



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

**CONTROLADOR PID SOBRE UN PLC SIEMENS S7-1500 PARA EL CONTROL DE
UN PROCESO TÉRMICO BASADO EN UNA CÉLULA PELTIER**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero en Electrónica.

AUTOR: EDITH DAYANNA CASTILLO QUIZHPI
CARLOS ENRIQUE FAICAN CALI

TUTOR: ING. JULIO CESAR ZAMBRANO ABAD, PhD.

Cuenca – Ecuador

2023

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

Nosotros, Edith Dayanna Castillo Quizhpi con documento de identificación N° 0106204134 y Carlos Enrique Faican Cali con documento de identificación N° 0105724843; manifestamos que:

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

Cuenca, 30 de julio del 2023

Atentamente,

Edith Dayanna Castillo Quizhpi

0106204134

Carlos Enrique Faican Cali

0105724843

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

Nosotros, Edith Dayanna Castillo Quizhpi con documento de identificación N° 0106204134 y Carlos Enrique Faican Cali con documento de identificación N° 0105724843, 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: “Controlador PID sobre un PLC Siemens S7-1500 para el control de un proceso térmico basado en una Célula Peltier” el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Electrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Cuenca, 30 de julio del 2023

Atentamente,

Edith Dayanna Castillo Quizhpi

0106204134

Carlos Enrique Faican Cali

0105724843

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Julio Cesar Zambrano Abad con documento de identificación N° 1400716849, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: CONTROLADOR PID SOBRE UN PLC SIEMENS S7-1500 PARA EL CONTROL DE UN PROCESO TÉRMICO BASADO EN UNA CÉLULA PELTIER, realizado por Edith Dayanna Castillo Quizhpi con documento de identificación N° 0106204134 y Carlos Enrique Faican Cali con documento de identificación N° 0105724843, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 30 de julio del 2023

Atentamente,

PhD. Julio Cesar Zambrano Abad

1400716849

AGRADECIMIENTOS

Dedicatoria de Carlos Faican

Querida mamá María Cali, querido papá Enrique Faican, apreciada compañera de trabajo de titulación Dayanna Castillo y estimado tutor Ph.D. Julio Cesar Zambrano, En este momento tan significativo y emocionante, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a cada uno de ustedes por el inmenso apoyo y contribución que han brindado a lo largo de mi trayectoria académica y en la culminación de mi trabajo de titulación.

Mamá y papá, su amor incondicional, aliento constante y sacrificio han sido la base de mi crecimiento personal y académico. Su apoyo inquebrantable me ha dado la fuerza para perseverar en momentos difíciles y alcanzar este logro tan importante.

Gracias por estar siempre a mi lado, impulsándome a dar lo mejor de mí.

Querida Dayanna, trabajar contigo en este proyecto ha sido una experiencia enriquecedora. Tu dedicación, entusiasmo y capacidad para encontrar soluciones nos han llevado a superar obstáculos y alcanzar nuestros objetivos. Agradezco sinceramente tu colaboración y amistad a lo largo de esta travesía académica.

Estimado Ph.D. Julio Cesar Zambrano, su orientación experta y sabiduría académica han sido fundamentales en el desarrollo de mi trabajo de titulación. Su paciencia, motivación y guía constante han sido invaluable para mi crecimiento como profesional. Gracias por compartir su conocimiento y por ser un mentor excepcional.

Este logro no solo es mío, sino también de cada uno de ustedes, quienes han dejado una huella indeleble en mi camino hacia el éxito. Cada palabra de aliento, cada

consejo y cada gesto de apoyo han sido fundamentales para alcanzar este momento.

No hay palabras suficientes para expresar mi gratitud, pero espero que sepan que siempre llevaré sus enseñanzas y contribuciones conmigo en cada paso que dé. De nuevo, muchas gracias por todo lo que han hecho por mí. Espero seguir honrando su legado y hacerlos sentir orgullosos en cada paso de mi carrera profesional.

Dedicatoria de Edith Castillo

En este momento tan significativo, quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que han sido fundamentales y eje promotor en el desarrollo y culminación de mi trabajo de titulación. En primer lugar, quiero agradecer de manera especial a mi madre, Rosario Quizhpi, por ser mi más grande ejemplo de esfuerzo y constancia. Gracias por apoyarme incondicionalmente a lo largo de mi camino académico y por enseñarme el valor del trabajo arduo y la perseverancia.

A mi abuelita, Teresita Barbecho, le agradezco por estar siempre presente en cada etapa de mi vida, brindándome su amor, sabios consejos y aliento inquebrantable. A mi familia materna, les agradezco por ser mi refugio, su apoyo incondicional ha sido fundamental para superar los desafíos y alcanzar este logro académico. A mis queridos amigos, les agradezco de corazón por estar presentes en cada paso de este camino.

Asimismo, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi compañero, por ser parte fundamental de este emocionante viaje académico. Su habilidad para enfrentar desafíos con determinación y voluntad para explorar nuevas ideas han sido una verdadera inspiración. Aprecio profundamente nuestra estrecha colaboración y la amistad que hemos construido durante todo el período académico. Sin duda, este éxito es el resultado de nuestro trabajo en equipo, y estoy enormemente agradecido de haber compartido esta experiencia contigo.

Finalmente, agradezco de manera especial a mi tutor Julio Zambrano, PhD por su orientación experta, paciencia y compromiso con mi formación académica. Sus conocimientos y guía han sido esenciales para alcanzar los objetivos de esta investigación.

DEDICATORIAS

DEDICATORIA

Dedicatoria de Edith Castillo

Deseo dedicar este logro académico a mi familia materna, en especial a mi querida madre y a mi abuelita. A ti, mamá, mi fuente de inspiración y apoyo incondicional, agradezco tus palabras alentadoras y tu amor inquebrantable que me han impulsado a alcanzar este sueño. Y a ti, abuelita, mi faro de sabiduría y cariño, agradezco tus valiosos consejos que me han guiado en este camino. Esta tesis lleva sus nombres en gratitud por su presencia constante y su inestimable papel en mi formación como persona y estudiante. Cada paso dado ha sido enriquecido por su apoyo, y este éxito es también suyo.

Dedicatoria de Carlos Enrique Faican Cali

Quiero dedicar mi logro académico a mi Mamá y papá, su amor incondicional y aliento constante han sido mi mayor impulso para alcanzar mis metas. Vuestras palabras de ánimo y confianza en mi capacidad han sido como un faro en los momentos de oscuridad, guiándome hacia el éxito. Cada sacrificio que han hecho por mí ha sido valorado y es una muestra del amor inmenso que me brindan. Esta

dedicación es un tributo a la maravillosa crianza que me han dado y al ejemplo de perseverancia que han demostrado.

Hoy, al alcanzar este hito en mi vida, quiero agradecerles de corazón por estar siempre a mi lado, impulsándome a dar lo mejor de mí. Sin su presencia y apoyo, este logro no sería posible. Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en mi camino y espero que esta dedicación sea un reflejo de mi profundo agradecimiento.

Índice general

Agradecimientos	I
Dedicatorias	III
Índice General	V
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	X
Resumen	XI
Abstract	XII
Antecedentes	1
Justificación	2
Grupo Objetivo (Beneficiarios)	3
Objetivos	4
Objetivo General	4
Objetivos Específicos	4
Introducción	5
1. Arquitectura del sistema	6
1.1. Sistema de Control	6
1.2. Proceso térmico basado en la célula Peltier	9

1.2.1. Efectos termoeléctricos.	9
1.2.2. Célula Peltier	12
1.3. Elementos de medición	16
2. Herramienta PID Compact de TIA Portal	19
2.1. Introducción	19
2.2. Incorporación del bloque PID en TIA Portal	20
2.3. Configuración del bloque PID	26
3. Diseño e implantación del sistema de control	33
3.1. Implementación de la etapa de potencia	33
3.2. Identificación de la dinámica del sistema	37
3.3. Sintonización del controlador PID con PID-Compact	44
3.3.1. Sintonización de la superficie caliente	46
3.3.2. Sintonización de la superficie fría	51
3.4. Interfaz humano-máquina.	55
3.4.1. Incorporación de una Estación SIMATIC PC	55
3.4.2. Diseño de la interfaz gráfica	57
4. Análisis de resultados y discusión	63
4.1. Temperaturas de operación	63
4.2. Control de la temperatura de la superficie caliente	64
4.2.1. Comportamiento del sistema ante cambios en la referencia	64
4.2.2. Comportamiento del sistema frente a una perturbación.	66
4.3. Control de la temperatura de la superficie fría	66
4.3.1. Comportamiento del sistema ante cambios en la referencia	66
4.3.2. Comportamiento del sistema frente a una perturbación.	68
Conclusión y Trabajos futuros	69
Referencias	73

Índice de figuras

1.1.	Diagrama de bloques de un sistema de control.	7
1.2.	Arquitectura del sistema de control a implementar.	8
1.3.	Efecto Joule [3]	9
1.4.	Efecto Seebeck [5]	10
1.5.	Efecto Thomson. [7]	11
1.6.	Esquema del Efecto Peltier. [8]	11
1.7.	Célula Peltier modelo comercial TEC-12706	12
1.8.	Kit de enfriamiento Peltier DIY.[10]	13
1.9.	Relación Temperatura(C)/Voltaje(V) en una célula Peltier	14
1.10.	Curva característica del medidor de temperatura LM35.	17
1.11.	Módulo con sensor LM35DZ.	18
2.1.	Selección del CPU 6ES 516-3AN01-AB0	20
2.2.	Módulos de entradas y salidas.	21
2.3.	Vista del proyecto en TIA Portal.	22
2.4.	Bloque Cyclic Interrupt.	22
2.5.	Bloque de función PID.	23
2.6.	Bloque PID-Compact.	24
2.7.	Selección del modo de operación del bloque PID.	25
2.8.	Bloque PID-compact agregado al proyecto en TIA Portal.	25
2.9.	Configuración de variables en el bloque PID.	26
2.10.	Elección de la opción de temperatura.	27
2.11.	Selección de la interfaz de entrada y salida.	27
2.12.	Configuración de valores máximos y mínimos de temperatura de la planta.	28

2.13. Relación de escala en el valor real.	28
2.14. Alarmas en el controlador PID.	29
2.15. Limitaciones PWM	29
2.16. Límites del valor de salida.	30
2.17. Pantalla de sintonía del controlador PID.	30
2.18. Optimización fina.	31
2.19. Optimización en curso.	31
2.20. Optimización finalizada.	32
3.1. Símbolo de IGBT.	34
3.2. Circuito de potencia para el control con IGBT.	37
3.3. Gráficas a temperatura ambiente.	38
3.4. Respuesta de temperatura en el punto de operación (voltaje de ingreso de 7.45V).	38
3.5. Respuesta de temperatura con una señal escalón de 0.35V.	39
3.6. Herramienta Trace	40
3.7. Registro de temperaturas en la herramienta Trace.	40
3.8. Barra de 3 herramientas en Tracer.	41
3.9. Datos exportados en formato .csv	41
3.10. Gráfica de comportamiento del sistema en superficie caliente.	43
3.11. Gráfica de comportamiento del sistema en superficie fría.	43
3.12. Creación de los bloques PID y el bloque de interrupción cíclica.	45
3.13. Bloques PID dentro del bloque de interrupción cíclica.	45
3.14. Objetos tecnológicos para la configuración de controladores PID.	46
3.15. Bloque PID par el control de la superficie caliente.	47
3.16. Configuración de tipo de controlador y parámetros de entrada y salida.	48
3.17. Configuración de límites de entrada.	48
3.18. Configuración de los límites de sintonización.	49
3.19. Configuración de límites de valores de salida (acción de control).	49
3.20. Pantalla de la herramienta PID-Compact con optimización fina inicializada.	50
3.21. Pantalla con la sintonización fina culminada.	50
3.22. Pantalla del PID-Compact con las variables de control PID.	51
3.23. Bloque PID para el control de temperatura de la superficie fría.	52

3.24. Configuración de los límites de la variable controlada.	53
3.25. Pantalla del PID-Compact con optimización fina en curso.	53
3.26. Proceso de sintonía culminado.	54
3.27. Pantalla de PID-Compact con variables de control.	54
3.28. Ventana para agregar un nuevo dispositivo en WinCC.	56
3.29. WinCC RT Advanced.	56
3.30. Módulo de comunicación IE general	57
3.31. Comunicación entre el PLC y la estación HMI	57
3.32. Agregar una nueva plantilla en WinCC	58
3.33. Botones en plantilla principal.	58
3.34. Menú para agregar imágenes.	59
3.35. Pantalla de la interfaz en lazo abierto	60
3.36. Interfaz del controlador PID para la Superficie Caliente.	60
3.37. Interfaz del controlador PID para la Superficie Fría.	61
3.38. Configuración de Runtime	61
3.39. Configuraciones generales de la pantalla.	62
4.1. Porcentaje en voltaje de salida del 100%.	63
4.2. Control de temperatura de la superficie caliente (referencia de 40°C)	64
4.3. Comportamiento de célula Peltier frente a varias referencias.	65
4.4. Comportamiento de célula Peltier frente a una perturbación.	66
4.5. Comportamiento de célula Peltier con referencia de 17°C.	67
4.6. Comportamiento de célula Peltier frente a varias referencias.	67
4.7. Comportamiento de célula Peltier frente a una perturbación.	68

Índice de tablas

1.1. Consumo de los componentes del kit de enfriamiento Peltier DIY.	14
3.1. Características eléctricas del IGBT	34
3.2. Comportamiento de variables con una fuente de 8V/2A	35
3.3. Comportamiento de variables con una fuente de 12V/3,4A	36

Resumen

La Celda Peltier es un dispositivo termoeléctrico ampliamente utilizado para generar un efecto de enfriamiento o calentamiento controlado en diversos sistemas industriales y de investigación. Este trabajo de titulación tiene como objetivo principal el diseño, implementación y evaluación de dos controladores PID para controlar la temperatura de la superficie fría y la superficie caliente de la celda.

Los controladores se implementa sobre un PLC SIMATIC S7-1500 de SIEMENS. En este caso se utiliza la herramienta PID-Compact, disponible para esta gama de controladores. Gracias a la utilización de esta herramienta es posible sintonizar los controladores y analizar su comportamiento de manera visual.

Los resultados obtenidos muestran que es posible controlar las temperaturas de las superficies de la celda utilizando controladores clásicos de tipo PID. Para el análisis y la gestión del sistema, de manera complementaria se implementa un sistema HMI utilizando la herramienta de WinCC.

Abstract

The Peltier cell is a thermoelectric device widely used to generate a controlled cooling or heating effect in various industrial and research systems. The main objective of this work is the design, implementation and evaluation of two PID controllers to control the temperature of the cold surface and the hot surface of the cell.

The controllers are implemented on a SIEMENS SIMATIC S7-1500 PLC. In this case, the PID-Compact tool, available for this range of controllers, is used. Thanks to the use of this tool it is possible to tune the controllers and analyze their behavior in a visual way.

The results obtained show that it is possible to control the cell surface temperatures using classical PID controllers. For the analysis and management of the system, a complementary HMI system is implemented using the WinCC tool.

Antecedentes

El deseo del ser humano por controlar las diferentes condiciones climáticas para poder tener un ambiente más confortable, es un tema por el cual se han venido desarrollando diferentes mecanismos, estrategias y tecnologías. La temperatura es una condición física que hemos buscado controlar desde hace 400 años, y en sus inicios se propuso el termostato; el mismo que ha servido como punto de inicio hacia las diferentes tecnologías aplicadas a la temperatura.

Los procesos térmicos han sido controlados gracias a diferentes estrategias. Hoy en día se pueden encontrar aplicaciones que parten desde el control básico ON/OFF hasta la utilización de controladores avanzados que utilizan sistemas computacionales.

Una de las herramientas de control más utilizadas en la industria es el controlador PID, el cual ofrece una composición del factor proporcional, integral y derivativo del error. Gracias a la utilización de este tipo de controladores es posible alcanzar las referencias en tiempos adecuados y con un error nulo.

Hoy en día existen diversas alternativas tecnológicas para implementar controladores PID. Este tipo de controladores están disponibles en algunas marcas de PLCs dentro de las gamas medias y altas. Para este proyecto se plantea la utilización de un PLC S7-1500 para controlar las temperaturas fría y caliente de la Celda Peltier.

Para un adecuado funcionamiento se plantea la construcción de un kit cuyo elemento principal es la celda Peltier. Sobre la celda se plantea incorporar elementos de medición para registrar las temperaturas de la superficie fría y caliente. Por otra parte sobre las superficies de la celda se plantea la incorporación de elementos disipadores y elementos de ventilación.

Justificación

La celda Peltier ofrece un diferencial de temperatura en cuanto a sus dos superficies, puesto que en su proceso de trabajo calienta una de ellas al tiempo que enfría la otra. Este fenómeno se da al aplicar voltaje en sus terminales. Este fenómeno puede ser ampliamente aprovechado siempre y cuando se logre obtener un control del proceso térmico resultante. El estudio del control térmico de la celda Peltier es importante y aplicable en la industria ya que existen diferentes necesidades presentes en cuanto al control de la temperatura de dispositivos de refrigeración sólidos, como en tecnología de imagen, en cámaras y telescopios, y en el enfriamiento de pequeños componentes computacionales.

El control de la temperatura de las superficies de la célula se logra con la diferencia de potencial aplicada a la célula. Debido a las perturbaciones o no linealidades propias del sistema, el control de temperatura de la célula es un problema de control que debe ser direccionado apropiadamente. En este caso se propone obtener el modelo matemático de la célula a través de técnicas de identificación. Por otra parte y como elemento esencial del trabajo de titulación también se diseñará e implementará un controlador PID sobre un PLC Siemens S7-1500.

Dado que estos dispositivos son relativamente nuevos, el presente trabajo de investigación se considera como un aporte inicial, el cual se verá reflejado en un prototipo de laboratorio que estará disponible para los estudiantes de la universidad. Los dispositivos educativos siempre son de gran utilidad dentro de laboratorios puesto que aportan en el aprendizaje interactivo y promueven la investigación con una orientación diferente. A partir de la construcción del prototipo se pueden generar nuevas ideas para futuros trabajos de titulación en los cuales se pueden plantear otras estrategias de control más avanzadas.

Grupo Objetivo (Beneficiarios)

El presente proyecto se enfoca en la implementación de un sistema de control para un proceso térmico basado en una celda Peltier. Dado que el trabajo incluye la fabricación de un prototipo de control para laboratorio, los beneficiarios directos serán los estudiantes de la carrera de Electrónica y Automatización y los estudiantes del Grupo de Investigación en Interacción, Automática y Robótica (GIIRA) de la UPS.

Objetivos

Objetivo General

- Desarrollar un controlador PID sobre un PLC Siemens S7-1500 para el control de un proceso térmico basado en una célula Peltier.

Objetivos específicos:

- Diseñar y construir un proceso térmico basado en una célula Peltier.
- Obtener el modelo matemático del proceso utilizando técnicas de identificación de sistemas.
- Diseñar e implementar el controlador PID para controlar la temperatura de las caras de la célula Peltier
- Implementar un sistema HMI para la operación y monitoreo de las variables del proceso.

Introducción

Las celdas Peltier son dispositivos termoeléctricos que permiten la conversión directa de energía térmica en energía eléctrica, y viceversa. Estas celdas están compuestas por materiales semiconductores que, al ser sometidos a una diferencia de temperatura, generan una corriente eléctrica. Las celdas Peltier son utilizadas en diversas aplicaciones, desde enfriamiento de dispositivos electrónicos hasta generación de energía eléctrica a partir de calor residual. El funcionamiento de las celdas Peltier se basa en el efecto Peltier, un fenómeno termoeléctrico que ocurre cuando una corriente eléctrica fluye a través de dos materiales conductores diferentes que están en contacto y a diferentes temperaturas. Cuando la corriente fluye desde un conductor caliente a uno frío, se produce una transferencia de calor que resulta en una diferencia de temperatura entre los dos conductores. Este efecto es reversible, lo que significa que si se aplica una diferencia de temperatura a dos conductores en contacto, se genera una corriente eléctrica. En las celdas Peltier, se utilizan dos materiales semiconductores diferentes, uno de tipo N y otro de tipo P, que se unen entre sí para formar una unión llamada termopar. Cuando se aplica una corriente eléctrica a la termopar, se produce un flujo de electrones que viajan desde el material N al material P, generando una transferencia de calor desde el lado frío al lado caliente de la unión. Este efecto se conoce como efecto Peltier y se utiliza para enfriar o calentar el dispositivo dependiendo de la dirección del flujo de corriente. Cuando la corriente eléctrica fluye en la dirección opuesta, el efecto Peltier se invierte y se genera una transferencia de calor en la dirección opuesta. De esta manera, las celdas Peltier pueden utilizarse como generadores de energía termoeléctrica, convirtiendo el calor en energía eléctrica a través del efecto Seebeck, que es el opuesto al efecto Peltier.

Capítulo 1

Arquitectura del sistema

En este capítulo se detallan diferentes aspectos sobre la arquitectura de control que se emplea para controlar el proceso térmico de una célula Peltier mediante un PLC Siemens S7-1500.

La célula Peltier es un dispositivo electrónico que tiene la propiedad física de mantener sus dos superficies a temperaturas contrarias. Este fenómeno se da al aplicar una diferencia de tensión en sus puntales. El correcto funcionamiento de la célula depende de ciertos componentes extra para mantener sus temperaturas independientes. El capítulo tiene como finalidad presentar una descripción de los diferentes bloques, estructuras y sistemas empleados para el control del proceso térmico en mención.

1.1. Sistema de Control

Un sistema de control se define como un grupo organizado y estructurado de elementos interconectados que trabajan en colaboración, con la finalidad de mantener o regular el comportamiento de un sistema físico o dispositivo. Los sistemas de control son ampliamente empleados en diferentes áreas de la ingeniería, de la salud y de la ciencia [1]. El sistema de control empleado en la investigación se basa en el manejo preciso de la temperatura en las dos superficies de la célula Peltier.

En general, un sistema de control consta de ciertos componentes principales y característicos (véase la Figura 1.1), los cuales son descritos a continuación:

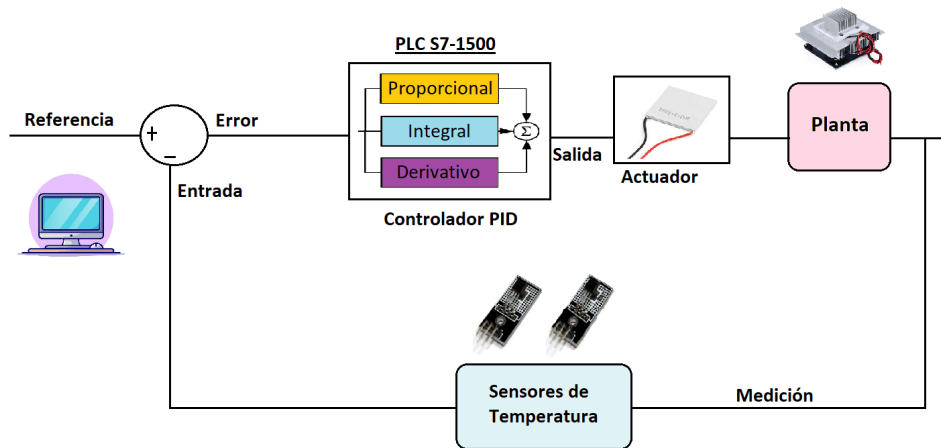


Figura 1.1: Diagrama de bloques de un sistema de control.

Variable controlada Es la variable que se desea regular. Normalmente, esta variable es medida a través de algún instrumento. Para este caso, la variable controlada puede ser la temperatura de la superficie fría o la temperatura de la superficie caliente de la celda. Ambas temperaturas son medidas a través de dispositivos LM35, los cuales se encuentra en contacto directo con cada una de las superficies de la célula Peltier.

Planta o proceso Es el sistema o proceso físico del cual se busca regular o controlar una o más variables. Este componente esta en constante supervisión ya que a este se le aplican acciones con la finalidad de establecer el comportamiento deseado. Para este caso, la planta es un kit que consta principalmente en una célula Peltier, dos disipadores de calor y dos ventiladores.

Controlador Es el dispositivo en el que se procesa la información. Su función principal es generar el control correcto para el sistema. En este sistema de control el controlador es el PID que se encuentra en el PLC S7-1500. El dispositivo tiene acceso a las dos diferentes mediciones de temperatura y posterior a ello genera la salida necesaria para el resultado pedido.

Acción de control Es la señal que genera el controlador, la cual es enviada al actuador para modificar la variable que se desea controlar. En este caso la acción de control sale del PLC y es generada por el bloque PID.

Error Hace referencia a la diferencia que se da entre la referencia y el valor medido de la variable que se está controlando. Esta señal es necesaria para el cálculo de la acción de control.

En la Figura 1.2 se muestra la arquitectura del sistema de control a implementar. La planta consiste de un proceso térmico basado en una célula Peltier. En las superficies fría y caliente se han adaptado sensores LM35. A la célula también se ha acoplado disipadores y sistemas de ventilación. Por otra parte, la acción de control generada por el PLC es amplificada gracias a la utilización de un IGBT.

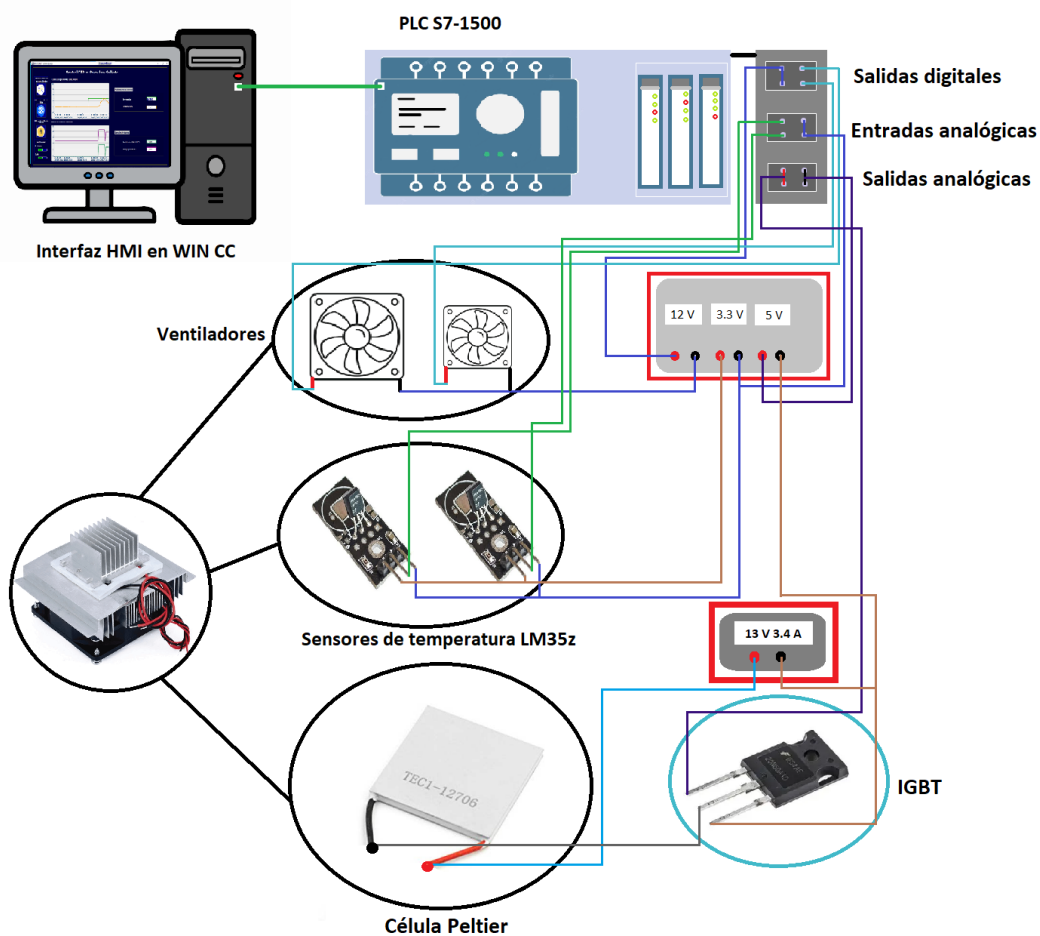


Figura 1.2: Arquitectura del sistema de control a implementar.

1.2. Proceso térmico basado en la célula Peltier

1.2.1. Efectos termoeléctricos.

El efecto Peltier no es una teoría aislada, mas bien es una conjetura de tres efectos termoeléctricos vinculados. La termoelectricidad permite relacionar fenómenos térmicos y eléctricos que la humanidad reconoce y estudia desde el siglo XIX. Los efectos en mención se describen a continuación:

Efecto Joule: El efecto Joule es un fenómeno físico descubierto por el británico James Prescott Joule en el año 1840. A través de sus experimentos, Joule demostró que cuando una corriente eléctrica fluye a lo largo de un conductor, se genera calor debido a la resistencia eléctrica inherente del material. Esta resistencia es el resultado de las colisiones entre los átomos y moléculas del material.

La cantidad de calor generado está directamente relacionado con la resistencia del material. En la figura 1.3 se puede observar que cuanto mayor sea la resistencia eléctrica del conductor y mayor sea la corriente que lo atraviese, mayor será la cantidad de calor producido por el efecto Joule [2]. Los estudios de Joule sentaron las bases para comprender la relación entre la electricidad y el calor, y establecieron los principios de la conservación de la energía.

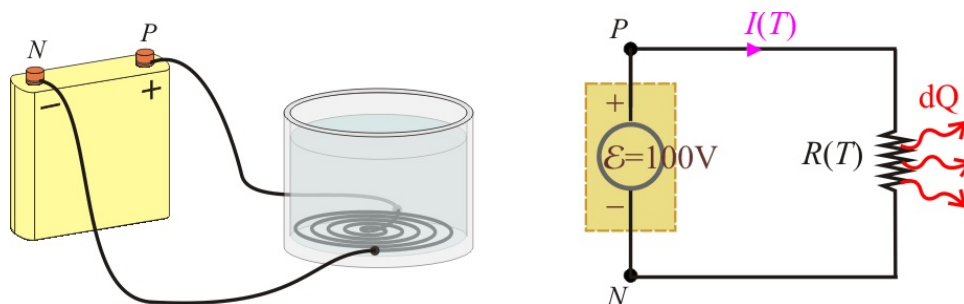


Figura 1.3: Efecto Joule [3]

Efecto Seebeck: El efecto Seebeck fue descubierto por el médico físico alemán Thomas Johann Seebeck a principios del siglo XIX, y es considerado el primer efecto termoeléctrico descubierto. En sus experimentos, se encontró una relación entre el calor y la electricidad al observar una caída de tensión entre dos materiales conectados

debido al gradiente de temperatura [4]. Para que este efecto funcione, los materiales utilizados deben ser distintos, lo que permite que la temperatura de la unión se eleve en un extremo mientras que en el otro se enfríe. Es importante destacar que estos materiales no necesitan estar soldados. El gradiente de temperatura generado en la unión permite obtener de manera espontánea una corriente eléctrica en el circuito. Seebeck observó este fenómeno tras experimentar con la disposición descrita y notar una desviación en su brújula. El efecto Seebeck permite convertir directamente una diferencia de temperaturas en energía eléctrica y el coeficiente Seebeck relaciona la diferencia de potencial generada con la diferencia de temperatura (véase la figura 1.4).

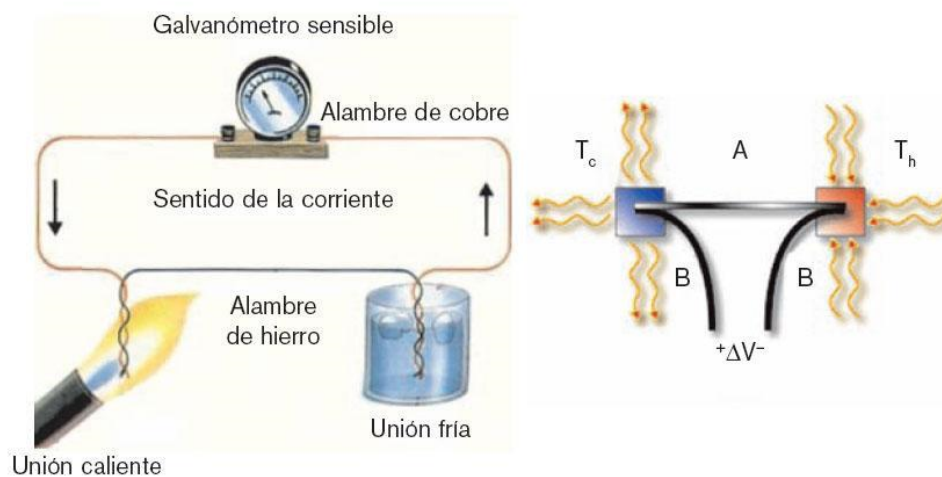


Figura 1.4: Efecto Seebeck [5]

Efecto Thomson: Conocido también como efecto Peltier-Seebeck inverso, el efecto Thomson fue descubierto por el físico escocés William Thomson en el año 1851. En la figura 1.5, se puede observar la diferencia que existe en cuanto la absorción y generación de calor dependiendo del tipo de efecto que se busque. Thomson llevó a cabo varios estudios en el campo de la termoelectricidad, a través de los cuales identificó un patrón físico que describe la generación de calor o frío cuando una corriente eléctrica fluye a través de un conductor con un gradiente de temperatura [6].

Este fenómeno se caracteriza por la existencia de un gradiente de temperatura en el conductor, lo que provoca una transferencia de calor. En resumen, el efecto Thomson establece que el calor puede generarse o absorberse en el conductor en

presencia de un flujo de corriente. Si la corriente eléctrica y el gradiente de temperatura tienen la misma dirección, se genera calor en el conductor. Por el contrario, si sus direcciones son opuestas, se absorbe calor del conductor.

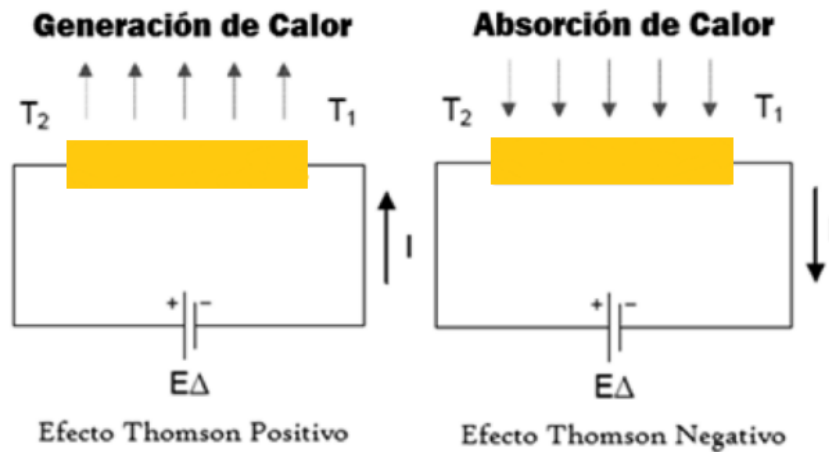


Figura 1.5: Efecto Thomson. [7]

En 1834 Jean Charles Peltier, descubrió el efecto que asegura el fenómeno que consisten en pasar corriente por un circuito compuesto de materiales diferentes cuyas uniones están a la misma temperatura. Este efecto se produce como efecto inverso al de Seebeck y relaciona los diferentes efectos termoeléctricos mencionados previamente. En el caso del efecto Peltier, se absorbe calor en una unión y se desprende en la otra como se muestra en la figura 1.6. Una de sus características más sobresalientes es el hecho que la inversión de la polaridad en sus puntales logra un efecto inverso.

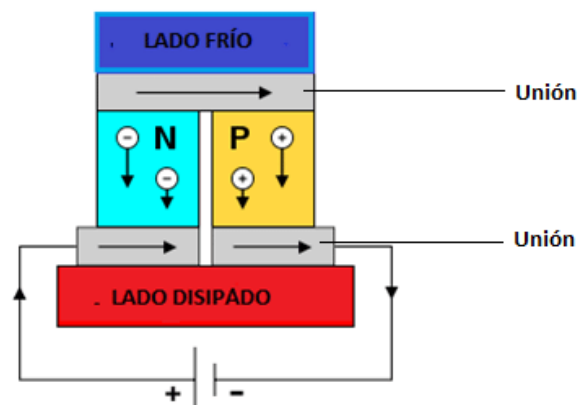


Figura 1.6: Esquema del Efecto Peltier. [8]

1.2.2. Célula Peltier

La celda Peltier, también conocida como "módulo Peltier", es un dispositivo semiconductor termoeléctrico utilizado para la transferencia de calor. Consiste en dos placas cerámicas unidas mediante una unión termoeléctrica, la cual genera de manera interna el efecto Peltier. Actualmente, las células Peltier son construidas sólidamente y en un tamaño reducido como se observa en la figura 1.7. Los semiconductores están fabricados en base de Teluro y Bismuto para que puedan ser tipo P o N. Con estos materiales se facilita el trasvase de calor del lado frío al caliente por el efecto de una corriente continua [9].



Figura 1.7: Célula Peltier modelo comercial TEC-12706

Una sola célula genera aproximadamente 0.5 W de potencia, esto es importante para las diferentes aplicaciones en las que se quiera aplicar este dispositivo. Las células Peltier tienen algunos inconvenientes los cuales son: alta demanda de corriente por otro lado dependiendo de la temperatura y la humedad del ambiente puede producirse condensación.

En este trabajo se realiza el control de las superficies fría y caliente de una célula Peltier. Para este caso se ha adquirido un kit comercial que viene acoplado con elementos disipadores y ventiladores. A continuación se brindan algunos detalles del kit utilizado.

Kit basado en la célula Peltier DIY: Cuenta con una célula Peltier modelo TEC1-12706 (actuador), dos ventiladores a corriente continua y dos disipadores para cada superficie de la célula. La célula posee las siguientes dimensiones: 40mm x 40mm x 3.8mm. El ensamblaje del kit se puede observar en la figura 1.8. Los ventiladores en conjunto con los disipadores son elementos críticos puesto que estos cumplen una función importante para que exista un flujo de calor en los disipadores y de esta manera eliminar el calor que se genera en la superficie caliente.



Figura 1.8: Kit de enfriamiento Peltier DIY.[10]

En la imagen 1.9 se muestra el comportamiento de la célula Peltier dependiendo el voltaje que se le aplique. La gráfica permite observar de mejor manera el concepto que se plantea con respecto a la potencia.

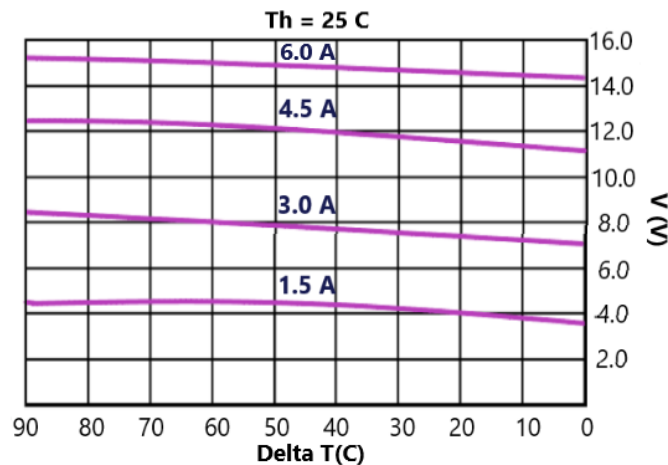


Figura 1.9: Relación Temperatura(C)/Voltaje(V) en una célula Peltier

Un ventilador facilita el flujo de aire y normalmente se encuentra en contacto con un disipador térmico. El ventilador impulsa el aire caliente hacia el exterior para conseguir el flujo de calor dentro del sistema.

En la tabla 1.1, se presenta el consumo de los elementos mencionados, los mismos que son alimentados con corriente continua. En el caso de la célula Peltier el consumo en corriente de la misma depende del voltaje aplicado a sus terminales.

Tabla 1.1: Consumo de los componentes del kit de enfriamiento Peltier DIY.

Componente Electrónico	Voltaje [Voltios]	Corriente [Amperios]
Célula Peltier (TEC1-12706)	max 12	max 6
Ventilador (Superficie Fría)	max 12	max 0.12
Ventilador (Superficie Caliente)	max 12	max 0.37

Actualmente, los procesos térmicos basados en una célula Peltier se constituyen un problema de control, ya que se requiere de un sistema que actúe con gran precisión para poder lograr las temperaturas deseadas en cada una de las células. De igual manera, en la literatura también se reportan algunas aplicaciones de modelado, lo cual es un problema de ingeniería altamente atractivo debido a las grandes no linealidades que exhibe este proceso.

En los últimos años se ha visto la necesidad de reutilizar la energía calorífica residual para generar una nueva fuente de energía secundaria y de esta manera tener un sistema más sustentable. El fenómeno de la energía calorífica ha sido analizado en

varios documentos, a través de diferentes efectos y fenómenos. Como punto inicial de estudio se puede tomar el efecto termoeléctrico, el cual permite transformar voltaje en diferencia térmica y viceversa; se conoce que este efecto engloba tres efectos que son: el efecto Peltier, el efecto Seebeck y el efecto Thomson. Las celdas Peltier basan su principio de funcionamiento en el principio ya mencionado. Al tener un dispositivo capaz de conectar energía térmica y energía eléctrica, se abre un gran campo de oportunidades en el cual se puede estudiar las aplicaciones de esta.

En [11] se explica y especifica un nuevo circuito que tiene la capacidad de almacenar energía de un sistema de elementos Peltier. Este proceso se realiza mediante la construcción de un Convertidor Elevador de Capacitores Conmutados. En este estudio se prioriza mantener y aprovechar la alta impedancia de la salida de una celda Peltier además de que se eleva el voltaje a diferentes magnitudes. Esta propuesta nace frente a la problemática que se encuentra en la baja potencia que ofrecen ciertos sistemas de recolección de energía, a la cual se le somete a un sistema de conversión robusto. En el estudio se parte de las celdas Peltier son una fuente de baja potencia con alta impedancia de salida por lo que es necesario buscar la mínima pérdida de potencia para poder ofrecer un voltaje de salida más alto. El circuito propuesto es sometido a diferentes pruebas en las que se toman varias muestras de manera constante y se concluye a la final que el circuito cumple su función de aumentar el voltaje de salida de un sistema de varias celdas Peltier.

En [12] se detalla la investigación realizada para poder realizar un modelo de fabricación propio de un generador termoeléctrico, el cual está basado fundamentalmente en módulos Peltier. A lo largo del documento se realizan pruebas para determinar las condiciones ideales de trabajo y sus resultados ante diferentes estados. Gracias a este trabajo se puede delimitar las limitaciones de esta tecnología. La celda Peltier es analizada para obtener su mejor funcionamiento puesto que se observa el mejor rendimiento según su tipo de conexión, a la par que se probaron diferentes modelos de celdas, se prueba tipos de enfriamiento y calefacción. Todos estos subprocesos otorgaron varias conclusiones interesantes de las cuales

podemos resaltar lo siguiente: se analizó a profundidad la eficiencia eléctrica que se puede obtener a partir de la construcción de estos módulos, se demuestra que el calor residual se puede usar como calefacción para obtener un diferencial importante y que no se debe dejar de lado la cara de la celda en la que se aplica enfriamiento para lo que se pueden usar elementos termo-generadores.

En [13] se presenta una investigación que se encuentra basada en la experimentación de aplicar un sistema de refrigeración a una fuente de alimentación conmutada. Al sistema se aplica refrigeración líquida y también celdas Peltier. Es necesario tener un buen sistema de refrigeración en este tipo de fuentes puesto que, al usar electrónica de potencia, los circuitos internos van a generar mucha energía calorífica la cual puede afectar el funcionamiento de los componentes. Tener un control de la temperatura de los componentes pasivos y activos es esencial para mantener el comportamiento ideal de la fuente. Se determina los componentes sometidos a esfuerzos térmicos, esto se realiza poniendo a prueba la fuente al someterla a una carga ficticia. Los datos que se obtienen son favorables en cuanto a que las celdas Peltier contribuyen a que exista un mínimo de temperatura cuando la fuente trabaja con niveles altos de corriente lo cual se da por la corriente absorbida por las celdas Peltier. Este último enunciado es un indicativo favorable para el experimento.

1.3. Elementos de medición

Módulo LM35DZ: Se trata de un circuito integrado que actúa como sensor de temperatura altamente preciso, generando un voltaje de salida que es directamente proporcional a la temperatura medida en grados centígrados. El comportamiento de su salida en mV con respecto a la temperatura se muestra en la figura 1.10. A diferencia de otros sensores calibrados en Kelvin, los sensores LM35 ofrecen una ventaja significativa, ya que no es necesario restar constantes de voltaje para obtener la calibración adecuada en centígrados.

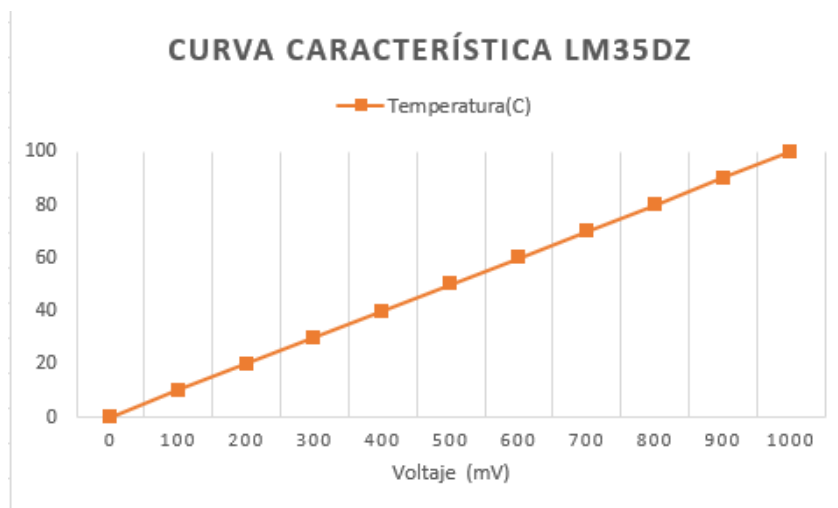


Figura 1.10: Curva característica del medidor de temperatura LM35.

Una de las ventajas distintivas de los sensores LM35 es que no requieren calibración o ajuste externo para mantener una precisión típica de $\pm 1/4^{\circ}\text{C}$ a temperatura ambiente y $\pm 3/4^{\circ}\text{C}$ en un amplio rango de temperaturas que va desde -55°C hasta $+150^{\circ}\text{C}$. Esto garantiza mediciones confiables y precisas sin necesidad de intervención adicional por parte del usuario.

Los sensores LM35 tienen una baja impedancia de salida, lo que les permite una fácil conexión a circuitos de lectura o control. Además, su salida lineal y calibración precisa hacen que sean ideales para diversas aplicaciones. Estos dispositivos son compatibles tanto con fuentes de alimentación simples como con fuentes de alimentación positivas y negativas.

En la figura 1.11 se puede observar el módulo empleado en el sistema de control, el cual se escogió en base a sus características físicas por su fácil acoplamiento a la planta de control.

Capítulo 2

Herramienta PID Compact de TIA Portal

2.1. Introducción

La herramienta PID-Compact de TIA Portal es una herramienta que brinda un control regulador PID constante con una optimización incorporada. Además, ofrece la posibilidad de ajustar un controlador de impulsos y permite cambiar entre modo manual y automático. La herramienta es apta para calcular de manera automática los parámetros P,I y D de un sistema y regularlo durante una optimización inicial, lo que ahorra el cálculo de las constantes a través de un método analítico o experimental. Además, la herramienta brinda la opción de realizar una optimización fina para poder configurar los parámetros de mejor manera y así tener un sistema de control con mayor rendimiento [14].

La herramienta PID-Compact también brinda la posibilidad de diseñar e implementar controladores PID de dos grados de libertad, controladores en cascada y controladores para procesos de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). El diseño de los controladores se complementa con la herramienta TRACE de TIA Portal que permite una visualización amigable de las variables involucradas en el control.

2.2. Incorporación del bloque PID en TIA Portal

Para poder utilizar la herramienta PID-Compact se debe realizar varias configuraciones en TIA Portal. Estas configuraciones son descritas a continuación:

En primera instancia se debe agregar un dispositivo, es decir se debe seleccionar el CPU que se va a utilizar. Para este caso se escoge el S7-1500 con el CPU 6ES 516-3AN01-AB0, como se muestra en la figura 2.1.

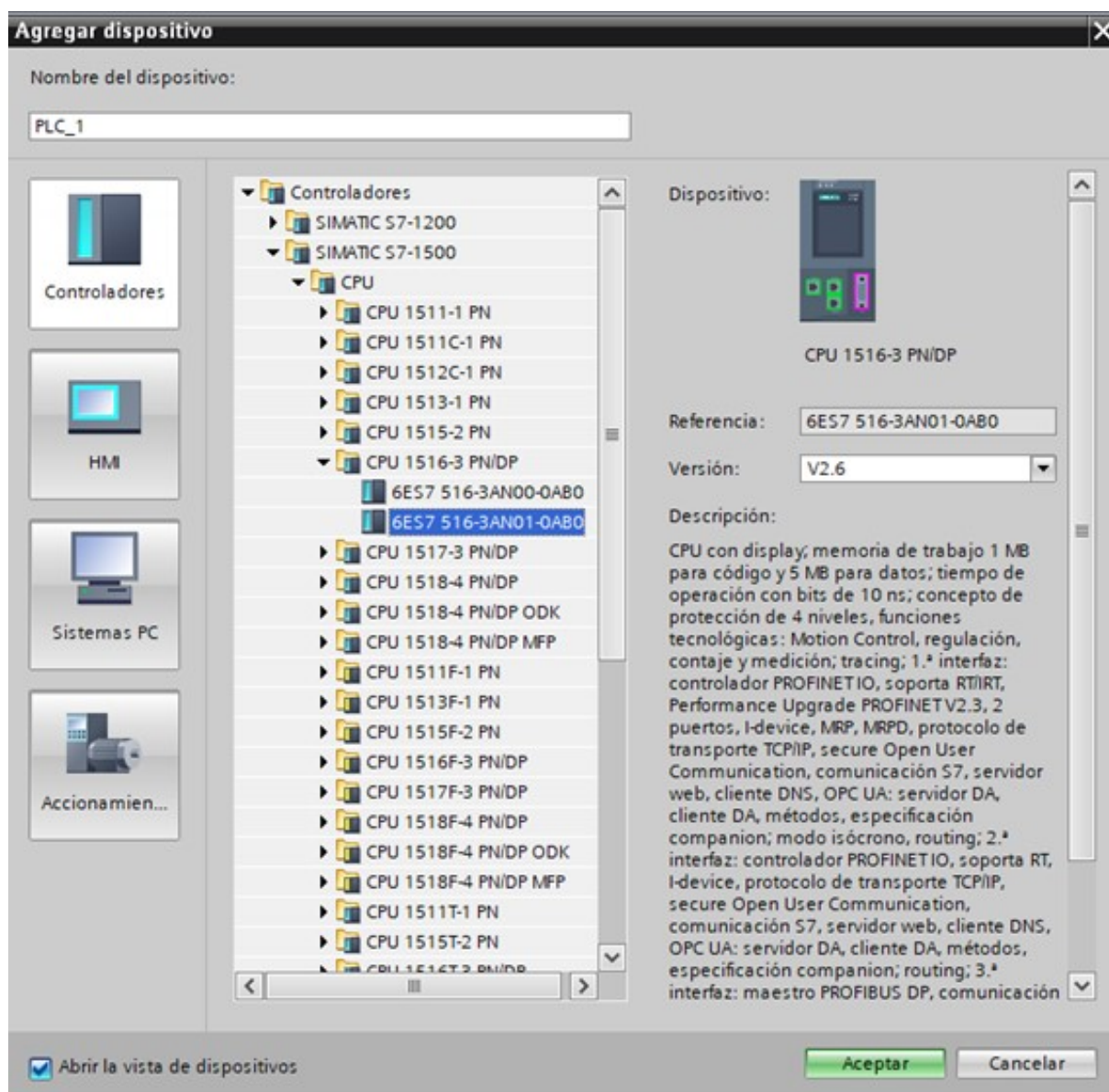


Figura 2.1: Selección del CPU 6ES 516-3AN01-AB0

A continuación se debe agregar los módulos de entrada y salida, que deben ser los que se encuentren conectados de manera física con el PLC. Se agregan módulos de entradas y salidas analógicas así también las entradas y salidas digitales como se muestra en la figura 2.2.

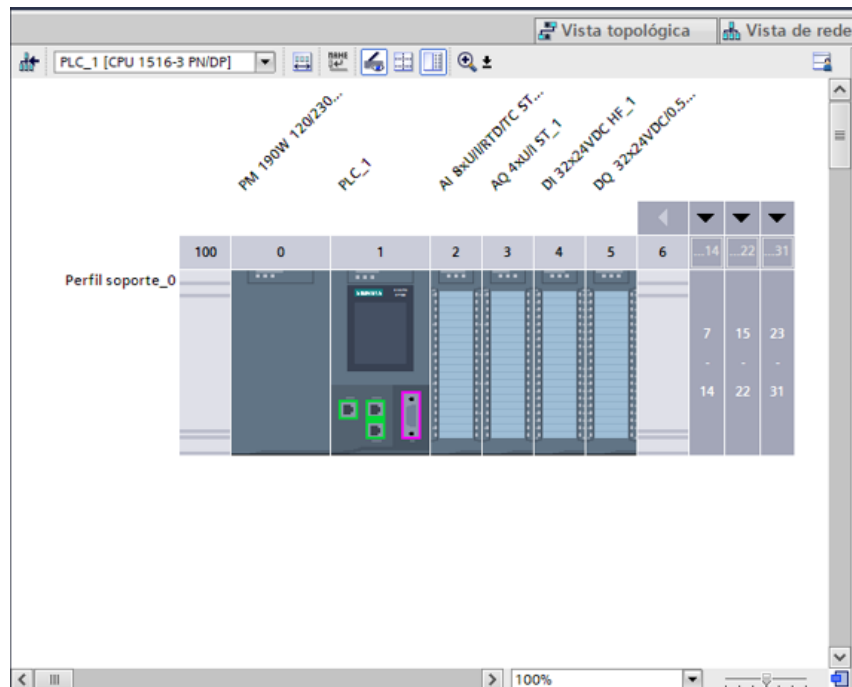


Figura 2.2: Módulos de entradas y salidas.

Dentro de bloques de programa se encuentran los diferentes bloques en donde se debe desarrollar las configuraciones correspondientes. La pantalla principal se encuentra vacía como se muestra en la figura 2.3.

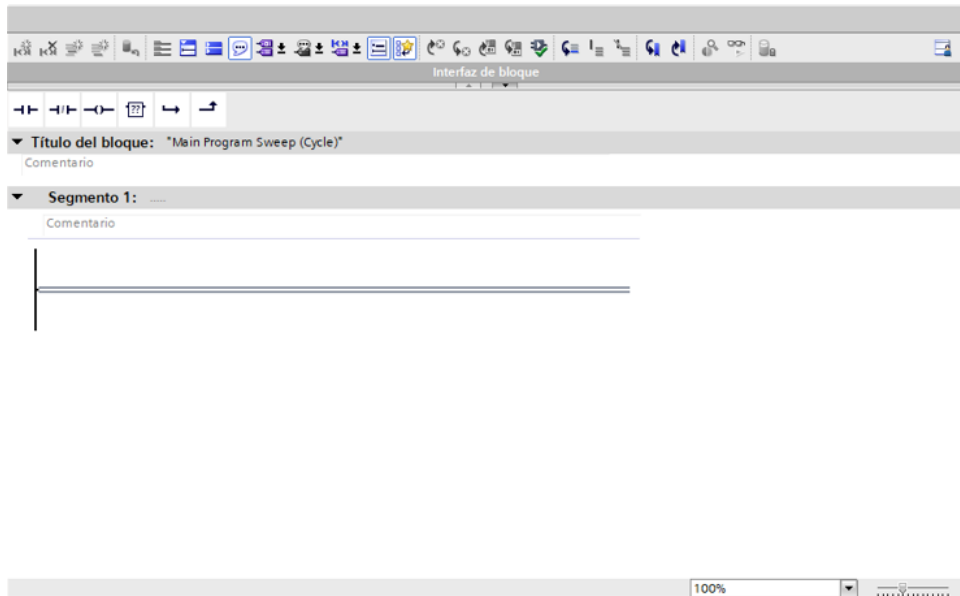


Figura 2.3: Vista del proyecto en TIA Portal.

En cuanto al uso del controlador PID, lo primero que se debe hacer es agregar un bloque Cyclic interrupt (véase la figura 2.4).

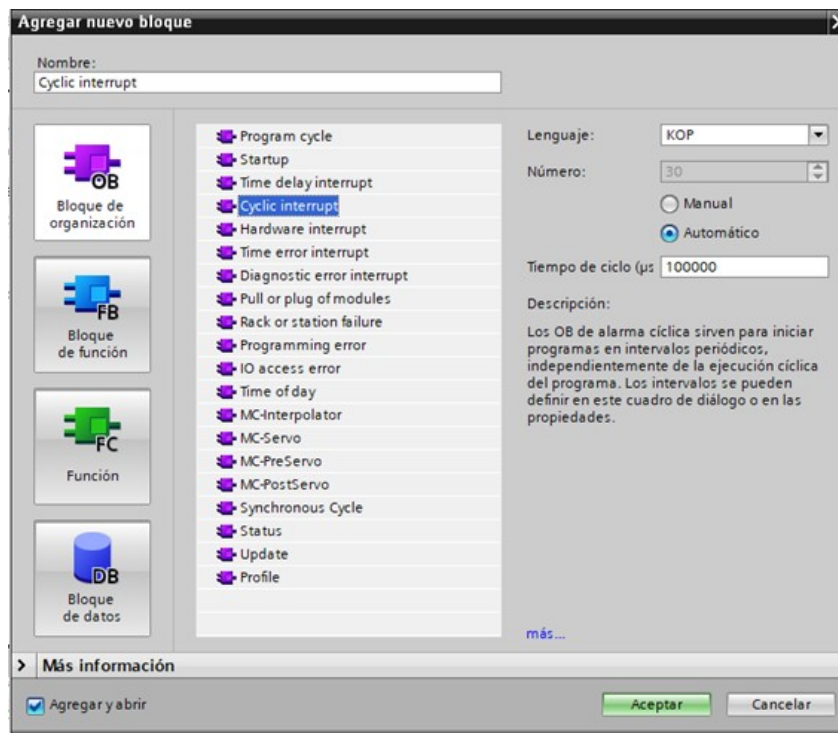


Figura 2.4: Bloque Cyclic Interrupt.

A continuación se debe agregar un bloque de función. Para este bloque es necesario cambiar el nombre para poder identificar de manera correcta donde se

encuentra el PID. Este proceso se ilustra en la figura 2.5

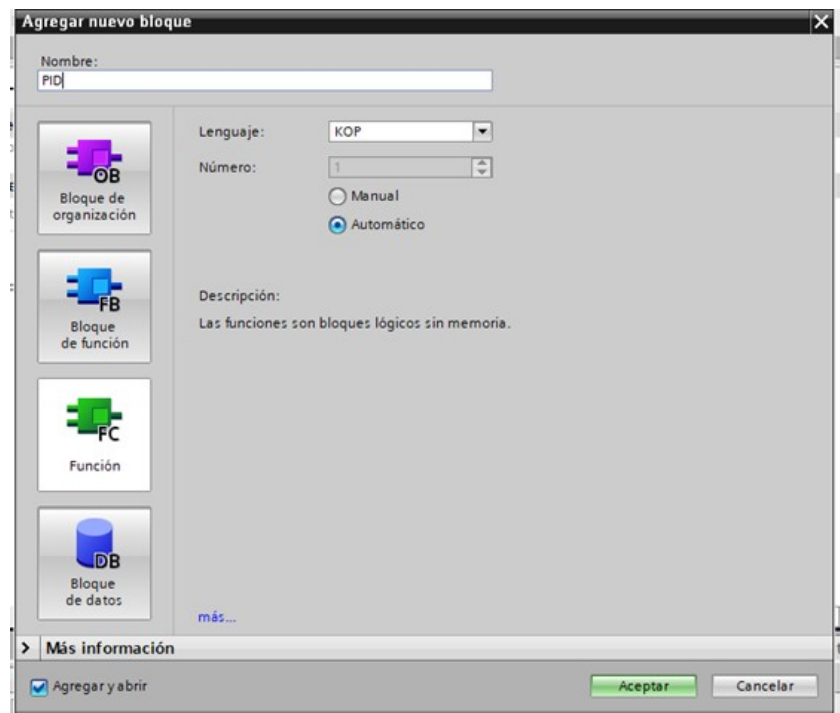


Figura 2.5: Bloque de función PID.

Como siguiente paso se debe agregar el bloque Compact-PID dentro del bloque de función PID. Este bloque se encuentra en las carpetas ubicadas en la parte derecha de la pantalla (véase figura 2.6).

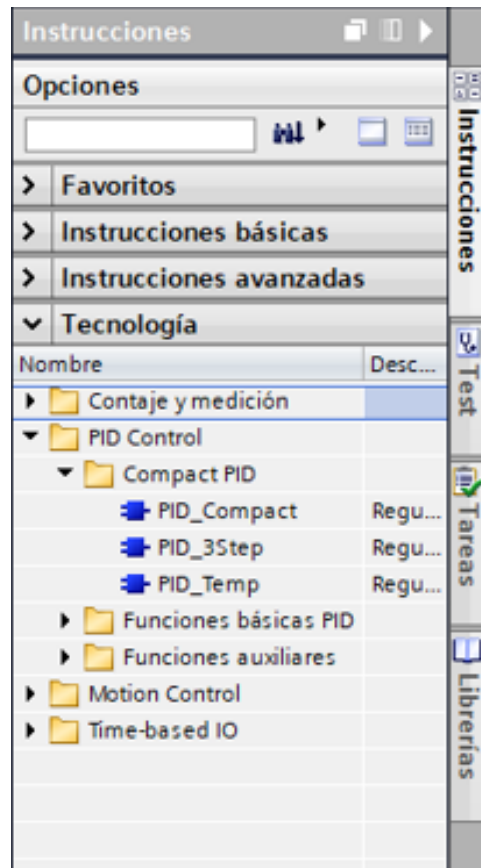


Figura 2.6: Bloque PID-Compact.

A continuación se puede cambiar el nombre de bloque. En la figura 2.7 se muestra las opciones disponibles para el funcionamiento del bloque. En este caso se debe seleccionar el modo de operación automático y se procede a aceptar los cambios.

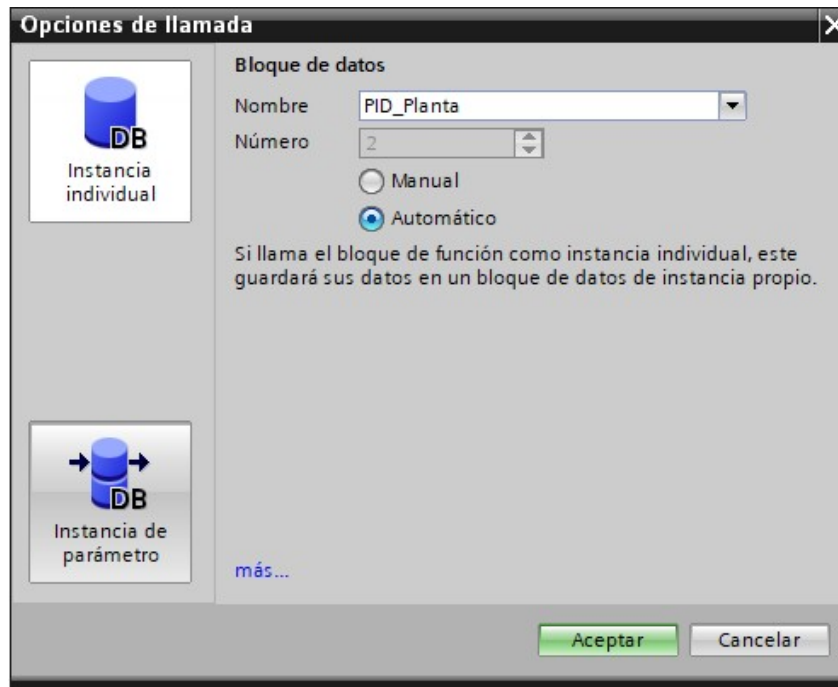


Figura 2.7: Selección del modo de operación del bloque PID.

Finalmente, el bloque agregado se muestra como en la figura 2.8.

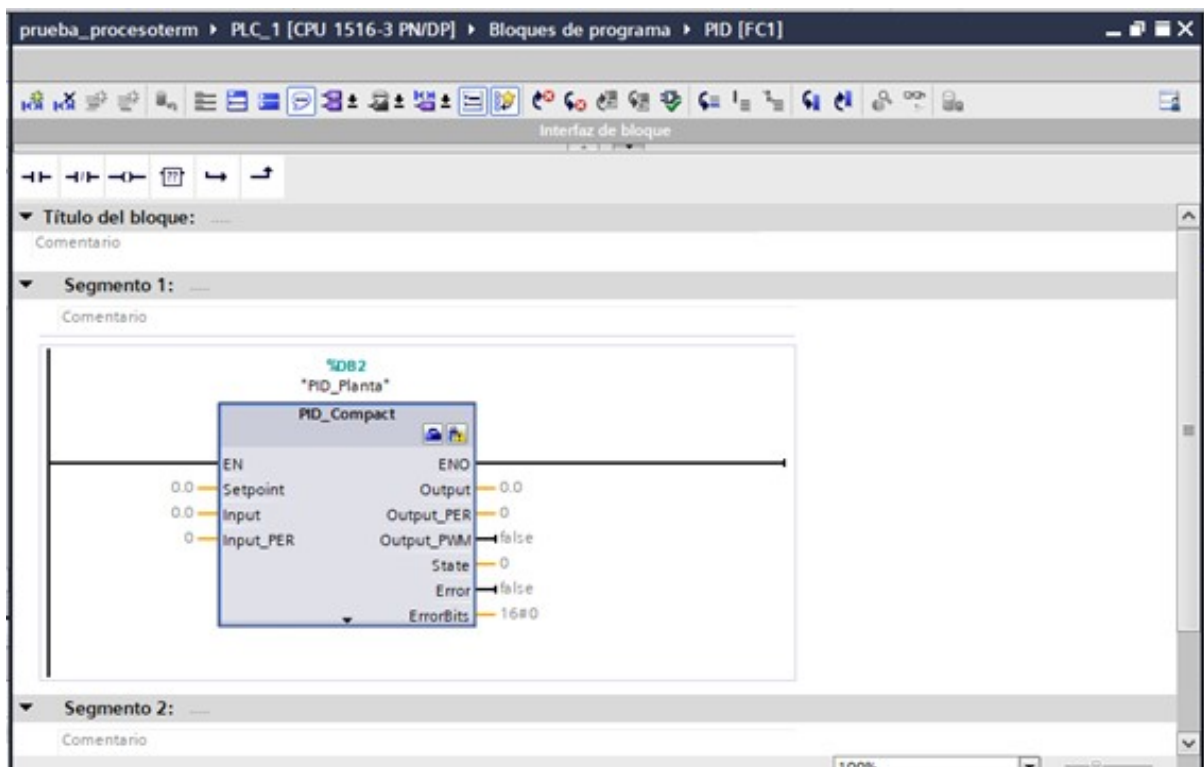


Figura 2.8: Bloque PID-compact agregado al proyecto en TIA Portal.

2.3. Configuración del bloque PID

Una de las primeras acciones que se debe realizar en el bloque PID es configurar las variables de punto de ajuste, entrada y salida. En este caso el punto de ajuste o setpoint se ha configurado para ser manejado desde una marca. En este caso se ha asignado la marca de tipo doble palabra *MD0*. En *Input_PER* debe ingresar la señal de la variable controlada, es decir, la medición de la salida del sistema. En este caso, el sensor de medición está acoplado a la entrada analógica del PLC que tiene la dirección *IW2*. Por otra parte, la acción de control generada por el controlador y que debe ser enviada a la planta se debe enviar por una salida analógica del PLC. En este caso se está utilizando la salida *QW0*. Todas estas configuraciones se muestran en la figura 2.9.

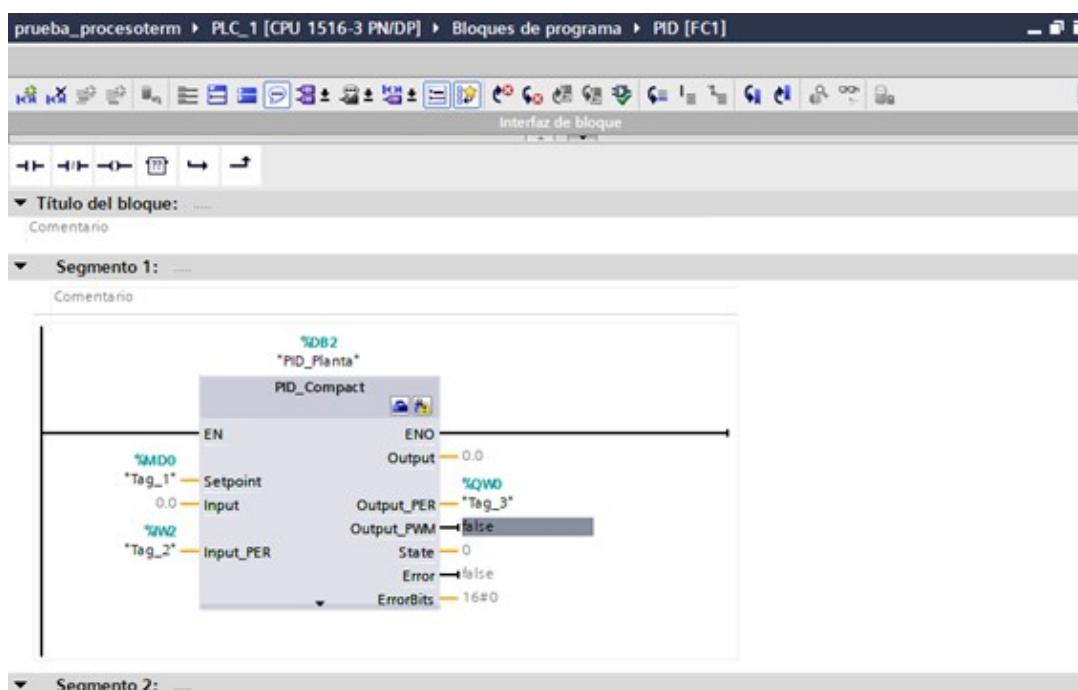


Figura 2.9: Configuración de variables en el bloque PID.

El bloque PID debe operar dentro de Cyclic Interrupt. Por esta razón, a continuación se debe copiar e incorporar el bloque dentro de la Interrupción cíclica, para que el sistema opere con un paso constante, el cual puede ser especificado por el usuario.

A continuación se deben realizar las configuraciones internas del bloque. Para esto, en la parte izquierda de la pantalla en la carpeta de objetos tecnológicos,

se encuentra el objeto de PID-Planta. En este objeto procedemos a configurar el funcionamiento y sintonización del bloque PID.

La pantalla que se muestra en la figura 2.10 corresponde al primer criterio a configurar, en el cual se escoge el tipo de regulación. En este caso se elige la opción de Temperatura. Se debe verificar que el modo del controlador se encuentre en 'Manual'.

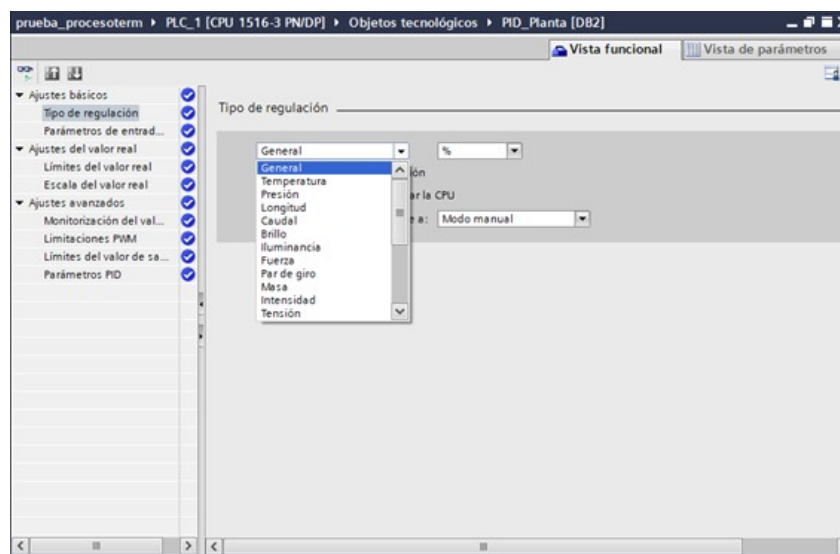


Figura 2.10: Elección de la opción de temperatura.

En los parámetros de entrada, se debe configurar en Input la misma interfaz que se asignó a la variable. En este caso se selecciona Input-Per. De igual manera para la salida se selecciona Output-per. Todas estas configuraciones se muestran en la figura 2.11.

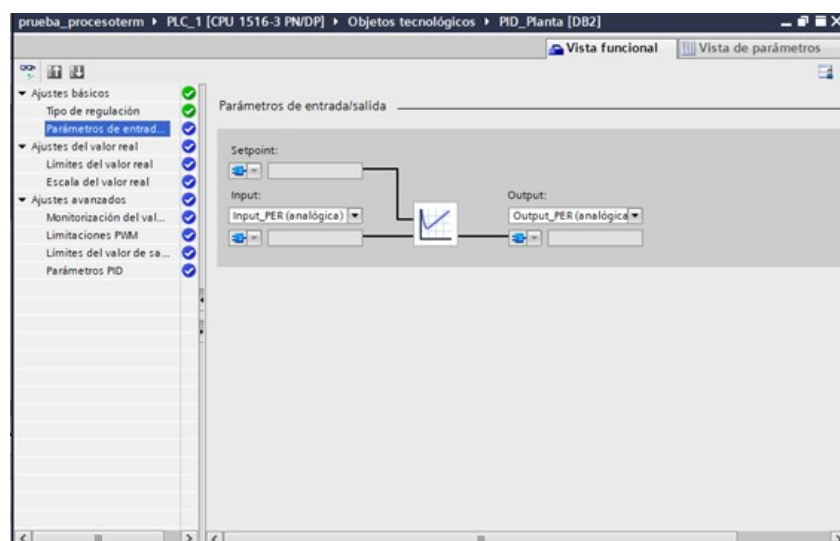


Figura 2.11: Selección de la interfaz de entrada y salida.

En los límites del valor real, se debe asignar los valores de temperatura máximo y mínimo, como se muestra en la figura 2.12.

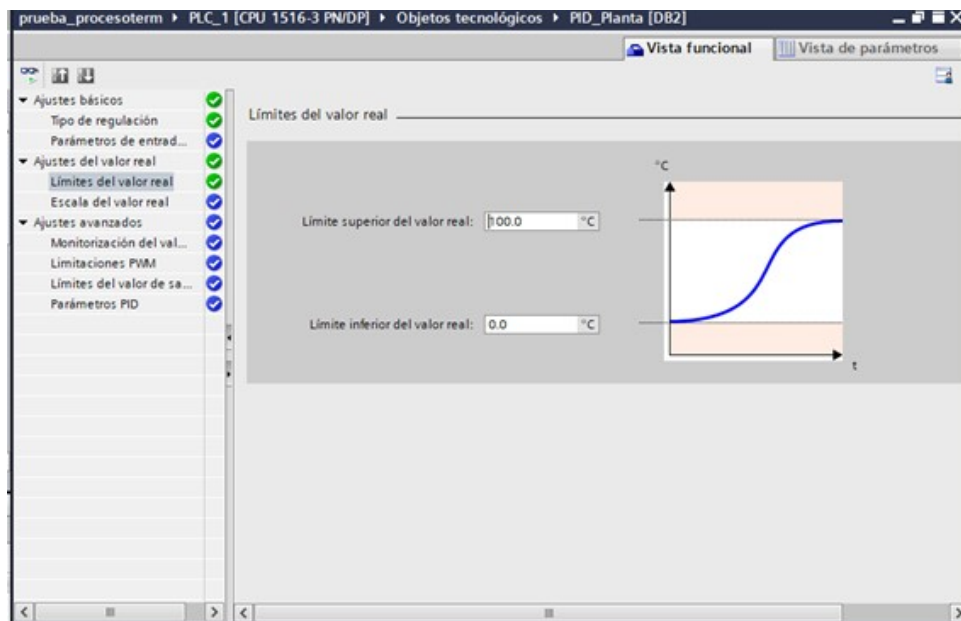


Figura 2.12: Configuración de valores máximos y mínimos de temperatura de la planta.

En la escala del valor real se debe configurar el valor de temperatura que recibe el PLC por parte de la entrada analógica. Esto es una equivalencia con respecto a las entradas analógicas y la temperatura. Estos parámetros dependen de el sensor utilizado (véase la figura 2.13). Aquí se está indicando que cuando la entrada analógica reciba su máximo valor, es decir 10V, esto equivaldrá a 100°C.

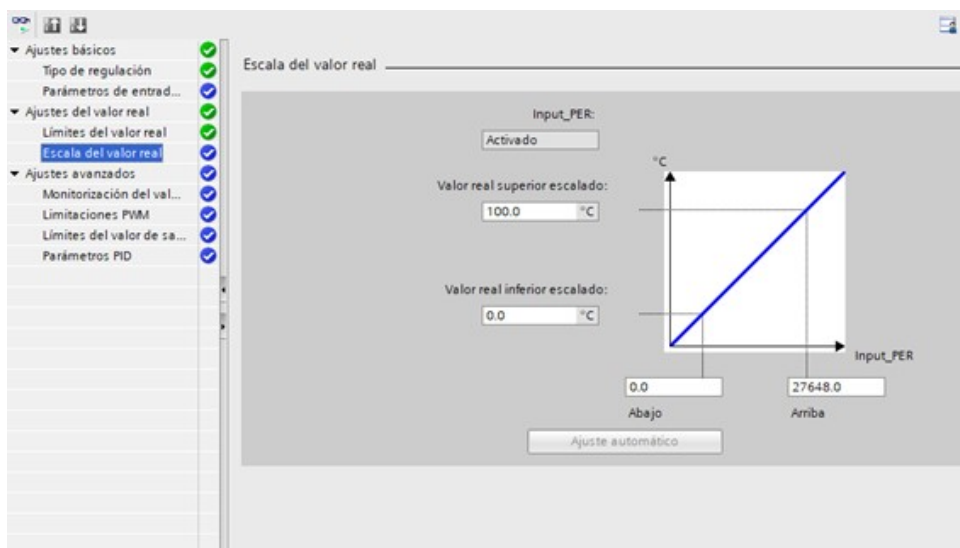


Figura 2.13: Relación de escala en el valor real.

A continuación se debe establecer los valores de alarma para poder identificar si se está excediendo el control PID como se indica en la figura 2.14.

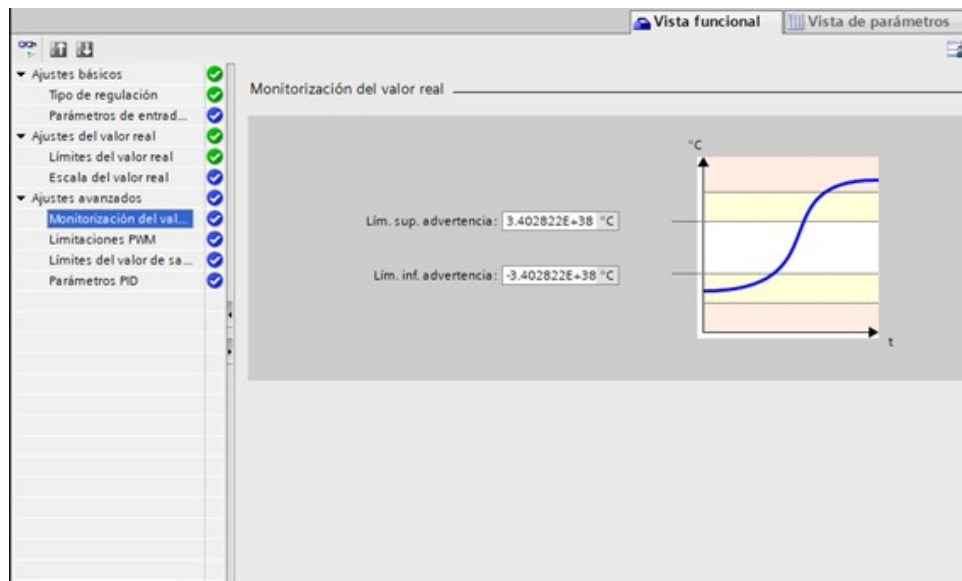


Figura 2.14: Alarmas en el controlador PID.

En caso se vaya a utilizar una salida de tipo PWM se debe realizar las configuraciones mostradas en la figura 2.15. En este caso, dado que se utiliza una salida analógica, no se deben realizar cambios en esta sección.

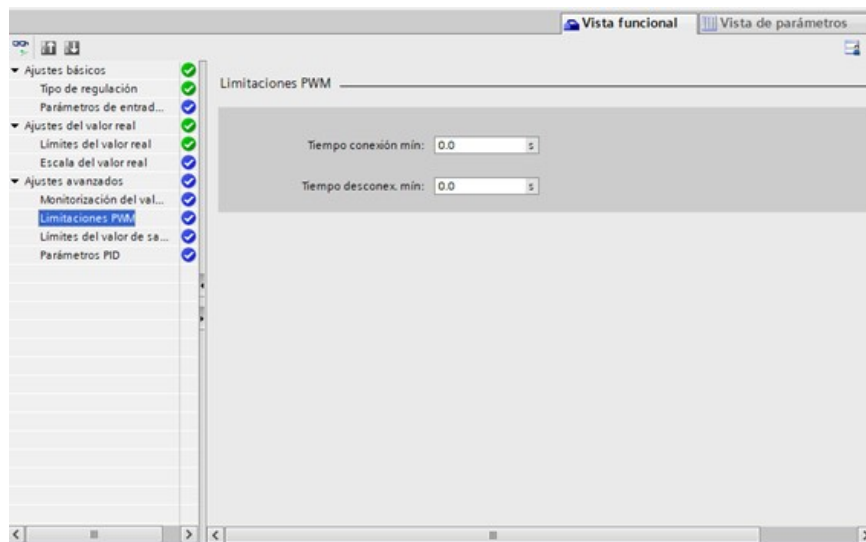


Figura 2.15: Limitaciones PWM

A continuación se debe asignar los valores máximos de salida en porcentaje (véase la figura 2.16. Teniendo en cuenta que 100 por ciento equivale a 10V

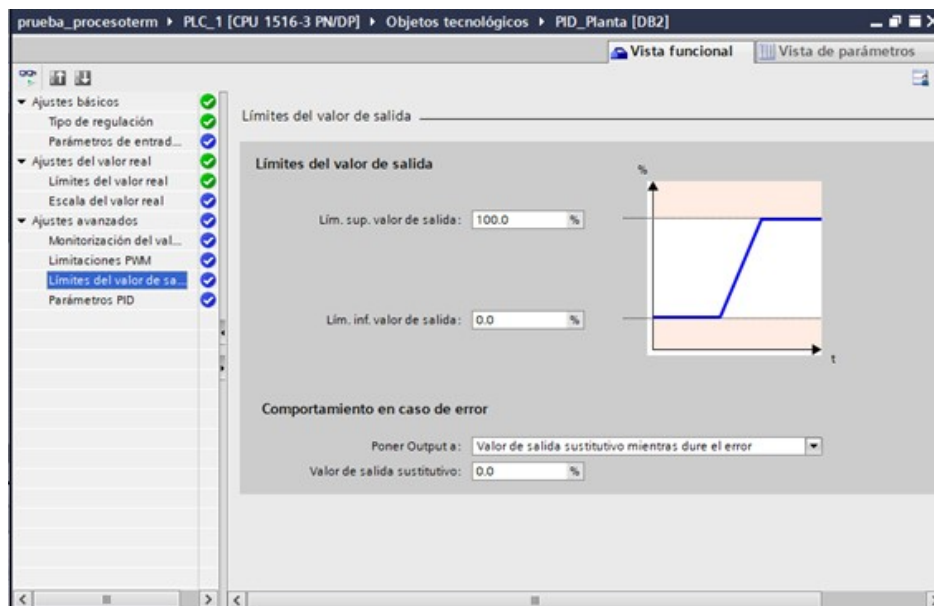


Figura 2.16: Límites del valor de salida.

Una vez realizadas las configuraciones se puede sintonizar el controlador. En la figura 2.17 se muestra la interfaz que tiene la herramienta para poder sintonizar el controlador PID.

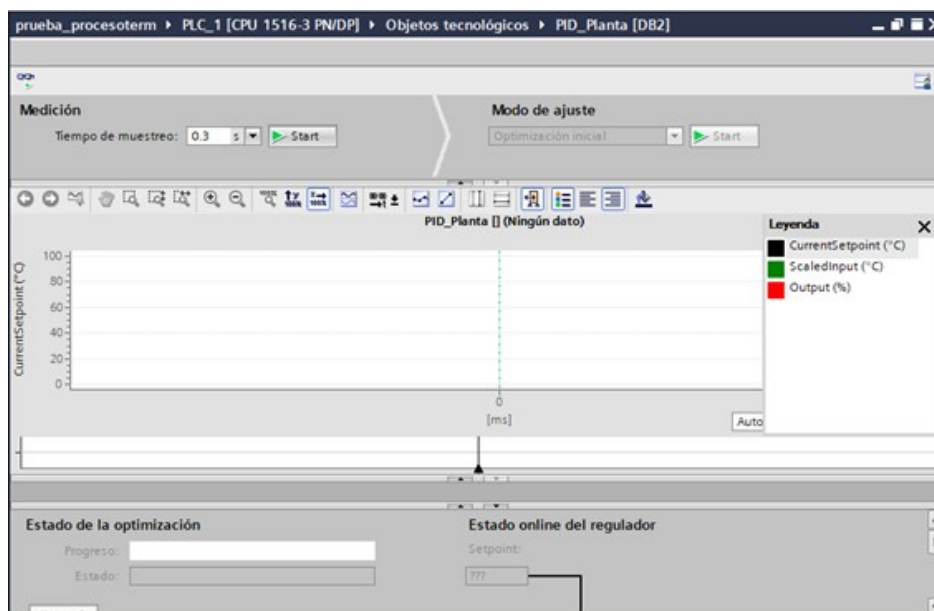


Figura 2.17: Pantalla de sintonía del controlador PID.

Es necesario tener en cuenta que para este paso el PLC debe estar enlazado con el computador desde el que se está trabajando para poder obtener las señales de entrada y controlar el actuador. Se debe seleccionar en método de ajuste. En este

punto se puede iniciar la optimización fina para que exista un control mas preciso. Este proceso se ilustra en la figura 2.18.

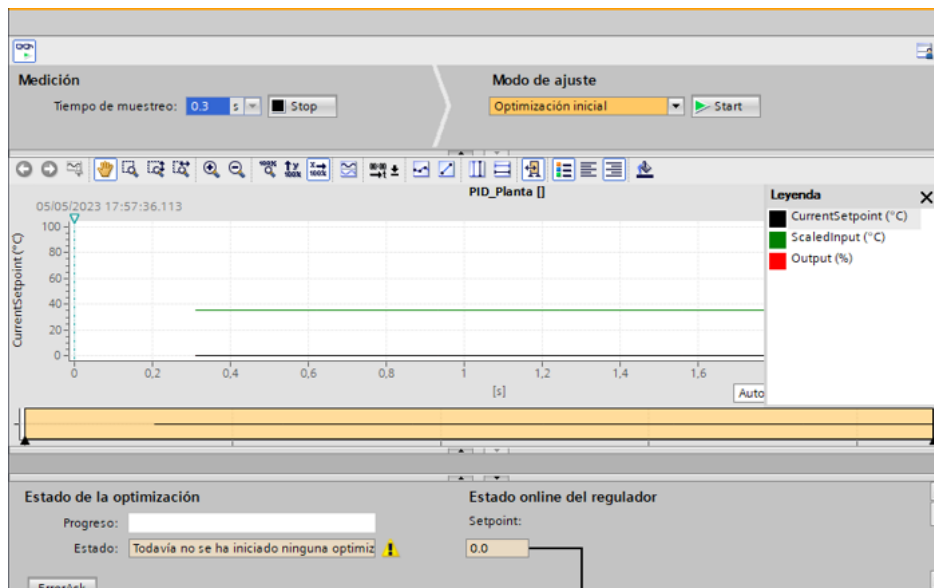


Figura 2.18: Optimización fina.

Al dar click en start la herramienta inicia la sintonía del controlador (véase la figura 2.19).

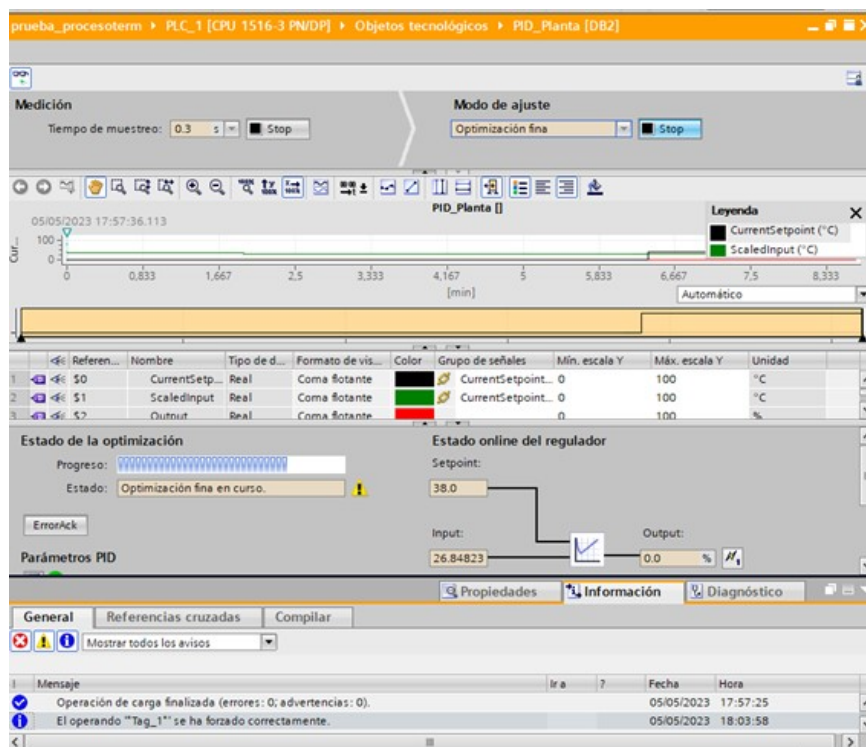


Figura 2.19: Optimización en curso.

Luego de que termine el proceso de sintonización se podrá visualizar la señal de temperatura que llega al valor de referencia. (véase la figura 2.20)

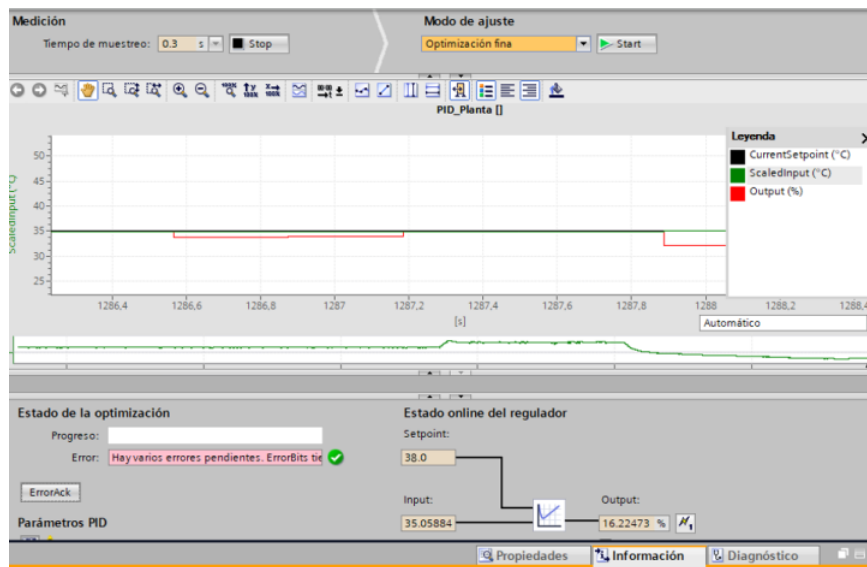


Figura 2.20: Optimización finalizada.

Capítulo 3

Diseño e implantación del sistema de control

En este capítulo se presenta la implementación de los controladores PID para regular de manera independiente las temperaturas de las superficies fría y caliente de la célula Peltier. En complemento y para futuras investigaciones también se presenta en detalle el procedimiento mediante el cual se puede obtener el modelo dinámico del proceso utilizando las herramientas de visualización y captura que brinda TIA Portal de SIEMENS.

3.1. Implementación de la etapa de potencia

Para tener un panorama claro y preciso del sistema de control es necesario analizar el comportamiento de la misma en lazo abierto y así descubrir las consideraciones necesarias que se debe tener en cuenta al momento de dar inicio al sistema de control. Anteriormente se menciona que una de las desventajas de la célula Peltier es su alto consumo de energía[15], por esta razón es indispensable tener un bloque de potencia para suministrar a la célula la corriente necesaria.

La acción de control del sistema se canaliza por una salida analógica del PLC S7-1500 en un formato de tensión de -10V a 10V. La salida analógica del PLC puede manejar corrientes de hasta 20 mA [16]. Estas características no son las ideales para aprovechar las propiedades de la célula Peltier, puesto que el consumo de la misma

supera la corriente propiciada por el PLC. El control de la célula debe ser en base a la salida analógica, es decir debe tener una relación directa.

Como bloque de potencia externo se propone el uso de un Insulated Bipolar Transistor (IGBT) o Transistor Bipolar de Puerta aislada [17], el cual es un dispositivo semiconductor que mezcla características de dos elementos electrónicos: el transistor bipolar y el transistor de efecto de campo. El IGBT se creó para aprovechar al máximo las ventajas de cada transistor anteriormente nombrado, dando como resultado altos niveles de voltaje y con corrientes de conmutación rápida. En la figura 3.1 se muestra el símbolo del IGBT y sus pines correspondientes.

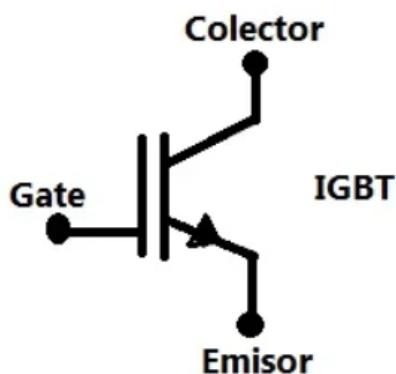


Figura 3.1: Símbolo de IGBT.

El IGBT tiene un diseño con una estructura de tipo NPN con una compuerta aislada. Esta compuerta ayuda a controlar la conducción de corriente entre el colector y el emisor dependiendo el voltaje que se aplica a dicha compuerta. Su principio de funcionamiento se basa en una estructura con cuatro capas P-N-P-N; las capas P tienen carga positiva y las capas N tienen carga negativa [18]. Las características eléctricas más relevantes bajo las cuales el IGBT funciona de manera correcta se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Características eléctricas del IGBT

Componente Electrónico	Voltaje [Colector-Emisor]	Voltaje [Consumo Colector-Emisor]	Voltaje [Gate-Emisor]
IGBT H716806GE	max 600V	1.85V	±20V

Para el análisis correcto de la planta se realizan pruebas en las cuales se busca

encontrar la configuración correcta de la fuente en cuanto a voltaje y corriente para poder llegar a las temperaturas deseadas en el sistema de control. Se debe tener en cuenta que para que la compuerta permita el paso de corriente se debe recibir un valor mayor que 6V. En la tablas 3.2 y 3.3 se muestran los valores obtenidos en los sensores al inyectar diferentes valores de voltaje a la compuerta al estar bajo dos condiciones diferentes en cuanto a la configuración de la fuente.

Tabla 3.2: Comportamiento de variables con una fuente de 8V/2A

Fuente - Voltaje: 8V Corriente: 2A				
Voltaje en la Compuerta [V]	Voltaje en la Célula [V]	Corriente en la Célula [A]	S. Frio [°C]	S. Caliente [°C]
6	0	0	22,8	19,5
6,8	0,006	0,04	22,8	19,8
7	0,22	0,08	22	20
7,4	1,2	0,4	19,7	22,6
7,8	4,02	1,34	13,3	29,9
8	6,23	2,02	10,3	37,5
8,4	6,5	2,02	8,9	41,6
8,8	6,54	2,02	8,9	42,5
9,5	6,57	2,02	8,56	43,01
10	6,58	2,02	8,7	43,5
11	6,6	2,02	8,4	43,9

Tabla 3.3: Comportamiento de variables con una fuente de 12V/3,4A

Fuente - Voltaje: 13V Corriente: 3,4A				
Voltaje en la Compuerta [V]	Voltaje en la Célula [V]	Corriente en la Célula [A]	S. Frio [°C]	S. Caliente [°C]
6	0	0	23,5	20,2
6,8	0,06	0,02	23,7	20,2
7	0,3	0,09	22,5	20,7
7,4	1,55	0,47	20,6	23,7
7,8	5,45	1,8	15,5	32,6
8	7,57	2,34	11,6	41,6
8,5	10,48	3,12	9,65	53,7
9	10,6	3,08	9,54	52,2
9,5	10,61	3,06	9,42	61,9
10	10,64	3,04	9,5	63,7
11	10,67	3,03	9,87	64,9

Con base a los datos obtenidos, se puede establecer que los límites de trabajo para un funcionamiento eficiente de la fuente se encuentran entre 6 a 9.5V. Entre la compuerta y el emisor existe un condensador el cual tiene un tiempo de descarga, este tiempo dificulta el control y por esta razón se agrega un par de resistencias en configuración Pull-Down. En la figura 3.2 se puede observar el circuito de potencia empleado en el sistema de control.

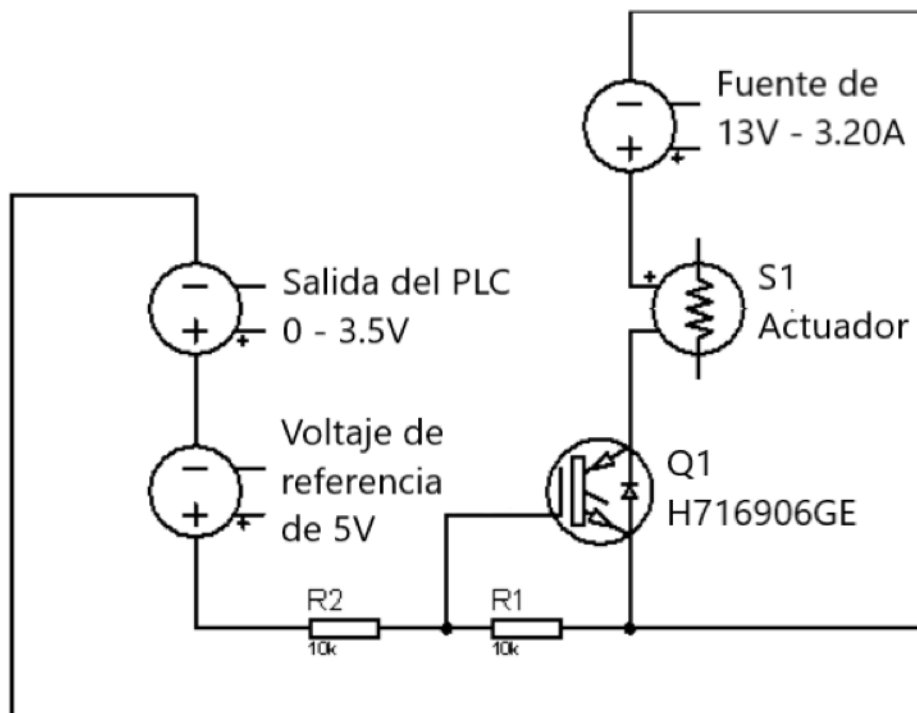


Figura 3.2: Circuito de potencia para el control con IGBT.

3.2. Identificación de la dinámica del sistema

Las definiciones vistas con anterioridad permiten deducir que un sistema está conformado por diferentes elementos interrelacionados, los cuales se pueden analizar y estudiar de mejor manera mediante la dinámica del sistema. La dinámica del sistema tiene un enfoque especial en el comportamiento del sistema frente a diferentes entradas o perturbaciones [19].

La mayoría de los sistemas dinámicos no son lineales y esta característica se vuelve un problema al momento de seleccionar la estructura del sistema. Dentro de la literatura hay ciertas técnicas que se usan dentro del campo del control de sistemas y se enfocan en modelar sistemas no lineales. Una de las técnicas más conocidas y aplicadas en estos casos son los modelos orientados a bloques como es el caso del modelo de Wiener-Hammerstein [20], [21].

Para poder determinar el modelo matemático del proceso es necesario que el sistema se encuentre en lazo abierto, de esta manera se puede ingresar una señal escalón y determinar el comportamiento del proceso térmico.

En la figura 3.3 se indica el comportamiento de la temperatura en las superficies de la célula sin ingresar una señal de excitación. La temperatura de la superficie caliente tiene un valor promedio de $25,246^{\circ}\text{C}$, mientras que la temperatura de la superficie fría tiene un valor promedio de $23,691^{\circ}\text{C}$.

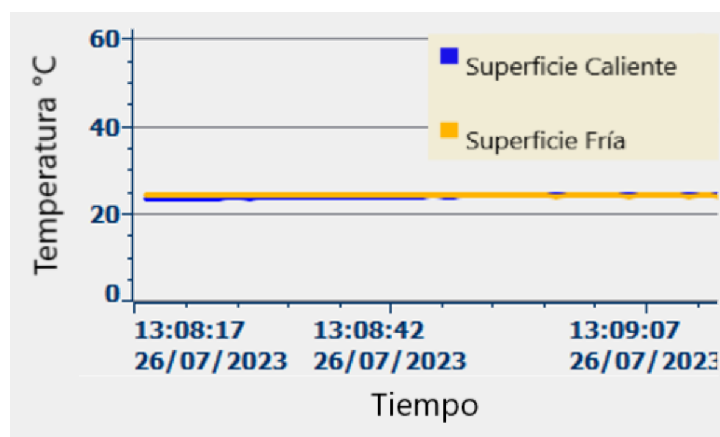


Figura 3.3: Gráficas a temperatura ambiente.

En primera instancia se debe ingresar un valor escalón al sistema para llevar a las salidas a un punto de operación determinado. Sobre este punto se realizará la identificación correspondiente. En este caso, se excita el sistema con un escalón de $7,40\text{V}$. El voltaje en mención ingresa en los terminales de la Célula Peltier. Las señales de temperatura se estabilizan como se muestra en la figura 3.4 y los valores en régimen permanente son de 25.246°C y 23.691°C para las superficies fría y caliente, respectivamente.

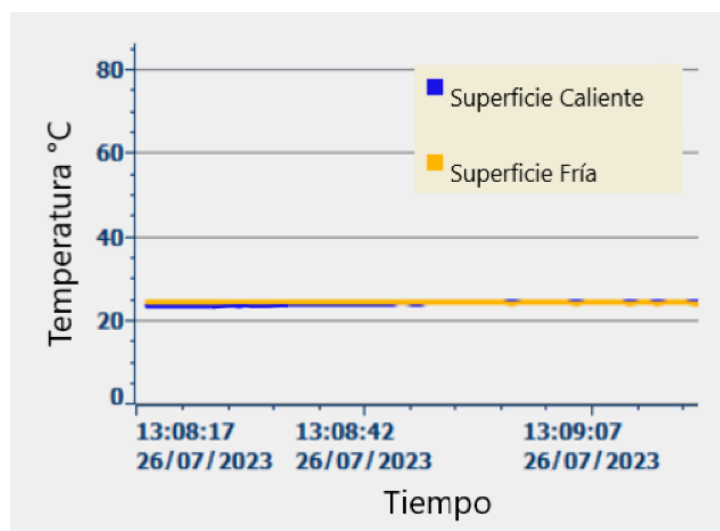


Figura 3.4: Respuesta de temperatura en el punto de operación (voltaje de ingreso de 7.45V).

A continuación, sobre el punto de operación alcanzado, se ingresa a la planta otra señal escalón la cual tiene un valor de $0,35V$. Al igual que en el experimento anterior, se debe esperar que la gráfica se estabilice (véase la figura 3.5).

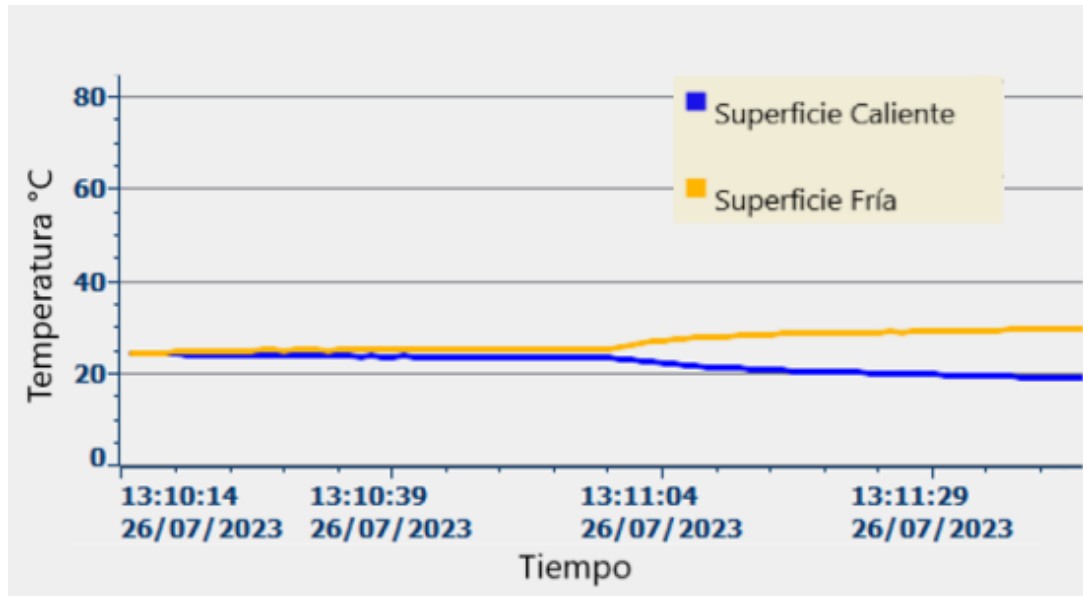


Figura 3.5: Respuesta de temperatura con una señal escalón de $0.35V$.

Para poder determinar el modelo del proceso térmico, es necesario tener acceso a los datos generados cuando ocurre el cambio en la respuesta frente a la entrada escalón, es decir, al momento de ingresar la última señal hasta su estabilización. El acceso a los datos se lo realiza mediante la herramienta *Trace*, la misma que se encuentra en la carpeta *Tracer* en la carpeta *Mediciones* (véase la figura 3.6).

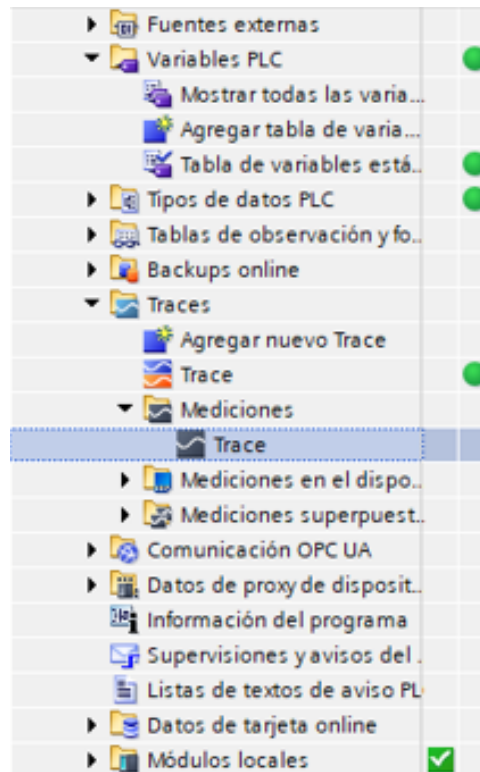


Figura 3.6: Herramienta Trace

La herramienta *Trace* permite recolectar los datos generados en las dos entradas analógicas, las mismas que llevan el nombre de $T_{Caliente}$ y T_{Fro} . En la figura 3.7 se puede observar el comportamiento de las dos señales con respecto al tiempo en un período de 1,5min.

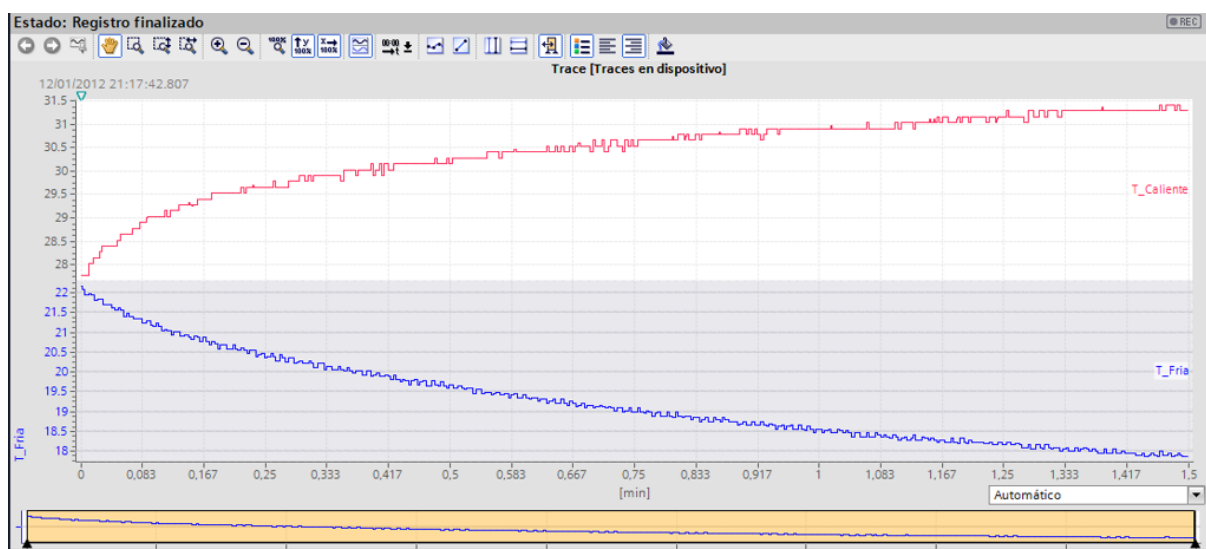


Figura 3.7: Registro de temperaturas en la herramienta Trace.

Una vez el registro haya terminado, es necesario exportar los datos mediante el icono que se indica en la figura 3.8. La herramienta se encuentra en la barra superior de la pantalla principal de *Trace*. Se debe tener en cuenta que los datos son exportados con formato *.csv*.

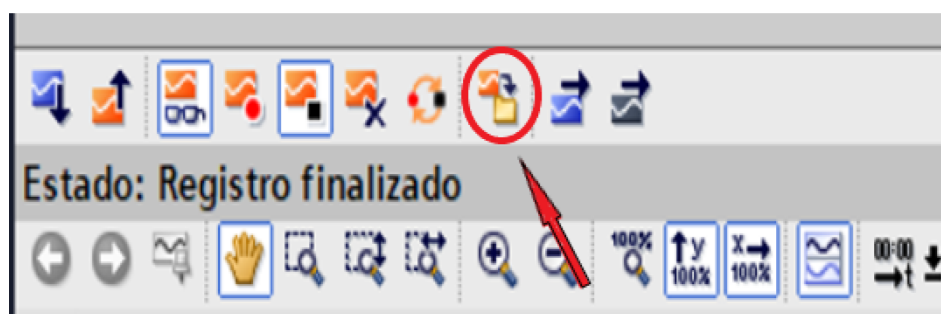


Figura 3.8: Barra de herramientas en Tracer.

El documento exportado contiene 4 variables en las que se indica el tiempo[*ms*], las muestras y la temperatura[$^{\circ}\text{C}$] de las dos superficies (véase figura 3.9). Gracias a los datos exactos se puede tener una mejor aproximación del modelo matemático. El número de muestras esta directamente relacionado al tiempo de muestreo y tiempo de ejecución que haya sido configurado en *Trace*.

	A	B	C	D
1	Sample	X(ms)	T_Caliente[%MD121]	T_Fria[%MD140]
2	0	1,33E+12	27,77964211	22,17158508
3	1	1,33E+12	27,77964211	22,09924698
4	2	1,33E+12	27,77964211	22,09924698
5	3	1,33E+12	27,77963829	21,95457268
6	4	1,33E+12	27,77963829	21,95457268
7	5	1,33E+12	27,77963829	21,95457268
8	6	1,33E+12	28,0296402	21,99073982
9	7	1,33E+12	28,0296402	21,99073982
10	8	1,33E+12	28,02963829	21,95457268
11	9	1,33E+12	28,02963829	21,95457268
12	10	1,33E+12	28,15463829	21,95457268
13	11	1,33E+12	28,15463638	21,80989647
14	12	1,33E+12	28,15463638	21,80989647

Figura 3.9: Datos exportados en formato *.csv*

Mediante comandos y herramientas de la plataforma de programación

MATLAB se puede determinar el modelo dinámico de las dos superficies. En las siguientes líneas de código se crean variables locales en el programa, puesto que el documento fue exportado como una tabla.

```
T_Caliente=Datos.Caliente;  
T_Frio=Datos.Frio;  
Escalon=Datos.Escalon;  
Muestras=Datos.Samples;
```

Es necesario utilizar diferentes funciones para determinar el modelo. En este sentido *iddata* ayuda a encapsular los datos de entrada y de salida mientras que *tfest* calcula la función de transferencia. En la función *tfest* el segundo parámetro determina el número de polos que va a tener la función. Por inspección se escoge el número de polos y se determinan 5 polos para ecuación de la superficie caliente mientras que para la superficie fría se determina que el número ideal es 4 polos.

```
data1=iddata(T_Caliente,Escalon,0.1)  
data2=iddata(T_Frio,Escalon,0.1)  
sys1=tfest(data1,5,0,0.8)  
sys2=tfest(data2,4,0,0.8)
```

A continuación se realiza un código el cual permite visualizar una comparación entre la curva obtenida mediante los datos exportados y la gráfica de la ecuación calculada mediante el software.

```
figure  
compare(data1,sys1)  
compare(data2,sys2)
```

En la figura 3.10 se muestra el comportamiento de la superficie caliente mientras que en la figura 3.11 se indica el comportamiento de la superficie fría.

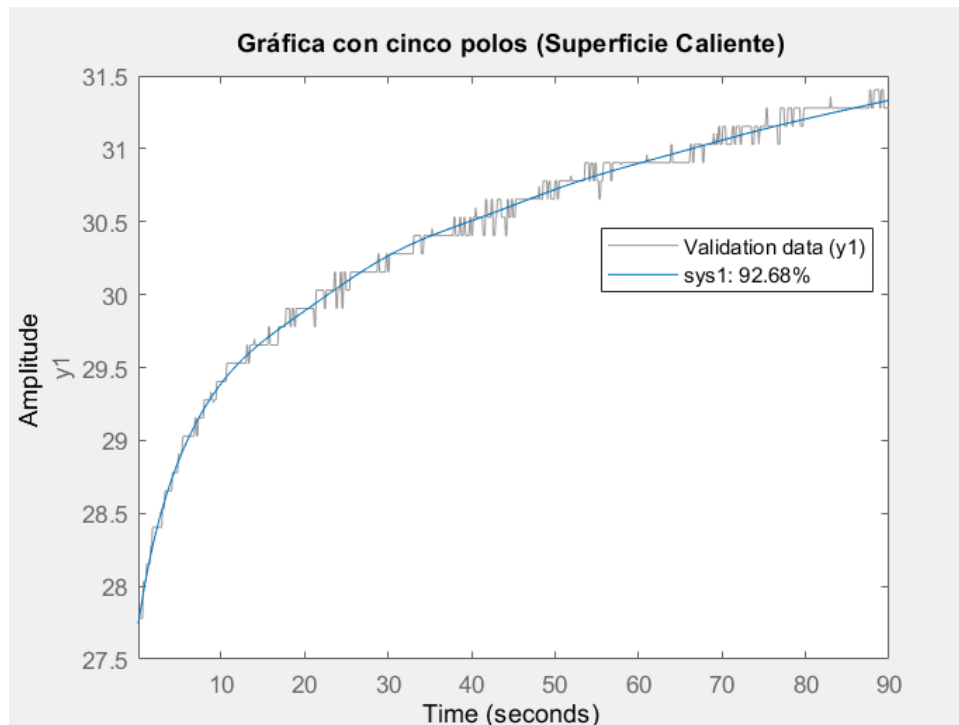


Figura 3.10: Gráfica de comportamiento del sistema en superficie caliente.

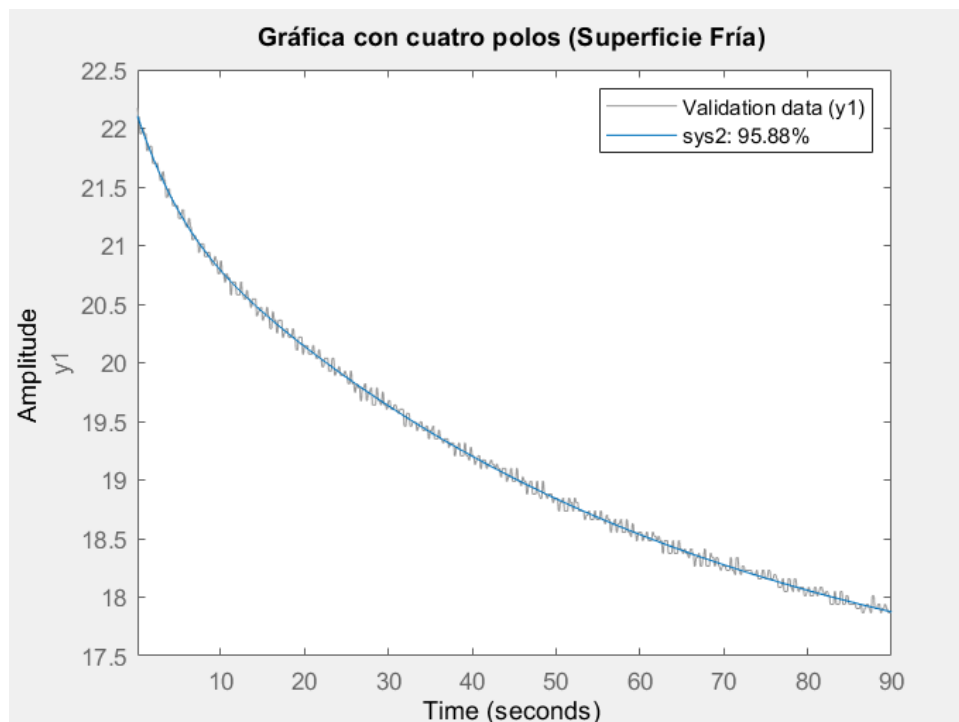


Figura 3.11: Gráfica de comportamiento del sistema en superficie fría.

Las funciones de transferencia obtenidas en *Matlab* son las siguientes:

Función de transferencia para la superficie caliente:

$$G(s) = \exp(-0,8 * s) * \frac{0,0001293}{s^5 + 0,6155s^4 + 0,1749s^3 + 0,04804s^2 + 0,003675s + 3,091e - 05} \quad (3.1)$$

Función de transferencia para la superficie fría:

$$G(s) = \exp(-0,8 * s) * \frac{0,0002771}{s^4 + 0,5466s^3 + 0,1172s^2 + 0,009372s + 0,000128} \quad (3.2)$$

Las funciones de transferencia encontradas pueden resultar de utilidad para estudiar con mayor profundidad la dinámica del proceso. De igual manera estas funciones pueden utilizarse en herramientas de simulación como MATLAB, para probar la sintonía de diversos tipos de controladores. En este caso se podría por ejemplo utilizar la herramienta PID Tuner de MATLAB para sintonizar los controladores PID correspondientes, no obstante, dado que TIA Portal también ofrece una herramienta de sintonía, se utilizará esta última herramienta para encontrar las ganancias del controlador.

3.3. Sintonización del controlador PID con PID-Compact

En el capítulo 2 se detallaron los pasos para configurar el bloque PID en TIA Portal. Sobre la base de estas configuraciones, en este apartado se presenta la aplicación de dos sintonizaciones distintas para controlar las temperaturas de la superficie fría y caliente de la célula Peltier.

En la figura 3.12 se muestran los bloques agregados por cada PID, donde PID[FC1] se utiliza para el control de la superficie caliente y PIDFRIO[FC2] para el control de la superficie fría.

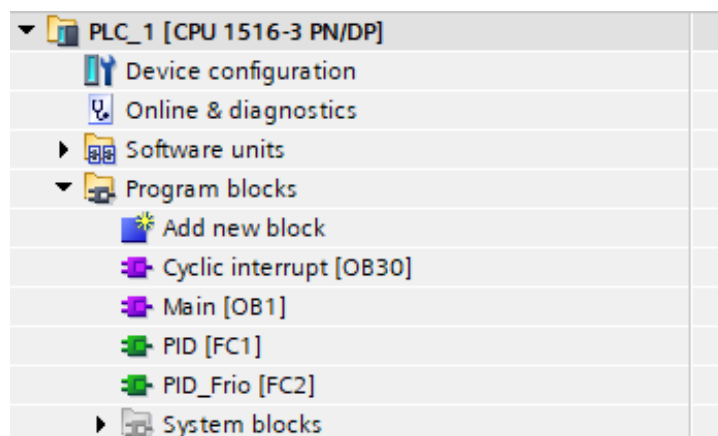


Figura 3.12: Creación de los bloques PID y el bloque de interrupción cíclica.

Los bloques PID deben operar dentro del bloque de interrupción cíclica (Cyclic interrupt) que debe ser creado previamente. Esto se realiza para que el ciclo de ejecución sea constante, es decir, con un período de tiempo fijo, el cual es establecido por el usuario. En este caso se utilizó un período de 100 milisegundos. En la figura 3.13 se muestra como los bloques PID han sido invocados dentro del bloque de interrupción cíclica.

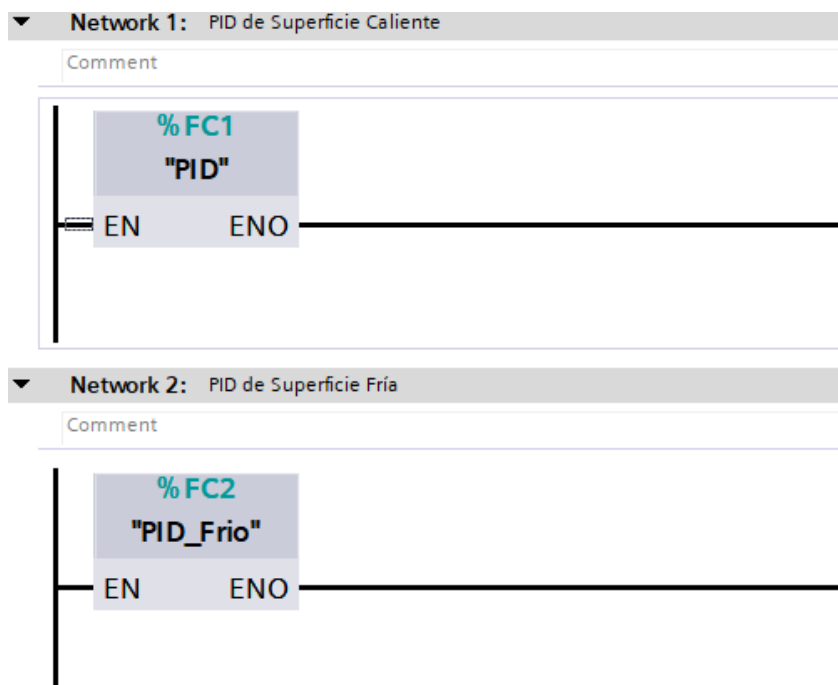


Figura 3.13: Bloques PID dentro del bloque de interrupción cíclica.

En la carpeta de objetos tecnológicos (Technology objects) se crea de manera automática las herramientas necesarias para poder cambiar parámetros específicos de los bloques PID (véase figura 3.14).

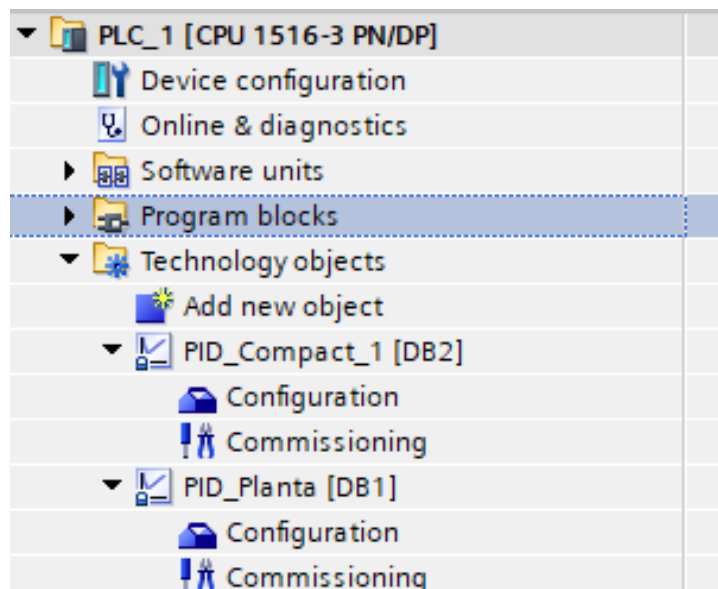


Figura 3.14: Objetos tecnológicos para la configuración de controladores PID.

3.3.1. Sintonización de la superficie caliente

En la figura 3.15 se puede observar el bloque PID configurado para el control de la superficie caliente. El punto de ajuste o setpoint, se maneja con la marca de tipo doble palabra *MD1*. Esta marca está enlazada a su vez con el HMI del sistema. El puerto input donde ingresa el valor de temperatura de la superficie caliente, se maneja con la marca de tipo doble palabra *MD121*. El puerto Reset permite que el controlador PID se mantenga encendido o no, se maneja con una variable booleana *M10,2*. El puerto Output_Per es donde el PLC va a mandar voltaje de salida hasta que se sintonice con la referencia. Se maneja con una variable de salida de voltaje analógico *QW0*.

Los puertos *ManualEnable* y *ManualValue* son empleados para que se pueda tener acceso directo a la variable analógica de salida del PID; esto es de relevancia para tener el sistema en lazo abierto. Con el PID en este modo se realizaron las pruebas necesarias para la determinación del modelo matemático. El puerto *ManualEnable* permite activar y desactivar el modo manual, es decir permite que se ingrese

manualmente un valor de salida hacia el actuador y se maneja con una variable tipo booleana *M11,5*. El puerto *ManualValue* se configura el valor de voltaje que se quiera entregar al actuador, se maneja con una variable tipo doble palabra *MD131*.

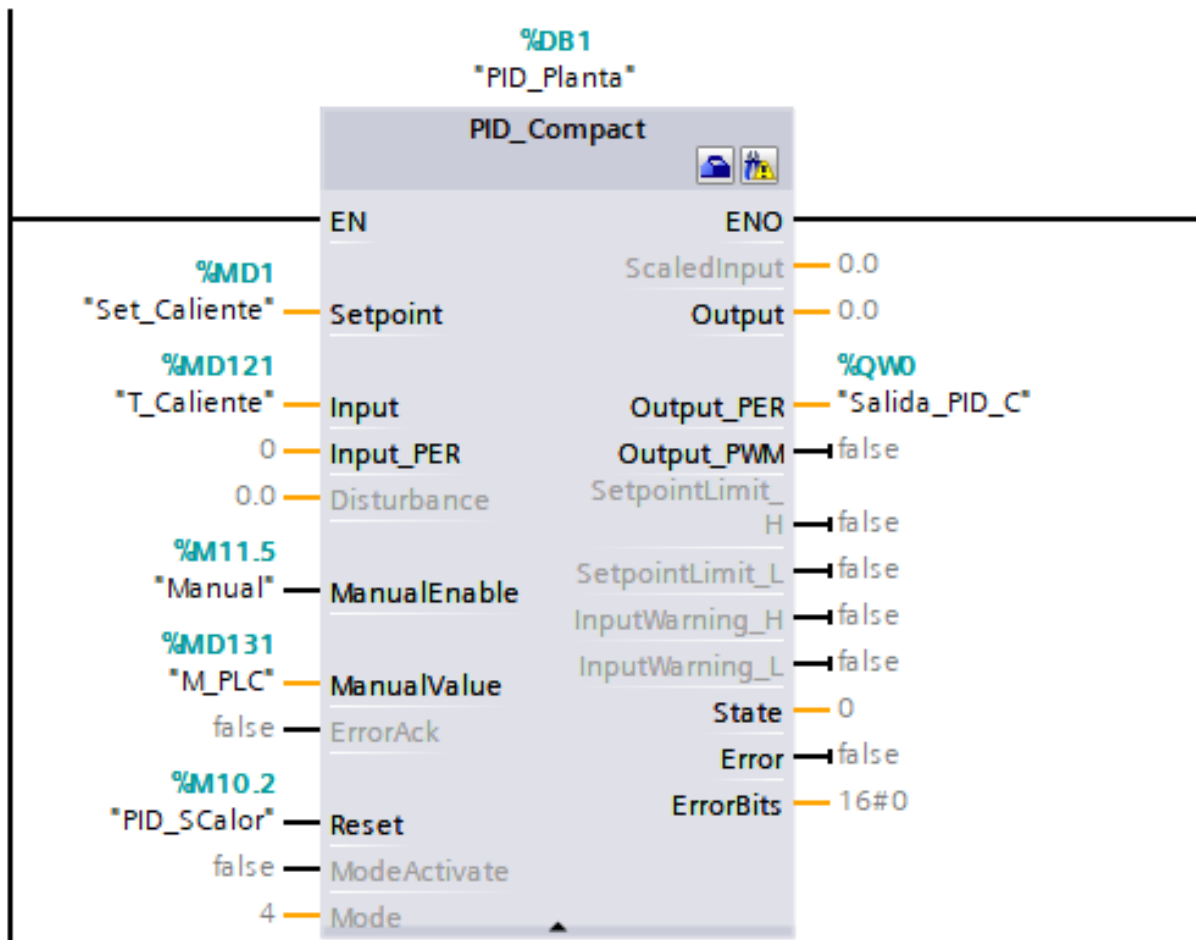


Figura 3.15: Bloque PID par el control de la superficie caliente.

La sintonización se realiza con las siguientes configuraciones:

Configuraciones Básicas

El tipo de controlador es temperatura y las unidades son grados centígrados (°C). Dentro de los parámetros de entrada y salida se selecciona *Input* como entrada y *Output_PER* como salida (véase la figura 3.16).

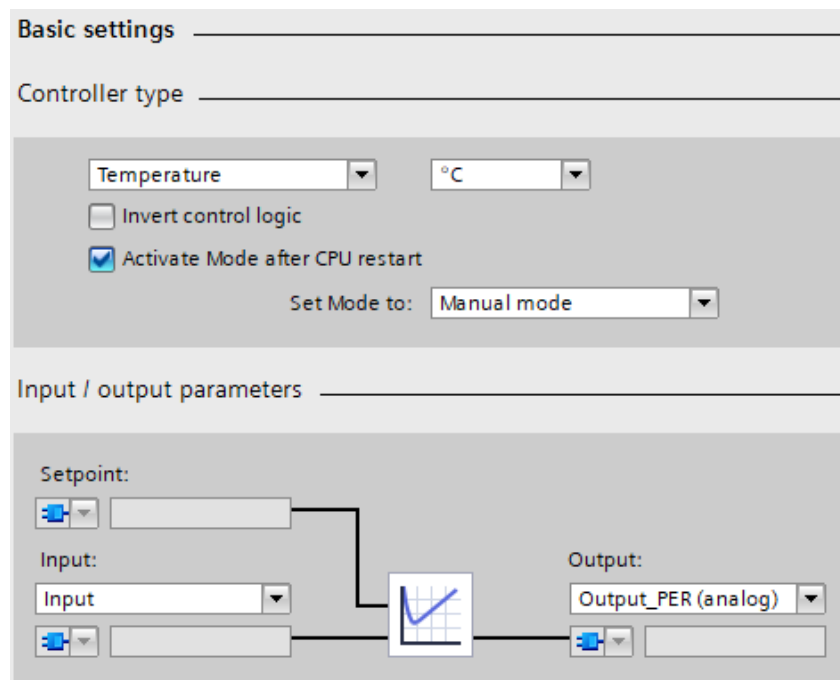


Figura 3.16: Configuración de tipo de controlador y parámetros de entrada y salida.

Ajuste del valor del proceso

En estos parámetros es necesario indicar los límites de la variable controlada. En este caso, se limita la temperatura de salida entre 0°C y 100 °C como se indica en la figura 3.17.

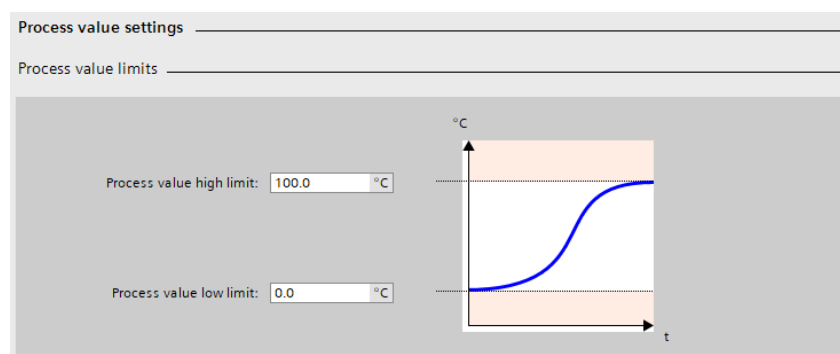


Figura 3.17: Configuración de límites de entrada.

Configuraciones avanzadas

En la primera parte no es necesario cambiar los valores puesto que son valores límites recomendados por el sistema (véase figura 3.18).

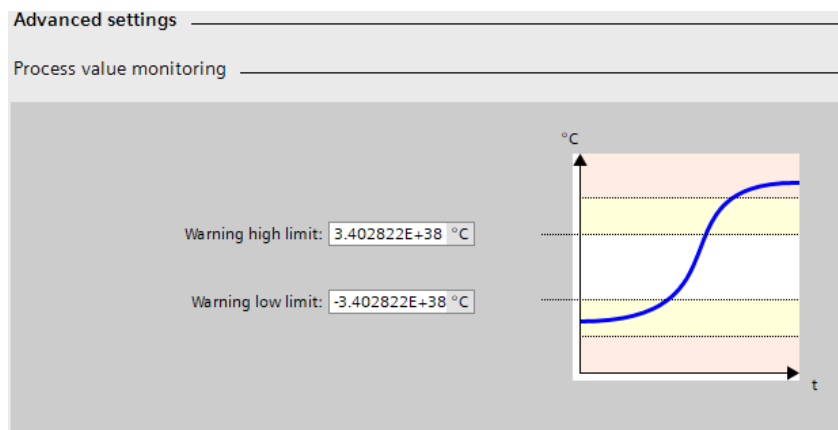


Figura 3.18: Configuración de los límites de sintonización.

Los límites que se modifican en este punto hacen referencia al porcentaje de voltaje que el PLC entregará al sistema. En la sección 3.2 se indica que para aprovechar las cualidades del sistema es necesario enviar un voltaje que se encuentre entre valores de 5V a 9V, por esta razón se cambia el porcentaje máximo por el 35 % que equivale a 3.5V (véase figura 3.19).

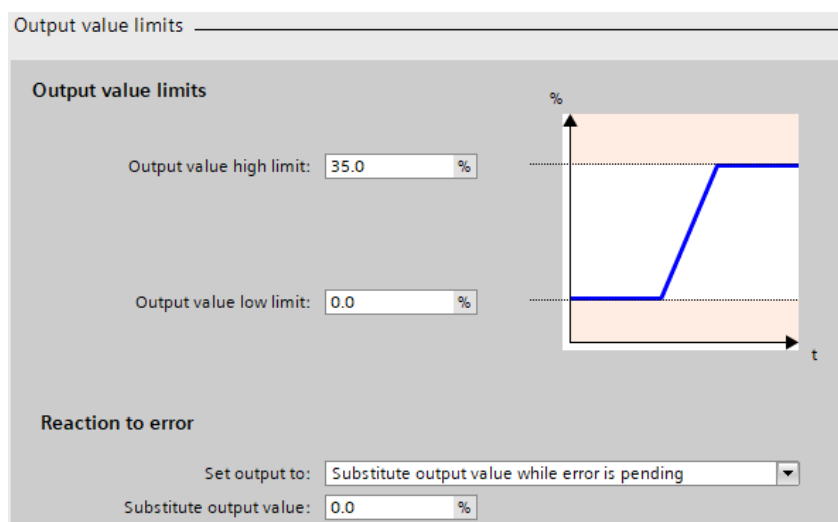


Figura 3.19: Configuración de límites de valores de salida (acción de control).

A continuación, se realiza la sintonización accediendo a la herramienta *Puesta en marcha* de la carpeta de objetos tecnológicos en el bloque PID correspondiente. En la figura 3.20 se muestra la interfaz de la herramienta, la configuración del Setpoint se realiza mediante la variable previamente definida en el bloque. La sintonización comienza cuando se da click en el botón play que se encuentra al lado derecho de las opciones Tiempo de muestreo y Optimización fina.

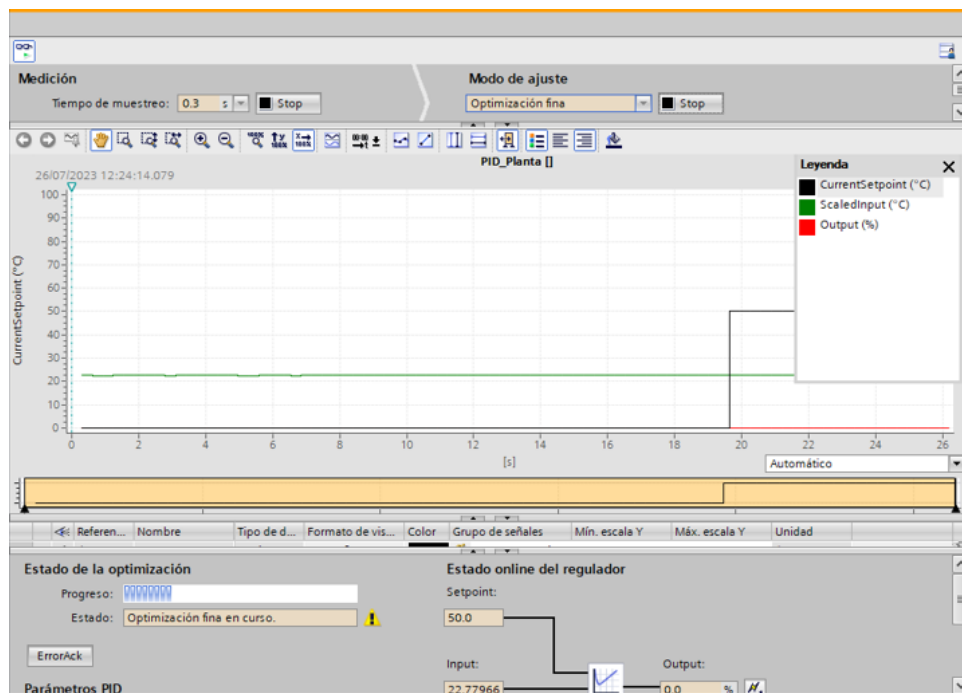


Figura 3.20: Pantalla de la herramienta PID-Compact con optimización fina inicializada.

A continuación, en la figura 3.21 se visualiza el proceso que el controlador ha desarrollado para poder optimizar el sistema. El estado de la sintonización se puede observar en la parte izquierda inferior.

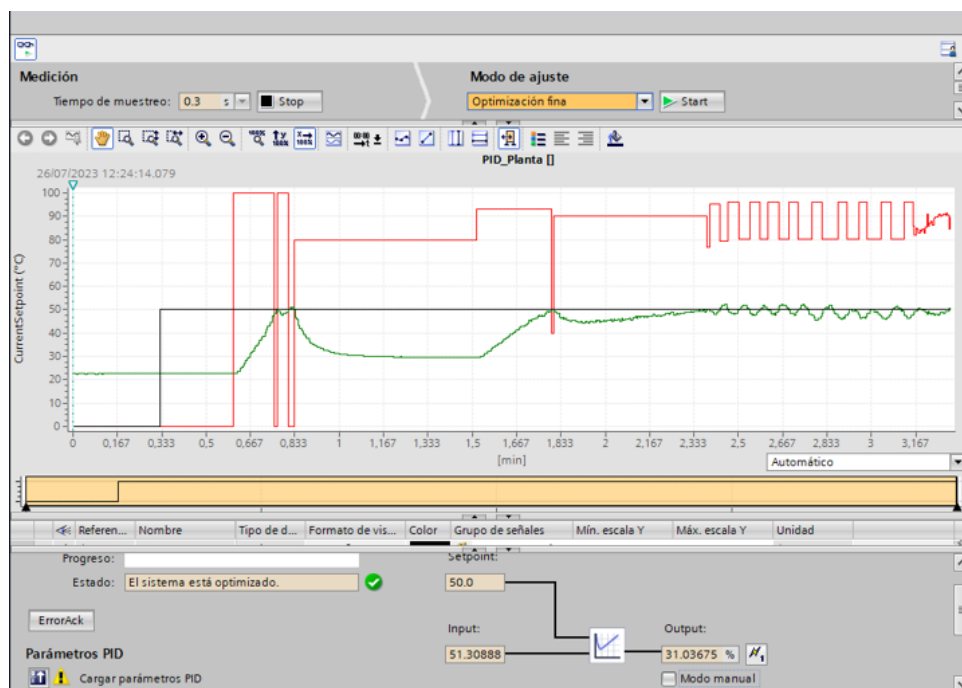


Figura 3.21: Pantalla con la sintonización fina culminada.

En la figura 3.22 se indican los valores de las ganancias del control PID luego de la optimización fina.

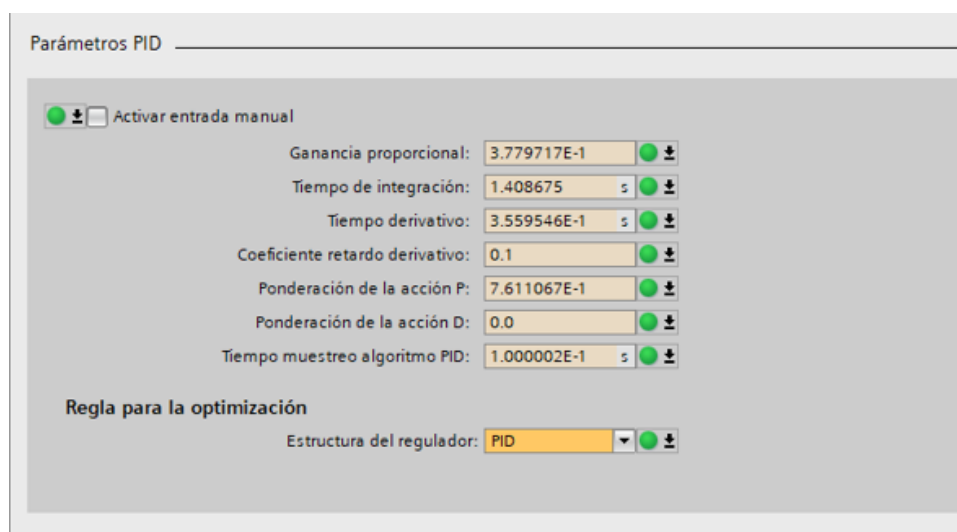


Figura 3.22: Pantalla del PID-Compact con las variables de control PID.

3.3.2. Sintonización de la superficie fría

En la figura 3.23 se puede ver el bloque PID para la superficie fría. El punto de ajuste o setpoint, se maneja con la marca de tipo doble palabra *MD125*, la misma que se encuentra enlazada con el HMI del sistema. El puerto input donde ingresa el valor de temperatura de la superficie caliente, se maneja con la marca de tipo doble palabra *MD156*. El puerto Reset permite que el controlador PID se mantenga habilitado o deshabilitado, se maneja con una variable booleana *M10,3*. El puerto Output_Per determina salida del PLC para enviar voltaje hasta que, el mismo que se encuentra en la salida analógica *QW0*.

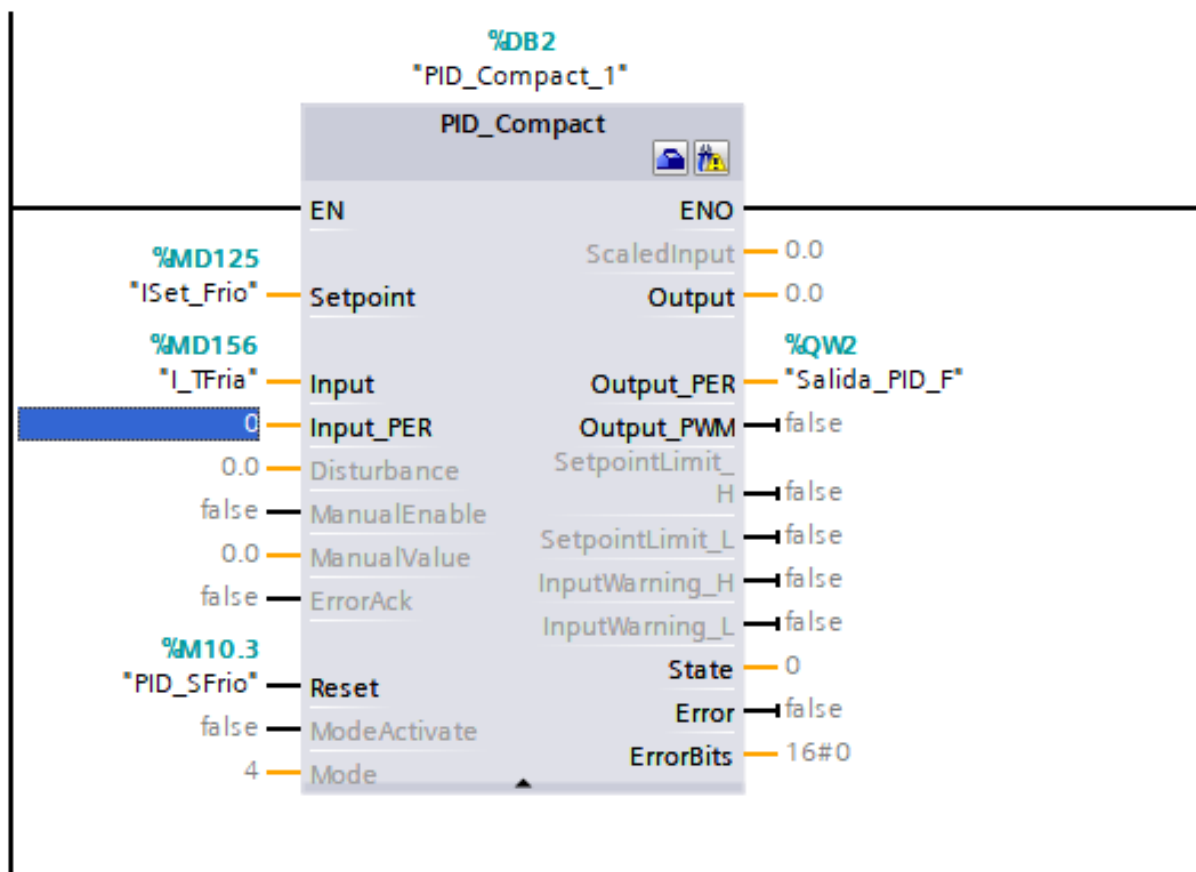


Figura 3.23: Bloque PID para el control de temperatura de la superficie fría.

Las configuraciones que no se nombran en este apartado es por que son idénticas a las explicadas en el apartado anterior que hace referencia al PID para el control de la superficie caliente (3.3.1)

Ajuste del valor del proceso

En estos parámetros es necesario indicar los limites de la variable controlada. En este caso se asignan los valores 0 a -33, respectivamente (véase en la figura 3.24)

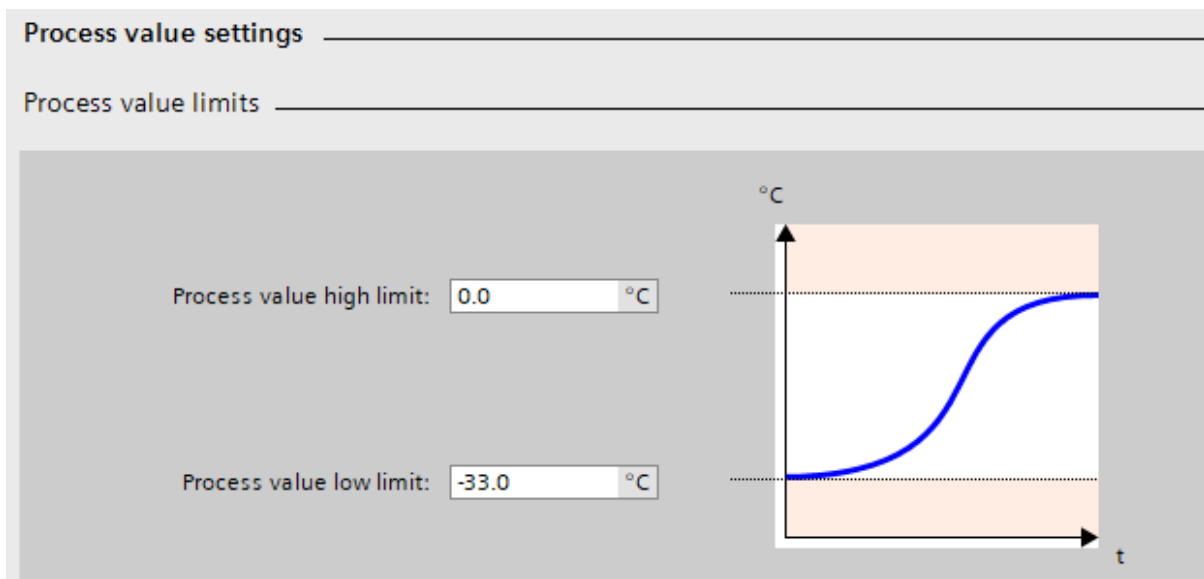


Figura 3.24: Configuración de los límites de la variable controlada.

En la figura 3.25 se muestra el comportamiento de la temperatura de la superficie fría mientras la optimización fina se encuentra en progreso.

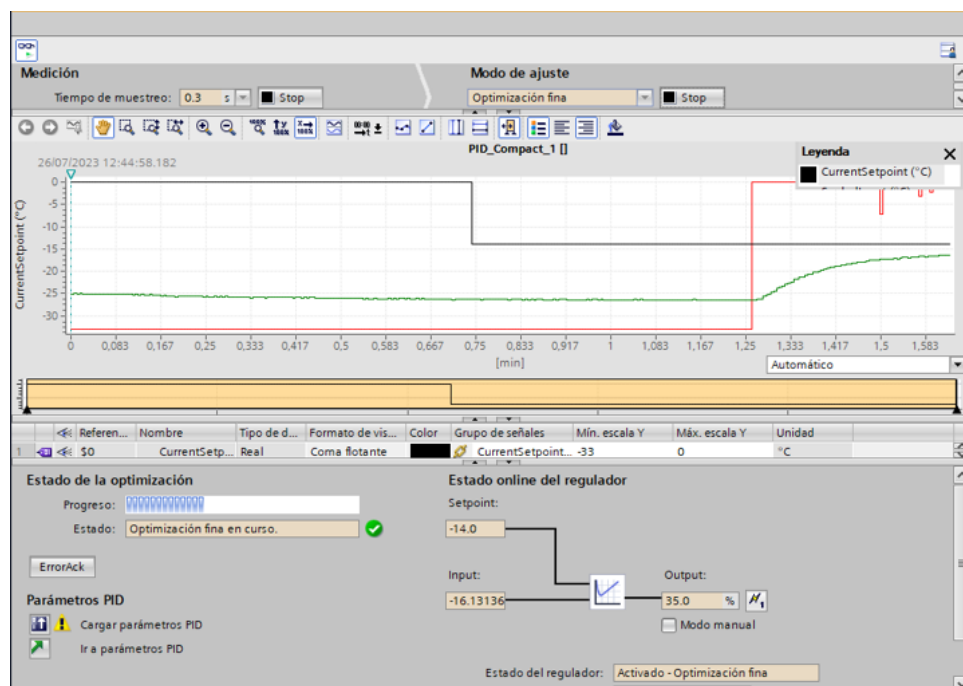


Figura 3.25: Pantalla del PID-Compact con optimización fina en curso.

En la figura 3.26 se visualiza el comportamiento de las señales que logran llegar al valor de la referencia para un punto de ajuste de 14C.

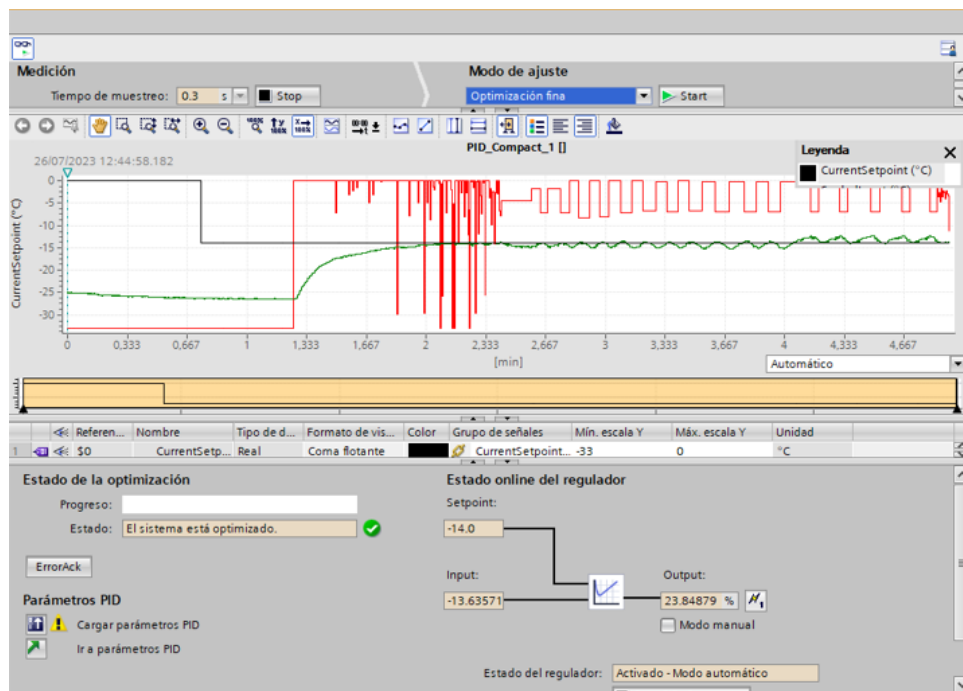


Figura 3.26: Proceso de sintonía culminado.

En la figura 3.27 se indican los valores para las ganancias del control PID posterior a su sintonización.

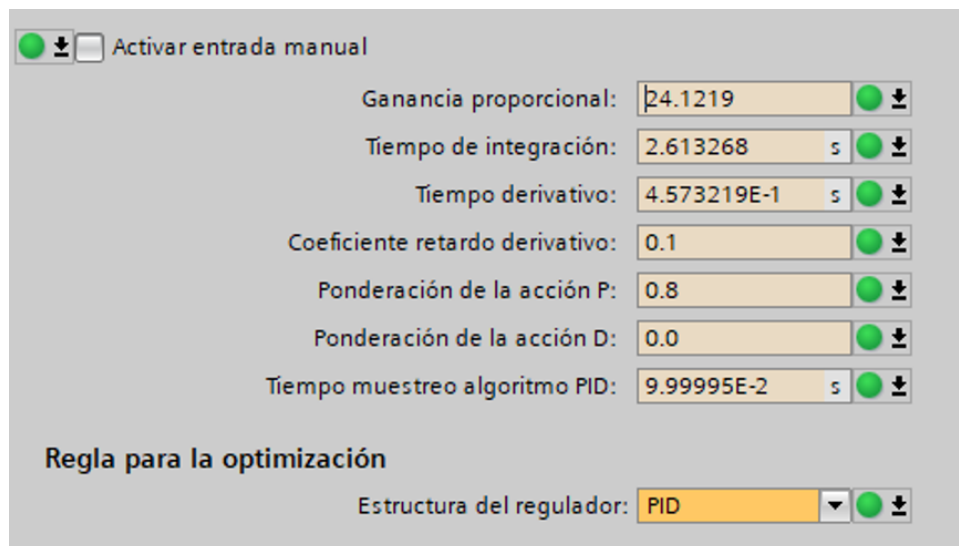


Figura 3.27: Pantalla de PID-Compact con variables de control.

3.4. Interfaz humano-máquina.

A diario todas las personas interactúan con diferentes interfaces gráficas en dispositivos como: el ordenador, cajeros, máquinas, etc. La importancia de las mismas radica en la comunicación con el usuario puesto que es de relevancia que el usuario pueda comprender el funcionamiento del dispositivo [22].

Para el control PID de la Célula Peltier es necesario que exista una interfaz humano-máquina, con la finalidad de que el sistema pueda ser comprendido y aprovechado en todos sus aspectos. Se conoce que existen diferentes bloques de programa dentro del *PLC*, los cuales tienen sus propias variables. Existen diferentes variables que determinan ciertos parámetros importantes dentro del sistema y por eso es relevante que el usuario acceda a la información sin la necesidad de acceder al programa.

SIMATIC WinCC Runtime Advanced se presenta como una solución de supervisión y control para aplicaciones industriales. Esta herramienta informática es considerada como un paquete básico para la visualización, registro y alarmas desde el punto de vista del usuario. Esta herramienta tiene una interfaz intuitiva para su programación y configuración, razón por la cual es ampliamente utilizada dentro del área industrial [23].

3.4.1. Incorporación de una Estación SIMATIC PC

Dentro del proyecto en TIA Portal se debe agregar un nuevo dispositivo llamado *WinCC RT Advanced* (véase la figura 3.28). El dispositivo en mención se puede encontrar dentro de la carpeta SINAMIC HMI application en la sección PC systems (véase figura 3.29).

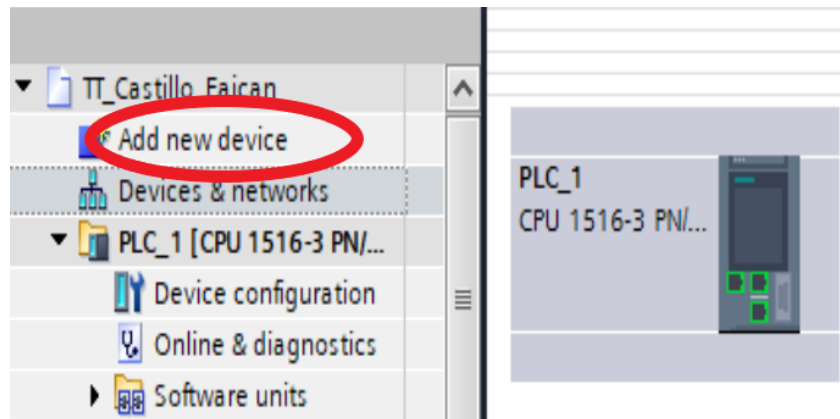


Figura 3.28: Ventana para agregar un nuevo dispositivo en WinCC.

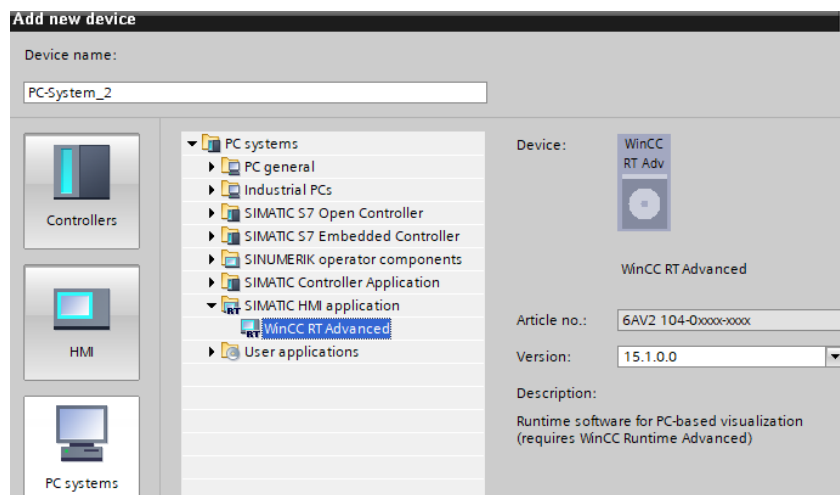


Figura 3.29: WinCC RT Advanced.

Para que WinCC tenga comunicación con la interfaz es necesario agregar un módulo llamado *IE General*. El módulo se puede encontrar en el catálogo, dentro de la carpeta PC systems en la sección de Communications modules como se muestra en la figura 3.30.

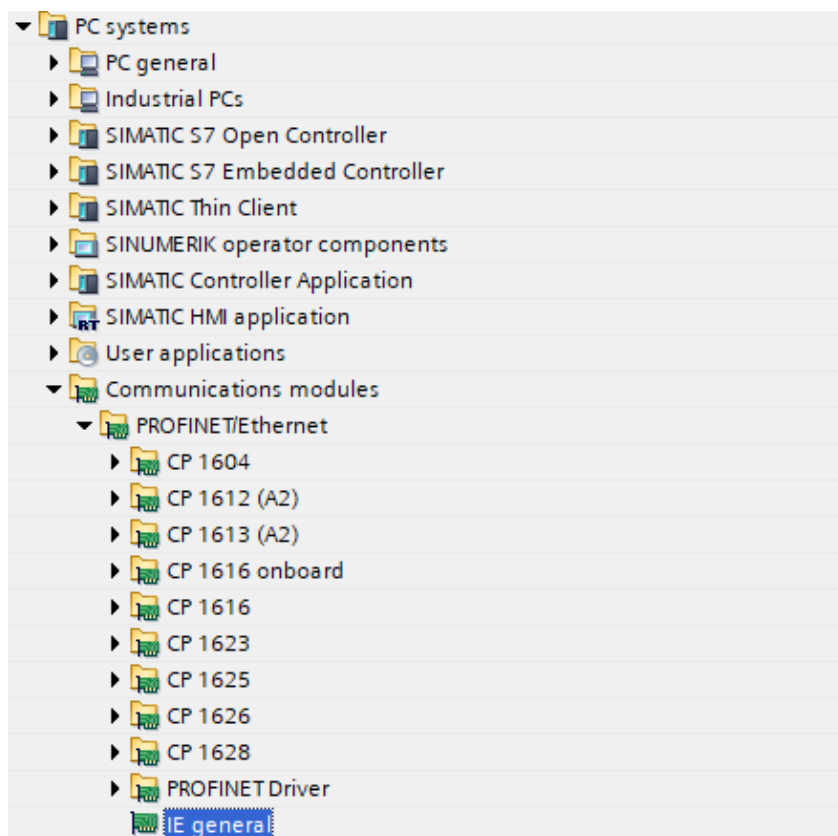


Figura 3.30: Módulo de comunicación IE general

Al enlazar los dos dispositivos la conexión se debe visualizar como se muestra en la imagen 3.31.

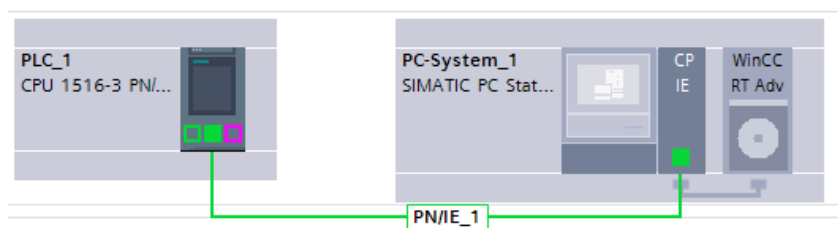


Figura 3.31: Comunicación entre el PLC y la estación HMI

3.4.2. Diseño de la interfaz gráfica

Creación de la plantilla principal

En primera instancia, se realiza la plantilla base en la cual se encuentran los elementos, comandos y botones que se visualizarán en la interfaz todo el tiempo. Para agregar la plantilla se debe acceder a Add new template como se indica en la figura

3.32.

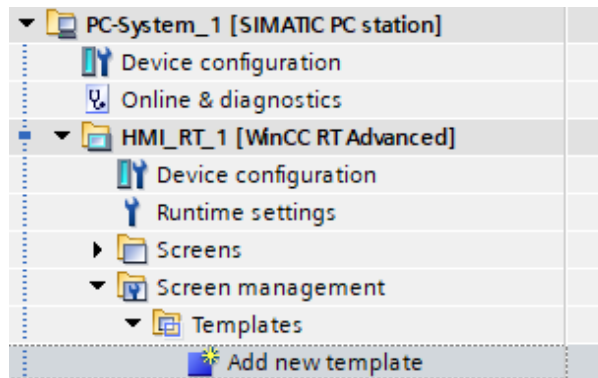


Figura 3.32: Agregar una nueva plantilla en WinCC

En este caso, la plantilla principal lleva por nombre *Plantilla 1*. Como se observa en la figura 3.33 la plantilla cuenta con 3 botones y 2 interruptores ON/OFF.



Figura 3.33: Botones en plantilla principal.

La función del primer botón es llevar al proceso térmico a lazo abierto mientras que el segundo y tercer botón permiten acceder a los dos controladores PID. Por último los interruptores se utilizan para el encendido y apagado de los ventiladores

que se encuentran colocados en las dos superficies de la célula.

Creación de imágenes

Las imágenes son las diferentes interfaces que se pueden mostrar en el proceso de runtime. A diferencia de las plantillas estas si cambian dependiendo la imagen en la que se encuentran. Una imagen siempre tendrá como fondo la plantilla que haya sido establecida como predeterminada. Las imágenes se agregan en la sección Screens (véase figura 3.34).

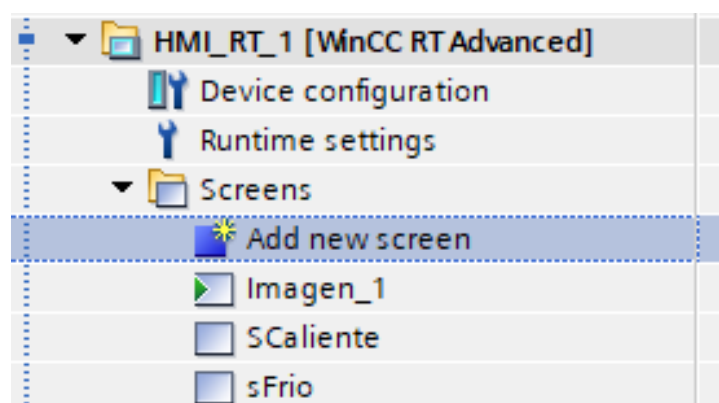


Figura 3.34: Menú para agregar imágenes.

En la figura 3.35 se puede visualizar la interfaz que se tiene cuando se acciona el botón 1 de la plantilla. Es decir se puede observar el comportamiento del sistema en lazo abierto. En esta imagen es posible enviar directamente desde la interfaz un voltaje de salida hacia la célula y en las gráficas se puede visualizar el comportamiento de las señales de temperatura de cada superficie y el voltaje aplicado a la célula.

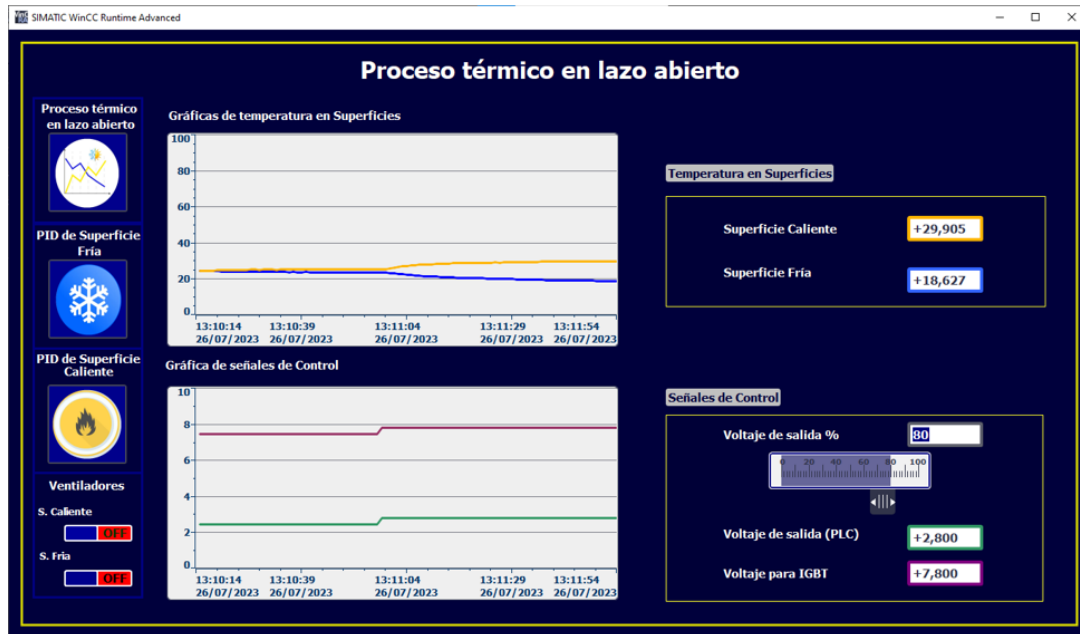


Figura 3.35: Pantalla de la interfaz en lazo abierto

Las figuras 3.36 y 3.37 muestran las interfaces creadas para visualizar el comportamiento de los controladores PID. Estas ventanas son llamadas tras presionar los botones de la plantilla correspondientemente. Ambas interfaces contienen dos gráficas. Una de ellas es para visualizar el comportamiento de la temperatura en conjunto con su referencia, mientras que la otra gráfica muestra la señal de voltaje que genera el PLC, es decir, la acción de control.

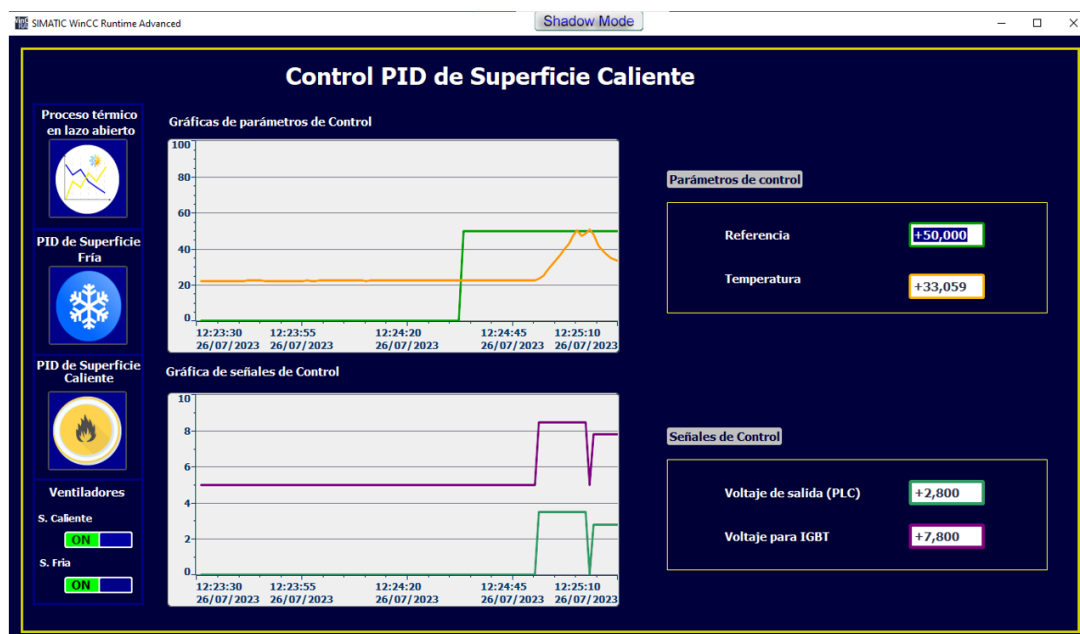


Figura 3.36: Interfaz del controlador PID para la Superficie Caliente.

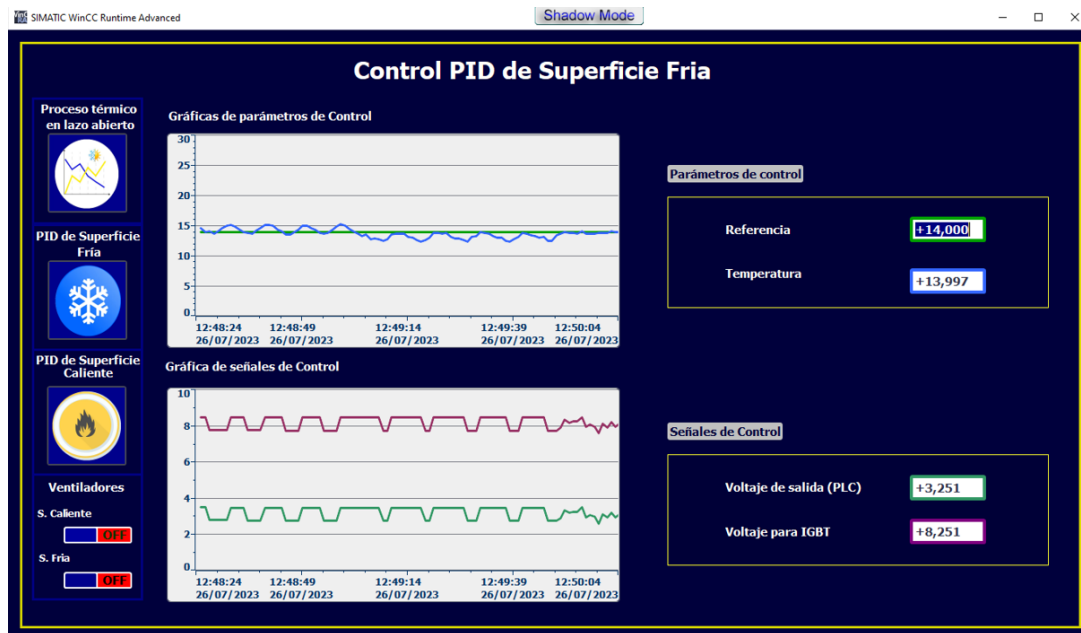


Figura 3.37: Interfaz del controlador PID para la Superficie Fría.

Configuración de runtime

Las configuraciones se deben realizar en la sección que se muestra en la figura 3.38.

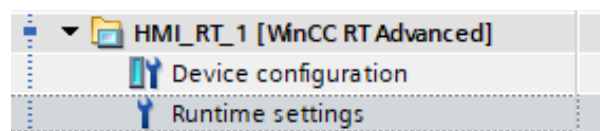


Figura 3.38: Configuración de Runtime

Los parámetros que se muestran a continuación son propiamente para la pantallas. Para este caso se busca que la pantalla de inicio sea la Imagen_1. También se configura para que la plantilla por defecto sea la Plantilla_1 y que la resolución de la pantalla sea de 1366x768 (véase figura 3.39).

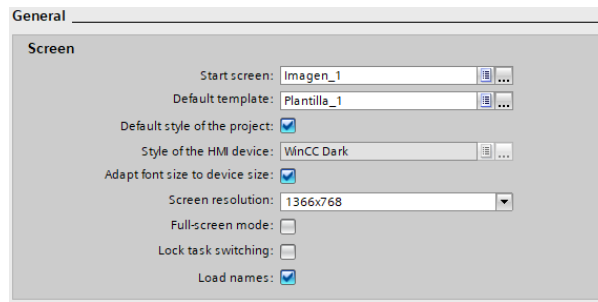


Figura 3.39: Configuraciones generales de la pantalla.

Capítulo 4

Análisis de resultados y discusión

4.1. Temperaturas de operación

Antes de probar el comportamiento de los controladores PID se ha incluido una prueba para conocer la temperatura máxima que puede alcanzar la superficie caliente y la temperatura mínima que pueda alcanzar la superficie fría. Para esta prueba se ha inyectado en lazo abierto, el 100 % de voltaje en los terminales de la célula Peltier. Es decir se ha enviado desde el PLC un voltaje de 3,5V. Este valor se ve reflejado como 8,5V a la salida de la etapa de potencia. Los valores de las temperaturas se pueden observar en la figura 4.1.

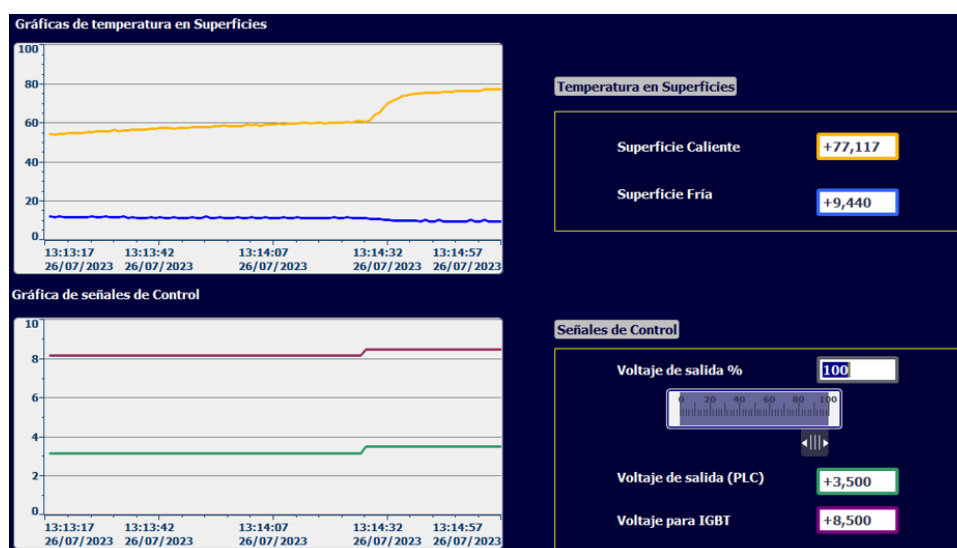


Figura 4.1: Porcentaje en voltaje de salida del 100%.

Según la información presentada en la figura 4.1, la planta está diseñada para que la superficie caliente alcance un valor máximo aproximado de $77,11^{\circ}\text{C}$, mientras que la cara fría podrá alcanzar valores de aproximadamente $9,44^{\circ}\text{C}$. La consecución de estos valores dependerá de la temperatura ambiente y de la corriente que pueda gestionar la etapa de potencia.

4.2. Control de la temperatura de la superficie caliente

4.2.1. Comportamiento del sistema ante cambios en la referencia

Como se observa en la figura 4.2, luego de realizar la auto sintonización con el PID-Compact, se procede a cambiar el valor de referencia para conocer el comportamiento del sistema. En este caso se ha dado una referencia de 40°C . Como se puede observar en la gráfica, la señal en amarillo, que es la variable controlada, busca la referencia y se establece en aproximadamente 46s. El error en estado estacionario es nulo, mientras que la señal presenta un sobre paso máximo aproximado del 8 %.

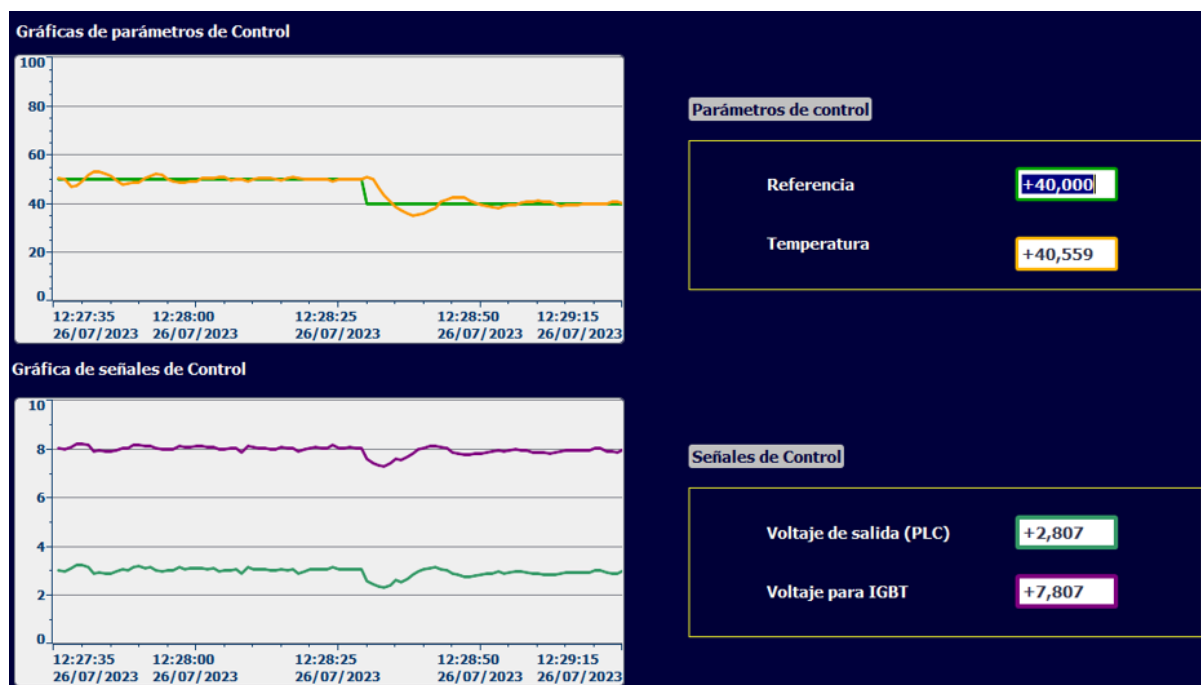


Figura 4.2: Control de temperatura de la superficie caliente (referencia de 40°C)

Como complemento a este análisis también se ha probado el comportamiento de la célula Peltier ante varios cambios en la referencia. En este caso se han dado

tres consignas diferentes. El sistema inicia en una temperatura de 40°C. Luego se ha dado una referencia de 50°C. Al cabo de un tiempo se ha cambiado la referencia a 70°C. Finalmente, siguiente referencia fue de 30°C. Como se puede observar en la Figura 4.3, el sistema sigue la referencia para las diferentes consignas a pesar de que el sistema presenta no linealidades. Esto corrobora la robustez con la que puede operar un controlador PID.

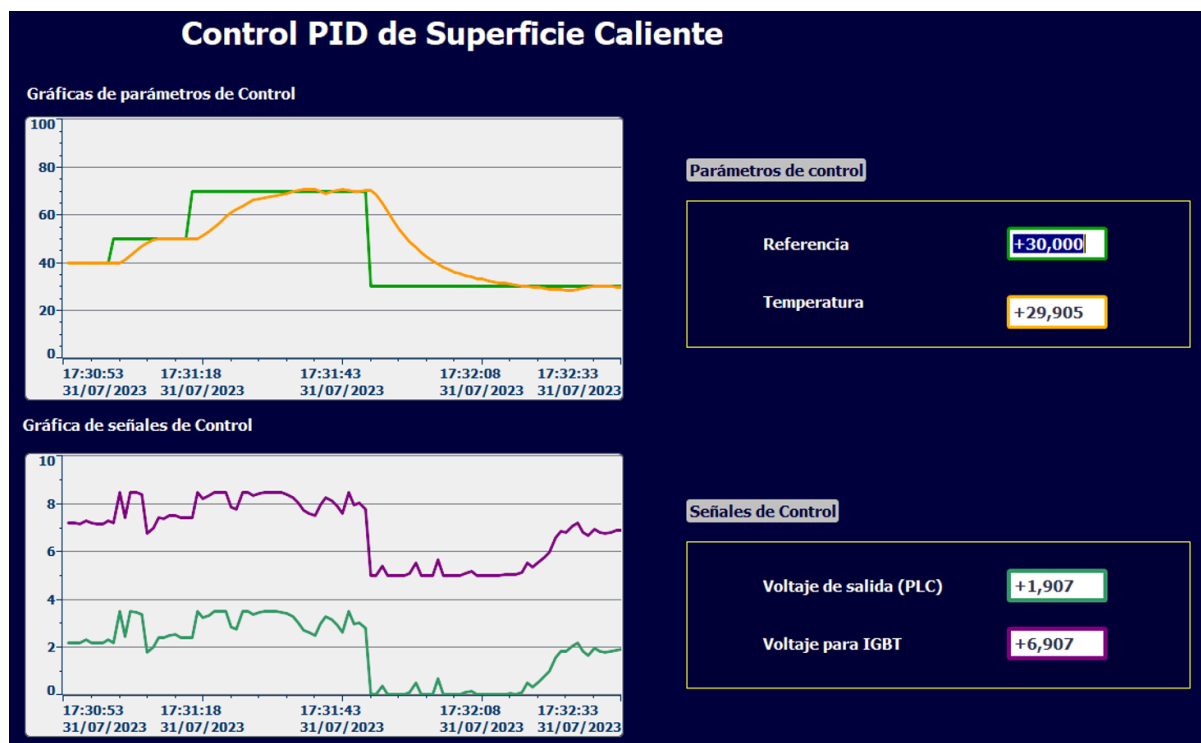


Figura 4.3: Comportamiento de célula Peltier frente a varias referencias.

En la Figura 4.3 también se puede evidenciar como el comportamiento dinámico es diferente para el calentamiento y para el enfriamiento de la superficie. El enfriamiento ocurre en un tiempo más prologando. Esta característica es típica en los sistemas térmicos. También en esta figura es posible evidenciar el efecto de la no linealidad. A pesar de que se han dado dos cambios de consigna ascendentes de 10 unidades, las respuestas del sistema son diferentes. En el primer cambio de consigna de 40°C a 50°C se puede ver como el tiempo de respuesta es más rápido que en el segundo cambio. Seguramente este efecto se debe a una no linealidad de tipo estático que hace que el sistema reaccione más lento conforme la temperatura se aproxima el máximo.

4.2.2. Comportamiento del sistema frente a una perturbación.

En la figura 4.4 se puede visualizar el comportamiento de la temperatura de la superficie caliente en el momento que ocurre una perturbación. Primero se ha ingresado una consigna 60°C. Luego de que el sistema se ha estabilizado se ha apagado del ventilador de la superficie caliente para observar como reacciona el controlador. Como se puede observar en la gráfica, una vez que ha ocurrido la perturbación el controlador reacciona para hacer que el sistema no pierda la referencia.

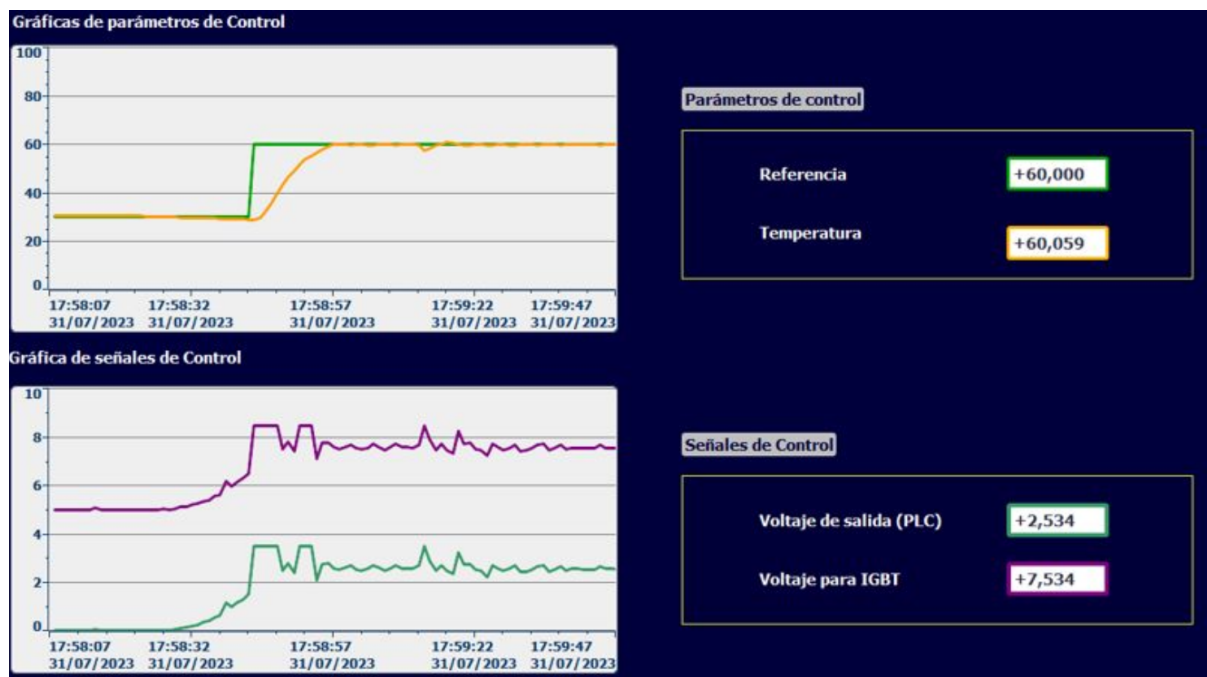


Figura 4.4: Comportamiento de célula Peltier frente a una perturbación.

4.3. Control de la temperatura de la superficie fría

4.3.1. Comportamiento del sistema ante cambios en la referencia

Para el control de temperatura en la superficie fría se realiza el mismo proceso que en el controlador de la superficie caliente. El sistema inicia en una temperatura de 17°C, posterior a ello se le da una referencia de 15°C. Como se observa la señal en azul, que es la variable controlada, busca establecerse en la referencia. La gráfica se estabiliza en aproximadamente 23s, el error en estado estacionario es nulo. (véase figura 4.5).

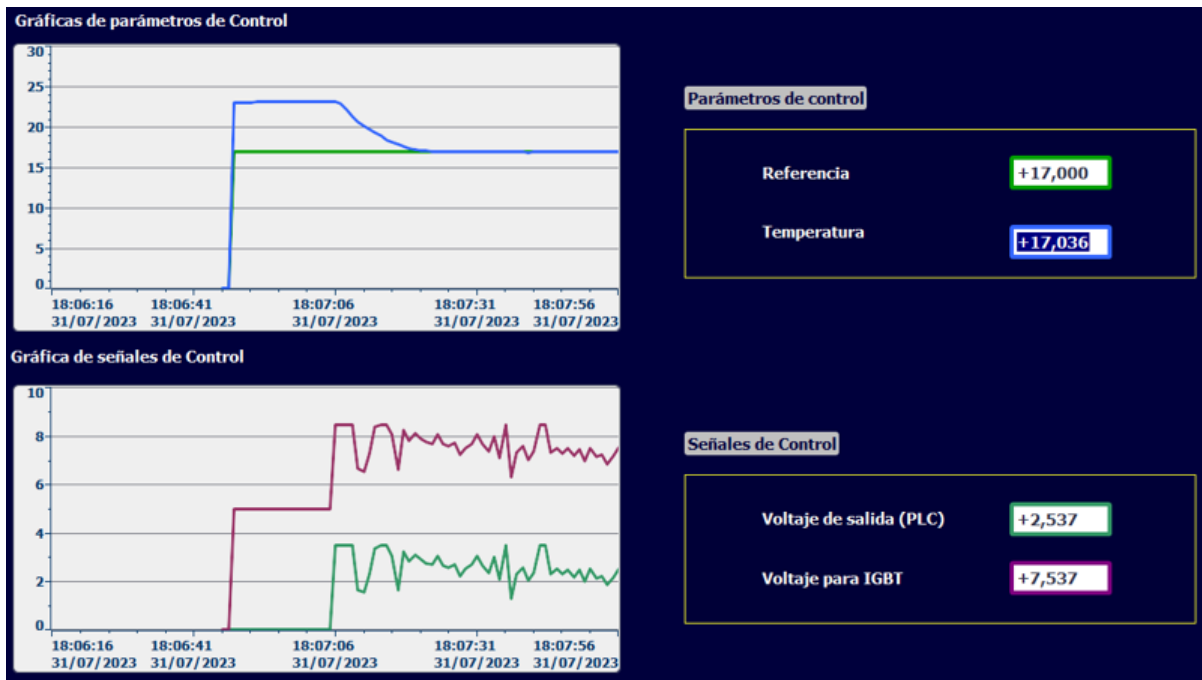


Figura 4.5: Comportamiento de célula Peltier con referencia de 17°C.

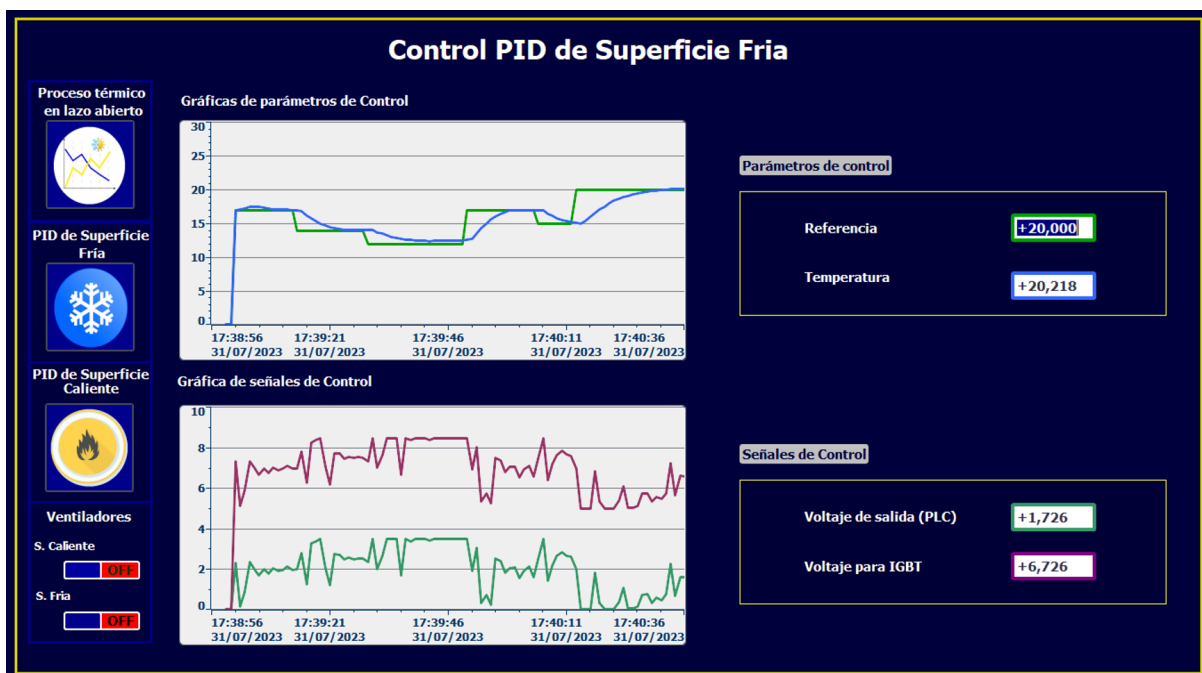


Figura 4.6: Comportamiento de célula Peltier frente a varias referencias.

Al igual que en el controlador anterior se realizan pruebas del comportamiento de la célula en la superficie fría frente a varios cambios en la referencia. En este caso el sistema empieza con una temperatura de 24°C, luego se da una referencia de 14°C. Después de un tiempo se cambia la referencia a 12°C y finalmente se establece

una referencia de 20°C. En la figura ?? se puede observar como el controlador logra establecer sus variables en las referencias establecidas. También se puede observar que el sistema presenta una no linealidad.

4.3.2. Comportamiento del sistema frente a una perturbación.

En la figura 4.7 se logra divisar el comportamiento de la temperatura de la superficie fría en el momento que variamos el valor de referencia. Se creó una perturbación en el caso actual se apagaron los ventiladores que disipan el frío de la superficie.

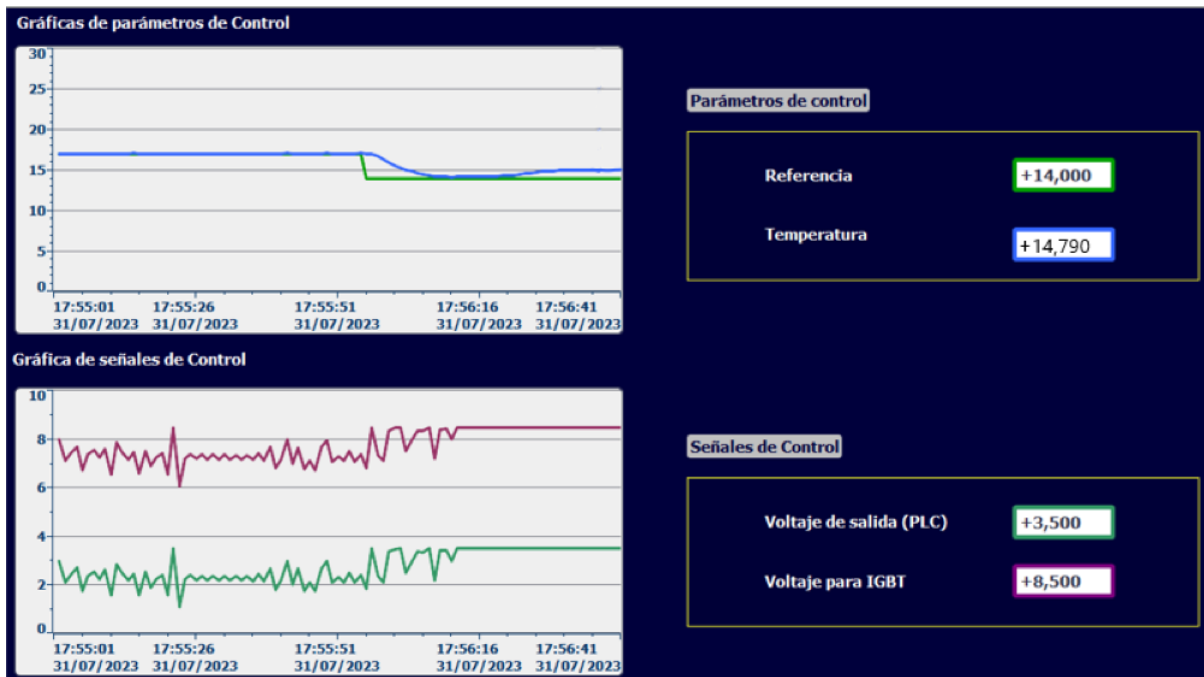


Figura 4.7: Comportamiento de célula Peltier frente a una perturbación.

Como se puede observar en la Figura 4.7, el efecto de la perturbación en la superficie fría es más notorio. Como se puede ver existe un desvío en la referencia que el controlador no logra corregir.

Conclusión y Trabajos Futuros

Conclusiones

En este trabajo de titulación, se ha demostrado que el control PID de una Celda Peltier utilizando un Controlador PID-Compact en el PLC Siemens S7-1500 es una solución efectiva y confiable para mantener la temperatura dentro de un rango deseado en diversas aplicaciones industriales y de investigación. Los resultados obtenidos muestran que el controlador PID-Compact proporciona una respuesta rápida y precisa, permitiendo una regulación óptima de la temperatura en la Celda Peltier.

La utilización del PLC Siemens S7-1500 en combinación con el Controlador PID-Compact ha demostrado ser una elección acertada, ya que este controlador compacto ofrece un alto rendimiento y una eficiente capacidad de procesamiento en aplicaciones con requerimientos de tiempo críticos, como el control de temperatura en sistemas termoeléctricos.

El Controlador PID-Compact se ha sintonizado de manera adecuada, lo que ha permitido lograr una respuesta estable y robusta en la Celda Peltier, manteniendo la temperatura dentro de un rango estrecho alrededor del valor deseado. Esta eficacia del control PID-Compact en el PLC Siemens S7-1500 se traduce en un aumento en la precisión y eficiencia del sistema de enfriamiento o calentamiento, lo que es altamente beneficioso en aplicaciones que requieren un control térmico preciso.

Trabajos Futuros

1. A partir de este trabajo de titulación, se abren varias líneas de investigación y mejora para el control PID de la Celda Peltier utilizando un Controlador PID-Compact

en el PLC Siemens S7-1500. Algunos trabajos futuros que podrían abordarse son:

2. Optimización de parámetros PID: Se puede explorar la utilización de técnicas de sintonización avanzadas para ajustar los parámetros PID de manera dinámica, lo que permitiría mejorar aún más el rendimiento del control y adaptarse a diferentes condiciones de operación.

3. Implementación de estrategias de control avanzadas: Se puede investigar la incorporación de técnicas de control avanzadas, como control predictivo o control adaptativo, para mejorar la precisión y la estabilidad del control de la Celda Peltier en situaciones más complejas y con perturbaciones variables.

4. Análisis de robustez: Sería interesante analizar la robustez del controlador PID-Compact frente a incertidumbres en el modelo del sistema o perturbaciones externas, con el objetivo de evaluar la capacidad de mantener el control estable y preciso bajo diversas condiciones adversas.

5. Control en cascada: Se podría estudiar la implementación de un control en cascada, donde se utilicen múltiples lazos de control PID para controlar diferentes variables en el sistema de Celda Peltier, lo que permitiría una regulación más sofisticada y precisa.

6. Control de la gradiente de temperatura: El control del gradiente de temperatura en una Celda Peltier es un aspecto importante en aplicaciones donde se requiere un control térmico preciso y uniforme en diferentes zonas del sistema.

7. Aplicaciones industriales específicas: Se podrían realizar investigaciones adicionales para aplicar el control PID-Compact en la Celda Peltier en áreas industriales específicas, como sistemas de refrigeración para dispositivos electrónicos, control de temperatura en laboratorios científicos o aplicaciones en la industria alimentaria.

En conclusión, el presente trabajo ha sentado las bases para una aplicación efectiva del control PID de una Celda Peltier utilizando un Controlador PID-Compact en el PLC Siemens S7-1500. Los trabajos futuros pueden expandir y mejorar aún más este enfoque, brindando soluciones más avanzadas y eficientes para el control térmico en diversos campos industriales y científicos.

Referencias

- [1] A. C. Solé, *Instrumentación industrial*. Marcombo, 2005.
- [2] A. I. C. Guzmán, D. S. Roy y G. A. P. Lobato, «Calor específico del agua con efecto Joule,»
- [3] *ELECTRICIDAD: CONDUCTIVIDAD Y RESISTIVIDAD ELÉCTRICA*. dirección: <http://deicy11b.blogspot.com/2016/05/conductividad-y-resistividad-electrica.html>.
- [4] L. Martínez, «Propiedades termoeléctricas de los materiales. Efecto Seebeck y Peltier. Fundamentos teóricos y propuesta experimental.»
- [5] *Termoelectricidad, la energía del desequilibrio – TÉCNICA INDUSTRIAL*. dirección: <https://www.tecnicaindustrial.es/termoelectricidad-la-energia-del-desequilibrio/>.
- [6] S. D. García, A. Abánades y V. Sara, «ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE APLICACIONES PARA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE EFECTOS TERMOELÉCTRICOS,» Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
- [7] P. Centeno, P. Universidad, P. D. Madrid, E. D. Telecomunicación, D. Pedro y C. Pomareta, «Introducción a TIA Portal con S7-1500 INTRODUCCIÓN A TIA PORTAL CON S7-1500.»
- [8] *2 Esquema del efecto Peltier | Download Scientific Diagram*. dirección: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-2-Esquema-del-efecto-Peltier_fig2_311856431.
- [9] É. P. Molina Caña y R. S. Ruiz Flores, «Diseño y construcción de un termogenerador de baja carga basado en el uso de una célula Peltier acoplado al sistema de escape de un motor monocilíndrico,» 2021.

- [10] Amazon.com: Yrhol DC 12V DIY Termoeléctrico Peltier Refrigeración Sistema de Refrigeración Kit Semiconductor Enfriador Disipador de Calor Módulo de Conducción Nevera Mini Aire Acondicionado Refrigeración (Individual) : *Electrónica*. dirección: [https://www.amazon.com/-/es/12V-Termoel % C3 % A9ctrico - Peltier - Refrigeraci % C3 % B3n - Semiconductor/dp/B0B48K6QWH/ref=sr_1_15?crid=XBAXNOTM51A4&keywords=celda+peltier+de+150w&qid=1690669613&s=industrial&sprefix=%2Cindustrial%2C187&sr=1-15](https://www.amazon.com/-/es/12V-Termoel%C3%A9ctrico-Peltier-Refrigeraci%C3%B3n-Semiconductor/dp/B0B48K6QWH/ref=sr_1_15?crid=XBAXNOTM51A4&keywords=celda+peltier+de+150w&qid=1690669613&s=industrial&sprefix=%2Cindustrial%2C187&sr=1-15).
- [11] L. Maruša, M. Milanović y H. Valderrama-Blavi, «Evaluating a Switched Capacitor-Boost Converter (SC-BC) for energy harvesting in a Peltier-cells thermoelectric system,» *2015 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*, págs. 227-234, 2015. DOI: 10.1109/EDPE.2015.7325298.
- [12] A. Skala y Z. Waradzyn, «Investigation and Determination of Efficiency of the Waste Heat Recovery System Using Peltier Modules,» 2018, págs. 1-5. DOI: 10.1109/EPMCCS.2018.8596493.
- [13] G. Casano y S. Piva, «Peltier cells cooling system for switch mode power supply,» 2016, págs. 279-282. DOI: 10.1109/THERMINIC.2016.7749066.
- [14] D. F. S. Cos-p, «Regulación PID; Regulación PID,» 2019.
- [15] S. R. López Campos, «Sistema de climatización basado en células Peltier,» B.S. thesis, 2014.
- [16] D. F. A. E, «Módulo de entradas/salidas analógicas AI 4xU/I/RTD/TC/ AQ 2xU/I ST (6ES7534-7QE00-0AB0),» 2014.
- [17] M. H. Rashid, *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación, 2004.
- [18] B. Zunzunegui Fernández, «Diseño y desarrollo de double-pulse test para módulos de IGBT,» 2021.
- [19] J. Aracil, *Introducción a la dinámica de sistemas*. 1983.
- [20] J. Zambrano, J. Sanchis, J. M. Herrero y M. Martinez, «WH-MOEA: A Multi-Objective Evolutionary Algorithm for Wiener-Hammerstein System Identification. A Novel Approach for Trade-Off Analysis between Complexity and Accuracy,» *IEEE Access*, vol. 8, págs. 228 655-228 674, 2020, ISSN: 21693536. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3046352.

- [21] J. C. Z. A. Advisors y J. S. S. J. M. H. D. Valencia, «Identification of nonlinear processes based on Wiener-Hammerstein models and heuristic optimization,» 2021.
- [22] M. C. Albornoz, «Diseño de interfaz gráfica de usuario,» en *XVI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, 2014.
- [23] SIMATIC WinCC (TIA Portal) - Industry Mall - Siemens Spain. dirección: <https://mall.industry.siemens.com/mall/es/es/Catalog/Products/10360572>.