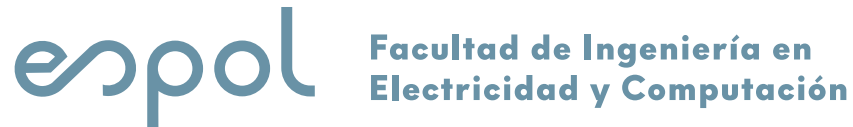




ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación



"DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE PROCESO INDUSTRIAL PARA LA
VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE TÉCNICAS DE MODELADO,
IDENTIFICACIÓN Y SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES
INDUSTRIALES"

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

MAGÍSTER EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL

Presentado por:

Annel Sixto Reina Rojas

Guayaquil – Ecuador

2023

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y a mi Familia han estado conmigo en este gran camino

DEDICATORIA

*Dedico la tesis a mi esposa e hijos,
que me han apoyado todo el tiempo.*

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

PhD. Douglas Plaza G.

DIRECTOR

MSc. Ronald Solis

VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual.

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Annel Sixto Reina Rojas

RESUMEN

El presente trabajo consiste en el desarrollo de un prototipo de un proceso industrial el cual en un espacio pequeño representa fielmente el proceso de intercambio de calor, proceso que se encuentra comúnmente en la mayoría de las industrias. Una vez construido el prototipo se ha procedido a diseñar y evaluar técnicas de modelado, identificación y control. Específicamente se ha modelado la planta mediante una ecuación diferencial no-lineal, se ha identificado una planta de primer orden con retardo y se han evaluado un controlador PID y un controlador por modelo interno.

En el primer capítulo se expone el problema a resolver, los antecedentes, todos los objetivos . En el segundo capítulo se presenta el fundamento teórico de los componentes empleados para desarrollar el módulo didáctico. El tercer capítulo presenta la metodología usada para identificar la planta, y diseñar los controladores. En el capítulo cuatro se desarrollan los diseños de los dos controladores abordados en este trabajo. En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimiento	II
Dedicatoria	III
Tribunal de Graduación	IV
Declaración Expresa	V
Resumen	VI
Índice General	VII
Tribunal de Graduación	X
Índice de figuras	X
Índice de tablas	XII
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 Identificación del problema	1
1.2 Justificación	3
1.3 Solución Propuesta	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo General	5
1.4.2 Objetivos específicos	5

1.5	Metodología	5
1.6	Alcance	7
2	MARCO TEÓRICO	8
2.1	Sensores y Actuadores	8
2.1.1	Termocuplas	8
2.1.2	Relés de Estado Solido	12
2.1.3	Resistencias Calefactoras	14
2.1.4	Acondicionadores de Señales	16
2.2	Modelamiento e Identificación de plantas de transferencia de calor	18
2.2.1	Modelo No-Lineal	18
2.3	Controlador PID y Controlador por Modelo Interno	20
2.3.1	Controlador PID	20
2.3.2	Controlador Por Modelo Interno	22
3	DISEÑO DE LA PLANTA	25
3.1	Construcción del prototipo de sistema de transferencia de calor .	25
3.2	Modelado empleando ecuaciones diferenciales	26
3.3	Simulación del modelo no-lineal	28
3.4	Obtención de la función de transferencia	28
4	DISEÑO DE LOS CONTROLADORES	31
4.1	Diseño del controlador PID	31
4.2	Diseño del controlador IMC	32
4.3	Simulación de los controladores en la planta identificada	33
4.3.1	Simulación Controlador PID	33
4.3.2	Simulación Controlador IMC	34
5	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	36

5.1	Respuesta de la planta ante la acción del controlador PID	36
5.2	Respuesta de la planta ante la acción del controlador IMC	38
5.3	Análisis comparativo del desempeño de los controladores	40
5.3.1	Detalles con la implementación en PLC	41
	Conclusiones y Recomendaciones	46
	Bibliografía	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Diagrama de bloques del sistema de transferencia de calor	6
Figura 2.1	Respuesta de los diferentes tipos de termocuplas	9
Figura 2.2	Termocupla de grado industrial	11
Figura 2.3	Estructura Interna SSR	12
Figura 2.4	Relé de Estado Solido de grado industrial	13
Figura 2.5	Resistencia Calefactora con Ventilador	16
Figura 2.6	Acondicionador de señales universal	17
Figura 3.1	Prototipo junto a estación de trabajo	26
Figura 3.2	Respuesta al escalón del modelo no lineal	27
Figura 3.3	Implementación en Simulink del modelo no-lineal	28
Figura 3.4	Validación del modelo no lineal	29
Figura 3.5	Método de los dos puntos para obtener la función de transferencia	30
Figura 4.1	Esquema del controlador por modelo interno	33
Figura 4.2	Modelo a lazo cerrado con control PID	33
Figura 4.3	Respuesta a lazo cerrado con controlador PID	34
Figura 4.4	Modelo a lazo cerrado con control IMC	35
Figura 4.5	Respuesta a lazo cerrado con controlador IMC	35
Figura 5.1	Modelo a lazo cerrado con control PID para el modelo No Lineal	37

Figura 5.2	Respuesta de la planta No Lineal con el controlador PID	37
Figura 5.3	Respuesta de la planta No Lineal con el controlador PID	38
Figura 5.4	Modelo a lazo cerrado con control IMC para el modelo No Lineal	39
Figura 5.5	Respuesta de la planta No Lineal con el controlador IMC	39
Figura 5.6	Respuesta de la planta No Lineal con el controlador IMC	40
Figura 5.7	Comparativa de la respuesta de la Planta No Lineal	41
Figura 5.8	Comparativa de la acción de control	42
Figura 5.9	Uso del bloque funcional PID Compact en TIA Portal	43
Figura 5.10	Modelo de primer orden utilizado para implementar el controlador IMC	44
Figura 5.11	Retardo utilizado para implementar el controlador IMC	45
Figura 5.12	Respuesta de temperatura en TIA Portal	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Parámetros identificados con algoritmo PSO.	27
-----------	---	----

Capítulo 1

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Identificación del problema

En los programas de postgrado profesionalizantes con contenido técnico, el enfoque principal es formar profesionales capaces de integrar sistemas tecnológicos y desarrollar habilidades en gestión empresarial con conciencia social y ambiental. Además, se espera que los graduados generen procesos de innovación técnica que satisfagan las necesidades de la industria y la sociedad. Sin embargo, para lograr una formación integral en el campo de la ingeniería, se requiere el desarrollo de prácticas experimentales. Estudios recientes [Morita and Setozaki(2017)] han demostrado que la experimentación es fundamental para consolidar los conocimientos teóricos adquiridos y permitir a los estudiantes aplicarlos en situaciones reales.

Desafortunadamente, adquirir equipos industriales para cada estudiante representa un costo económico significativo, que muchas veces resulta difícil de asumir. Además, los laboratorios disponibles en el programa suelen estar limitados en número y capacidad, lo que limita la experiencia de los estudiantes en la realización de experimentos y la validación práctica de los conocimientos teóricos.

En el caso del programa de Maestría en Automatización y Control, se busca formar profesionales capaces de integrar tecnologías de automatización industrial y resolver problemas en el campo de los procesos industriales utilizando técnicas clásicas y modernas de control de procesos. Por lo tanto, los estudiantes necesitan realizar experimentos para poner en práctica los conocimientos teóricos adquiridos. Actualmente, la experimentación se lleva a cabo en los laboratorios de control y automatización, lo que limita la cantidad de experimentos que pueden realizar los estudiantes y dificulta la validación práctica de los conocimientos teóricos.

Ante esta situación, surge la necesidad de permitir que los estudiantes realicen experimentación en los lugares donde desarrollan sus actividades si es posible. Esta alternativa permitiría a los estudiantes tener acceso a equipos e instalaciones de la industria, lo que les brindaría una experiencia valiosa y les permitiría aplicar los conocimientos teóricos adquiridos en un entorno real. Por supuesto, se requiere un cuidadoso análisis de los riesgos y beneficios de esta alternativa, y se deben establecer las medidas

de seguridad necesarias para garantizar la integridad física de los estudiantes y la protección de los equipos y las instalaciones industriales. Sin embargo, si se implementa adecuadamente, esta alternativa puede ser una solución efectiva para mejorar la formación de los estudiantes de posgrado y prepararlos para los desafíos de la industria moderna.

1.2. Justificación

En la educación de postgrado, la teoría es fundamental, pero también es importante que los estudiantes adquieran experiencia práctica. Sin embargo, es común encontrar que muchos programas de estudio tienen pocos módulos de experimentación en procesos industriales. Esta falta de experimentación práctica puede ser un obstáculo para los estudiantes, ya que no les permite aplicar los conocimientos teóricos adquiridos en situaciones reales.

La implementación de módulos de experimentación en procesos industriales de bajo costo es una solución viable y necesaria para resolver esta problemática. Este tipo de módulo permitiría a los estudiantes de postgrado aplicar sus conocimientos teóricos en un entorno práctico y simulado, lo que les brinda la oportunidad de validar el desempeño de los controladores industriales en tiempo real.

Además, la experimentación práctica en procesos industriales con módulos de bajo costo permitiría a los estudiantes desarrollar

prácticas y proyectos de titulación, lo que afianza el conocimiento adquirido. De esta manera, los estudiantes podrían obtener una comprensión más completa de los conceptos teóricos y, al mismo tiempo, desarrollar habilidades prácticas valiosas para su futuro profesional.

1.3. Solución Propuesta

Para resolver el problema de la limitación en la experimentación práctica, se propone diseñar un prototipo de planta industrial de bajo costo que permita validar experimentalmente las técnicas de modelado, identificación y sintonización de controladores industriales.

La planta tendrá características industriales, como sensores, actuadores y controladores, que permitirán tener un acercamiento a un proceso industrial real y validar el desempeño de los controladores diseñados teóricamente.

Esto permitiría a los estudiantes aplicar los conocimientos adquiridos en el diseño de controladores industriales y validar su desempeño en una planta industrial real, lo que afianzaría sus conocimientos y aumentaría su interés en las temáticas relacionadas con el control de los procesos industriales.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Desarrollo de un prototipo de calentador industrial para la validación de técnicas y métodos de modelamiento matemático, identificación de sistemas, y la sintonización de controladores industriales mediante el análisis del comportamiento del sistema en lazo cerrado ante la presencia de perturbaciones regulando la variable temperatura.

1.4.2. Objetivos específicos

- Desarrollo del prototipo de calentador empleando componentes de bajo costo manteniendo el grado industrial de los mismos.
- Obtener el modelo matemático del sistema empleando técnicas de identificación de sistemas.
- Diseñar el sistema de control de temperatura considerando la presencia de perturbaciones y el efecto del tiempo muerto en el sistema. Los sistemas de control a validar son Proporcional-Integral-Derivativo PID y Control por Modelo Interno (IMC).

1.5. Metodología

Se iniciará desarrollando la planta de transferencia de calor, mediante una resistencia calefactora, la misma que contará con un driver

de potencia, además de la electrónica analógica y la tarjeta de acondicionamiento de señales y adquisición de datos necesaria para el funcionamiento.

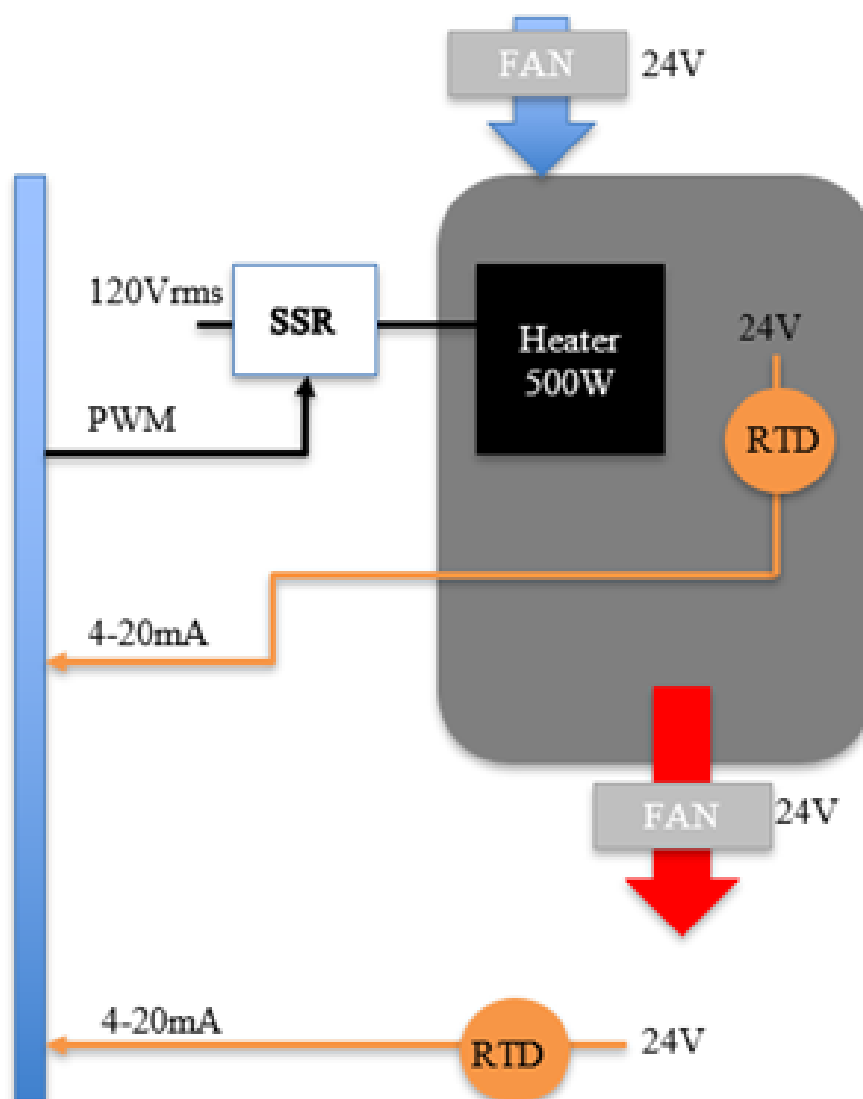


Figura 1.1: Diagrama de bloques del sistema de transferencia de calor

Posteriormente se determinará la dinámica de la planta, mediante el modelamiento basado en las leyes de la física. Luego se recolectarán datos de la respuesta de la planta, con los cuales se calibrará el modelo físico y se obtendrá la función de transferencia mediante

métodos de identificación de sistemas.

A partir de la función de transferencia obtenida se diseñarán esquemas de control que mejoren la respuesta del sistema ante la presencia de perturbaciones de temperatura externa, además se tomará en cuenta el efecto del tiempo muerto presente en la planta. Los controladores por considerar serán el controlador PID y el controlador IMC. Para el diseño y validación tanto por simulación como con la planta física se empleará en primera instancia el software Matlab/SIMULINK.

Finalmente se evaluará el desempeño del controlador PID empleando el software TIA Portal.

1.6. Alcance

En el presente trabajo se espera obtener un prototipo de una planta industrial de bajo costo, que permita validar el funcionamiento de controladores PID y control basado en modelo interno, así como el desarrollo de una herramienta que permita a los maestrantes realizar experimentación desde sus hogares.

Capítulo 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Sensores y Actuadores

2.1.1. Termocuplas

Las termocuplas son sensores de temperatura que se basan en el efecto Seebeck. Este efecto genera una diferencia de potencial eléctrico entre dos metales distintos unidos en sus extremos cuando se someten a una diferencia de temperatura. Esta diferencia de potencial eléctrico es proporcional a la temperatura y puede medirse con instrumentos adecuados, como termómetros termopar o transmisores de temperatura.

Las termocuplas se clasifican según el tipo de metales que las componen y el rango de temperatura que pueden medir.

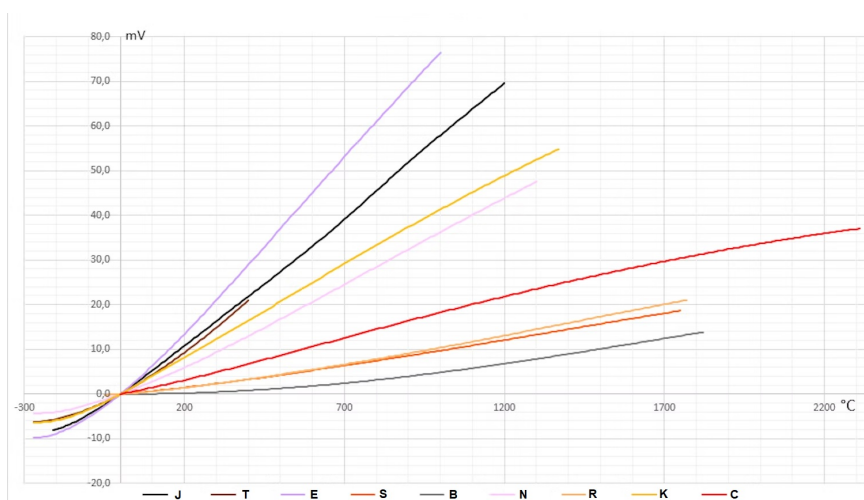


Figura 2.1: Respuesta de los diferentes tipos de termocuplas

Existen diferentes tipos de termocuplas identificados por letras y números según la norma IEC 60584. Algunos de los tipos más comunes son:

- Tipo K: Es adecuada para una amplia gama de aplicaciones industriales, desde aplicaciones de baja temperatura hasta aplicaciones de alta temperatura. Puede soportar temperaturas extremadamente altas y se utiliza en industrias como la automotriz, metalúrgica, procesamiento de alimentos y hornos industriales.

Rango de temperatura: Aproximadamente -200°C a $+1.300^{\circ}\text{C}$ (-328°F a $+2.372^{\circ}\text{F}$)

- Tipo J: Comúnmente utilizada en aplicaciones de baja temperatura. Tiene una buena sensibilidad en el rango de temperatura bajo y es adecuada para aplicaciones en la industria química, alimentos, fabricación de plásticos y sistemas de calefacción.

Rango de temperatura: Aproximadamente -200°C a $+750^{\circ}\text{C}$
(-328°F a $+1.382^{\circ}\text{F}$)

- Tipo T: Adecuada para aplicaciones de baja temperatura y entornos corrosivos. Tiene una buena estabilidad a temperaturas criogénicas y se utiliza en la industria farmacéutica, sistemas de refrigeración, monitoreo de procesos criogénicos y aplicaciones en laboratorios.

Rango de temperatura: Aproximadamente -200°C a $+400^{\circ}\text{C}$
(-328°F a $+752^{\circ}\text{F}$)

- Tipo E: Conocida por su alta sensibilidad y es adecuada para aplicaciones de baja temperatura y entornos oxidantes. Es ampliamente utilizada en aplicaciones de control de temperatura, sistemas de calefacción y ventilación, así como en la industria química.

Rango de temperatura: Aproximadamente -200°C a $+900^{\circ}\text{C}$
(-328°F a $+1.652^{\circ}\text{F}$)

- Tipo B: Diseñada para aplicaciones de alta temperatura. Puede soportar temperaturas extremadamente altas y ofrece una excelente precisión y estabilidad en el rango de temperatura elevada. Se utiliza en aplicaciones industriales como la industria metalúrgica, procesos de combustión y hornos industriales.

Rango de temperatura: Aproximadamente 0°C a $+1.800^{\circ}\text{C}$ (32°F
a $+3.272^{\circ}\text{F}$)

La medición de las termocuplas puede realizarse de diferentes formas, dependiendo del tipo de conexión establecida entre la termocupla y el instrumento de medición. La forma más simple es la

conexión directa, donde la termocupla se conecta directamente al instrumento mediante cables del mismo material que la termocupla. Sin embargo, esta forma requiere mantener la temperatura de referencia constante en el punto de conexión, lo que se conoce como compensación de unión fría.

Otra forma de medir las termocuplas es mediante una conexión compensada, donde se utilizan cables de extensión o compensación que tienen una composición similar a la termocupla y generan el mismo potencial eléctrico. Estos cables se conectan a un dispositivo que compensa la temperatura de referencia mediante un circuito electrónico o una tabla de corrección.

La última forma de medir las termocuplas es mediante una conexión aislada, donde se utiliza un dispositivo que aísla eléctricamente la termocupla del instrumento de medición y convierte el potencial eléctrico generado por la termocupla en una señal estándar, como 4-20 mA o 0-10 V. Esta forma tiene la ventaja de eliminar los problemas de ruido eléctrico y compensación de unión fría.



Figura 2.2: Termocupla de grado industrial

2.1.2. Relés de Estado Sólido

Los relés de estado sólido (SSR) son dispositivos electrónicos que permiten la conmutación de la corriente eléctrica cuando se aplica una pequeña corriente en sus terminales de control. A diferencia de los relés electromecánicos, los SSR no tienen partes móviles y utilizan semiconductores como tiristores, transistores o MOSFET para realizar la conmutación. Los SSR presentan varias ventajas sobre los relés convencionales, como una mayor velocidad, ausencia de ruido y mayor durabilidad. Sin embargo, también tienen algunas desventajas, como una mayor resistencia al paso de corriente, menor tolerancia a sobrecargas y mayor calentamiento.

El principio de funcionamiento de los SSR se basa en el acoplamiento óptico entre el circuito de control y el circuito de potencia. El circuito de control activa un LED interno que ilumina y activa un diodo fotosensible (fotovoltaico). Este diodo genera una corriente que activa un interruptor electrónico de estado sólido, el cual conmuta el circuito de potencia. De esta manera, se logra un aislamiento galvánico entre los dos circuitos, lo que permite trabajar con diferentes tensiones y frecuencias.

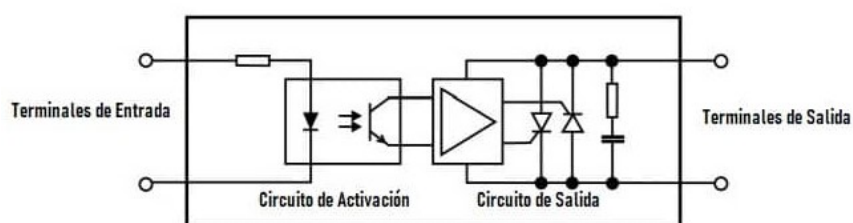


Figura 2.3: Estructura Interna SSR

Los SSR se clasifican según el tipo de carga que conmutan, ya sea corriente continua (CC) o corriente alterna (CA). Los SSR de CC suelen utilizar uno o varios MOSFET en paralelo para realizar la conmutación. Es importante colocar diodos externos de protección cuando se conmutan cargas inductivas debido al diodo interno del MOSFET. Por otro lado, los SSR de CA utilizan un TRIAC, que consiste en dos SCR conectados en direcciones opuestas, para conmutar la corriente en ambos sentidos. Los TRIAC se sincronizan con el cruce por cero de la onda alterna para evitar picos transitorios.

Además, los SSR se pueden clasificar según su forma de operación: instantáneos o temporizados. Los SSR instantáneos conmutan la carga tan pronto como reciben la señal de control, mientras que los SSR temporizados incorporan un circuito temporizador que retrasa la conmutación según un tiempo preestablecido.



Figura 2.4: Relé de Estado Solido de grado industrial

Los SSR encuentran múltiples aplicaciones en el campo de la

electrónica y la automatización industrial. Permiten el control de dispositivos eléctricos o electrónicos mediante una señal de control proveniente de un microcontrolador, un PLC o un sensor. Algunos ejemplos de aplicaciones son el control de motores, bombas, válvulas, calefactores, iluminación, entre otros.

2.1.3. Resistencias Calefactoras

Las resistencias calefactoras industriales son dispositivos que convierten la energía eléctrica en calor y se utilizan para calentar diferentes tipos de materiales, como agua, aceite, aire o gas. El principio de funcionamiento de las resistencias calefactoras se basa en el efecto Joule, que consiste en que cuando una corriente eléctrica pasa por un conductor, parte de la energía se disipa en forma de calor debido a la resistencia eléctrica del material.

Las resistencias calefactoras industriales se pueden clasificar según el tipo de material que calientan, el tipo de material que las constituye, la forma que tienen o el modo de operación que emplean. Algunas de las clasificaciones más comunes son las siguientes:

- Según el tipo de material que calientan: se pueden distinguir entre resistencias de inmersión, que se sumergen directamente en el fluido a calentar; resistencias de contacto, que se adhieren a la superficie del material a calentar; y resistencias de radiación, que emiten calor por ondas electromagnéticas.
- Según el tipo de material que las constituye: se pueden diferenciar entre resistencias metálicas, que están hechas de alambres o

láminas de metales como níquel-cromo, hierro-cromo-aluminio o cobre-níquel; y resistencias no metálicas, que están hechas de materiales cerámicos, carbón o grafito.

- Según la forma que tienen: se pueden clasificar entre resistencias tubulares, que tienen forma cilíndrica y se pueden doblar o acodar según la necesidad; resistencias planas, que tienen forma rectangular o circular y se pueden enrollar o plegar; y resistencias especiales, que tienen formas diversas según la aplicación específica.
- Según la forma que tienen: se pueden clasificar entre resistencias tubulares, que tienen forma cilíndrica y se pueden doblar o acodar según la necesidad; resistencias planas, que tienen forma rectangular o circular y se pueden enrollar o plegar; y resistencias especiales, que tienen formas diversas según la aplicación específica.
- Según la forma que tienen: se pueden clasificar entre resistencias tubulares, que tienen forma cilíndrica y se pueden doblar o acodar según la necesidad; resistencias planas, que tienen forma rectangular o circular y se pueden enrollar o plegar; y resistencias especiales, que tienen formas diversas según la aplicación específica.
- Según el modo de operación que emplean: se pueden dividir entre resistencias fijas, que tienen una potencia y una tensión constantes; y resistencias variables, que pueden modificar su potencia o su tensión según la demanda o el control externo.



Figura 2.5: Resistencia Calefactora con Ventilador

2.1.4. Acondicionadores de Señales

Los acondicionadores de señal de grado industrial desempeñan un papel fundamental al recoger la señal de un sensor y transformarla en una señal eléctrica de mayor nivel, adecuada para su procesamiento en sistemas de control. Estos dispositivos son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales que requieren la medición de diversos parámetros como temperatura, presión, nivel, velocidad, entre otros.

Existen distintas modalidades de acondicionadores de señal, cada una adaptada a diferentes tipos de señales de entrada y salida, funciones adicionales y niveles de aislamiento galvánico. Algunos ejemplos comunes incluyen:

- Convertidores de medida: transforman la señal de entrada en una señal analógica o digital estándar, como 0-10 V, 4-20 mA o RS-485.
- Amplificadores de separación: aíslan galvánicamente la señal de entrada y salida para evitar corrientes de compensación y perturbaciones electromagnéticas, garantizando la calidad de la

señal.

- Duplicadores de señales: separan galvánicamente la señal de entrada y la replican en múltiples salidas independientes, permitiendo su uso simultáneo en varios dispositivos receptores.
- Transductores de potencia: convierten la señal de entrada en una señal proporcional a la potencia eléctrica consumida o generada por un dispositivo o sistema.



Figura 2.6: Acondicionador de señales universal

Estos acondicionadores de señal encuentran aplicaciones en diversos ámbitos industriales, tales como:

- Control y supervisión de procesos industriales que requieren mediciones precisas y confiables de diferentes variables físicas.
- Protección y seguridad de personas, instalaciones y equipos frente a posibles fallas o sobretensiones en los circuitos eléctricos.

- Comunicación e integración de datos entre sensores, actuadores y sistemas de control mediante el uso de protocolos estándar o específicos.

2.2. Modelamiento e Identificación de plantas de transferencia de calor

2.2.1. Modelo No-Lineal

Para el modelamiento del equipo didáctico debemos plantear el balance de energía, balance que debe incluir el fenómeno físico de transferencia de calor mediante convección y radiación. Se plantea la ecuación:

$$mc_p \frac{dT}{dt} = UA(T_{AMB} - T) + \epsilon \rho A(T_{AMB}^4 - T^4) + \alpha Q \quad (2.1)$$

donde m es la masa, c_p es la constante de capacidad calorífica, T es la temperatura dentro del equipo, U es el coeficiente de transferencia de calor, A es el área del equipo, T_{AMB} es la temperatura del ambiente, ϵ es la constante de emisividad, ρ es la constante de Stefan-Boltzman, y Q es el calor generado por el equipo expresado en porcentaje. El parámetro α es el factor que convierte el calor generado de porcentaje a la potencia disipada por el calentador expresada en Watts.

Como se aprecia en la ecuación, el modelo es no-lineal representando de forma más próxima el comportamiento real del equipo.

Los parámetros de la ecuación serán identificados empleando un algoritmo genético conocido como Particle Swarm Optimization (PSO). [Heris(2015)].

El algoritmo PSO es un algoritmo empleado en problemas de optimización matemática. Tiene una fundamentación heurística específicamente del tipo genética permitiendo minimizar una función de costo mediante réplica de posibles valores de acuerdo a una condición dinámica de velocidad y posición. Como resultado de las múltiples iteraciones, el algoritmo encuentra un conjunto de valores de parámetros que permite minimizar la función de costo.

Además de identificar los parámetros de la ecuación diferencial no-lineal, también se identificará una función de transferencia de primer orden:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k_p}{\tau_p s + 1} \quad (2.2)$$

donde k_p es la ganancia estática de la planta, τ_p es la constante de tiempo de la planta didáctica. Para identificar la función de transferencia se emplea el método conocido como la curva de reacción, también conocida como la respuesta a la señal escalón [Bequette(2003)].

2.3. Controlador PID y Controlador por Modelo Interno

2.3.1. Controlador PID

El controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es un algoritmo de control ampliamente utilizado en sistemas de control automatizado. Su diseño se basa en combinar tres componentes principales: la acción proporcional, la acción integral y la acción derivativa. Cada una de estas acciones contribuye de manera específica al desempeño del controlador y permite obtener una respuesta óptima frente a diferentes perturbaciones y errores.

La acción proporcional (P) es la más simple de las tres y se basa en la proporcionalidad entre el error actual y la señal de control generada. El error se define como la diferencia entre el valor deseado o de referencia y el valor medido por el sistema. La salida proporcional es proporcional al error y se calcula multiplicando el error por una constante de ganancia proporcional (K_p). La ecuación que representa la acción proporcional es:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (2.3)$$

La acción integral (I) se utiliza para eliminar los errores residuales y proporcionar un control preciso a largo plazo. Esta acción toma en cuenta la integral acumulada del error a lo largo del tiempo. La salida integral se calcula multiplicando el error acumulado por una

constante de ganancia integral (K_i). La ecuación que representa la acción integral es:

$$u(t) = K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.4)$$

La acción derivativa (D) se utiliza para anticipar las tendencias del error y proporcionar una respuesta rápida frente a cambios bruscos en el sistema. Esta acción se basa en la derivada del error con respecto al tiempo. La salida derivativa se calcula multiplicando la derivada del error por una constante de ganancia derivativa (K_d). La ecuación que representa la acción derivativa es:

$$u(t) = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5)$$

El controlador PID combina estas tres acciones en una única señal de control, que se obtiene sumando las salidas proporcionales, integrales y derivativas. La ecuación general que representa el controlador PID es:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (2.6)$$

Donde:

- $u(t)$ es la señal de control generada en el instante de tiempo t .
- K_p es la constante de ganancia proporcional.
- K_i es la constante de ganancia integral.
- K_d es la constante de ganancia derivativa.
- $e(t)$ es el error en el instante de tiempo t .

- $\int_0^t e(\tau) d\tau$ representa la integral acumulada del error desde el inicio hasta el instante de tiempo t .
- $\frac{de(t)}{dt}$ es la derivada del error con respecto al tiempo en el instante de tiempo t .

El ajuste de los parámetros K_p , K_i y K_d del controlador PID es crucial para lograr un control eficiente y estable del sistema. Estos parámetros se determinan mediante técnicas de sintonización, como el método del lugar de las raíces, el método de Ziegler-Nichols o algoritmos de optimización. La selección adecuada de estos parámetros depende de las características del sistema, los requisitos de rendimiento y la respuesta deseada.

El controlador PID es ampliamente utilizado en una variedad de aplicaciones, desde el control de temperatura en sistemas de climatización hasta el control de velocidad en motores eléctricos. Su versatilidad y capacidad para adaptarse a diferentes sistemas lo convierten en una herramienta fundamental en el campo del control automático.

2.3.2. Controlador Por Modelo Interno

El controlador por modelo interno (CMI) es una técnica de control utilizada para lograr un seguimiento preciso de la referencia o setpoint en un sistema dinámico. Se basa en la idea de incorporar un modelo interno del sistema en el controlador para mejorar el rendimiento y la capacidad de rechazo de perturbaciones.

El controlador por modelo interno se compone de dos partes principales: el controlador proporcional y el modelo interno. La acción de control proporcional se encarga de ajustar la señal de control en función del error entre la salida del sistema y el valor deseado. La señal de control resultante se aplica tanto al sistema como al modelo interno.

El modelo interno se utiliza para predecir la respuesta del sistema en función de la señal de control aplicada. Esto se logra mediante una representación matemática del sistema que captura su comportamiento dinámico. La ecuación general del modelo interno puede expresarse como:

$$M(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (2.7)$$

donde

- $M(s)$ es la función de transferencia del modelo interno.
- $Y(s)$ es la transformada de Laplace de la salida del sistema.
- $U(s)$ es la transformada de Laplace de la señal de control.

El objetivo principal del modelo interno es generar una señal de control que minimice el error entre la salida deseada y la salida real del sistema. Para lograr esto, se utiliza la siguiente ecuación para el cálculo de la señal de control:

$$U(s) = \frac{R(s) - Y(s)}{M(s)} \quad (2.8)$$

donde

$R(s)$ es la transformada de Laplace de la referencia o setpoint deseado.

Además, el controlador por modelo interno puede incluir términos adicionales como la acción integral y derivativa para mejorar la respuesta y la estabilidad del sistema. Estos términos se agregan a la señal de control en función de la integral y la derivada del error, respectivamente. La ecuación general del controlador por modelo interno con términos PID puede expresarse como:

$$U(s) = K_p (R(s) - Y(s)) + K_i \frac{1}{s} (R(s) - Y(s)) ds + K_d s (R(s) - Y(s)) \quad (2.9)$$

donde K_p , K_i y K_d son las constantes de ganancia proporcional, integral y derivativa, respectivamente.

El controlador por modelo interno tiene varias ventajas, como una respuesta más rápida, un seguimiento de referencia preciso y una mejor capacidad de rechazo de perturbaciones. Sin embargo, su diseño y ajuste requieren un conocimiento detallado del sistema y su modelo interno.

Capítulo 3

3. DISEÑO DE LA PLANTA

3.1. Construcción del prototipo de sistema de transferencia de calor

Para la construcción del prototipo se usaron los siguientes elementos:

- Gabinete metálico.
- Termocupla tipo k.
- Resistencia calefactora con ventilador de 500W.
- Relé de estado solido.
- Transmisor universal PR4116

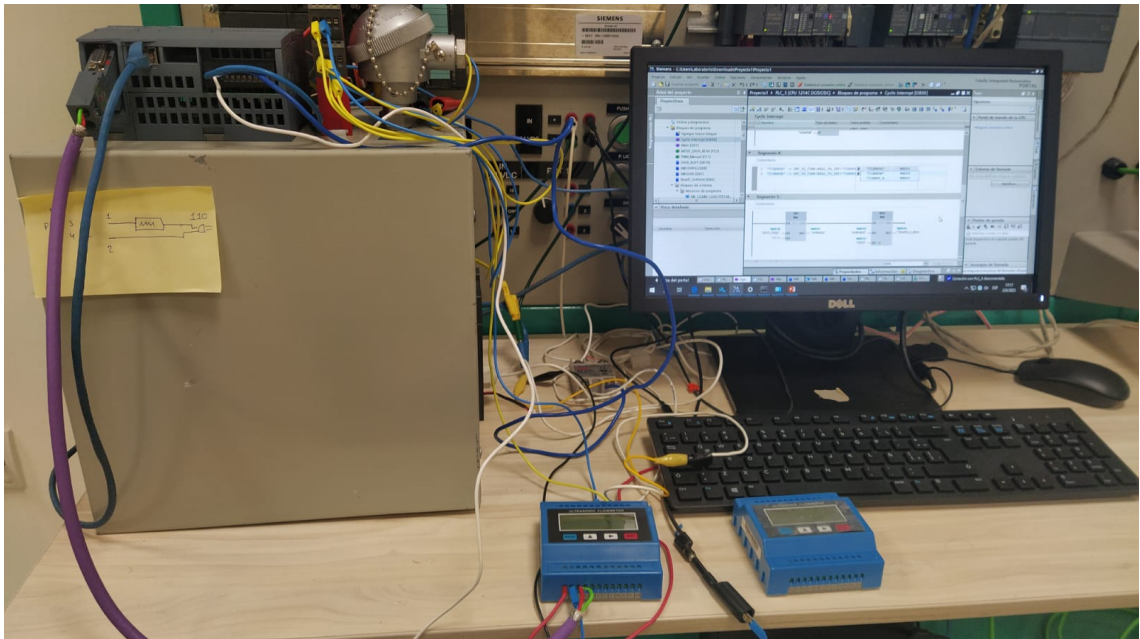


Figura 3.1: Prototipo junto a estación de trabajo

Estos elementos se ensamblaron de tal manera que se consiga un prototipo que permita calentar el interior, y aplicar perturbaciones externas, mientras que se puede medir la temperatura interna y la externa en todo momento.

La figura 3.1 muestra el prototipo construido. Dentro de la caja está colocado tanto el calefactor como la punta del sensor de temperatura. Externamente se encuentran el controlador PLC, el transmisor universal y parte del sensor de temperatura.

3.2. Modelado empleando ecuaciones diferenciales

En esta sección presentamos los valores de los parámetros de la ecuación diferencia no-lineal indicada en la sección 2.2.1.

Parameter	Value
m	0.564
c_p	80.58
U	14.188
A	0.04168
ϵ	0.1265
σ	$5.67 \cdot 10^{-8}$
α	0.75919
T_{AMB}	32+273.15
T_0	32+273.15

Tabla 3.1: Parámetros identificados con algoritmo PSO.

La tabla 3.1 presenta los valores identificados por el algoritmo PSO. Los valores obtenidos han sido identificados como óptimos considerando el menor error posible.

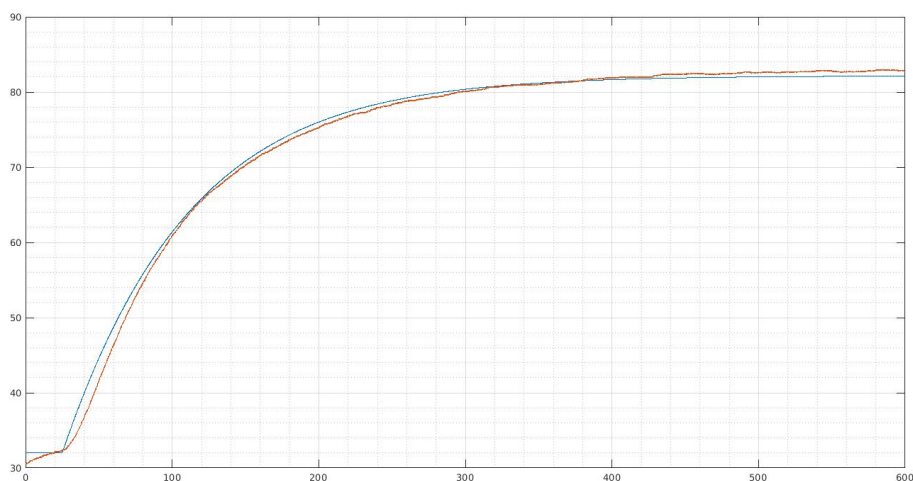


Figura 3.2: Respuesta al escalón del modelo no lineal

La figura 3.2 muestra la respuesta al escalón del modelo No-lineal comparada con los datos obtenidos de la planta real. Vemos un ajuste de las gráficas con un bajo error cuando se han identificado los parámetros con el algoritmo PSO.

3.3. Simulación del modelo no-lineal

El modelo no-lineal del proceso industrial corresponde a la ecuación diferencial no-lineal, dicha ecuación se ha implementado en el programa informático de simulación de sistemas dinámicos SIMULINK. La figura 3.3 muestra el diagrama de bloques en SIMULINK.

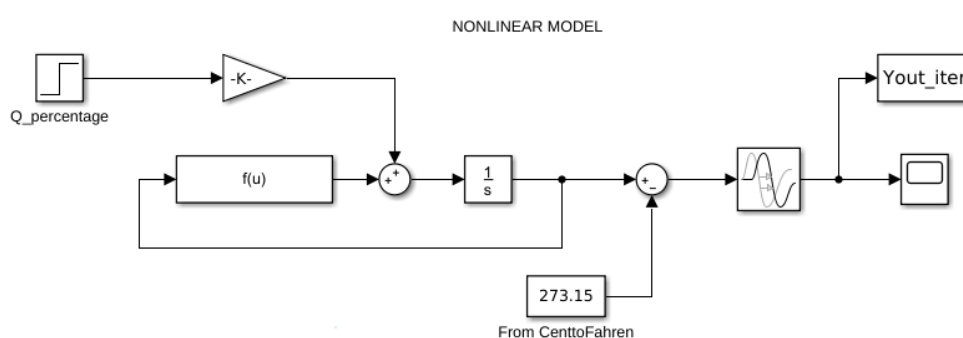


Figura 3.3: Implementación en Simulink del modelo no-lineal

A continuación se presenta en la figura 3.4 el comportamiento del modelo no-lineal ante una entrada escalón. La gráfica muestra la respuesta del modelo comparado con los datos reales.

3.4. Obtención de la función de transferencia

En base a los datos obtenidos se procedió a identificar un modelo de primer orden con retardo:

$$G(s) = \frac{k_p}{\tau_p s + 1} e^{-\theta s} \quad (3.1)$$

El método aplicado se conoce como la curva de reacción. La gráfica 3.5 muestra la identificación de los parámetros empleados en la

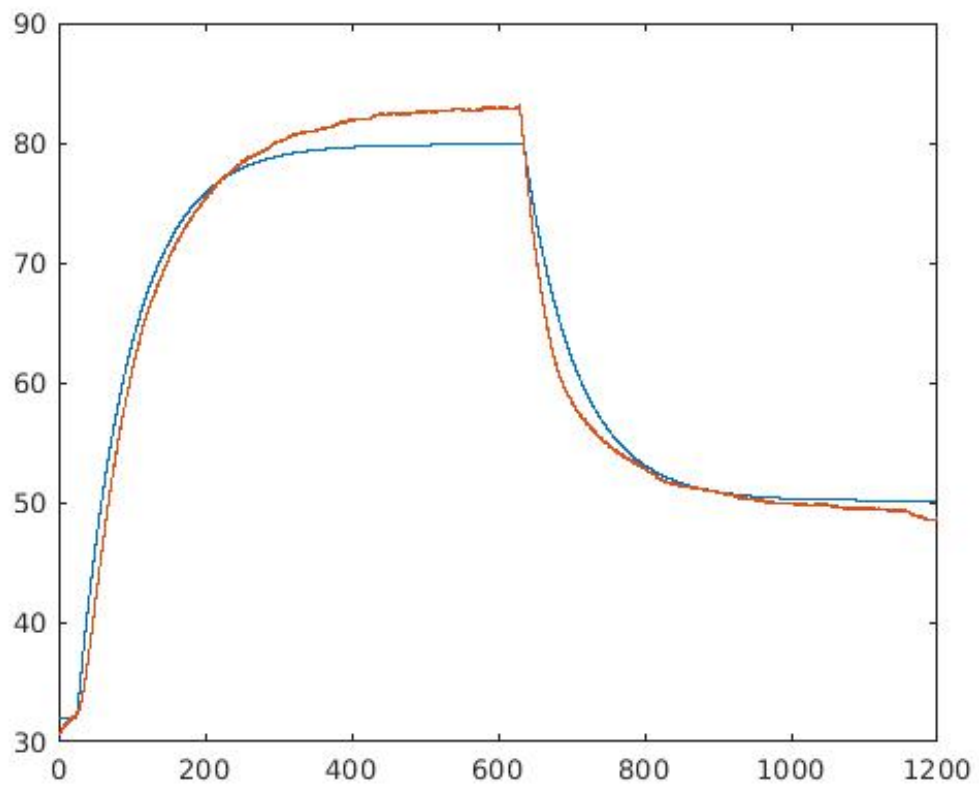


Figura 3.4: Validación del modelo no lineal

fórmula siguiendo la metodología de los dos puntos o también conocida como la curva de reacción.

Luego a partir de los valores obtenidos de la gráfica procedemos a encontrar los parámetros de la función de transferencia de la siguiente manera:

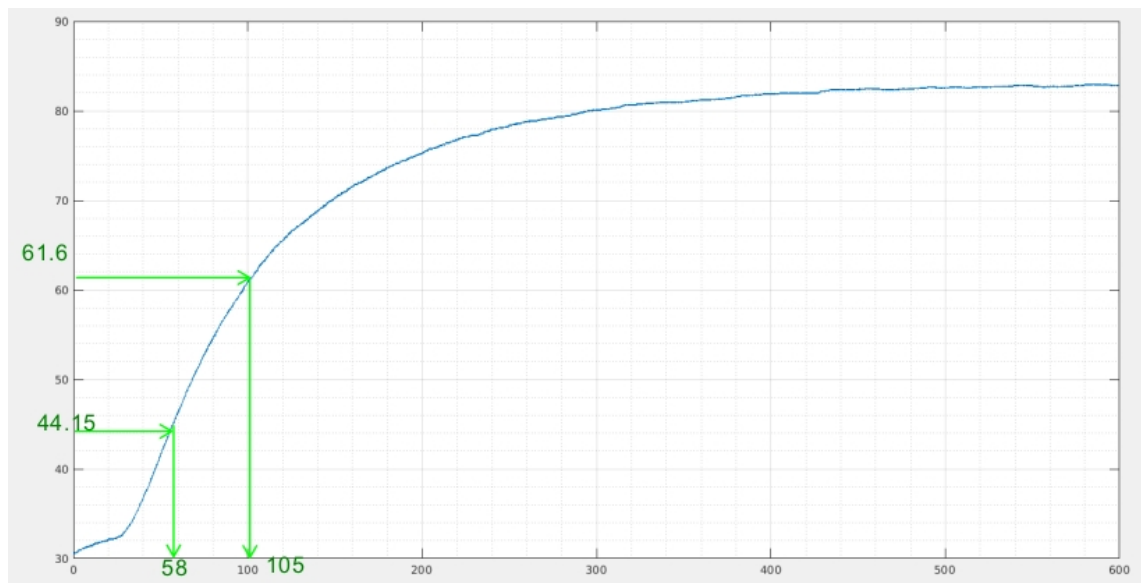


Figura 3.5: Método de los dos puntos para obtener la función de transferencia

$$\Delta Y = 83 - 33 = 50^{\circ}\text{C} \quad (3.2)$$

$$\Delta U = 40\% \quad (3.3)$$

$$K_p = \frac{\Delta Y}{\Delta U} = 1,25^{\circ}\text{C}/\% \quad (3.4)$$

$$t_{63,2\%} = 0,632 * 50 + 30 = 61,6 \quad (3.5)$$

$$t_{28,3\%} = 0,283 * 50 + 30 = 44,15 \quad (3.6)$$

$$\tau_p = 1,5(105s - 58s) = 70,5s \quad (3.7)$$

$$\theta = 105s - 70,5s = 34,5s \quad (3.8)$$

por tanto obtenemos la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{1,25}{70,5s + 1} e^{-34,5s} \quad (3.9)$$

Una vez obtenida la función de transferencia se procederá a diseñar los controladores.

Capítulo 4

4. DISEÑO DE LOS CONTROLADORES

4.1. Diseño del controlador PID

El controlador empleado en este trabajo corresponde a un controlador PID de estructura standard:

$$u(t) = k_c(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int e(t)dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (4.1)$$

Para el diseño del controlador PID se emplea el modelo en función de transferencia obtenido. La metodología a emplear en el diseño se conoce como el método de síntesis directa [Bequette(2003)]. De acuerdo a la metodología, los parámetros del controlador PID están dados por las siguientes ecuaciones:

$$k_c = 1/k_p = 1/1,25 \quad (4.2)$$

$$\tau_i = \tau_p = 70,5 \quad (4.3)$$

$$\tau_d = 0 \quad (4.4)$$

4.2. Diseño del controlador IMC

Para el diseño del controlador IMC debemos invertir el modelo de primer orden de la planta y luego compensar la función de transferencia del controlador en caso sea necesario agregando un filtro cuyo orden dependerá del orden del numerador de la función de transferencia del controlador $Q(s)$.

$$Q(s) = \frac{\tau_p s + 1}{k_p} \quad (4.5)$$

$$Q(s) = \left(\frac{1}{k_p}\right) \frac{\tau_p s + 1}{\lambda s + 1} \quad (4.6)$$

Una vez obtenido el controlador IMC procedemos a agregar la parte no invertible de la función de transferencia que corresponde al retardo, obteniendo finalmente el controlador IMC .

$$Q(s) = \left(\frac{1}{k_p}\right) \frac{\tau_p s + 1}{\lambda s + 1} e^{-\theta s} \quad (4.7)$$

El factor λ es el único parámetro a sintonizar en un controlador IMC. La velocidad de la respuesta en lazo cerrado depende del valor de λ . En el diagrama de bloques 4.1 se aprecia que el controlador

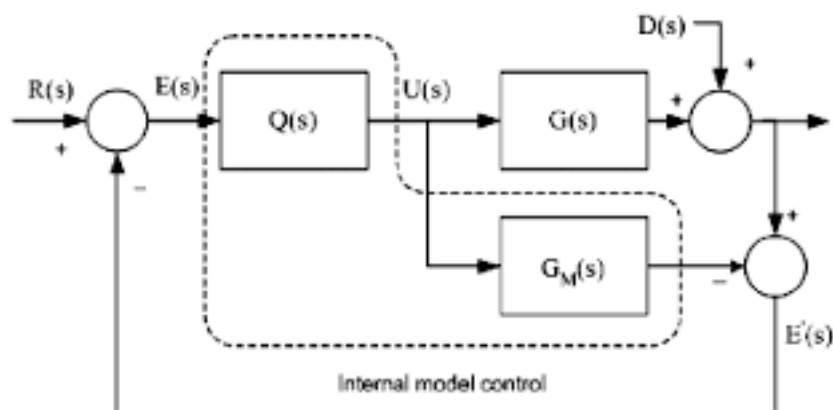


Figura 4.1: Esquema del controlador por modelo interno

por modelo interno está conformado por el controlador $Q(s)$ y por el modelo del proceso industrial $G_M(s)$. Mientras que el proceso industrial está representado por $G(s)$.

4.3. Simulación de los controladores en la planta identificada

4.3.1. Simulación Controlador PID

Para la simulación del controlador PID se usó el modelo mostrado en la siguiente figura:

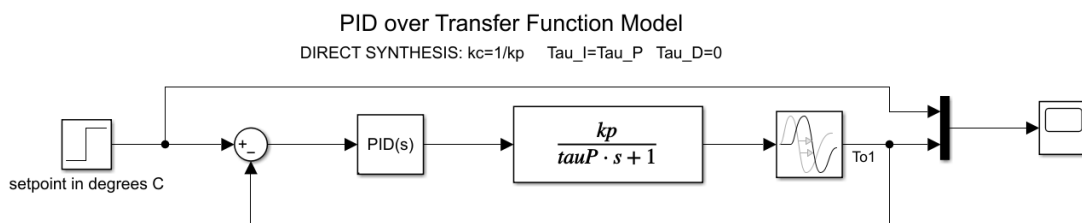


Figura 4.2: Modelo a lazo cerrado con control PID

Para la simulación se considero un tiempo de cambio de la señal

escalón de 50 segundos, y una temperatura de 50°C como setpoint, obteniendo la siguiente respuesta:

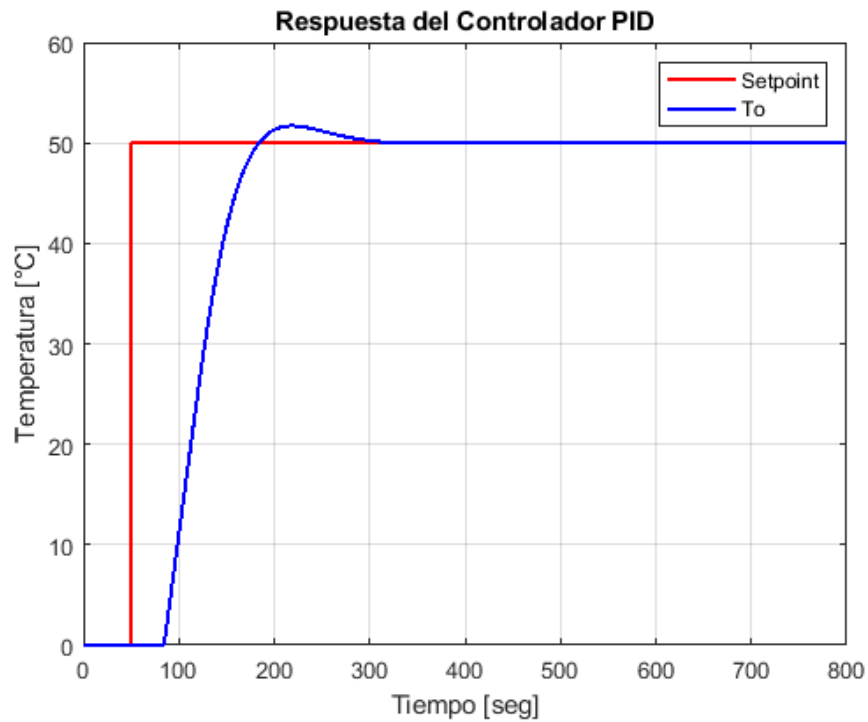


Figura 4.3: Respuesta a lazo cerrado con controlador PID

Se puede observar que con el controlador PID se obtiene un tiempo de estabilización de 250 segundos aproximadamente y un sobrenivel porcentual menor a 2.1 %.

4.3.2. Simulación Controlador IMC

Para realizar la simulación a lazo cerrado con el controlador por modelo interno se implementó el siguiente diagrama de Simulink.

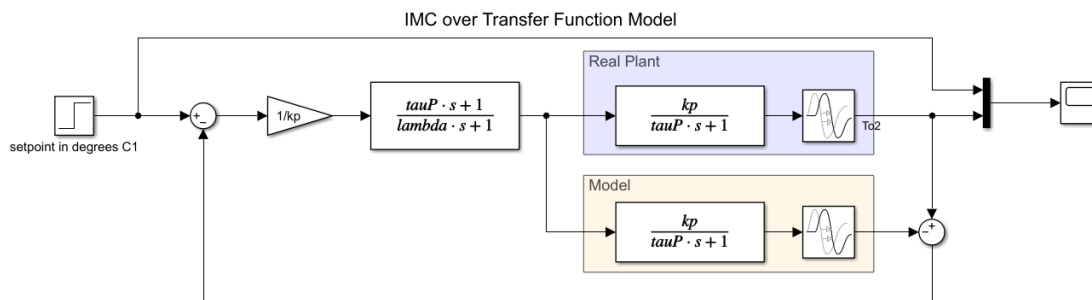


Figura 4.4: Modelo a lazo cerrado con control IMC

Para la simulación se considero un tiempo de cambio de la señal escalón de 50 segundos, y una temperatura de 50°C como setpoint, obteniendo la siguiente respuesta:

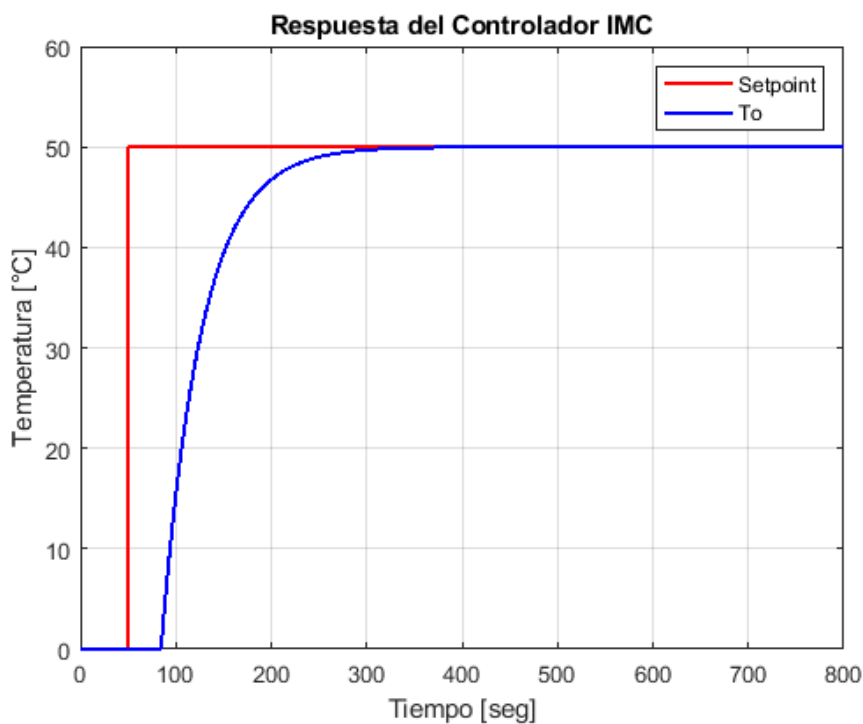


Figura 4.5: Respuesta a lazo cerrado con controlador IMC

Se puede observar que con el controlador IMC se obtiene un tiempo de estabilización de 250 segundo aproximadamente y sin presentar sobrenivel.

Capítulo 5

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

5.1. Respuesta de la planta ante la acción del controlador PID

Para comprobar el desempeño del controlador diseñado se realiza la prueba en el modelo de la planta No Lineal, considerando una perturbación externa en el tiempo 700 segundos, con una magnitud de 20°C, lo que correspondería a la temperatura ambiente, el modelo usado es el que se muestra a continuación:

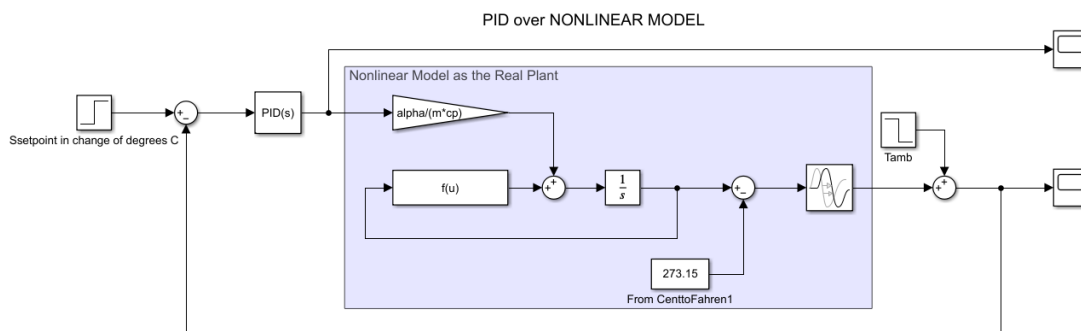


Figura 5.1: Modelo a lazo cerrado con control PID para el modelo No Lineal

Una vez simulado el sistema se obtuvo la siguiente respuesta en la planta:

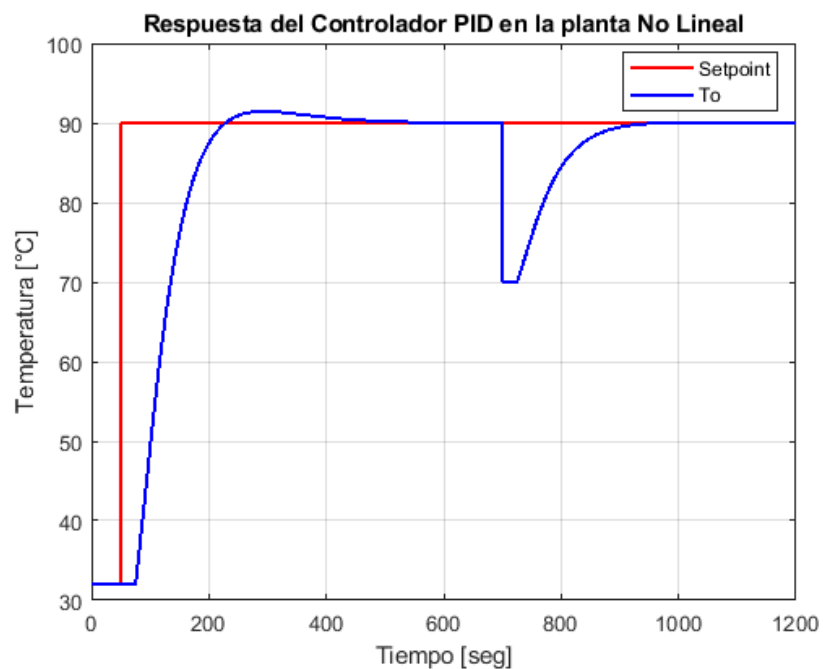


Figura 5.2: Respuesta de la planta No Lineal con el controlador PID

Como se puede observar el controlador mantiene la temperatura establecida en el setpoint incluso ante perturbaciones externas, donde se puede observar un tiempo de estabilización de alrededor de 350 segundos, y un sobre nivel porcentual de

2.58 % aproximadamente.

Por otro lado la acción de control queda dentro de los márgenes de acción de la señal PWM.

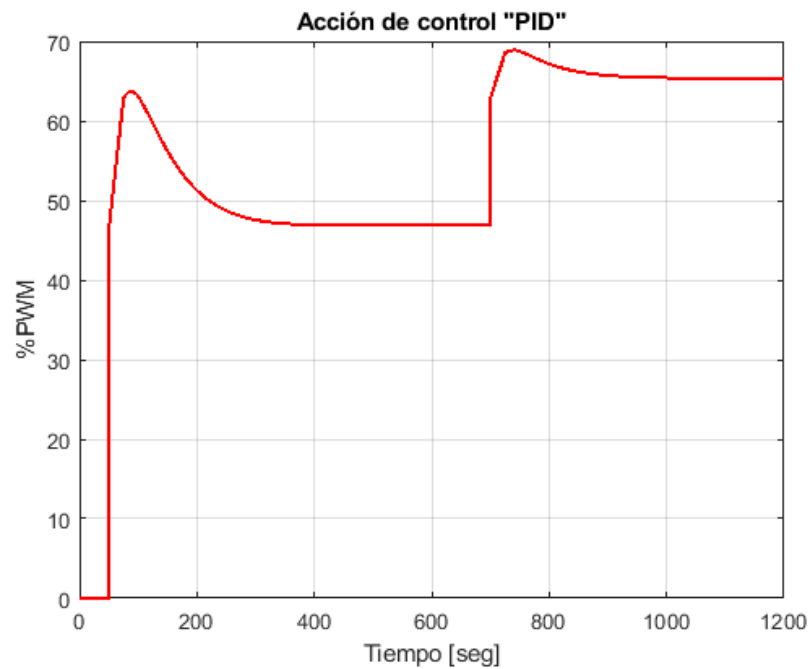


Figura 5.3: Respuesta de la planta No Lineal con el controlador PID

5.2. Respuesta de la planta ante la acción del controlador IMC

Para comprobar el desempeño del controlador IMC diseñado se realiza la prueba en el modelo de la planta No Lineal, considerando una perturbación externa en el tiempo 700 segundos, con una magnitud de 20 °C, lo que correspondería a la temperatura ambiente, el modelo usado es el que se muestra a continuación:

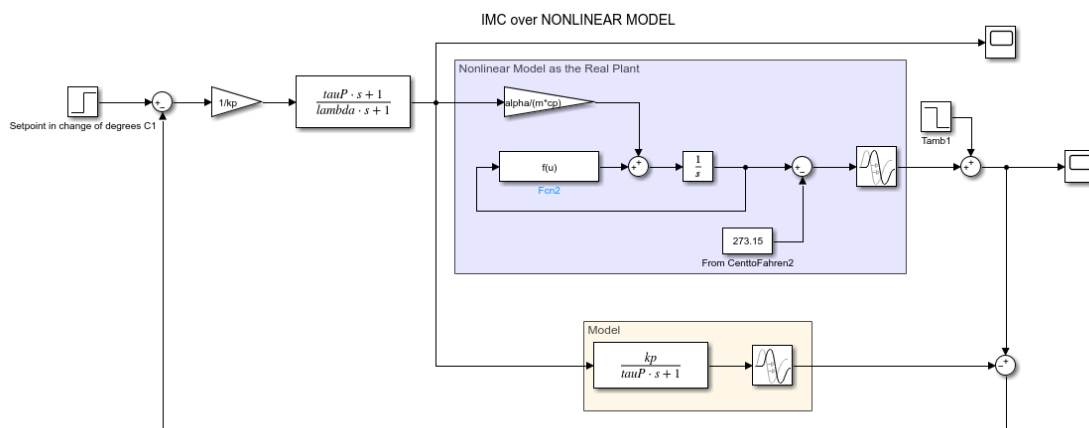


Figura 5.4: Modelo a lazo cerrado con control IMC para el modelo No Lineal

Una vez simulado el sistema se obtuvo la siguiente respuesta en la planta:

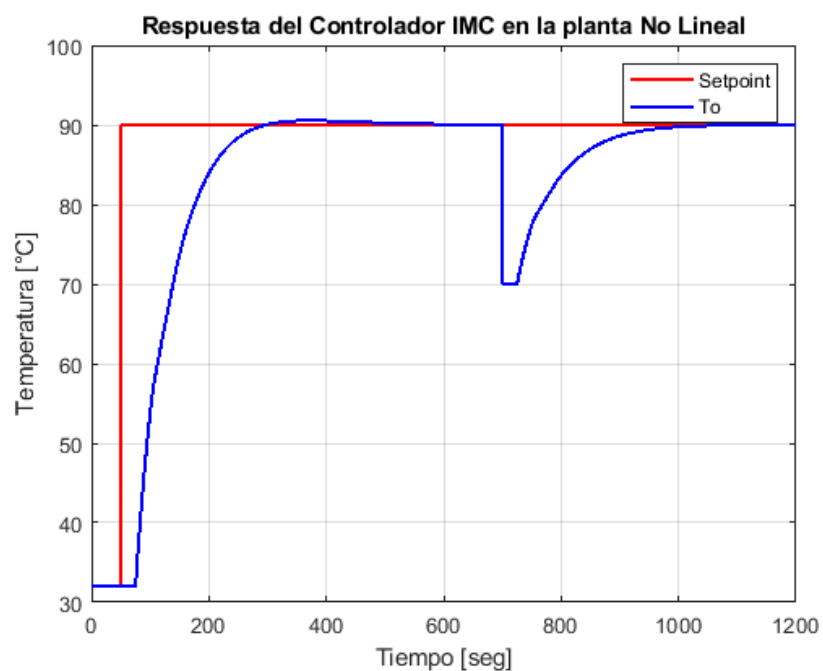


Figura 5.5: Respuesta de la planta No Lineal con el controlador IMC

Como se puede observar el controlador mantiene la temperatura establecida en el setpoint incluso ante perturbaciones externas, donde se puede observar un tiempo de estabilización de

alrededor de 350 segundos, y un sobre nivel porcentual de 1.08 % aproximadamente.

Por otro lado la acción de control queda dentro de los márgenes de acción de la señal PWM.

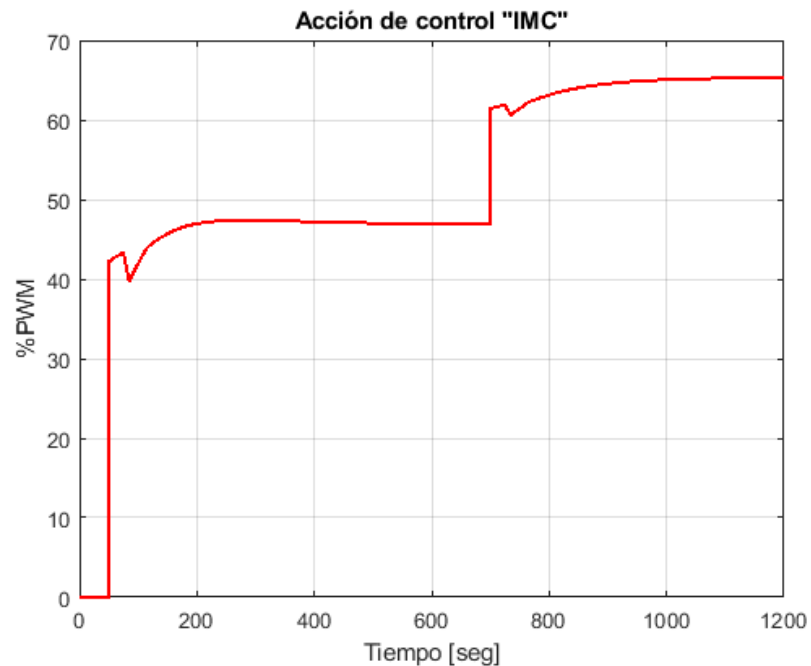


Figura 5.6: Respuesta de la planta No Lineal con el controlador IMC

5.3. Análisis comparativo del desempeño de los controladores

Realizando el análisis de los controladores se puede observar que en la respuesta de la planta ambos consiguen llegar al valor de la temperatura establecida en el setpoint, y reaccionar adecuadamente ante perturbaciones externas como se muestra en la figura a continuación:

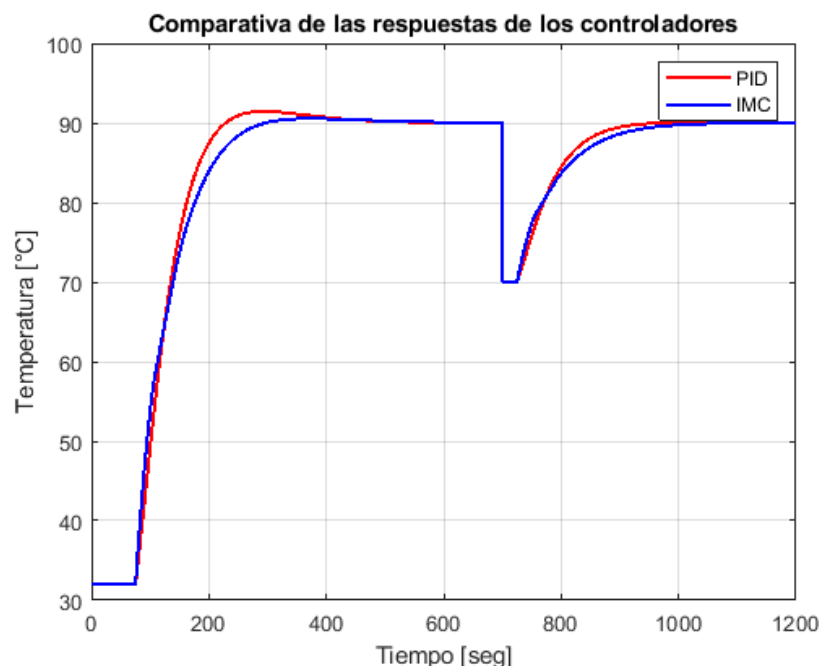


Figura 5.7: Comparativa de la respuesta de la Planta No Lineal

Se puede denotar que el controlador IMC tiene una respuesta más suave comparada con la respuesta del controlador PID, ya que se obtiene un menor porcentaje de sobre nivel y tiempos de respuesta similares.

Por otro lado en la acción de control se puede denotar que la acción de dada por el controlador IMC representa una menor carga para al accionador de la planta ya que su acción es mas suave y sin picos notables como en el caso del controlador PID.

5.3.1. Detalles con la implementación en PLC

La figura 5.9 muestra la implementación del controlador PID empleando un PLC S71200 de la firma comercial SIEMENS (por detalles ver [SIEMENS(2015)]). El controlador de SIEMENS se lo

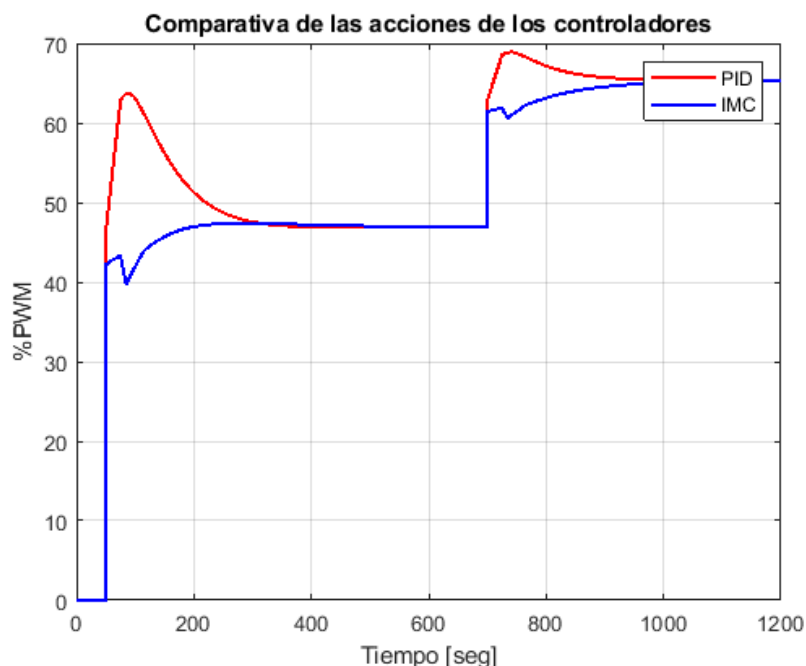


Figura 5.8: Comparativa de la acción de control

implementa a través de la plataforma TIA Portal. Específicamente, mediante el bloque funcional conocido como TIA Portal. La plataforma de SIEMENS cuenta con herramientas interesantes que dan soporte a la configuración del controlador. Un ejemplo es el asistente de configuración del bloque PID Compact.

Como se lo indicó en la sección del diseño del controlador por modelo interno es necesario contar con el modelo de la planta para poder implementar el controlador. Las figuras 5.10 y 5.11 muestran la implementación del modelo de la planta, modelo correspondiente a un sistema de primer orden con retardo.

La figura 5.12 nos muestra el comportamiento de la variable temperatura del equipo didáctico ante un cambio en la señal de referencia. La figura es presentada en la interfaz gráfica de TIA Portal empleando el asistente de configuración del bloque PID Compact.

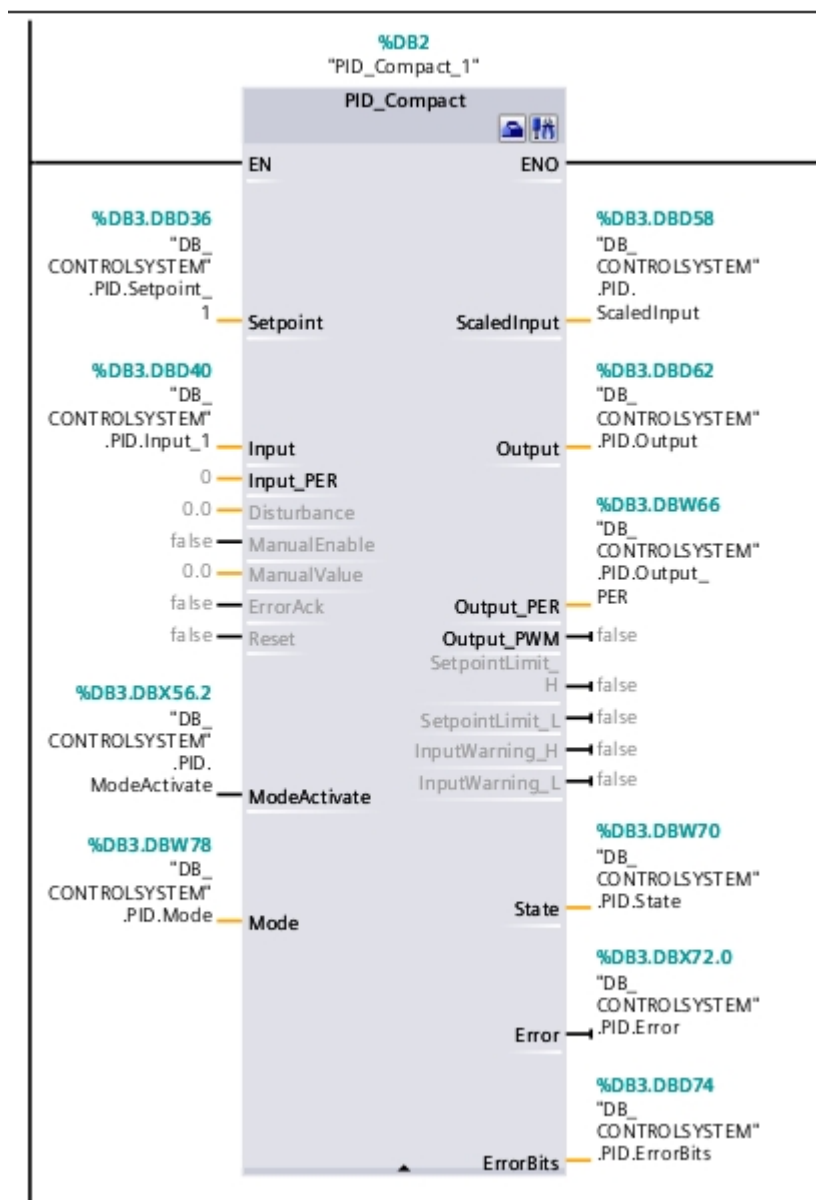


Figura 5.9: Uso del bloque funcional PID Compact en TIA Portal

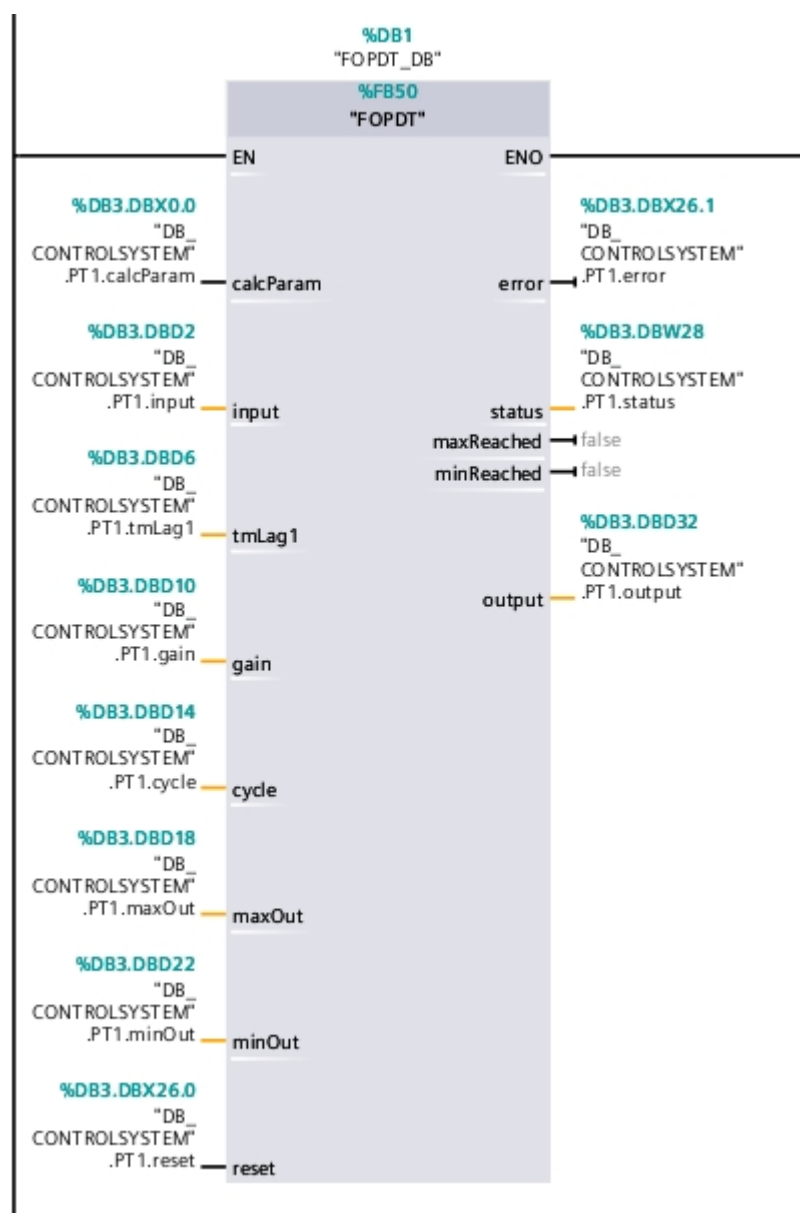


Figura 5.10: Modelo de primer orden utilizado para implementar el controlador IMC

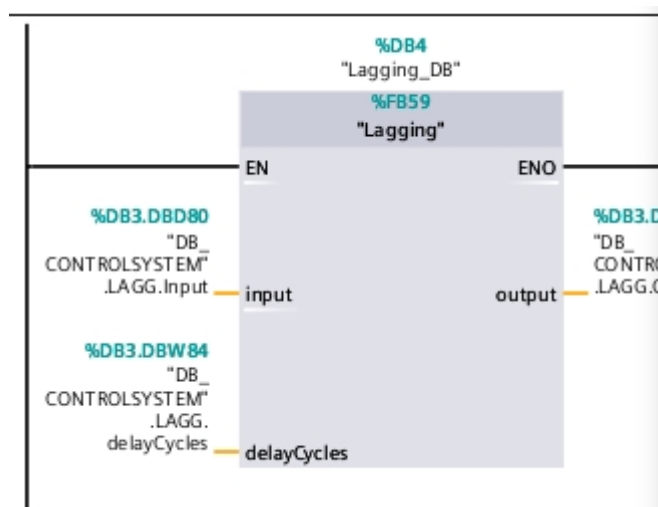


Figura 5.11: Retardo utilizado para implementar el controlador IMC

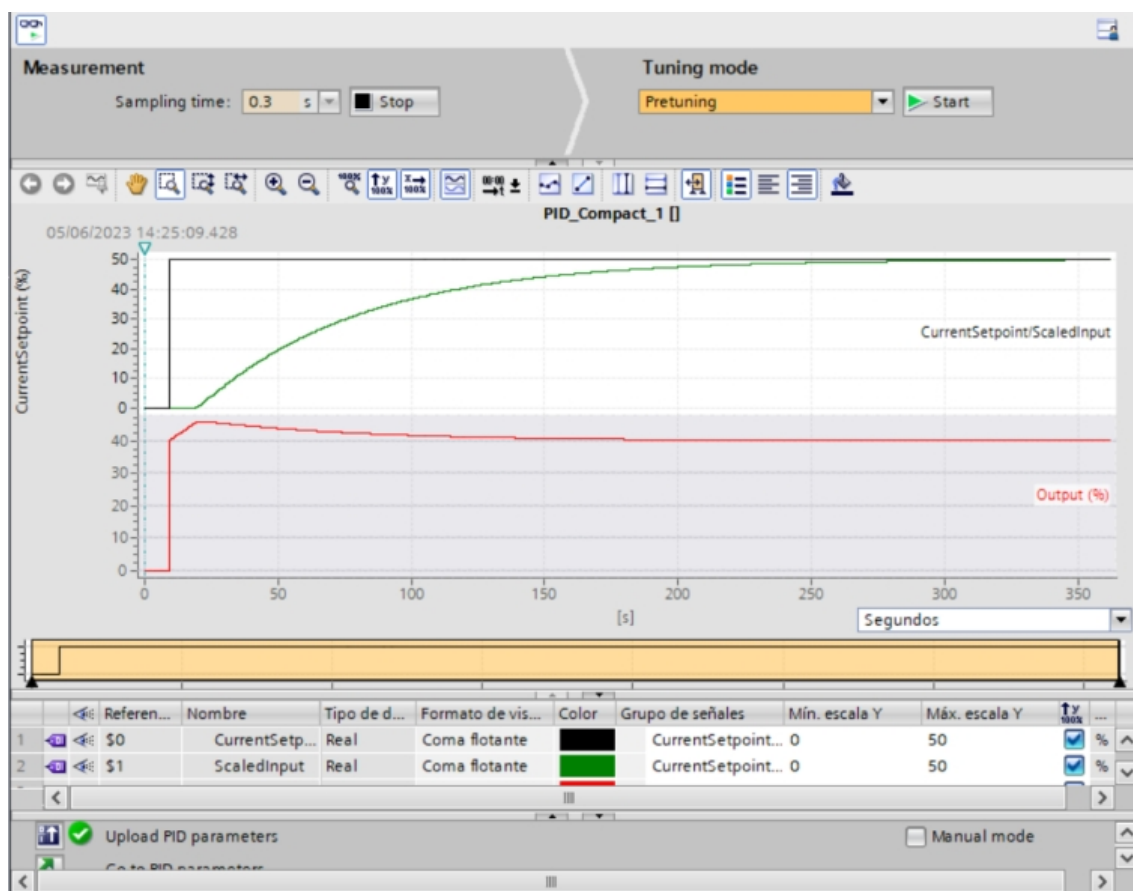


Figura 5.12: Respuesta de temperatura en TIA Portal

Conclusiones

CONCLUSIONES

- 1) Se logró diseñar un prototipo de calentador de grado industrial a pequeña escala, que permitirá a los estudiantes de la maestría realizar prácticas de identificación y diseño de controladores en un ambiente más realista.
- 2) En el presente trabajo también se pudo modelar satisfactoriamente la planta no lineal por medio de las ecuaciones diferenciales y dimensionar los valores por medio del algoritmo PSO .
- 3) Una vez simulado el modelo obtenido se pudo comprobar que representa el comportamiento real de la planta al compararla con su respuesta a lazo abierto.
- 4) Por otro lado se comprobó que la planta representa satisfactoriamente un modelo industrial, al poder diseñarle controladores de tipo PID e IMC que respondieron de forma adecuado al cambio de referencia y a las perturbaciones externas.
- 5) Se recomienda extender el número de practicas a futuro, considerando que la planta es un banco de trabajo apropiado para

incluso evaluar técnicas de control óptimas y predictivas.

Bibliografía

- [Bequette(2003)] B Wayne Bequette. *Process control: modeling, design, and simulation*. Prentice Hall, 2003.
- [Heris(2015)] Mostapha Kalami Heris. Particle swarm optimization in matlab, 2015. URL <https://yarpiz.com/50/ypea102-particle-swarm-optimization>.
- [Morita and Setozaki(2017)] Yusuke Morita and Norio Setozaki. Learning by tangible learning system in science class. In Masaaki Kurosu, editor, *Human-Computer Interaction. Interaction Contexts*, pages 341–352, Cham, 2017. Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-58077-7.
- [SIEMENS(2015)] SIEMENS. Function manual: Simatic s7-1200, s7-1500: Pid control, 2015. URL <https://support.industry.siemens.com/cs/ww/en/view/108210036>.