



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
INGENIERO EN ELECTRÓNICA

PROYECTO TÉCNICO:

**Diseño de un Controlador Difuso para el control de temperatura del módulo
ET200SP usando el S7-1200.**

AUTORES:

JEREMY RICARDO PEÑAFIEL GARZÓN
JAVIER SEBASTIÁN SÁNCHEZ RODRÍGUEZ

TUTOR:

Ing. TEDDY JHENNSE NEGRETE PEÑA, MSC.

GUAYAQUIL – ECUADOR

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Javier Sebastián Sánchez Rodríguez con documento de identificación N° 0941552622 y Jeremy Ricardo Peñafiel Garzón con documento de identificación N° 0930985858, manifestamos que:

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

Guayaquil, 17 de septiembre del año 2024.

Atentamente,



Javier Sebastián Sánchez Rodríguez

0941552622



Jeremy Ricardo Peñafiel Garzón

0930985858

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

Nosotros, Javier Sebastián Sánchez Rodríguez con documento de identificación N° 0941552622 y Jeremy Ricardo Peñafiel Garzón con documento de identificación N° 0930985858 , expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Diseño de un Controlador Difuso para el control de temperatura del módulo ET200SP usando el S7-1200”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Electrónica, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Guayaquil, 17 de septiembre del año 2024.

Atentamente,



Javier Sebastián Sánchez Rodríguez

0941552622



Jeremy Ricardo Peñafiel Garzón

0930985858

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, TEDDY JHENNSE NEGRETE PEÑA con documento de identificación N° 0912419611 docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UN CONTROLADOR DIFUSO PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA DEL MODULO ER2000SP USANDO EL S7-1200, realizado por Sánchez Rodríguez Javier Sebastián con documento de identificación N° 0941552622 y Peñafiel Garzón Jeremy Ricardo Paladine con documento de identificación N° 0930985858, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 17 de septiembre del año 2024.

Atentamente,



Ing. Teddy Jhennse Negrete Peña, MSC.

0912419611

DEDICATORIA

“Dedico mi trabajo en esta carrera a todos aquellos que han sido los principales pilares en mi camino para culminar esta carrera. En primer lugar, quiero agradecer a mis padres que siempre me han dado su apoyo moral desde el primer día. Gracias a su constante aliento y sacrificio, nunca dudé en dar un paso atrás. Su amor y guía han sido mi brújula en cada decisión y desafío que he enfrentado.

Gracias a mis queridos abuelos que me brindaron una valiosa oportunidad de estudiar. Tu generosidad y fe en mi potencial son regalos que llevaré conmigo para siempre. Gracias a mi tío que no sólo me introdujo en esta rama de la ingeniería, sino que también me inspiró profundamente con su compromiso y conocimiento. Gracias a él, encontré mi pasión y el camino que he seguido todos estos años, y este trabajo representa no solo mis esfuerzos personales, sino también la culminación de su amor, sacrificio y confianza en mí, gracias por estar siempre conmigo, compartir todos mis éxitos y seguir inspirándome.

Este logro es tanto suyo como mío y espero que este trabajo sea un testimonio de nuestra dedicación y unidad. Dedico este trabajo a ustedes, mis pilares, mis mentores y mi familia, con todo mi amor y gratitud. ¡Gracias por todo!

Javier Sebastián Sánchez Rodríguez.

DEDICATORIA

A mis padres, Nancy Garzón y Ricardo Peñafiel, cuyo inagotable amor incondicional ha sido el cimiento sobre el cual he construido mis sueños y logros. Su sacrificio y entrega han sido el viento que ha llenado mis velas, permitiéndome navegar por los mares de la vida académica con confianza y determinación.

Gracias por ser mi guía, mi mentor y mi amigo. Gracias por creer en mí, incluso cuando yo mismo dudaba de mis capacidades. Gracias por estar siempre a mi lado, brindándome su apoyo incondicional y su amor sin límites.

Y a Dios, cuya presencia divina ha sido el faro que ha iluminado mi camino, guiándome a través de las tormentas y los momentos de oscuridad. Gracias por su amor incondicional, por su sabiduría y por su fortaleza. Gracias por permitirme crecer y aprender, y por darme la oportunidad de cumplir mis sueños.

A ambos, les agradezco por la educación que me han brindado. Esta tesis es un tributo a su amor, dedicación y apoyo incondicional. Que sea un reflejo de su orgullo y una muestra de mi eterna gratitud. Que sea un testimonio de la fe y la confianza que han depositado en mí, y que sea un recordatorio de que, con su apoyo, puedo alcanzar cualquier meta que me proponga.

Jeremy Ricardo Peñafiel Garzón

AGRADECIMIENTO

En este momento tan importante de mi vida, me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento a todos a mis seres queridos que me han ayudado en mi camino para fortalecerme en mi finalización de la carrera. Primero, doy gracias a Dios cuya voluntad ha sido como mi guía constante y fuente mucha de fortaleza a lo largo de mi carrera universitaria.

Agradezco desde el fondo de mi corazón a mi familia, quienes son mis pilares y mi mayor apoyo. Se lo debo todo a mis padres que son Luis Sanchez y Paola Rodríguez, ellos nunca dejaron de creer en mí y me inculcaron una fuerza mental invaluable. Gracias a mis abuelos, Juana Jiménez y Leonardo Rodríguez quienes me dieron la bendición de estudiar y perseguir mis sueños con determinación. Gracias a mi tío Leonardo Rodriguez que me inspiró a elegir la ingeniería como carrera y cuyo apoyo ha sido inquebrantable. Gracias a mis hermanos, que siempre han estado a mi lado, me animaron y me acompañaron en mis momentos más difíciles. También quiero agradecer a mi familia, cuya presencia y aliento han sido un rayo de luz en este camino cuyo final me acerco. Cada uno de ustedes ha sido una parte de mí y que han sido imborrable en mi corazón y en mi carrera universitaria.

¡Muchas gracias por su amor, apoyo y confianza en mí! Este logro no hubiera sido posible sin ustedes. ¡Gracias a esas personas que me dieron este apoyo hasta este momento! "

Javier Sebastián Sánchez Rodríguez.

AGRADECIMIENTO

Quiero dedicar un agradecimiento especial a mis padres, cuya constante apoyo y amor han sido la base de todo lo que he logrado. Gracias a su inquebrantable confianza en mí y a las oportunidades que me han brindado, he podido cumplir la meta que me propuse y alcanzar este importante hito en mi vida universitaria.

Sus sacrificios y su aliento me han permitido no solo estar donde estoy ahora, sino también convertirme en quien soy. Han sido una fuente de inspiración y fortaleza durante todo este proceso, y me han dado la posibilidad de explorar y conocer muchas cosas increíbles que me han enriquecido profundamente.

Además, mi experiencia universitaria no hubiera sido la misma sin las muchas personas que he tenido el privilegio de conocer a lo largo del camino. Agradezco a todos aquellos que me han apoyado y guiado en este viaje, y a quienes han contribuido de manera significativa a mi crecimiento personal y académico.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

Jeremy Ricardo Peñafiel Garzón

Resumen

En la actualidad, los sistemas de control de procesos industriales enfrentan limitaciones con los controladores Proporcional Integral Derivativo (PID) tradicionales, especialmente cuando se trata de manejar dinámicas no lineales y perturbaciones en procesos térmicos complejos. En el laboratorio de automatización industrial 1, el módulo ET200SP, que utiliza un controlador PID para regular la temperatura, debe mejorar su eficiencia para un funcionamiento óptimo.

La serie S7-1200 carece de un controlador lógico difuso para el control de temperatura, lo que provoca fluctuaciones indeseadas y afecta la eficiencia del proceso. Los controladores difusos, basados en reglas de conocimiento experto, manejan mejor la incertidumbre y no linealidad en los sistemas de control.

El diseño de un controlador difuso para el módulo ET200SP con el S7-1200 presenta desafíos únicos, pero es crucial para potenciar la eficiencia del sistema. El uso del S7-1200 es ideal para la automatización industrial debido a su versatilidad y fácil programación. La implementación de un controlador difuso mejora la gestión de las dinámicas no lineales del sistema térmico, proporcionando ajustes más precisos y adaptativos a las condiciones de operación.

Este trabajo sobre el diseño de un controlador difuso para el control de temperatura del módulo ET200SP con el S7-1200 es relevante por la necesidad de controladores difusos en sistemas de temperatura. La mejora en el rendimiento no solo optimiza la operación del módulo, sino que también proporciona una herramienta educativa avanzada para estudiantes de Electrónica y Automatización, promoviendo el uso de técnicas de control moderno y mejorando la comprensión de sistemas complejos.

Palabras Claves: Controlador difuso, Regulación de temperatura, Automatización industrial, Módulo ET200SP, PLC S7-1200, Sistemas de control de temperatura.

ABSTRACT

Currently, there are various systems for the control of industrial processes related to variables such as temperature, level and pressure. Traditional Proportional Integral Derivative (PID) controllers have been replaced due to their limitations in the face of non-linear dynamics and inherent disturbances in complex thermal processes. In the industrial automation laboratory 1, the ET200SP module, using a PID controller for temperature regulation, needs to improve its efficiency for optimal operation and better practical understanding of fuzzy design.

The S7-1200 series lacks a fuzzy logic controller for temperature control, which causes unwanted fluctuations and affects the efficiency of the process. Fuzzy controllers, which use rules based on expert knowledge, handle uncertainty and non-linearity in control systems better. The design of a fuzzy controller for the ET200SP module with the S7-1200 presents unique challenges, but it is essential to improve the performance of the system.

The use of the S7-1200 is ideal for industrial automation due to its versatility and easy programming. The implementation of a fuzzy controller improves the management of the non-linear dynamics of the thermal system, providing more precise and adaptive adjustments according to the operating conditions.

This work on the design of a fuzzy controller for temperature control of the ET200SP module with the S7-1200 is relevant due to the need for fuzzy controllers in temperature systems. The performance improvement not only optimizes the operation of the module, but also provides an advanced educational tool for Electronics and Automation students, promoting the use of modern control techniques and improving the understanding of complex systems.

Key words: Fuzzy controller, Temperature regulation, Industrial automation, ET200SP Module, S7-1200 PLC, Temperature control systems.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I INTRODUCCIÓN	1
II PROBLEMA.....	2
III OBJETIVOS	3
3.1 Objetivo general.....	3
3.2 Objetivos específicos	3
IV FUNDAMENTO TEÓRICO	4
4.1 Sistemas de Control de Procesos Industriales.....	4
4.2 Modulo ET200SP (Componentes).....	5
4.2.1 ET200SP	5
4.2.2 Relés de estado sólido	6
4.2.3 Phoenix Contact Mini-PS	7
4.2.4 Relé de 24VDC	8
4.2.5 Resistencias.....	9
4.2.6 Sensor PT-100.....	10
4.2.7 Túnel de calor	11
4.3 Controladores PID	12
4.3.1 Limitaciones del controlador PID	13
4.4 Control Difuso	14
4.4.1 Reglas Difusas y Membresías.....	15

4.4.2	Reglas del controlador Difuso	16
4.5	Comparación entre los distintos tipos de controladores	20
4.6	PLC S7 – 1200	23
4.7	Pantalla HMI KTP700	24
4.8	TIA PORTAL (Versión 18).....	25
4.9	Matlab (R2021b).....	26
V	MARCO METODOLÓGICO	27
5.1	Desarrollo de proyecto en TIA PORTAL V18	28
5.1.1	Creación de los bloques de programación del PLC 1	30
5.1.2	Configuración y desarrollo de los bloques de programación del PLC en (MAIN).....	31
5.1.3	Desarrollo del datalogger.....	36
5.1.4	Desarrollo del HMI KTP700.	40
5.1.5	Programación de la Lógica de Control.	50
5.1.6	Configuración de Bloques de Datos del Controlador Difuso.	52
5.2	Desarrollo del proyecto en Matlab.....	54
5.2.1	Creación del archivo (.m)	55
5.2.2	Desarrollo del código en el archivo (.m)5	56
VI	RESULTADOS	57
6.1	Ejecución del controlador difuso utilizando TIA Portal y MATLAB	57

6.1.1 Comunicación maestro esclavo con el módulo ET200SP y el HMI	57
6.1.2 Compilación del proyecto en TIA Portal V18.....	57
6.1.5 Compilar el HMI KTP700.....	58
6.1.3 Cargar el programa en el PLC	59
6.1.4 Simulación del controlador difuso	60
6.1.7 Cargar los datos en el web server.	61
6.1.8 Generar la tabla de datos en Excel.....	62
6.1.8 Generar la representación gráfica de los datos en MATLAB	62
6.2 Ejecución del Controlador PID utilizando TIA Portal.	63
6.2.1 Comunicación maestro esclavo con el módulo ET200SP y el PLC.....	63
6.2.3 Cargar el programa PID en el PLC.....	64
6.2.4 Simulación del controlador PID.	65
6.2.5 Cargar los datos PID en el web server.....	65
6.2.6 Generar la tabla de datos PID en Excel	66
6.2.7 Generar la representación gráfica de los datos PID en MATLAB	66
6.3 Análisis de respuestas de ambos Controladores.....	67
6.3.1 Análisis Comparativo de Controladores: Regulación de Temperatura a 40 °C en la Resistencia 1.	67
6.3.2 Análisis Comparativo de Controladores: Regulación de Temperatura a 40 °C en la Resistencia 2.	69

6.3.3 Análisis Comparativo de Controladores: Regulación de Temperatura a 50 °C en la Resistencia 1.	70
6.3.4 Análisis Comparativo de Controladores: Regulación de Temperatura a 50 °C en la Resistencia 2.	71
6.3.5 Comparación entre ambos Controladores en la Resistencia 1 y 2.....	72
6.4 Guía Práctica del Funcionamiento del Controlador Difuso	73
6.4.1 Diseño de un Sistema de Control de Temperatura utilizando un Controlador en el Difuso mediante el PLC S7-1200 y el módulo ET200 SP.....	73
VII CRONOGRAMA	78
VIII PRESUPUESTO	79
IX CONCLUSIONES	80
X RECOMENDACIONES.....	81
XI REFERENCIAS	82
XII ANEXOS.....	87

INDICE DE FIGURA

Figura 1. Sistemas de control de Procesos industriales (Grupo Ylumeuco, 2021).....	4
Figura 2. Modulo ET200 con sus especificaciones técnicas (Campozano, 2021).....	6
Figura 3. Relé de estado térmico y su especificación técnica (Megatronica, 2023).....	7
Figura 4 Phoenix Contact Mini-PS y su especificación técnica (Phoenix Contact, 2020).....	8
Figura 5 Relé de 24VDC y su especificación técnica (MAZ, 2017)	9
Figura 6. Resistencia del túnel de calor (Luis & Talía, 2018)	10
Figura 7. Sensor PT100 (Direct Industry/CONNECT, 2019).....	11
Figura 8. Túnel de calor del Módulo ET200SP (Campozano, 2021).	12
Figura 9. Diagrama de bloque PID en lazo cerrado (Martín., 2024).	13
Figura 10. Representación del control difuso (ResearchGate , 2024).	14
Figura 11. Representación gráfica que muestran las reglas Difusas IF-THEN (ResearchGate , 2024).	15
Figura 12 Respuestas a las perturbaciones del controlador PID y controlador (A.Ferreyra, 1999)	22
Figura 13 Estabilización más Rápida con Control Difuso (A.Ferreyra, 1999).....	22
Figura 14. PLC SIEMENS S7-1200 (INTEREMPRESAS, 20203).	23
Figura 15 HMI KTP700 Simatic Siemens y su detalle técnico (INGELCOM, 2020)	24
Figura 16. Siemens TIA PORTAL (DisTI Corporation, 2024)	25
Figura 17. MATLAB/Simulink (DisTI Corporation, 2024).	26
Figura 18. Diagrama del proceso general.....	28
Figura 19. Inicialización del entorno de desarrollo de TIA Portal y verificación de los componentes de hardware necesarios.	29

Figura 20. Selección del modelo e incorporación del módulo con su versión correspondiente. ..	29
Figura 21. Configuración de la unidad de control PLC en TIA Portal.	30
Figura 22. Creación de Bloques de Función (FB).	31
Figura 23. Asignación de Parámetros y Variables.	32
Figura 24. Bloque de Setpoint y disipador.	33
Figura 25. Bloque Webserver.	34
Figura 26. Selección de Resistencias R1 y R2.	35
Figura 27. Desarrollo Dataloger.	36
Figura 28. Bloque TON.	37
Figura 29. DataLogOpen_B.	37
Figura 30. Función Set-Reset y Temporizador.	38
Figura 31. Función Set-Reset y Temporizador.	39
Figura 32. Función DataLogClose_DB.	40
Figura 33. Configuración de dispositivo HMI KTP – 700.	40
Figura 34. Selección del HMI.	41
Figura 35. "HMI Device".....	42
Figura 36. Ventana del HMI seleccionado.	42
Figura 37. Opción "Add New Screen".....	43
Figura 38. Asignación de nombre para el proyecto.	44
Figura 39. Elementos para la creación del HMI.	45
Figura 40. Integración de botones en la librería.	45
Figura 41. Integración de objetos por Basic Objects.	46
Figura 42. Diseño del HMI con el nombre del proyecto y sus integrantes.	47

Figura 43. Esquema del sistema de control.	48
Figura 44. Pantalla HMI donde se visualizan las graficas.	49
Figura 45. Controlador difuso vinculado a las resistencias.	50
Figura 46. Programación lógica.	51
Figura 47. Representación estructurada en LAD.	51
Figura 48. Bloques de datos [DB23].	52
Figura 49. Fuzzy Controller Temp_DB_2.	52
Figura 50. Fuzzy Controller Temp_DB_3 [DB3].	53
Figura 51. Input_DB_2.	53
Figura 52. Output_DB2.	53
Figura 53. Output_DB3.	54
Figura 54. Parámetros.	54
Figura 55. Creación de script.	55
Figura 56. Código para análisis de datos de temperatura.	56
Figura 57. Comunicación maestro esclavo en TIA Portal V18.	57
Figura 58. Estado de Compilación en TIA Portal V18.	58
Figura 59. Copelación del proyecto.	58
Figura 60. Carga del programa.	59
Figura 61. Funcionamiento general del sistema.	60
Figura 62. Simulación del controlador Difuso.	61
Figura 63. Registro de datos del web server.	61
Figura 64. Recopilación de registro de datos del módulo.	63
Figura 65. Representación de la gráfica de control.	63

Figura 66. Comunicación maestro esclavo en TIA Portal V18	63
Figura 67 Compilación del programa en TIA Portal V18	64
Figura 68. Ejecución del programa con su respectivo IP.....	64
Figura 69. Simulación del controlador PID.	65
Figura 70. Registro de datos del web. Server.	65
Figura 71. Recopilación de registro de datos del módulo.....	66
Figura 72. Representación de la gráfica de control.....	67
Figura 73. Respuesta del Controlador PID y Difuso en Resistencia 1 a 40°C.	68
Figura 75. Respuesta del Controlador PID y Difuso en Resistencia 2 a 40°C.	69
Figura 76. Respuesta del Controlador PID y Difuso en Resistencia 1 a 50°C.	70
Figura 77. Respuesta del Controlador PID y Difuso en Resistencia 2 a 50°C.	71

Índice de Tablas

Tabla 1 Comparación entre controlador PID y controlador Difuso para la resistencia 1 y 2 -----	72
Tabla 2 Cronograma de actividades para el desarrollo del Proyecto de Titulación -----	78
Tabla 3 Presupuesto estimado para el desarrollo del Proyecto de Titulación -----	79

I INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de titulación se aborda la implementación de un controlador difuso para el control de temperatura del módulo ET200SP donde utiliza el PLC S7-1200. Este proyecto tiene como objetivo superar las limitaciones de los controladores PID tradicionales, que a menudo se enfrentan a desafíos significativos donde se trata de dinámicas no lineales y perturbaciones en los sistemas industriales. La aplicación de un controlador difuso permitirá una gestión más precisa y robusta de la temperatura, mejorar la eficiencia y estabilidad del sistema.

El uso de controladores difusos ofrece ventajas significativas en la automatización industrial, especialmente en la gestión de procesos térmicos complejos. Estos controladores, basados en reglas y conocimientos expertos, son capaces de manejar la incertidumbre y adaptarse mejor a las variaciones de las condiciones operativas. Implementar este tipo de controlador en el módulo ET200SP no solo optimizará su funcionamiento, sino que también proporcionará una herramienta educativa avanzada para los estudiantes de la carrera de Electrónica y Automatización.

Este proyecto no solo se enfoca en el diseño y programación del controlador difuso, sino que también incluye pruebas experimentales y una comparación de desempeño con un controlador PID tradicional. El objetivo es comprobar la superioridad del controlador difuso en términos de precisión y estabilidad en el control de temperatura, contribuyendo así al avance del conocimiento en el campo de la automatización industrial.

II PROBLEMA

Actualmente, el módulo ET200SP en el laboratorio de Automatización Industrial I emplea un controlador PID para la regulación de la temperatura. No obstante, este enfoque presenta limitaciones importantes frente a dinámicas no lineales y perturbaciones propias de procesos térmicos complejos. La limitada adaptabilidad de los controladores PID y su sensibilidad a variaciones en las condiciones operativas resultan en un control insuficiente, afectando la estabilidad y eficiencia del sistema. Este escenario sugiere la necesidad de explorar alternativas más eficaces para la regulación de temperatura.

En este contexto, los controladores difusos se han posicionado como una opción prometedora dentro de la teoría de control moderna. A diferencia de los PID, los controladores difusos se basan en reglas derivadas del conocimiento experto, lo que les permite gestionar mejor la incertidumbre y la no linealidad inherente a los sistemas de control. Esta capacidad los hace especialmente adecuados para aplicaciones donde las condiciones varían de forma impredecible, como en los procesos térmicos complejos.

Sin embargo, diseñar e implementar un controlador difuso en el módulo ET200SP utilizando el S7-1200 plantea desafíos particulares que deben superarse para lograr un desempeño óptimo. Entre estos retos se encuentran la formulación de reglas difusas adecuadas, la calibración precisa de los parámetros del controlador y su integración con el hardware existente. Superar estos desafíos no solo mejorará el control de temperatura, sino que también estabilizará el sistema frente a condiciones cambiantes, lo que representaría un avance significativo en la automatización industrial. Así, la investigación sobre controladores difusos es no solo pertinente, sino también fundamental para optimizar el rendimiento y aumentar la fiabilidad en aplicaciones industriales.

III OBJETIVOS

3.1 Objetivo general.

Diseñar un Controlador Difuso para el control de temperatura del módulo ET200SP usando el S7-1200

3.2 Objetivos específicos.

- Diseñar reglas difusas del Controlador Difuso para estabilizar la temperatura del módulo ET200SP.
- Analizar el tiempo de respuesta de un Controlador Difuso versus un Controlador PID.
- Realizar una guía práctica que explique el funcionamiento del controlador Difuso.

IV FUNDAMENTO TEÓRICO

4.1 Sistemas de Control de Procesos Industriales.

En distintas industrias, la automatización y optimización de operaciones dependen en gran medida de los sistemas de control de procesos industriales. Los sistemas realizan la tarea de supervisar y controlar variables cruciales tales como temperatura, presión, nivel y flujo, como se aprecia en la figura 1. Para asegurar el correcto funcionamiento de los procesos industriales, es necesario emplear sensores, actuadores y controladores con el fin de recoger datos en tiempo real y tomar las decisiones pertinentes para su control (COPADATA, 2023).

Los sensores registran las variables del proceso, mientras que los actuadores realizan las acciones necesarias para corregir cualquier desviación detectada. Estos elementos optimizan los diversos componentes necesarios para el funcionamiento de un entorno industrial, asegurando que operen de manera eficiente y coordinada. Un Sistema de Control Industrial (ICS) puede ejercer un control total o implementarse en un modelo híbrido que permite la intervención humana. Se presentan opciones de control en bucle abierto, bucle cerrado y manual. Existen diferentes tipos de controladores, como los PID, difusos o predictivos, que se encargan de procesar la información captada por los sensores y determinar las acciones correctivas (EMAC Industrial Solutions and Services S.A , 2021).

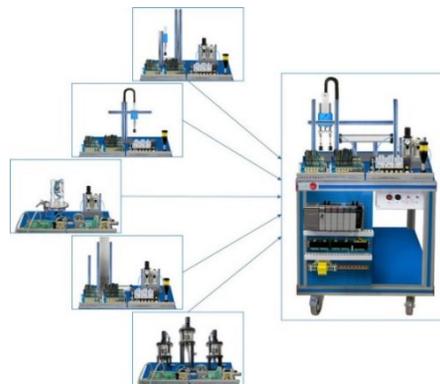


Figura 1. Sistemas de control de Procesos industriales (Grupo Ylumeyco, 2021).

4.2 Modulo ET200SP. (Componentes)

4.2.1 ET200SP.

El ET200SP es un componente fundamental en la automatización industrial, facilitando la comunicación entre sensores, actuadores y sistemas de control centralizados. Parte de la serie SIMATIC de Siemens, este sistema se adapta a distintos controladores, como PID y difusos, permitiendo su implementación en aplicaciones que demandan variados métodos de control para optimizar los procesos. El ET200SP maneja tanto señales analógicas como digitales y se presenta como una solución avanzada y confiable para la automatización, combinando flexibilidad, precisión y eficiencia en la integración de dispositivos de campo. (Campozano, 2021).

El módulo ET200SP ofrece diversas capacidades para la automatización industrial. Entre sus opciones se encuentra el modelo 6ES7134-6JD00-0CA1, que dispone de 4 entradas analógicas para RTD (Detector de Temperatura de Resistencia) y termocuplas, permitiendo la medición de resistencias con dos sensores de temperatura PT100. También está disponible el modelo 6ES7132-6BF01-0BA0, que cuenta con 8 salidas digitales de 24 VDC, adecuado para controlar dispositivos como luces piloto, ventiladores y resistencias, con salidas digitales de tipo DQ 8x24VDC/0.5A ST. Finalmente, el modelo 6ES7131-6BF01-0AA0 proporciona 8 entradas digitales de 24 VDC, ideales para conectar botones de arranque, parada y emergencia, facilitando una integración segura y eficiente en sistemas de control. (Campozano, 2021). En la figura 2 se ilustra el ET200SP acompañado de su respectiva ficha técnica.



Tipo de Módulo	Modelo	Descripción
Entradas Analógicas	6ES7134-6JD00-0CA1	4 entradas para RTD y termocuplas, medición con PT100.
Salidas Digitales	6ES7132-6BF01-0BA0	8 salidas digitales de 24 VDC para controlar luces, ventiladores y resistencias (DQ 8x24VDC/0.5A ST).
Entradas Digitales	6ES7131-6BF01-0AA0	8 entradas digitales de 24 VDC para botones de arranque, parada y emergencia.

Figura 2. Modulo ET200 con sus especificaciones técnicas (Campozano, 2021).

4.2.2 Relés de estado sólido.

Los relés de estado sólido son dispositivos cruciales para el control de resistencias eléctricas, permitiendo una regulación precisa y eficiente de la potencia. Estos dispositivos operan mediante la aplicación de un voltaje de control bajo, lo que activa un circuito interno que posibilita el flujo de corriente hacia las resistencias. A diferencia de los relés mecánicos, los SSR no contienen componentes móviles, lo cual se traduce en una mayor durabilidad y en tiempos de conmutación más rápidos. Además, ofrecen un aislamiento eléctrico efectivo entre la señal de control y la carga, lo que garantiza un funcionamiento seguro y confiable en una cantidad de diversas aplicaciones para el control de temperatura, la automatización industrial, entre otros. (Electronica Universal de Monterrey, 2023). En la figura 3, se presenta el relé térmico junto a su ficha técnica, lo que facilita la comprensión y el uso adecuado de este componente.

Característica	Descripción
Tipo	Relé de estado sólido (SSR)
Voltaje de Control	Generalmente 3-32 V DC o 90-280 V AC
Voltaje de Carga	24-480 V AC (dependiendo del modelo)
Corriente de Carga	Hasta 40 A o más (dependiendo del modelo)
Tiempo de Conmutación	Milisegundos (rápido)
Aislamiento Eléctrico	2500 V AC o más
Temperatura de Operación	-30 °C a 80 °C (varía por modelo)
Montaje	Panel o riel DIN
Protección	A prueba de sobrecarga y cortocircuitos
Durabilidad	Más de 100 millones de ciclos
Ruido	Operación silenciosa
Aplicaciones	Control de temperatura, automatización industrial, iluminación



Figura 3. Relé de estado térmico y su especificación técnica (Megatronica, 2023)

4.2.3 Phoenix Contact Mini-PS.

El Phoenix Contact MINI POWER es una fuente de alimentación compacta, que ofrece una versión de 24 V DC con corrientes de salida de 1,3 A, 2 A y 4 A, también se presentan tensiones especiales de 5 V/3 A y ± 15 V/1 A, así como un rango de 10 V a 15 V con 2 A. Para asegurar un arranque confiable de cargas difíciles, cuenta con una reserva de potencia denominada POWER BOOST, que puede alcanzar hasta el 100%. La robustez del servicio está garantizada en entornos de red global complejos; MINI POWER opera eficientemente incluso en situaciones de interrupciones de tensión estáticas, transitorios en la alimentación o fallos de fase. Sus condensadores sobredimensionados permiten un puenteo de fallos de red superior a 20 ms a plena

carga (Phoenix Contact, 2020). En la figura 4 se muestra el Mini-Ps junto a su correspondiente hoja técnica.



Figura 4 Phoenix Contact Mini-PS y su especificación técnica (Phoenix Contact, 2020)

4.2.4 Relé de 24VDC.

El sensor relé, con bobina de 24VDC, es un dispositivo que cuenta con una bobina que funciona a 24V en corriente continua, creando un campo magnético que activa la conmutación de los contactos. Su configuración de 14 pines ofrece versatilidad en el diseño de circuitos, con pines específicos para la bobina y los contactos de conmutación, que pueden configurarse como SPDT o DPDT, según el modelo (Solectro, 2022).

La capacidad indica la carga máxima que pueden manejar los contactos sin sufrir daños. Este tipo de relé se utiliza comúnmente en aplicaciones industriales para gestionar cargas eléctricas, en sistemas de control de maquinaria y en la automoción, donde se necesita un control

preciso y eficiente. Al integrar este relé en una placa de circuito impreso o en una base de relé, es importante considerar la disposición adecuada de los pines y la protección contra sobrevoltajes, garantizando así la estabilidad y durabilidad del sistema (Weidmuller, 2020). En la figura 5 se muestra el relé de 24 VDC junto con sus especificaciones técnicas.



Disposición de contactos		2C	3C	4C
Resistencia de contacto inicial	mΩ	100		
Material de los contactos		Aleación de plata		
Carga nominal (resistiva)		5A/220Vca		3A/220Vca
		5A/28Vcc		3A/28Vcc
Tensión de conmutación MÁX.	Vca	250		
	Vcc	125		
Corriente de conmutación MÁX.	A	5		3
Capacidad de conmutación máx.	VA	1100		660
	W	140		84
Duración eléctrica	Ciclos	1×10 ⁶		
Duración mecánica	Ciclos	1×10 ⁷		

Figura 5 Relé de 24VDC y su especificación técnica (MAZ, 2017)

4.2.5 Resistencias.

En los sistemas de calefacción industrial, las resistencias son fundamentales para regular y mantener temperaturas precisas. En particular, se emplean dos resistencias de 940W cada una, diseñadas específicamente para operar en un túnel de calor. Estas resistencias permiten alcanzar y mantener temperaturas de hasta 300 °C de manera eficiente (Pearson Educación, 2017). En la figura 6 se presenta las resistencias junto a su especificación técnica.

Característica	Descripción
Valor de Resistencia	940 Ω
Temperatura Máxima	300 °C
Tipo de Resistencia	Eléctrica (calentadora)
Material	Generalmente platino o acero inoxidable
Uso Común	Calefacción, hornos industriales
Potencia	Dependiendo de la corriente aplicada, puede variar
Aplicaciones	Procesos industriales, soldadura, control térmico
Tiempo de Respuesta	Rápido, dependiendo del diseño
Seguridad	Debe cumplir con normativas de seguridad para altas temperaturas



Figura 6. Resistencia del túnel de calor (Luis & Talía, 2018)

4.2.6 Sensor PT-100

El sensor PT100 mide la temperatura a través de la resistencia eléctrica de un filamento de platino. A medida que aumenta la temperatura, la resistencia del sensor de platino (PT100) también crece, generando una señal eléctrica que se puede convertir en una medición precisa de la temperatura. La elección del PT100 se debe a su alta estabilidad y exactitud, lo que lo hace adecuado para aplicaciones donde se requiere una medición confiable. Además, su capacidad para responder rápidamente a los cambios de temperatura lo convierte en una opción preferida en entornos industriales y de laboratorio que demandan rapidez y fiabilidad en las mediciones. (Saldias.A, 2024). En la figura 7 se observa el sensor PT100 con su especificación técnica.

Temperatura [°C]	Temperatura [°F]	Resistencia [ohmios]
-200.00	-328.00	18.5201
-100.00	-148.00	60.2558
0.00	32.00	100.0000
100.00	212.00	138.5055
200.00	392.00	175.8560
300.00	572.00	212.0515
400.00	752.00	247.0920
500.00	932.00	280.9775
600.00	1112.00	313.7080
700.00	1292.00	345.2835
800.00	1472.00	375.7040
850.00	1562.00	390.4811



Figura 7. Sensor PT100 (Direct Industry/CONNECT, 2019).

Nota: En la tabla se muestran los valores numéricos de temperatura contra resistencia de un Pt100 en una serie de puntos

4.2.7 Túnel de calor.

El túnel de calor, figura 8, es un equipo diseñado para generar un entorno de aire turbulento en una cámara específica. Esto se logra mediante la aspiración de aire del ambiente con un ventilador, el cual es luego calentado por medio de una resistencia eléctrica u otro dispositivo que facilite el intercambio térmico. Su principal función es asegurar una rápida contracción de materiales termoplásticos, lo que asegura confiabilidad, seguridad y eficacia, al mismo tiempo que mejora la presentación de los productos y optimiza la capacidad de producción (Campozano, 2021).



Figura 8. Túnel de calor del Módulo ET200SP (Campozano, 2021).

4.3 Controladores PID.

La unidad de control responde a una señal de error de varias formas, generando una salida que activa los elementos correctivos requeridos. El control PID utiliza tres componentes principales: proporcional, integral y derivativo, para ajustar la salida del sistema. El control proporcional ajusta la salida en función de la diferencia entre el valor deseado y el valor actual, ayudando a reducir esta diferencia. Por su parte, el control integral tiene en cuenta el error acumulado a lo largo del tiempo y ajusta la salida para corregirlo completamente. El control derivativo se basa en la velocidad con la que cambia el error, permitiendo anticipar posibles errores futuros y aplicar una corrección antes de que se produzcan. (Martín., 2024).

Se procede a diseñar el controlador proporcional-derivativo del PID con el fin de satisfacer las condiciones de respuesta transitoria. Esto implica ajustar tanto la velocidad como la estabilidad del sistema durante su respuesta inicial ante cambios. Luego, se implementa el control integral con el fin de garantizar la eliminación del error en estado estacionario, lo que significa corregir cualquier discrepancia persistente entre el valor deseado y el valor real. Mediante esta combinación, se logra un control preciso y eficiente que se adapta de forma dinámica a las fluctuaciones del sistema, la figura 9 muestra un bloque PID con el diseño del controlador con los

pasos mencionados previamente, lo cual contribuye a optimizar tanto la estabilidad como el rendimiento del proceso bajo control. (Roth, 2023).

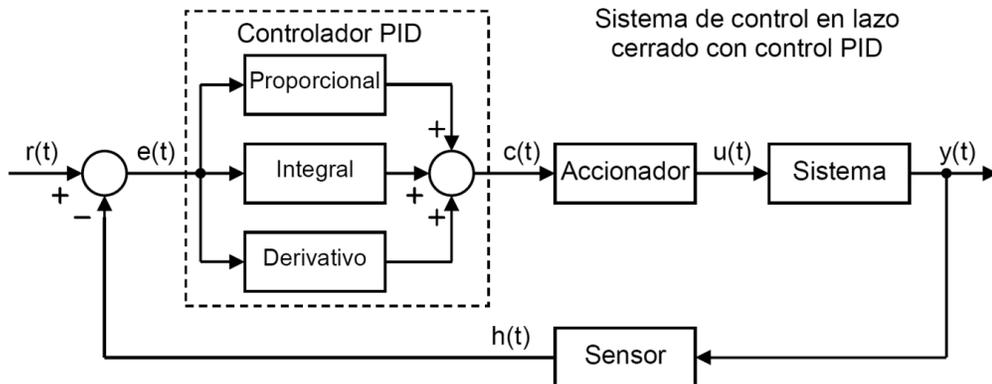


Figura 9. Diagrama de bloque PID en lazo cerrado (Martín., 2024).

4.3.1 Limitaciones del controlador PID.

A pesar de que los controladores PID son ampliamente usados en la industria, pueden experimentar ciertas limitaciones que podrían impactar su rendimiento en aplicaciones más complejas. La sensibilidad a interferencias externas y ruidos en la señal de control es una desventaja destacada, ya que puede afectar negativamente la precisión y estabilidad del sistema. Incluso, si bien los PID están diseñados específicamente para sistemas lineales, su rendimiento puede ver una disminución notable cuando se enfrentan a dinámicas no lineales. Además, tienen problemas para adaptarse a cambios en los parámetros del sistema y deben realizar ajustes constantes de las constantes de control K_p , K_i y K_d cada vez que cambian las condiciones de operación. La calibración de un controlador PID puede llevar mucho tiempo y ser compleja, sobre todo en sistemas que presentan múltiples variables interdependientes (Picuino, 2024).

Además, los controladores PID no son adecuados para gestionar de manera eficiente los retrasos temporales presentes en ciertos procesos industriales, lo cual puede ocasionar respuestas inestables o poco efectivas. Bajo condiciones operativas extremas, tales como cambios abruptos de carga o perturbaciones significativas, el desempeño del controlador PID puede disminuir, lo

cual resulta en un control subóptimo. Por último, es necesario realizar un seguimiento continuo y realizar el mantenimiento regular de estos controladores para garantizar su correcto funcionamiento, lo que puede resultar en un incremento de los gastos operativos. (Studocu, 2002).

4.4 Control Difuso.

Un controlador difuso usa lógica difusa en lugar de lógica binaria como lo hacen los controladores tradicionales. La lógica difusa permite el manejo de valores intermedios, que representan grados de verdad; esto es particularmente útil en sistemas donde hay incertidumbre e imprecisión. Las tres etapas principales del controlador difuso son la fuzzificación, la inferencia y la defuzzificación. Las entradas del sistema se convierten en valores difusos utilizando funciones de pertenencia durante la etapa de fuzzificación, en la figura 10, muestra que se puede convertir la temperatura medida en expresiones lingüísticas que representen niveles de temperatura "bajo", "medio" o "alto" mediante un control difuso (Herrera & Verdegay, 1995).

La lógica difusa puede modelar la incertidumbre y la imprecisión utilizando conceptos como la pertenencia parcial y las reglas lingüísticas. La lógica difusa utiliza componentes cualitativos que se representan mediante funciones de pertenencia en lugar de trabajar con entradas y salidas precisas. (Rodríguez J. L., Lógica difusa y su aplicación a sistemas de control., 2004).

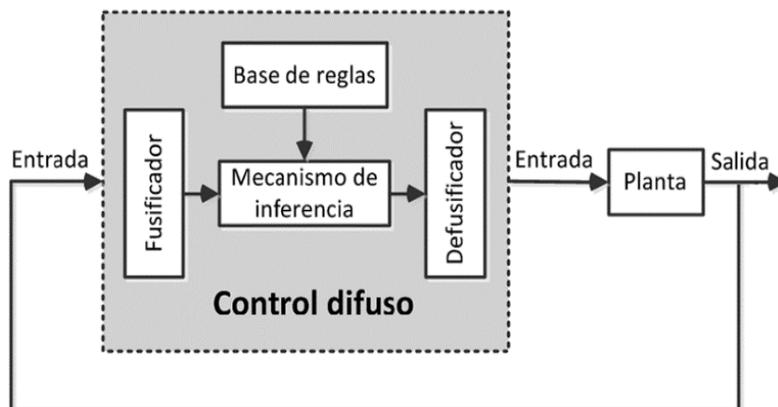


Figura 10. Representación del control difuso (ResearchGate , 2024).

4.4.1 Reglas Difusas y Membresías.

La lógica difusa se fundamenta en las reglas difusas. El sistema de control relaciona las variables de entrada con las variables de salida a través de declaraciones condicionales del tipo "si-entonces" (Betanzos Gutierrez, 2011).

Cada regla borrosa se compone de una condición y un resultado. Estas reglas reflejan el conocimiento experto y la experiencia práctica, lo cual permite que el controlador difuso tome decisiones basadas en descripciones cualitativas en lugar de depender precisamente de modelos matemáticos. Las reglas difusas se unen entre sí para formar una base de conocimiento que incluye distintas situaciones operativas presentar los términos lingüísticos utilizados en las reglas difusas, resulta fundamental contar con funciones de membresía. Estas funciones otorgan un nivel de pertenencia a cada valor de una variable de entrada en un rango específico. Cada función de membresía puede tener una forma distinta como triangular, trapezoidal o gaussiana, entre otras. Estas formas definen cómo los valores de entrada se convierten en valores difusos. El nivel de correspondencia entre un valor de entrada y un término lingüístico específico se representa mediante el grado de pertenencia, figura 11, que varía en una escala del 0 al 1 (Turmero, 2021).

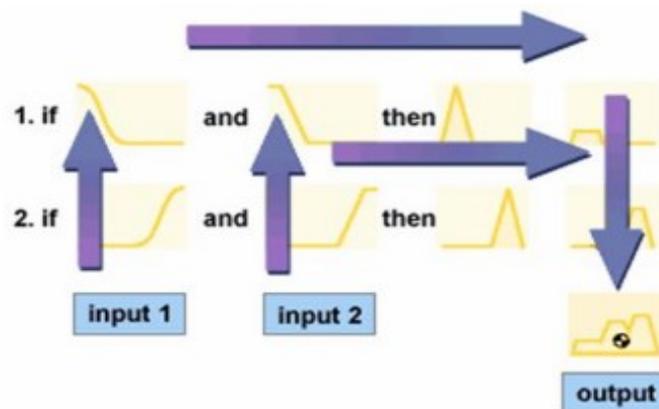


Figura 11. Representación gráfica que muestran las reglas Difusas IF-THEN (ResearchGate , 2024).

4.4.2 Reglas del controlador Difuso.

Las reglas difusas emergen como una herramienta para abordar la complejidad en las variables y valores lingüísticos presentes. Estas reglas funcionan como enlaces que relacionan proposiciones difusas, conocidas como antecedentes, con otras proposiciones también difusas, denominadas consecuentes, utilizando una estructura condicional del tipo "Si-Entonces". A diferencia de la lógica tradicional, que emplea valores binarios (verdadero o falso), la lógica difusa permite que los valores oscilen en un rango continuo entre 0 y 1, lo que ofrece una representación más realista y precisa de las situaciones. (Morillo, 2011). La estructura de las reglas difusas se puede expresar mediante la siguiente fórmula:

$$\text{IF } x \text{ is } A \text{ THEN } y \text{ is } B$$

En esta estructura, "x is A" corresponde al antecedente, que es una proposición difusa donde la variable x pertenece al conjunto difuso A, mientras que "y is B" se refiere al consecuente, una proposición difusa que pertenece al conjunto difuso B. Esta configuración, caracterizada por su flexibilidad y capacidad de adaptación, proporciona un enfoque más eficiente para la toma de decisiones en situaciones donde predominan la incertidumbre y la imprecisión. (Calle & Novillo, 2018).

En los controladores difusos no lineales, la parte consecuente de cada regla no es simplemente otro conjunto difuso, En lugar de una fórmula matemática específica, se utiliza una expresión que describe detalladamente el modelo local correspondiente. Esta aproximación permite una representación más precisa y completa del comportamiento del sistema.

En el caso de un sistema no lineal en tiempo continuo, la representación de las reglas del controlador difuso no lineal se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$$

$$y(t) = h(x(t))$$

O en tiempo discreto:

$$X_{k+1} = f(X_k, u_k)$$

$$y_k = h(X_k)$$

Donde:

La entrada se representa como:

$$u(\cdot) \in R^m$$

El estado se representa como:

$$x(\cdot) \in R^n$$

Y la salida de los sistemas se representaría como:

$$y(\cdot) \in R^q$$

Es posible modelar el comportamiento entrada-salida de los sistemas mediante un modelo borroso

(o difuso) definido por un conjunto de reglas:

Si $z_1(t)$ es F_{1i} y ... $z_p(t)$ es F_{pi}

$$\text{Entonces } \sum: \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t), i = 1, \dots, r \end{cases}$$

$z_1(\cdot), \dots, z_p(\cdot)$ Representan las variables premisas que pueden medirse y que, en algunos casos, pueden coincidir con el vector de estado $(x(t), x_k)$ o las variables premisas medibles, que pueden

coincidir total o parcialmente con el vector de estado a través de las señales de salida $y(\cdot)$. F_{li} son los correspondientes conjuntos difusos. Donde:

El modelo difuso se construye utilizando un fusificador de tipo singleton, un motor de inferencia basado en el producto, y un defusificador que emplea el método del centro de gravedad (Wang, 1997). Este enfoque da lugar a un sistema difuso que se expresa como una combinación lineal $\mu_i(\cdot)$ de los modelos locales, logrando así una representación flexible y adaptable del sistema., de manera que:

Para sistemas continuos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) (A_i x(t) + \\ \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) B_i u(t)) = \hat{f}(x(t), u(t)) \\ y(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) (C_i x(t) + \hat{h}(x(t))) \end{array} \right.$$

Donde:

$$\mu_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))}$$

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p F_{pi}(z_j(t))$$

En sistemas discretos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}(t)_{k+1} = \sum_{i=1}^r \mu_i(z_k(t)) (A_i^d x_k + \\ \sum_{i=1}^r \mu_i(z_k) B_i^d u_k) = \hat{f}(x_k, u_k) \\ y_k = \sum_{i=1}^r \mu_i(z_k) (C_i^d x_k + \hat{h}(x_k)) \end{array} \right.$$

Donde:

$$\mu_i(z_k) = \frac{w_i(z_k)}{\sum_{i=1}^r w_i(z_k)}$$

$$w_i(z_k) = \prod_{j=1}^p F_{pi}(z_{jk})$$

El término $F_{pi}(z_{jk})$ es el grado de membresía de z_{jk} en F_{pi} .

El peso normalizado para cada regla:

$$\mu_i(z(\cdot)) \geq 0$$

$$\sum_{i=1}^r \mu_i(z(\cdot)) = 1, \quad z(\cdot) = [z_1(\cdot), \dots, z_p(\cdot)]^T$$

Estas reglas borrosas pueden capturar la lógica subyacente que gobierna la relación entre las entradas y las salidas del sistema de una manera más natural y flexible que los modelos matemáticos tradicionales

4.5 Comparación entre los distintos tipos de controladores.

El controlador Difuso son reguladores no lineales que utilizan un establecimiento a bases de reglas del enfoque que permite realizar regulaciones multivariables de manera rápida y orientada a la resolución de problemas, lo cual es especialmente beneficioso en situaciones donde no se dispone de un modelo claro del sistema controlado o cuando dicho modelo tiene una estructura no lineal compleja que dificulta su manejo. A diferencia del controlador PID, que se basa en un modelo matemático lineal y utiliza solo tres parámetros de ajuste (proporcional, integral y derivativo), el controlador difuso se fundamenta en un enfoque lingüístico que emplea expresiones difusas como "alto", "bajo", "rápido". Esto permite una representación más natural del conocimiento experto sobre el comportamiento del sistema, lo que facilita su diseño e implementación, (GUNT HAMBURG, 2008) .

Los sistemas de control basados en lógica difusa presentan ventajas significativas para el manejo de sistemas complejos y no lineales, en comparación con los controladores convencionales como el PID. Esto se debe a que los controladores difusos describen el comportamiento del sistema mediante expresiones lingüísticas, lo que facilita su comprensión y diseño, y además permiten la ampliación o adaptación posterior de su base de conocimiento, haciéndolos más flexibles y adecuados para sistemas cambiantes. A diferencia de los controladores PID, limitados por su estructura lineal y parámetros fijos, los sistemas de control difuso pueden adaptarse mejor a las no linealidades y condiciones variables, ofreciendo un desempeño más robusto y eficaz en aplicaciones complejas. Al elegir el controlador Difuso se garantiza un mejor manejo de sistemas complejos y no lineales, donde el modelado matemático puede ser difícil. El enfoque lingüístico y la capacidad de adaptación de la base de reglas del controlador difuso lo hacen más apropiado para

este tipo de aplicaciones, en comparación con el controlador. (Palomino Hawasly, Strefezza, & Contreras, 2016).

El controlador PID se utiliza en múltiples aplicaciones, como el control de procesos industriales, la automatización de sistemas, la electrónica y los sistemas de potencia, entre otros. Esto se debe a su simplicidad de diseño y su capacidad para lograr un rendimiento efectivo en una gran cantidad de sistemas de control. El constante uso del controlador PID se debe a su capacidad para proporcionar un control eficaz, con un rendimiento predecible y estable, incluso en presencia de perturbaciones y cambios en las condiciones del sistema. Además, su estructura simple y bien establecida facilita el diseño, la sintonización y la implementación en una amplia gama de aplicaciones. Sin embargo, el controlador PID presenta limitaciones cuando se trata de sistemas que exhiben un comportamiento no lineal significativo. (Fuji Electric, 2024).

Esto se debe a que el controlador PID se basa en un modelo matemático lineal del sistema y utiliza solo tres parámetros de ajuste “proporcional, integral y derivativo”. En sistemas no lineales, el modelo matemático puede ser mucho más complejo y difícil de obtener, lo que dificulta la sintonización adecuada de los parámetros del controlador PID. (MINT, 2022).

En términos comparativos, el controlador PID se basa en un modelo matemático robusto de un proceso lineal, lo que implica que su diseño y funcionamiento dependen de una representación matemática precisa del sistema a controlar. Esto le permite ajustar sus parámetros de manera específica según las necesidades del sistema. Aunque se percibe al controlador PID como una opción más simple y, por tanto, más económica, en la práctica puede resultar más complejo de implementar que otros enfoques. Por otro lado, los controles difusos destacan por ser más sencillos de implementar, describir y verificar. Su mantenimiento y ampliación también son más eficientes y precisos, lo que puede reducir los tiempos de desarrollo y ajustes en comparación

con los controladores PID. Además, los controladores difusos responden mejor a las perturbaciones. Mientras que una fuerte perturbación puede provocar una caída en la estabilidad, el sistema difuso tiende a estabilizarse dentro de un margen de error aceptable. Por ejemplo, en un escenario de perturbación severa, el error en un controlador difuso puede caer solo hasta un 0.5, mientras que un controlador PID podría experimentar caídas de hasta tres veces más, lo que demuestra la mayor capacidad de los sistemas difusos para mantener un control estable en condiciones cambiantes. (A.Ferreira, 1999).

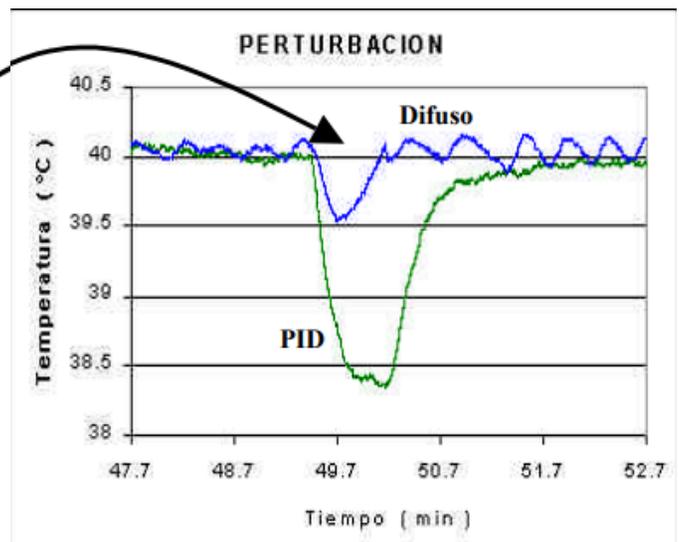
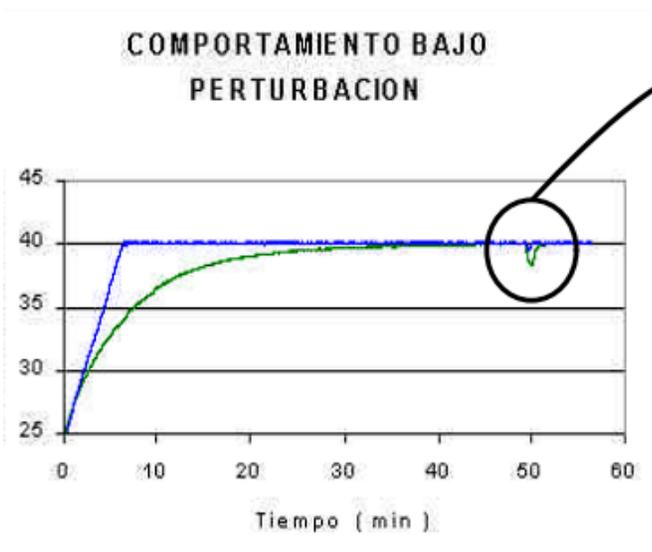


Figura 12 Respuestas a las perturbaciones del controlador PID y controlador (A.Ferreira, 1999)

Figura 13 Estabilización más Rápida con Control Difuso (A.Ferreira, 1999)

Basándose en los resultados de esta investigación, la elección del controlador difuso se justifica plenamente. Este método demuestra ser altamente adecuado para el sistema propuesto, brindando un mejor rendimiento en comparación con un controlador PID estándar, especialmente en aplicaciones de tiempo real y en hardware. Cabe señalar que el rendimiento del control difuso puede mejorarse aún más mediante la incorporación de las etapas integral y derivativa. Sin embargo, estas deben utilizarse con precaución y en función del tipo de aplicación y la precisión

requerida, ya que su implementación complica significativamente el ajuste del control, lo que supone un importante compromiso a considerar. (A.Ferreira, 1999).

4.6 PLC S7 – 1200.

La serie de controladores lógicos programables (PLC) El PLC S7-1200 de Siemens, está diseñado para asistir a distintas empresas en la automatización de sus procesos. Los PLC de la familia S7-1200 son perfectos para una variedad de aplicaciones industriales gracias a su flexibilidad, facilidad de uso y avanzadas capacidades de comunicación (Schneider Electric., 2020).



Campo	Descripción
Modelo	CPU 1214C DC/DC/DC
Firmware	V4.1
Voltaje Suministro	24 V (20.4 V - 28.8 V)
Protección	Contra polaridad inversa
Consumo (CPU)	500 mA (1,400 mA con expansión)

Figura 14. PLC SIEMENS S7-1200 (INTEREMPRESAS, 20203).

El SIMATIC S7-1200 es un PLC desarrollado para aplicaciones de automatización industrial que se destaca por su capacidad de comunicación mediante el protocolo ProfiNet. Ofrece flexibilidad en la gestión de señales gracias a sus dos entradas analógicas, catorce entradas digitales y diez salidas digitales. Este controlador puede ser alimentado tanto con corriente alterna como continua, utilizando una fuente de voltaje interna. La versión de software 4.2 facilita la programación y supervisión de procesos automatizados, proporcionando herramientas eficientes para optimizar el

control y la gestión de los sistemas industriales efectiva (INTEREMPRESAS, 20203). En la figura 14 se muestra el PLC y su detalle técnico.

4.7 Pantalla HMI KTP700.

El HMI, figura 15, es una herramienta de la automatización industrial que facilita la visualización de datos en tiempo real a través de pantallas táctiles o monitores, lo que les permite tomar decisiones rápidas e informadas para mantener la eficiencia y la seguridad de las actividades (Schneider Electric., 2020).



Figura 15 HMI KTP700 Simatic Siemens y su detalle técnico (INGELCOM, 2020)

El dispositivo HMI KTP700 tiene como funcionalidad la visualización de información en tiempo real. Este ofrece representaciones gráficas donde se exponen estados de diversos

elementos como válvulas, motocicletas y niveles, entre otros parámetros inherentes a procesos específicos. Además, proporciona datos relacionados a dichos procesos, facilitando su control y optimización. Las interfaces HMI han sido diseñadas para permitir un monitoreo eficaz a escala industrial (INGELCOM, 2020).

4.8 TIA PORTAL. (Versión 18)

TIA PORTAL, figura 16, es una sola interfaz integrada que contiene todas las herramientas necesarias para la programación y configuración de sistemas de automatización industrial el cual gestiona de manera eficiente y completa los proyectos de automatización, desde la etapa inicial de diseño hasta su implementación operativa y mantenimiento (AG, 2020).

En el campo de la ingeniería se utiliza TIA Portal para administrar todas las fases del ciclo de vida del proyecto, abarcando desde el diseño y la planificación hasta la operación y el mantenimiento, de manera eficiente. La plataforma integrada con todas las herramientas y bibliotecas brinda ventajas notables en términos de eficacia y comodidad. La utilización de TIA Portal permite a los usuarios acceder fácilmente a una única interfaz para llevar a cabo la programación de controladores, configurar redes, diseñar interfaces HMI y poner en funcionamiento sistemas de accionamiento (Siemens AG, 2021).



Figura 16. Siemens TIA PORTAL (DisTI Corporation, 2024)

4.9 Matlab. (R2021b)

La aplicación MATLAB es fundamental para el análisis de datos y la generación de gráficas, permitiendo una interpretación clara de los resultados obtenidos en simulaciones. MATLAB brinda la capacidad de manipular estos resultados mediante la aplicación de algoritmos, facilitando la evaluación y representación de datos de manera óptima. Esta funcionalidad es particularmente valiosa en las etapas de evaluación y validación de diseños, donde se busca mejorar la calidad del desarrollo y reducir los costos asociados (MathWorks, 2020).

MATLAB, figura 17, proporciona un entorno gráfico para la modelación y simulación de sistemas dinámicos antes de su implementación en hardware, siendo crucial para la automatización de procesos. El entorno basado en diagramas de bloques posibilita la ejecución de simulaciones en múltiples dominios de manera integrada y adoptar un enfoque de diseño basado en modelos, ofreciendo soporte para el diseño a nivel de sistema, la simulación, la generación automática de código, así como pruebas continuas y verificación de sistemas embebidos (Mercado, 2020).



Figura 17. MATLAB/Simulink (DisTI Corporation, 2024).

V MARCO METODOLÓGICO

Para llevar a cabo este estudio, se utiliza una metodología de diseño y simulación empleando las herramientas de programación y simulación proporcionadas por Siemens en el software TIA Portal V18, en conjunto con un PLC S7-1200. En la simulación, se utilizará el módulo ET200SP que cumplen con la función de circular el aire caliente generado por las resistencias y se expulsa por la salida del túnel de calor.

En este estudio, se procederá a sustituir el controlador PID actual del módulo ET200SP por un controlador difuso. Se busca crear y poner en funcionamiento un controlador difuso a través de la utilización del PLC S7-1200 y el software TIA Portal V18, con el fin de mejorar la regulación de la temperatura del módulo. Mediante esta metodología, será posible evaluar y ajustar el rendimiento del módulo ET200SP de manera más precisa y adaptativa, lo cual resultará en una mejora notable en la eficiencia del proceso.

Para las gráficas, con la capacidad de monitorear y generar gráficos en MATLAB contribuirá de manera significativa a la identificación de posibles áreas de mejora y optimización en el proceso, lo que llevará a un incremento notable en la eficiencia del sistema de control térmico. Este enfoque integral no solo garantiza un análisis detallado, sino que también establece una base sólida para implementar mejoras futuras en la regulación de procesos industriales.

En la figura 18 se puede visualizar el diagrama de flujo general del proyecto que se usará en la interfaz del TIA Portal.

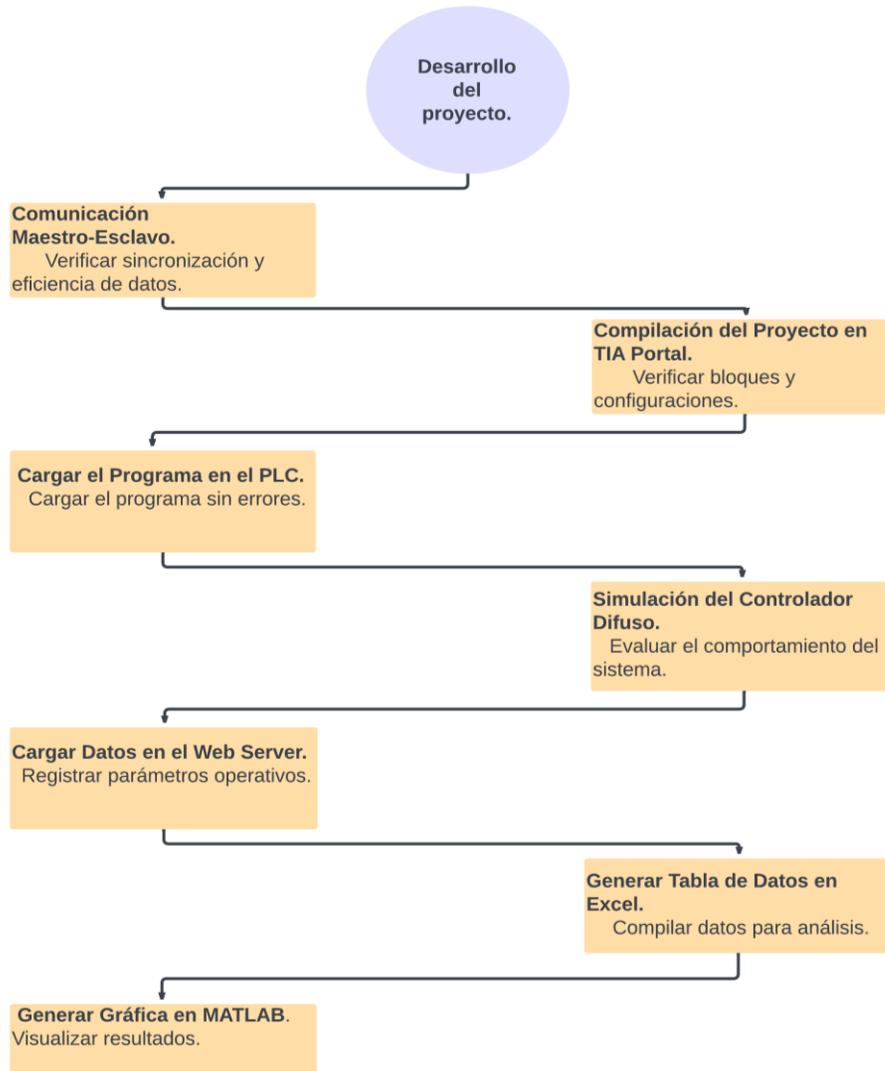


Figura 18. Diagrama de flujo del proceso general.

5.1 Desarrollo de proyecto en TIA PORTAL V18.

Para iniciar un proyecto en TIA Portal V18, figura 19, es fundamental abrir el software en la computadora y confirmar la disponibilidad del hardware requerido: un PLC Siemens S7-1200, un módulo ET200SP, sensores de temperatura de tipo PT100 y un ventilador de 110VAC, el cual se encargará de facilitar la circulación del aire caliente a través de la salida del túnel térmico. A

continuación, accede a TIA Portal, crea un nuevo proyecto asignándole un nombre y ubicación específicos, y selecciona la opción para inicializar el proyecto.

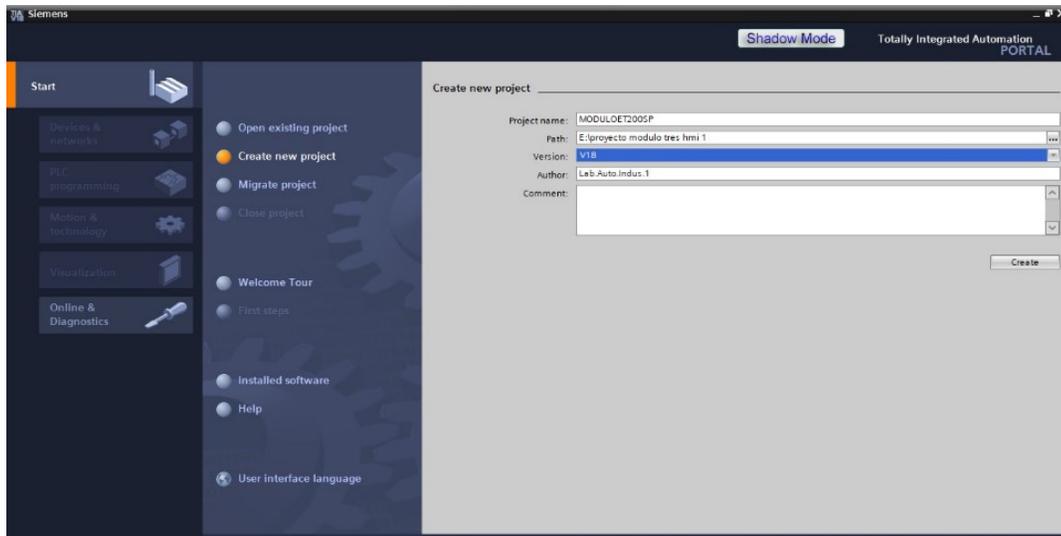


Figura 19. Inicialización del entorno de desarrollo de TIA Portal y verificación de los componentes de hardware

Posteriormente se configura el hardware en el proyecto se agregan el PLC S7-1200 desde la sección "Dispositivos y Redes" del "Árbol del Proyecto". Se selecciona el modelo "CPU 1214C DC/DC/DC 6ES7 214-1AE30-0XB0, versión 2.2 y se añade al proyecto., luego se incorpora el módulo ET200SP, para mejorar el uso de conexión entre el PLC S7-1200 y este módulo como se muestra en la figura 20.

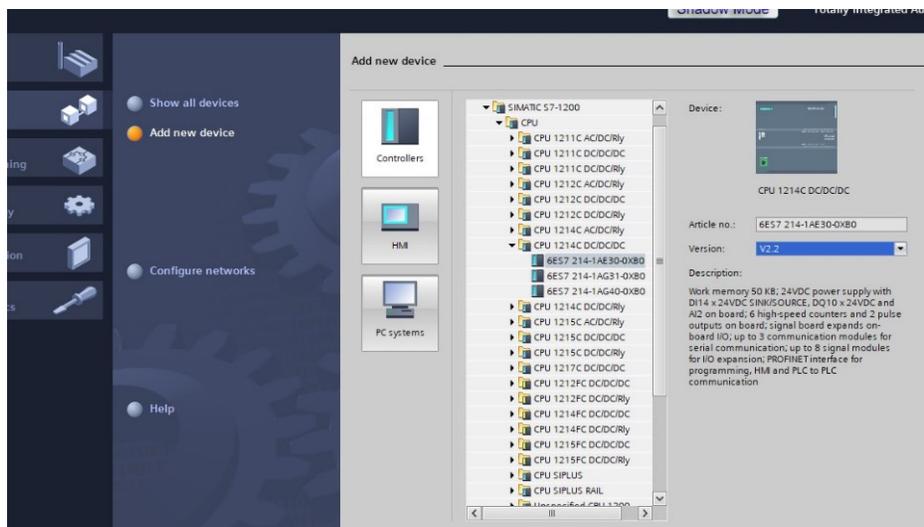


Figura 20. Selección del modelo e incorporación del módulo con su versión correspondiente.

5.1.1 Creación de los bloques de programación del PLC 1.

Se utiliza la interfaz de programación del controlador lógico programable a emplearse en el desarrollo del proyecto, figura 21. Se involucra la selección y configuración de la unidad de control PLC_1 en la sección "Devices" del entorno TIA Portal, lo cual sienta las bases para la posterior elaboración de los bloques de programa que constituirán la lógica de control del sistema.

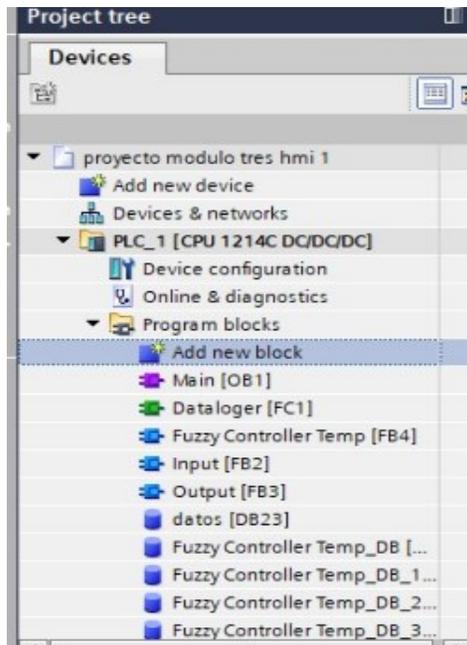


Figura 21. Configuración de la unidad de control PLC en TIA Portal.

5.1.2 Configuración y desarrollo de los bloques de programación del PLC en (MAIN)

Para crear FBs en TIA Portal V18, se comienza con acceder a la opción "Agregar nuevo bloque" y se elige "Bloque de Función (FB)", posteriormente, se define las variables de entrada, salida y de instancia que serán empleadas por el bloque, posteriormente se programa la lógica de control correspondiente, se utilizan lenguajes como Ladder (LAD), que permite una visualización y comprensión claras del flujo del programa como se ve en la figura 22.

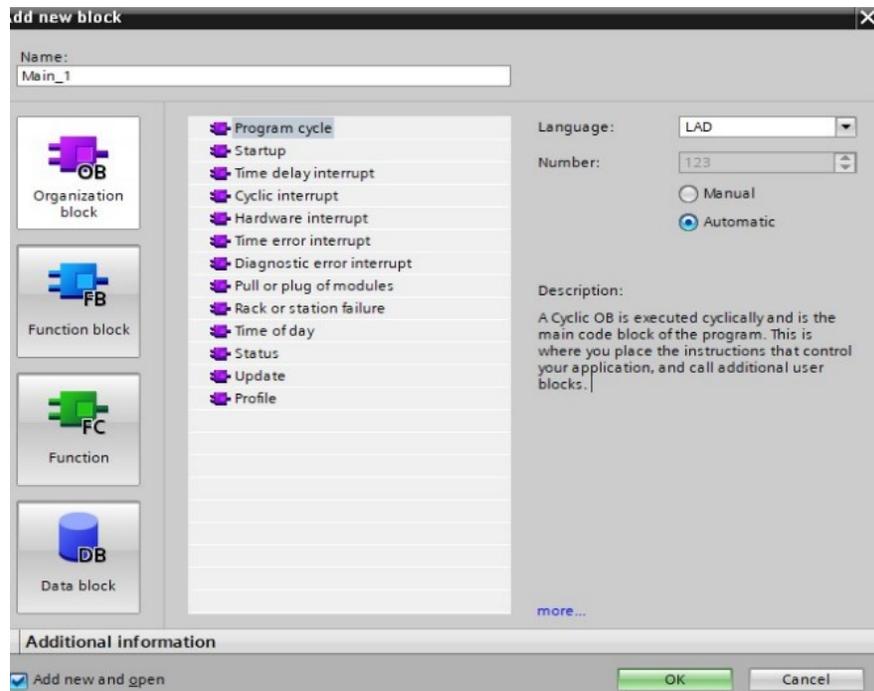


Figura 22. Creación de Bloques de Función (FB).

5.1.2.1 Control de Resistencias mediante Lógica Difusa.

Cada resistencia, R1 y R2, se controla mediante bloques de función (FB4) que aplican lógica difusa para procesar las entradas de temperatura, almacenadas en %MD102 (TEMP_R2) y %MD94 (TEMP_R1), junto con parámetros ajustables (a1, a2, a3, a4, time1, time2). En el caso de R1, el controlador difuso genera un resultado que se guarda en %M4.5, el cual es procesado por un bloque de salida (FB3) asociado al bloque de datos %DB9, lo que activa la resistencia a través de la salida %Q2.0. De manera similar, para R2, el controlador difuso toma las mismas entradas de temperatura y parámetros específicos, almacenando el resultado en %M1.4. Este resultado es luego utilizado por un bloque de salida (FB3) vinculado al bloque de datos %DB13, activando la resistencia R2 a través de la salida %Q2.1. En la figura 23 se muestra el sistema el cual proporciona un control preciso y adaptable de las resistencias, ajustándose dinámicamente a las condiciones térmicas y a las reglas definidas por los controladores difusos.

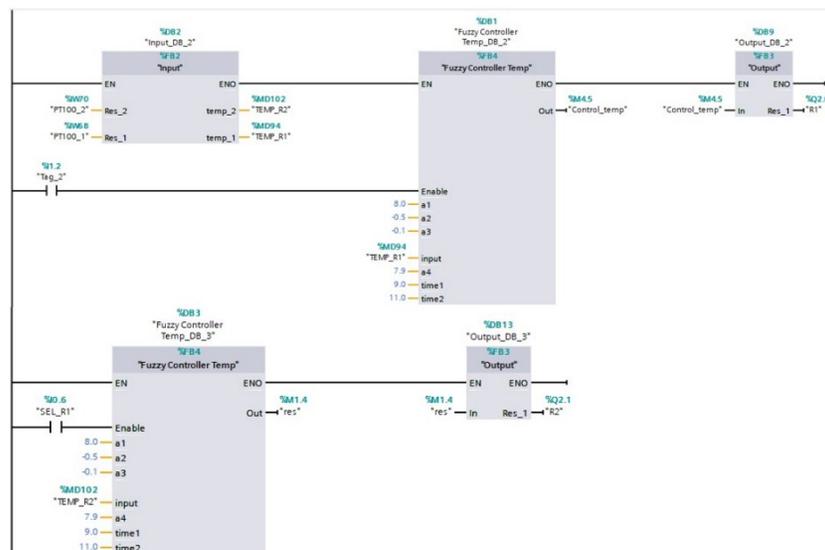


Figura 23. Asignación de Parámetros y Variables.

5.1.2.2 Bloque Setpoint y disipador de calor.

Se observan varios bloques de datos en el entorno de programación del TIA Portal: Input_DB [DB7] y Input_DB [DB11], figura 24, el cual almacenan y organizan las entradas del sistema; Output [FB3] regula las salidas del PLC, controlando las señales del sistema; Fuzzy Controller Temp se refiere al bloque del controlador difuso, que aplica la lógica de control difusa para ajustar el nivel del tanque; y datos [DB23] contiene información adicional o general utilizada por el programa.

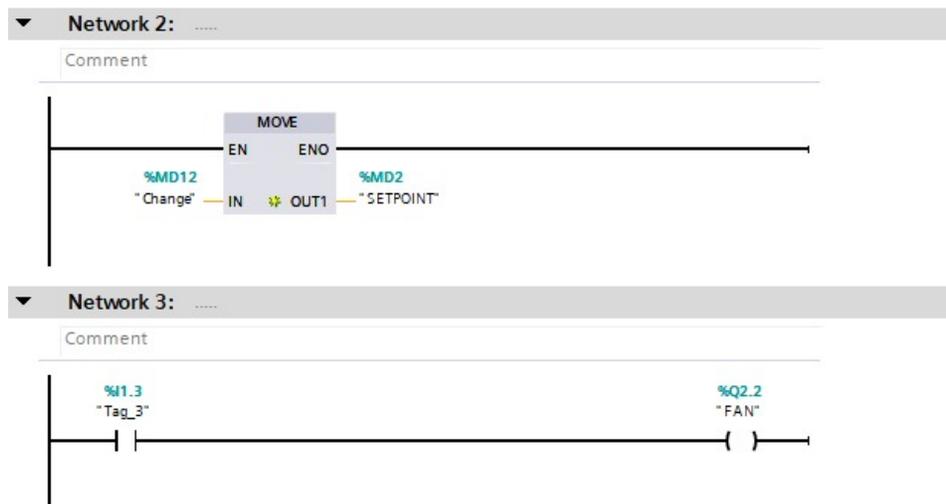


Figura 24. Bloque de Setpoint y disipador.

5.1.2.3 Bloque de recopilación datos en Web Server.

En el bloque %DB22, figura 25, se configura el bloque de funciones "DatalogCreate", que cuenta con múltiples entradas y salidas. Las entradas incluyen: EN (habilitación), REQ (solicitud de operación), RECORDS (cantidad de registros), FORMAT (configuración del formato), TIMESTAMP (sello de tiempo), NAME (nombre de los datos), ID (identificador en Datalog), y DATA (dato a almacenar). Las salidas del bloque son: ENO (habilitación), DONE (operación finalizada), BUSY (proceso en curso), ERROR (detector de fallos) y STATUS (estado del proceso). En términos de conexiones, REQ está activado con true, y RECORDS está configurado en 1000, que indica el número de registros que se desea obtener y este puede variar. Las demás entradas están vinculadas a variables del bloque de datos "datos", al igual que las salidas.

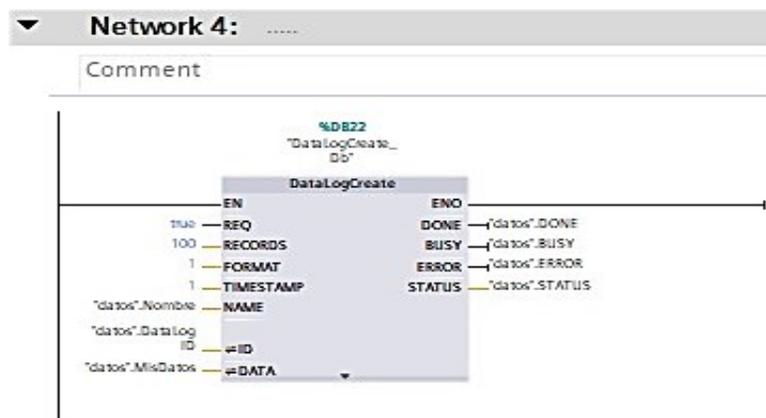


Figura 25. Bloque Web Server.

5.1.2.4 Selector de Resistencias R1 y R2.

El bloque MOVE se realiza la instrucción al sistema para que transfiera datos identificados como erróneos desde el punto de ajuste %MD2, etiquetado como " SET POINT ", hacia una salida designada "OUT1". Este proceso se realiza con el fin de manejar y corregir la información antes de su uso, el segundo segmento realiza la instrucción MOVE, realiza el movimiento de datos desde el punto de ajuste %MD94, que está relacionado con la variable "TEMPERATURA_R1" (en esta

variable puede seleccionar los datos de que resistencia que se desean tomar R1, R2), al destino denominado "OUT1", que representa los datos refinados del sensor bajo la etiqueta "Mis Datos". Estas acciones aseguran que los datos procesados sean precisos y estén correctamente ubicados para su análisis y visualización, esto garantiza la integridad y fiabilidad del sistema de control automatizado, tal como lo muestra la figura 26.

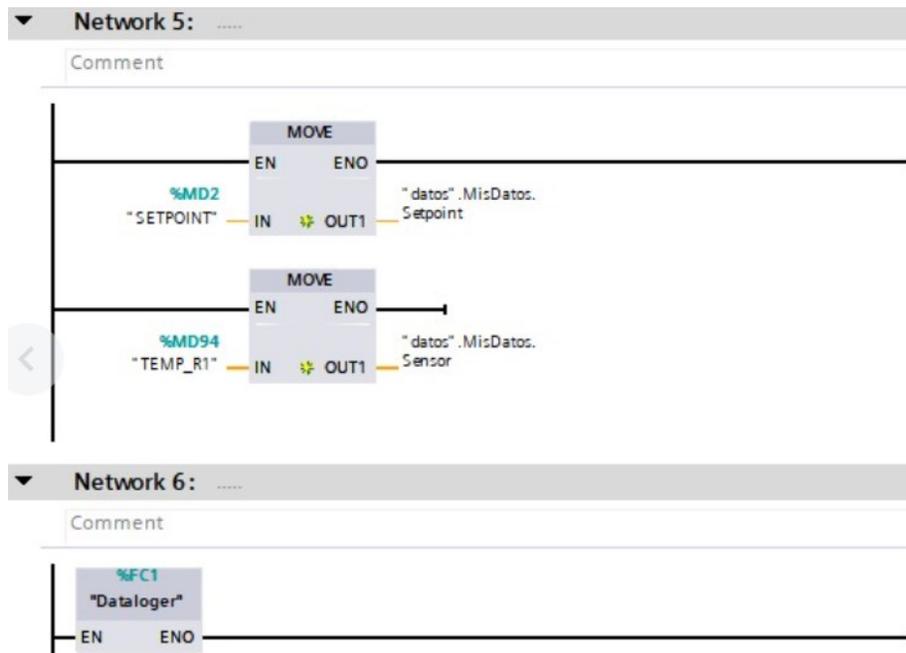


Figura 26. Selección de Resistencias R1 y R2.

5.1.3 Desarrollo del dataloger.

Se añade un nuevo bloque denominado "dataloger" (FC1), figura 27, en el sistema de control que estará encargado de gestionar el proceso de almacenamiento de datos de temperatura. Este bloque funcionará como una función (FC) que implementa la lógica necesaria para la captura y registro de datos de temperatura en intervalos específicos, asegurando la integridad y disponibilidad de la información para su posterior análisis.

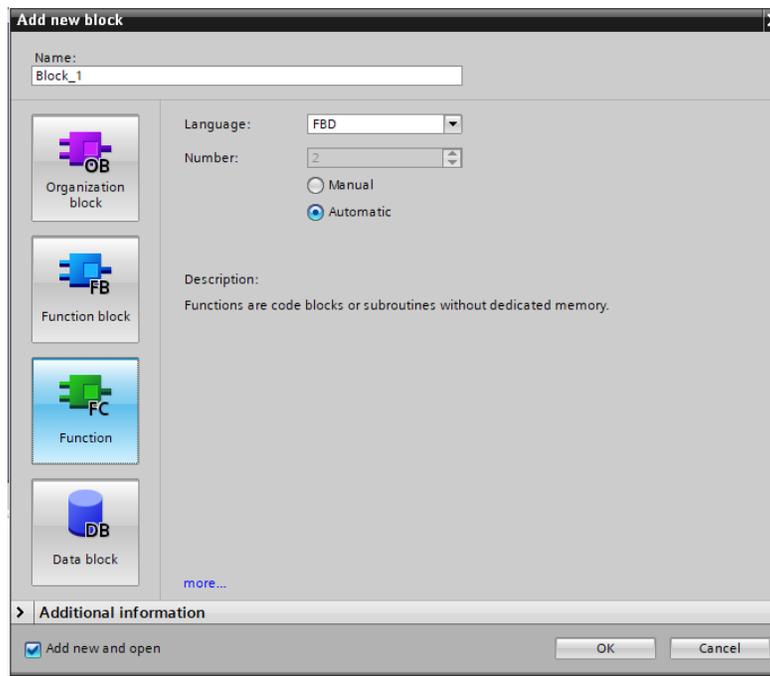


Figura 27. Desarrollo Dataloger.

5.1.3.1 Bloque TON

La imagen presenta un diagrama de programación en el que se utilizan dos bloques de temporización TON (Time ON) para gestionar dos intervalos de tiempo distintos, denominados "Tiempo 0" y "Tiempo 1", figura 28. El primer bloque, identificado como %DB14, recibe una señal de entrada (IN) que activa el temporizador, y su salida (Q) se utiliza para desencadenar el siguiente bloque. Este último, %DB15, también es un temporizador que se activa tras la

finalización del primero, permitiendo el control de un segundo intervalo de tiempo. Ambos temporizadores tienen configuraciones de tiempo predefinidas (PT) y generan un tiempo transcurrido (ET) que se puede utilizar en otras operaciones lógicas del sistema.



Figura 28. Bloque TON.

5.1.3.2 Función DataLogOpen

El bloque de función denominado "DataLogOpen_B", figura 29, identificado como %DB16, que se utiliza para iniciar un proceso de registro de datos. Este bloque presenta múltiples entradas y salidas: la señal de habilitación (EN) y la salida (ENO) que indica el estado de operación. La entrada de solicitud (REQ) activa el proceso, mientras que la salida DONE indica su finalización. También incluye un modo de operación (MODE) y un campo para el nombre del registro (NAME). Además, muestra indicadores de estado como BUSY, ERROR y STATUS, que permiten monitorizar el estado del bloque durante su ejecución, así como un identificador único (ID) asociado a los datos registrados.

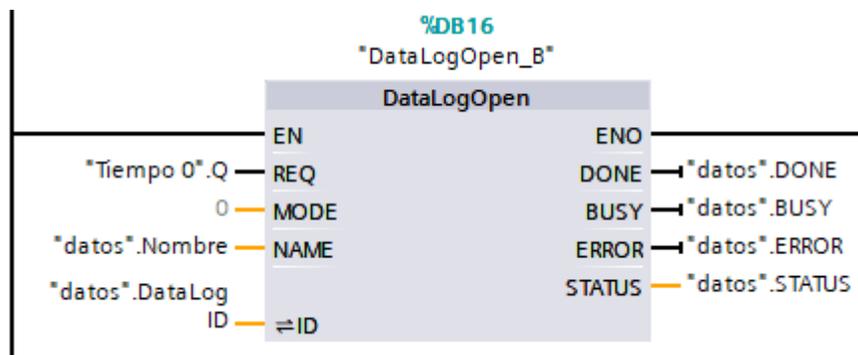


Figura 29. DataLogOpen_B.

5.1.3.3 Función Set-Reset y Temporizador

Se hizo uso de un circuito de control que utiliza un bloque de tipo SR (Set-Reset) y un temporizador TON (Time ON) identificado como %DB18, relacionado con "Tiempo 3", figura 30. El bloque SR se activa mediante dos condiciones: la señal de "Tiempo 0" (Q) y dos auxiliares, "auxiliar3" y "auxiliar4". Cuando se cumplen estas condiciones, el bloque SR establece su salida (Q), que a su vez activa el temporizador. El temporizador monitoriza un intervalo de tiempo definido (PT), generando un tiempo transcurrido (ET) que se puede utilizar para otras operaciones lógicas. Este sistema permite gestionar eventos temporales en función del estado de las señales de entrada.

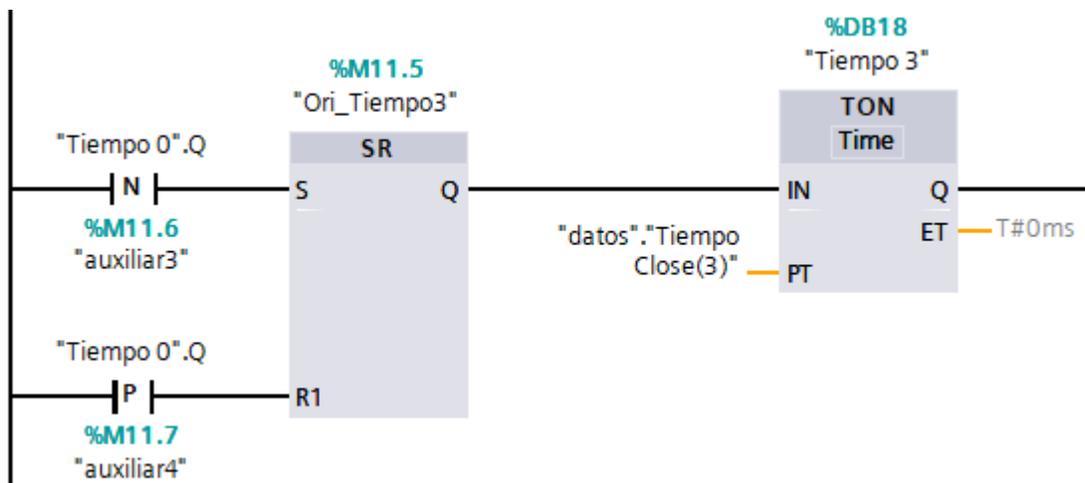


Figura 30. Función Set-Reset y Temporizador.

5.1.3.4 Función DataLogWrite_DB

En el bloque de función designado "DataLogWrite_DB", figura 31, identificado como %DB19, diseñado para gestionar el proceso de escritura de datos en un sistema de registro. Este bloque incluye entradas y salidas clave: la señal de habilitación (EN) y la salida (ENO) que indica el estado de operación. La entrada de solicitud (REQ) activa el proceso de escritura, mientras que la salida DONE confirma su finalización. También se indican estados como BUSY,

ERROR y STATUS, que permiten monitorizar el progreso y la integridad de la operación. La entrada %M600.5 corresponde a un reloj de 1 Hz que actúa como desencadenante del proceso, y el identificador de datos (ID) permite asociar la escritura a un conjunto específico de datos registrados.

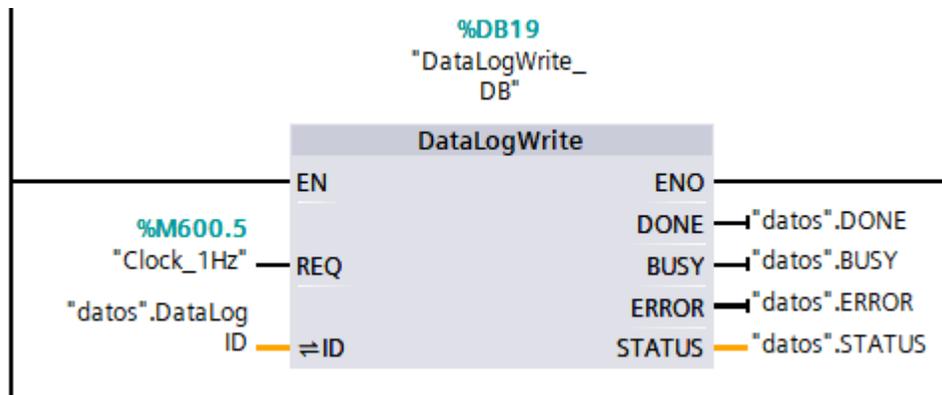


Figura 31. Función Set-Reset y Temporizador.

5.1.3.1 Función DataLogClose_DB.

En el bloque funcional llamado "DataLogClose_DB", figura 32, designado como %DB20, se encarga de concluir el proceso de registro de datos. Este bloque posee entradas y salidas importantes: la señal de habilitación (EN) y la salida (ENO) que indica el estado operativo. La entrada de solicitud (REQ) activa el cierre del registro, mientras que la salida DONE confirma la finalización del proceso. Además, se incluyen indicadores de estado como BUSY, ERROR y STATUS, que permiten monitorear la operación en tiempo real. La entrada "Tiempo 3".IN funciona como el desencadenante para iniciar el cierre, y el identificador de datos (ID) vincula la operación con el conjunto de datos en gestión.

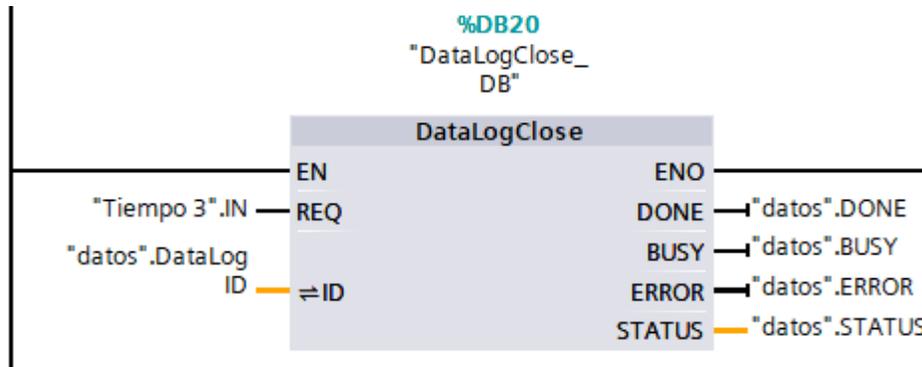


Figura 32. Función DataLogClose_DB.

5.1.4 Desarrollo del HMI KTP700.

Al iniciar el programa TIA Portal V18, el procedimiento inicial es equivalente al utilizado en un PLC, comenzando con la creación de un nuevo proyecto. Tras la creación del proyecto, se procede a configurar el dispositivo correspondiente. Para ello, se debe seleccionar la opción "Add devices". Como se puede apreciar en la figura 33.

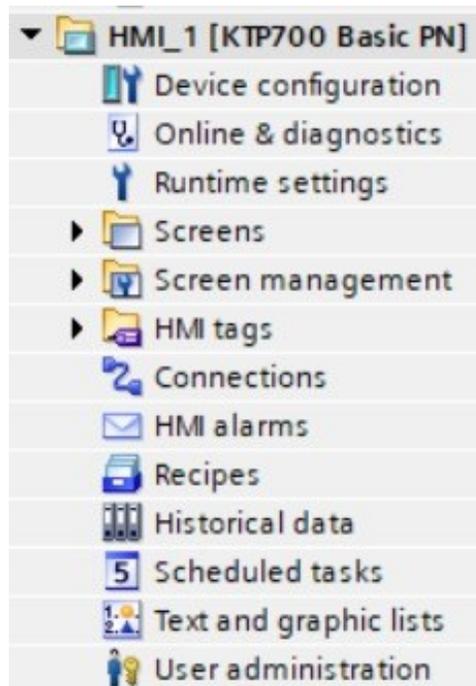


Figura 33. Configuración de dispositivo HMI KTP – 700.

5.1.4.1 Configuración del hardware KTP700.

Se selecciona el HMI correspondiente, que en este proyecto es el modelo KTP700 Basic (Ítem 2) con la versión V17.0.0. Para finalizar la configuración, se confirma haciendo clic en la opción "OK". Como se observa en la figura 34.

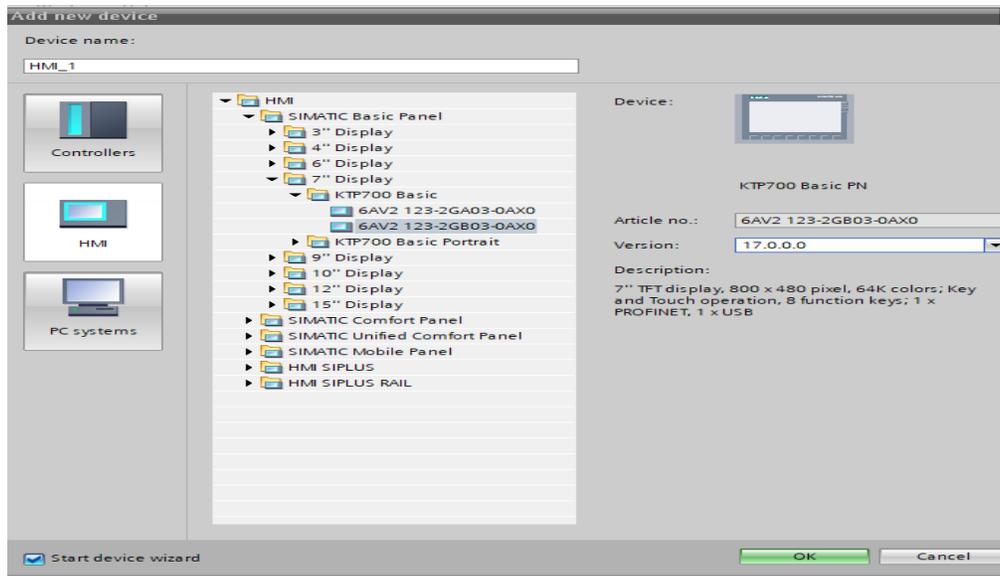


Figura 34. Selección del HMI.

Con esta acción, el HMI queda correctamente integrado en el proyecto, lo que permite continuar con las siguientes etapas de configuración y desarrollo de la interfaz de usuario.

5.1.4.2 Establecimiento de la Comunicación entre el KTP700 y el PLC S7-1200.

Una vez que se incorpora el dispositivo, se presenta una ventana denominada "HMI Device", figura 35, en la que se selecciona el PLC adecuado.

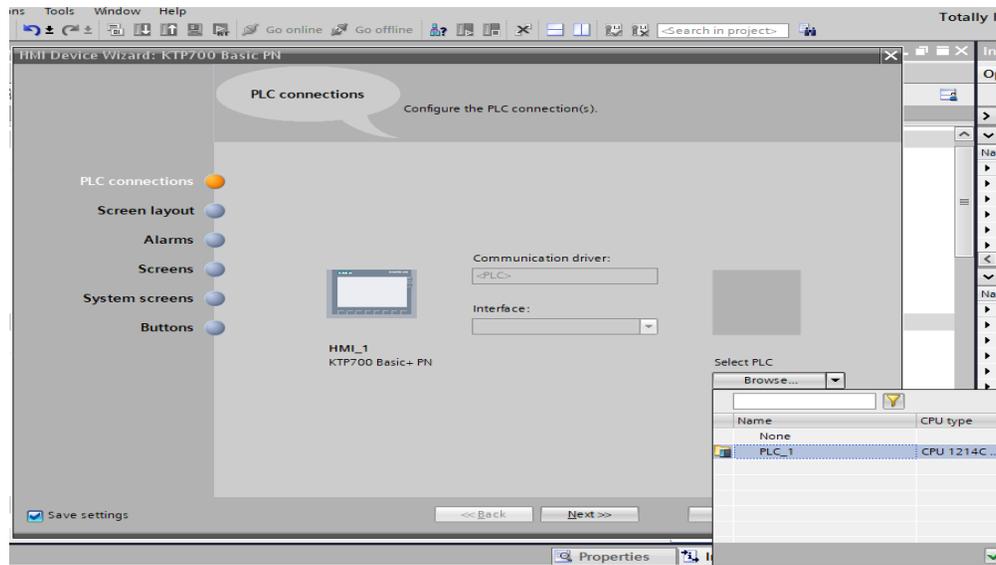


Figura 35. "HMI Device".

Una vez identificado, se procede a confirmar la selección. Posteriormente, se muestra una ventana de confirmación, figura 36. Este paso es esencial para garantizar la correcta integración y operación conjunta entre el PLC y el HMI.

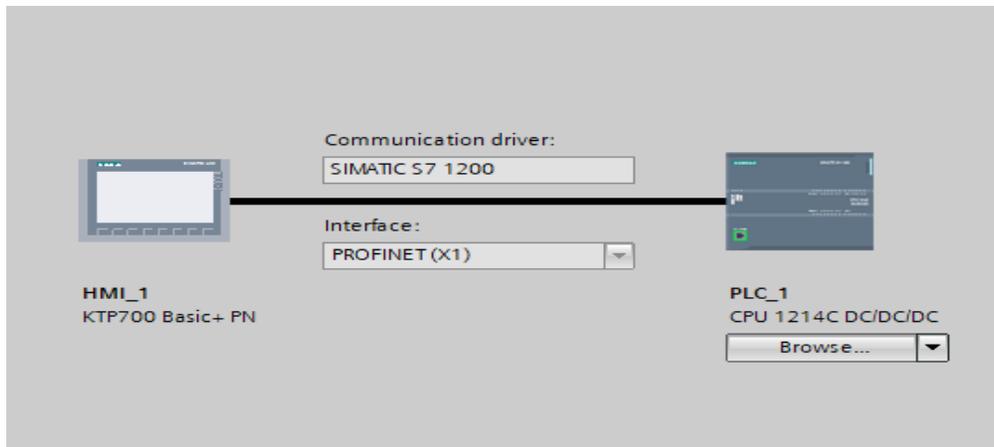


Figura 36. Ventana del HMI seleccionado.

5.1.4.3 Creación de pantallas.

Una vez finalizada la configuración del HMI, se procede a crear las pantallas que se visualizarán en la sección "Screens". En este proyecto, se desarrollarán cuatro pantallas, que

permitirán visualizar cada fase de la simulación de manera virtual. Para añadir estas pantallas, se utiliza la opción "Add New Screen", figura 37.

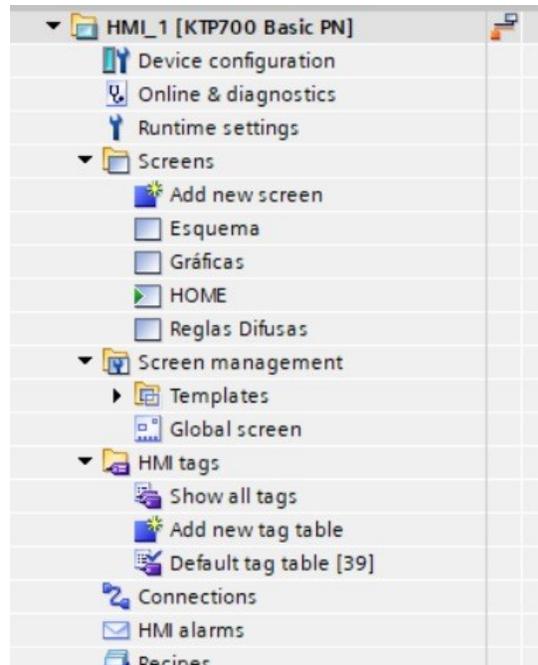


Figura 37. Opción "Add New Screen".

5.1.4.4 Diseño de pantallas.

Una vez creadas las pantallas del HMI, es crucial editarlas para mejorar la experiencia del operador. El primer paso es cambiar el nombre predeterminado proporcionado por el HMI KTP700, como "Screen_1". Para ello, haz clic derecho sobre la pantalla y selecciona la opción "Rename", figura 38, luego asigna el nuevo nombre "Home."

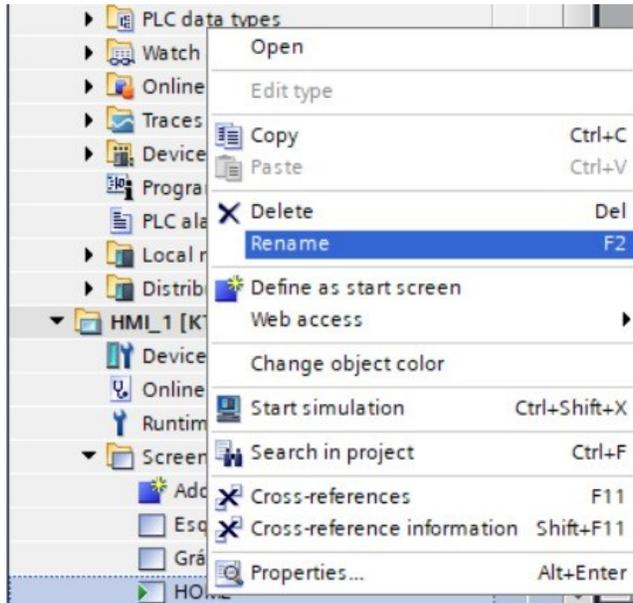


Figura 38. Asignación de nombre para el proyecto.

5.1.4.5 Insertar Gráficos en las Pantallas.

Para esta sección, será necesario usar las librerías de gráficos, que están ubicadas en “Toolbox”. En la opción de “Graphics”, figura 39, se encuentran los elementos necesarios para la creación del HMI como el ventilador y las resistencias, permitirán visualizar el estado del sistema y su funcionamiento.

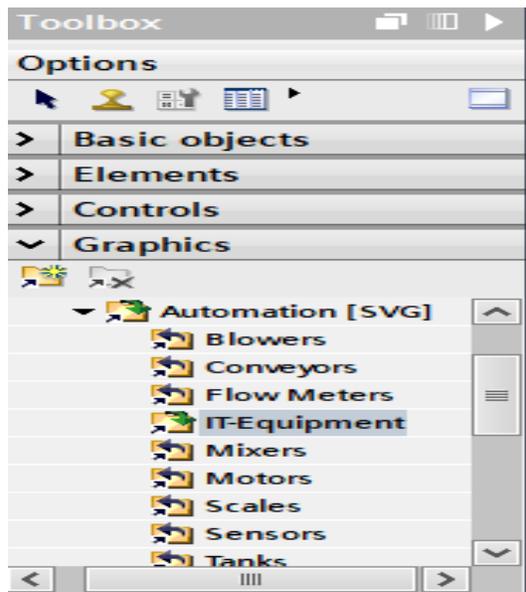


Figura 39. Elementos para la creación del HMI.

5.1.4.6 Integrar botones de la librería Toolbox.

Para integrar botones de la librería Toolbox en el HMI, comienza abriendo el software de diseño y accediendo a la sección “Toolbox.” Selecciona el tipo de botón que deseas utilizar, como “Start” o “Stop,” y arrástralo a la pantalla de diseño como se puede observar en la figura 40. Ajusta su tamaño y posición para que sea accesible. Luego, haz clic derecho en el botón y selecciona “Properties” para personalizar el texto y los colores. Asigna la acción correspondiente en la sección de “Actions” o “Events.”

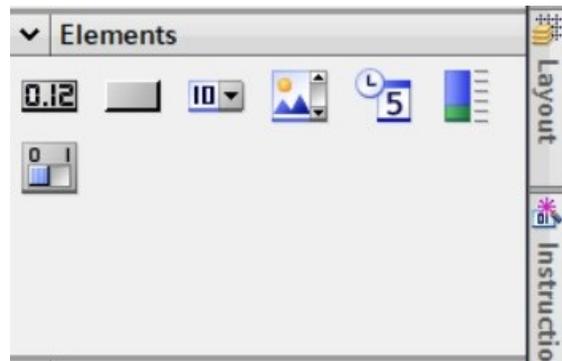


Figura 40. Integración de botones en la librería.

5.1.4.7 Insertar objetos básicos de librería Toolbox.

Para la integración de objetos en el proyecto y mejorar la estética o señalar un proceso específico, se recurre nuevamente a la librería mencionada, “Toolbox.” En la sección de “Basic Objects”, figura 41, se selecciona el objeto deseado, que luego se arrastra y se coloca en la pantalla correspondiente. Una vez ubicado, se puede proceder a editar sus propiedades según las necesidades del diseño.

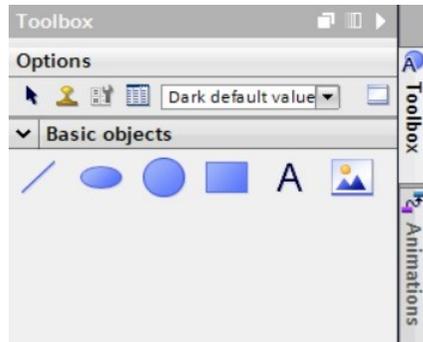


Figura 41. Integración de objetos por Basic Objects.

5.1.4.8 Diseño de la pantalla " HOME".

En la pantalla HOME, En la presentación del proyecto, se presenta un diseño atractivo que destaca el “DISEÑO DE UN CONTROLADOR DIFUSO PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA DEL MÓDULO ET200SP USANDO EL S7-1200.” Los integrantes del equipo, JEREMY RICARDO PEÑAFIEL GARZÓN y JAVIER SEBASTIÁN SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, así como su tutor, ING. TEDDY JHINNESE NEGRETE PEÑA, MSC, figura 42, están claramente identificados. La interfaz incluye botones de navegación como “Inicio,” “Reglas Difusas,” “Gráficas,” y “Esquema,” lo que facilita el acceso a distintas secciones del HMI. Además, se presenta una imagen del módulo de control, añadiendo un elemento visual atractivo y contextualizando la funcionalidad del sistema. Esta presentación no solo proporciona información esencial, sino que también está diseñada para ser intuitiva y fácil de usar para los operadores.



Figura 42. Diseño del HMI con el nombre del proyecto y sus integrantes.

5.1.4.1 Diseño de la pantalla “ESQUEMA”.

La segunda pantalla titulada Esquema, figura 43, ofrece una interfaz clara y eficiente para el operador. En esta pantalla, se destacan los botones “Start” y “Stop,” que permiten al usuario iniciar y detener el sistema de control de manera sencilla. Además, se incluye un campo de setpoint donde el operador puede ingresar la temperatura deseada, lo que asegura un control preciso del proceso.

En la parte izquierda, se muestran las resistencias, denominadas “Resistencia 1” y “Resistencia 2,” facilitando la identificación de cada componente. A la derecha, un gráfico del ventilador indica su estado operativo, permitiendo al usuario comprender de manera rápida la dinámica del sistema.



Figura 43. Esquema del sistema de control.

5.1.4.2 Diseño de la pantalla “GRAFICAS”.

La visualización de datos es crucial para el control efectivo del sistema. En la segunda pantalla, denominada “Gráfica”, figura 44, se presenta un gráfico que muestra los puntos de setpoint, así como las entradas y salidas, permitiendo a los usuarios monitorear el rendimiento en tiempo real. Los gráficos de línea representan las tendencias de temperatura, facilitando el análisis, mientras que los colores negro, rojo y verde distinguen claramente entre setpoint, output e input, mejorando así la legibilidad de la información presentada. Esta claridad es fundamental para que los operadores tomen decisiones informadas y efectivas.

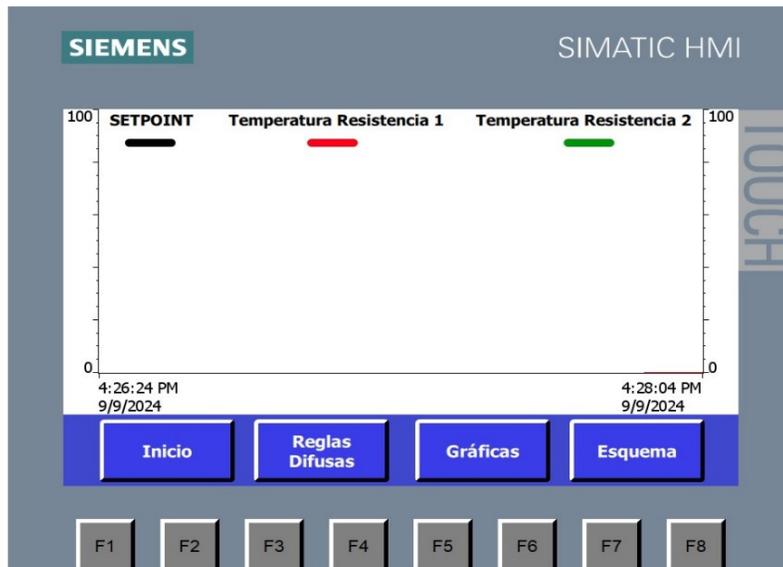


Figura 44. Pantalla HMI donde se visualizan las graficas.

5.1.4.1 Diseño de la pantalla “REGLAS DIFUSAS”.

La tercera pantalla, titulada “Reglas Difusas,” presenta el estado de los controladores difusos vinculados a las resistencias, figura 45. Cada controlador cuenta con su propio indicador, lo que permite a los usuarios monitorear el rendimiento de cada componente de manera individual. Entre las características destacadas de esta pantalla se encuentra la medición en tiempo real, donde los indicadores reflejan valores que se actualizan continuamente, facilitando así la toma de decisiones informadas por parte de los operadores. Además, se ofrece interactividad, permitiendo a los usuarios ajustar los parámetros de los controladores según sea necesario, lo que mejora la adaptabilidad y el control del sistema.

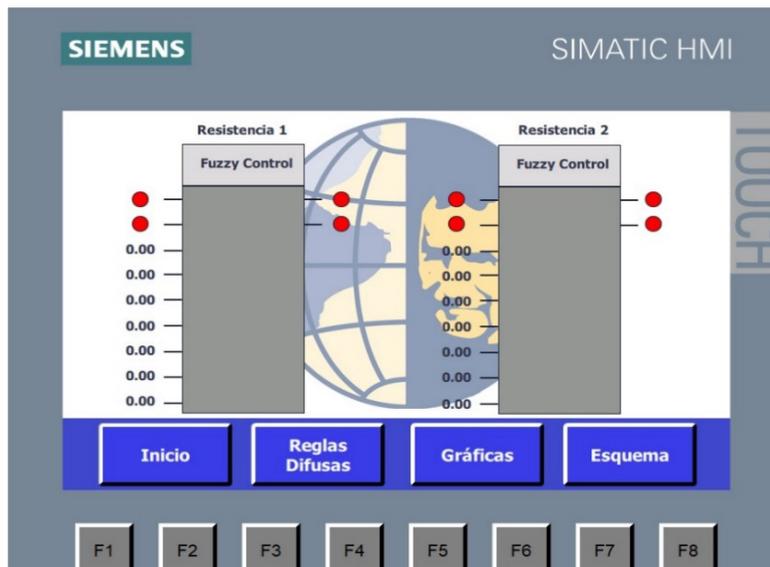


Figura 45. Controlador difuso vinculado a las resistencias.

5.1.5 Programación de la Lógica de Control.

En la figura 46 se observa, El código empieza con un comentario que señala "VALOR DE ERROR", lo cual indica que esta lógica de programación está diseñada para gestionar situaciones en las que se detectan valores fuera del rango esperado o desviaciones significativas en la variable de temperatura, figura 46. Se define una variable "a" para calcular la diferencia entre el valor de consigna (Setpoint) y la temperatura medida (Input), lo que resulta fundamental para implementar las acciones de control necesarias, una vez que las variables han sido definidas, se procede a programar la lógica de control dentro del bloque de función (FB), se utiliza el lenguaje de programación tipo diagrama de escalera (Ladder Diagram o LAD), a este enfoque permite una representación visual y clara del flujo del programa, facilita la comprensión y el mantenimiento de la secuencia de operaciones y las declaraciones condicionales IF-THEN-ELSE, estas condiciones evalúan diferentes situaciones basadas en los valores de "a" y otras variables relacionadas, determina si la salida "Out" debe ser verdadera (TRUE) o falsa (FALSE). Además, se incluye lógica adicional para controlar un contador "counter", que se incrementa o se restablece en función

de ciertos criterios predefinidos. Esta representación visual y estructurada en LAD, figura 47, ayuda a entender mejor el comportamiento del controlador y simplifica su mantenimiento.

```

IF... CASE... FOR... WHILE.. (*...*) REGION
OF... TO DO.. DO...

4
5 IF #Enable THEN
6   IF #A < #a2 THEN
7     #Out := FALSE;
8   END_IF;
9   IF #A > #a1 THEN
10    #Out := TRUE;
11  END_IF;
12  IF #A < #a4 AND #A > #a3 THEN
13    #Out := FALSE;
14    IF #Out = FALSE AND "Clock_1Hz" = TRUE THEN
15      #counter := #counter + 1;
16    END_IF;
17
18    IF #counter > #time1 THEN
19      #Out := TRUE;
20      IF #Out = TRUE AND #counter = #time2 THEN
21        #counter := 0;
22      END_IF;
23    END_IF;
24  END_IF;
25
26 END_IF;
27
28

```

Figura 46. Programación lógica.

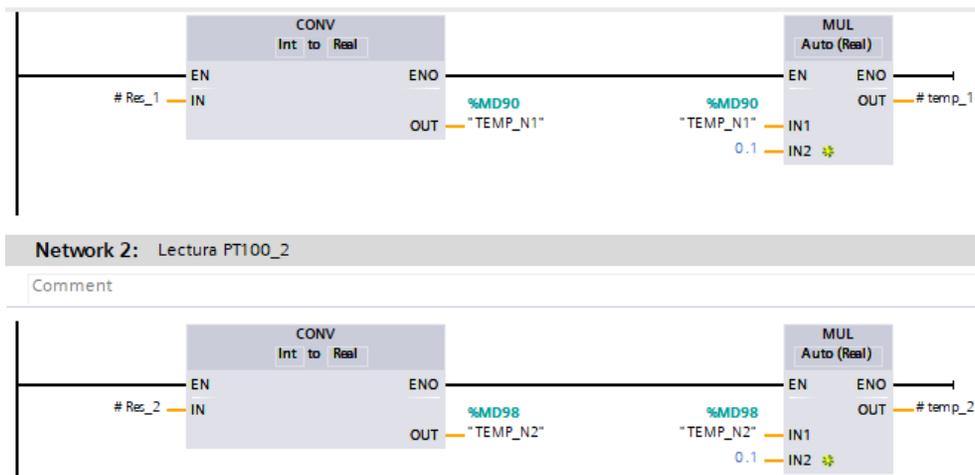


Figura 47. Representación estructurada en LAD.

5.1.6 Configuración de Bloques de Datos del Controlador Difuso.

Se realizan los bloques de datos, figura 48, que son utilizados en el programa del controlador difuso, estos bloques incluyen configuraciones de variables de entrada y salida, así como parámetros estáticos necesarios para el funcionamiento del sistema. Cada bloque detalla los tipos de datos, valores iniciales y atributos de accesibilidad, figura 49, para así proporcionar una visión integral de la estructura y funcionalidad del controlador.

datos									
	Name	Data type	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Comment
1	▼ Static			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	▣ Nombre	String	'RegistroDatos'	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	▣ DataLogID	DInt	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	▣ Cabecera	String	'Tiempo,Setpoi...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	▣ ▸ MisDatos	Struct		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	▣ TiempoON(0)	Time	T#15ms	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	▣ TiempoOFF(1)	Time	T#15ms	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	▣ TiempoWrite(2)	Time	T#4ms	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	▣ TiempoClose(3)	Time	T#6ms	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	▣ DONE	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11	▣ BUSY	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
12	▣ ERROR	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
13	▣ STATUS	Word	16#0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 48. Bloques de datos. [DB23].

Fuzzy Controller Temp_DB_2 (snapshot created: 8/29/2024 5:38:43 PM)									
	Name	Data type	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Comment
1	▼ Input			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	▣ Enable	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	▣ a1	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	▣ a2	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	▣ a3	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	▣ input	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	▣ a4	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	▣ time1	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	▣ time2	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	▼ Output			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11	▣ Out	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
12	▣ InOut			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
13	▼ Static			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
14	▣ counter	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
15	▣ A	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 49. Fuzzy Controller Temp_DB_2.

En la figura 50, se muestra la función del Controller de Temperatura, con sus respectivos nombres y variables.

Fuzzy Controller Temp_DB_3 (snapshot created: 8/29/2024 5:38:43 PM)									
	Name	Data type	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Comment
1	▼ Input			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	▪ Enable	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	▪ a1	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	▪ a2	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	▪ a3	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	▪ input	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	▪ a4	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	▪ time1	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	▪ time2	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	▼ Output			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11	▪ Out	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
12	InOut			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
13	▼ Static			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
14	▪ counter	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
15	▪ A	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 50. Fuzzy Controller Temp_DB_3 [DB3].

En la figura 51, se muestra la función Input_DB2, con sus respectivos nombres y variables.

Input_DB_2 (snapshot created: 8/29/2024 5:38:43 PM)									
	Name	Data type	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Comment
1	▼ Input			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	▪ Res_2	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	▪ Res_1	Int	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	▼ Output			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	▪ temp_2	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	▪ temp_1	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	InOut			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	▼ Static			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	▪ Norm	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 51. Input_DB_2.

En la figura 52, se muestra la función Output_2, con sus respectivos nombres y variables.

Output_DB_2 (snapshot created: 8/29/2024 5:38:43 PM)									
	Name	Data type	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Comment
1	▼ Input			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	▪ In	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	▼ Output			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	▪ Res_1	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	InOut			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	Static			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 52. Output_DB2.

En la figura 53, se muestra la función del Output_DB3, con sus respectivos nombres y variables.

Output_DB_3 (snapshot created: 8/29/2024 5:38:43 PM)									
	Name	Data type	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Comment
1	Input			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	In	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	Output			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	Res_1	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	InOut			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	Static			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 53. Output_DB3.

En la figura 54, se muestra la función de parámetros, con sus respectivos nombres y variables.

Param (snapshot created: 8/29/2024 5:38:43 PM)									
	Name	Data type	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Comment
1	Static			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	Enable	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	SP (cm)	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	Nivel (cm)	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	CV	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	a1	Real	20.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	a2	Real	50.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	a3	Real	150.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	b1	Real	30.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	b2	Real	60.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11	b3	Real	100.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 54. Parámetros.

5.2 Desarrollo del proyecto en Matlab.

Matlab se utiliza para el desarrollo, análisis y visualización de datos en el control difuso aplicado al túnel de calor, inicialmente, se descarga el archivo Excel desde el servidor web del TIA Portal y se importan los datos mediante funciones como xlsread. Esta importación organiza la información en variables para el set point, tiempo y temperatura, lo que facilita un procesamiento eficiente, posteriormente, se generan gráficas que ilustran la variación de la temperatura en función del tiempo y en comparación con el set point, se utiliza la función plot. Estas gráficas se personalizan para mejorar su comprensión, se ajustan a los ejes, se agregan títulos, etiquetas y

configuraciones de leyendas. La personalización permite evaluar en detalle la respuesta del sistema de control y su eficacia para mantener la temperatura deseada, finalmente, los resultados gráficos y los datos procesados se exportan en formatos como PNG o PDF para su inclusión en la tesis. El enfoque con Matlab permite un análisis completo y una representación visual clara, fundamental para evaluar el rendimiento del controlador difuso en el control de temperatura del túnel de calor.

5.2.1 Creación del archivo (.m)

Para el desarrollo en Matlab, primero se ingresa al entorno de Matlab y se crea un nuevo script o archivo (.m), este archivo será el contenedor del código necesario para realizar el análisis y la visualización de los datos, el código incluirá la configuración de las variables necesarias, como el tiempo, la temperatura y el set point. En el script, se definirán los datos que se van a graficar, esto se puede hacer directamente en el código o mientras se carga el conjunto de datos desde un archivo externo como se observa en la figura 55. Luego, se utilizarán funciones de Matlab como plot o plot3 para graficar los datos.

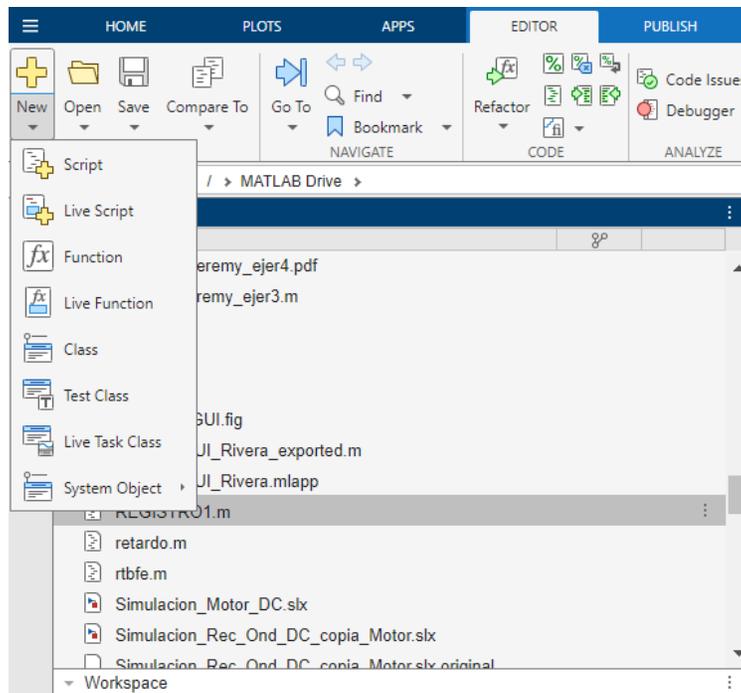
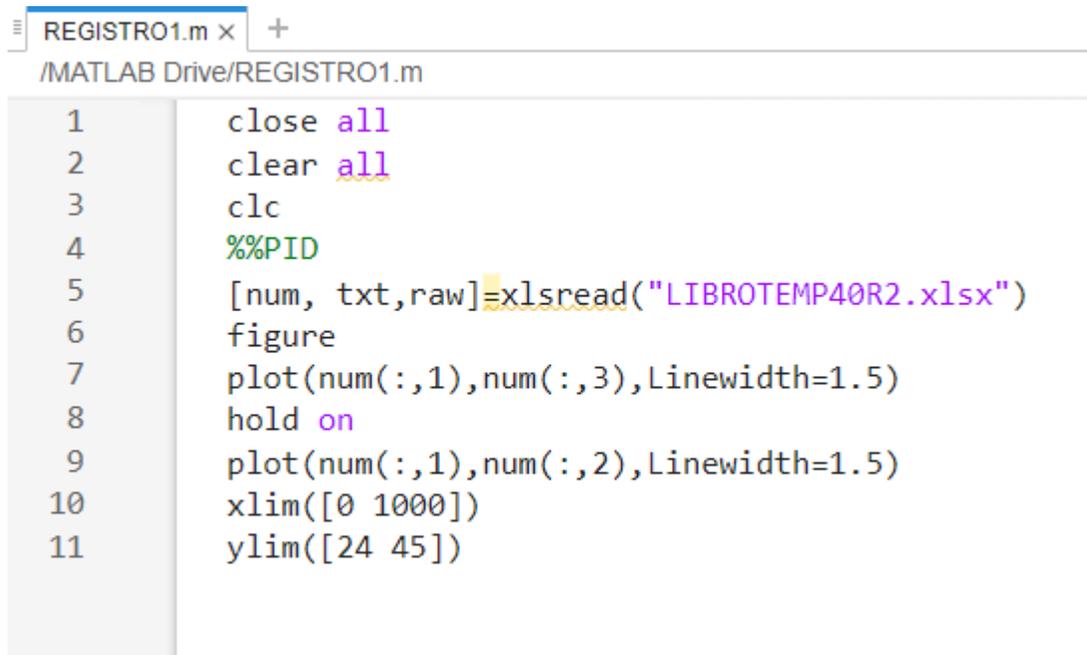


Figura 55. Creación de script.

5.2.2 Desarrollo del código en el archivo (.m)5

El código de Matlab en esta programación, figura 56, comienza con la limpieza del entorno y la ventana de comandos, seguido de la importación de datos desde un archivo Excel (LIBROTEMP40R2.xlsx), donde los datos numéricos, de texto y combinados se almacenan en las variables num, txt y raw. Luego, se crea una figura para graficar los datos, donde se plotean las columnas que representan el tiempo y la temperatura, así como el set point. Los ejes X e Y se ajustan para mostrar un rango de 0 a 1000 en tiempo y de 24 a 45 en temperatura, la visualización debe ser clara y precisa de la información. Se puede visualizar el desarrollo del código en la figura.



```
REGISTRO1.m x +
/MATLAB Drive/REGISTRO1.m
1 close all
2 clear all
3 clc
4 %%PID
5 [num, txt, raw]=xlsread("LIBROTEMP40R2.xlsx")
6 figure
7 plot(num(:,1),num(:,3),Linewidth=1.5)
8 hold on
9 plot(num(:,1),num(:,2),Linewidth=1.5)
10 xlim([0 1000])
11 ylim([24 45])
```

Figura 56. Código para análisis de datos de temperatura.

VI RESULTADOS

6.1 Ejecución del controlador difuso utilizando TIA Portal y MATLAB.

6.1.1 Comunicación maestro esclavo con el módulo ET200SP y el HMI.

En este proceso se garantiza una comunicación eficiente y la correcta sincronización de los equipos, así poder minimizar el riesgo de pérdida de datos o información. La implementación adecuada de estos procedimientos, figura 57, asegura la integridad de los datos y optimiza la operatividad del sistema, lo que resulta en un rendimiento más confiable y consistente.

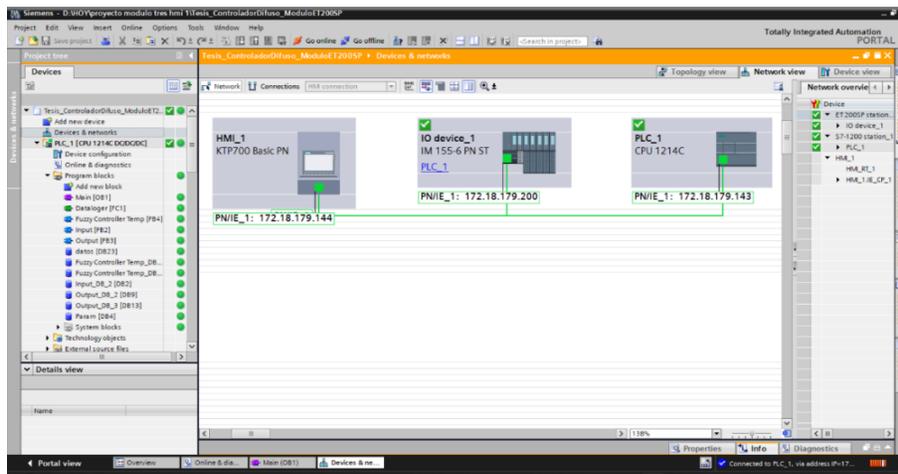


Figura 57. Comunicación maestro esclavo en TIA Portal V18.

6.1.2 Compilación del proyecto en TIA Portal V18

Se realiza la compilación del proyecto en TIA Portal V18, para verificar que todas las configuraciones de hardware y los bloques de programación estén correctamente establecidos. En el árbol del proyecto, se observa la estructura de los bloques de programa, incluyendo el bloque principal (Main), el datalogger (FC1), y los bloques del controlador difuso (FB4) y de entrada (FB2). Esta organización garantiza que todos los componentes se integren adecuadamente para el funcionamiento óptimo del controlador. En la Figura 58, se presenta el estado de la compilación del controlador difuso.

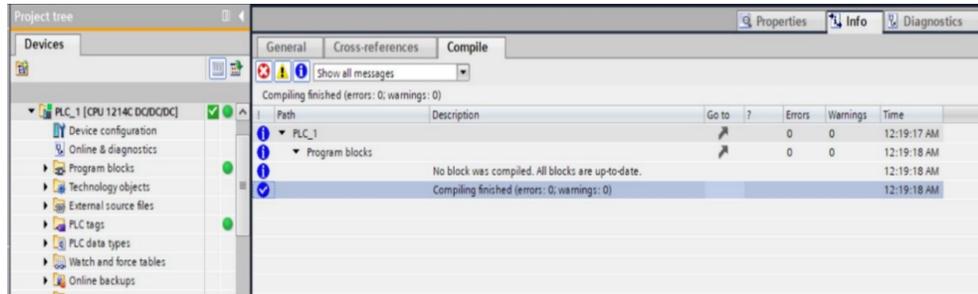


Figura 58. Estado de Compilación en TIA Portal V18.

6.1.5 Compilar el HMI KTP700.

Posteriormente de la simulación del control Difuso, la compilación del HMI se lleva a cabo para verificar la integridad y funcionalidad del proyecto. En el proceso de compilación, se registran los resultados, que en este caso indican que no hay errores. Como se muestra en la figura 59.

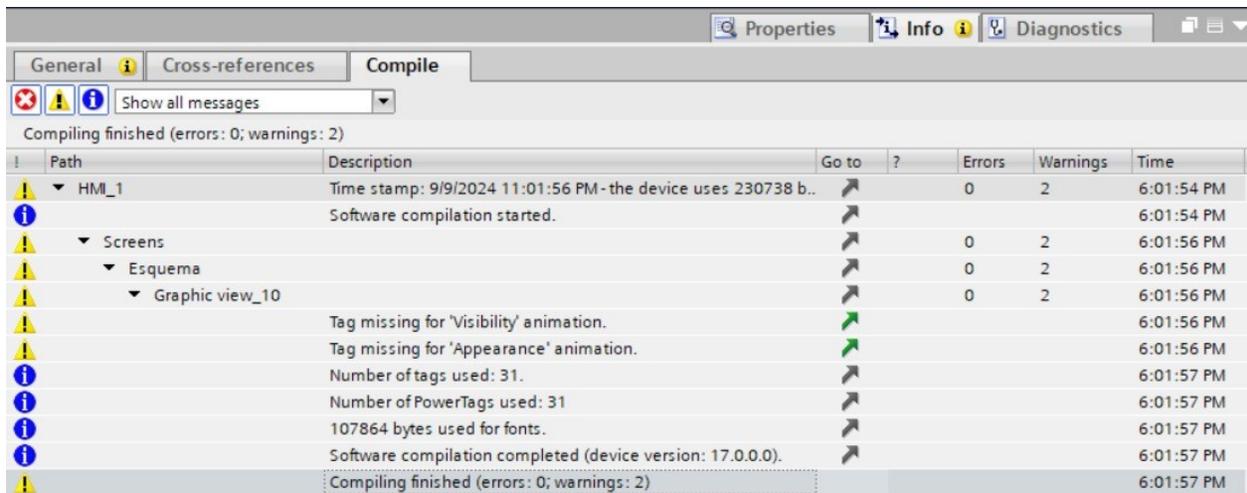


Figura 59. Copelación del proyecto.

6.1.3 Cargar el programa en el PLC.

Se procede a cargar el programa al plc una vez ya no se tienen errores para continuar la prueba del controlador difuso y el HMI, en la figura 60 se puede observar el proceso de carga del programa.

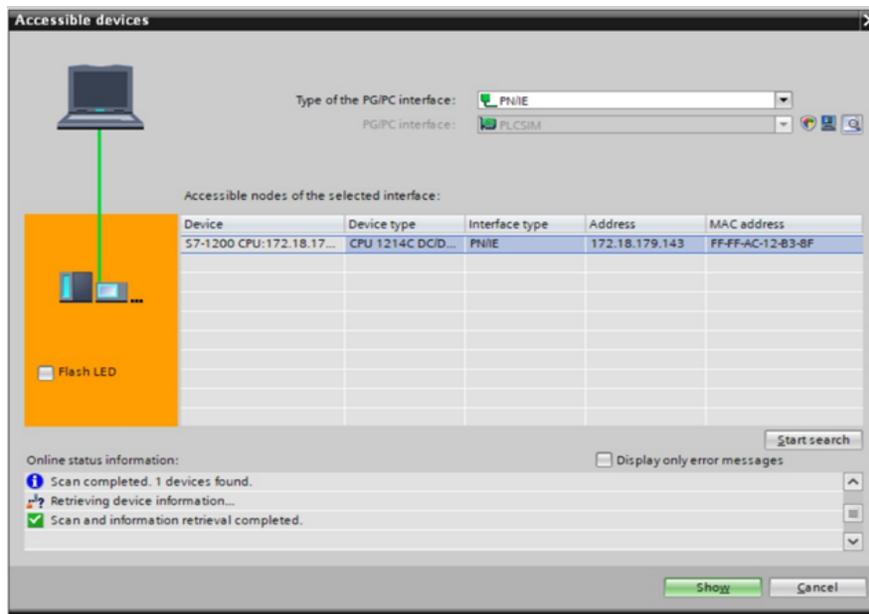


Figura 60. Carga del programa.

Una vez finalizada la carga del programa en el HMI, se procede a verificar el funcionamiento correcto tanto de la interfaz del HMI como de la programación del PLC. Este procedimiento es crucial para garantizar que todas las configuraciones y funcionalidades diseñadas se ejecuten de manera adecuada en el entorno operativo.

De igual manera, se aconseja que el personal responsable reciba una formación adecuada en el manejo del sistema y en el cumplimiento de los procedimientos de seguridad establecidos, para asegurar un funcionamiento eficiente y seguro. Como se observa en la figura 61, se ve el funcionamiento en la pantalla HMI KTP700.



Figura 61. Funcionamiento general del sistema.

6.1.4 Simulación del controlador difuso.

Una vez completada la compilación del proyecto, figura 62, se procede a la simulación del controlador difuso. Durante esta fase, se evalúa el comportamiento del sistema al aplicar la lógica de control difusa diseñada para regular la temperatura del módulo ET200SP. Las entradas de temperatura, almacenadas en %MD102 (TEMP_R2) y %MD94 (TEMP_R1), son procesadas por los bloques de función (FB4), que ajustan las resistencias R1 y R2 en tiempo real.

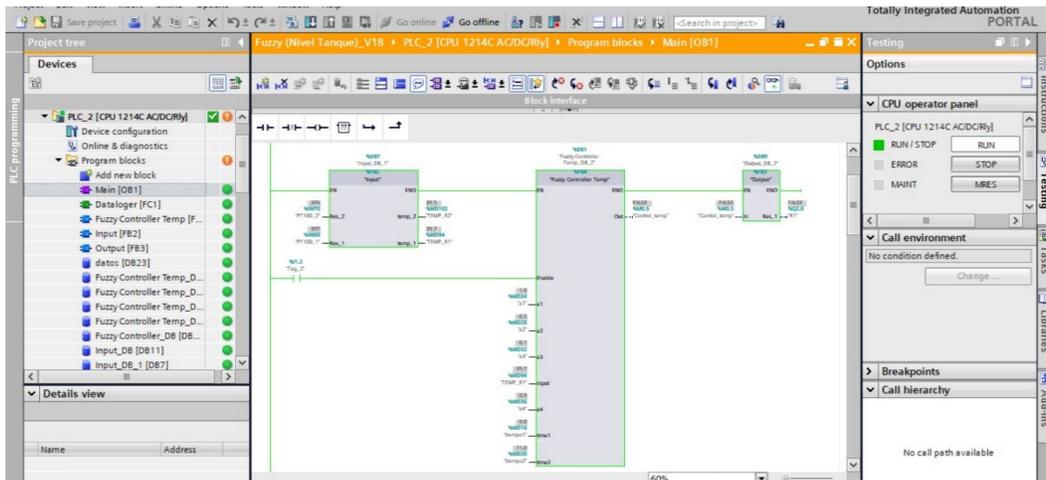


Figura 62. Simulación del controlador Difuso.

6.1.7 Cargar los datos en el web server.

Una vez que las resistencias hayan alcanzado la temperatura deseada, se procederá a cargar una tabla de datos al servidor web de la plataforma TIA Portal, figura 63. Esta tabla incluirá información crítica, como el set point, la temperatura alcanzada y el tiempo necesario para alcanzar dicha temperatura. Este proceso asegura un registro preciso y accesible de los parámetros operativos, esto facilitara el análisis y la supervisión del sistema.

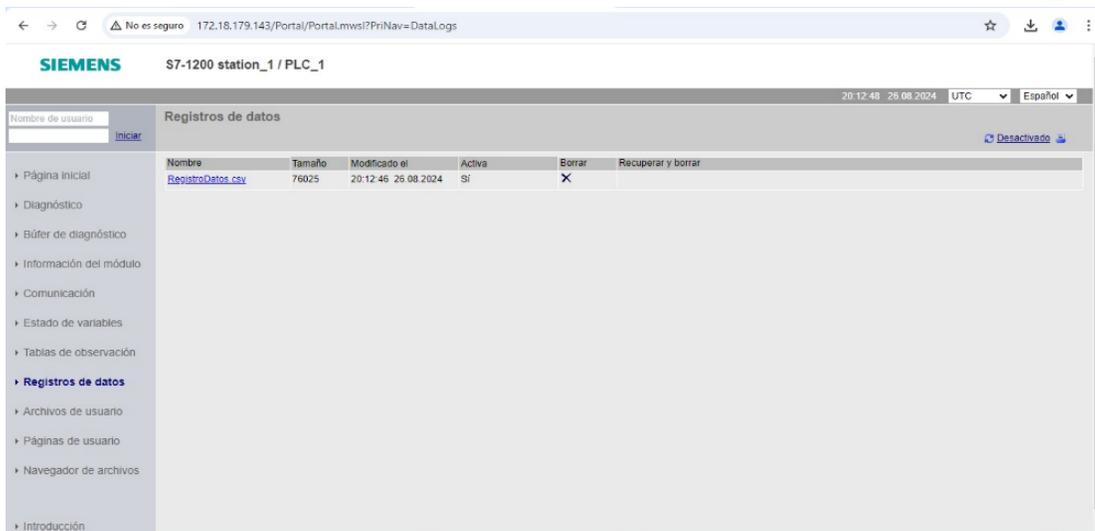


Figura 63. Registro de datos del web server.

6.1.8 Generar la tabla de datos en Excel.

Una vez transcurrido el tiempo de respuesta necesario para que la temperatura alcance el punto deseado, se generará un archivo Excel que compilará los datos necesarios para elaborar un gráfico, figura 64. Este gráfico permitirá una visualización adecuada del desempeño del sistema de control y así facilitar el análisis y la evaluación de su efectividad.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Record	Date	UTC Time	Column1	_1	_2			Tiempo	Set Point	APT-100
2	1	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7610	0	29500000			0	0	29,5
3	2	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7610	0	29500000			2	0	29,5
4	3	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7611	0	29500000			4	30	29,5
5	4	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7611	0	29500000			6	30	29,5
6	5	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7613	30000000	29500000			8	30	29,5
7	6	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7613	30000000	29500000			10	30	29,5
8	7	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7614	30000000	29400000			12	30	29,4
9	8	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7615	30000000	29400000			14	30	29,4
10	9	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7615	30000000	29400000			16	30	29,4
11	10	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7615	30000000	29400000			18	30	29,4
12	11	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7616	30000000	29400000			20	30	29,4
13	12	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7617	30000000	29400000			22	30	29,4
14	13	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7617	30000000	29400000			24	30	29,4
15	14	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7618	30000000	29400000			26	30	29,4
16	15	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7618	30000000	29400000			28	30	29,4
17	16	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7618	30000000	29400000			30	30	29,4
18	17	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7619	30000000	29400000			32	30	29,4
19	18	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7620	30000000	29400000			34	30	29,4
20	19	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7620	30000000	29400000			36	30	29,4
21	20	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7621	30000000	29400000			38	30	29,4
22	21	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7621	30000000	29400000			40	30	29,4
23	22	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7622	30000000	29400000			42	30	29,4
24	23	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7622	30000000	29400000			44	30	29,4
25	24	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7623	30000000	29500000			46	30	29,5
26	25	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7624	30000000	29500000			48	30	29,5

Figura 64. Recopilación de registro de datos del módulo.

6.1.8 Generar la representación gráfica de los datos en MATLAB.

Una vez generada la tabla de datos, se procede a abrir MATLAB y se desarrolla un archivo (.m) que contiene el código necesario para el análisis. Este script incluye la configuración de variables y la lógica para graficar con funciones como plot. La personalización de las gráficas, figura 65, abarca la inclusión de títulos, etiquetas y ajustes de ejes, optimiza la interpretación de los resultados.

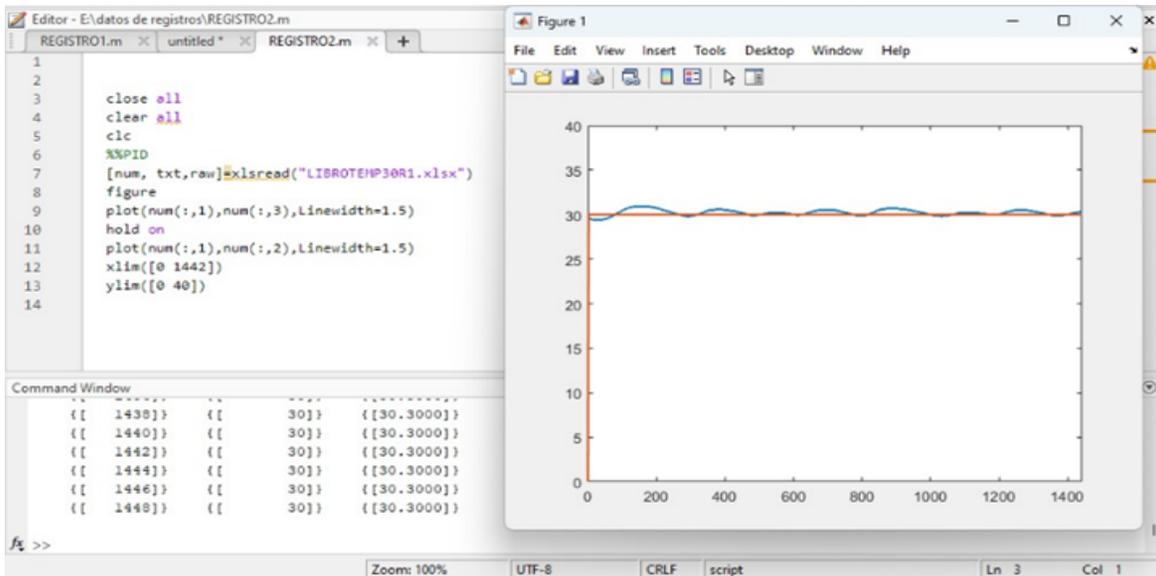


Figura 65. Representación de la gráfica de control.

6.2 Ejecución del Controlador PID utilizando TIA Portal.

6.2.1 Comunicación maestro esclavo con el módulo ET200SP y el PLC.

Se realiza la verificación de que este establecida la conexión con el MODULO ET200SP y el PLC para que no haya fallas en al momento de cargar los datos de temperatura. En la figura 66, se observa la comunicación Maestro esclavo.

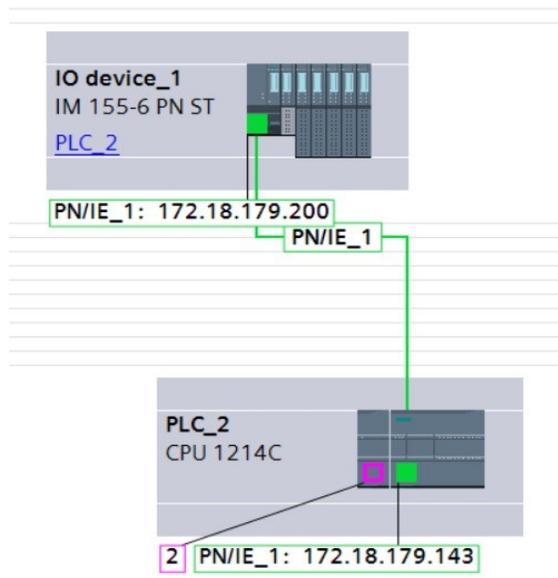


Figura 66. Comunicación maestro esclavo en TIA Portal V18

6.2.2 Compilación del proyecto PID en TIA Portal V18.

Se procede hacer una compilación del proyecto para verificar que no haya algún error en el programa antes de realizar la carga del programa en el PLC ya que si existen fallos en esto no se podrá realizar. en la figura 67 se observa la compilación del programa.

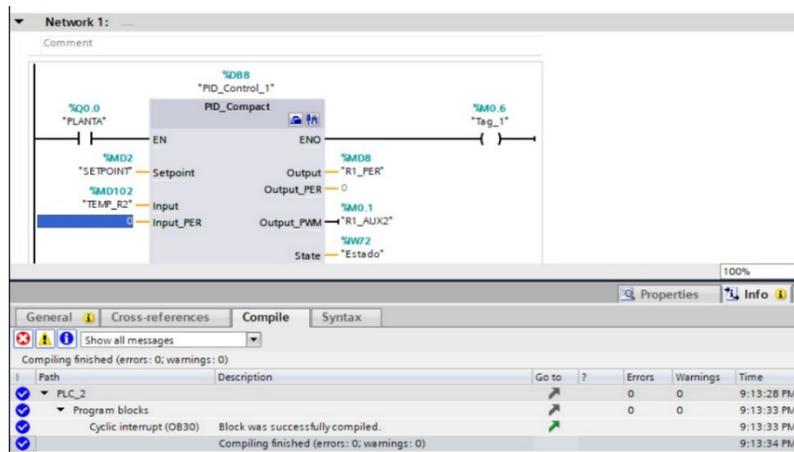


Figura 187. Compilación del programa en TIA Portal

6.2.3 Cargar el programa PID en el PLC.

Una vez verificado que no se presenten problemas en el proyecto se procede a ejecutar la carga del programa en el PLC con su respectiva IP en este caso la 172.18.179.143. Se visualiza en la figura 68 como se ve cargando el programa.

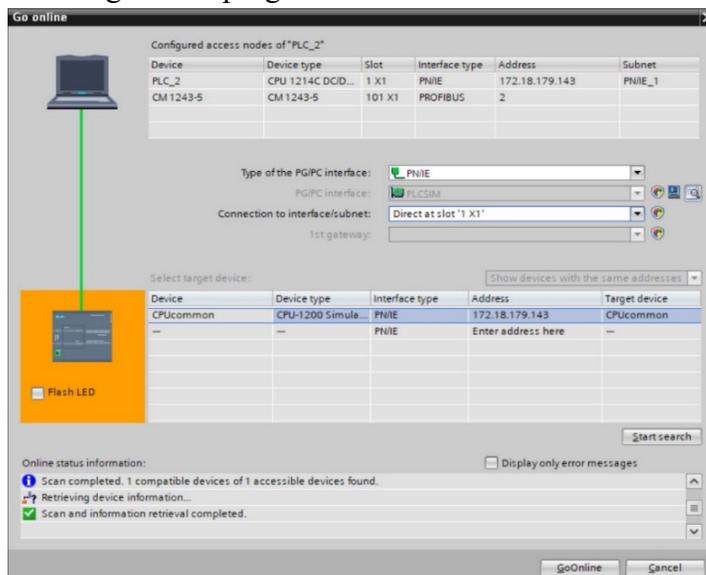


Figura 68. Ejecución del programa con su respectivo IP.

6.2.4 Simulación del controlador PID.

Cuando ya están realizados los pasos anteriores se observa el correcto funcionamiento del programa sin errores en su simulación. Se aprecia en la figura 69, la simulación del controlador PID.

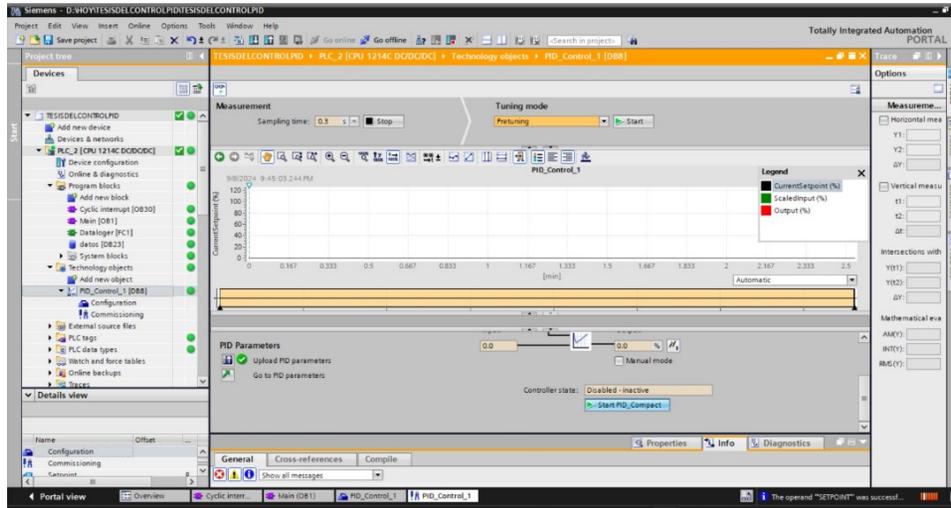


Figura 69. Simulación del controlador PID.

6.2.5 Cargar los datos PID en el web server.

Para este paso se debe constar la conexión internet y de que pase un tiempo estimado a la regulación de la temperatura que se requiere alcanzar. Se observa en la figura 70, el registro de datos del Web Server.



Figura 70. Registro de datos del web. Server.

6.2.6 Generar la tabla de datos PID en Excel

Estos pasos a continuación son opcionales a realizar ya que en el mismo TIA PORTAL se puede observar una gráfica del funcionamiento del controlador PID que es llamada "**Respuesta al escalón**", pero se realiza este proceso porque la gráfica que se observa en Matlab es más lineal y se representa de mejor manera la comparación entre los dos controladores. En la figura 71, se visualiza la recopilación del registro de datos del módulo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Record	Date	UTC Time	Column1	_1	_2			Tiempo	Set Point	APT-100
2	1	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7610	0	29500000			0	0	29,5
3	2	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7610	0	29500000			2	0	29,5
4	3	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7611	0	29500000			4	30	29,5
5	4	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7611	0	29500000			6	30	29,5
6	5	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7613	30000000	29500000			8	30	29,5
7	6	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7613	30000000	29500000			10	30	29,5
8	7	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7614	30000000	29400000			12	30	29,4
9	8	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7615	30000000	29400000			14	30	29,4
10	9	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7615	30000000	29400000			16	30	29,4
11	10	08/26/2024	0/1/1900 22:19	7615	30000000	29400000			18	30	29,4
12	11	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7616	30000000	29400000			20	30	29,4
13	12	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7617	30000000	29400000			22	30	29,4
14	13	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7617	30000000	29400000			24	30	29,4
15	14	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7618	30000000	29400000			26	30	29,4
16	15	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7618	30000000	29400000			28	30	29,4
17	16	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7618	30000000	29400000			30	30	29,4
18	17	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7619	30000000	29400000			32	30	29,4
19	18	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7620	30000000	29400000			34	30	29,4
20	19	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7620	30000000	29400000			36	30	29,4
21	20	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7621	30000000	29400000			38	30	29,4
22	21	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7621	30000000	29400000			40	30	29,4
23	22	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7622	30000000	29400000			42	30	29,4
24	23	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7622	30000000	29400000			44	30	29,4
25	24	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7623	30000000	29500000			46	30	29,5
26	25	08/26/2024	0/1/1900 22:20	7624	30000000	29500000			48	30	29,5

Figura 71. Recopilación de registro de datos del módulo.

6.2.7 Generar la representación gráfica de los datos PID en MATLAB

Una vez generada la tabla de los datos deseados se procede a usar el código de simulación de la gráfica lineal para mejorar la visualización del controlador. En la figura 72 se aprecia la representación gráfica en el Matlab de los PID en MATLAB.

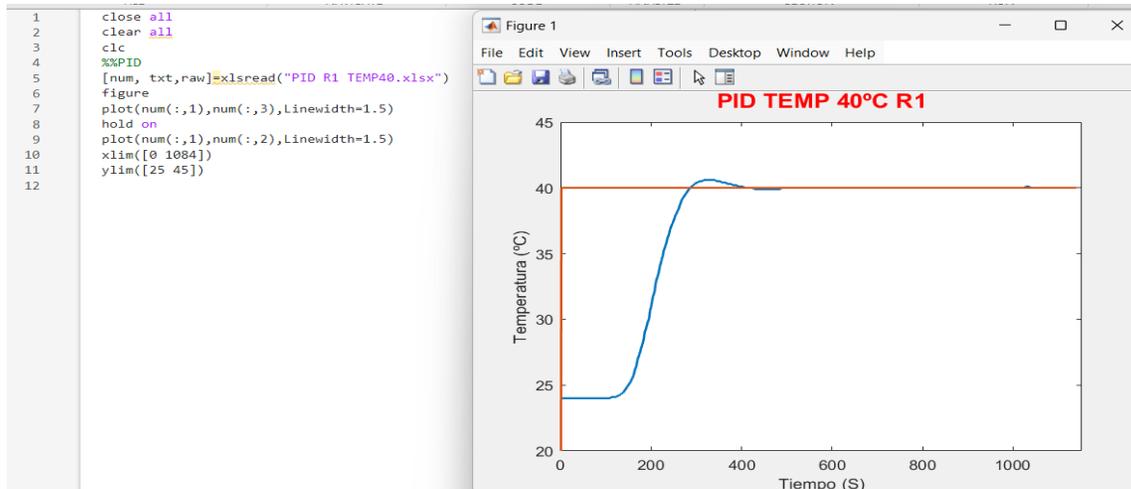


Figura 72. Representación de la gráfica de control.

6.3 Análisis de respuestas de ambos Controladores

En este apartado, se realizará una evaluación detallada de las características de respuesta del controlador difuso en comparación con un controlador PID, con el fin de analizar su desempeño en la regulación de la temperatura de un sistema con resistencias del módulo. Esta comparación permitirá identificar las diferencias en términos de estabilidad, precisión y capacidad de adaptación de ambos controladores bajo diferentes condiciones de operación.

6.3.1 Análisis Comparativo de Controladores: Regulación de Temperatura a 40 °C en la Resistencia 1.

En la figura 73 correspondiente al controlador PID y el Difuso, se observa que la gráfica del PID en la temperatura inicial es baja, pero asciende rápidamente hacia el valor de referencia (setpoint). No obstante, este controlador muestra un sobre impulso, donde la temperatura excede brevemente el setpoint antes de estabilizarse, reflejando cierta inestabilidad en su respuesta. El rendimiento del controlador, si bien es adecuado, podría beneficiarse de ajustes adicionales para mejorar la precisión y reducir las oscilaciones.

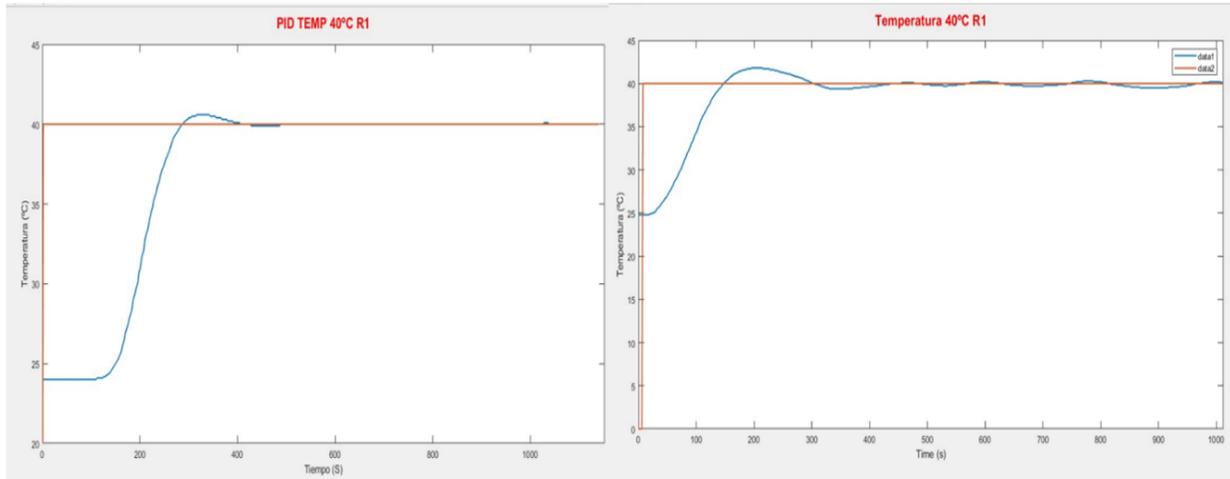


Figura 73. Respuesta del Controlador PID y Difuso en Resistencia 1 a 40°C.

NOTA: El controlador PID muestra un aumento rápido de la temperatura hacia el setpoint de 40 °C, pero presenta un sobre impulso que alcanza aproximadamente 42 °C, evidenciando cierta inestabilidad con oscilaciones de 2 °C a 4 °C. Esto podría ser problemático en aplicaciones que requieren precisión. En contraste, el controlador difuso incrementa la temperatura de manera más gradual y controlada, manteniendo oscilaciones mínimas y logrando una regulación más suave y precisa.

Por el contrario, el gráfico del controlador difuso evidencia un incremento más gradual y controlado de la temperatura hacia el setpoint de 40 °C. A lo largo del proceso, este controlador mantiene oscilaciones mínimas alrededor del objetivo, mostrando un control más estable y preciso. Esto subraya la capacidad del controlador difuso para regular la temperatura con mayor suavidad y precisión, resultando en un rendimiento más eficiente.

6.3.2 Análisis Comparativo de Controladores: Regulación de Temperatura a 40 °C en la Resistencia 2.

En la figura 74, en el gráfico correspondiente al correspondiente al controlador PID y el Difuso de la resistencia 2, se puede observar un aumento rápido de la temperatura desde un valor inicial bajo, pero con un sobre impulso considerable que supera el setpoint de 40 °C antes de estabilizarse. Aunque finalmente alcanza el valor objetivo, se notan oscilaciones, lo que refleja una respuesta menos precisa y una regulación inestable.

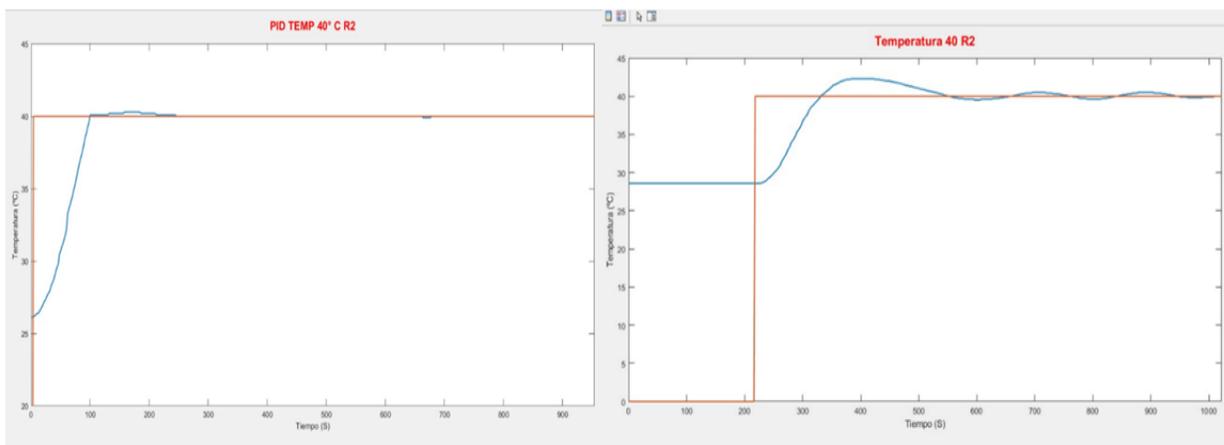


Figura 74. Respuesta del Controlador PID y Difuso en Resistencia 2 a 40°C.

NOTA: se observa un aumento rápido de la temperatura que supera el setpoint de 40 °C, lo que indica un sobre impulso significativo y una regulación inestable, con oscilaciones notables. En contraste, el controlador difuso muestra un incremento gradual y controlado, alcanzando el setpoint sin sobre impulsos y con mínimas oscilaciones.

En cambio, el gráfico del controlador difuso muestra un incremento gradual de la temperatura, alcanzando el setpoint sin un sobre impulso significativo. Las oscilaciones alrededor del setpoint son mínimas, lo que demuestra una mayor precisión y estabilidad en la regulación de la temperatura.

6.3.3 Análisis Comparativo de Controladores: Regulación de Temperatura a 50 °C en la Resistencia 1.

En la figura 75, en el gráfico correspondiente al controlador PID y el Difuso de la resistencia 1, se puede observar en el gráfico correspondiente al controlador PID, se aprecia un incremento rápido de la temperatura desde un valor bajo. A pesar de que eventualmente alcanza el setpoint de 50 °C, se observa un sobre impulso significativo, donde la temperatura excede el objetivo antes de estabilizarse. Este comportamiento sugiere una respuesta algo inestable, con oscilaciones alrededor del setpoint que indican una regulación que podría optimizarse.

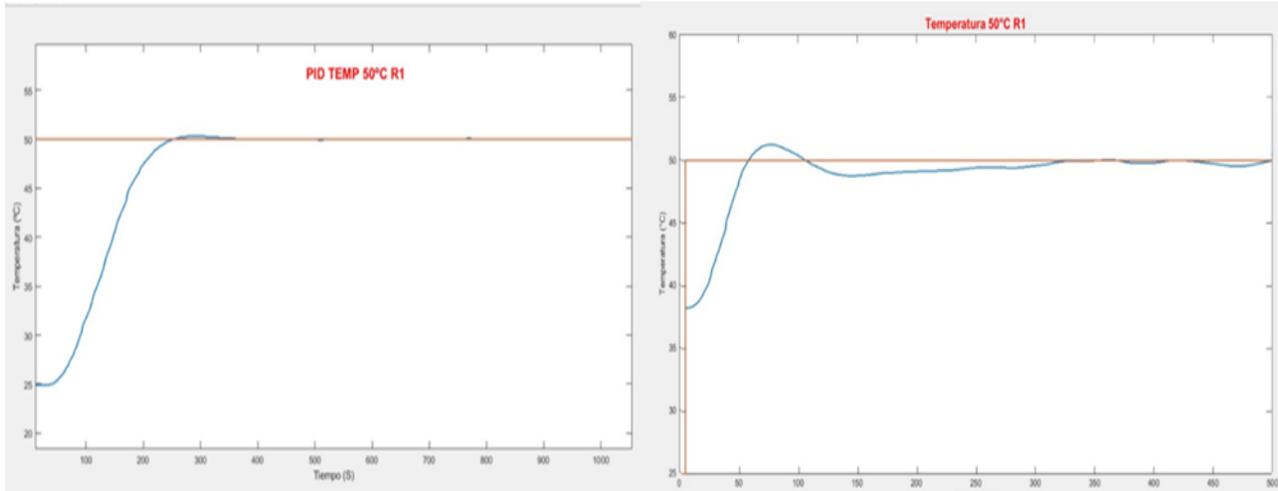


Figura 75. Respuesta del Controlador PID y Difuso en Resistencia 1 a 50°C.

Nota: En el gráfico que representa el comportamiento del controlador PID de la resistencia 1, se observa un aumento de la temperatura que excede el setpoint de 50 °C, lo que evidencia un sobre impulso considerable y una regulación inestable, acompañada de oscilaciones alrededor del objetivo. En comparación, el controlador difuso presenta un incremento más gradual y controlado, alcanzando el setpoint sin sobre impulsos y con fluctuaciones mínimas.

Por otro lado, en el gráfico del controlador difuso, la temperatura aumenta de manera más progresiva y controlada hacia los 50 °C. Este controlador alcanza el setpoint sin presentar un sobre impulso considerable, manteniendo la temperatura cerca del objetivo con mínimas fluctuaciones, lo que refleja una regulación más precisa y estable.

6.3.4 Análisis Comparativo de Controladores: Regulación de Temperatura a 50 °C en la Resistencia 2.

En la figura 76, en el gráfico correspondiente al controlador PID y el Difuso de la resistencia 2, En el gráfico izquierdo, que representa el comportamiento del controlador PID, se evidencia un incremento abrupto de la temperatura desde un nivel bajo. El controlador muestra un sobre impulso significativo, superando rápidamente el setpoint de 50 °C antes de comenzar a estabilizarse. Aunque finalmente la temperatura se ajusta cerca del valor objetivo, las oscilaciones que persisten reflejan una falta de precisión y estabilidad en la regulación.

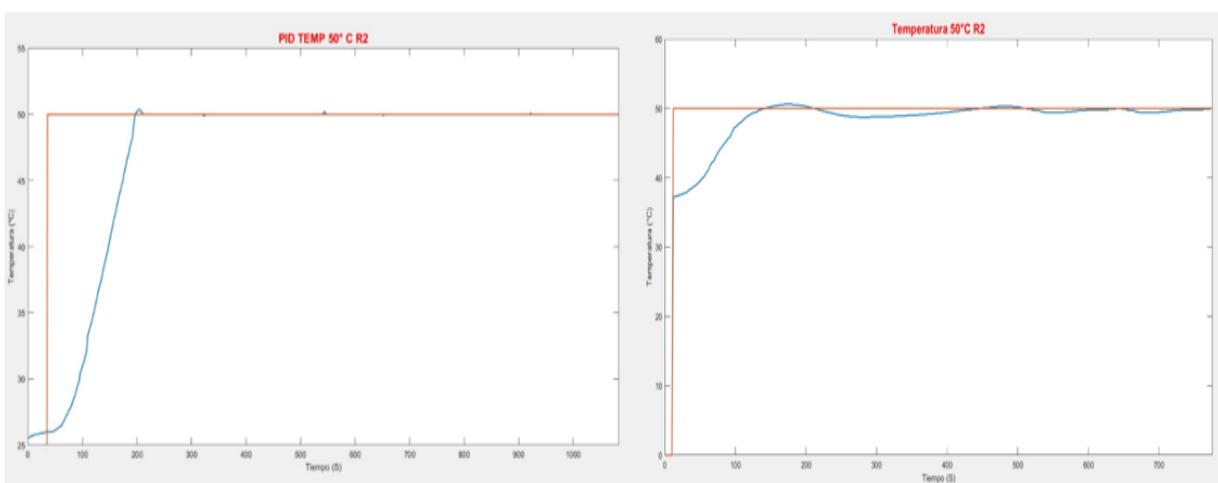


Figura 76. Respuesta del Controlador PID y Difuso en Resistencia 2 a 50°C.

NOTA: En el gráfico del controlador PID para la resistencia 2, se observa un incremento rápido de la temperatura desde un nivel bajo, con un sobre impulso que alcanza aproximadamente 52 °C, superando el setpoint de 50 °C. Aunque la temperatura finalmente se estabiliza cerca del objetivo, las oscilaciones alrededor del setpoint, que varían entre 2 °C y 3 °C, indican una falta de precisión y estabilidad en la regulación.

En contraste, el gráfico derecho, correspondiente al controlador difuso, muestra un incremento más gradual y controlado de la temperatura hacia el setpoint de 50 °C. Este controlador evita un sobre impulso notable y mantiene la temperatura con oscilaciones mínimas

alrededor del objetivo, lo que resalta su capacidad de proporcionar una regulación más precisa y estable en comparación con el PID.

6.3.5 Comparación entre ambos Controladores en la Resistencia 1 y 2.

Los resultados de las pruebas de simulación muestran que el controlador difuso logra mantener el setpoint con fluctuaciones muy reducidas, generalmente dentro de un margen de ± 1 °C, incluso frente a cambios de temperatura. En comparación, los controladores PID presentaron variaciones más pronunciadas, oscilando entre ± 2 °C y ± 4 °C, lo que refleja una menor precisión en su capacidad de control.

A continuación, en la tabla 1 se observa un cuadro comparativo que resalta las principales diferencias entre ambos controladores en las pruebas realizadas:

Tabla 1 Comparación de respuestas en ambos controladores para la resistencia 1 y 2.

	Referencia (°C)	Tiempos de respuestas (S)		Sobre impulso (°C)		Error en Estado Estable (°C)	
		PID	DIFUSO	PID	DIFUSO	PID	DIFUSO
Resistencia 1							
	40 °C	600	200	2	0	0,5	0,2
	50 °C	600	240	3	0	0,5	0,1
Resistencia 2							
	40 °C	600	200	2	0	0,5	0,2
	50°C	720	240	4	0	0,5	0,1

El controlador difuso alcanzó la estabilidad en aproximadamente 200 segundos, mientras que el controlador PID necesitó hasta 600 segundos. Esta diferencia en la rapidez de la respuesta es particularmente relevante en aplicaciones industriales donde la eficiencia temporal es fundamental. Además, el controlador difuso evitó el fenómeno de sobre impulso, en contraste con el PID, que experimentó un sobre impulso de 2 °C. Esto subraya la superioridad del controlador difuso en términos de precisión y eficiencia en el control en la rapidez de respuesta que es lo más importante.

6.4 Guía Práctica del Funcionamiento del Controlador Difuso

6.4.1 Diseño de un Sistema de Control de Temperatura utilizando un Controlador en el Difuso mediante el PLC S7-1200 y el módulo ET200 SP.

		GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO
CARRERA: Ingeniería Electrónica.		ASIGNATURA: Teoría de Control I y II
No.:	1	TÍTULO: Diseño de un Sistema de Control de Temperatura utilizando un Controlador en el Difuso mediante el PLC S7-1200 y el módulo ET200 SP.
OBJETIVOS: <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar un sistema de control de temperatura utilizando un controlador difuso en el entorno TIA Portal, incluyendo la creación de reglas de lógica difusa y la definición de funciones de pertenencia. • Ajustar las funciones de pertenencia y los parámetros de entrada (temperaturas de referencia) para mejorar la precisión y estabilidad del sistema de control. • Ejecutar el programa en el PLC S7-1200 y observar la respuesta del controlador ante cambios de temperatura, registrando los resultados para análisis y comparación con los valores esperados. • Evaluar la efectividad del controlador difuso en comparación con un controlador PID en términos de rendimiento, precisión y facilidad de configuración. 		
INSTRUCCIONES:		1. Utilizar el entorno de programación TIA Portal para crear las reglas de lógica difusa, definir funciones de pertenencia y rangos de operación. Luego, cargar el programa al PLC S7-1200.
		2. Ajustar las funciones de pertenencia y parámetros de entrada (temperaturas de referencia) para mejorar la precisión y estabilidad del sistema.
		3. Ejecutar el programa en el PLC, observar la respuesta del controlador a los cambios de temperatura, ajustar las reglas y parámetros, y registrar los resultados para comparar con los valores

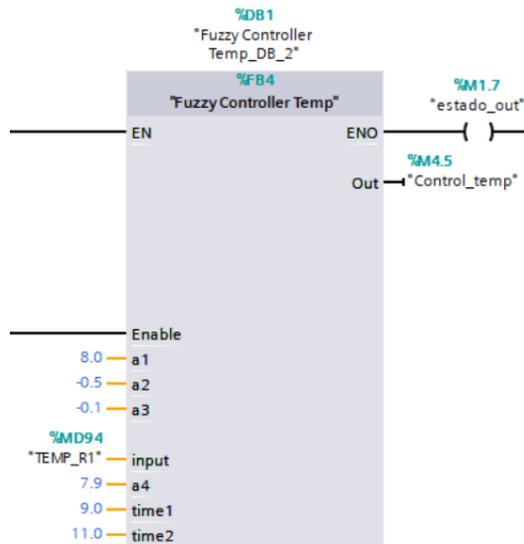
DESARROLLO:

Programación en TIA PORTAL V.18

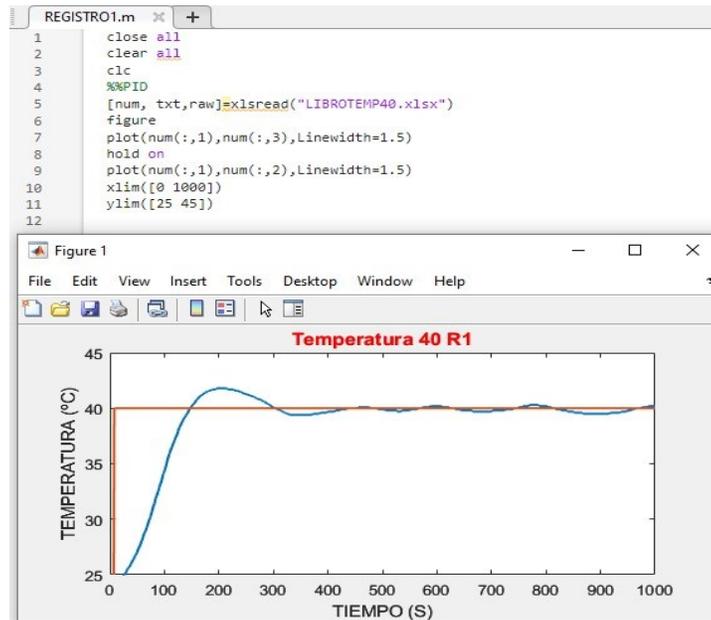
El bloque Controlador Difuso de Temperatura [FB4] permite definir las reglas de límite y los valores que se asignarán al controlador difuso. Esto facilita la configuración del sistema para que responda adecuadamente a diversas condiciones, optimizando el monitoreo de la temperatura de acuerdo con las especificaciones requeridas.

```
1 //VALOR DE ERROR
2
3 #A := "SETPOINT" - #input;
4
5 IF #Enable THEN
6   IF #A < #a2 THEN
7     #Out := FALSE;
8   END_IF;
9   IF #A > #a1 THEN
10    #Out := TRUE;
11  END_IF;
12  IF #A < #a4 AND #A > #a3 THEN
13    #Out := FALSE;
14    IF #Out = FALSE AND "Clock_1Hz" = TRUE THEN
15      #counter := #counter + 1;
16    END_IF;
17
18    IF #counter > #time1 THEN
19      #Out := TRUE;
20      IF #Out = TRUE AND #counter = #time2 THEN
21        #counter := 0;
22      END_IF;
23    END_IF;
24  END_IF;
25
26 END_IF;
```

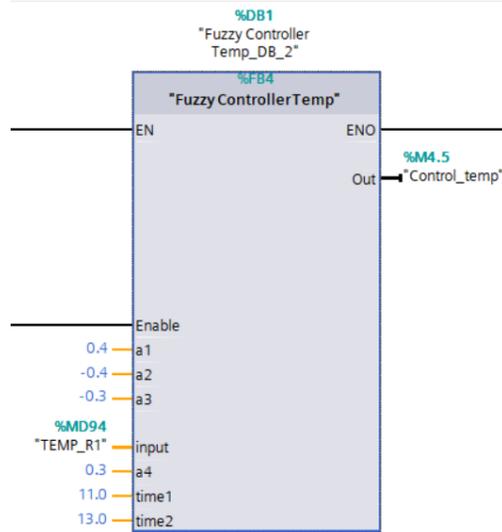
El bloque Main es el componente donde se pueden modificar o seleccionar los parámetros a1, a2, a3, a4, que se definieron según las reglas establecidas y en esta imagen estos valores son los que mejor censaron la temperatura. Además, este bloque permite elegir los valores óptimos de tiempo de encendido y apagado, asegurando la eficiencia del controlador.



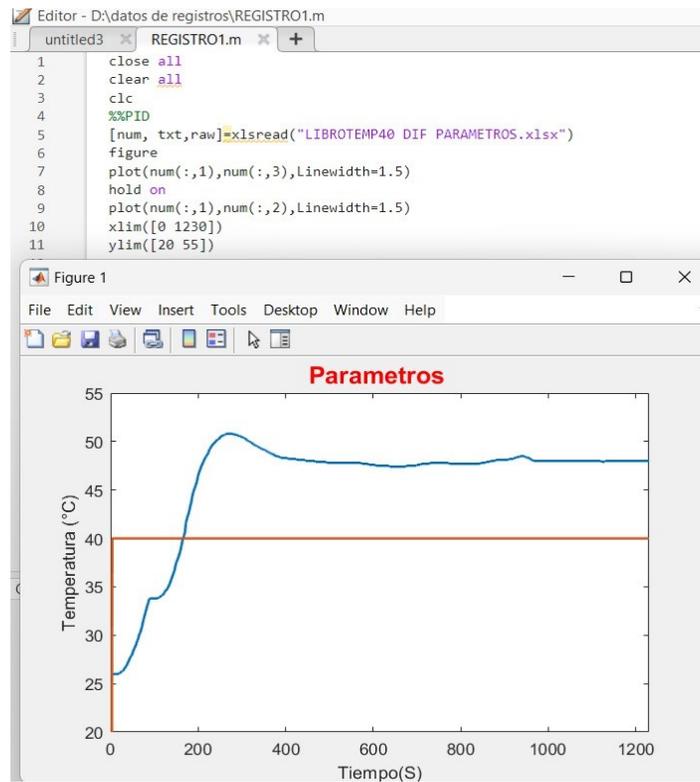
El siguiente bloque se encargará de recopilar los datos obtenidos en un período de tiempo determinado.



Adicional se realiza el cambio con diferentes parámetros en el bloque de datos main en los parámetros a1, a2, a3, a4, siguiendo el paso anterior de esperar el tiempo de respuesta del controlador.



Grafica del controlador difuso con el cambio realizado en los parámetros **a1**, **a2**, **a3** y **a4**



Nota: En este cambio realizado en los parámetros se puede observar que no cumple la temperatura deseada y tiende a elevarse más de la requerida.

ACTIVIDADES POR DESARROLLAR

1. Diseñar y programar el algoritmo de control difuso en el entorno TIA Portal

2. Ejecutar el programa en el PLC y supervisar la respuesta del sistema ante variaciones de temperatura.

3. Ajustar las reglas difusas y los parámetros del controlador según los resultados observados

RESULTADOS:

- El sistema ha logrado ajustar y mantener la temperatura dentro del rango de 40 °C una precisión alta.
- Los ajustes realizados en las reglas difusas y parámetros del sistema han mejorado el rendimiento general, como lo evidencian los datos y gráficos documentados.
- El controlador difuso ha demostrado ser más complejo de configurar y ajustar en comparación con el controlador PID.

CONCLUSIONES:

- El controlador difuso ofrece una capacidad avanzada para manejar sistemas con comportamientos no lineales y variaciones impredecibles.
- Aunque el controlador difuso puede proporcionar un control más preciso y adaptativo, su configuración y ajuste son más complejos en comparación con el controlador PID.
- A pesar de la capacidad del controlador difuso para manejar la no linealidad y las variaciones, el controlador PID sigue siendo preferible en situaciones que requieren una configuración rápida y directa.

RECOMENDACIONES:

- Antes de implementar el controlador difuso, realiza una evaluación exhaustiva de las características y comportamientos del sistema de temperatura.
- Dado que el controlador difuso puede ser complejo de configurar, considera invertir tiempo en capacitación adicional sobre lógica difusa y su implementación en el entorno TIA Portal. Además, realiza pruebas iterativas para ajustar las reglas y parámetros del controlador.

VII CRONOGRAMA

En la Tabla 2 se presenta la propuesta del cronograma de actividades dispuesto por semanas, haciendo un total de 20 semanas de trabajo, para el desarrollo del Proyecto de Titulación en los meses de mayo a julio correspondientes al periodo académico 64, aspirando que en la primera semana de septiembre se culmine con la sustentación.

Tabla 2 Cronograma de actividades para el desarrollo del Proyecto de Titulación

ACTIVIDADES	Mayo		Junio				Julio				
	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Propuesta del tema y redacción del anteproyecto del Trabajo de Titulación											
Revisiones con el tutor y aprobación del tema de Titulación.											
Identificación de Variables, Análisis del Sistema y Diseño del Controlador Difuso, comienzo de la programación del controlador.											
Pruebas Experimentales en el Laboratorio y Comparación de Desempeño entre Controladores.											
Entrega del avance del documento al tutor (primera revisión)											
Finalización del documento de Titulación											

VIII PRESUPUESTO

En la tabla 3 se especifican los costos estimados para este estudio (ver Tabla 3).

Presupuesto estimado:

Tabla 3 Presupuesto estimado para el desarrollo del Proyecto de Titulación

Cant.	Detalle	Valor unit	Valor total
3 h	Horas de ingeniería	\$116.67/hora	\$ 350
1	Material de trabajo	\$80,00	\$ 80
1	Otros Gastos	\$30	\$ 30
	Valor total		\$ 460

IX CONCLUSIONES

Este estudio se llevó a cabo una comparación detallada entre los controladores PID y los controladores difusos aplicados a la regulación de temperatura en dos resistencias distintas del módulo ET-200SP. Los resultados mostraron que, aunque el controlador PID puede ofrecer un rendimiento aceptable, el controlador difuso se destacó por su mayor precisión y adaptabilidad.

El controlador difuso alcanzó la estabilidad en 200 segundos para 40 °C y 240 segundos para 50 °C, en comparación con los 600 segundos requeridos por el PID. Además, evitó el fenómeno de sobre impulso, manteniendo la temperatura en el setpoint sin fluctuaciones importantes, mientras que el PID experimentó sobre impulso de entre 2 °C y 4 °C.

En contraste, los controladores PID experimentaron oscilaciones mayores, entre $\pm 2^{\circ}\text{C}$ y $\pm 4^{\circ}\text{C}$, y requirieron un tiempo de estabilización considerablemente más largo, llegando hasta los 600 segundos, frente a los 200 segundos del controlador difuso, además, el controlador difuso logró evitar sobreimpulsos, mientras que el PID registró un sobre impulso de 2°C.

Entre las principales ventajas del controlador difuso se destacan su capacidad para adaptarse a dinámicas no lineales y cambios rápidos de temperatura, así como la simplicidad en su diseño y ajuste del fundamentado en la lógica difusa.

En resumen, el controlador difuso no solo se presenta como una solución alterna para la regulación de la temperatura, sino también como una alternativa superior a los controladores PID en entornos industriales, mejorando la efectividad y estabilidad de los sistemas de control.

X RECOMENDACIONES

Se sugiere afinar los parámetros del controlador PID ajustando sus componentes proporcional, integral y derivativo de manera detallada, para minimizar el sobre impulso y optimizar la estabilidad del sistema. El método de Ziegler-Nichols ofrece un enfoque sistemático y eficiente para este ajuste, al basarse en la respuesta del sistema a una entrada escalonada. Este método facilita la identificación de parámetros críticos y permite obtener configuraciones más precisas que reducen el sobre impulso, mejorando la respuesta temporal y la estabilidad general del sistema.

Dado el excelente rendimiento de los controladores difusos en sistemas con no linealidades e incertidumbres, es recomendable su implementación en aplicaciones donde se requieran altos niveles de adaptabilidad y precisión. La correcta calibración de sus reglas y parámetros resulta crucial para asegurar un control eficiente. Paralelamente, establecer un sistema de monitoreo continuo para ambos controladores que permitirá evaluar su comportamiento en tiempo real y realizar ajustes según las condiciones variables del sistema.

Además, es aconsejable ampliar el uso de los controladores difusos en diferentes entornos industriales, como la automatización de procesos. Este enfoque permitiría obtener datos valiosos sobre su desempeño en distintos contextos, destacando mejoras significativas en tiempos de estabilización. En estudios previos, el controlador difuso ha demostrado reducir el tiempo de estabilización a 200 segundos, frente a los 600 segundos observados con los controladores PID tradicionales. Esta implementación podría optimizar la eficiencia operativa en diversas aplicaciones industriales, promoviendo un control más rápido y preciso.

XI REFERENCIAS

- ResearchGate . (2024). *Diagrama-a-bloques-del-sistema-de-control-difuso*. (Area Cooling Solutions) Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Diagrama-a-bloques-del-sistema-de-control-difuso_fig3_338809975
- AG, S. (2020). *Portal TIA: Ingeniería integrada para el futuro de la automatización*. Siemens TIA Portal. doi:<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v2i4.36>
- Arango, J. G. (2017). IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE LÓGICA DIFUSA PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA EN UNA PLANTA PILOTO CON PLC A INSTALAR EN LOS LABORATORIOS DE AUTOMATIZACIÓN . 12-35.
- Calle, D. E., & Novillo, P. f. (2018). Diseño e implementacion de un control difuso de velocidad para el motor hidraulico HRE HIDRAULIC. 50-55.
- Campozano Pin, J. L. (2021). Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura, para prácticas en el laboratorio de automatización industrial, basado en la red PROFINET con un sistema de periferia remota. 53-60.
- Campozano, V. &. (1 de Octubre de 2021). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA, PARA PRÁCTICAS EN EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL, BASADO EN LA RED PROFINET CON UN SISTEMA DE PERIFERIA REMOTA. Guayaquil. Obtenido de <https://areacooling.com/areacademy/es/ciclo-basico-de-refrigeracion/>
- COPADATA. (28 de 03 de 2023). *Sistema de control industrial*. Obtenido de <https://www.copadata.com/es/productos/platform-editorial-content/sistemas-de-control-industrial/>

Direct Industry/CONNECT. (6 de 6 de 2019). *Sonda de temperatura Pt100*. Obtenido de <https://www.directindustry.es/prod/rs-pro/product-79967-2361491.html>

DisTI Corporation. (2024). Obtenido de DisTI Corporation: <https://www.cursosaula21.com/profinet-que-es-y-como-funciona/>

Electronica Universal de Monterrey. (23 de 11 de 2023). *Adminwp*. Obtenido de https://www.electronicauniversal.com.mx/2021/10/19/que-es-un-rele-de-estado-solido/?srsltid=AfmBOor10SJNF424pmFpX_LKAnlENvg5Z4ZYEQAZD_5SLQKI6oL7q6qB

EMAC Industrial Solutions and Services S.A . (2021). (Area Cooling Solutions) Obtenido de <https://emacstores.com/sistemas-de-control-industrial/>

Emilio Pérez Noriega, J. L. (14 de 06 de 2022). Conocimientos y actitudes sobre el cambio climático. págs. 1-7.

Felipe, L. C. (2023). *Análisis comparativo de controladores PID y PI con lógica difusa para el control de velocidad en motores DC*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12442/12668>

Fuji Electric. (2024). *PID control for dummies: Everything you need to know*. FE.

Grupo Ylumeyco. (2021). Obtenido de Grupo Ylumeyco: <https://ilumeyco.com/sistemas-de-automatizacion-industrial/>

INGELCOM. (Octubre de 2020). *INGELCOM*. Obtenido de INGELCOM: <https://www.autycom.com/que-es-un-sistema-hmi/>

INTEREMPRESAS. (2023). *INTEREMPRESAS*. Obtenido de <https://www.siemens.com/mx/es/productos/automatizacion/systems/industrial/plc/s7-1200.html>

- Ivana Azuaje, I. A. (2018). *UNIVERSIDAD DE LOS ANDES*. Obtenido de CIENCIA INGENIERIA: <https://www.redalyc.org/journal/5075/507555109004/html/>
- Lasso Bittner, D. (2022). Control difuso de temperatura y humedad de un invernadero en la Comunidad José Painecura Hueñalihuen. 20-25.
- Luis Fidel Cerecero Natale, E. C. (11 de 05 de 2017). Comparación experimental de controladores PID clásico, PID no lineal y PID difuso para el caso de regulación. Mexico.
- Martín. (22 de marzo de 2019). *Análisis Comparativo de Control PID y Lógica Difusa Como Técnicas de Control en un Proceso de Nivel de un Tanque de Recuperación de Agua de Una Planta Minera*. (Area Cooling Solutions) Obtenido de Area Academy: <https://areacooling.com/areacademy/es/ciclo-basico-de-refrigeracion/>
- Martín., C. F. (Marzo de 2024). *Controlador PID*. (Area Cooling Solutions) Obtenido de Area Academy: <https://www.picuino.com/es/control-pid.html>
- MathWorks. (4 de 08 de 2020). *Introducción a Simulink*. Obtenido de <https://la.mathworks.com/help/simulink/getting-started-with-simulink.html>
- Mercado. (2020). *Mercado*. Obtenido de <https://www.siemens.com/mx/es/productos/automatizacion/systems/industrial/plc/s7-1200.html>
- MINT. (18 de 08 de 2022). *¿Qué es el control PID? Sus aplicaciones en la Industria 4.0*. Obtenido de <https://mintforpeople.com/noticias/que-es-control-pid/>
- Palomino Hawasly, M. Á., Strefezza, M., & Contreras, L. (2016). Sistema difuso para la detección automática de estilos de aprendizaje en ambientes de formación web. 14-30.
- Pérez, A. (2018). *Automatización y Control Industrial: Principios y Aplicaciones*. Alfaomega.

Phoenix Contact. (29 de 08 de 2020). *MINI-PS-100-240AC/24DC/2 - Fuente de alimentación*.

Obtenido de MINI-PS-100-240AC/24DC/2 - Fuente de alimentación:

<https://www.phoenixcontact.com/es-pc/productos/alimentacion-de-corriente-mini-ps-100-240ac-24dc-2-2938730>

Picuíno. (2024). *Controlador PID - Control automático*. Obtenido de Controlador PID - Control automático: <https://www.picuino.com/es/control-pid.html>

Rodríguez, A. (2018). Automatización industrial con TIA Portal: Conceptos y aplicaciones. . 1-8.

Rodríguez, J. L. (2004). Lógica difusa y su aplicación a sistemas de control. 2-7.

Rodríguez, J. L. (2004). Lógica difusa y su aplicación a sistemas de control. En F. Herrera, *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial* (Vol. 4, pág. 26). Mexico. Obtenido de <https://www.journalbusinesses.com/index.php/revista/article/view/70/190>

Roth, R. (5 de Abril de 2023). *Control PID básico*. Obtenido de Control PID básico.: <https://blog.novus.com.br/control-pid-basico/?lang=es>

Saldías.A. (20 de 3 de 2024). *Sistemas de regulacion y control*. Obtenido de <https://srcsl.com/que-es-un-sensor-pt100/>

Schneider Electric. (2020). *HMI: Interfaces Hombre-Máquina para la automatización industrial*. *Recuperado de*. Schneider Electric HMI. Obtenido de

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81629470012>

Schneider Electric. (26 de 07 de 2020). *Schneider Electric*. Obtenido de

<https://www.se.com/mx/es/product-category/2100-hmi-interfaz-hombre-máquina/>

Siemens AG. (18 de 12 de 2019). Obtenido de <https://doi.org/10.21501/21454086.3253>

Siemens AG. (10 de 07 de 2021). Obtenido de <https://doi.org/10.4060/cc7724en>

Siemens AG. (2021). *Manual del Usuario de TIA Portal*. Siemens Industry Online Support.

doi:<https://doi.org/10.4060/cc7724en>

Solectro. (18 de 3 de 2022). *Funcionamiento y características de los relés* . Obtenido de

<https://solectroshop.com/es/blog/funcionamiento-y-caracteristicas-de-los-reles--n116?srltid=AfmBOopU1xgaVk-E14neqWfee5UpzCUaG3nxJpiOS55FS06JldG6S9Fd>

Turmero, P. (12 de Marzo de 2021). *Conceptos y fundamentos de lógica difusa*. Obtenido de

Conceptos y fundamentos de lógica difusa: Monografias.com.

<https://www.monografias.com/trabajos106/conceptos-y-fundamentos-logica-difusa/conceptos-y-fundamentos-logica-difusa2>

V, O. G. (04 de 1999). Sistemas de lógica difusa. Fundamentos. Revista Ingenieria.

Weidmuller. (18 de 09 de 2020). *DRL570024L*. Obtenido de

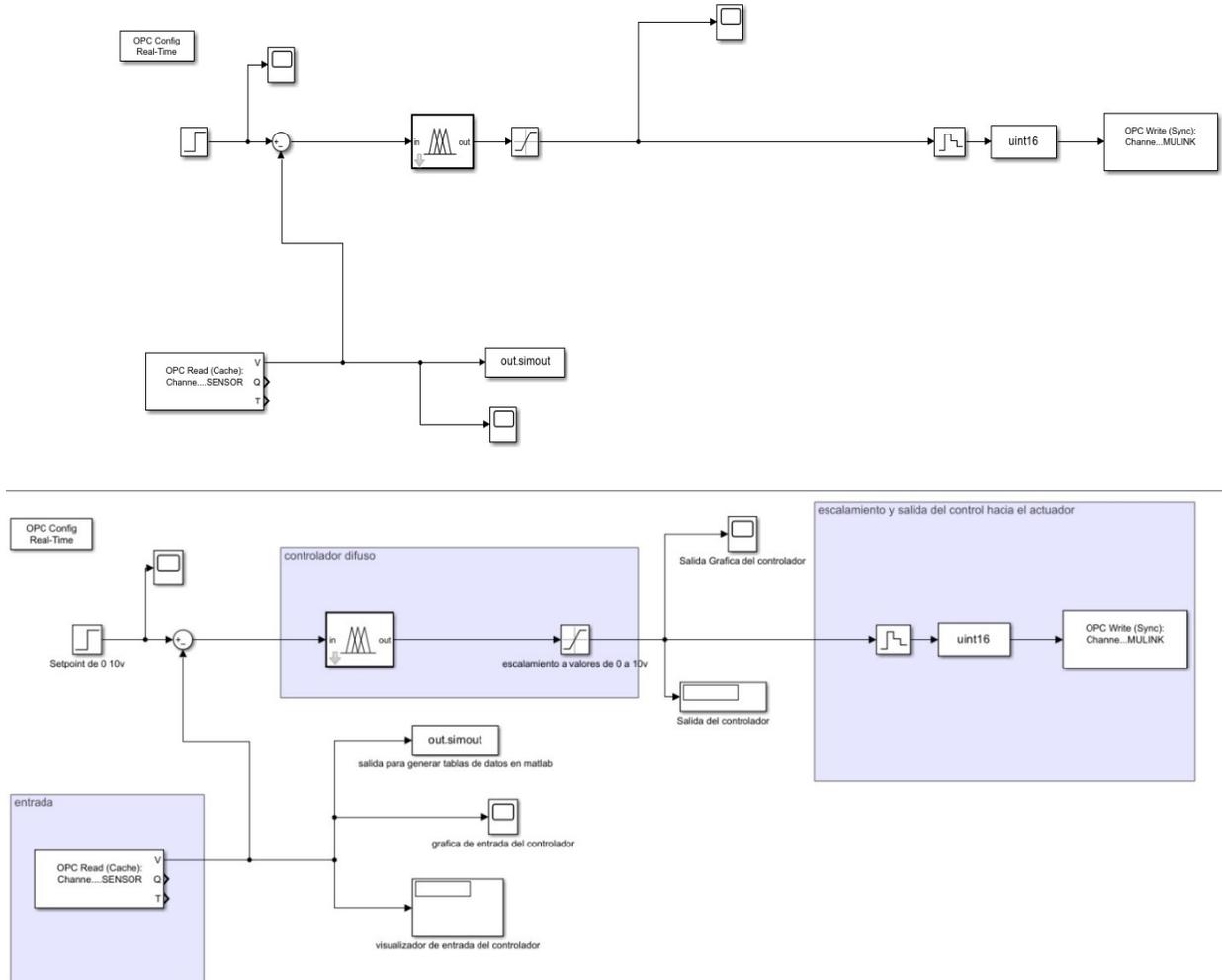
[https://catalog.weidmueller.com/procat/Product.jsp;jsessionid=94523144A6AB056689F9FE5EB1D3627D?productId=\(%5b1133630000%5d\)&page=Product](https://catalog.weidmueller.com/procat/Product.jsp;jsessionid=94523144A6AB056689F9FE5EB1D3627D?productId=(%5b1133630000%5d)&page=Product)

Zabala Jiménez, J. M. (2021). Diseño e implementación de un sistema de control difuso para

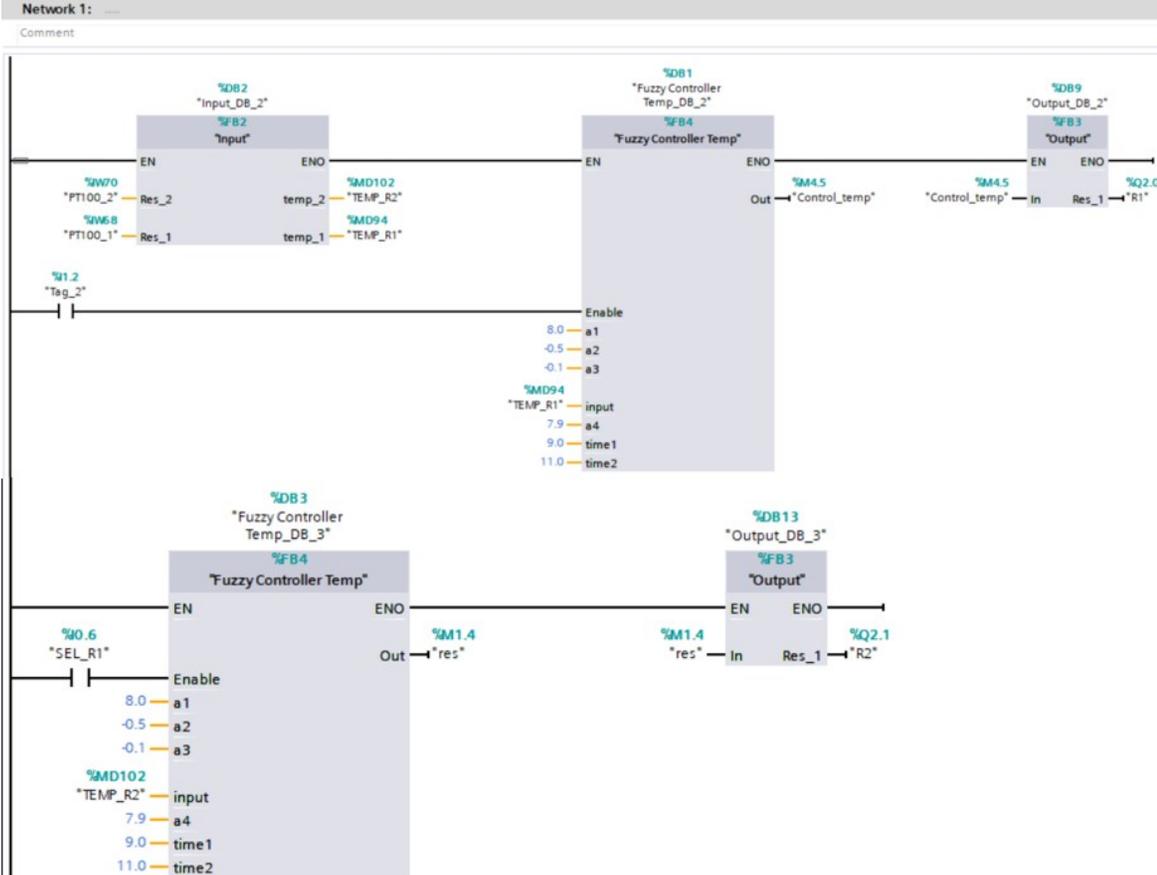
llenado de tanque por medio de un PLC s7-1500 y comunicación con Labview. 136-148.

XII ANEXOS

Diagrama de bloques implementando un controlador difuso.

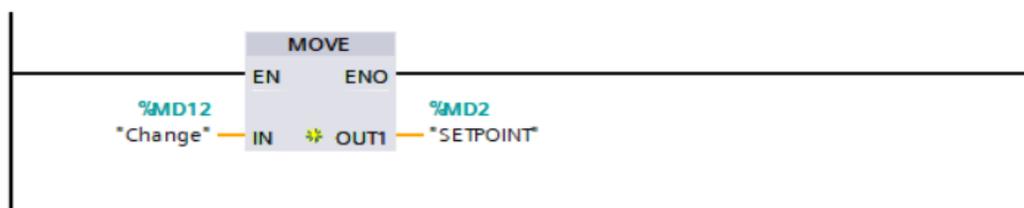


Programa de bloques "Main"



Network 2:

Comment



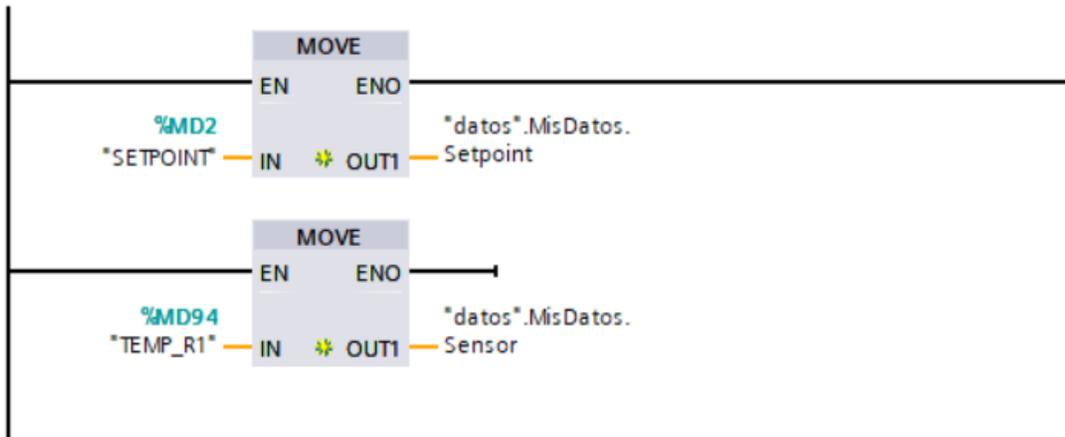
Network 3:

Comment



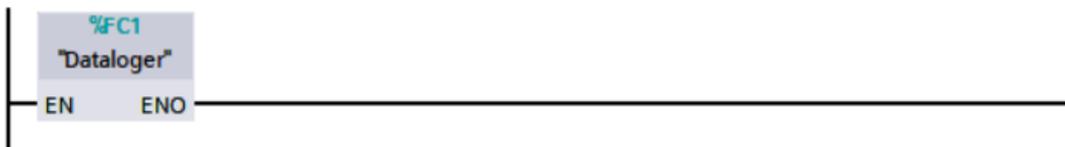
Network 5:

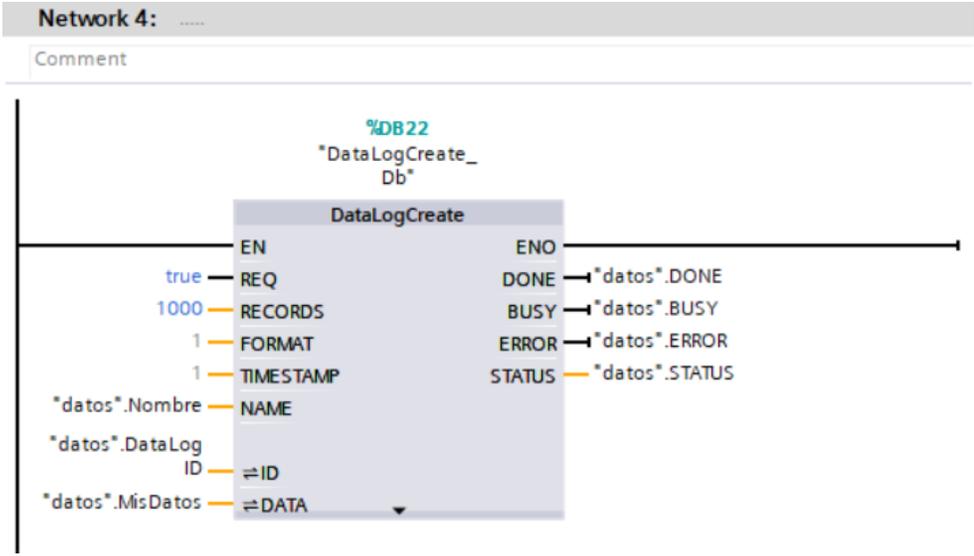
Comment



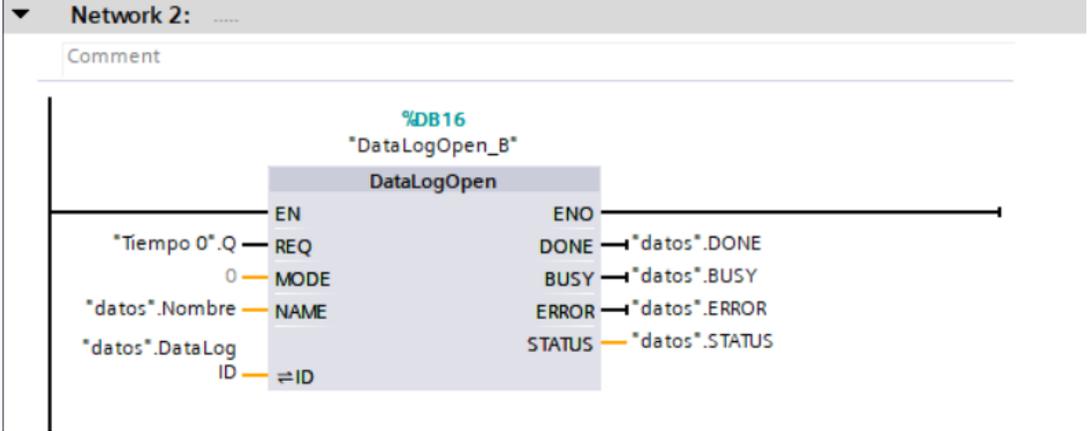
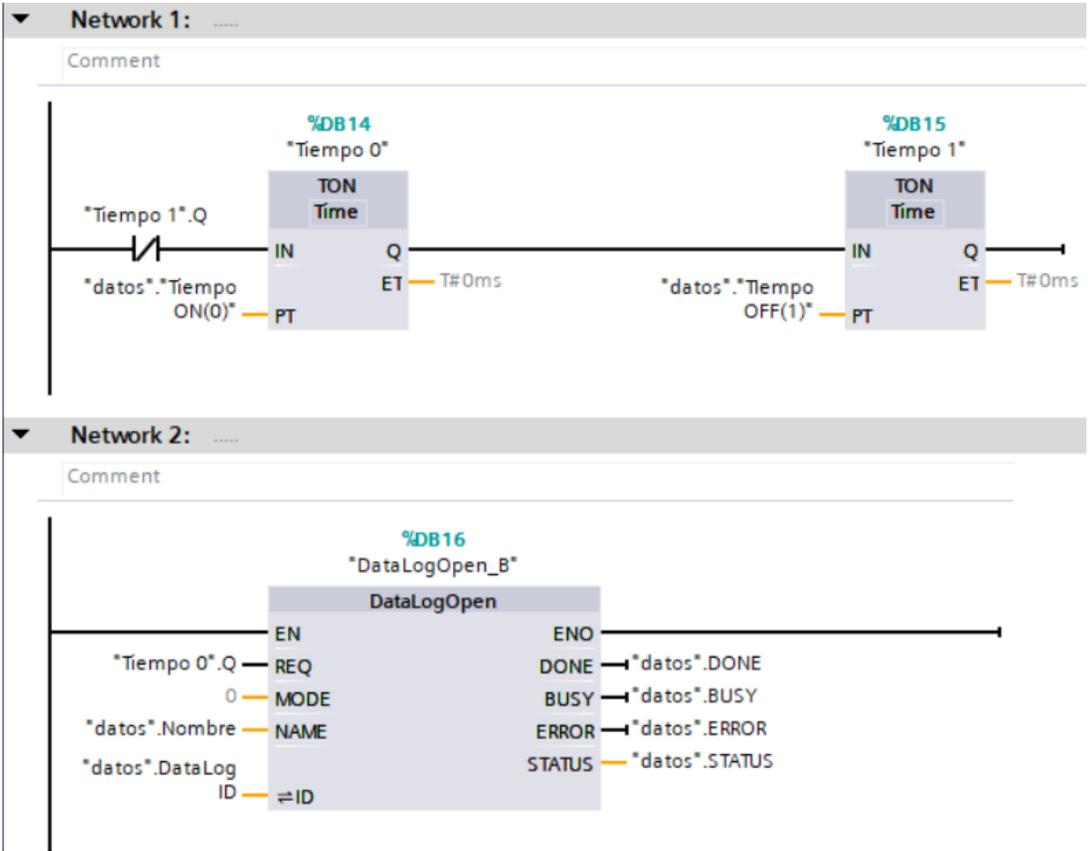
Network 6:

Comment



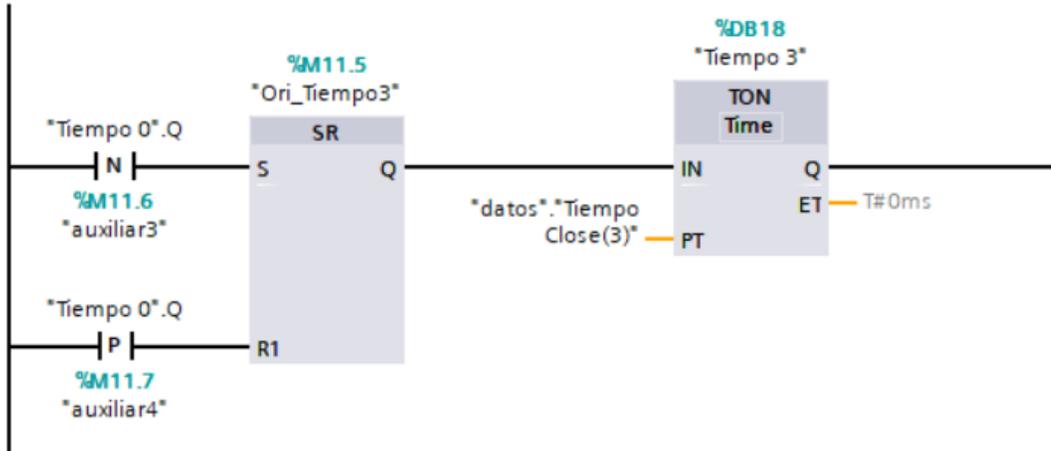


Programa de bloques "Dataloger"



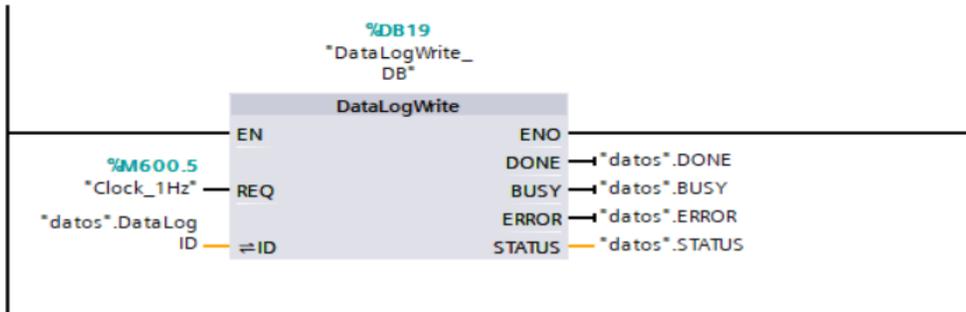
▼ Network 3:

Comment



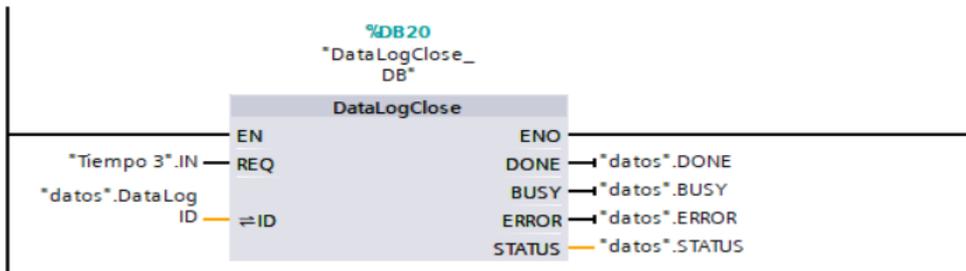
▼ Network 4:

Comment



▼ Network 5:

Comment



Código del bloque “FUZZY CONTROLLER”.

```
//VALOR DE ERROR

#A := "SETPOINT" - #input;

IF #Enable THEN
  IF #A < #a2 THEN
    #Out := FALSE;
  END_IF;
  IF #A > #a1 THEN
    #Out := TRUE;
  END_IF;
  IF #A < #a4 AND #A > #a3 THEN
    #Out := FALSE;
    IF #Out = FALSE AND "Clock_1Hz" = TRUE THEN
      #counter := #counter + 1;
    END_IF;

    IF #counter > #time1 THEN
      #Out := TRUE;
      IF #Out = TRUE AND #counter = #time2 THEN
        #counter := 0;
      END_IF;
    END_IF;
  END_IF;
END_IF;
```

Código de Visualización Matlab.

```
close all
clear all
clc
%%PID
[num, txt, raw]=xlsread("TEMP 50.xlsx")
figure
plot(num(:,1),num(:,3),Linewidth=1.5)
hold on
plot(num(:,1),num(:,2),Linewidth=1.5)
xlim([0 1084])
ylim([25 55])
```

Guayaquil, 17 de septiembre del 2024

Ing. Orlando Barcia, Msc.

Director de Carrera de Electrónica y Automatización.

De mis consideraciones:

Yo, Teddy Negrete Peña, portador de la cédula de ciudadanía No. 0912419611 tutor de trabajo de titulación **“Diseño de un Controlador Difuso para el control de temperatura del módulo ET200SP usando el S7-1200.”**, informo la calificación al Trabajo de Titulación de los estudiantes de la Malla Ajuste: JEREMY RICARDO PEÑAFIEL GARZON y JAVIER SEBASTIAN SANCHEZ RODRIGUEZ.

Crterio	Descripción del criterio	Puntaje	Observaciones
Planteamiento e identificación del problema	Se muestra la importancia del problema y la contribución que se quiere alcanzar con el Proyecto técnico.	15	
Revisión del marco teórico y fuentes de información	Este criterio estable la relación entre la revisión literaria y el problema a abordar en el Proyecto técnico, así como el adecuado nivel de exhaustividad en la revisión de las fuentes de información.	15	
Contenido Metodológico	Se establecen con claridad y de manera estructurada las distintas fases, uso de métodos, herramientas, diseños, recursos, materiales, etc. para el desarrollo del Proyecto técnico y la propuesta de solución.	20	
Funcionalidad	Permite evaluar el nivel de funcionalidad del trabajo desarrollado, tomando en cuenta los objetivos del mismo.	30	
Presentación de Resultados	Se expresan o presentan los resultados alcanzados en el desarrollo del proyecto técnico y cómo se relacionan con el cumplimiento de los objetivos, el impacto y la innovación.	15	
Conclusiones Recomendaciones	Este criterio establece la claridad con que el autor expone su posición y sus ideas respecto a las conclusiones y recomendaciones expresadas.	5	
PUNTAJE FINAL:		100	

Por la atención que se sirva dar a la presente, quedo de usted muy agradecido.

Atentamente,

Ing. Teddy Negrete.

Docente Tutor.

