



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE
TEMPERATURA PARA EL HORNO DE CALENTAMIENTO DE MÁQUINAS
DE TERMOFORMADO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Electrónico

AUTOR: Cristian Eduardo Aña Quiña

TUTOR: Carlos Germán Pillajo Angos

Quito - Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Cristian Eduardo Aiña Quiña con documento de identificación 1725885147; 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.

Quito, 10 de febrero del año 2025

Atentamente,



Cristian Eduardo Aiña Quiña
1725885147

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

Yo, Cristian Eduardo Aiña Quiña con documento de identificación No. 1725885147, expreso mi voluntad, y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad de los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del proyecto técnico : "Desarrollo de un sistema de control automático de temperatura para el horno de calentamiento de máquinas de termoformado", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 10 de febrero del año 2025

Atentamente,



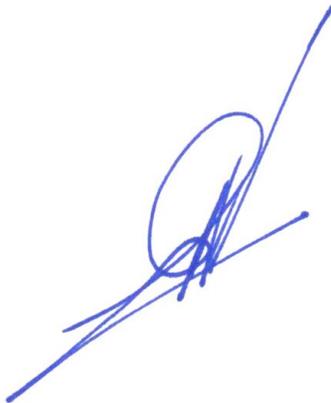
Cristian Eduardo Aiña Quiña
1725885147

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Germán Pillajo Angos, con documento de identificación N° 1709255119, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE TEMPERATURA PARA EL HORNO DE CALENTAMIENTO DE MÁQUINAS DE TERMOFORMADO**, realizado por Cristian Eduardo Aíña Quiña con documento de identificación N° 1725885147, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 10 de febrero del año 2025

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned below the text 'Atentamente,'.

Ing. Carlos German Pillajo Angos, PhD
1709255119

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a la memoria de mi padre, quien fue mi inspiración y me ayudó a formar una mentalidad profesional, a mi madre, quien con su paciencia y apoyo me motivó a alcanzar este logro. Agradezco también a mi esposa e hijo, quienes han sido mi mayor motivación para continuar persiguiendo mis sueños y culminar esta etapa. Además, deseo que este trabajo sirva como inspiración para mi hermana, alentándola a seguir adelante y terminar sus estudios universitarios

Agradezco a mi tutor de tesis por su paciencia y apoyo incondicional, que fueron fundamentales para alcanzar esta meta. También quiero expresar mi gratitud al Ing. Juan Carlos Miranda, quien confió en mí y me ayudó a desarrollar mi talento en el área de electrónica, sacando la mejor versión de mí mismo.

¡Muchas gracias!

INDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|-----|
| RESUMEN..... | xii |
| ABSTRACT | xiv |
| INTRODUCCIÓN | xvi |
| CAPÍTULO 1. | 1 |
| ANTECEDENTES | 1 |
| 1.1 Problema de estudio..... | 1 |
| 1.2 Justificación..... | 2 |
| 1.3 Objetivos | 4 |
| 1.3.1 Objetivo General..... | 4 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos..... | 4 |
| 1.4 Metodología..... | 5 |
| 1.4.1 Método exploratorio | 5 |
| 1.4.2 Método Experimental..... | 5 |
| 1.4.3 Método Inductivo | 5 |
| 1.4.4 Método analítico | 5 |
| 2 CAPÍTULO 2. | 6 |
| FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA | 6 |
| 2.1 Termopar Tipo K..... | 6 |
| 2.2 Resistencias Industriales | 6 |
| 2.3 Definición de HMI..... | 7 |
| 2.3.1 Usos de la HMI..... | 7 |
| 2.4 Termoformado..... | 7 |
| 2.4.1 El principio del termoformado | 8 |
| 2.4.2 Las etapas del termoformado | 8 |
| 2.4.3 Las aplicaciones del termoformado | 9 |
| 2.5 Material Foam | 9 |
| 2.6 Controladores Lógicos Programables | 9 |
| 2.7 Comunicación Rs485 | 10 |
| 2.8 Sistemas de control..... | 10 |
| 2.8.1 Control en bucle abierto vs control en bucle cerrado | 11 |
| 2.9 Un relé de estado sólido (SSR)..... | 11 |

| | | |
|--------|---|----|
| 2.10 | Etapa de Diseño del Sistema de Control de Temperatura | 12 |
| 2.10.1 | Justificación del Uso de los Elementos y Marcas Implementadas | 12 |
| 2.10.2 | Justificación del uso del tipo de control en lazo cerrado PID..... | 13 |
| 2.10.3 | Diagrama de bloques del proceso de máquinas de termoformado..... | 14 |
| 2.10.4 | Diagrama de bloques del proceso de calentamiento de la lámina de termoformado | 16 |
| 3 | CAPÍTULO 3. | 18 |
| | IMPLEMENTACION..... | 18 |
| 3.1 | Máquina termoformadora..... | 18 |
| 3.1.1 | Panel Semiautomático..... | 18 |
| 3.1.2 | Horno de Máquinas de termoformado | 19 |
| 3.2 | Implementación del tablero de control..... | 20 |
| 3.2.1 | Materiales y Componentes | 20 |
| 3.2.2 | Distribución del tablero..... | 21 |
| 3.2.3 | Conexiones Eléctricas | 22 |
| 3.2.4 | Controladores de temperatura TM4 | 23 |
| 3.3 | Selección del tipo de Control de Temperatura..... | 25 |
| 3.3.1 | Configuración del PID | 25 |
| 3.3.2 | Método de control | 26 |
| 3.4 | Pantalla HMI | 27 |
| 3.4.1 | Interfaz de Usuario para el control de zonas | 28 |
| 3.4.2 | Interfaz de control y configuración PID | 29 |
| 3.5 | Implementación Comunicación TM4- HMI-PLC..... | 30 |
| 3.6 | Control de alarmas y control de acceso | 31 |
| 3.6.1 | Implementación de Baliza led | 31 |
| 3.6.2 | Alarmas de puertas de seguridad | 32 |
| 3.6.3 | Alarmas de temperatura | 34 |
| 3.6.4 | Seguridad y control de acceso en HMI | 35 |
| 3.7 | Monitoreo y registro de datos | 36 |
| 3.7.1 | Registro de temperatura | 36 |
| 4 | CAPITULO 4. | 38 |
| 4.1 | Pruebas realizadas | 38 |
| 4.2 | Pruebas Realizadas y Resultados Obtenidos..... | 38 |
| 4.2.1 | Pruebas control de zonas de calentamiento ON/OFF | 38 |
| 4.2.2 | Alarmas y control de temperatura de zonas de calentamiento | 39 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.2.3 | Pruebas de configuración de PID Automático | 41 |
| 4.3 | Resultados Específicos del PID Automático | 43 |
| 4.3.1 | Calculo del error relativo zona 1 | 44 |
| 4.3.2 | Calculo del error promedio de la zona 1 | 45 |
| 4.3.3 | Análisis de Error Promedio (%)..... | 46 |
| 4.3.4 | Configuración de los parámetros PID por el método de Automático | 47 |
| 4.3.5 | Análisis de la configuración del PID de forma automática de las zonas 1-5 | 48 |
| 4.3.6 | Calculo del porcentaje de numero de aciertos del sistema PID de las zonas 1-5 | 49 |
| 4.3.7 | Análisis del porcentaje de numero de aciertos del sistema PID de las zonas 1-5 | 49 |
| 5 | CONCLUSIONES | 51 |
| 6 | RECOMENDACIONES | 53 |
| 7 | BIBLIOGRAFÍA. | 54 |
| 8 | ANEXOS..... | 56 |
| | Configuración Automática del PID | 59 |
| | Configuración Manual del PID | 59 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.10.2 Diagrama de lazo cerrado de control de temperatura de horno de máquina de termoformado..... | 13 |
| Figura 2.10.3 Diagrama de proceso de máquina de termoformado..... | 14 |
| Diagrama de proceso de máquina de termoformado | 14 |
| Figura 2.10.4 Diagrama de proceso de calentamiento de la lámina de termoformado... .. | 16 |
| | 16 |
| Figura 3.1 Máquina Termoformadora..... | 18 |
| Figura 3.1.1 Panel de control del horno de máquinas de termoformado | 19 |
| Figura 3.1.2 Horno de termoformadoras | 20 |
| Figura 3.2.2 Distribución de tablero de control..... | 22 |
| Figura 3.2.3 Conexiones eléctricas del tablero de control | 23 |
| Figura 3.2.4 Comparación de módulo CH402 y Modulo TM4..... | 24 |
| Figura 3.3.1.2 Interface de configuración PID automático | 26 |
| Figura 3.3.2 Interface de configuración Método de Control..... | 27 |
| Figura 3.4 Interface general de pantalla HMI | 28 |
| Figura 3.4.1 Interface de usuario para el control de temperaturas..... | 29 |
| Figura 3.4.2 Interface de control y configuración PID | 30 |
| Figura 3.5 Topología de comunicación, procesamiento y comportamiento del sistema | 31 |
| | 31 |
| Figura 3.6.1 Ubicación de la baliza led..... | 32 |
| Figura 3.6.2 Sensores fotoeléctricos colocados en las puertas..... | 33 |
| Figura 3.6.2.1 Interface HMI de puertas de seguridad..... | 34 |
| Figura 3.6.3 Interface HMI de alarmas activas e históricos para el control de temperaturas | 35 |
| Figura 3.6.4 Interface de acceso para la configuración PID | 36 |
| Figura 3.7.1 Interface de monitoreo de zonas de calentamiento | 37 |
| Figura 4.2.1 Prueba de funcionamiento ON/OFF de zonas de calentamiento | 39 |
| | 39 |
| Figura 4.2.2 Interface de Alarmas de Zonas de Temperaturas..... | 40 |
| Figura 4.2.2.1 Activación de baliza led en color rojo | 41 |
| Figura 4.2.3 Control de temperatura mediante modulo CH402 | 42 |
| Figura 4.2.3.1 Control de temperatura mediante módulo TM4..... | 42 |
| Figura 4.3. interface de Zonas de Temperatura..... | 43 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.3.4 Prueba de configuración de Parámetros de PID zona 1 | 47 |
| Figura B.1 interface de menú principal..... | 57 |
| Figura B.3 interface de selección de Zonas de configuración PID..... | 58 |
| Figura B.4 interface de configuración manual o automática del PID..... | 59 |
| Figura B.5 interface de configuración automática y manual del PID..... | 60 |
| Figura C.1 interface de menú principal..... | 61 |
| Figura C.2 interface de zonas de temperatura | 62 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 3.2.1 Lista de Materiales | 21 |
| Tabla 3.2.4 Controlador de temperatura TM4..... | 24 |
| Tabla 4.3.1 Error relativo zona 1 | 44 |
| Tabla 4.3.1 Error Relativo de Zonas 1-5 de temperatura..... | 45 |
| Tabla 4.3.2 Error Relativo Promedio de Zonas de temperatura | 46 |
| Tabla 4.3.4 Configuración de parámetros PID..... | 48 |
| Tabla 4.3.6 Porcentaje de aciertos de Zonas de temperatura..... | 49 |
| Tabla A.1 Configuración de parámetros PID..... | 56 |

RESUMEN

Desarrollo de un Sistema de Control Automático de Temperatura para un Horno de Calentamiento en Máquinas de Termoformado

Este estudio presenta el diseño e implementación de un sistema de control automático de temperatura para hornos de calentamiento en máquinas de termoformado, que anteriormente funcionaban de manera semiautomática con controladores PID manuales. El objetivo fue optimizar el uso de recursos y automatizar la regulación de las zonas de calentamiento mediante una interfaz HMI (Human-Machine Interface) y un controlador lógico programable (PLC).

El sistema es capaz de gestionar entre 1 y 51 zonas de calentamiento, las cuales se pueden ajustar desde la pantalla HMI para controlar diferentes modos: calentamiento, enfriamiento o combinación de ambos. Esto permite un control rápido y eficiente de las zonas de temperatura, mejorando significativamente la operación de la máquina.

Estas máquinas operan con un sistema de potencia de 440 V AC trifásico, que alimenta motores de 135 amperios y resistencias eléctricas de 440 V AC. Debido a los requisitos de potencia, fue necesario separar el sistema en dos partes: un sistema de control de 220 V AC y el sistema de potencia de 440 V AC, asegurando así una operación segura y eficiente.

Gracias al uso del PLC, el sistema no solo regula la temperatura, sino que también monitorea otros parámetros clave como la corriente de los motores, la velocidad, y las temperaturas de cada zona. Además, se integraron alarmas visuales con indicadores de estado:

- Luz verde: Indica que el sistema funciona correctamente.
- Luz amarilla: Se activa cuando la temperatura varía menos de 5 grados fuera del rango establecido.
- Luz roja: Se enciende si la variación supera este intervalo, alertando de un problema crítico.

El sistema es escalable y admite la expansión a través de comunicación RS485, lo que permite la adición de más entradas y salidas. La conexión entre los 10 controladores RS485 permite gestionar hasta 4 zonas de calentamiento por controlador mediante el módulo TM4, brindando flexibilidad en el manejo de las temperaturas.

Se incorporó una tarjeta SD para el registro de datos, lo que facilita la toma de decisiones basada en el historial de eventos de corriente y temperatura. Esto mejora la capacidad de diagnóstico y optimización de la máquina, permitiendo al operador una interacción más intuitiva con el sistema a través de la pantalla HMI. El diseño permite un control preciso y escalable, mejorando la eficiencia y la toma de decisiones en el proceso de termoformado.

ABSTRACT

This study presents the design and implementation of an automatic temperature control system for heating ovens in thermoforming machines, which previously operated semi-automatically with manual PID controllers. The goal was to optimize resource use and automate temperature zone regulation using a Human-Machine Interface (HMI) and a Programmable Logic Controller (PLC).

The system is capable of managing between 1 and 51 heating zones, which can be adjusted via the HMI screen to control different modes: heating, cooling, or a combination of both. This allows for fast and efficient control of the temperature zones, significantly improving the machine's operation.

These machines operate with a 440 V AC three-phase power system, powering 135-amp motors and 440 V AC heating resistances. Due to the high power requirements, the system was divided into two parts: a 220 V AC control system and a 440 V AC power system, ensuring safe and efficient operation.

Thanks to the PLC, the system not only regulates temperature but also monitors other key parameters such as motor current, speed, and zone temperatures. Additionally, visual alarms were integrated to indicate the machine's status:

- Green light: Indicates the system is operating correctly.
- Yellow light: Activates when the temperature deviates less than 5 degrees from the set range.
- Red light: Illuminates if the temperature deviation exceeds this interval, signaling a critical issue.

The system is scalable and can be expanded through RS485 communication, allowing for additional inputs and outputs. The connection between the 10 RS485 controllers enables control of up to 4 heating zones per controller, offering flexibility in temperature management.

A SD card was incorporated to log data, facilitating decision-making based on the history of current and temperature events. This improves the machine's diagnostic and optimization capabilities, allowing the operator to interact more intuitively with the

system through the HMI screen. The design enables precise and scalable control, enhancing efficiency and decision-making in the thermoforming process.

INTRODUCCIÓN

La empresa privada en cuestión cuenta actualmente con siete máquinas de termoformado y tres máquinas extrusoras, todas ellas operando bajo condiciones semiautomáticas y a una tensión de 440 VAC. Aunque estas máquinas cuentan con implementaciones básicas de controladores, la automatización completa se ve limitada por el alto costo de los sistemas adicionales necesarios para optimizar su funcionamiento.

Para mejorar los procesos productivos, se ha decidido implementar un sistema de automatización en las máquinas de termoformado. A través de pruebas de campo y ajustes, se evaluará la posibilidad de extender esta automatización a las máquinas extrusoras, las cuales requieren un proceso de control más complejo debido a su naturaleza.

El enfoque inicial de la automatización se centrará en el control de las temperaturas de los hornos de las máquinas de termoformado. Se incorporarán alarmas y pantallas HMI (Interfaz Hombre-Máquina) que permitirán una mejor interacción de los operadores con las zonas de calentamiento. Estas interfaces facilitarán la visualización de los históricos de alarmas, mejorando la eficiencia operativa y permitiendo un análisis posterior de los datos, lo que contribuirá a la optimización continua del proceso de producción.

CAPÍTULO 1.

ANTECEDENTES

1.1 Problema de estudio

Las máquinas de termoformado en la empresa privada cuentan actualmente con un sistema de control semiautomático que utiliza 51 controladores de temperatura independientes. Esto obliga al operador a configurar manualmente cada una de las zonas de calentamiento según el tipo de producto a fabricar (por ejemplo, loncheras, ollitas o platos de 10 1/4 pulgadas). Este procedimiento resulta en tiempos prolongados de configuración, lo que afecta negativamente la productividad. Además, el proceso de ajuste de temperaturas es complejo y propenso a errores, lo que ocasiona frecuentes paros durante el arranque de las máquinas.

El sistema carece de funcionalidades clave que facilitarían la operación y el mantenimiento. Por ejemplo, no se cuenta con un registro histórico de datos ni con un sistema de alarmas que permita al operador identificar de manera intuitiva el estado de las zonas de calentamiento, si están funcionando correctamente o presentan fallas eléctricas. Esta falta de automatización también incrementa el riesgo de incidentes, como conatos de incendio, debido a las altas temperaturas en las zonas de calentamiento.

Por otro lado, no existe un sistema que registre y gestione el mantenimiento preventivo y correctivo, ni un manual que facilite la identificación de fallas recurrentes. Esto dificulta la implementación de un mantenimiento eficiente y agrava el impacto de las averías en la operatividad de las máquinas. La ausencia de estas herramientas críticas limita la capacidad de optimizar el desempeño de las termo formadoras y garantizar un ambiente de trabajo más seguro y eficiente.

Este escenario plantea la necesidad de desarrollar un sistema de control de temperatura automatizado, acompañado de alarmas, monitoreo en tiempo real y herramientas de gestión de mantenimiento, que sea sencillo de implementar y mejore significativamente los procesos de configuración, operación y seguridad.

1.2 Justificación

Actualmente se cuenta con varios proyectos técnicos en el desarrollo de sistemas de control automático de temperatura de máquinas termo formadoras para reducir la variación de temperatura a $\pm 3^{\circ}\text{C}$ respecto de la temperatura de consigna en los hornos de termoformado de la máquina productora de láminas plásticas P7, fue una necesidad de la empresa TUBASEC C.A. en Riobamba. La investigación partió de la adquisición de datos del horno sometido a una prueba de tipo escalón. (Cortés Llanganate, 2019)

Para el control automático de temperatura de máquinas de termoformado se cuenta con trabajos que realizan la implementación de un sistema PID, la evaluación e identificación de los sistemas térmicos, mecánicos e hidráulicos y la modificación del software de control para el funcionamiento semiautomático, esto partiendo de la valoración, la cual determina el estado actual de la máquina, las capacidades y operación de sistema de forma integra (Contreras Herrera , 2020)

Para controlar todos los equipos involucrados en estos procesos, se han utilizado PLCs de los que se disponía, que son además de distinto fabricante (Schneider, Delta y Siemens), por lo que se ha tenido que implementar la sincronización entre ambos, siendo capaces de compartir información relevante del proceso de máquinas de termoformado (David, 2021)

El montaje del tablero de control y de la Interfaz Hombre-Máquina (HMI) se lo realiza sin alterar la estructura original del horno, se realizaron pruebas a distintos valores de temperatura para validar el funcionamiento del equipo y se obtuvo mejoras considerables respecto al antiguo controlador. (Alex , 2020)

Se tiene varias formas de controlar horno de alta temperatura y de varios tipos de materiales en la mayoría de los casos se necesita una interface HMI para el set point de los datos y visualización de registros permitiendo facilitar el manejo del horno e incorporar la visualización de la temperatura actual. (Quiroga , 2020)

Se implementará un sistema de control automático de temperatura con un controlador lógico programable con módulos de control de temperatura y una pantalla HMI para el

horno de las máquinas de termoformado para controlar las zonas de calentamiento y una Baliza de color rojo, amarillo y verde.

Al tener una interface HMI y un controlador lógico programable se puede realizar indicadores y registros de cada zona de calentamiento de una manera factible y de rápido mantenimiento.

Como solución al punto 2 se realizará un sistema de control automático en el horno de las máquinas de termoformado y obtendremos registros e indicadores del estado de las zonas de calentamiento del horno , se solucionará de una manera más rápida la configuración de las temperaturas teniendo formulas o recetas ya programadas para el arranque en cada cambio de presentación de platos desechables .Se implementara indicadores visuales en la pantalla HMI y salidas de estado , luces led en rojo verde y amarillo. Con estas alarmas ayudaremos al operador a poder solucionar el fallo de las zonas de temperatura de los hornos de la máquina de termoformado.

Al tener un sistema de control en las zonas de calentamiento evitaremos los conatos de incendio por altas temperaturas se implementará alarmas visuales y el apagado de las zonas de calentamiento automáticamente.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Desarrollar un sistema de control de temperatura para los hornos de calentamiento de máquinas termoformadoras mediante un controlador lógico y una interface HMI

1.3.2 Objetivos Específicos

- Investigar sobre los diferentes tipos de control automático para el seteo de un punto de consigna, esto mediante documentos en repositorios universitarios.
- Desarrollar un sistema automático para el control de temperatura del horno de máquinas de termoformado por medio de hardware y software especializado.
- Diseñar una interfaz que permita a un operario la visualización, notificación de alarmas y el control del proceso de termoformado mediante una interface HMI.
- Verificar el funcionamiento del sistema de control de temperatura en hornos de calentamiento de máquinas termoformadoras, desde una interfaz HMI para su validación mediante pruebas de campo

1.4 Metodología

Para la realización del presente proyecto se procederá al uso de la metodología de investigación que se detalla a continuación:

1.4.1 Método exploratorio

Se debe estudiar los tipos de controladores lógicos en el mercado y ver cuál es el más factible para su implementación en campo al igual que la interface HMI.

1.4.2 Método Experimental

Se aplica este método, ya que una vez realizado la implementación del controlador lógico y pantalla HMI se debe realizar las pruebas en campo y ver cómo es la interacción con los operadores.

1.4.3 Método Inductivo

Se desarrollará un sistema de control de temperatura e indicadores dinámicos por medio de la interfaz HMI

1.4.4 Método analítico

Se podrá observar los resultados obtenidos a través de comparaciones de registros de conatos de incendio y paro de máquina por problemas en el horno.

2 CAPÍTULO 2.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Termopar Tipo K

llamado habitualmente *coronel/Alumel*, sigue siendo el termopar más utilizado para aplicaciones industriales. Está concebido principalmente para atmosferas neutras. De hecho, se debe tener especial cuidado a la hora de proteger el sensor cuando se utiliza en otro ambiente distinto. La temperatura máxima en continuo se aproxima a los 1100°C y en períodos cortos de tiempo alcanza los 1200°C. Por encima de los 800°C la oxidación causa deriva y des calibración de forma más pronunciada.

Aunque el tipo K es el termopar más utilizado debido a su rango y su precio, no es tan estable como los otros sensores de metal común. Para temperaturas entre 250°C y 600°C, pero especialmente entre 300°C y 550°C, la histéresis cíclica de temperatura puede dar errores de varios grados. Aunque el tipo K se utiliza popularmente en aplicaciones nucleares debido a su relativa dureza frente a la radiación, actualmente el Tipo N posee mejores características. (TC-SA, 2020).

2.2 Resistencias Industriales

Cuando hablamos de resistencias eléctricas industriales nos referimos a resistencias que se utilizan en líneas de procesos de producción en industrias o empresas.

Están especialmente diseñadas para cumplir una función específica según el material a calentar y el tipo de proceso que se realice. Todas las resistencias eléctricas transforman la energía eléctrica en calor. Esa disipación de calor es utilizada para los procesos industriales que se clasifican en 3 tipos: calentamiento de sólidos, calentamiento de líquidos y calentamiento de aire o gases.

Sobre los materiales. Se emplean básicamente aceros, cerámica, óxido de magnesio e hilo resistivo Kanthal para resistencias eléctricas hasta 700°C. Para temperaturas superiores hasta 1300°C se emplea tan solo hilo resistivo Kanthal con soportes cerámicos de alúmina tubular. Pero existen materiales especiales que son capaces de soportar

temperaturas elevadas de hasta 2730°C. Tal es el caso del carburo de silicio o el disiliciuro de molibdeno. (Martinez, 2019)

2.3 Definición de HMI

HMI son las siglas de human-machine interface y se refieren a un panel que permite a un usuario comunicarse con una máquina, software o sistema. Técnicamente, se puede referir a cualquier pantalla que se use para interactuar con un equipo, pero se utiliza normalmente para las de entornos industriales. Las HMI muestran datos en tiempo real y permiten al usuario controlar las máquinas con una interfaz gráfica de usuario.

2.3.1 Usos de la HMI

La HMI se utiliza en una amplia gama de sectores. Es común en la fabricación de distintos productos, desde automóviles a comida y bebidas pasando por medicinas. Industrias como la de la energía, el agua, las aguas residuales, los edificios y el transporte también pueden usar HMI. Cargos como los integradores de sistemas, operarios e ingenieros y, en especial, los ingenieros de sistemas de control de procesos, usan frecuentemente HMI para controlar máquinas, vehículos, plantas o edificios.

La sofisticación de la HMI varía en función de la complejidad de la máquina o sistema para el que se usa. También varía según el uso de la HMI, ya sea para supervisar una máquina o para otros fines, como supervisar operaciones de una planta y controlar equipos. (copadata, 2018).

2.4 Termoformado

El termoformado es un proceso de fabricación de plástico que implica calentar una lámina termoplástica y darle formas específicas utilizando un molde. Esta técnica se lleva a cabo mediante el uso de una máquina de termoformado, que calienta y estira la lámina sobre

el molde deseado. Una vez que el plástico se ha moldeado, se enfría y se recorta, obteniendo como resultado la pieza final.

Entre los materiales para el termoformado más utilizados se encuentran el ABS, el polietileno, el policarbonato, el PETG, entre otros. La elección del material depende del proyecto de fabricación y de las características requeridas para el producto final. (copadata, 2018).

2.4.1 El principio del termoformado

El termoformado conduce a la transición vítrea de los materiales termoplásticos calentándolos por encima de la temperatura de transición vítrea [T_g] de los materiales que se van a termo formar. Una vez superada esta etapa, los materiales entran en estado gomoso, lo que permite obtener la forma deseada con una precisión milimétrica. Para optimizar la calidad de la producción, se utilizan hornos (secado, recocido pos formado) para preparar los termoplásticos para las distintas etapas del termo conformado.

Realizado al vacío o bajo presión, el termoformado permite producir formas complejas y piezas más gruesas, incluso de grandes dimensiones, con costes de utillaje controlados.

2.4.2 Las etapas del termoformado

- Se coloca un molde dentro de la caja de la máquina sobre una bandeja que puede desplazarse verticalmente.
- Se sujeta una lámina termoplástica en un marco (de tamaño reducible) que también sella la caja.
- El material se calienta mediante paneles eléctricos de infrarrojos (halógenos, cuarzo o cerámica) hasta alcanzar la temperatura de conformado (sensor de infrarrojos).
- Una vez alcanzada la temperatura óptima (variable en función del grosor de la chapa o del tipo de material), se retiran los paneles calefactores y la chapa ablandada se estira previamente mediante inyección de aire (burbujeo).

- El molde se coloca en la posición superior para dar forma a la pieza: a continuación, una bomba de vacío aspira el aire para que la chapa encaje perfectamente en el molde, eventualmente con ayuda mecánica.
- A continuación, la pieza se enfría mientras permanece en el molde, hasta que pueda desmoldarse (desmolde) sin adherencias ni deformaciones.

2.4.3 Las aplicaciones del termoformado

Las aplicaciones del termoformado son numerosas en diversos sectores industriales que requieren la fabricación de moldes y piezas con la superficie más perfecta posible, tales como:

- Aeronáutica con la fabricación de asientos de aviones (piezas de plástico, resinas sintéticas y espumas),
- Señalización, Plv, comunicación con el termoformado de señalización exterior
- Transporte terrestre con el moldeo y la fabricación de asientos en la industria ferroviaria (MECANUMERIC, 2017).

2.5 Material Foam

Técnicamente, llamamos foam a la espuma elaborada, fundamentalmente, a base de polietileno. Se la conoce también como espuma de célula cerrada porque está formada por una agregación de burbujas selladas entre sí que, a diferencia de la espuma de celda abierta, presenta una gran resistencia al agua. Esa característica, unida a la enorme resistencia que tiene y a sus propiedades aislantes de temperatura la convierten en el producto ideal para cualquier tipo de embalaje. (Ra-pack, 2018)

2.6 Controladores Lógicos Programables

Un Controlador lógico Programable, es un dispositivo que fue inventado para reemplazar los circuitos de relés secuenciales necesarios para máquinas de control. El Controlador

Lógico Programable trabaja leyendo sus entradas y dependiendo de su estado, varia las salidas de acuerdo a la lógica que se planteó. Un controlador lógico programable es una máquina electrónica programable, por personal no informático, destinada a cumplir funciones de automatismos lógicos y control de procesos de manufactura, en ambiente industrial y tiempo real, tanto sean de tipo combinaciones o secuencial. Esta definición no debe interpretarse en forma rigurosa ya que los controladores lógicos programables modernos incorporan funciones especiales no solo de tratamiento lógico sino también de cálculo numérico, regulación de PID y de servo control. (ARRIETA ARVILLA, 2019).

2.7 Comunicación Rs485

Es una interfaz estándar de la capa física de comunicación, un método de transmisión de señales, el 1er nivel del modelo OSI (Interconexión de Sistemas Abiertos). El protocolo RS-485 fue creado para ampliar las capacidades físicas de la interfaz RS-232.

La conexión serie EIA-485 es realizada utilizando un cable de dos o tres hilos: un hilo de datos, un hilo con datos invertidos y, a menudo, un hilo cero (tierra, 0 V). De este modo, los transmisores y los receptores intercambian los datos a través de un cable de par trenzado de hilos rígidos de 22 o 24 AWG. Su principal función es transportar una señal a través de dos cables. (weis, 2021)

2.8 Sistemas de control

Un sistema de control es aquel en el que las variables de salida se comportan según las órdenes dadas por las variables de entrada. En esta sección describiremos distintos tipos de sistemas de control.

2.8.1 Control en bucle abierto vs control en bucle cerrado

Un sistema de control en bucle abierto (Open loop control system) se caracteriza porque el sistema de control no recibe información acerca del valor que tiene la variable del producto o proceso que quiere controlar.

Los sistemas de control en bucle cerrado (Closed loop control systems) se caracterizan por recibir información en sus entradas sobre el valor de la variable que controlan. Se dice por ello que son sistemas que están realimentados (Feedback control systems). Un ejemplo de sistema de control lógico en bucle cerrado es el control del nivel de agua de un depósito. La entrada de agua al depósito depende del nivel de agua en cada momento. Otro ejemplo de sistema de control en bucle cerrado es el de control de la velocidad de un motor de corriente continua. Para ello dicha velocidad se mide mediante un taquímetro cuya salida se conecta a la entrada del sistema de control. Los sistemas que realizan el control en bucle cerrado son los verdaderos sistemas de control automático que hacen que un producto o proceso tome decisiones sin necesidad de la intervención de un ser humano y por ello suelen recibir el nombre de sistemas de regulación automática o simplemente reguladores. (Mandado, 2009)

2.9 Un relé de estado sólido (SSR)

Un relé de estado sólido (SSR) es un dispositivo interruptor electrónico que conmuta el paso de la electricidad cuando una pequeña corriente es aplicada en sus terminales de control. Los SSR consisten en un sensor que responde a una entrada apropiada (señal de control), un interruptor electrónico de estado sólido que conmuta el circuito de carga, y un mecanismo de acoplamiento a partir de la señal de control que activa este interruptor sin partes mecánicas. Puede estar diseñado para conmutar corriente alterna o continua. Hace la misma función que el relé electromecánico, pero sin partes móviles. Los relés de estado sólido utilizan semiconductores de potencia como tiristores y transistores para conmutar corrientes hasta más de 100 amperios. Los relés SSR pueden conmutar a muy altas velocidades (del orden de milisegundos) en comparación a los electromecánicos, y no tienen contactos mecánicos que se desgasten. A la hora de aplicar este tipo de relés

debe tenerse en cuenta su baja tolerancia para soportar sobrecargas momentáneas, comparado con los relés electromecánicos, y su mayor resistencia al paso de la corriente en su estado activo. (Fluxingenieros, 2020)

2.10 Etapa de Diseño del Sistema de Control de Temperatura

Para garantizar la eficiencia del sistema de control de temperatura en los hornos de calentamiento de las máquinas de termoformado, se realizó un proceso de selección de componentes basado en criterios de rendimiento, compatibilidad y facilidad de implementación. A continuación, se justifican las elecciones de los elementos y marcas utilizadas.

2.10.1 Justificación del Uso de los Elementos y Marcas Implementadas

- **Controlador Lógico Programable (PLC) Delta:** Se seleccionó debido a su compatibilidad con la comunicación RS485 y su capacidad de manejo de múltiples entradas y salidas digitales y analógicas, facilitando la integración con los demás dispositivos del sistema. Además, es una opción económica que cumple con los requisitos del sistema.
- **Pantalla HMI Delta:** Permite una interacción intuitiva con el sistema, proporcionando monitoreo en tiempo real y ajustes de parámetros PID. Se escogió debido a su compatibilidad con el PLC Delta y su costo accesible.
- **Controladores de Temperatura TM4:** Reemplazaron los módulos CH402, ya que cuentan con comunicación RS485, lo que permite su integración con la HMI y el PLC.
- **Termopares Tipo K:** Se eligieron porque la máquina ya dispone de estos sensores, lo que facilita su implementación sin necesidad de modificaciones adicionales.
- **Relés de Estado Sólido (SSR):** Se utilizaron porque ya están presentes en la máquina, lo que permite su reutilización sin requerir inversión adicional.

- **Baliza LED Tricolor:** Implementada para alertar visualmente sobre el estado del sistema, mejorando la seguridad operativa.
- **Sensores Fotoeléctricos:** Se utilizaron para controlar la apertura de puertas y evitar accesos indebidos durante el funcionamiento de la máquina de tipo NC y NO de señal.

2.10.2 Justificación del uso del tipo de control en lazo cerrado PID

Se escogió un sistema de control de lazo cerrado PID, como se muestra en la figura 2.10.2. Esta implementación se realizó debido a que el sistema anterior ya utilizaba un controlador PID y los técnicos estaban familiarizados con este tipo de control. Además, el proveedor recomendó este tipo de sistema para optimizar la eficiencia térmica.

Se seleccionó este tipo de control porque los módulos TM4 tienen esta configuración, permitiendo un ajuste preciso y estable de la temperatura en cada zona del horno. Gracias a esta implementación, el sistema puede mantener las temperaturas de trabajo dentro de un margen óptimo, asegurando la calidad del producto final.

Figura 2.10.2 Diagrama de lazo cerrado de control de temperatura de horno de máquina de termoformado

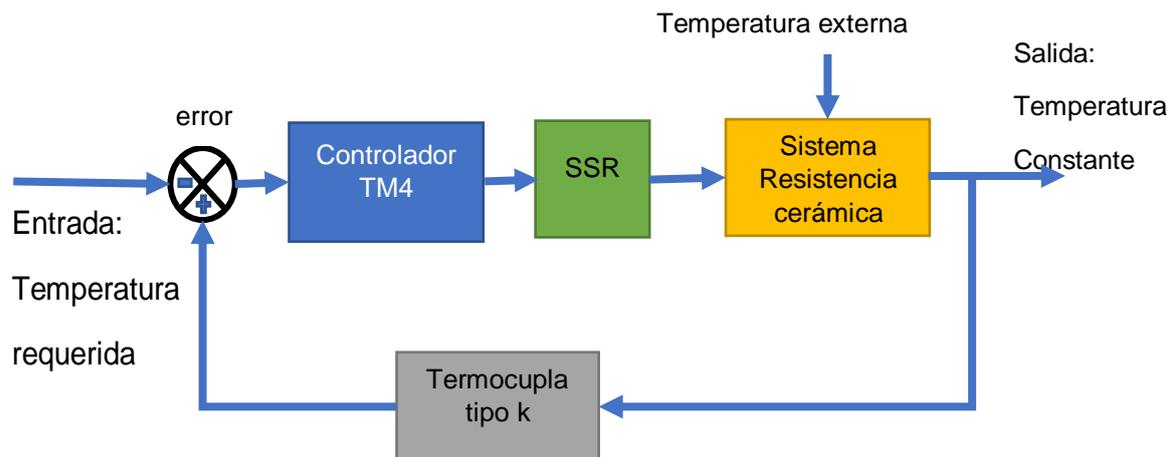


Diagrama de lazo cerrado de control de temperatura. Realizado por: Cristian Aña

2.10.3 Diagrama de bloques del proceso de máquinas de termoformado

El siguiente diagrama representa el flujo del proceso de termoformado desde la alimentación del material hasta el empaquetado final

Figura 2.10.3 Diagrama de proceso de máquina de termoformado

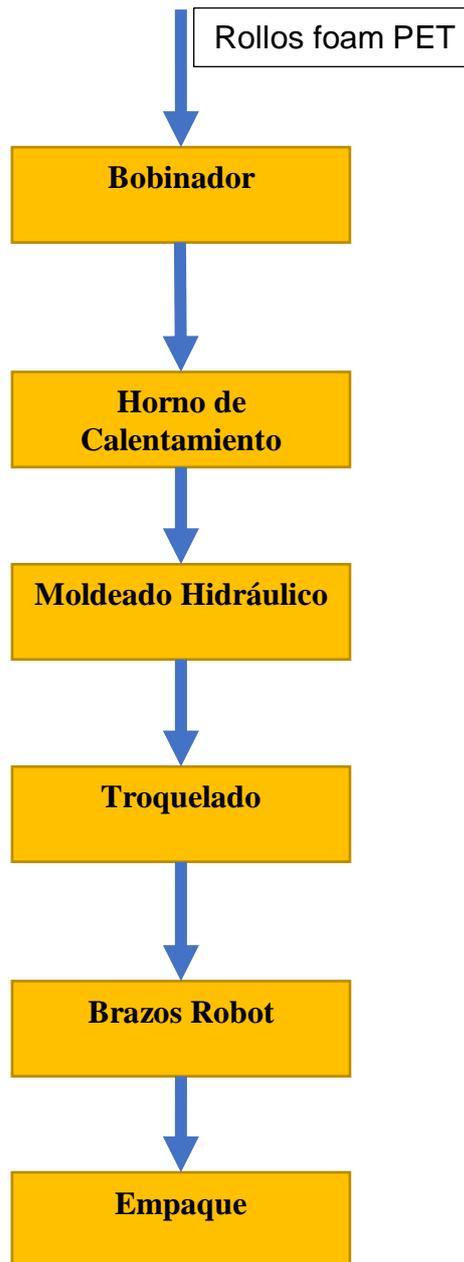


Diagrama de proceso de máquina de termoformado

. Realizado por: Cristian Aiña

2.10.3.1 Explicación de cada etapa:

1. **Bobinador:** Recibe los rollos de material foam PET (50-100 kg, 2 metros de diámetro) y los posiciona en el sistema de alimentación.
2. **Horno de Calentamiento:** Usa resistencias eléctricas de 440V AC para calentar la lámina, permitiendo su expansión.
3. **Moldeado Hidráulico:** Un sistema hidráulico presiona la lámina entre un molde superior e inferior, dándole la forma deseada.
4. **Troquelado:** Un cilindro hidráulico acciona un troquel con cuchillas que corta las piezas moldeadas (ejemplo: 25 cavidades por molde).
5. **Brazos Robot:** Recogen las piezas cortadas y las colocan en mesas para facilitar el empaquetado.
6. **Empaque:** Los operadores sellan y empacan las piezas utilizando máquinas selladoras y fundas plásticas.

2.10.4 Diagrama de bloques del proceso de calentamiento de la lámina de termoformado

Este esquema de control de temperatura permite un calentamiento progresivo y una transición térmica controlada, optimizando la calidad del termoformado. A continuación, se presenta el diagrama de bloques del proceso de calentamiento

Figura 2.10.4 Diagrama de proceso de calentamiento de la lámina de termoformado

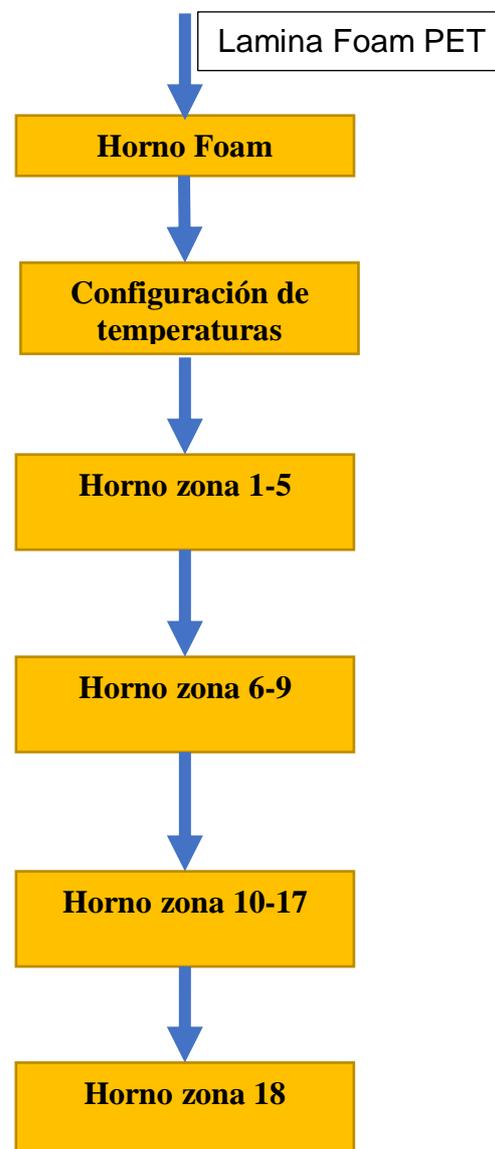


Diagrama de proceso de calentamiento de la lámina de termoformado. Realizado por:
Cristian Aiña

2.10.4.1 Explicación de cada etapa:

El proceso de calentamiento de la lámina de termoformado inicia cuando esta ingresa al horno. El operador debe configurar las temperaturas adecuadas para cada zona, asegurando un calentamiento eficiente y uniforme. Para facilitar este proceso, la interfaz del sistema divide el horno en diferentes zonas:

- **Zonas 1 a 5:** Corresponden a la entrada de la lámina en el horno, donde se requiere una temperatura alta para iniciar el proceso de expansión del foam. Estas zonas operan en un rango de **190°C a 210°C**. La lámina ingresa al horno transportada por una **cadena de arrastre a alta velocidad**, lo que requiere un calentamiento rápido y uniforme para expandir correctamente el material.
- **Zonas 6 a 9:** Representan el centro del horno, donde la temperatura debe mantenerse **constante alrededor de 210°C**. En esta etapa, es crucial evitar fluctuaciones térmicas para prevenir defectos en la lámina. **Si la temperatura es demasiado alta, la lámina puede quemarse y romperse**; si es demasiado baja, el material no se expandirá correctamente, lo que puede causar un **mal formado del producto final**.
- **Zonas 10 a 17:** En estas zonas, la temperatura comienza a descender progresivamente, con un rango de **170°C a 110°C**. Esta reducción es esencial porque, al llegar a la **etapa de moldeado**, el material ya estará expuesto a calor adicional. **Si la lámina mantiene una temperatura demasiado alta en esta fase, el contacto con el molde caliente puede provocar su ruptura**. En cambio, si la temperatura es demasiado baja, el material no se adaptará correctamente al molde, afectando la calidad del producto.
- **Zona 18:** Corresponde a la última fase del proceso, con un rango de temperatura entre **90°C y 100°C**. Su función es corregir posibles errores térmicos antes del moldeado final. **El operador puede ajustar esta temperatura en caso de detectar variaciones abruptas** que puedan afectar la calidad del termoformado.

3 CAPÍTULO 3.

IMPLEMENTACION

3.1 Máquina termoformadora

La automatización se implementó en una máquina termoformadora, como se muestra en la figura 3.1, perteneciente a una empresa privada. Actualmente, esta máquina opera con un panel semiautomático que controla un horno superior e inferior. En total, cuenta con 200 resistencias que operan a 440 V AC, con un consumo de 600 watts cada una. Para el control de estas zonas, se utilizan controladores de temperatura manuales CH402. Existen 51 controladores, los cuales son calibrados manualmente por el operador para ajustar las temperaturas según las diferentes presentaciones que requiere la producción.

Figura 3.1 Máquina Termoformadora



Vista general de máquina Termoformadora. Fuente (Empresa Privada,2024)

3.1.1 Panel Semiautomático.

El panel semiautomático, mostrado en la figura 3.1.1, utiliza 51 controladores de temperatura para termocupla tipo K, con salidas de control SSR de 40 amperios. También está equipado con indicadores digitales que permiten monitorear la corriente de las

resistencias. Además, cuenta con un sistema de paro de emergencia, y todo el panel opera a 220 V AC. Para la parte de control.

Figura 3.1.1 Panel de control del horno de máquinas de termoformado



Vista general de panel semiautomático de termoformadoras. Fuente (Empresa Privada,2024)

3.1.2 Horno de Máquinas de termoformado

El horno cuenta con 51 zonas de calentamiento distribuidas de la siguiente manera: las zonas 1 a 26 se ubican en la parte superior, mientras que las zonas 27 a 51 se encuentran en la parte inferior figura 3.1.2. Cada zona controla de 3 a 5 resistencias conectadas en paralelo, funcionando a 440 V AC, con una potencia de 600 W por resistencia. Además, hay 51 termocuplas tipo K distribuidas a lo largo del horno. El control de temperatura se ajusta según los requerimientos de producción; por ejemplo, se calibrará para loncheras,

mientras que otras temperaturas son necesarias para contenedores compartidos, según las especificaciones del proceso productivo.

Figura 3.1.2 Horno de termoformadoras



Vista general de horno de termoformadoras parte superior e inferior. Fuente (Empresa Privada,2024)

3.2 Implementación del tablero de control

3.2.1 Materiales y Componentes

Para la elaboración del tablero de control, se eligieron los siguientes materiales, según se detalla en la tabla 3.2.1.

Tabla 3.2.1 Lista de Materiales

| Nombre | Descripción | Unidad | Cantidad |
|---|--|--------|----------|
| Controlador Lógico Programable PLC DELTA | PLC con 8 entradas y 6 salidas Delta | U | 1 |
| Pantalla HMI Delta 10 pulgadas | conexión rs485,232, USB, SD, ethernet | U | 1 |
| Almacenamiento | MicroSD 32gb | U | 1 |
| SSR Dc-Dc | Input 24 dc output 24 dc | U | 10 |
| Sensores Autonic Fotoeléctricos Emisor - receptor | 24 DC Tipo NC-NO 15 metros de detección | U | 2 |
| Gabinete eléctrico | Alto 1 metros ancho 0,80 cm y profundidad 60 cm | U | 1 |
| TM4 Controlador PID | Controlador PID 4 entradas, Cuenta comunicación rs485 | U | 13 |
| Riel Din | | M | 3 |
| Canaleta | | M | 3 |
| Cable 26 x 4 concéntrico | Tipo Apantallado | M | 100 |
| Cable 18 x 7 concéntrico | Tipo Apantallado | M | 100 |
| Cable de termocupla tipo k | Termo cumpla tipo k con recubrimiento en fibra de vidrio | M | 100 |
| Baliza Led | 3 colores rojo, verde, amarillo Input 24 DC | U | 1 |
| Breaker de un polo 3 A | | U | 2 |
| Breaker de dos polos 10 A | | U | 2 |
| Borneras de un polo | | U | 1 |

Tabla de componentes electrónicos del tablero de control. Realizado por: Cristian Aña

3.2.2 Distribución del tablero

El tablero de control fue ubicado junto al tablero de potencia, ya que se requiere de los 51 SSR existentes en el sistema anterior. En este caso, se reemplazaron los 51

controladores CH402 por 13 controladores TM4, debido a que los SSR operan con la misma entrada de 24 V DC de control que los TM4. Además, las señales de las termocuplas fueron redirigidas al tablero de control, lo cual optimiza el sistema al centralizar las señales y mejorar la eficiencia del control de temperatura. Fig. 3.2.2

Figura 3.2.2 Distribución de tablero de control



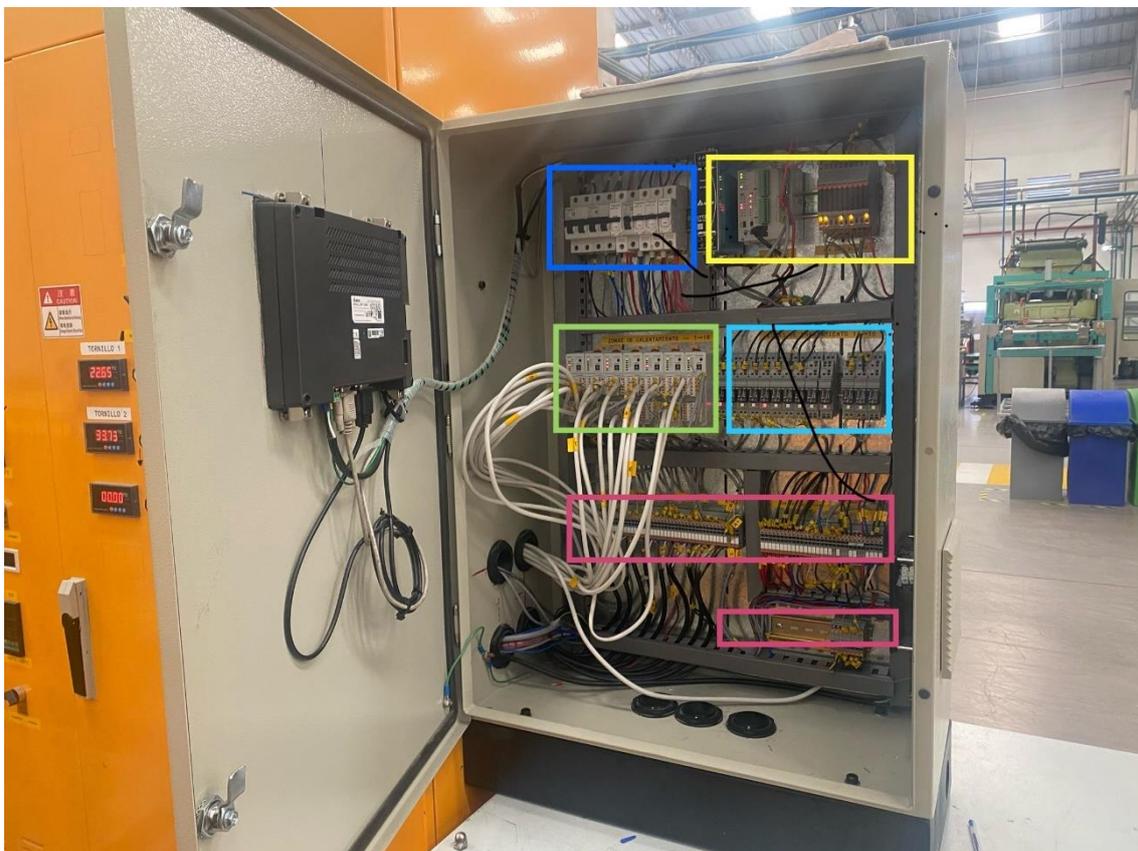
Vista general del tablero de control de máquinas de termoformado. Fuente (Empresa privada, 2024)

3.2.3 Conexiones Eléctricas

La conexión eléctrica se realizó de la siguiente manera: según la figura 3.2.3, en el cuadro de color azul se encuentra el sistema de protección para la corriente alterna (AC) y corriente continua (DC) mediante interruptores automáticos (breakers) de 1 y 2 polos, seleccionados de acuerdo con las corrientes de consumo. En el cuadro de color amarillo, se encuentra el sistema de control compuesto por un PLC Delta con sus respectivos SSR para las entradas y salidas, funcionando a 24 VDC tanto para entrada como para salida. En este cuadro se conectan sensores y actuadores operando a 24 VDC. En el cuadro de

color verde se encuentran los módulos TM4, conectados en serie a través de un conector físico que permite la interconexión mediante RS485. Estos módulos se encargan de gestionar las señales de control de los SSR del tablero de potencia y las señales de las termocuplas. En el cuadro azul, también se ubican relés con entrada de 24 VDC y salida de 220 VAC, utilizados para actuadores que requieren un mayor consumo de corriente. Finalmente, en la zona rosada están las borneras, donde se conecta todo el cableado de control hacia el tablero de potencia.

Figura 3.2.3 Conexiones eléctricas del tablero de control



Vista general del tablero de control de máquinas de termoformado. Fuente (Empresa Privada, 2024)

3.2.4 Controladores de temperatura TM4

Para el control de temperatura se seleccionó el módulo TM4, en sustitución del módulo CH402 original de la máquina. Como se observa en la Tabla 3.2.4, el módulo TM4 ofrece características mejoradas, destacándose especialmente su capacidad para comunicarse con la pantalla HMI mediante el protocolo RS485.

Tabla 3.2.4 Controlador de temperatura TM4

| Características | Tm4 | Ch402 |
|------------------------------|----------|----------|
| Numero de Canales de Entrada | 4 ch | 1 ch |
| Salida de Control | 5- 30 VC | 5- 30 VC |
| Corriente de salida | 3A | 2A |
| Comunicación RS485 | Si | No |

Tabla comparativa de controladores de temperatura. Realizado por: Cristian Aña

Este controlador cuenta con cuatro salidas y cuatro entradas para señales de temperatura, cada una con su propio PID configurable de manera individual. La configuración de los parámetros del PID se realiza directamente desde la pantalla HMI. Esta solución permitió optimizar el sistema, reduciendo el número de controladores necesarios para gestionar las 51 zonas de temperatura a solo 13 unidades. Figura 3.2.4

Figura 3.2.4 Comparación de módulo CH402 y Modulo TM4



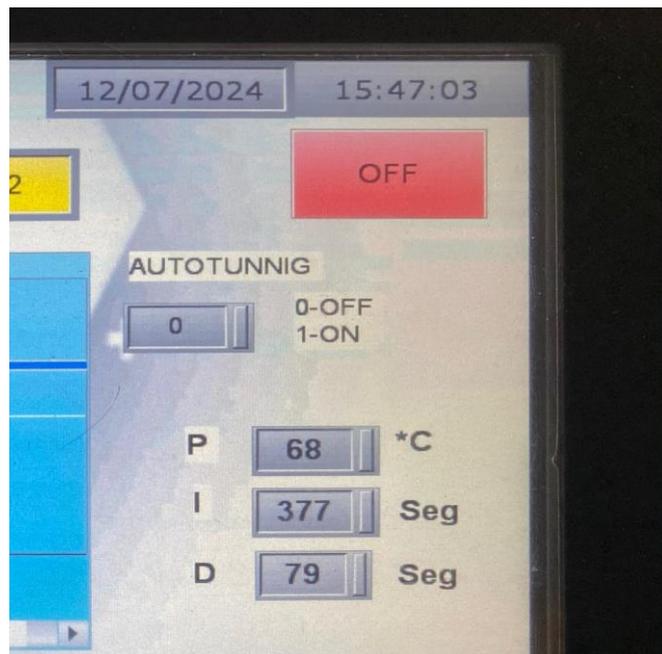
Vista general de comparación de módulos de Temperatura. Fuente (Autonic, 2024)

3.3 Selección del tipo de Control de Temperatura

3.3.1 Configuración del PID

Para el tipo de control, se seleccionó un sistema de lazo cerrado basado en control PID con configuración automática. Este sistema fue implementado a través de la pantalla HMI y el módulo TM4, utilizando el protocolo de comunicación Modbus. Se desarrolló una interfaz que permite al personal de mantenimiento ajustar el PID de manera automática al simplemente colocar un "1" y activar la función de autoajuste (autotuning). Figura 3.3.1

Figura 3.3.1.1 Configuración PID automático mediante interface HMI

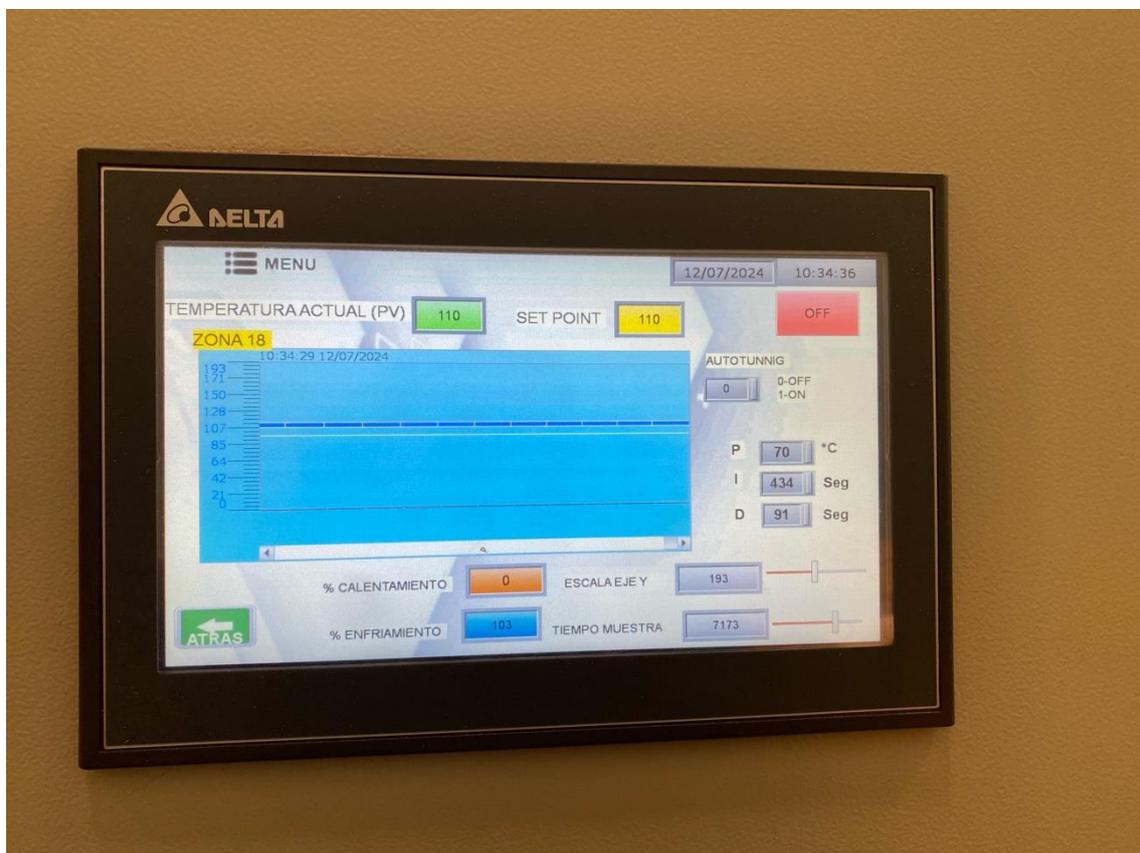


Además, la pantalla incluye la posibilidad de modificar manualmente los parámetros del PID. Esta interfaz fue diseñada para gestionar las 18 zonas del sistema, mostrando el *set point* y la temperatura actual de cada una. También permite visualizar el tiempo que el sistema requiere para estabilizarse, optimizando así el proceso de supervisión y ajuste del control.

Para la configuración manual de los valores PID, el controlador ofrece las siguientes opciones: el valor proporcional se expresa en grados centígrados, con un rango máximo de 50°C, mientras que los valores integral y derivativo se configuran en segundos, estableciendo un rango de trabajo seguro de 0 a 2000 segundos (ver Figura 3.3.1.2).

Además, se configuraron las 18 zonas de calentamiento, ajustando los valores PID y obteniendo la siguiente tabla 3.3.1

Figura 3.3.1.2 Interface de configuración PID automático



Vista general de interface HMI de PID automático. Realizado por: Cristian Aiña

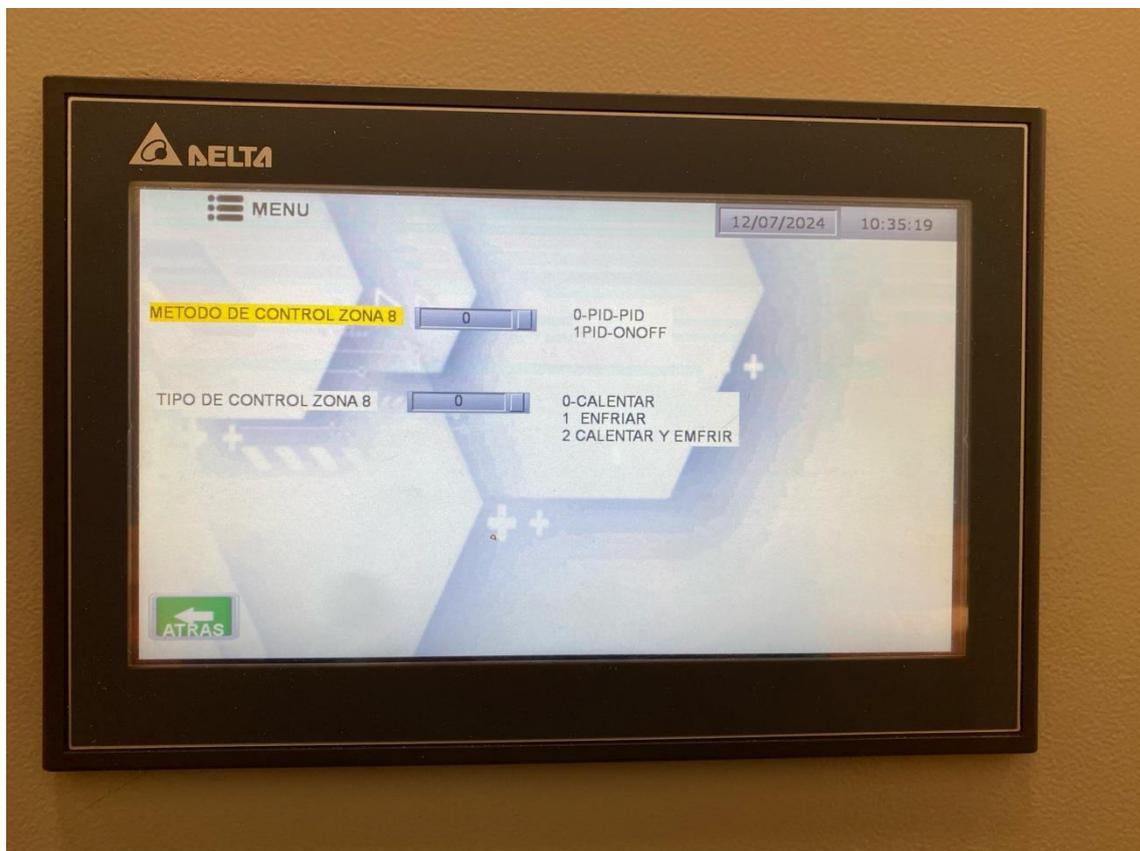
3.3.2 Método de control

Se configuraron dos métodos de control uno para gestionar exclusivamente las zonas de calentamiento y otro método combinado que permite calentar y enfriar simultáneamente. Este último es especialmente útil cuando el sistema opera con extrusoras o requiere un

enfriamiento rápido de las resistencias. Para lograrlo, se inyecta agua fría a través de tuberías, acelerando el proceso de enfriamiento en las extrusoras.

En la interfaz de la pantalla HMI, el usuario puede seleccionar el modo deseado, eligiendo entre calentar únicamente o aplicar el control combinado de calentamiento y enfriamiento, según las necesidades operativas del sistema. Figura 3.3.2

Figura 3.3.2 Interface de configuración Método de Control



Vista general de Interface HMI selección de métodos de control para hornos de termoformado. Realizado por: Cristian Aiña

3.4 Pantalla HMI

Se implementaron tres interfaces principales: una destinada a la visualización de las temperaturas, otra para presentar el ajuste de la **configuración del PID** y el tipo de

control (MTT), y una última diseñada para la gestión y monitoreo de alarmas. Estas interfaces se detallan en la Figura 3.4

Figura 3.4 Interface general de pantalla HMI



Vista general de interface general de pantalla HMI de para máquinas de termoformado.

Realizado por: Cristian Aña

3.4.1 Interfaz de Usuario para el control de zonas

Se desarrolló una interfaz en la HMI diseñada para gestionar la temperatura de cada zona de manera individual. Esta interfaz permite visualizar la temperatura actual, ajustar el valor deseado (set point) y activar o desactivar cada zona según sea necesario. La activación o desactivación de cada zona se realiza enviando una señal directa al SSR correspondiente. Figura 3.4.1

Figura 3.4.1 Interface de usuario para el control de temperaturas



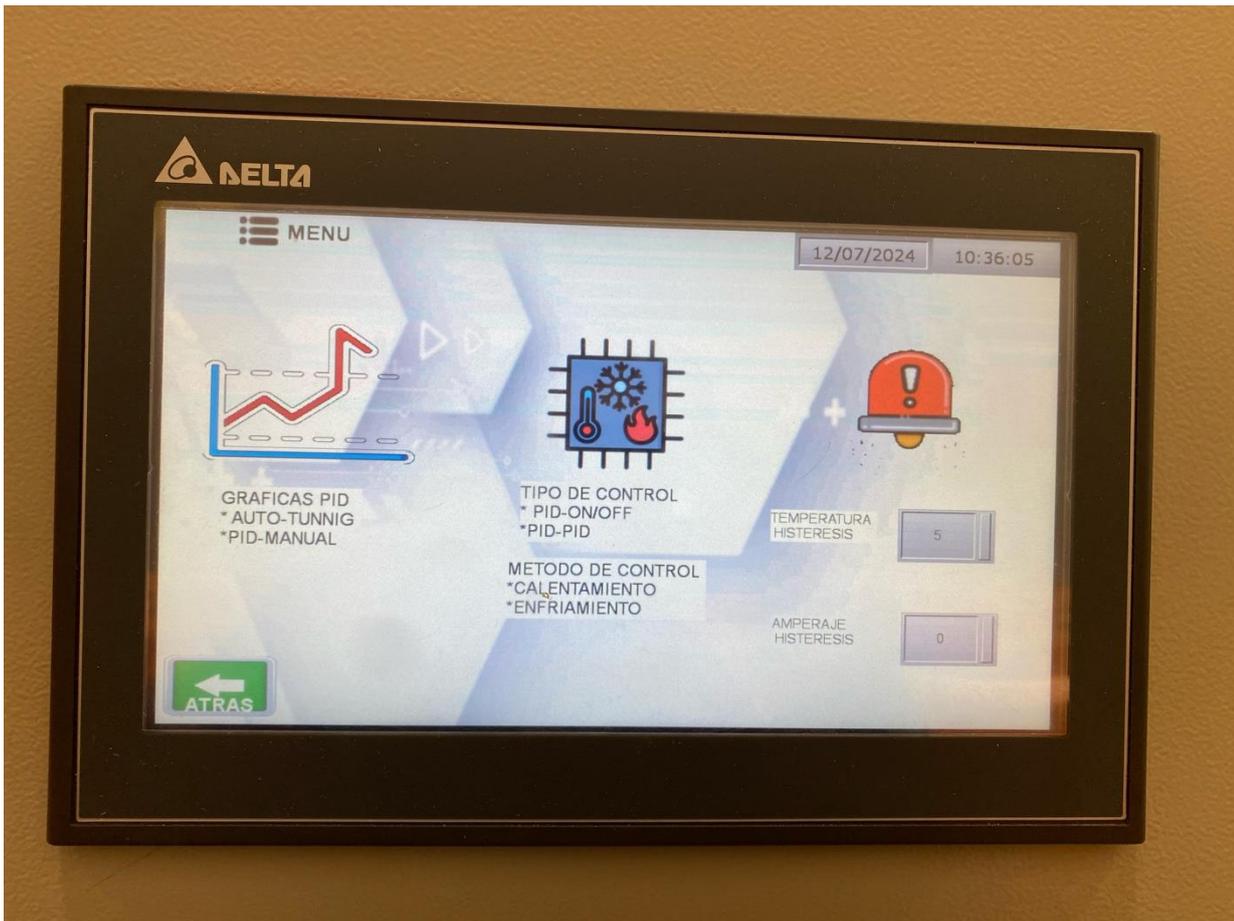
Vista general de interface de zonas de calentamiento de máquinas de termoformado.

Realizado por: Cristian Aiña

3.4.2 Interfaz de control y configuración PID

En esta pantalla, es posible modificar los parámetros del módulo TM4 y visualizar gráficas en tiempo real de las temperaturas y la corriente de los variadores. Esto permite monitorear el comportamiento de la máquina durante su operación en línea. Adicionalmente, el sistema ofrece la opción de ajustar el rango de variación de temperatura en ± 5 grados centígrados, según los requerimientos operativos. Figura 3.4.2

Figura 3.4.2 Interface de control y configuración PID

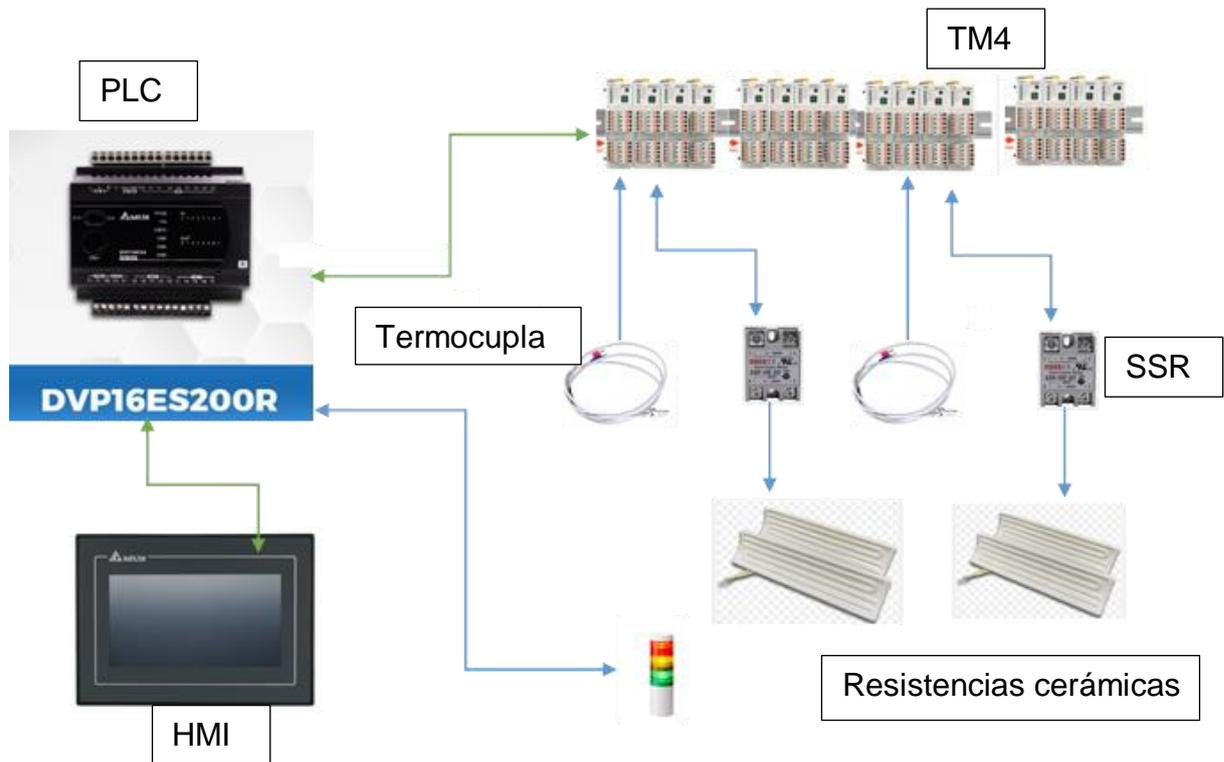


Vista general de interface de control y configuración PID de máquinas de termoformado. Realizado por: Cristian Aña

3.5 Implementación Comunicación TM4- HMI-PLC

La comunicación se implementó siguiendo el diagrama mostrado en la Figura 3.5. En este esquema, la pantalla HMI se conecta a los módulos TM4 mediante RS485, asignando una dirección única a cada módulo para evitar conflictos al enviar y recibir datos, como es característico en este tipo de comunicación. Este enfoque, común en máquinas extrusoras, permite también configurar las direcciones de los variadores. Por otro lado, la HMI se conecta al PLC utilizando un cable de comunicación RS232, lo que facilita el manejo de las entradas y salidas del PLC.

Figura 3.5 Topología de comunicación, procesamiento y comportamiento del sistema



Topología de comunicación del sistema. Realizado por: Cristian Aña

3.6 Control de alarmas y control de acceso

3.6.1 Implementación de Baliza led

Se implementó una baliza LED de colores rojo, amarillo y verde, conectada al PLC, que facilita la identificación visual del estado de la máquina. Esta baliza, instalada en la parte superior del tablero de potencia, como se muestra en la figura 3.6.1, es configurable mediante programación. Esto permite integrar diferentes alarmas y, a través de la pantalla

HMI, se especifica qué dispositivo presenta fallas. Esta información se visualiza en la interfaz de alarmas, mejorando la eficiencia y claridad en la supervisión del sistema.

Figura 3.6.1 Ubicación de la baliza led



Vista general de la baliza led de control de alarmas. Realizado por: Cristian Aiña

3.6.2 Alarmas de puertas de seguridad

Se implementaron sensores fotoeléctricos de distancia instalados en las puertas, los cuales evitan que el operador las abra mientras la máquina está en funcionamiento. En caso de que alguna puerta sea abierta, la máquina se detiene automáticamente, como se ilustra en la figura 3.6.2.

Figura 3.6.2 Sensores fotoeléctricos colocados en las puertas



Vista general de los sensores fotoeléctricos en las puertas. Realizado por: Cristian Aiña

Se desarrolló una interfaz automática de alarmas que se activa cuando una puerta es abierta. Esta interfaz aparece en la pantalla, indicando específicamente qué puerta fue abierta y solicitando al operador que la cierre. Si el operador no actúa, el sistema detiene la máquina de forma automática, obligando a cerrar la puerta para reanudar el funcionamiento, como se muestra en la figura 3.6.2.1

Figura 3.6.2.1 Interface HMI de puertas de seguridad



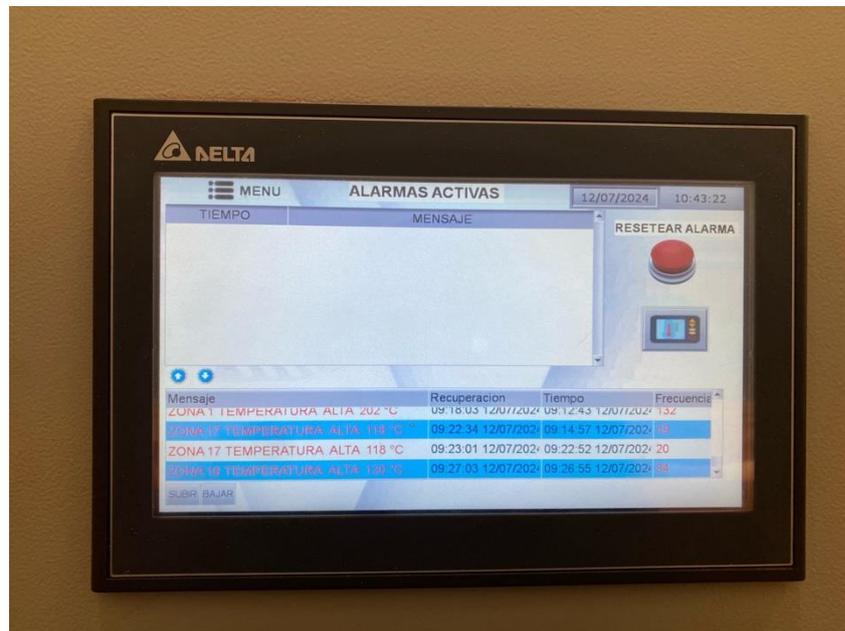
Vista general de la interface de los sensores fotoeléctricos de máquinas termoformadoras. Realizado por: Cristian Aiña

3.6.3 Alarmas de temperatura

Se utilizó la baliza instalada en el tablero para indicar al operador el estado de las temperaturas. Si la luz está en verde, las temperaturas están estables dentro del rango configurable, el cual se estableció en 5 grados centígrados. En caso de un desvío significativo, el sistema muestra una alarma en la pantalla: **“Temperatura alta”** si el valor es muy elevado, o **“Temperatura baja”** si es inferior al rango. Además, se registra el tiempo transcurrido durante la anomalía y el momento en que fue resuelta, ayudando al operador a localizar rápidamente la zona afectada y facilitando al personal de mantenimiento la solución eficiente del problema, como se muestra en la figura 3.6.3

Adicionalmente, se incorporó un botón de reinicio de alarmas que debe activarse una vez que todo esté en condiciones normales, restableciendo el sistema y cambiando la baliza nuevamente a verde.

Figura 3.6.3 Interface HMI de alarmas activas e históricos para el control de temperaturas



Vista general de la interface de alarmas activas de máquinas de termoformado.

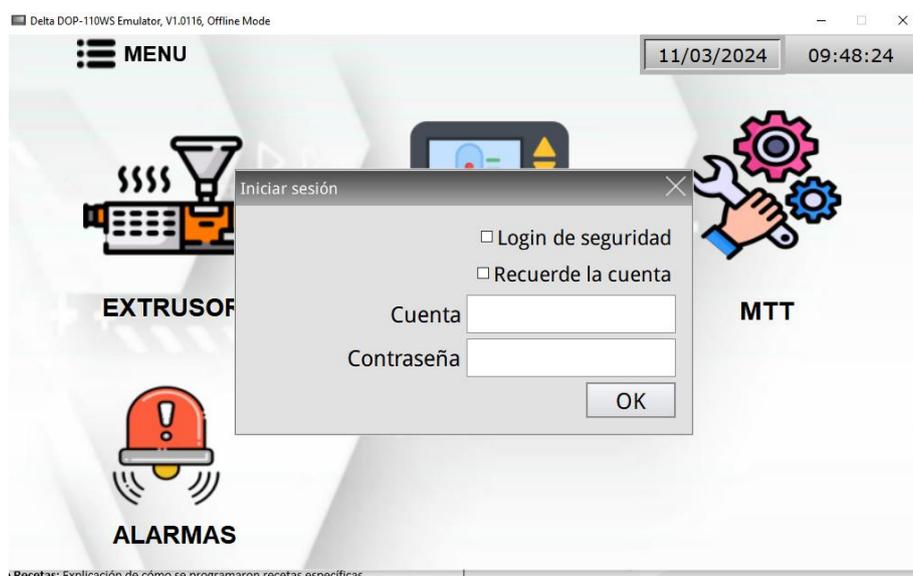
Realizado por: Cristian Aña

Se cuenta con un historial de alarmas que permite registrar y visualizar las incidencias ocurridas durante el funcionamiento de la máquina, proporcionando una herramienta útil para el análisis y seguimiento de eventos.

3.6.4 Seguridad y control de acceso en HMI

Se implementó una pantalla exclusiva para el personal de mantenimiento, accesible mediante usuario y contraseña, para asegurar que solo el personal autorizado pueda modificar los valores de PID y los parámetros de alarma en las distintas zonas de temperatura. Como se muestra en la figura 3.6.4

Figura 3.6.4 Interface de acceso para la configuración PID



Vista general de la interface de control de acceso de máquinas de termoformado.

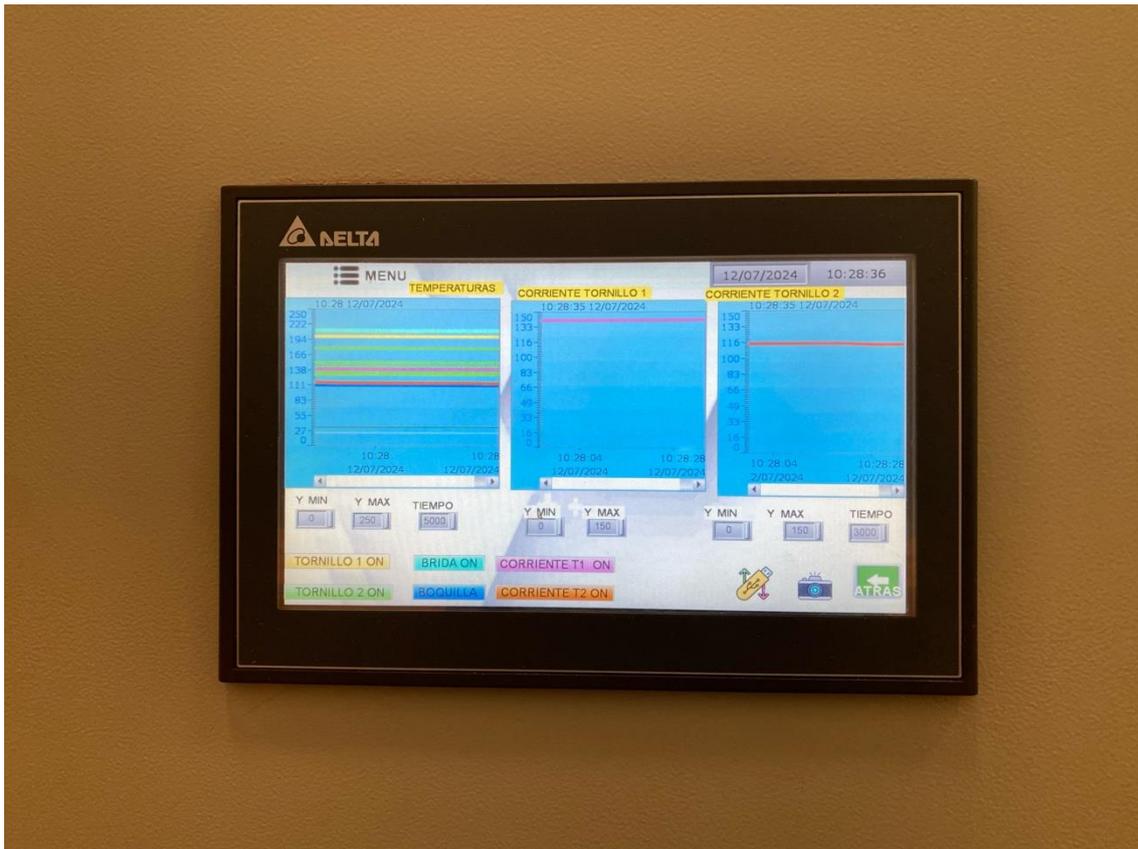
Realizado por: Cristian Aña

3.7 Monitoreo y registro de datos

3.7.1 Registro de temperatura

Se desarrolló una interfaz para monitorear las zonas de temperatura mediante una gráfica de tiempo vs. temperatura, con un intervalo de muestreo configurable. Al activar esta gráfica, los datos se almacenan en una tarjeta SD de 32 GB incorporada en la pantalla HMI. Además, la interfaz incluye un ícono para capturar imágenes y otro para la extracción segura de los datos. Figura 3.7.1

Figura 3.7.1 Interface de monitoreo de zonas de calentamiento



Vista general de la Interface de monitoreo de zonas de calentamiento. Realizado por:
Cristian Aiña

Se realizó la extracción de datos de las zonas de temperatura en formato CSV, lo que permite analizarlos de manera más eficiente en Excel. Además, se implementó un botón de captura de pantalla en el sistema, que permite al operador guardar información crítica o eventos inusuales que requieran registro, como se muestra en la figura 3.7.1

4 CAPITULO 4.

RESULTADOS

4.1 Pruebas realizadas

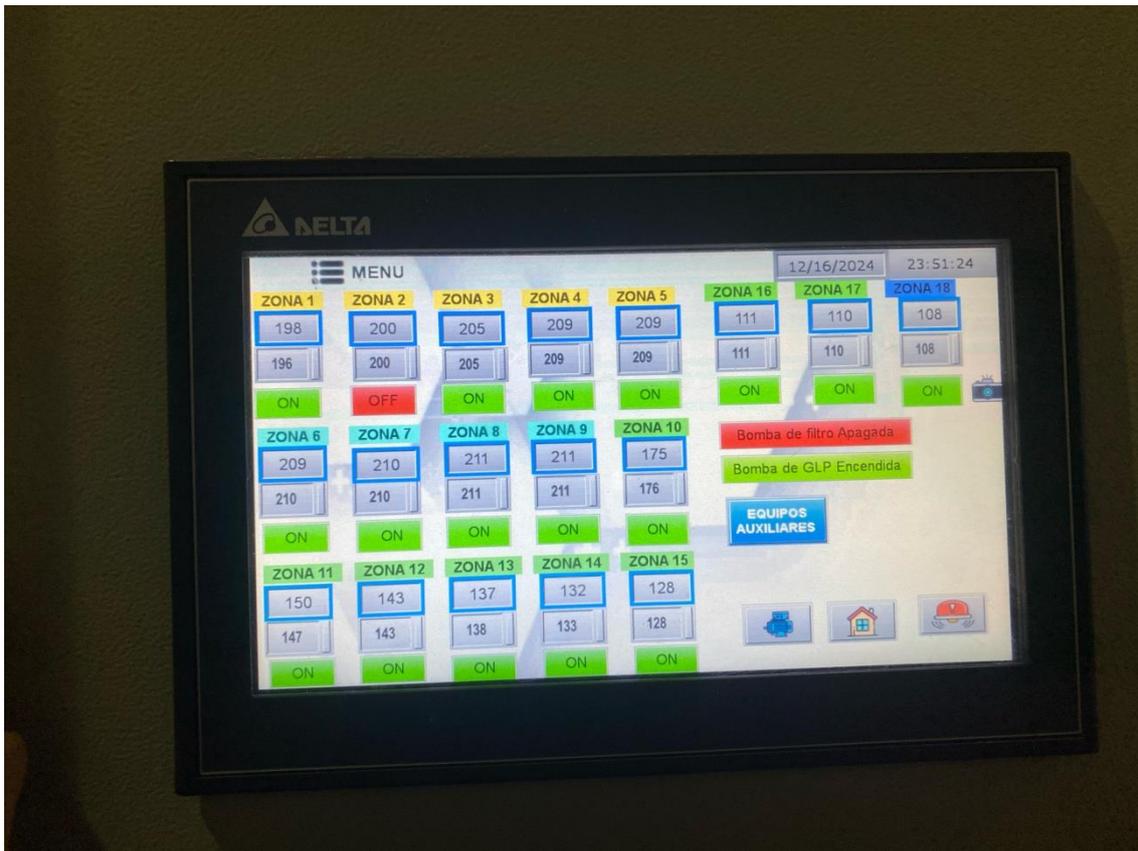
En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas en el sistema de control de temperatura de los hornos de calentamiento de las máquinas termoformadoras. El objetivo es analizar el comportamiento de la máquina bajo diversas condiciones operativas y evaluar la efectividad de los controles implementados en el sistema

4.2 Pruebas Realizadas y Resultados Obtenidos

4.2.1 Pruebas control de zonas de calentamiento ON/OFF

Se llevaron a cabo pruebas de funcionamiento del control de las zonas de calentamiento, activando los SSR (Relés de Estado Sólido) desde la interfaz HMI. Como se observa en la figura 4.2.1, el botón indica que está **desactivado** al mostrarse en color rojo con la etiqueta "OFF", y **activado** al cambiar a color verde con la etiqueta "ON".

Figura 4.2.1 Prueba de funcionamiento ON/OFF de zonas de calentamiento

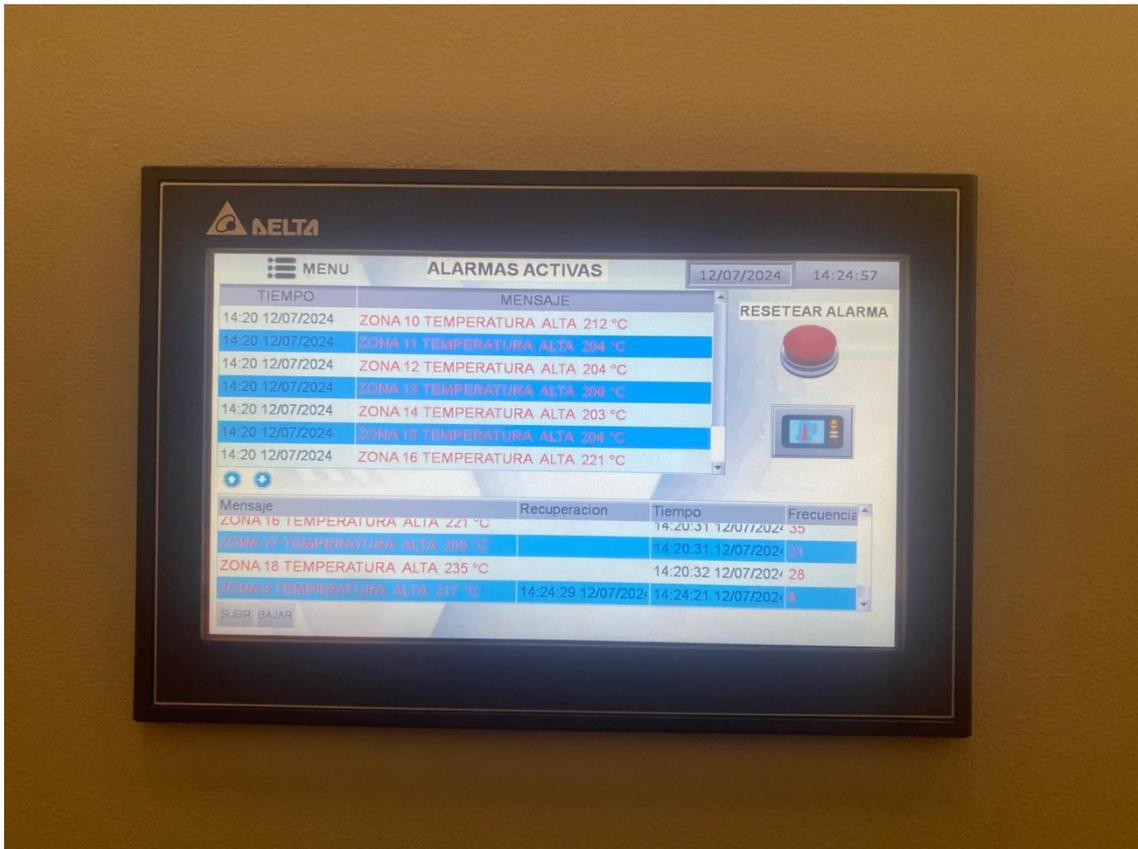


Vista general de la Interface de zonas de calentamiento Realizado por: Cristian Aña

4.2.2 Alarmas y control de temperatura de zonas de calentamiento

Como se puede observar en la Figura 4.2.2, al activarse la interfaz de alarmas, se muestra el número de zonas que presentan problemas, ya sea por alta o baja temperatura. En este caso, se trata de una alarma por alta temperatura. Además, se puede ver el tiempo en el que ocurrió la alarma y cuándo fue solucionada, junto con la frecuencia de los eventos. La interfaz cuenta con un botón de reseteo de alarma, que permite al operador restablecer la alarma y devolverla a su estado normal.

Figura 4.2.2 Interface de Alarmas de Zonas de Temperaturas



Vista general de la Interface de activación de alarmas de máquinas de termoformado

Realizado por: Cristian Aiña

Como se muestra en la figura 4.2.2.1, la baliza se activa en colores amarillo y rojo cuando la temperatura está fuera del rango permitido. Una vez que la temperatura se encuentra dentro del rango de ± 5 grados centígrados, la baliza vuelve a mostrar el color verde.

Figura 4.2.2.1 Activación de baliza led en color rojo



Vista general de activación de baliza led en estado rojo por alta temperatura en zona de calentamiento. Realizado por: Cristian Aiña

4.2.3 Pruebas de configuración de PID Automático

En la Figura 4.2.3, podemos observar un módulo CH402 que controla una zona de calentamiento, donde la temperatura actual es de 225°C, mientras que el set point está fijado en 193°C. Esta diferencia genera una variación considerable en el control de la máquina. En cambio, en la Figura 4.2.3 se muestra un sistema PID automático mediante el modulo TM4, el cual mantiene la temperatura tanto en el valor de set point como en el valor actual, lo que resulta en un control más preciso y estable frente a las variaciones externas.

Figura 4.2.3 Control de temperatura mediante modulo CH402



Vista general Modulo CH402 en funcionamiento. Realizado por: Cristian Aiña

Figura 4.2.3.1 Control de temperatura mediante módulo TM4



Vista general Modulo TM4 en funcionamiento. Realizado por: Cristian Aiña

4.3 Resultados Específicos del PID Automático

Se analizaron 3,145 datos de temperatura registrados entre las 11:00 a. m. y las 5:00 p. m., con el objetivo de calcular el error relativo y promedio, se tomarán como ejemplo las zonas más inestables, ya que están expuestas a variaciones y perturbaciones de la temperatura exterior. El análisis se realizará en las zonas 1 a 5. y los resultados se presentan en la siguiente tabla 4.3. Este análisis se realizó con el apoyo de la interfaz HMI, que almacenó toda la información en una tarjeta MicroSD. Como se muestra en la figura 4.3, se presenta una captura de pantalla donde el valor actual está resaltado con un marco azul en la parte superior, mientras que el valor deseado se encuentra en la parte inferior.

Figura 4.3. interface de Zonas de Temperatura



Vista general de interface de Zonas de Temperaturas de máquinas de termoformado.

Realizado por: Cristian Aña

4.3.1 Cálculo del error relativo zona 1

Para el cálculo del error relativo, se utilizaron los datos obtenidos de la microSD. Al realizar la prueba del error relativo en la zona 1, entre las 11:00 a.m. y las 5:00 p.m. del 12/13/2024, se observó que durante este período no hubo variaciones significativas, salvo dos fluctuaciones registradas. De los **3,145 datos** analizados, estos cambios fueron mínimos, como se muestra en la tabla 4.3.1 y los siguientes cálculos.

$$Error\ Relativo\ (\%) = \frac{|SP - PV|}{SP} \times 100$$

$$Error\ Relativo\ Zona\ 1(\%) = \frac{|196 - 195|}{196} \times 100$$

$$Error\ Relativo\ Zona\ 1(\%) = 0.510$$

$$Error\ Relativo\ (\%) = \frac{|SP - PV|}{SP} \times 100$$

$$Error\ Relativo\ Zona\ 1(\%) = \frac{|196 - 195|}{196} \times 100$$

$$Error\ Relativo\ Zona\ 1(\%) = 0.510$$

Tabla 4.3.1 Error relativo zona 1

| Zona # | Zona Temperatura actual (PV) | Zona Set Point (SP) | Zona Temperatura actual (PV) | Número de veces que se repite |
|--------|------------------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Zona 1 | 195 | 196 | 0.510 | 1592 |
| Zona 1 | 196 | 198 | 1.020 | 571 |

Tabla de zona 1 de temperaturas de hornos de termoformado. Realizado por: Cristian
Aña

Utilizando esta fórmula, se obtuvo la Tabla 4.3.1, que muestra el cálculo del error relativo en las zonas 1 a 5.

Tabla 4.3.1 Error Relativo de Zonas 1-5 de temperatura

| Zona # | Zona Temperatura actual (PV) | Zona Set Point (SP) | Error Relativo (%) |
|--------|------------------------------|---------------------|--------------------|
| Zona 1 | 195 | 196 | 0.510 |
| Zona 2 | 200 | 200 | 0 |
| Zona 3 | 205 | 205 | 0 |
| Zona 4 | 209 | 209 | 0 |
| Zona 5 | 210 | 210 | 0 |

Tabla de zonas 1-5 Error relativo. Realizado por: Cristian Aña

4.3.2 Cálculo del error promedio de la zona 1

Para el cálculo del error promedio, se obtuvieron los siguientes resultados utilizando la fórmula correspondiente. A continuación, se muestra un ejemplo del cálculo aplicado a la zona 1.

$$\text{Error Relativo Promedio (\%)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{Error Relativo \%}$$

$$\text{Error Relativo Promedio (\%)} = \frac{1592 * (0.510) + 571 * (1.020)}{3145}$$

$$\text{Error Relativo Promedio (\%)} = 0.44$$

A continuación, se presenta la tabla 4.3.2, que muestra el valor del error relativo promedio en las zonas 1 a 5.

Tabla 4.3.2 Error Relativo Promedio de Zonas de temperatura

| Zonas | Error relativo Promedio (%) |
|--------|-----------------------------|
| Zona 1 | 0.44 |
| Zona 2 | 0 |
| Zona 3 | 0.09 |
| Zona 4 | 0.05 |
| Zona 5 | 0.01 |

Tabla de zonas 1-5 Error relativo Promedio. Realizado por: Cristian Aiña

4.3.3 Análisis de Error Promedio (%)

Zona 1 (0.44%):

Este valor es el más alto entre las zonas, pero sigue siendo bajo en términos absolutos. Representa una desviación promedio de menos del 0.5% del setpoint.

Es válido investigar si esta zona enfrenta condiciones particulares, como mayor carga térmica, fluctuaciones externas o diferencias en el diseño del sistema, que podrían explicar el error.

Zona 2 (0%):

Este desempeño indica que el sistema PID está funcionando perfectamente en esta zona, logrando mantener la temperatura exactamente en el setpoint sin desviaciones detectables.

Zona 3 (0.09%):

Este es un error promedio muy bajo, lo que demuestra que el ajuste PID es eficiente y que las desviaciones son mínimas, con un excelente control de la temperatura.

Zona 4 (0.05%) y Zona 5 (0.01%):

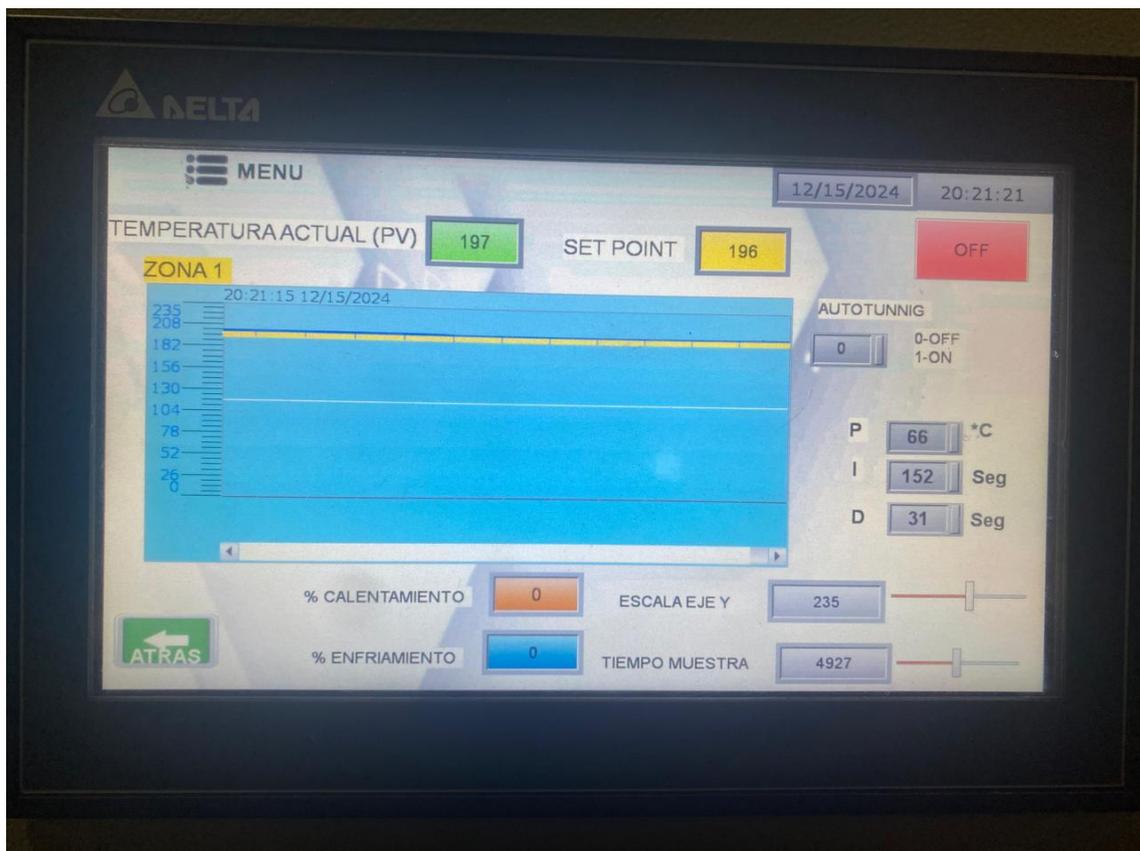
Estos valores reflejan un control excepcionalmente preciso, con desviaciones insignificantes en relación al setpoint.

Esto probablemente se debe a un diseño bien optimizado del sistema y una calibración efectiva de los parámetros PID.

4.3.4 Configuración de los parámetros PID por el método de Automático

Estos valores fueron configurados en la pantalla HMI en la interface de configuración de PID para su posterior análisis. En la tabla 4.3.4 se presentan los valores obtenidos tras la ejecución del ajuste automático del PID en las zonas 1-5. Los resultados de las demás zonas se encuentran en el Anexo A. y en la figura 4.3.4 tenemos los resultados de la zona 1 una vez finalizado el PID automático

Figura 4.3.4 Prueba de configuración de Parámetros de PID zona 1



Vista general de interface de Parámetros de configuración de PID de máquinas de termoformado. Realizado por: Cristian Aiña

Tabla 4.3.4 Configuración de parámetros PID

| Zonas | P C | I seg | D seg |
|--------|--------|----------|----------|
| Zona 1 | 66 | 152 | 31 |
| Zona 2 | 107 | 480 | 101 |
| Zona 3 | 150 | 594 | 126 |
| Zona 4 | 150 | 594 | 126 |
| Zona 5 | 183 | 787 | 171 |

Tabla de zonas 1-5 configuración de parámetros de PID automático de hornos de termoformado. Realizado por: Cristian Aña

4.3.5 Análisis de la configuración del PID de forma automática de las zonas 1-5

P (Proporcional): A medida que el valor de P aumenta de la Zona 1 a la Zona 5, el sistema responde con mayor agresividad a las variaciones de temperatura, lo que es adecuado en zonas con cambios térmicos rápidos.

I (Integral): A medida que el valor de I aumenta, el sistema se enfoca más en corregir errores acumulados, lo que es útil para eliminar desviaciones persistentes, pero podría ser riesgoso si el valor es demasiado alto y causa oscilaciones o inestabilidad.

D (Derivativo): El valor de D aumenta a medida que avanzamos de la Zona 1 a la Zona 5, lo que indica un énfasis creciente en minimizar las oscilaciones y responder rápidamente a los cambios en la tasa de temperatura. Este enfoque es apropiado en zonas donde los cambios térmicos son rápidos o impredecibles.

4.3.6 Cálculo del porcentaje de número de aciertos del sistema PID de las zonas 1-5

Para realizar este cálculo, tomamos como ejemplo la zona 1, en la cual se obtuvieron 2,574 aciertos de un total de 3,145 datos. Considerando un rango de ± 1 grado centígrado, si la temperatura medida se encuentra dentro de 1 grado por encima o por debajo del valor deseado, se considera un acierto.

$$\text{Porcentaje de aciertos zona 1} = \frac{\text{Numero de aciertos}}{\text{Total de mediciones}} \times 100$$

$$\text{Porcentaje de aciertos zona 1} = \frac{2574}{3145} \times 100$$

$$\text{Porcentaje de aciertos zona 1} = 81.84$$

Tabla 4.3.6 Porcentaje de aciertos de Zonas de temperatura

| Zonas | Numero de aciertos | Total, mediciones | Porcentaje de aciertos % |
|--------|--------------------|-------------------|--------------------------|
| Zona 1 | 2574 | 3145 | 81.84 |
| Zona 2 | 3145 | 3145 | 100 |
| Zona 3 | 3145 | 3145 | 100 |
| Zona 4 | 3145 | 3145 | 100 |
| Zona 5 | 3145 | 3145 | 100 |

Tabla de zonas 1-5 porcentaje de aciertos de hornos de termoformado. Realizado por:

Cristian Aña

4.3.7 Análisis del porcentaje de número de aciertos del sistema PID de las zonas 1-5

Rendimiento general: La mayoría de las zonas (Zona 2, 3, 4, y 5) presentan un rendimiento óptimo, con un 100% de aciertos. Esto sugiere que el sistema de control PID

ha sido eficaz en la mayoría de las zonas, con parámetros bien calibrados y un control de temperatura preciso.

Oportunidad de mejora: La **Zona 1**, con un 81.84% de aciertos, muestra una ligera desviación en el rendimiento. Este resultado sugiere que podría haber factores que afecten el control en esa zona, como variaciones térmicas o un ajuste subóptimo del PID. Se recomienda revisar las condiciones específicas de esta zona para mejorar la precisión del sistema.

5 CONCLUSIONES

Implementación de un sistema funcional y estable:

Se logró desarrollar e implementar un sistema de control de temperatura que mantiene las temperaturas dentro de un rango de ± 5 °C, lo que ha mejorado significativamente los tiempos de producción y reducido los tiempos de mantenimiento. Esto confirma la efectividad del sistema en alcanzar los objetivos planteados.

Configuración precisa del PID:

La interfaz HMI desarrollada permite al operador ajustar los parámetros del controlador PID de manera intuitiva, optimizando el desempeño del sistema según las necesidades de producción y manteniendo condiciones estables.

Selección de Componentes Adecuados:

La elección de componentes como el PLC Delta, la pantalla HMI Delta, los controladores de temperatura TM4, los termopares tipo K y los SSR refleja un enfoque estratégico en la eficiencia y reducción de costos, mientras se asegura la interoperabilidad entre los sistemas y la facilidad de implementación.

Control PID como Estrategia Clave:

El sistema de control de temperatura con **PID automático** ha demostrado ser altamente efectivo para mantener temperaturas estables, reduciendo errores de hasta un 0.5% en las zonas más críticas. Esta elección fue fundamental para optimizar el desempeño térmico y garantizar la calidad del material termoformado.

Implementación Satisfactoria:

El sistema implementado ha cumplido con los objetivos propuestos al mantener las temperaturas de las zonas dentro de los rangos óptimos. La calibración del PID automático ha mostrado ser adecuada para responder a las variaciones térmicas, contribuyendo al éxito del proceso de termoformado.

Respuesta eficiente a eventos críticos:

Las alarmas visuales integradas en la HMI, junto con alarmas externas, mejoran la capacidad de respuesta del operador ante situaciones críticas, lo que contribuye a una toma de decisiones más oportuna y acertada. Se verificó que las alarmas no presentan errores de programación, alcanzando un 100 % de efectividad en su funcionamiento.

Escalabilidad del sistema:

La arquitectura del sistema permite su extensión a otras máquinas de la línea de producción. Esto se evidenció en la incorporación del sistema a una máquina extrusora, adaptando la misma programación del PLC y los módulos TM4 para manejar tanto el calentamiento como el enfriamiento. Esta flexibilidad demuestra que el diseño es versátil y puede ajustarse a diferentes aplicaciones.

Monitoreo continuo y mejora en la producción:

Gracias al PLC, es posible registrar continuamente las variaciones de temperatura durante las 24 horas de operación de la fábrica. Las pruebas de campo confirmaron que el sistema opera de manera eficiente bajo estas condiciones, lo que contribuyó al incremento de los tiempos efectivos de producción.

6 RECOMENDACIONES

Monitoreo y análisis de datos:

Implementar herramientas adicionales para analizar los datos recolectados por el PLC y el sistema HMI, a fin de identificar tendencias o fallos recurrentes y establecer acciones preventivas.

Evaluación periódica del desempeño:

Realizar auditorías periódicas del sistema, tanto en software como en hardware, para garantizar su funcionalidad y detectar áreas de mejora en términos de eficiencia energética y productividad.

Implementación de un Plan de Mantenimiento Preventivo y Correctivo

Diseñar e implementar un plan de mantenimiento preventivo y correctivo para el sistema de control, con el fin de minimizar los posibles daños a la máquina y evitar paros no programados. Este plan debe incluir inspecciones regulares, ajustes y reemplazos de componentes críticos, así como la pronta intervención ante fallas, asegurando así el funcionamiento continuo y eficiente de la maquinaria.

7 BIBLIOGRAFÍA.

Contreras Herrera, J. (2020). *Implementación de un control PID para la puesta a punto de una máquina termoformadora por vacío, de una sola estación.*

Alex, Z. (2020). *Desarrollo de un controlador de temperatura en lazo cerrado para los hornos rotativos de la empresa Frigomacz Cía. Ltda.* Quito: Universidad Politécnica Salesiana.

Arrieta Arvilla, R. (2019). *Tutorial básico para programación de PLC.* Recuperado de <https://www.mecanumeric.es/3-5/tecnologias/termoformado/>

Bernal, J. C. (2015). *Ingeniería del diseño.* Recuperado de <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6837/05Jcb05de16.pdf>

Copadata. (2018). *¿Qué es una HMI?* Recuperado de <https://www.copadata.com/es/productos/zenon-software-platform/visualizacion-control/que-significa-hmi-interfaz-humano-máquina-copa-data/>

Cortés Llanganate, J. (2019). *Diseño de un sistema de control de temperatura para los hornos de termoformado de la máquina de láminas P7 de Techoluz en Tubasec C.A.* Quito: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

David, G. (2021). *Desarrollo de una solución de control sobre PLCs integrando regulación de temperatura en un horno y automatización de la logística interna del producto: Demostración en un prototipo de planta a escala.* Valencia: Universitat Politècnica de València.

Flux ingenieros. (2020, 15 de enero). Recuperado de <https://fluxingenieros.es/categoria-producto/relés-controladores-potencia/>

Gomar, J. (2018). *¿Qué es un PLC?* Recuperado de <https://industriassgl.com/blogs/automatizacion/que-es-un-plc-y-como-funciona>

Mandado, E. (2009). *Autómatas programables y sistemas de automatización.*

Martínez, J. (2019, 19 de marzo). *Resistencias industriales: tipo de material a calentar*. Recuperado de <https://juliomartineznaya.com/resistencias-industriales-tipo-de-material-a-calentar/#:~:text=Cuando%20hablamos%20de%20resistencias%20el%C3%A9ctricas,d e%20proceso%20que%20se%20realice>.

Mecanumeric. (2017). *Tecnologías de termoformado*. Recuperado de <https://www.mecanumeric.es/3-5/tecnologias/termoformado/>

Quiroga, J. (2020). *Diseño e implementación de un sistema de control para un horno de crisol*. Quito.

Ra-pack. (2018, 20 de diciembre). *Lumiber*. Recuperado de <https://www.rajapack.es/blog-es/espuma-foam-sus-usos>

Rappaport, T. S. (2015). *Wireless communications* (2ª ed.). Nueva York: Segunda Edición.

TC-SA. (2020). *Termopar tipo K*. Recuperado de <https://www.tc-sa.es/termopares/tipo-k-termopar.html>

Weis, O. (2021, 19 de octubre). *RS485 communication guide*. Recuperado de <https://www.eltima.com/es/article/rs485-communication-guide/>

8 ANEXOS.

Anexo A: Se adjuntan los datos obtenidos de las zonas 1- 18 de configuración de PID de forma automática en la siguiente tabla A.1

Tabla A.1 Configuración de parámetros PID

| Zonas | P C | I seg | D seg |
|---------|--------|----------|----------|
| Zona 1 | 66 | 152 | 31 |
| Zona 2 | 107 | 480 | 101 |
| Zona 3 | 150 | 594 | 126 |
| Zona 4 | 150 | 594 | 126 |
| Zona 5 | 183 | 787 | 171 |
| Zona 6 | 199 | 847 | 185 |
| Zona 7 | 59 | 136 | 28 |
| Zona 8 | 159 | 136 | 28 |
| Zona 9 | 232 | 696 | 150 |
| Zona 10 | 232 | 696 | 150 |
| Zona 11 | 81 | 487 | 102 |
| Zona 12 | 122 | 437 | 91 |
| Zona 13 | 86 | 362 | 75 |
| Zona 14 | 47 | 378 | 79 |
| Zona 15 | 120 | 349 | 73 |
| Zona 16 | 19 | 172 | 35 |
| Zona 17 | 68 | 377 | 79 |
| Zona 18 | 76 | 471 | 99 |

Tabla de zonas 1-18 configuración de parámetros de PID automático de hornos de termoformado. Realizado por: Cristian Aña

Anexo B: Manual de Operaciones de configuración PID

Este manual detalla el procedimiento para la configuración del PID en el sistema de control de temperatura de las zonas de calentamiento de la máquina termoformadora. Se explicarán las opciones de configuración manual y automática, así como la interfaz de usuario para el ajuste de los parámetros.

Acceso a la Interfaz de Configuración PID

En la pantalla principal, ubicar la opción **MTT** (Figura B.1).

Figura B.1 interface de menú principal



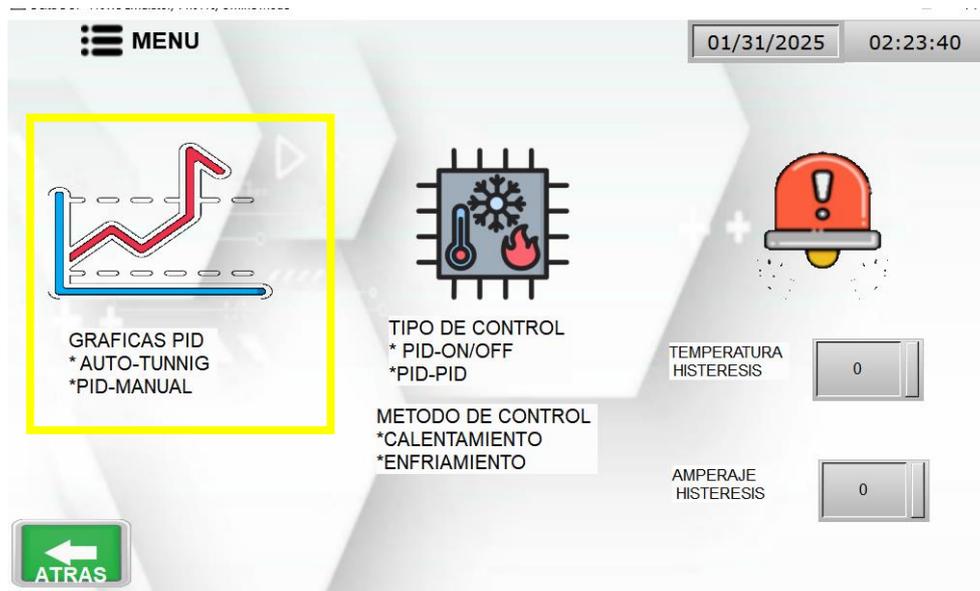
Vista general de interface del Menú Principal de máquinas de termoformado.

Realizado por: Cristian Aña

Una vez dentro de la interfaz, como se muestra en la Figura B.2, se presentan las siguientes opciones: **Gráficas PID**, **Tipo de Control** y **Alarmas**.

- Seleccionar la opción **Gráficas PID** (Figura B.2).

Figura B.2 interface de configuración PID



Vista general de interface de configuración PID de máquinas de termoformado.

Realizado por: Cristian Aña

Una vez dentro de la interfaz, como se muestra en la Figura B.3, se presentan todas las zonas de calentamiento disponibles para su configuración.

- Seleccionar la **zona específica** a configurar (ejemplo: Zona 10).

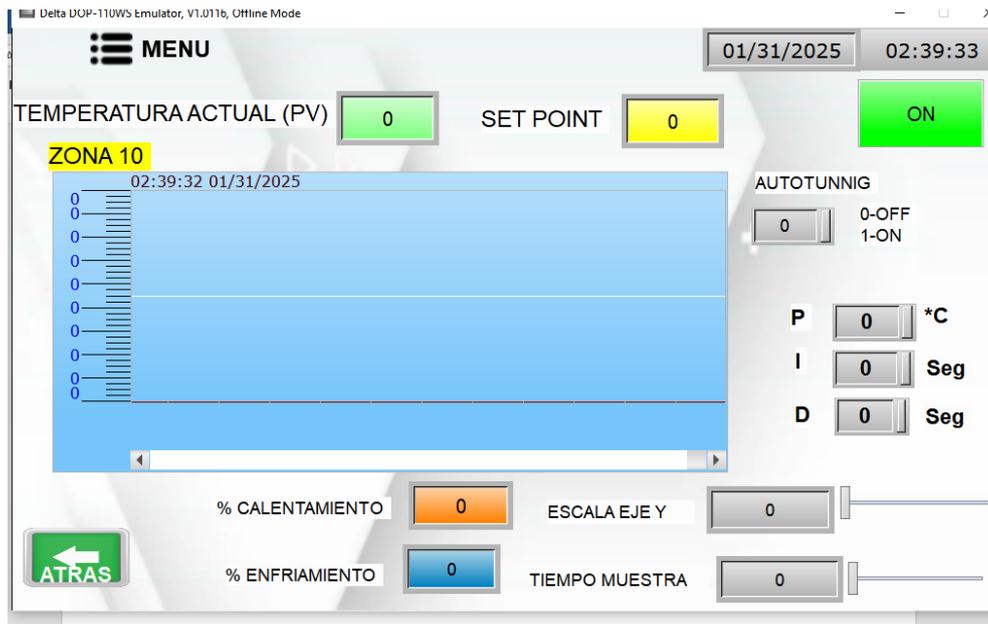
Figura B.3 interface de selección de Zonas de configuración PID



Vista general de interface de selección de zonas de configuración PID de máquinas de termoformado. Realizado por: Cristian Aña

Una vez dentro de la interfaz, como se muestra en la Figura B.4, se presenta una interfaz donde podemos configurar el PID de forma manual y automática. También se incluye una gráfica de **temperatura actual vs. set point vs. tiempo**. Adicionalmente, hay una casilla de color naranja donde podemos ver el porcentaje de calentamiento de las resistencias.

Figura B.4 interface de configuración manual o automática del PID



Vista general de interface de configuración manual o automática del PID. Realizado por: Cristian Aiña

Configuración Automática del PID

Como se muestra en la Figura B.5, se debe ingresar el valor 1 en el cuadro Autotuning. Una vez ingresado, esperamos que el sistema se calibre automáticamente. Para saber que la calibración ha finalizado, la casilla volverá a 0, y los valores de las casillas **P, I, D** se ajustarán automáticamente.

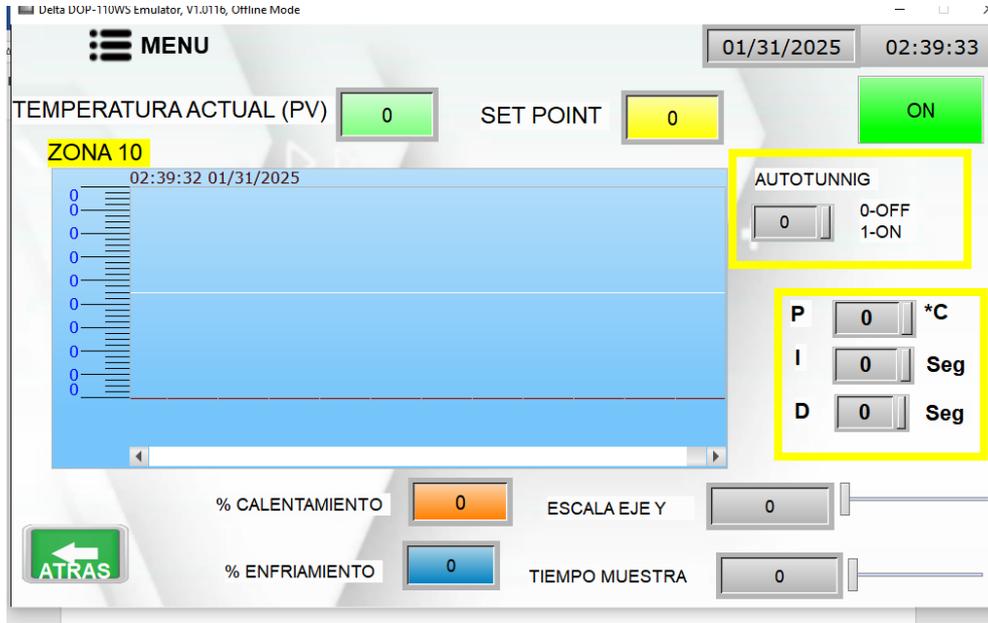
Configuración Manual del PID

Como se muestra en la Figura B.5, se deben ingresar manualmente los valores de **P, I, D**:

- **P (Proporcional)**: Unidades en temperatura (°C), con un rango máximo de **300**.
- **I (Integral) y D (Derivativo)**: Valores en **segundos**, con una configuración máxima de **2000 segundos**.

Estos parámetros deben ser cuidadosamente configurados para un funcionamiento óptimo.

Figura B.5 interface de configuración automática y manual del PID



Vista general de interface de configuración automática y manual del PID. Realizado por: Cristian Aña

Anexo C: Manual de Operaciones de Zonas de Temperatura

Este manual detalla el procedimiento para la configuración del valor **Set Point** de control de temperatura de las zonas de calentamiento de la máquina termoformadora.

Acceso a la Interfaz de Zonas de Temperaturas

- En la pantalla principal, ubicar la opción **Temperaturas** (Figura C.1).

Figura C.1 interface de menú principal



Vista general de interface de menú principal. Realizado por: Cristian Aiña

Una vez dentro de la interfaz de zonas de temperaturas, como se muestra en la Figura C.2, se presentan todas las zonas de temperatura del horno de las máquinas de termoformado.

Dentro de esta interfaz se encuentran:

- **Casillero de visualización** de la temperatura actual.
- **Casillero de entrada** para configurar la temperatura deseada (**Set Point**).
- **Botón ON/OFF** para activar o desactivar la zona de calentamiento.
- **Controles de equipos auxiliares**, como el encendido y apagado de bombas de GLP y bombas de filtro.

Figura C.2 interface de zonas de temperatura



Vista general de interface de zonas de Temperatura de máquinas de termoformado.

Realizado por: Cristian Aña