregando así un valor acorde en %DB15.DB08 "DATOS/RECETAS". ALIMENTADOR.AMPERAJE.

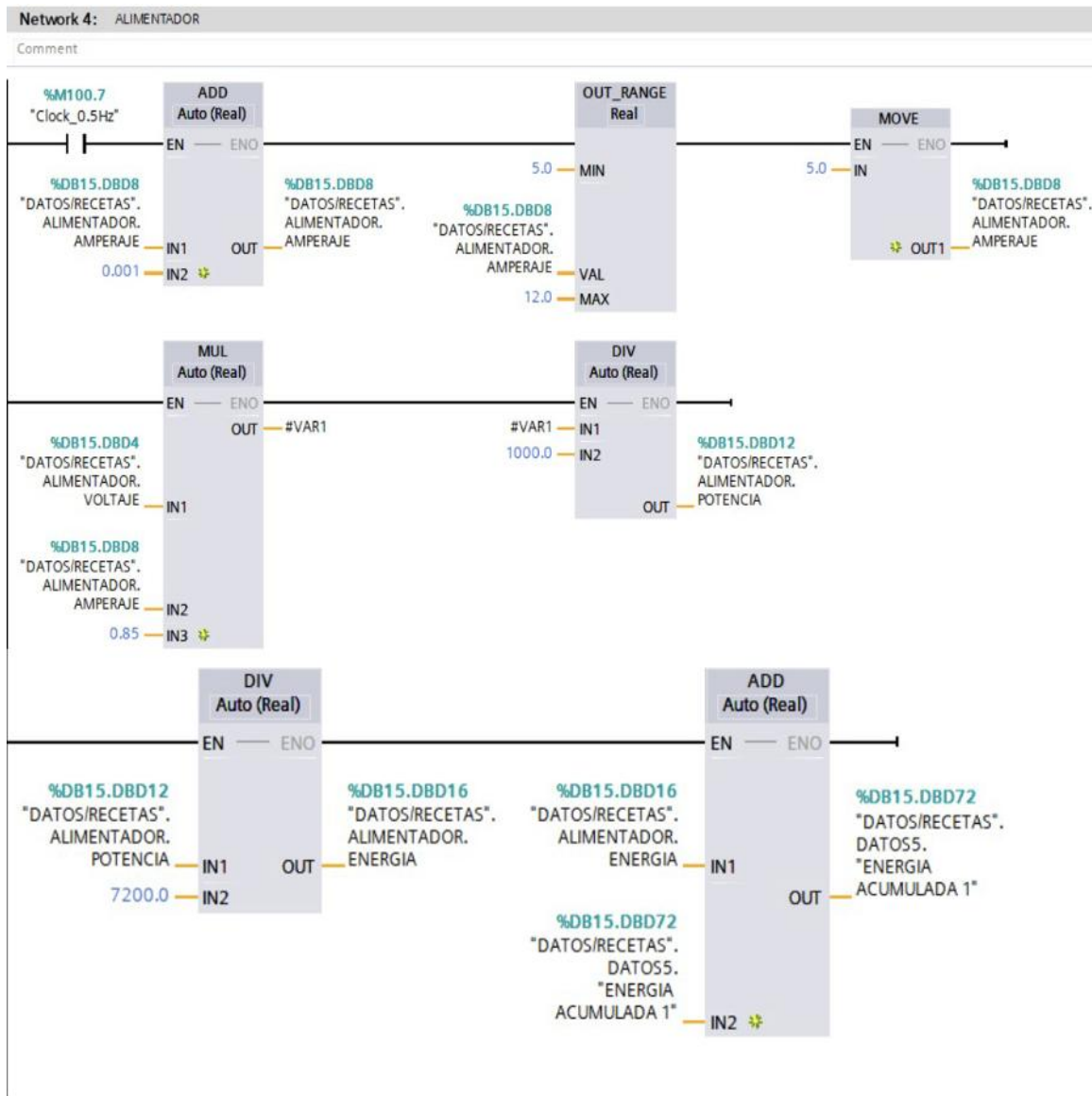
En la siguiente línea se aplicó el bloque MUL donde IN1 de voltaje es el valor leído por medio del potenciómetro mientras que el valor de la corriente y el factor de potencia 0.85 corresponden al consumo del motor. El resultado de esta operación se obtuvo en vatios (W). El primer bloque DIV es de la conversión de W a KW dividiendo el valor entre 1000 permitiendo expresar la potencia en KW.

El segundo bloque DIV convirtió la potencia en energía, considerando que el sistema trabajó con un tiempo de muestreo de 0.5 segundos, se dividió para 7200

obteniendo así la energía en KWh por cada ciclo. En el resto de las etapas se aplicó la misma lógica, pero con diferente rango operativo de corriente.

Figura 44

Lógica de cálculo del alimentador: amperaje, potencia y energía.



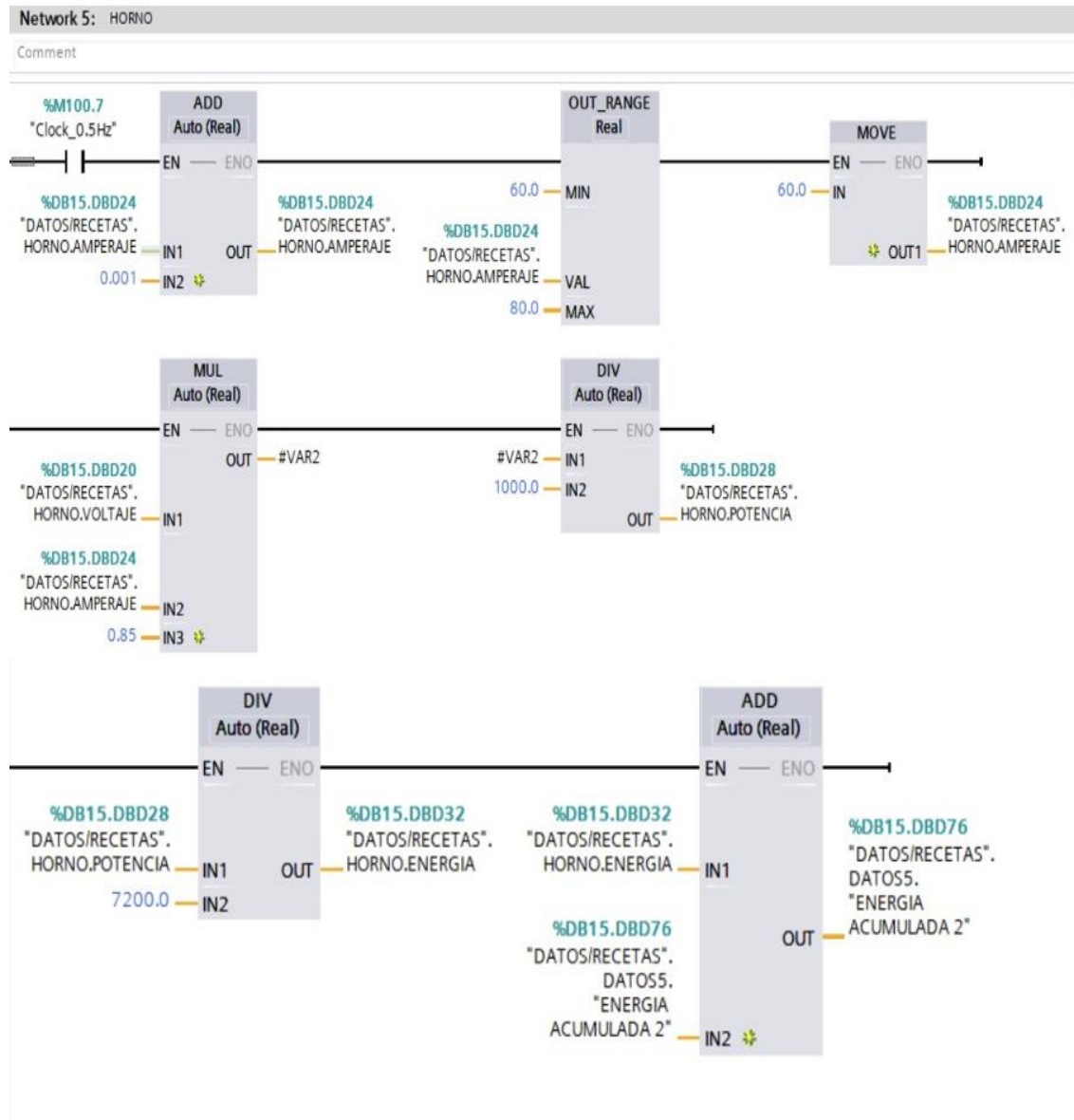
Nota. Red que permita generar un estimado y acumular el consumo energético del alimentador durante la operación.

La figura 45 muestra la network 5 correspondiente al procesamiento energético del horno. Se aplicó la misma lógica de la etapa previa de alimentador, pero en este caso el rango operativo del amperaje fue de 60 A a 80 A. Y también los valores de potencia y

energía tuvieron un seguimiento independiente que se guardan en el bloque asignado para el horno.

Figura 45

Network 5- Lógica de cálculo de potencia y energía del horno.

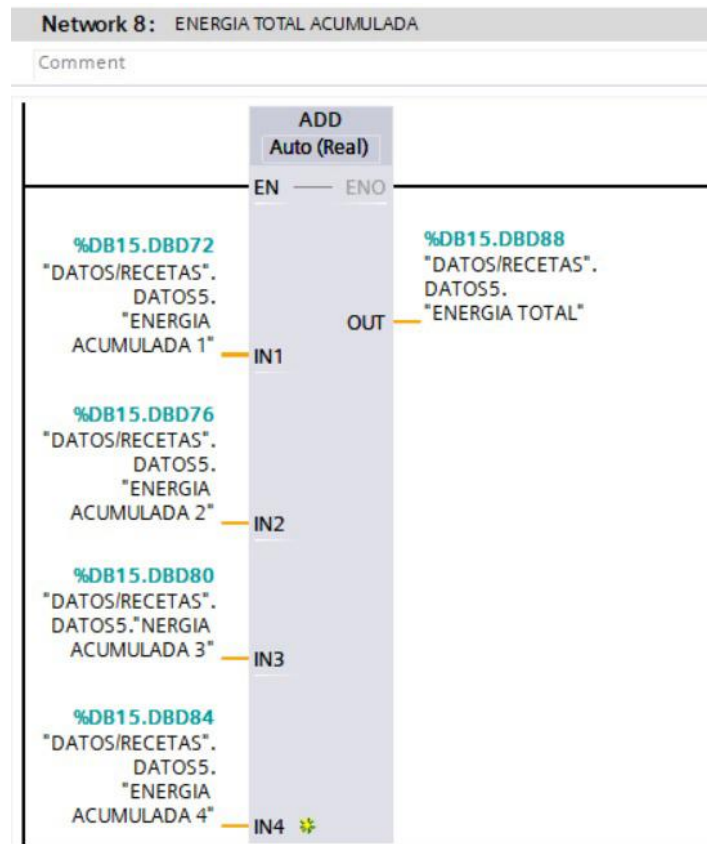


Nota. Red para cálculo de amperaje, potencia y energía acumulada del sistema térmico.

Finalmente se realizó el cálculo de energía total acumulada del sistema, como se observa en la figura 46. Se empleó el bloque ADD para sumar todas las energías de cada etapa. El resultado de esta suma se almacena en la variable ENERGIA_TOTAL con un valor acumulado único.

Figura 46

Cálculo de la energía total acumulada.



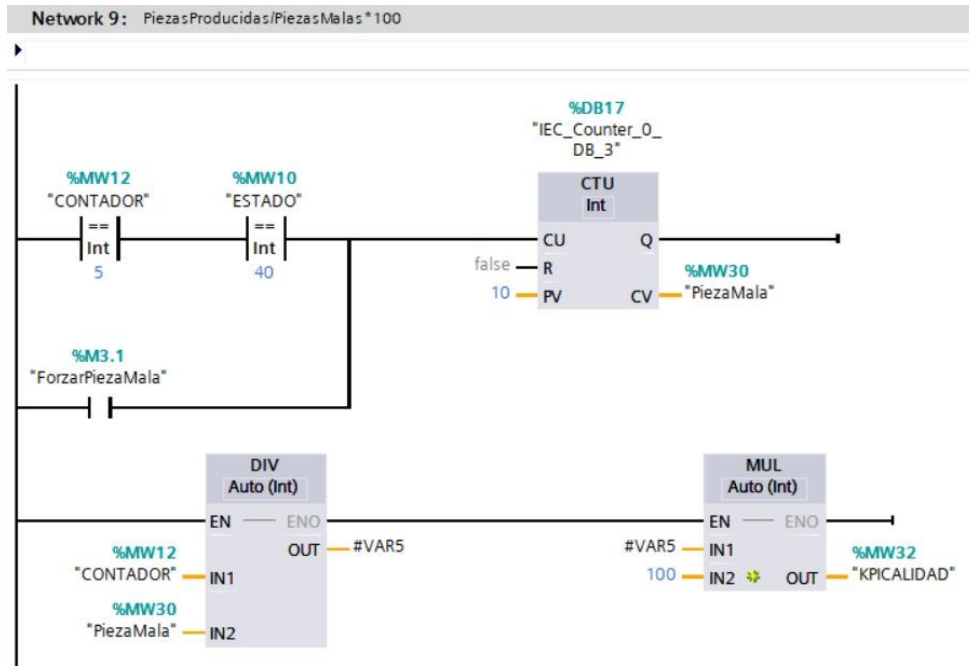
Nota. Red que integra todas las energías para obtener el consumo energético total del proceso.

Por otra parte, como se observa en la figura 47 se programó el cálculo del indicador del proceso donde se empleó inicialmente un bloque CTU que registró la cantidad de piezas malas cuando se cumplieron las condiciones de estado del sistema. El valor acumulado CV representó el total de piezas rechazadas durante la operación.

Además, mediante el bloque DIV realizó la división entre el total de piezas producidas y el número de piezas malas registradas, con el fin de obtener una relación proporcional entre producción y defectos. Finalmente, el bloque MUL multiplica este resultado por 100 para expresar el indicador en porcentaje, almacenando el valor en la variable correspondiente al KPI de calidad.

Figura 47

Cálculo del KPI basado en piezas producidas y defectuosas.

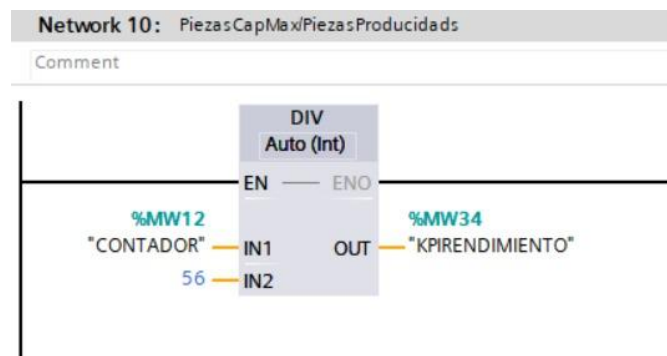


Nota. Red de conteo de piezas defectuosas y cálculo del indicador de calidad del proceso.

Finalmente, la figura 48 representa la red que se utilizó para el cálculo del KPI de rendimiento. En esta lógica se empleó el bloque de DIV para realizar una división entre los productos contados y capacidad máxima en este caso 56.

Figura 48

Cálculo del KPI de rendimiento



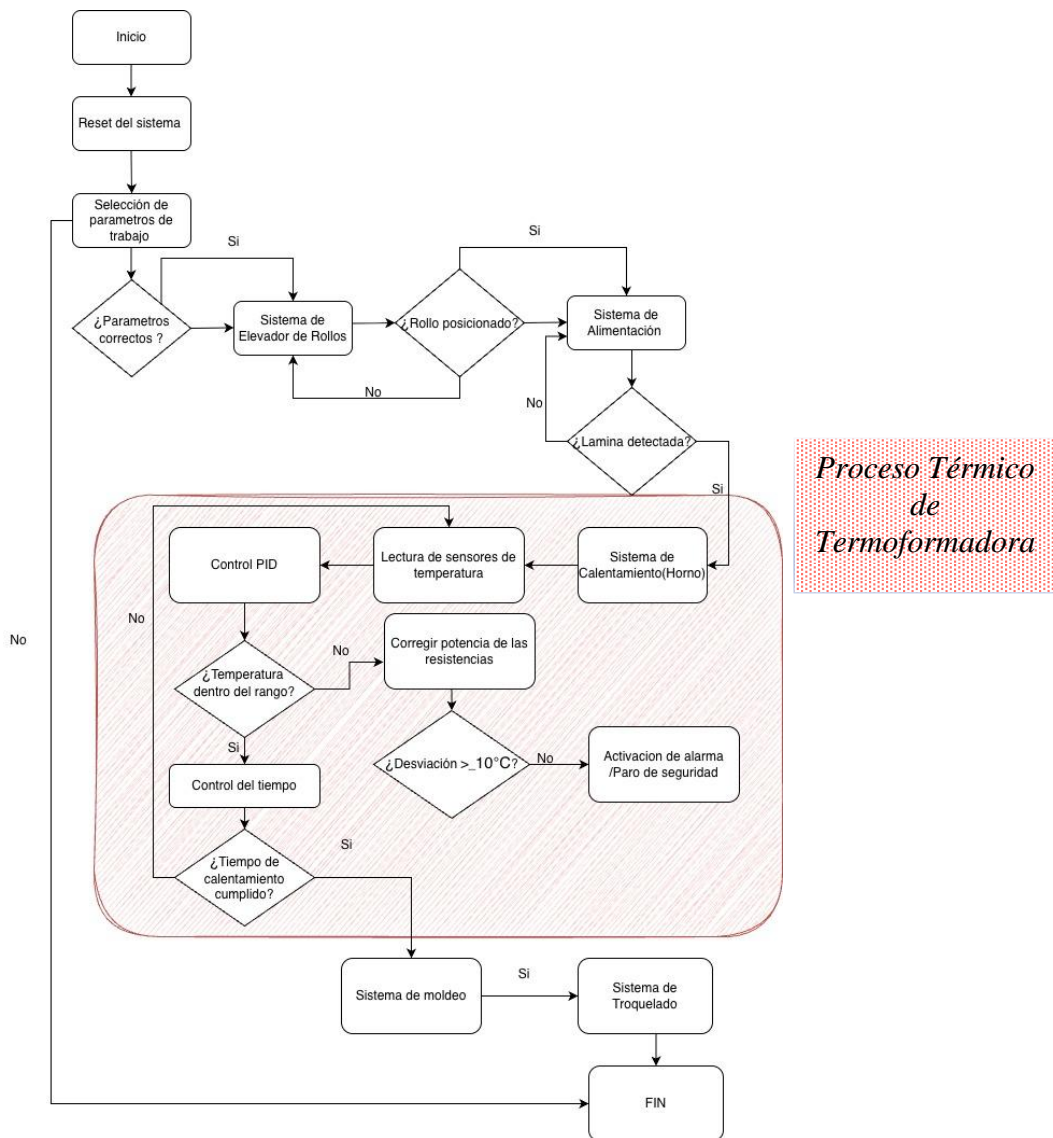
Nota. Lógica para almacenar la variable KPIRENDIMIENTO.

5.3.3 Etapa 3: Diseño de la interfaz HMI

En esta etapa se diseñó la interfaz HMI correspondiente al proceso del termoformado. Se organizó las pantallas necesarias para visualizar la temperatura, configurar parámetros y revisar el estado del sistema. El diseño incluyó botones y elementos de navegación que permitan al operador interactuar con cada fase del proceso. A continuación, se presenta el diagrama de flujo estimado en la figura 49 del proceso del termoformado.

Figura 49

Diagrama de flujo del proceso de termoformado

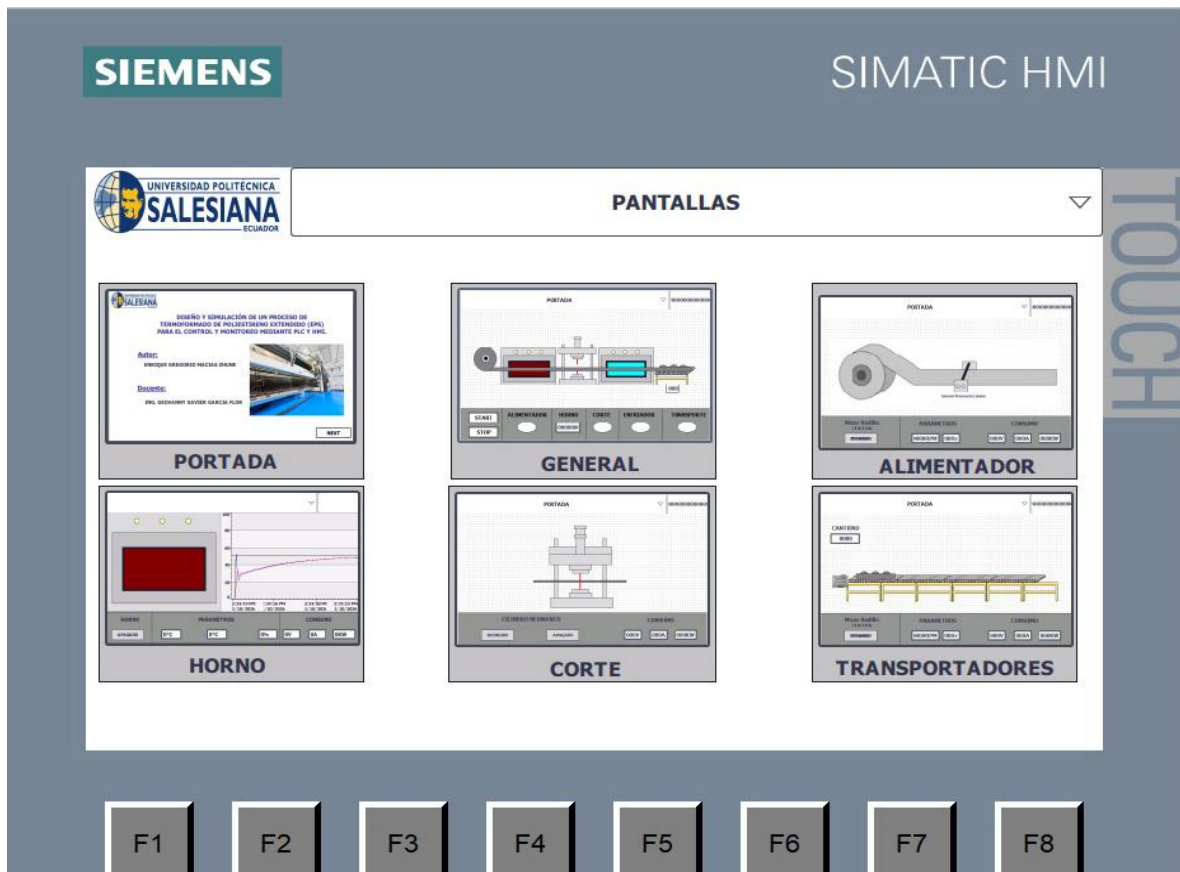


Nota. Diagrama de flujo del proceso del termoformado estimado que se visualiza en el HMI.

En esta primera interfaz se desarrolló una pantalla principal para que el usuario pudiera visualizar y acceder de forma ordenada a las diferentes etapas del proceso de termoformado. En la figura 50 se observa el diseño de la pantalla principal.

Figura 50

Portada del diseño de la Interfaz HMI



Nota. Diagrama de flujo del proceso del termoformado estimado

Luego se desarrolló una interfaz para recetas con el propósito de permitir la selección de productos y la administración de parámetros de operación como la temperatura de trabajo.

Adicionalmente, la ventana emergente ayudó a evitar modificaciones no autorizadas mediante un control de acceso basado en credenciales y contraseñas únicamente a usuarios autorizados como se observa en la figura 51.

Figura 51

Interfaz de recetas



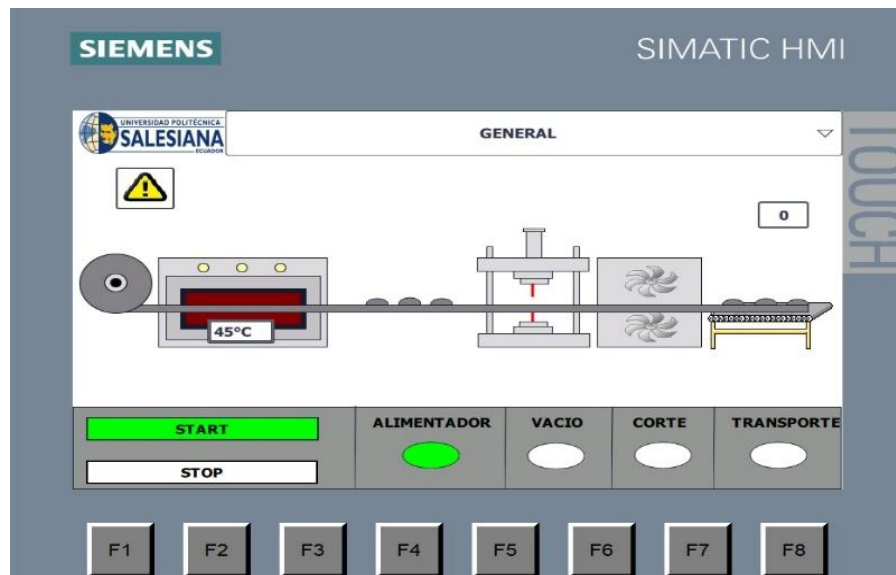
Nota. La pantalla de recetas incorpora un sistema de autenticación mediante usuario y contraseña.

En la figura 52 se observa la pantalla general que se diseñó con el fin de tener una visualización global del proceso completo que incluye horno, alimentador, corte y la banda transportadora. También se integraron los indicadores de cada etapa junto a los controles principales de arranque y paro.

Además, se incorporó de forma gráfica el desplazamiento del producto a lo largo del proceso permitiendo visualizar la secuencia de operación.

Figura 52

Pantalla general de supervisión del proceso de termoformado.

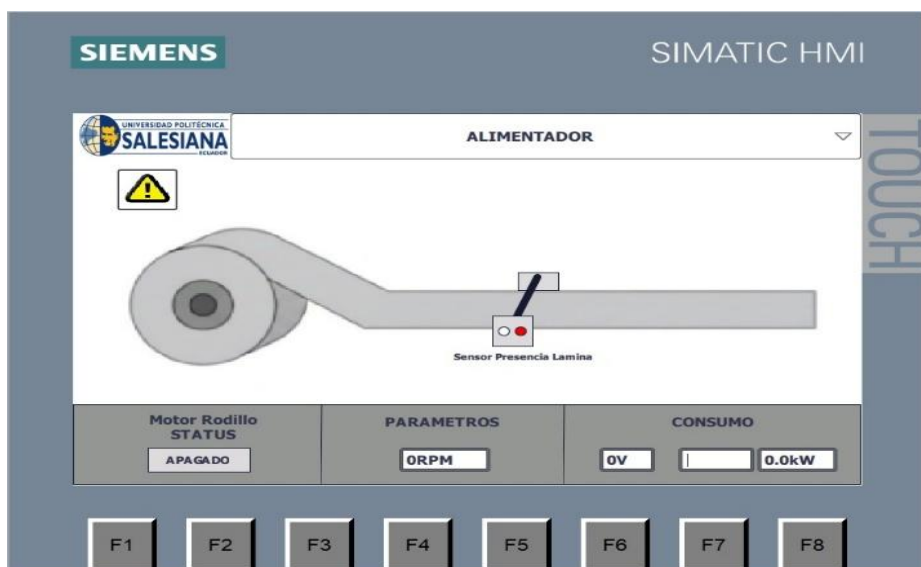


Nota. Pantalla con etapas integradas de todo el proceso.

También se diseñó la interfaz correspondiente al alimentador, en la cual mostraron el estado de motor del rodillo, los parámetros de operación y la señal del sensor de presencia de lámina como se observa en la figura 53.

Figura 53

Interfaz de etapa de alimentación



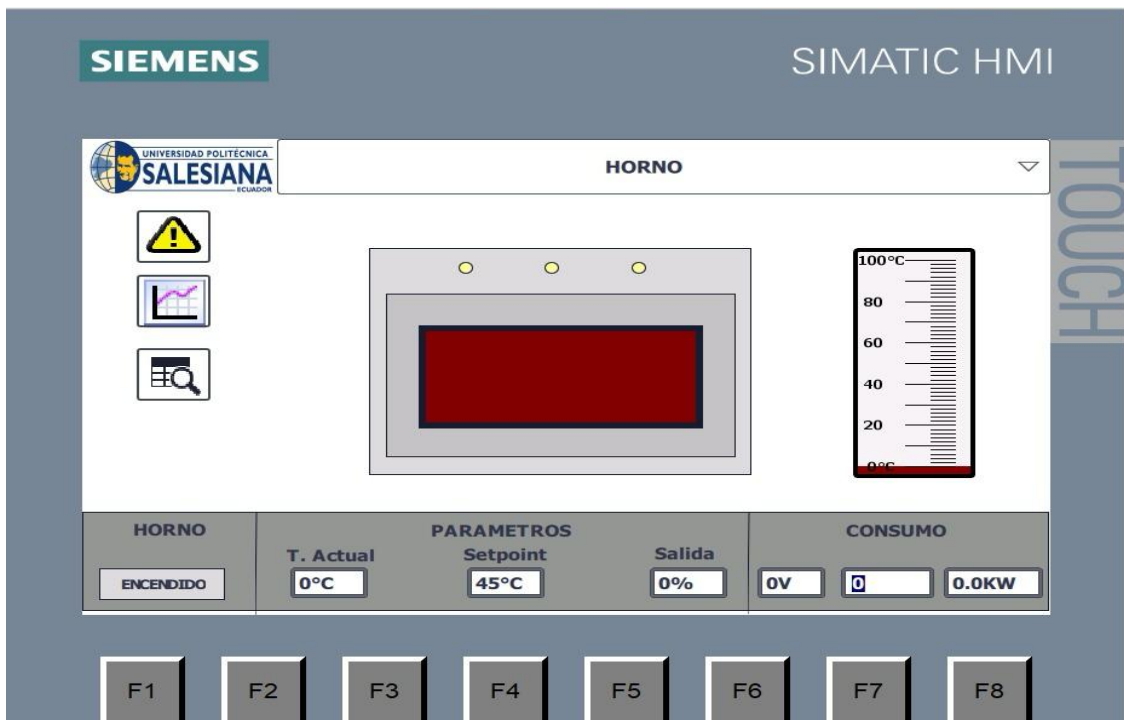
Nota. Pantalla del alimentador con parámetros, sensor, status y consumo.

Por otra parte, se realizó el diseño de la interfaz correspondiente a la etapa del horno, donde se visualizaron la temperatura actual, setpoint y output. De la misma manera, la incorporación de indicadores gráficos que permitieron una interacción más rápida del proceso térmico, en conjunto con variables de consumo eléctrico como se observa en la figura 54.

También se incorporaron botones de navegación para alarmas, tendencias y recetas para facilitar un acceso rápido en caso de que fuera requerido.

Figura 54

Interfaz de la etapa de calentamiento de horno

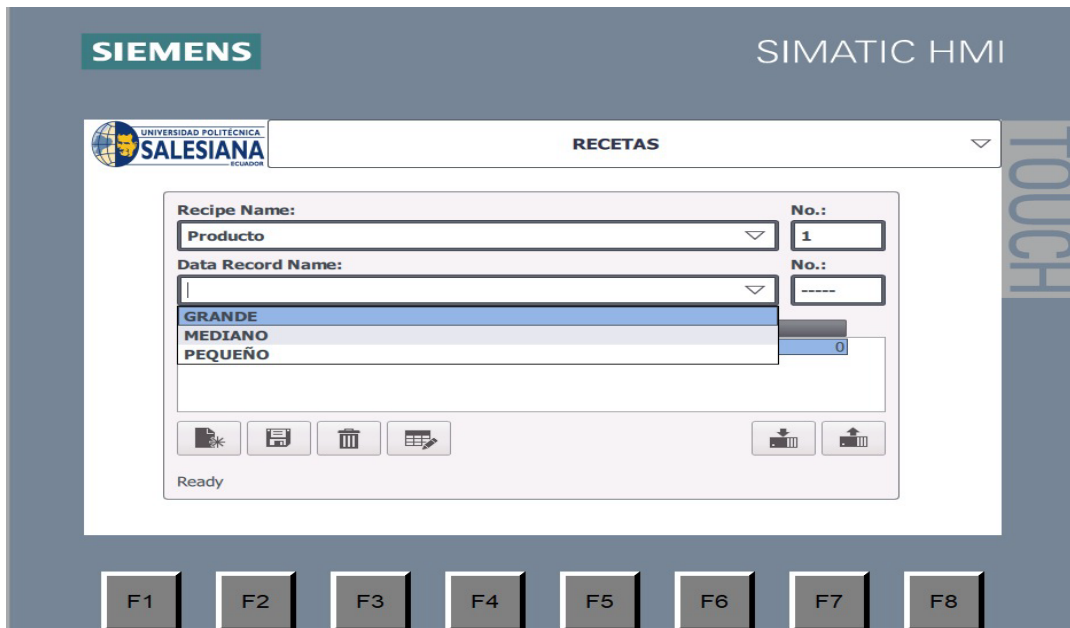


Nota. Pantalla del horno con parámetros, status y consumo.

En la figura 55 la interfaz de recetas que se diseñó con el fin de facilitar la selección del producto a fabricar. Por medio de esta pantalla se puede elegir recetas previamente definidas, las cuales poseían valores predeterminados.

Figura 55

Interfaz para la selección de recetas



Nota. Pantalla que permite seleccionar el tipo de producto.

En la figura 56 se observa la pantalla de alarmas del horno, la cual se implementó con el objetivo de registrar y visualizar eventos relacionados con desviaciones térmicas.

Figura 56

Interfaz de alarmas

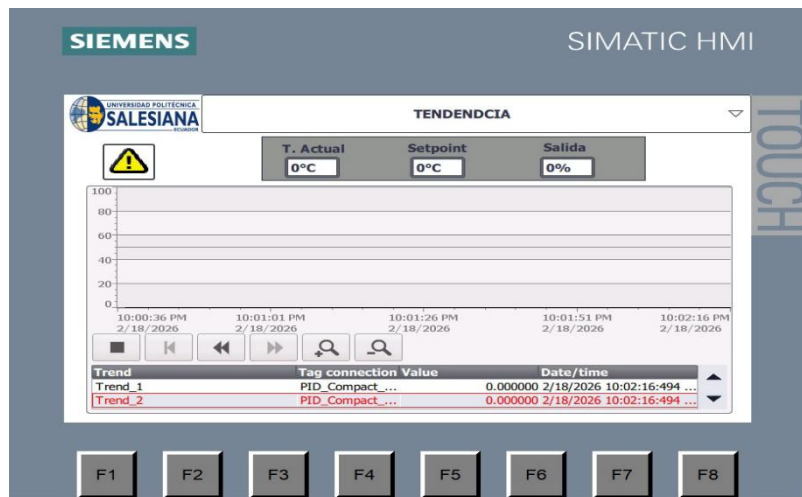


Nota. Pantalla de historial de alarmas.

Adicionalmente se realizó una interfaz como se observa en la figura 57 para visualizar el comportamiento de la temperatura del horno a lo largo del tiempo de manera simultánea el valor de consigna y el valor actual del proceso.

Figura 57

Pantalla de tendencias de temperatura del proceso

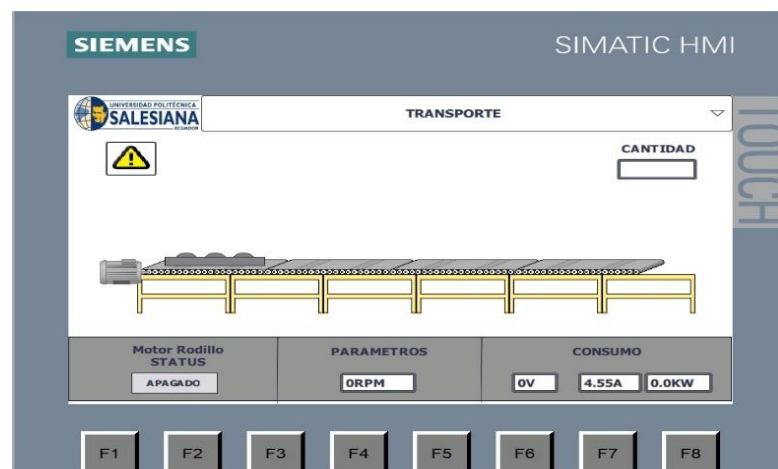


Nota. Pantalla que permite visualizar la evolución temporal de temperatura.

Finalmente, se observa en la figura 58 como se diseñó la etapa de transportación donde se observó el desplazamiento y conteo del producto, también el estado del motor del rodillo, los parámetros de operación definidos e indicadores de consumo eléctrico.

Figura 58

Interfaz de la etapa de transporte



Nota. Pantalla que permite visualizar el número de productos desplazados.

5.3.4 Etapa 4: Configuración de los parámetros del control térmico

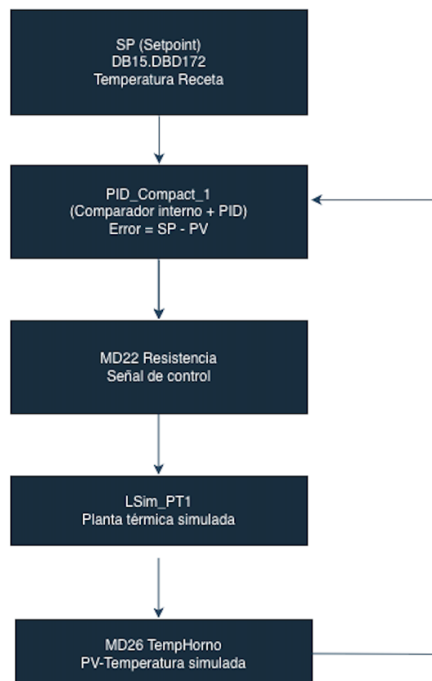
Se establecieron los parámetros del PID, en los cuales es importante tomar en cuenta las necesidades específicas del material EPS. Para ello se configuraron los valores del controlador del PLC, definiendo el setpoint adecuado para llevar el EPS a un rango apropiado sin exceder sus características de temperatura.

La figura 59 muestra el diagrama de lazo de control PID que se implementó para regular la temperatura del horno de termoformado para las diferentes recetas. El valor de orden SP (Setpoint) provino de la receta el cual se comparó internamente con la variable de proceso dentro del bloque PID compact. Desde ese error generado el controlador computó una señal de control que ajusta la potencia aplicada en la resistencia.

Adicionalmente la planta simulada de primer orden (LSim_PT1) representó la respuesta térmica del sistema la cual corresponde a la temperatura del horno, y luego cuya salida se realimenta al controlador del lazo cerrado.

Figura 59

Diagrama de lazo de control



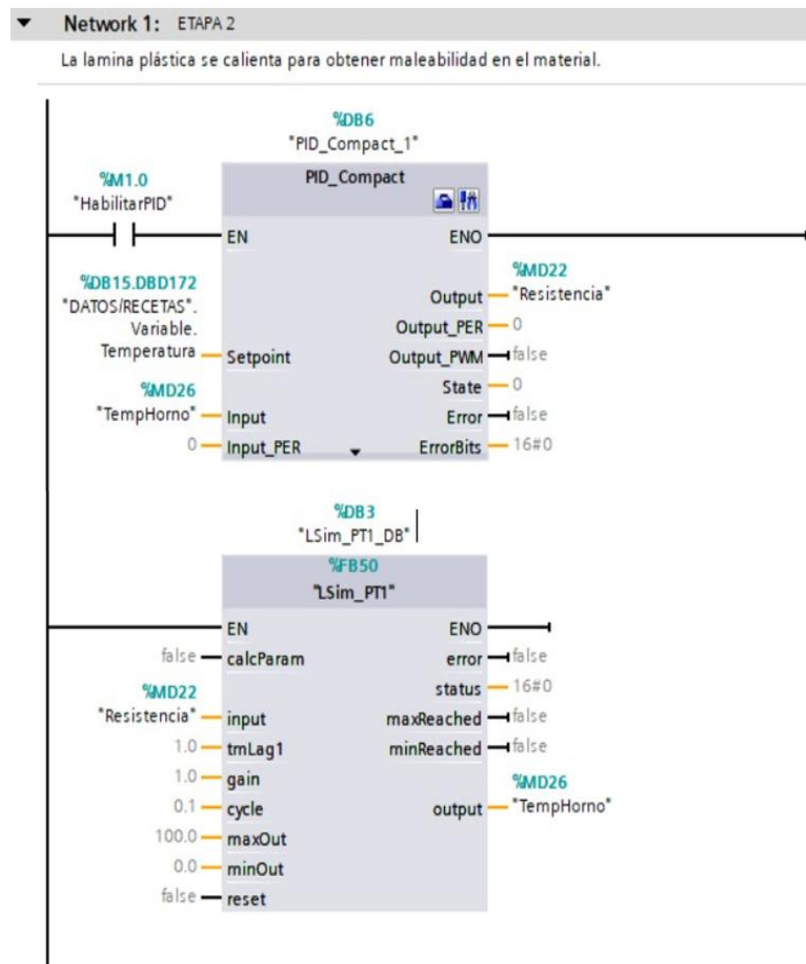
Nota. Control PID lazo cerrado para regulación de temperatura.

A continuación, primero se implementó el lazo de control por medio de la integración de los bloques PID_Compact el cual se habilita mediante la señal HabilitarPID y como SetPoint recibe el valor de temperatura definido en las recetas. También se consideró la variable (PV) la cual corresponde a la señal TempHorno, que representa la temperatura actual del sistema.

Después la salida del controlador que se almacenó en la variable Resistencia es la señal del control para el bloque Lsim_PT1 que modela el comportamiento térmico del horno y como se observa en la figura 60, el lazo se cerró en la salida del bloque con la variable TempHorno.

Figura 60

Implementación de control PID y Lsim

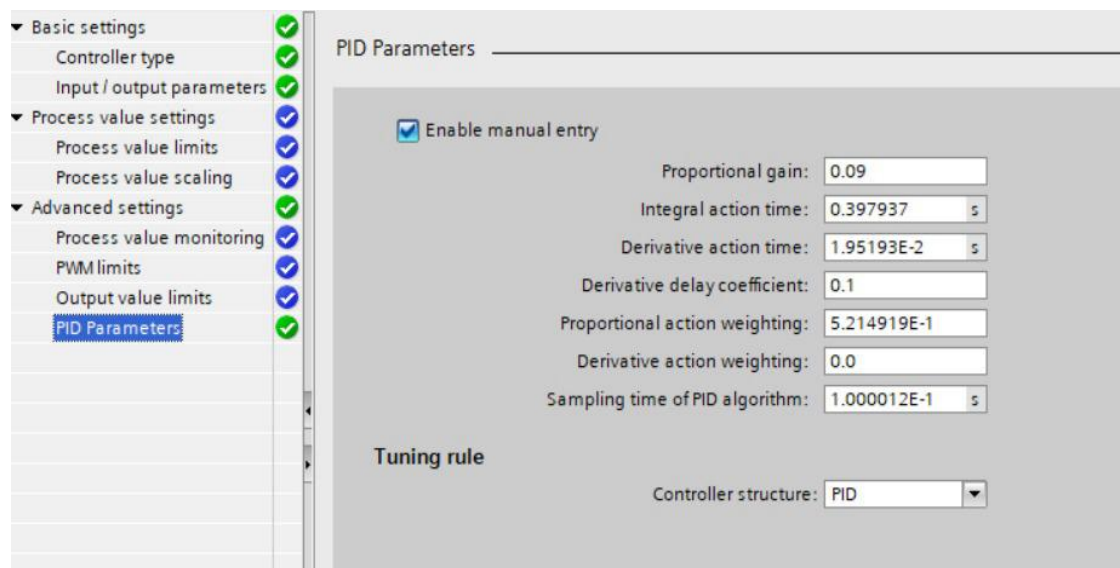


Nota. Bloques que representan un sistema de control en lazo.

Como parte del proceso también se ingresaron los parámetros del controlador en la cual se definió la ganancia proporcional, el tiempo de acción integral y el tiempo de acción derivativa que construyen la respuesta dinámica del sistema. La frecuencia con la que el controlador ejecutó el cálculo de la señal de control también es importante y se parametrizó el tiempo de muestreo del algoritmo PID como se observa en la figura 61.

Figura 61

Parámetros del controlador PID compact



Nota. Parámetros PID para una respuesta estable.

5.3.5 Etapa 5: Integración del dashboard y monitoreo de KPI

Se integró un dispositivo IoT2040 para la recolección de datos simulados y su envío hacia un dashboard de monitoreo. Se configuraron los KPI para estabilidad térmica o tiempo de calentamiento con el fin de visualizar tendencias y variaciones dentro del entorno simulado.

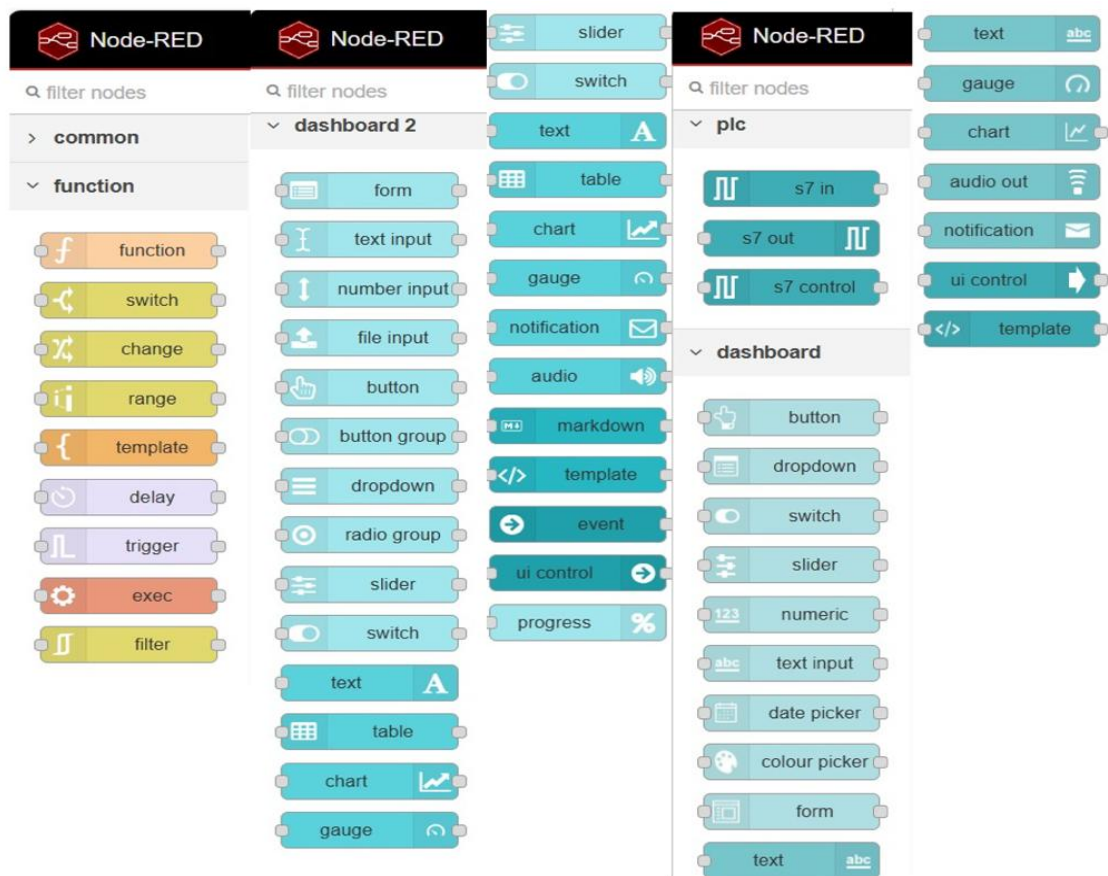
Se realizó la identificación para la selección de nodos en Node-RED. Se identificaron varias categorías como se observa en la figura 62. Por ejemplo, en la categoría de función se utilizaron diferentes nodos como change, switch, entre otros que

sirven para acondicionar datos, validar y conversión de variables antes de ser presentadas en la interfaz.

También se usaron nodos de comunicación en la categoría PLC, como el S7 in y S7 out, así como también los nodos de dashboard y dashboard 2 que proporcionaron nodos como gauge, chart, text y slider para la construcción de la interfaz en el dashboard.

Figura 62

Categorías y nodos principales en Node-RED



Nota. Bloques de categorías de nodos seleccionados para construcción del dashboard.

Estructura del layout del Dashboard en Node-RED

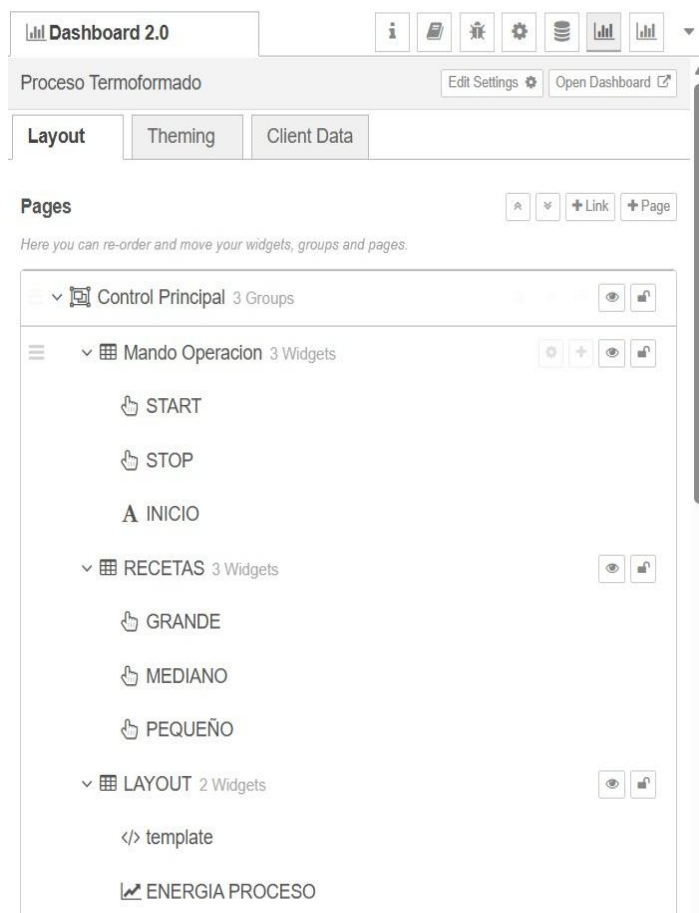
También se trabajó en el layout del dashboard donde se crearon páginas y grupos con el fin de tener una interfaz ordenada. En la figura 63 se presenta la configuración del diseño de la página principal denominada como “Proceso Termoformado”, la cual

contuvo 3 páginas. En la primera página se encuentra el grupo de “Control Principal” que incluyó los elementos de operación del sistema.

Dentro de este grupo se incluyó un subgrupo “Mando Operación”, donde se encontraron los botones de START y STOP, así como el indicador INICIO. El siguiente subgrupo agregado es el de “RECETAS” con diferentes opciones GRANDE, MEDIANO y PEQUEÑO. En este primer grupo también se agregó dos widgets de tipo template y el indicador “ENERGIA PROCESO” para visualización gráfica.

Figura 63

Configuración del layout del Dashboard 2.0 en Node-RED Grupo 1



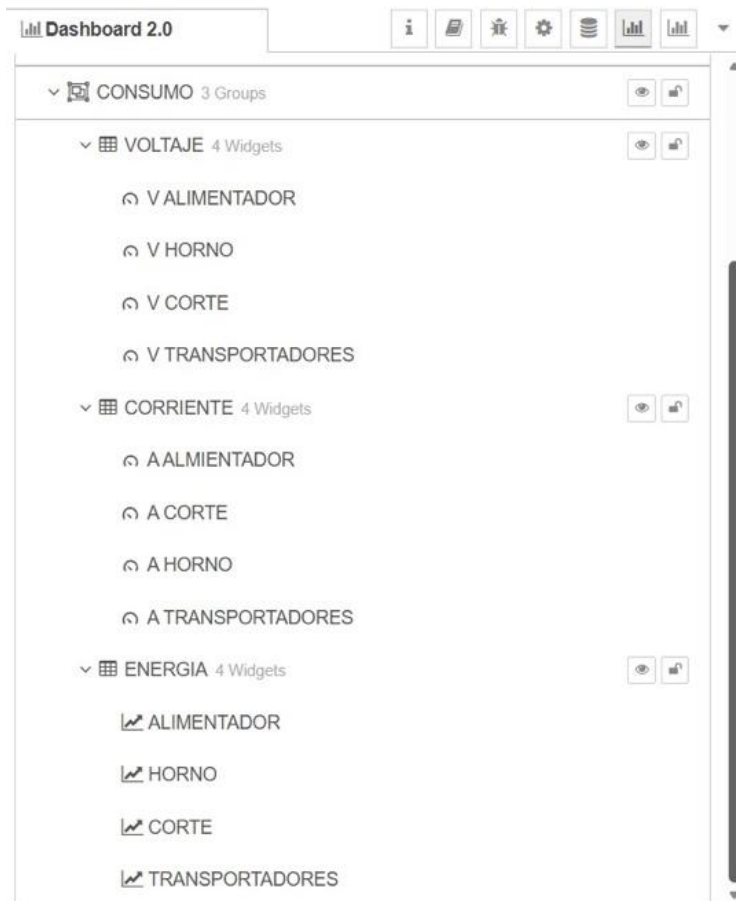
Nota. Distribución de páginas, grupos y subgrupos.

Adicionalmente también se configuró la visualización del consumo eléctrico del proceso como se observa en la figura 64 cuyo grupo se denominó “CONSUMO” y fue parte de la página 2. El subgrupo se armó con los indicadores correspondientes de voltaje de las etapas: alimentador, horno, corte y transportadores.

Por otro lado, el subgrupo corriente con indicadores de corriente eléctrica de las mismas etapas. Finalmente, el subgrupo de ENERGIA configurado para la visualización de la evolución del consumo a lo largo del tiempo.

Figura 64

Configuración del layout del Dashboard 2.0 en Node-RED Grupo 2



Nota. Distribución de páginas, grupos y subgrupos.

Y finalmente se configuró el panel de la sección de indicadores que se encuentran en la tercera página. En la figura 65 se puede observar cómo se agrupó los seis indicadores fundamentales: Calidad, Rendimiento, Alimentador, Transporte, Horno y Corte que permiten observar el desempeño operativo.

Figura 65

Panel de indicadores del sistema



Nota. Distribución de páginas, grupos y subgrupos.

Definición de variables en Node-RED

En esta sección se realizó la configuración de la lista de variables en Node-RED, donde el campo de Address es correspondiente a la dirección de memoria del PLC y Name representó el nombre lógico de la variable como se observa en la figura 66.

Figura 66

Interfaz para la creación de variables en Node-RED



Nota. Campo de configuración de variables.

En la figura 67 se observan las direcciones M0.3, M0.4, DB15.REAL16 con nombres diferentes START, STOP, y ENERGIA ALIMENTADOR que fueron asociadas a cada widget o nodo a la variable correspondiente.

Figura 67

Configuración de las variables



Nota. Distribución de páginas, grupos y subgrupos.

Las direcciones mostradas en la tabla de la figura 68 fueron utilizadas, cuyas posiciones de memoria fueron definidas en el PLC S-1500 y asociadas con nombres lógicos en Node-RED, lo que permitió la visualización en el dashboard.

Por ejemplo, las variables de proceso y consumo energético se almacenaron en el bloque de datos DB15 y son tipo REAL, y también están las marcas internas M que ejecutaron la lógica del sistema.

Figura 68

Tabla de variables para la comunicación PLC-Node-RED

Dirección	Descripción
1 M0.3	START
2 M0.4	STOP
3 M0.0	INICIO
4 DB15,REAL168	Temperatura
5 M2.7	TRIGGER
6 DB15,REAL16	ENERGIA ALIMENTADOR
7 DB15,REAL32	ENERGIA HORNO
8 DB15,REAL48	ENERGIA CORTE
9 DB15,REAL68	ENERGIA TRANSPORTADORES
10 DB15,REAL48	VOLTAJE ALIMENTADOR
11 DB15,REAL20	VOLTAJE HORNO
12 DB15,REAL36	VOLTAJE CORTE
13 DB15,REAL56	VOLTAJE TRANSPORTE
14 DB15,REAL8	A ALIMENTADOR
15 DB15,REAL24	A HORNO
16 DB15,REAL40	A CORTE
17 DB15,REAL60	A TRANSPORTADORES
18 DB15,REAL72	E ALIMENTADOR
19 DB15,REAL76	E HORNO
20 DB15,REAL80	E CORTE
21 DB15,REAL84	E TRANSPORTADORES
22 DB15,REAL88	E PROCESO
23 MW32	KPI CALIDAD
24 MW12	KPI RENDIMIENTO

Nota. Variables de proceso, control y consumo energético del PLC y ejecutadas en Node-RED.

5.3.6 Configuración de flujo de nodos en Node-RED

Primera página

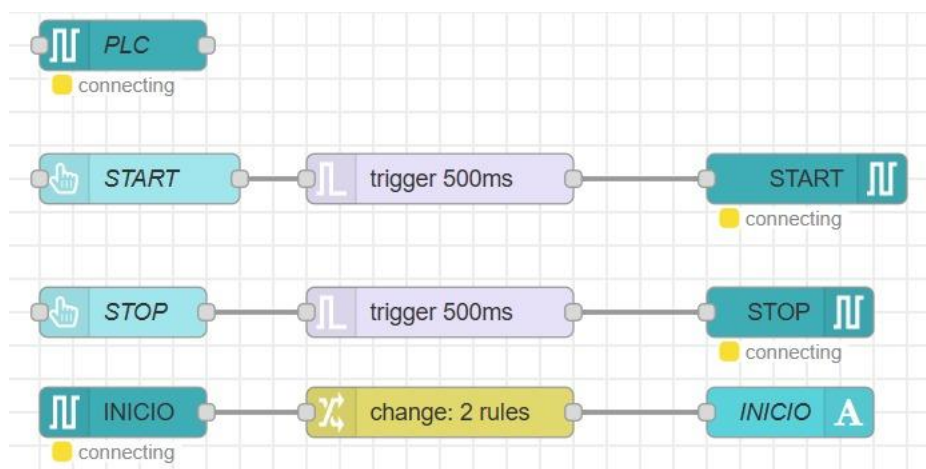
En la figura 69 se observa cómo se elaboró el flujo de nodos. Primero el nodo S7 control de nombre PLC cuya función principal fue establecer y mantener la comunicación entre Node-RED y el controlador. Por ejemplo, el estado “connecting”.

Luego se agregó los botones START y STOP que generaron señales de control que pasaron por un nodo trigger con un pulso de 500ms el cual envió un pulso momentáneo al PLC, al instante las señales generadas fueron enviadas a los nodos s7 out de START y STOP.

Adicionalmente, también se configuró un nodo s7 in con la variable INICIO leída desde el PLC procesada por un nodo change el cual adaptó su valor antes de mostrarse en el dashboard.

Figura 69

Nodo principal y nodos de control



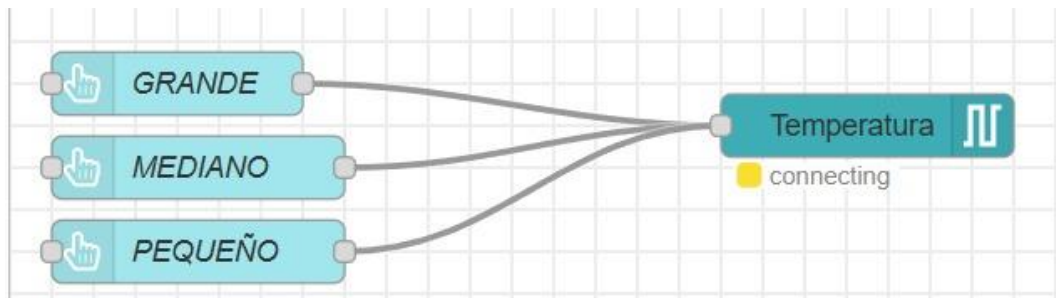
Nota. Variables de proceso, control y consumo energético del PLC y ejecutadas en Node-RED.

Configuración de flujo de nodos en Node-RED

Siguiendo el flujo se configuraron los botones GRANDE, MEDIANO y PEQUEÑO con el fin de permitir al usuario elegir la receta desde el dashboard. Cada botón envió un valor de temperatura que fue dirigido al nodo s7 out Temperatura como se puede apreciar en la figura 70.

Figura 70

Selección de recetas y envío de valor de temperatura al PLC

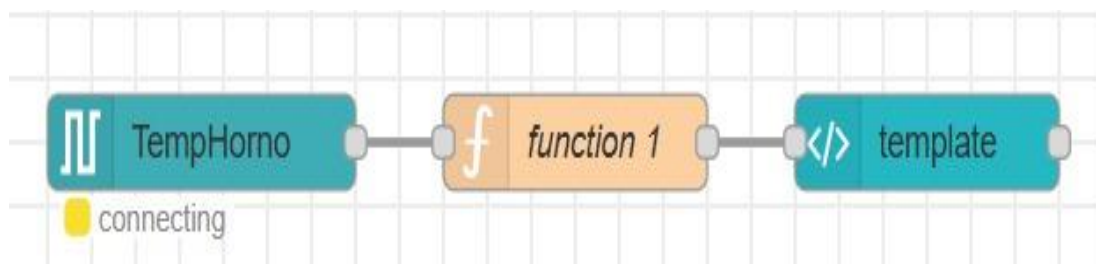


Nota. Implementación de botones de selección de recetas.

En la figura 71 se continuó con la elaboración del flujo donde se utilizó un nodo s7 in (TempHorno) el cual leyó la variable de temperatura directamente desde el PLC permitiendo obtener el valor actual del proceso térmico. Luego el nodo **function** adaptó ese valor y es procesado a un nodo **template** que mostró el valor directamente en el dashboard.

Figura 71

Lectura y visualización de horno en dashboard

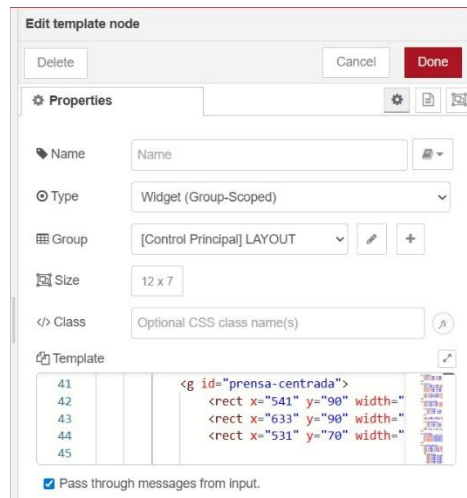


Nota. Flujo de visualización de nodo y animación.

Dentro del nodo template se realizó la elaboración del código svg para dibujar y animar elementos que en este caso representaron el proceso del termoformado por ejemplo como se observa en la figura 72, se usaron coordenadas, colores y tamaños.

Figura 72

Configuración del nodo template



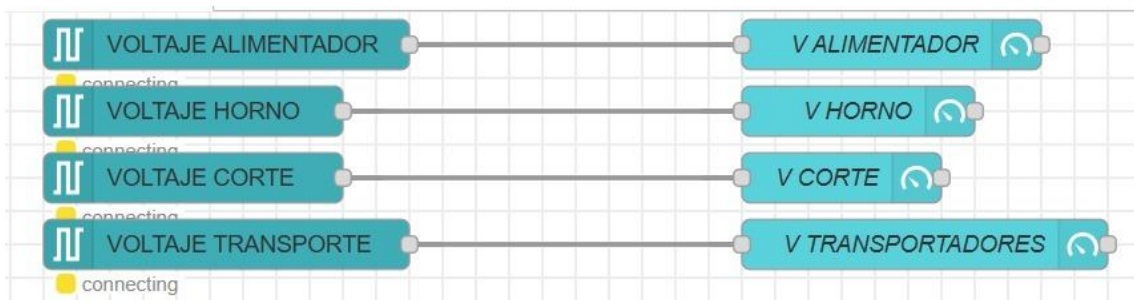
Nota. Nodo template configurado con código.

Segunda página

En la segunda página del dashboard el propósito principal fue mostrar el consumo energético de las diferentes etapas del proceso de termoformado. Se visualizaron indicadores de voltaje mediante nodos s7 in, como se pudo observar en el flujo de la figura 73. Las variables de voltaje de alimentador, horno, corte y transporte son leídas desde el PLC y enviadas al nodo gauge en el dashboard.

Figura 73

Flujo de nodos de voltaje de etapas de termoformado

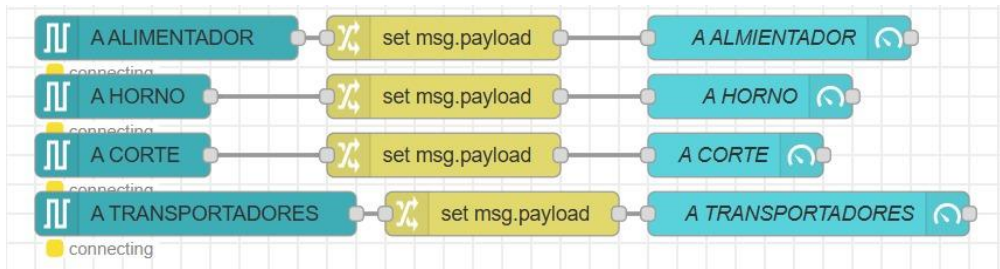


Nota. Implementación de nodos s7 in y gauge

Posteriormente como se muestra en la figura 74 se efectuó el flujo de nodos para la visualización de la corriente eléctrica en todas las etapas del termoformado. Las variables fueron leídas desde el PLC mediante nodos s7 in y pasaron por un nodo change el cual preparó el valor de corriente y finalmente fueron enviados a cada nodo gauge.

Figura 74

Flujo de nodo de corriente, change y gauge

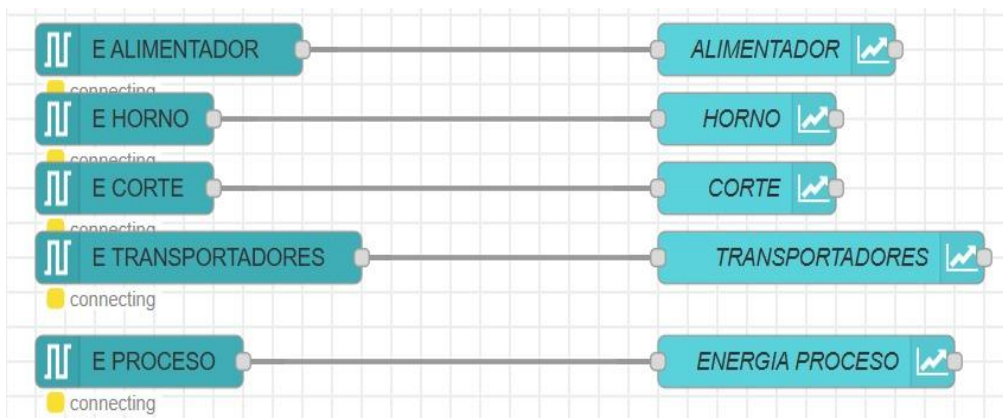


Nota. Implementación de nodos s7 in y gauge.

También, en la figura 75 se muestra cómo se realizó el flujo de nodos para visualización de la energía consumida en cada etapa del termoformado y también del proceso total. Las variables fueron leídas desde el PLC mediante nodos s7 in y enviadas directamente a indicadores tipo chart para la visualización de consumo energético a largo tiempo.

Figura 75

Flujo de nodos de energía de cada etapa y del proceso



Nota. Implementación de nodos s7 in e indicadores chart.

Finalmente, en la figura 76 se observa la estructura del flujo, donde cada variable provino desde el PLC hacia los widgets gráficos. Este flujo permitió que los valores calculados en el sistema de control fueran enviados en tiempo real.

Figura 76

Configuración de nodos para la visualización de KPI



Nota. Enlace de variables energéticas y desempeño.

5.3.7 Etapa 6: Pruebas finales del control automático

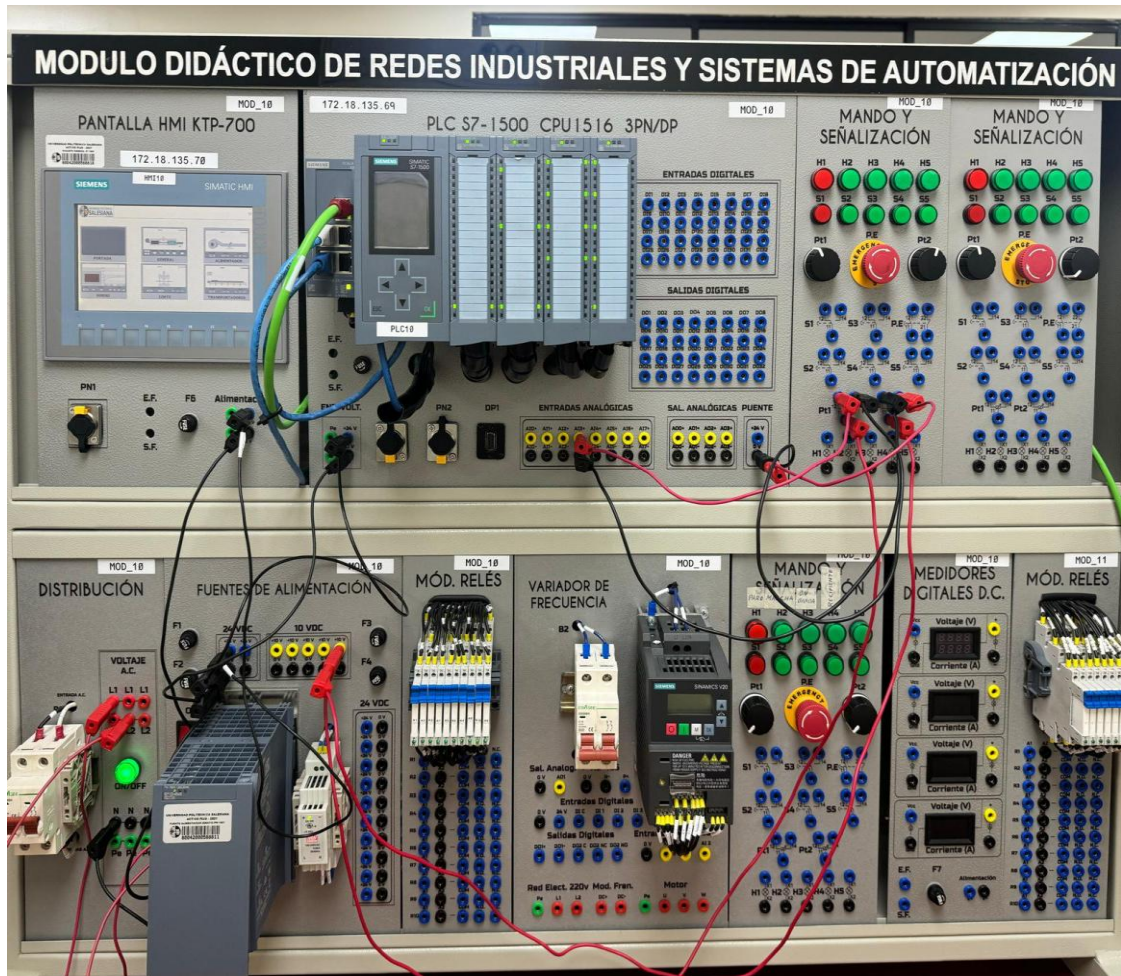
Finalmente, en esta etapa se realizó la implementación del prototipo en el tablero ubicado dentro del Laboratorio de Automatización Industrial II, y se ejecutaron las pruebas finales del prototipo y los ajustes solicitados para el proceso correcto del funcionamiento del termoformado.

En la figura 77 se puede observar el módulo utilizado el cual poseyó un PLC Siemens CPU1516 PN/DP, que se programó para que funcione como unidad central del procesamiento y control gestionando señales de entrada y salida, al igual que el procesamiento de variables.

También se utilizó la pantalla HMI KTP-700 para la supervisión del proceso en tiempo real, visualizando estados y parámetros configurables.

Figura 77

Módulo didáctico con PLC S7-1500 Y HMI KTP-700

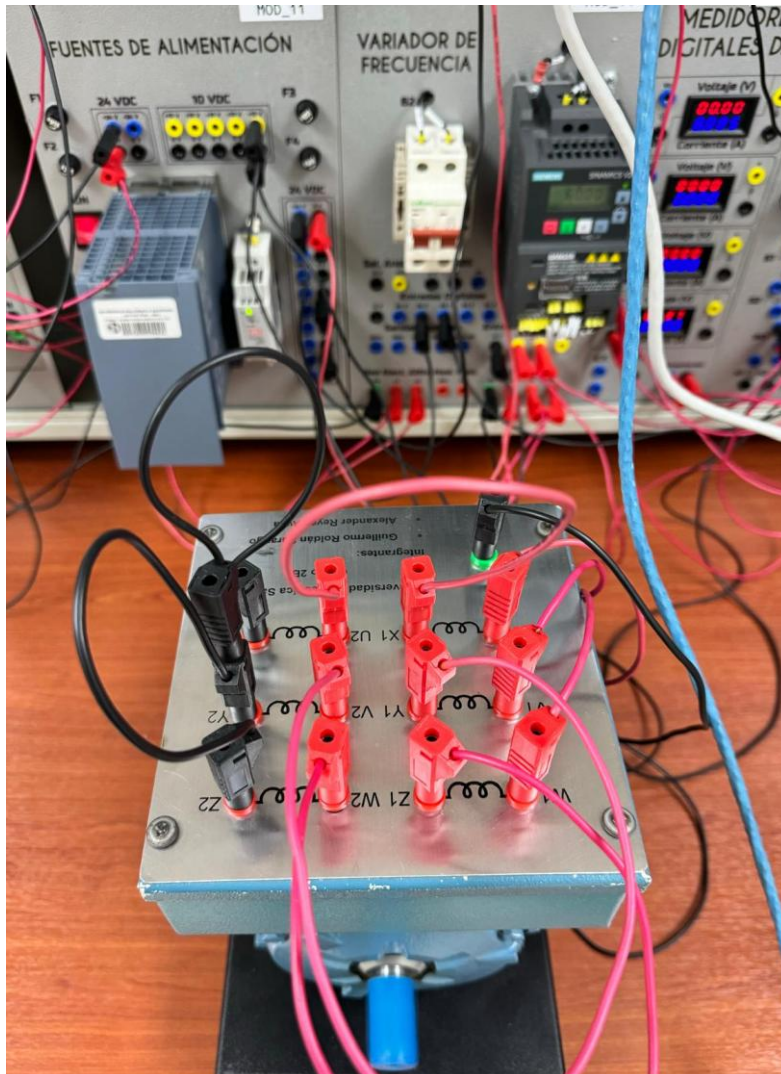


Nota. Módulo que permite la integración del control comunicación mediante PROFINET y dispositivos de campo.

Se configuró la conexión estrella de un motor eléctrico que fue alimentado por un variador de frecuencia. Los terminales U1, V1, W1 fueron conectados a la salida del variador. El motor se activó en la etapa de transportación del proceso del termoformado y el variador de frecuencia reguló la velocidad del motor. Cuando el motor se detuvo indicó que la banda se detuvo y luego comienza la siguiente etapa. En la figura 78 se muestra la conexión de motor y variador.

Figura 78

Motor de transporte y variador de frecuencia.



Nota. Motor con configuración estrella

6. RESULTADOS

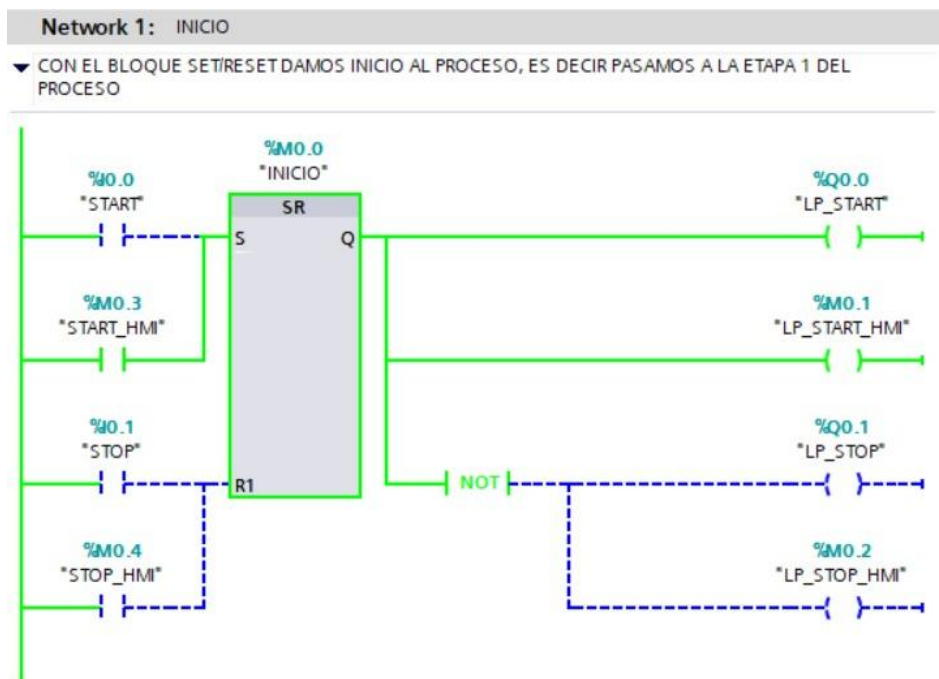
En esta sección se muestran los resultados de las pruebas realizadas en el módulo que se encuentran en el Laboratorio de Automatización II. Se verificó el cumplimiento de cada etapa del proceso de termoformado. Además, la implementación de los indicadores en el dashboard.

6.1 Programación del PLC

Se procedió a poner en línea la programación del PLC realizada en TIA Portal la cual mostró el estado de las variables, en la figura 79 se observa la network de inicio que indica la activación del pase para la etapa 1 del proceso.

Figura 79

Lógica de inicio del proceso en el PLC



Nota. Red correspondiente a la condición inicial del sistema donde la marca %M0.3 indica la activación del proceso.

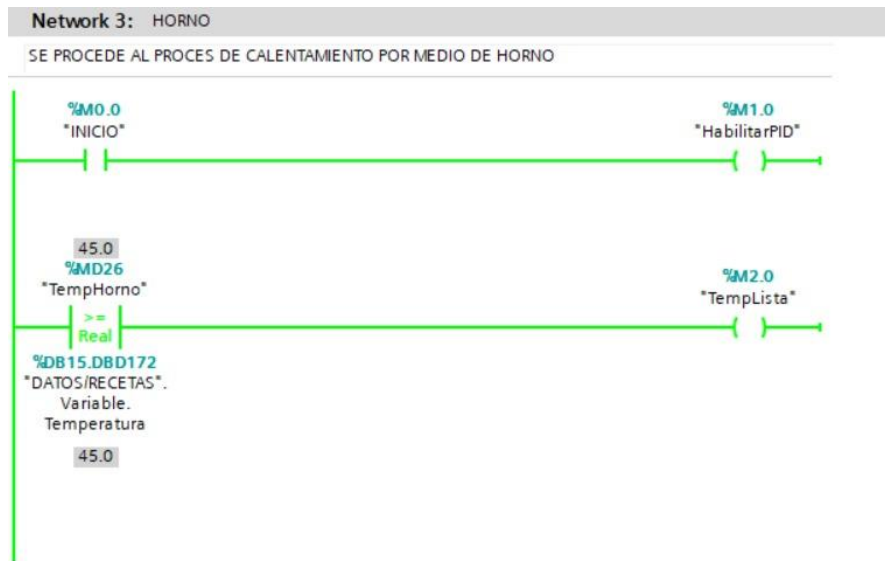
Una vez que se habilitó el sistema y ejecutada la etapa inicial de alimentación del material, el proceso continuó con la activación de la etapa de calentamiento dentro del

horno. En la figura 80 se observa que la condición inicio %M0.0 permitió habilitar la marca encargada de activar el PID encargado de regular la temperatura del sistema.

También se observa el valor de temperatura predeterminado en el bloque de datos de recetas comparado con el valor de temperatura actual.

Figura 80

Lógica de control del horno



Nota. Red correspondiente a la condición inicial del sistema donde la marca %M0.3 indica la activación del proceso.

Después de validar la lógica de habilitación del horno y el cumplimiento del setpoint térmico, dentro del bloque se ejecutó un comportamiento dinámico junto a la simulación térmica LSIM_PT1.

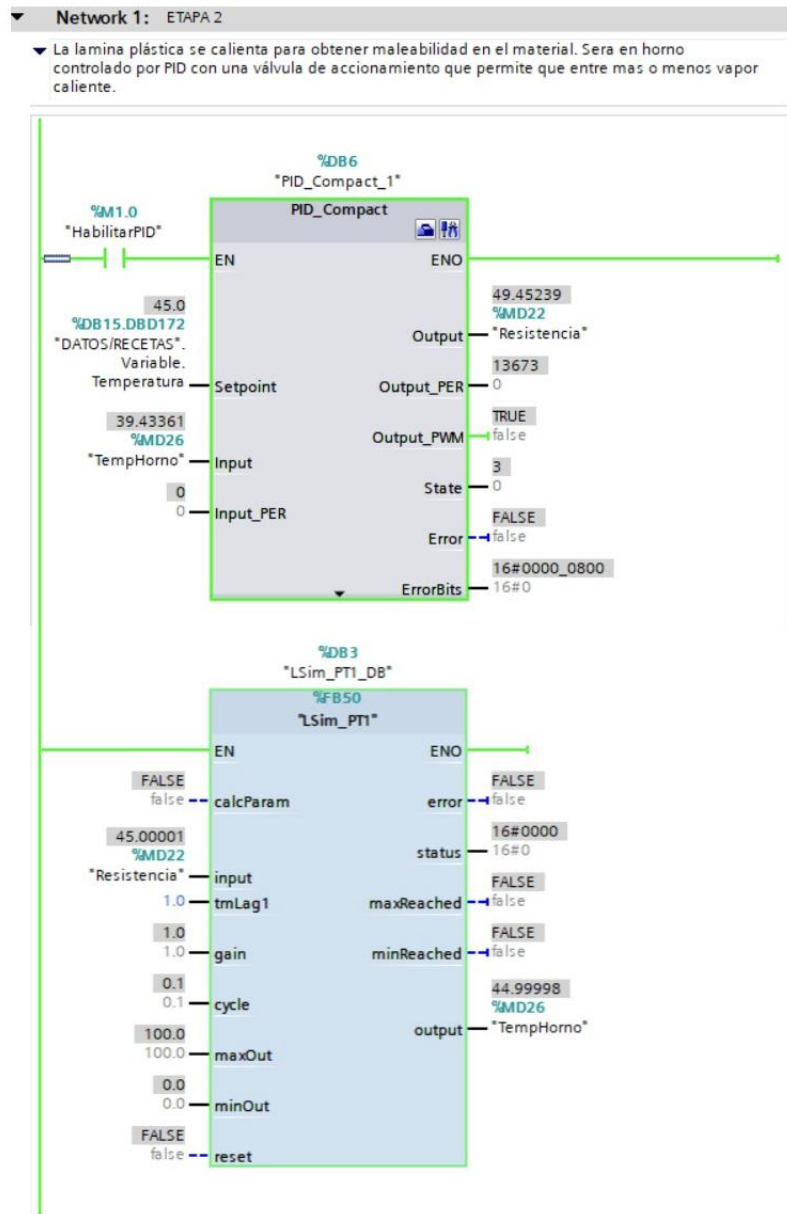
En la figura 81 se observa como el controlador recibió un setpoint de 45 °C proveniente de la receta almacenada en el bloque de datos, y la variable de proceso de 39.43 °C cuyo valor se encontraba por debajo del setpoint en consecuencia el controlador incrementó la señal de salida hacia la resistencia para compensar el error térmico existente.

Luego, el bloque LSIM simuló el comportamiento térmico del horno como un sistema de primer orden de manera progresiva y no de una forma instantánea. La salida del modelo alcanzó aproximadamente 44.99°C, esto indicó que el sistema se acercó al

setpoint configurado. De esta manera se evidenció estabilidad y ausencia de sobreimpulso en la respuesta.

Figura 81

Comportamiento del controlador PID en la etapa de calentamiento

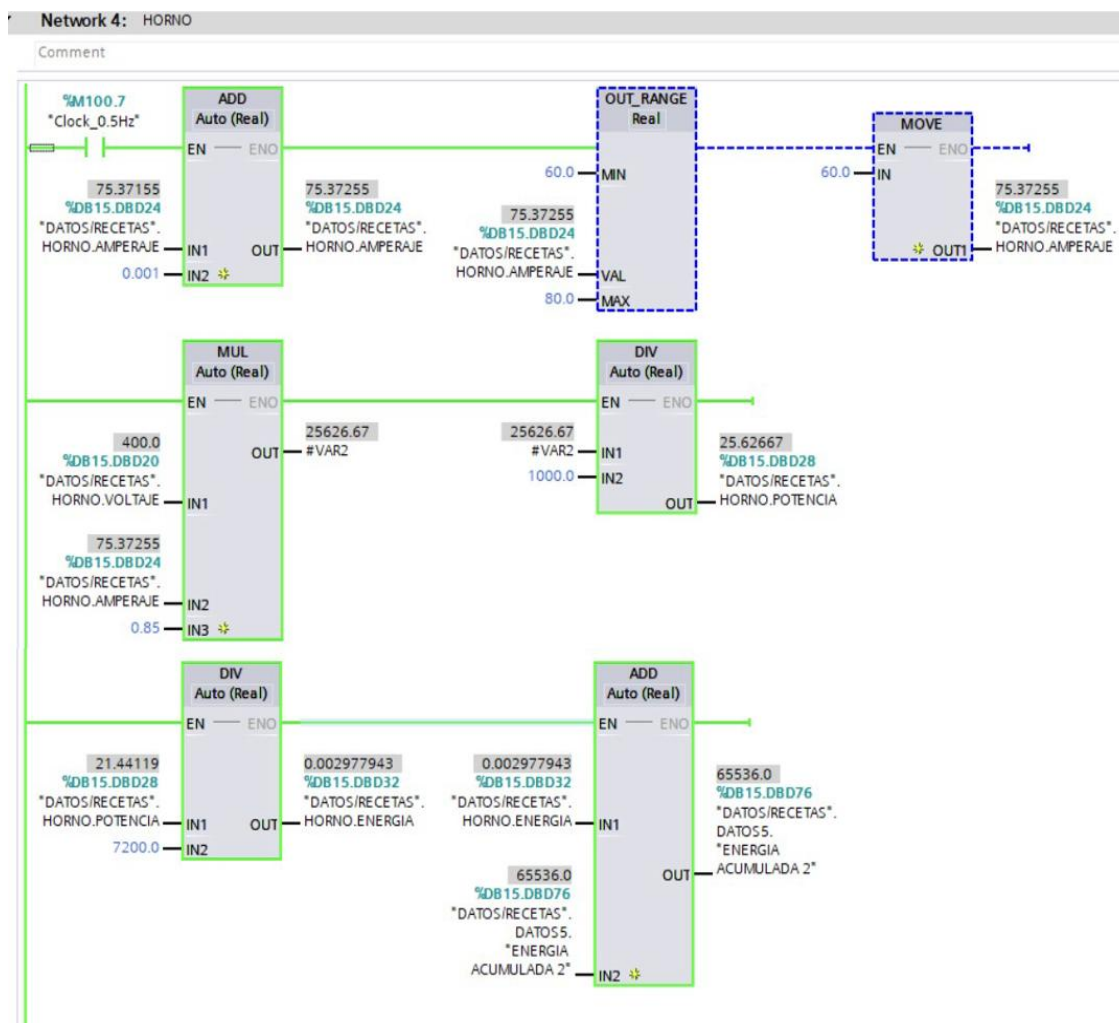


Nota. El bloque PID regula la potencia de la resistencia en función del error térmico para una aproximación estable al setpoint de la receta.

Posterior al PID se habilitó la red de cálculo para la estimación de potencia eléctrica y energía acumulada en la etapa del horno. El voltaje del sistema fue ajustado manualmente mediante el potenciómetro del módulo didáctico, se estableció aproximadamente 400 V. La corriente del horno se almacenó en el bloque de datos la cual se actualizó y limitó dentro de un rango de 60 A a 80 A y a partir de estos valores se calculó la potencia eléctrica como se observa en la figura 82.

Figura 82

Cálculo de potencia y energía del horno



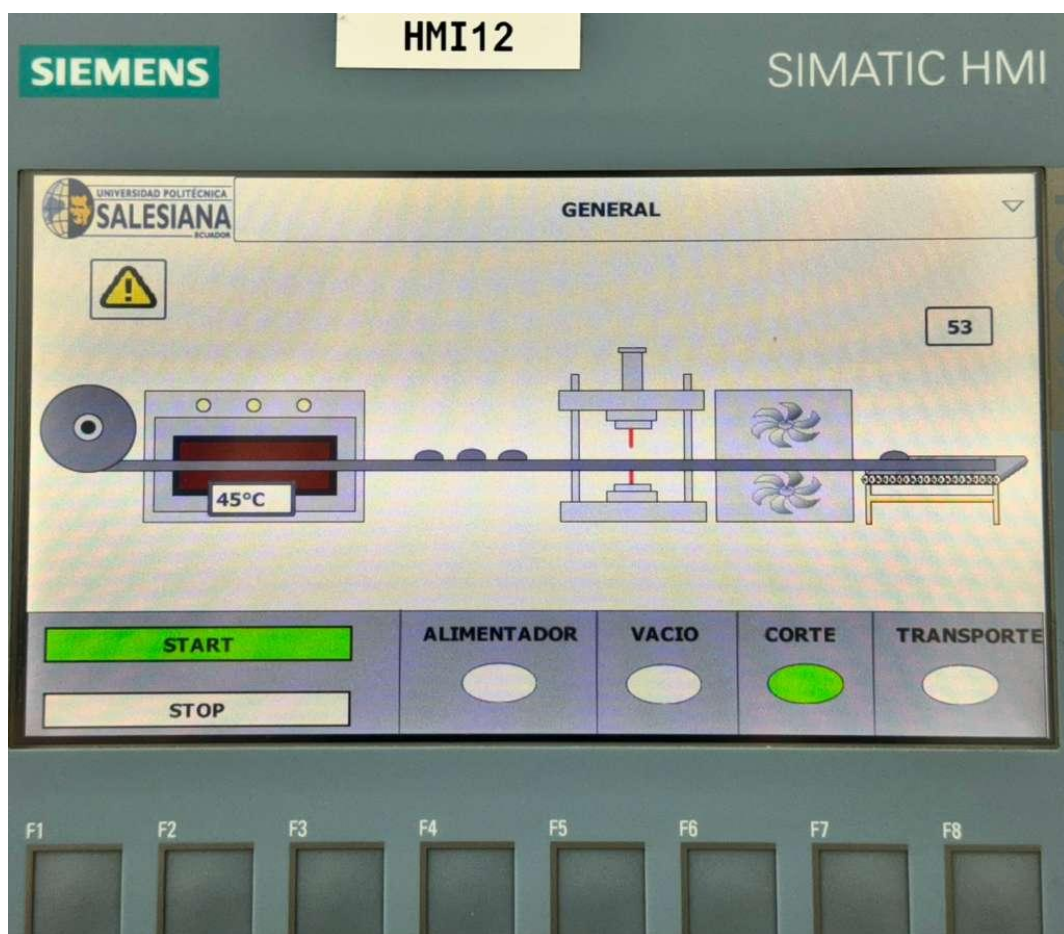
Nota. Red que permite calcular y acumular en tiempo real la potencia y energía.

6.2 Interfaz HMI

Se presentó la pantalla general de supervisión implementada en la HMI SIMATIC, en la cual se visualizó en tiempo real el estado del proceso de termoformado. En la figura 83 se observa el sistema en operación con botón START activo, temperatura de horno en 45 °C, etapa de corte habilitada y una producción de 53 productos.

Figura 83

Pantalla general de supervisión en HMI



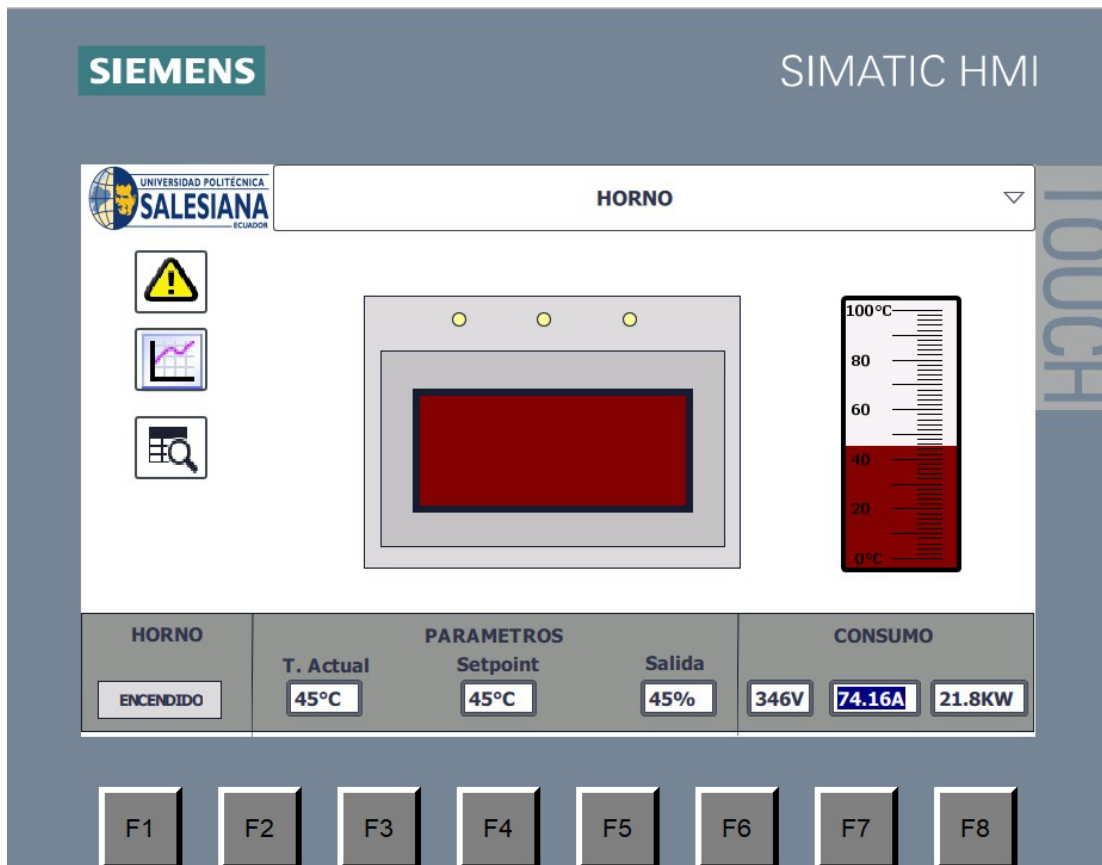
Nota. HMI física durante la operación del sistema en modo automático.

En la figura 84 se observa la pantalla específica del horno en la HMI, donde se visualizaron en tiempo real los parámetros de control térmico. Se observa la temperatura de 45 °C, concordante con el setpoint configurado y una señal de salida al 45% que correspondió al accionamiento de la resistencia.

Del mismo modo se muestran los valores eléctricos asociados al consumo del horno 346 V, 74.16 A y una potencia aproximada de 21.8 KW, lo que permitió una relación directa con el comportamiento del controlador PID con la demanda energética de la etapa.

Figura 84

Pantalla de supervisión de la etapa de horno

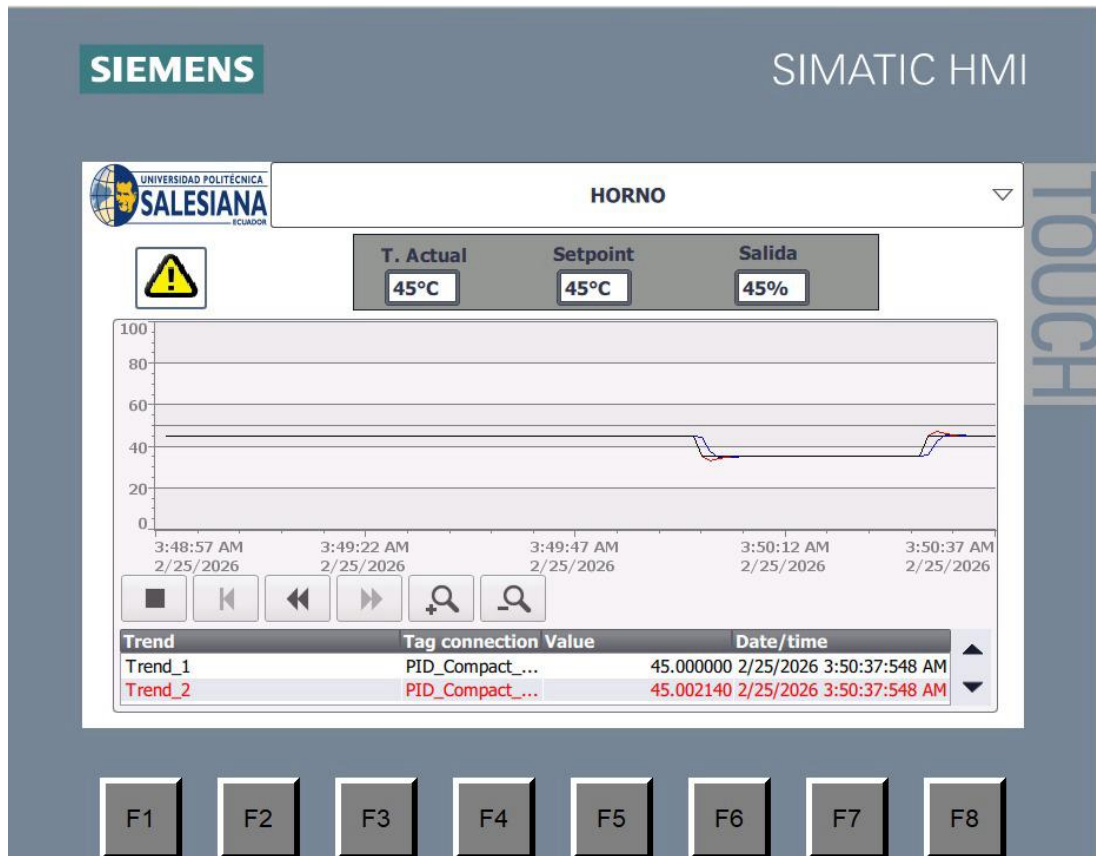


Nota. Operación de horno en la HMI mostrando variables del sistema.

En la figura 85 se observa la tendencia implementada en la HMI, donde se registró una temperatura tiempo real de 43 °C, setpoint 45 °C y señal de salida del controlador PID de 44%. La respuesta mostró una aproximación progresiva hacia el valor de referencia. No se presentó oscilaciones significativas o sobreimpulsos marcados el cual indica un comportamiento estable del controlador.

Figura 85

Tendencia de temperatura y setpoint del horno



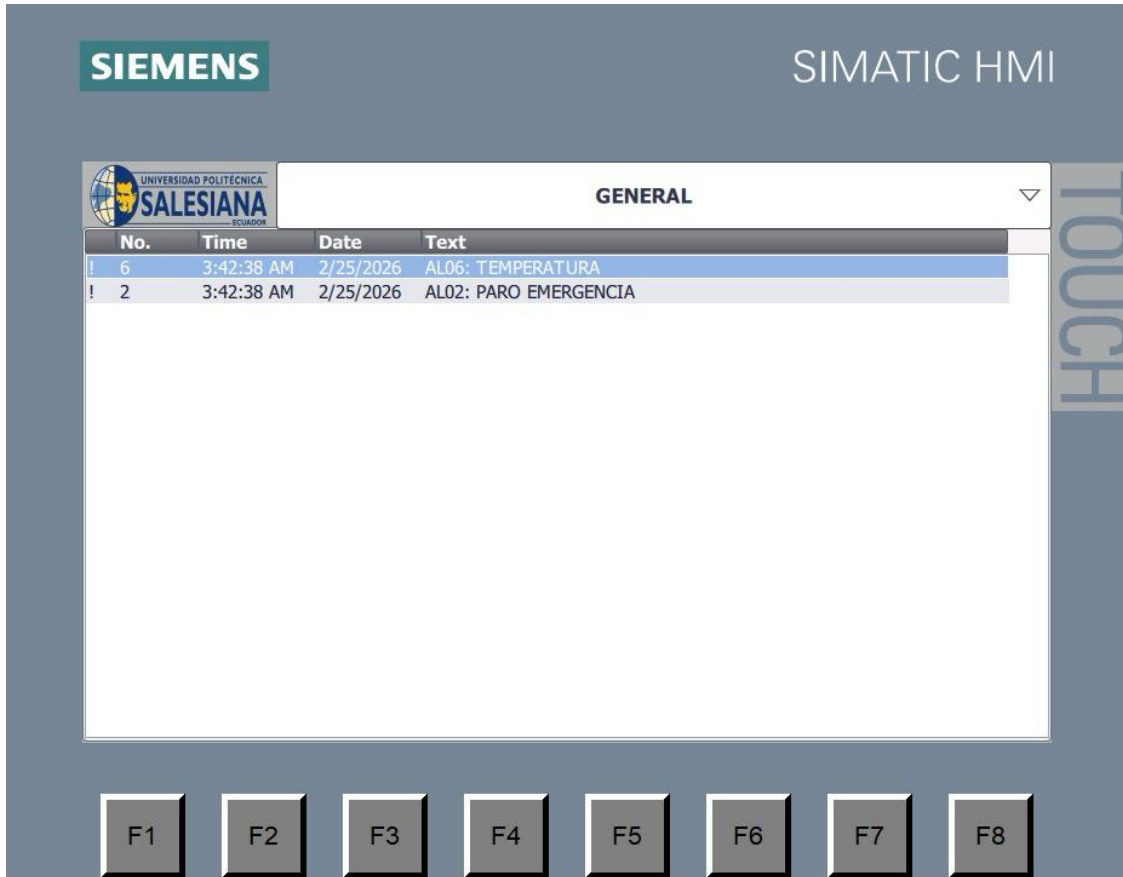
Nota. Tendencia registrada en la HMI durante la etapa del horno.

6.2.1 Alarmas

En la figura 86 se presentó la pantalla de registro de alarmas implementadas en la HMI, donde se mostró el almacenamiento de eventos asociados al sistema. Se registró la activación de la alarma AL06 con una temperatura superior a la del setpoint establecido. Cada evento se registró con fecha y hora para llevar un control cronológico del comportamiento térmico del horno.

Figura 86

Registro de alarma del sistema en HMI



Nota. Registro de alarma generado automáticamente durante la operación.

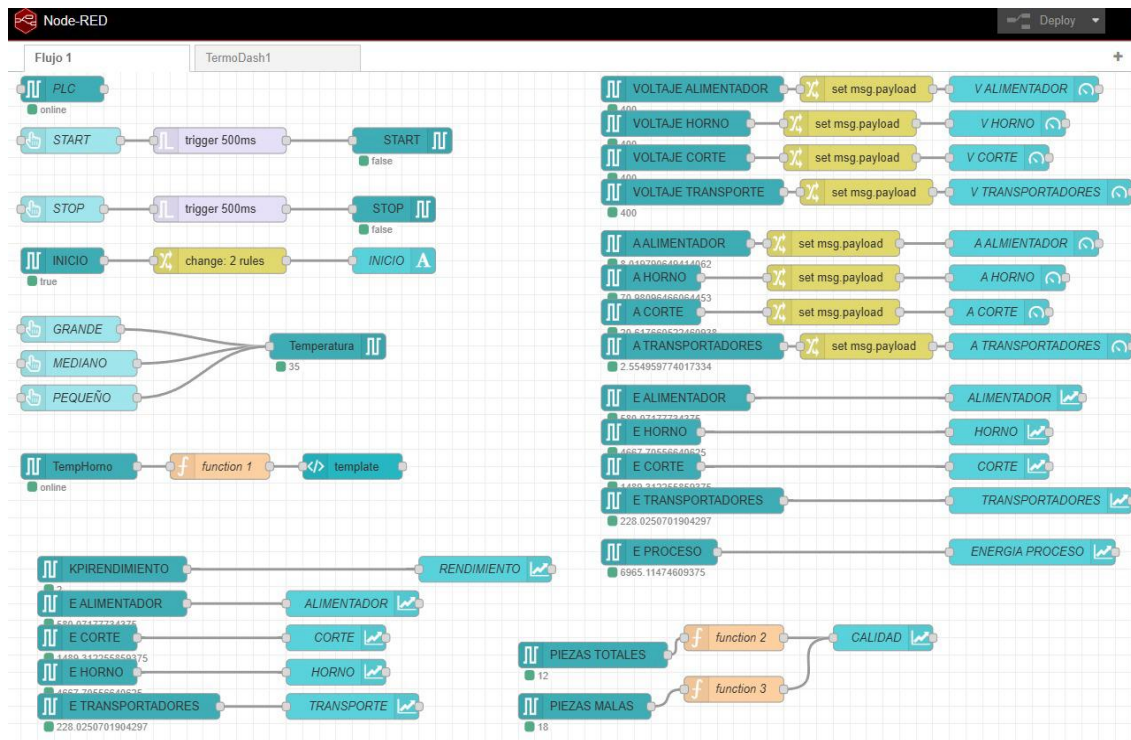
6.2.2 Dashboard

Después de la validación local de la HMI, se procedió a la visualización de los nodos en estado online como se observa en la figura 87, permitió la transmisión en tiempo real de datos hacia el dashboard. Se observó el proceso de diferentes variables como voltaje, corriente y energía por etapa.

El nodo S7 denominado “PLC”, actuó como nodo principal de comunicación con el controlador Siemens S7-1500. La implementación online permitió comprobar la correcta comunicación entre el controlador y el entorno de visualización, por ende, se validó la arquitectura PLC-IoT-Dashboard.

Figura 87

Implementación del dashboard en Node-RED con PLC en línea



Nota. Registro de alarma generado automáticamente durante la operación.

En la figura 88 se muestra la interfaz principal del dashboard que se desarrolló en Node-RED. El sistema se encontraba en marcha la cual evidenció la operación activa en modo automático. La integración de las funciones de mando, selección de recetas y visualización gráfica del consumo energético se visualizó en esta pantalla.

Se presentó la gráfica de energía total acumulada del proceso de termoformado con un registro de incremento progresivo hasta alcanzar aproximadamente 1,115 KWh en el intervalo mostrado. Existió coherencia en el aumento casi lineal de la energía total en un proceso continuo en operación, de la misma manera se evidenció estabilidad en la obtención y procesamientos de datos provenientes del PLC.

Figura 88

Dashboard principal del proceso de termoformado en Node-RED



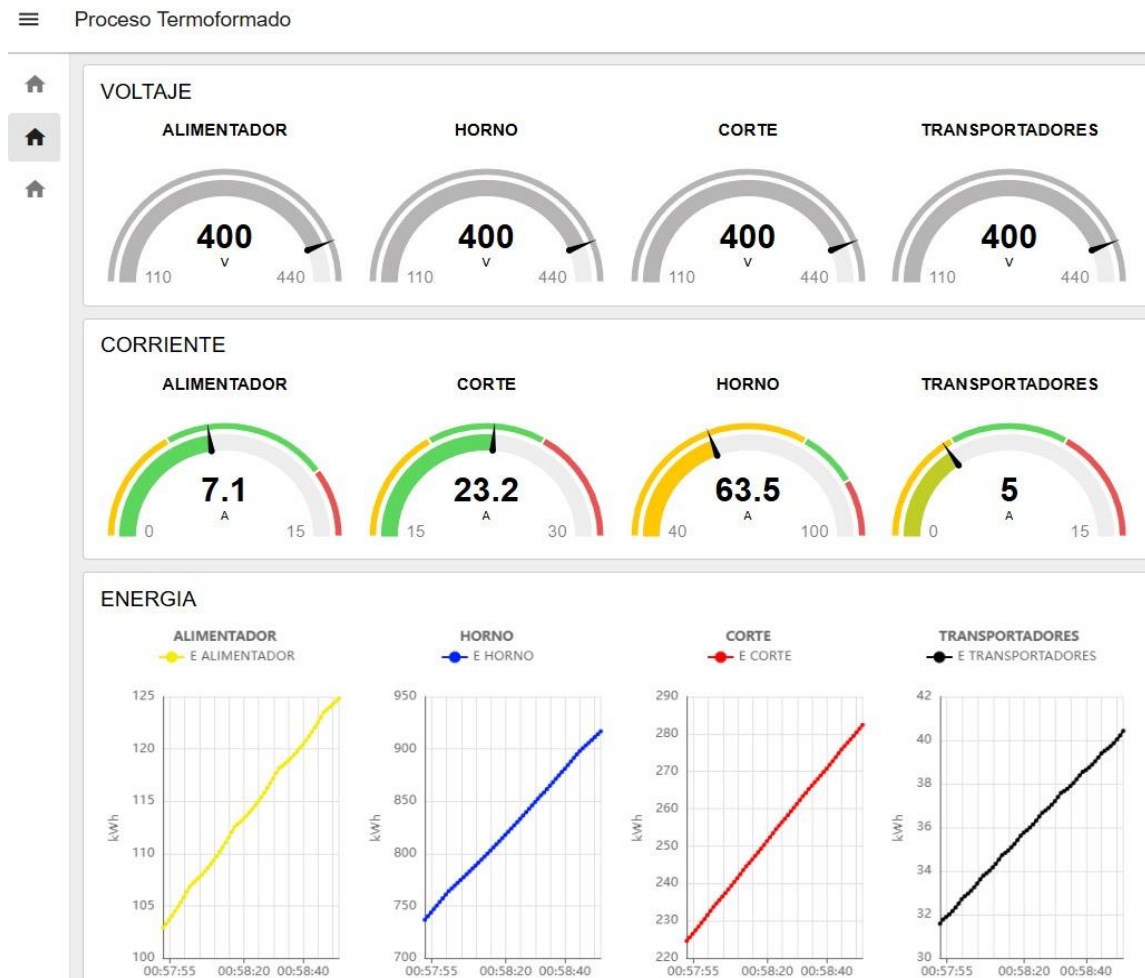
Nota. Dashboard implementado en Node-RED en tiempo real del proceso con el PLC en línea.

En la segunda página se activó el monitoreo de las variables de voltaje, corriente y energía asociadas con las etapas de alimentador, horno, corte y transportación. Como se observa en la figura 89 fueron representadas por indicadores tipo gauge y por gráficos de tendencias. Se determinó un voltaje estable de aproximadamente 400 V en todas las etapas, evidenciando uniformidad en la alimentación del sistema. Con respecto a la corriente, el horno registró el mayor valor con 53,5 A, seguido por corte con 23,2 A, mientras que las otras etapas presentaron valores menores.

Se evidenció que el horno representó la etapa de mayor demanda energética aproximadamente un 67%. La corriente elevada confirmó que el calentamiento del material es la fase más intensiva en consumo eléctrico.

Figura 89

Interfaz de monitoreo eléctrico y energético del proceso de termoformado



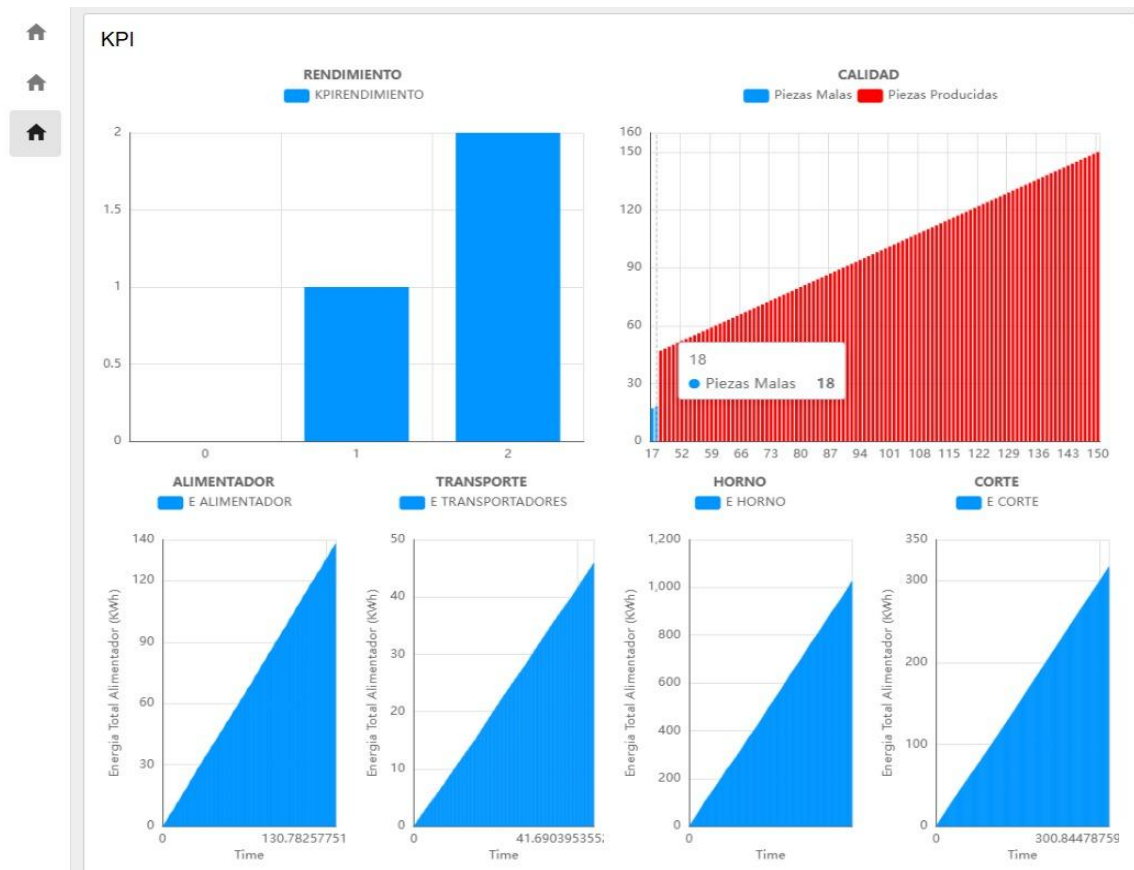
Nota. Panel de supervisión de voltaje, corriente y energía.

Finalmente, la figura 90 se presentó el panel de visualización de los indicadores clave de desempeño (KPI) del proceso de termoformado. El KPI rendimiento reflejó la eficiencia operativa en función del número de ciclos ejecutados respecto a la capacidad máxima de lotes asignada. Por otra parte, el KPI de calidad registró la presencia de piezas

defectuosas, teniendo una relación directa entre piezas malas y piezas producidas permitiendo evaluar el desempeño del proceso durante la simulación.

Figura 90

Panel de indicadores KPI del proceso de termoformado

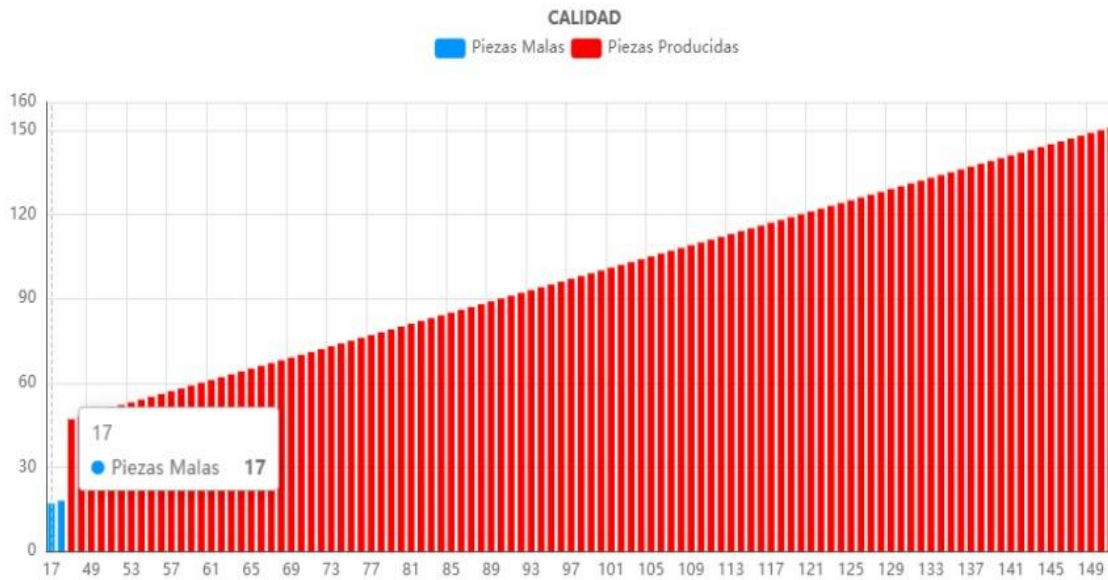


Nota. Interfaz para la evaluación de rendimiento, calidad y desempeño energético del sistema.

En la figura 91 se registró el intervalo de número de piezas producidas frente a las piezas defectuosas durante la operación del sistema. Aproximadamente de 150 piezas producidas, se generaron 17 piezas defectuosas. Sin embargo, la producción mostró un crecimiento progresivo y el número de piezas malas se mantiene significativamente menor en comparación a todo lo generado.

Figura 91

Indicador de calidad del proceso



Nota. KPI de calidad generado en tiempo real.

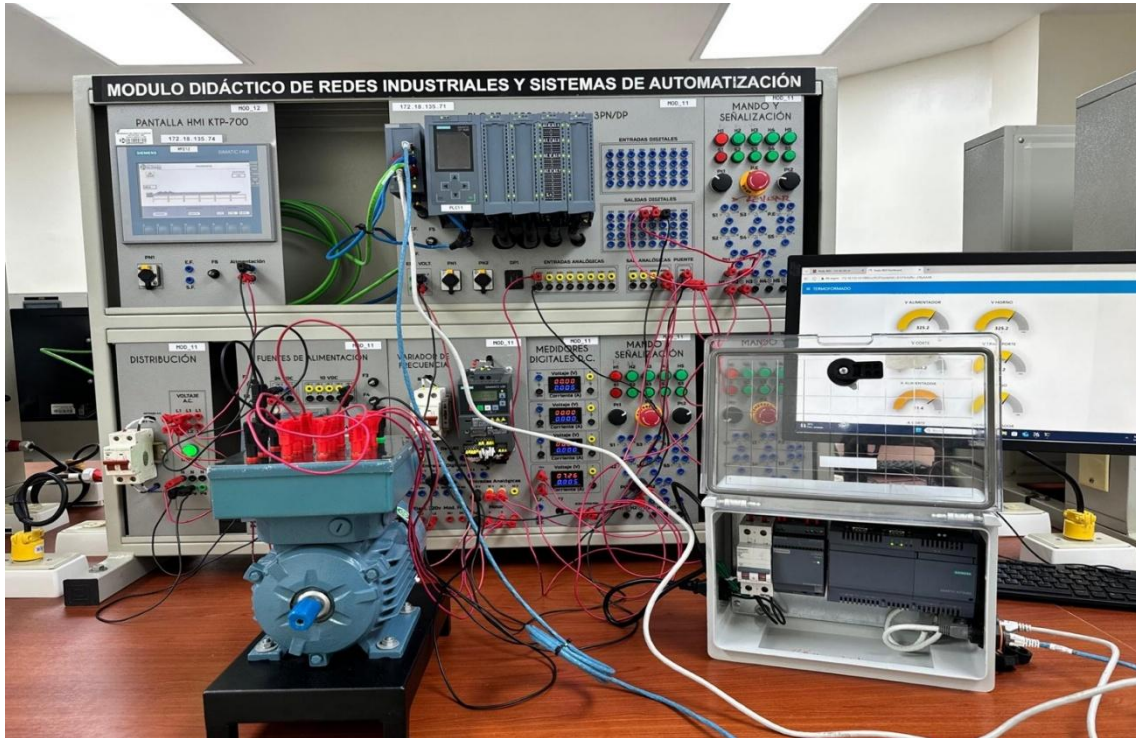
6.3 Implementación

La implementación final en el módulo se puede observar en la figura 92, mostrando la integración del PLC Siemens S7-1500, HMI KTP, módulos de entradas y salidas digitales, las fuentes de alimentación y los indicadores.

El sistema se instaló en el módulo didáctico del Laboratorio de Automatización Industrial II, permitiendo validar físicamente la programación realizada en TIA Portal y también la comunicación con el dashboard que se implementó en Node-RED.

Figura 92

Implementación física del sistema de automatización



Nota. Implementación realizada en el módulo didáctico del laboratorio de automatización.

En la figura 93 se observa cómo se implementó el Gateway industrial SIMATIC IoT2040, instalado dentro de un gabinete de protección y debidamente conectado al sistema eléctrico. El dispositivo se enlazó al PLC mediante comunicación Ethernet permitiendo la adquisición de datos del proceso y transmitiéndolos a la plataforma de monitoreo.

De la misma manera se visualizaron los indicadores de LED de estado que confirmó la operación activa y transmisión correcta de datos en tiempo real hacia el dashboard que se desarrolló en Node-RED. Adicionalmente la implementación del dispositivo permitió descentralizar los datos y también se evidenció cómo el Gateway actuó como nodo intermediario entre lo industrial y la capa de visualización.

Figura 93

Integración del Gateway IoT2040



Nota. Implementación del Gateway industrial para la transmisión y visualización de datos del sistema en tiempo real.

7. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

En la Tabla 1 se muestran las actividades realizadas durante los meses de noviembre, diciembre, enero en un período de 4 semanas por cada mes, en la cual se puede visualizar etapas correspondientes del diseño que conlleva el desarrollo y sistema de monitoreo del proceso de termoformado.

Tabla 1

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									
Revisión y selección de las metodologías a utilizar.						X								
Investigación del proceso de termoformado y del material EPS.							X							
Desarrollo de la programación en el PLC para las distintas etapas del termoformado.								X	X	X				
Desarrollo de la interfaz HMI para la visualización de cada etapa del termoformado.										X	X			
Ajuste de parámetros del control.										X	X			
Implementación del dashboard y configuración de KPI mediante IoT2040											X	X		
Pruebas finales del todo el control automático.													X	

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

8. PRESUPUESTO

En la Tabla 2 se da a conocer el presupuesto sobre las horas de ingeniería consideradas durante el desarrollo del proyecto, con base en el salario básico.

Tabla 2

Presupuesto general

<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>TOTAL</i>			<i>\$234,40</i>

Nota. Presupuesto por horas de ingeniería. Los elementos usados pertenecen al laboratorio de automatización II.

9. CONCLUSIONES

- La programación realizada en el PLC en el software TIA Portal permitió el desarrollo y control de cada etapa del proceso de la máquina termoformadora, consiguiendo la secuencia correcta de las etapas de alimentación, calentamiento, corte y transporte en el entorno simulado. Adicionalmente, permitió la integración de condiciones de operación, control PID y cálculo de variables eléctricas y energéticas.
- El diseño de interfaz HMI facilitó el monitoreo en tiempo real de cada etapa del proceso de termoformado, así como de variables críticas como temperatura, corriente, voltaje, y estados, proporcionando una visualización clara para el usuario y saber qué ocurre en el sistema.
- El desarrollo del dashboard mediante el Gateway IoT2040 contribuyó con indicadores claves de desempeño tales como producción, rendimiento, energía consumida y variables eléctricas facilitando la comprensión del desempeño del proceso.

10. RECOMENDACIONES

- En la programación del control PID, se recomienda realizar una adecuada calibración y ajuste de los parámetros proporcional, integral y derivativo, con el propósito de alcanzar una temperatura estable en un tiempo coherente. De la misma manera se sugiere realizar pruebas progresivas para mejorar la respuesta térmica del sistema.
- En el proceso de diseño de interfaz HMI, se sugiere crear una estructura clara, organizada, prevaleciendo una organización visual de la información y evitando el exceso de elementos innecesarios en la pantalla. Se recomienda presentar datos relevantes que faciliten la interpretación rápida del estado del sistema por parte del usuario.
- Para la implementación del Gateway IoT2040, se sugiere una previa verificación de la compatibilidad de las librerías, a fin de evitar problemas de comunicación o funcionamiento. También, se recomienda emplear una microSD con capacidad recomendada por el fabricante por ejemplo 8GB para evitar daños en el dispositivo.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afrin, S., & Rafa, S. J. (2025). *Industrial Internet of Things: Implementations, challenges, and potential solutions across various industries*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016636152500082X>
- Afshariantorghabeh, S., & Pesonen, A. (2023). *Effects of thermoforming operation and tooling on the thermoformability of plastic-coated fibre-based materials*.
https://www.researchgate.net/publication/372139882_Effects_of_thermoforming_operation_and_tooling_on_the_thermoformability_of_plastic-coated_fibre-based_materials
- ASEPLAS, Asociación Ecuatoriana de Plásticos. (2023). *Proyecto clúster de plásticos: Fortalecimiento de la cadena de reciclaje de poliestireno y polipropileno*.
<https://aseplas.ec/wp-content/uploads/2024/05/LIBRO-PROYECTO-CLUSTER-DE-PLASTICO.pdf>
- Barreras Rios, F. J., & Ramirez Leon, S. A. (2021). *Mecanismos de transferencia de calor*.
https://www.researchgate.net/publication/353033023_Mecanismos_de_transferencia_de_calor
- Bhardwaj, H., Arora, M., & Mahmood, S. M. (2025). *The role of Internet of Things (IoT), smart devices, and data integration in transforming business operations*.
https://www.researchgate.net/publication/392165982_The_Role_of_Internet_of_Things_IoT_Smart_Devices_and_Data_Integration_in_Transforming_Business_Operations
- Chavarría Briceño, R. (2025). *El indicador clave de desempeño (KPI)*.
https://www.researchgate.net/publication/394667780_indicador_clave_de_desempeno_KPI
- CN Polychemer. (14 de enero de 2025). *How the polystyrene melting point affects product performance*. CN Polychemer. <https://es.cnpolychemer.com/news/how-polystyrene-melting-point-affect-product-s-84178095.html>
- Delphin Technology AG. (s.f.). *PROFINET Communication*. Delphin Technology.
<https://www.delphin.de/en/profinet-communication/>
- Elecproy. (13 de junio de 2024). *Elecproy*. Elecproy. <https://elecproy.com/es/blog/plcs-definicion-partes-ventajas/>

- Gaspar-Cunha, A. (2021). *Multi-objective optimization of plastics thermoforming*.
https://www.researchgate.net/publication/353472640_Multi-Objective_Optimization_of_Plastics_Thermoforming
- Grand View Research. (2024). *Thermoformed Plastics Market Size, Share & Trends Analysis Report*. Grand View Research.
<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/thermoformed-plastics-market>
- Group BMG, M. (2024). *Introduction to thermoforming: A comprehensive guide*. OneBMG. https://www.onebmg.com/Portals/0/pdfs/BMG_eBook_Thermo-ComprehensiveGuide.pdf
- HMI: Human-Machine Interface. (9 de Octubre de 2025). *HMI: Human-Machine Interface*. HMI: Human-Machine Interface.
<https://inductiveautomation.com/resources/article/what-is-hmi#hmi-defined>
- Hussein F. A., Y. M. (2025). *The future of intelligent industrial systems: PLC, Node-RED, and IoT/IIoT*. <https://ates.alayen.edu.iq/home/vol2/iss2/5/>
- Irwin Research & Development, Inc. (s.f.). *Model 44: Thermoformer and Trim Press*.
<https://irwinresearch.com/machines/model44.html>
- Kibishov, A. (2024). *Thermal analysis of radiation heat transfer of improved fractal solar collectors*. <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/23/11155>
- Ministerio de Energía y Minas. (2025). *Balance energético nacional*.
https://www.ambienteyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2025/09/BEN_24_INTRO.pdf
- Mutlu, H. (2025). *PROFINET controller on cloud*.
https://www.academia.edu/128810803/PROFINET_Controller_on_Cloud
- OpenJSFoundation. (s.f.). *node-red-contrib-s7*. Node-RED Flow Library.
<https://flows.nodered.org/node/node-red-contrib-s7>
- Pacana, A., Czerwinska, K., Bednarova, L., & Simkova, Z. (2025). Integration of Key Performance Indicators (KPI) Taxonomy and Energy Efficiency Analysis in the Aluminium Industry Using Industry 4.0 Technologies. *Energies*.
<https://doi.org/10.3390/en18236133>
- Patil, J. P. (2021). *Transient thermal analysis of close pressure thermoforming process*.
https://www.researchgate.net/publication/348362637_Transient_thermal_analysis_of_close_pressure_thermoforming_process

- Plástico. (1 de noviembre de 2025). *Poliestireno expandido (EPS): usos, ventajas y aplicaciones*. Plástico. <https://www.plastico.com/es/noticias/poliestireno-expandido-eps-usos-ventajas-y-aplicaciones>
- Plastiglas. (2020). *Manual Técnico Termoformado*.
https://www.plastiglas.com.mx/pdfs/literatura/Manual_termoformado.pdf
- Punina Guerrero, D. J. (2024). *Procesos de convección e intercambiadores de calor*.
<https://repositorio.cidecuador.org/bitstream/123456789/3122/3/25-7-2024%20Libro%20Proceso%20Conveccion.pdf>
- Salazar, J., Pérez, M., & Rodríguez, L. (2025). *Heuristic tuning and decoupling strategies for multivariable systems: An integrated TIA Portal and Matlab-Simulink approach*. <https://pure.ups.edu.ec/es/publications/heuristic-tuning-anddecoupling-strategies-formultivariable-system/>
- Schmidt, C. (2020). *Implementing key performance indicators for energy efficiency in manufacturing*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116312914>
- Siemens. (2025). *Hoja de datos 6ES7516-3AN01-0AB0*. Siemens.
<https://www.siemens.com>
- Siemens. (2025b). <https://sieportal.siemens.com/en-ww/support>
- Siemens AG. (2022). *PID control with PID_Compact: SIMATIC S7-1200 / S7-1500 + TIA Portal V17*. <https://www.siemens.com>
- Siemens AG. (2023). *LSim Library Documentation*. <https://www.siemens.com>
- Simkoff, J. M. (2020). Process control and energy efficiency. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, 11*, 16.1–16.23 .
- Smart Factory. (2020). *SIMATIC IOT2040*. Smart Factory.
<https://smartfactory.ie/product/simatic-iot2040/>
- Technews Publishing. (2024). *Siemens IoT2040 industrial intelligent gateway*. SA Instrumentation & Control: <https://www.instrumentation.co.za/60309n>
- URANY. (1 de febrero de 2023). *URANY*. URANY: <https://urany.net/blog/conoce-el-funcionamiento-de-los-servomotores>
- Wardhana, D. A. (2023). *Finite element simulation and optimization of thermoforming process parameters for polymer sheet forming*.
https://www.researchgate.net/publication/220348078_Finite_element_simulation_of_thermoforming_processes_for_polymer_sheets

