

Modernización del Sistema de Control de una Planta de Procesos Didáctica mediante PLC S7-1200 y Desarrollo de un Gemelo Digital para el Lazo de Temperatura

Alumno: Diego Rivera Campos

Profesor guía: Helmut Contreras

Abril 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Modernización del sistema de control de una planta...

Nombre del candidato(a): Diego Felipe Rivera Campos

Carrera / Grado: Ing. de Ejec. en Control e Instr. Industrial.

Campus: Concepción Departamento: Electrónica e Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Helmut Alexis Contreras Novoa, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

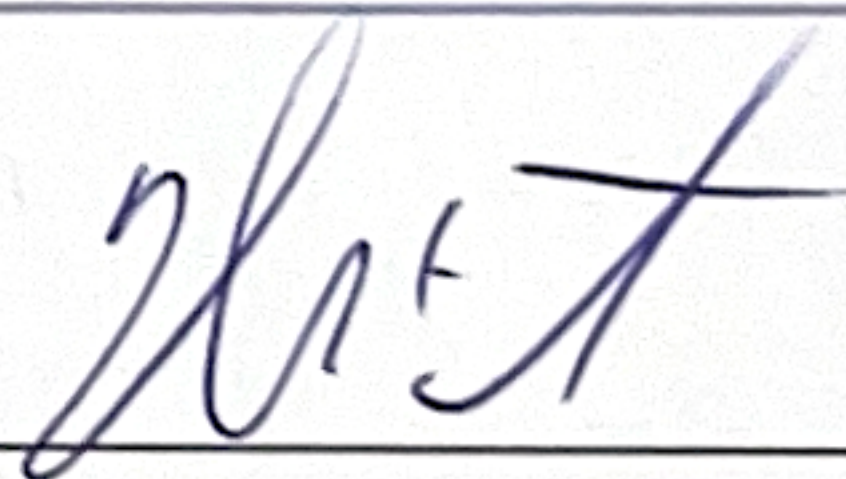
El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por (marcar una opción):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

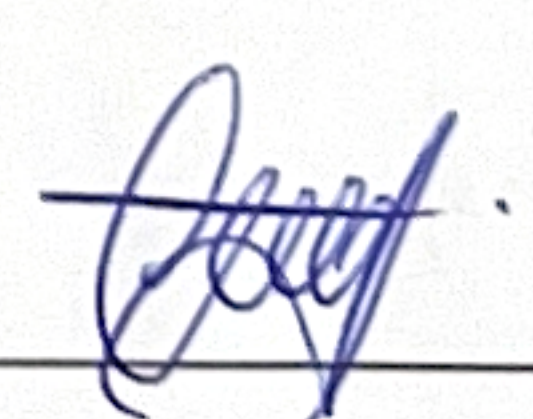
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

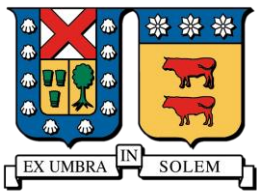
Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 16/04/2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

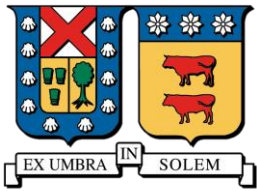
Fecha: 16/04/2026 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



Contenido

1.1 Contexto Académico:	3
1.2 Problemática de Capacidad:	4
1.3 Obsolescencia Tecnológica del Sistema de Control	5
1.4 Solución Propuesta:	6
CAPÍTULO 2: OBJETIVOS DEL PROYECTO	8
Objetivo General:	8
Objetivos Específicos:	8
Alcances.....	9
CAPÍTULO 3: IMPLEMENTACIÓN DE HARDWARE Y MODERNIZACIÓN	10
3.1 Reemplazo del Sistema de Control.....	10
3.2 Descripción de la Planta Didáctica De Lorenzo DL2314.....	11
3.3 Descripción del Proceso Industrial	13
3.4 Instrumentación del Sistema.....	14
3.4.1 Estanque.....	15
3.4.2 Bomba.....	16
3.4.3 Válvulas	17
3.4.4 Calefactor.....	18
3.4.5 Flujómetro	19
3.5 Configuración de Entradas y Salidas Analógicas	20
3.6 Sistema de Calentamiento del Proceso	21
CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL GEMELO DIGITAL DE TEMPERATURA	22
4.1 Modelado Dinámico del Proceso Térmico	22
4.2 Algoritmo de Simulación del Gemelo Digital	28
4.3 Estrategia de Control de Temperatura	31
4.4 Interfaz HMI y uso del Sistema.....	34
4.5 Arquitectura del Sistema Propuesto.....	35
CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y APLICACIÓN PEDAGÓGICA	37
5.1 Contraste de Resultados.....	37
5.2 Aplicación Pedagógica del Sistema.....	41
CAPÍTULO 6: TRABAJOS FUTUROS	43
6.1 Mejora del Lazo de Nivel.....	43
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES.....	45
REFERENCIAS	46



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

1.1 Contexto Académico:

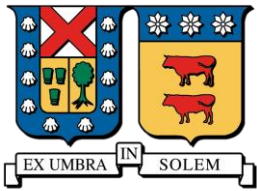
La formación de profesionales en el área de la automatización industrial requiere una combinación equilibrada entre fundamentos teóricos y experiencia práctica en sistemas reales de control. En particular, las carreras vinculadas a la ingeniería en instrumentación y control industrial demandan que los estudiantes comprendan el comportamiento dinámico de los procesos físicos, así como el funcionamiento de los sistemas de medición, adquisición de datos y control automático.

En este contexto, las plantas didácticas de procesos industriales cumplen un rol fundamental dentro de los laboratorios académicos, ya que permiten recrear a pequeña escala las condiciones de operación presentes en instalaciones industriales reales. Estas plataformas proporcionan un entorno seguro y controlado en el cual los estudiantes pueden experimentar con diferentes variables de proceso, analizar la respuesta dinámica de los sistemas y aplicar técnicas de control automático.

Dentro del laboratorio de procesos industriales se dispone de una planta didáctica del fabricante De Lorenzo, diseñada específicamente para el estudio de variables de proceso tales como temperatura, nivel, flujo y presión. Este tipo de sistema constituye una herramienta pedagógica esencial para el desarrollo de actividades prácticas asociadas a asignaturas relacionadas con instrumentación industrial, control de procesos y automatización.

El equipo permite a los estudiantes interactuar con componentes industriales reales, tales como sensores de temperatura, transmisores de señal, actuadores eléctricos y sistemas de control programables. De esta forma, los alumnos pueden comprender de manera directa cómo se integran los distintos elementos que componen un sistema de control industrial completo.

Uno de los experimentos más relevantes que se realizan en esta plataforma corresponde al control de temperatura de un recipiente que contiene agua, utilizando un sistema de calentamiento eléctrico controlado automáticamente. Este proceso permite analizar fenómenos de transferencia de calor, estudiar la dinámica térmica del sistema y aplicar algoritmos de control automático, particularmente controladores del tipo PID (Proporcional–Integral–Derivativo) (Ogata, 2010; Seborg et al., 2011).



1.2 Problemática de Capacidad:

A pesar de la importancia pedagógica que representa la planta didáctica De Lorenzo dentro del laboratorio de procesos industriales, su utilización presenta una limitación significativa asociada a la disponibilidad del equipo para el trabajo práctico de los estudiantes.

En el contexto actual del curso, el laboratorio dispone de un total de 18 estudiantes organizados en grupos de tres personas. Para el desarrollo de las actividades prácticas, se cuenta con seis puestos de trabajo equipados con PLC Siemens S7-1200, además de una única estación asociada a la planta física.

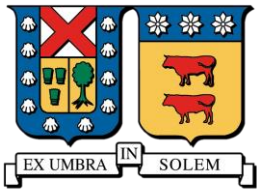
Esta situación implica que cada grupo dispone de un tiempo limitado para interactuar con el sistema físico, lo que reduce las oportunidades de experimentación y análisis del comportamiento del proceso. En muchos casos, los estudiantes deben realizar ajustes de control o análisis de resultados dentro de intervalos de tiempo reducidos, lo cual dificulta la comprensión profunda de la dinámica del sistema.

Entre las principales consecuencias de esta limitación se pueden mencionar:

- Reducción del tiempo efectivo de experimentación para cada grupo.
- Dificultad para realizar múltiples iteraciones de ajuste del controlador.
- Limitaciones para repetir experimentos y validar resultados.
- Dependencia exclusiva del sistema físico para probar estrategias de control.
- Posibilidad de generar errores operacionales debido a la presión de tiempo.

En el contexto de la enseñanza de control automático, la posibilidad de experimentar, ajustar parámetros y analizar la respuesta del sistema es fundamental para que los estudiantes puedan comprender adecuadamente los fenómenos involucrados.

En el marco de la problemática expuesta, se evidencia la necesidad de incorporar herramientas complementarias que permitan extender la experiencia de aprendizaje más allá del sistema físico, facilitando la experimentación, el análisis y la comprensión del comportamiento del proceso en condiciones controladas y repetibles. Dichas herramientas deben ser capaces de representar de manera fiel la dinámica del sistema real, de modo que el aprendizaje adquirido en entornos virtuales sea transferible a la operación de la planta física.



1.3 Obsolescencia Tecnológica del Sistema de Control

Además de la problemática asociada a la disponibilidad del equipo, la planta didáctica presenta una limitación crítica relacionada con la obsolescencia tecnológica de su sistema de control original.

La plataforma fue diseñada para operar mediante un software ejecutado sobre una plataforma basada en Windows 98, sistema que actualmente se encuentra fuera de soporte y completamente discontinuado. Esta situación genera una serie de restricciones tanto a nivel operativo como académico, ya que los sistemas computacionales modernos no garantizan compatibilidad con dicho entorno.

Como consecuencia, la operación del sistema de control depende de hardware específico y configuraciones difíciles de mantener, lo que incrementa el riesgo de fallas y limita la continuidad del uso del sistema en el laboratorio. Entre los principales problemas asociados se identifican:

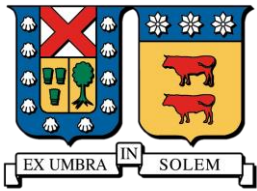
- Incompatibilidad con sistemas operativos actuales
- Dificultad para mantener hardware legado
- Ausencia de soporte técnico
- Riesgo de pérdida total del sistema ante fallas críticas

Si bien el sistema continúa siendo funcional desde el punto de vista físico e instrumental, la obsolescencia del sistema de control restringe significativamente su potencial como herramienta pedagógica.

No obstante, esta limitación también representa una oportunidad para redefinir el enfoque del sistema, transitando desde un esquema tradicional de control hacia un entorno moderno basado en tecnologías digitales.

En este contexto, la modernización mediante un PLC industrial no solo permite resolver los problemas de compatibilidad y mantenimiento, sino que habilita la incorporación de nuevas herramientas orientadas al aprendizaje avanzado, particularmente el desarrollo de un Gemelo Digital.

Desde una perspectiva académica, esta integración transforma el sistema en una herramienta de entrenamiento virtual, en la cual el estudiante no solo interactúa con el sistema físico, sino también con una representación digital capaz de replicar su comportamiento dinámico.



Este enfoque permite que los alumnos puedan:

- Configurar y ajustar controladores PID en un entorno virtual
- Analizar la respuesta del sistema ante distintas condiciones de operación
- Realizar múltiples iteraciones sin restricciones de tiempo ni riesgo para el equipo
- Transferir directamente el conocimiento adquirido hacia la planta física

Para que esta herramienta de entrenamiento sea efectiva, resulta fundamental asegurar la fidelidad del modelo digital. Esto implica que el comportamiento del Gemelo Digital debe representar con precisión la dinámica real del proceso, especialmente en aspectos como tiempos de respuesta, constantes de tiempo y comportamiento transitorio.

En este sentido, la modernización del sistema no se limita a un reemplazo tecnológico, sino que establece las bases para un entorno de aprendizaje donde la simulación y la realidad convergen. De esta manera, el sistema evoluciona desde un esquema de control obsoleto hacia una plataforma integrada de entrenamiento, validación y experimentación, alineada con los principios de la automatización industrial moderna y la Industria 4.0.

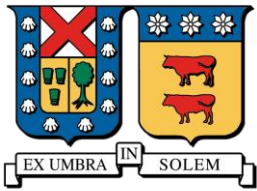
1.4 Solución Propuesta:

Con el objetivo de abordar las problemáticas de capacidad y obsolescencia tecnológica previamente identificadas, el presente proyecto propone la modernización del sistema de control de la planta didáctica De Lorenzo, incorporando tecnologías industriales actuales y un enfoque orientado al aprendizaje práctico de los estudiantes.

En una primera etapa, se plantea el reemplazo del sistema de control original por un Controlador Lógico Programable (PLC) Siemens S7-1200, junto con módulos de expansión analógica. Esta modernización permite eliminar la dependencia de software obsoleto, mejorar la confiabilidad operativa y habilitar la implementación de estrategias de control utilizadas en la industria actual.

Como complemento a esta modernización, se incorpora el desarrollo de un Gemelo Digital del lazo de temperatura, entendido como una representación virtual del sistema real capaz de reproducir su comportamiento dinámico a partir de modelos matemáticos y datos obtenidos desde la planta.

A diferencia de otras aproximaciones, el Gemelo Digital propuesto en este trabajo es implementado directamente en el PLC mediante un bloque de función (FB) programado en lenguaje SCL, ejecutándose en paralelo con el sistema físico y bajo las mismas condiciones de operación. Esto permite comparar de forma directa la respuesta del proceso real con la simulación generada por el modelo.



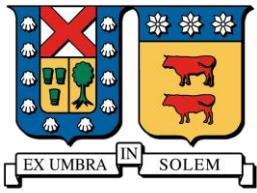
Desde el punto de vista pedagógico, este enfoque permite transformar el sistema en una herramienta de entrenamiento virtual. En este contexto, los estudiantes pueden interactuar con el Gemelo Digital a través de interfaces HMI (Siemens AG, 2021), configurando controladores PID, ajustando parámetros y observando en tiempo real la respuesta del sistema simulado.

Considerando la disponibilidad de múltiples estaciones de trabajo en el laboratorio, se propone una arquitectura en la cual el Gemelo Digital se ejecuta en el PLC asociado a la planta física, mientras que los distintos puestos de trabajo permiten a los estudiantes implementar estrategias de control que interactúan con el modelo. De esta forma, es posible realizar prácticas simultáneas sin intervenir directamente sobre el equipo real.

Para que esta herramienta sea efectiva desde el punto de vista formativo, resulta fundamental que el comportamiento del modelo sea representativo del sistema real. Por esta razón, el Gemelo Digital es ajustado a partir de datos experimentales obtenidos en la planta, permitiendo que la dinámica del modelo sea coherente con la observada en la práctica.

Gracias a esta calibración, los estudiantes pueden configurar un controlador PID en el entorno virtual y posteriormente aplicar esos mismos parámetros en la planta real, logrando una transferencia directa del aprendizaje.

En conjunto, la solución propuesta no solo moderniza la infraestructura de control, sino que también transforma el sistema en una plataforma integral de aprendizaje, donde se combinan el control real, la simulación y el análisis del comportamiento dinámico del proceso.



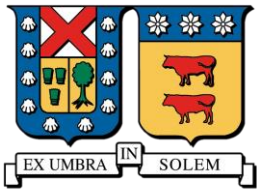
CAPÍTULO 2: OBJETIVOS DEL PROYECTO

Objetivo General:

Diseñar e implementar la fase inicial de una herramienta de entrenamiento virtual basada en un Gemelo Digital del lazo de temperatura de la planta De Lorenzo, ejecutado en un PLC Siemens S7-1200. El trabajo busca validar el comportamiento dinámico del modelo en comparación con el sistema físico, generando un avance funcional que permita la sintonización de controladores PID y establezca las bases técnicas para su posterior refinamiento y consolidación como herramienta académica integral.

Objetivos Específicos:

1. Modernizar el sistema de control de la planta De Lorenzo mediante la implementación de un PLC Siemens S7-1200, reemplazando el sistema original basado en software obsoleto.
2. Desarrollar un modelo matemático simplificado del proceso térmico que represente el comportamiento dinámico de la temperatura del sistema.
3. Implementar un Gemelo Digital del lazo de temperatura mediante un bloque de función (FB) programado en lenguaje SCL, ejecutado en el mismo PLC de la planta.
4. Diseñar la arquitectura de interacción entre el Gemelo Digital y múltiples estaciones de trabajo, permitiendo su uso como herramienta de entrenamiento para estudiantes.
5. Proponer el uso de una interfaz HMI que permita la visualización de variables del proceso y la configuración de controladores PID en un entorno de simulación.
6. Validar el comportamiento del modelo mediante la comparación entre la respuesta del sistema físico y la simulación generada por el Gemelo Digital.
7. Establecer una base funcional que permita el futuro ajuste del modelo y su expansión hacia una herramienta académica más completa.



Alcances

El presente trabajo aborda la modernización del sistema de control de la planta didáctica De Lorenzo mediante la incorporación de un Controlador Lógico Programable (PLC) Siemens S7-1200, reemplazando el sistema de control original basado en software obsoleto. Esta actualización permite establecer una plataforma de control acorde a los estándares actuales de la automatización industrial y habilita la implementación de nuevas estrategias de control y monitoreo del proceso.

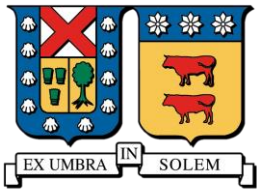
Dentro de este contexto, el alcance del proyecto contempla el desarrollo de una propuesta de Gemelo Digital aplicada al lazo de temperatura, implementada mediante un bloque de función (FB) programado en lenguaje SCL, el cual se ejecuta directamente en el mismo PLC que controla la planta física. Este enfoque permite que el modelo matemático del proceso opere en tiempo real, en paralelo con el sistema real, utilizando las mismas señales de control y condiciones de operación.

Asimismo, se considera el diseño conceptual de una arquitectura de entrenamiento orientada al uso académico del sistema, en la cual el Gemelo Digital puede ser utilizado por estudiantes a través de interfaces hombre-máquina (HMI). Estas interfaces permiten la interacción con el sistema mediante el ingreso de parámetros de control, tales como el setpoint y los parámetros de un controlador PID, así como la visualización del comportamiento de la temperatura simulada generada por el modelo.

Dado que el laboratorio dispone de múltiples estaciones de trabajo equipadas con PLC Siemens S7-1200, se propone una arquitectura en la cual el Gemelo Digital se ejecuta en el PLC asociado a la planta física, mientras que los PLC de los puestos de trabajo operan como estaciones de entrenamiento.

En este esquema, los estudiantes pueden implementar sus propios controladores PID, enviar señales de control hacia el modelo y recibir como respuesta la variable de proceso simulada, permitiendo así realizar prácticas de sintonización y análisis sin intervenir directamente sobre la planta real.

Desde el punto de vista funcional, el alcance incluye la validación inicial del modelo mediante la comparación entre la respuesta del sistema físico y la respuesta del Gemelo Digital, utilizando datos experimentales obtenidos desde la planta. Sin embargo, se establece explícitamente que el desarrollo corresponde a una fase inicial, orientada a demostrar la viabilidad de la implementación y a establecer las bases técnicas necesarias para futuras mejoras.



CAPÍTULO 3: IMPLEMENTACIÓN DE HARDWARE Y MODERNIZACIÓN

3.1 Reemplazo del Sistema de Control

El sistema de control original de la planta didáctica se encontraba basado en una plataforma computacional que operaba mediante software desarrollado para el sistema operativo Windows 98. Esta arquitectura implicaba una fuerte dependencia de hardware y software obsoleto, lo cual limitaba tanto la confiabilidad del sistema como la posibilidad de incorporar nuevas funcionalidades asociadas a tecnologías modernas de automatización.

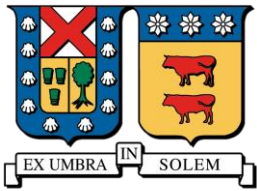
Al inicio del presente trabajo, la planta no contaba con un controlador lógico programable (PLC), operando exclusivamente a través del sistema antes descrito. Esta condición representaba una restricción importante desde el punto de vista académico, ya que impedía a los estudiantes interactuar con herramientas ampliamente utilizadas en entornos industriales reales, como lo son los sistemas de control basados en PLC.

Con el propósito de superar estas limitaciones, se llevó a cabo el reemplazo del sistema de control existente mediante la implementación de un PLC Siemens S7-1200, incorporando además un módulo de expansión analógica que permite la adquisición y generación de señales de proceso en formato industrial. Esta modernización implicó el desarrollo de un nuevo esquema de control, así como la implementación de un tablero eléctrico que integra los distintos componentes necesarios para la operación del sistema.

La incorporación del PLC permite desacoplar la operación de la planta respecto de tecnologías obsoletas, mejorando la confiabilidad del sistema y habilitando la ejecución de algoritmos de control en tiempo real. Asimismo, esta nueva arquitectura facilita la integración de herramientas avanzadas de análisis y control, tales como la implementación de controladores PID y el desarrollo de un Gemelo Digital del proceso térmico.

Desde una perspectiva pedagógica, este cambio resulta fundamental, ya que transforma la planta didáctica en una plataforma alineada con las prácticas actuales de la industria. De esta manera, los estudiantes pueden desarrollar competencias en programación, adquisición de datos y análisis de variables de proceso, interactuando con un sistema que refleja de forma más fiel las condiciones de operación de un entorno industrial real.

El PLC Siemens S7-1200 corresponde a un controlador compacto ampliamente utilizado en aplicaciones de automatización industrial (Siemens AG, 2020), caracterizado por su arquitectura modular, flexibilidad de programación y capacidad de comunicación con distintos dispositivos de campo.

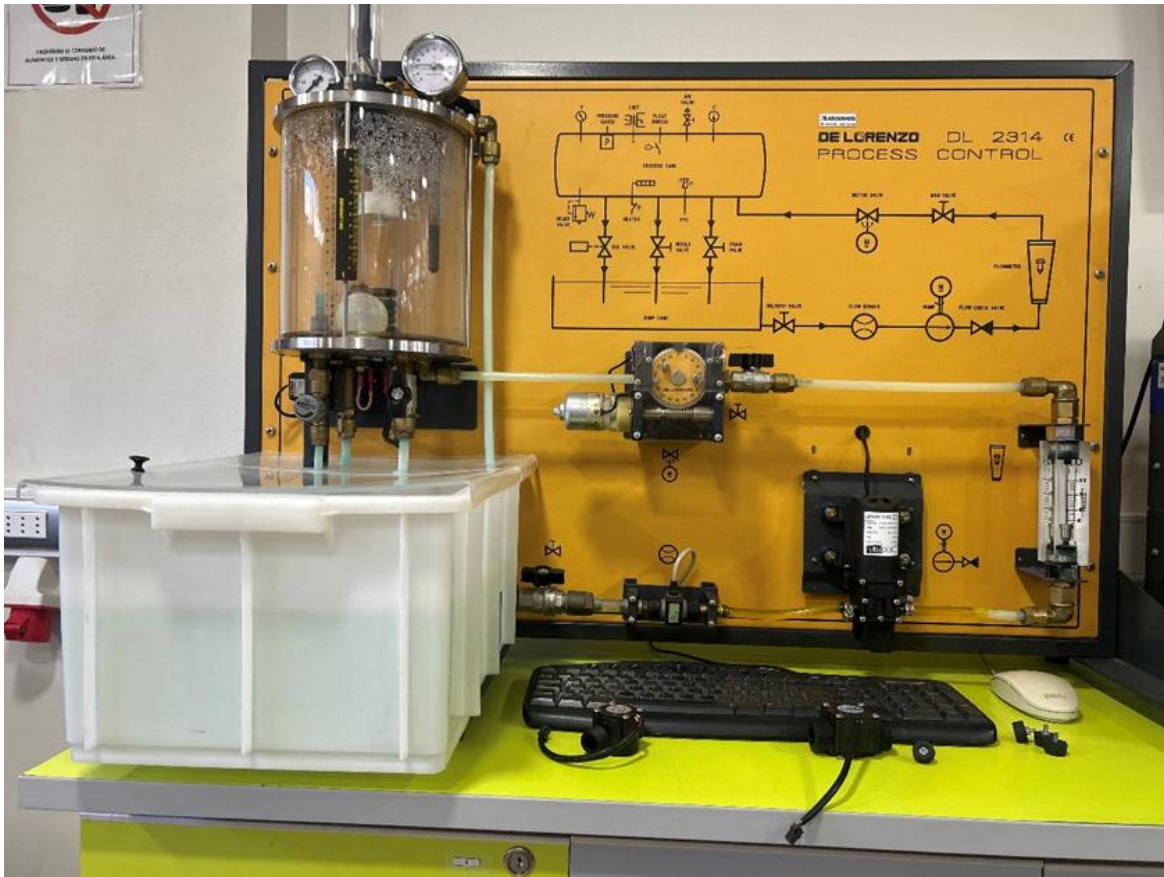


En este contexto, el PLC cumple un rol fundamental en la ejecución del proceso de control y en la vinculación entre la planta física y el entorno virtual asociado al Gemelo Digital, permitiendo no solo la operación del sistema, sino también su utilización como herramienta de apoyo en el proceso de enseñanza y aprendizaje.

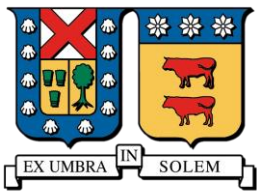
Entre las principales funciones que realiza el PLC dentro del sistema se encuentran:

- Adquisición de señales provenientes de sensores industriales
- Procesamiento de variables de proceso
- Ejecución de algoritmos de control automático
- Generación de señales de salida hacia actuadores
- Comunicación con interfaces HMI (Siemens AG, 2021)

3.2 Descripción de la Planta Didáctica De Lorenzo DL2314



La planta didáctica De Lorenzo DL2314 corresponde a un sistema de entrenamiento diseñado para el estudio, análisis e implementación de estrategias de control en procesos industriales a escala reducida. Este tipo de plataforma permite reproducir, de manera controlada y segura, el comportamiento de variables fundamentales presentes en la industria, tales como nivel (LT), temperatura (TT), flujo (FT) y presión (PT).

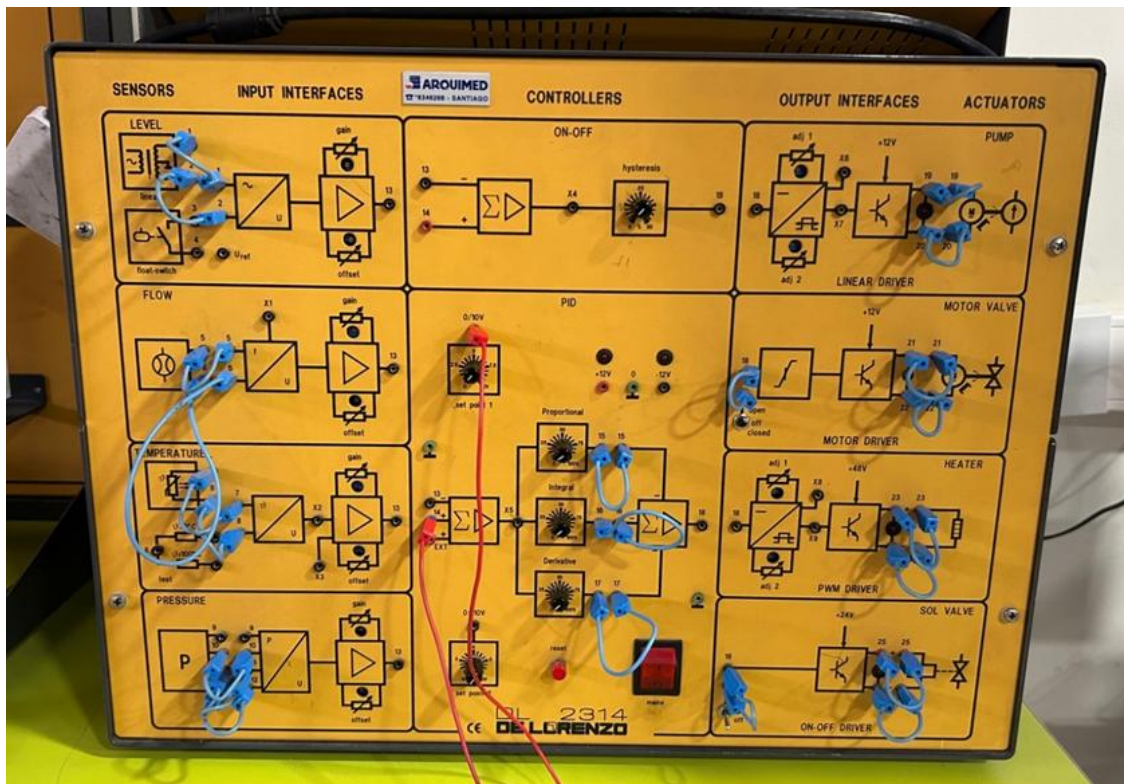


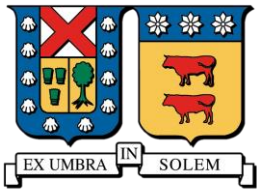
Desde un punto de vista académico, el sistema constituye una herramienta clave en la formación de profesionales del área de la automatización e instrumentación industrial, ya que permite vincular los conceptos teóricos de control automático con la experiencia práctica en sistemas reales. A diferencia de simulaciones puramente virtuales, la interacción con esta planta permite observar directamente los efectos físicos de las acciones de control, tales como variaciones de caudal, cambios de temperatura o modificaciones en el nivel de un estanque.

La estructura general del sistema se compone de dos subsistemas principales claramente diferenciados. Por una parte, se encuentra el módulo de proceso físico, en el cual se desarrollan los fenómenos hidráulicos y térmicos asociados al comportamiento del fluido, tales como variaciones de nivel, flujo, presión y temperatura.

Por otra parte, se dispone del panel de instrumentación y control, el cual actúa como interfaz entre el proceso físico y el sistema de control, permitiendo el acondicionamiento de señales, la interacción del usuario y la implementación de estrategias de control automático.

Este panel organiza de manera estructurada los bloques funcionales del sistema, facilitando la comprensión del flujo de señales desde la etapa de medición, pasando por el procesamiento en los controladores, hasta la acción final sobre los actuadores. De este modo, se proporciona una visión integral del funcionamiento de un lazo de control, permitiendo analizar en tiempo real la relación entre las variables del proceso y las acciones de control aplicadas.





3.3 Descripción del Proceso Industrial

El proceso representado corresponde a un sistema hidráulico y térmico cerrado, en el cual un fluido (generalmente agua) es impulsado, almacenado, calentado y regulado mediante distintos dispositivos de control.

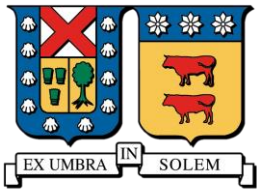
El funcionamiento general del sistema puede describirse como una secuencia de etapas interconectadas. En primer lugar, el fluido es impulsado por una bomba eléctrica desde una sección de almacenamiento hacia el estanque principal. Durante este trayecto, el fluido circula a través de tuberías donde pueden instalarse sensores de flujo (FT, Flow Transmitter) y presión (PT, Pressure Transmitter), permitiendo la medición de estas variables en tiempo real.

Una vez en el estanque, el fluido puede ser sometido a un proceso de calentamiento mediante un calefactor eléctrico sumergido, el cual incrementa su temperatura en función de la potencia suministrada. La temperatura del sistema es monitoreada mediante sensores del tipo transmisor de temperatura (TT, Temperature Transmitter). Paralelamente, el nivel del estanque varía dependiendo del balance entre el caudal de entrada impulsado por la bomba y el caudal de salida regulado mediante válvulas, siendo medido mediante transmisores de nivel (LT, Level Transmitter) (ISA, 2009).

El sistema incorpora válvulas motorizadas que permiten regular de forma continua el flujo del fluido, lo cual resulta fundamental para la implementación de estrategias de control proporcional o PID. Estas válvulas actúan como elementos finales de control, modificando directamente el comportamiento del proceso en función de las señales enviadas por el sistema de control, tales como controladores de temperatura (TIC, Temperature Indicating Controller) o de nivel (LIC, Level Indicating Controller), según la variable a regular.

Desde el punto de vista dinámico, el proceso presenta características típicas de sistemas industriales reales, tales como inercia, retardos y acoplamiento entre variables. Por ejemplo, los cambios en la potencia del calefactor no se reflejan de manera inmediata en la temperatura del fluido, sino que existe un retardo asociado a la transferencia de calor. De igual manera, las variaciones en el caudal afectan progresivamente el nivel del estanque, evidenciando un comportamiento dinámico acumulativo.

Este tipo de comportamiento permite modelar el sistema mediante ecuaciones diferenciales y analizar su respuesta ante diferentes condiciones de operación, lo cual resulta fundamental para el desarrollo de algoritmos de control y la validación de modelos matemáticos.



3.4 Instrumentación del Sistema

La planta didáctica DL2314 incorpora una serie de dispositivos de instrumentación que permiten medir, transmitir y actuar sobre las variables del proceso de manera continua. Estos elementos cumplen un rol fundamental dentro del sistema de control, ya que permiten la adquisición de información en tiempo real del estado del proceso y la posterior aplicación de acciones correctivas mediante actuadores, cerrando así el lazo de control automático.

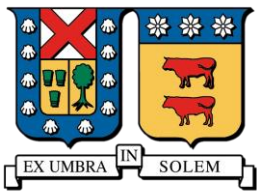
Desde el punto de vista funcional, la instrumentación constituye el vínculo directo entre el proceso físico y el sistema de control. Los sensores instalados en la planta son capaces de transformar magnitudes físicas, tales como nivel, temperatura, presión y caudal, en señales eléctricas proporcionales, las cuales pueden ser procesadas por el PLC. Estas señales, una vez adquiridas, permiten al sistema evaluar el comportamiento del proceso, detectar desviaciones respecto a los valores de referencia y generar respuestas adecuadas para mantener la estabilidad operativa.

La correcta selección, instalación y calibración de los instrumentos resulta esencial para garantizar la precisión de las mediciones, ya que cualquier error en la adquisición de datos puede traducirse en decisiones de control incorrectas (ISA, 2009).

En este sentido, la calidad de la instrumentación impacta directamente en el desempeño global del sistema de control, influyendo en variables como la estabilidad, el tiempo de respuesta y la eficiencia del proceso.

En el contexto de este proyecto, la instrumentación adquiere un rol aún más relevante con la incorporación del concepto de Gemelo Digital. Este permite replicar de manera virtual el comportamiento del proceso físico a partir de modelos matemáticos y de las señales reales captadas por los sensores. Gracias a esto, no solo es posible monitorear el estado actual del sistema, sino también comparar en tiempo real el comportamiento del proceso físico con su representación simulada.

El uso del Gemelo Digital introduce una nueva dimensión en el monitoreo de procesos, ya que permite anticipar comportamientos, validar estrategias de control y analizar el sistema sin necesidad de intervenir directamente sobre la planta física. Esto resulta especialmente útil en entornos educativos, donde múltiples usuarios requieren acceso al sistema, pero el recurso físico es limitado.



3.4.1 Estanque



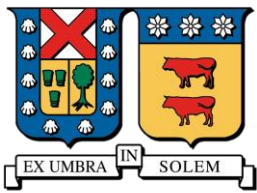
El estanque constituye el elemento central del proceso físico, siendo el componente donde se almacena el fluido y donde se desarrollan las principales dinámicas del sistema. Su comportamiento puede ser modelado como un sistema de acumulación, en el cual el nivel depende directamente del balance entre los flujos de entrada y salida.

Desde el punto de vista del control, el estanque representa un sistema con inercia, lo que implica que los cambios en las variables de proceso no se manifiestan de manera instantánea.

En este contexto, la variable de nivel es monitoreada mediante un transmisor de nivel (LT, Level Transmitter), cuya señal es utilizada por el sistema de control para evaluar el estado del proceso y aplicar las acciones correspondientes.

Adicionalmente, el estanque permite analizar el comportamiento transitorio del sistema frente a perturbaciones, tales como variaciones en el caudal de entrada o cambios en la apertura de las válvulas de salida. Estas perturbaciones generan respuestas dinámicas que pueden ser observadas y evaluadas en términos de estabilidad, tiempo de establecimiento y posible sobreimpulso.

Debido a estas características, el estanque se convierte en un elemento ideal para la implementación y estudio de estrategias de control automático, permitiendo ajustar parámetros de control y evaluar su impacto en la regulación del nivel. En particular, es posible implementar esquemas de control mediante controladores de nivel (LIC, Level Indicating Controller), los cuales permiten mantener la variable dentro de rangos deseados frente a distintas condiciones de operación.



3.4.2 Bomba

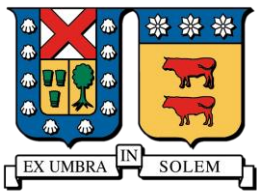


La bomba mostrada en la imagen corresponde a una bomba eléctrica de pequeña potencia, diseñada para aplicaciones didácticas y de laboratorio, cuyo objetivo principal es impulsar el fluido a través del circuito hidráulico. Este tipo de bomba reproduce el comportamiento básico de las bombas utilizadas en sistemas industriales reales, permitiendo el estudio práctico del transporte de fluidos y su interacción con variables de proceso como nivel (LT, Level Transmitter), presión (PT, Pressure Transmitter) y flujo (FT, Flow Transmitter).

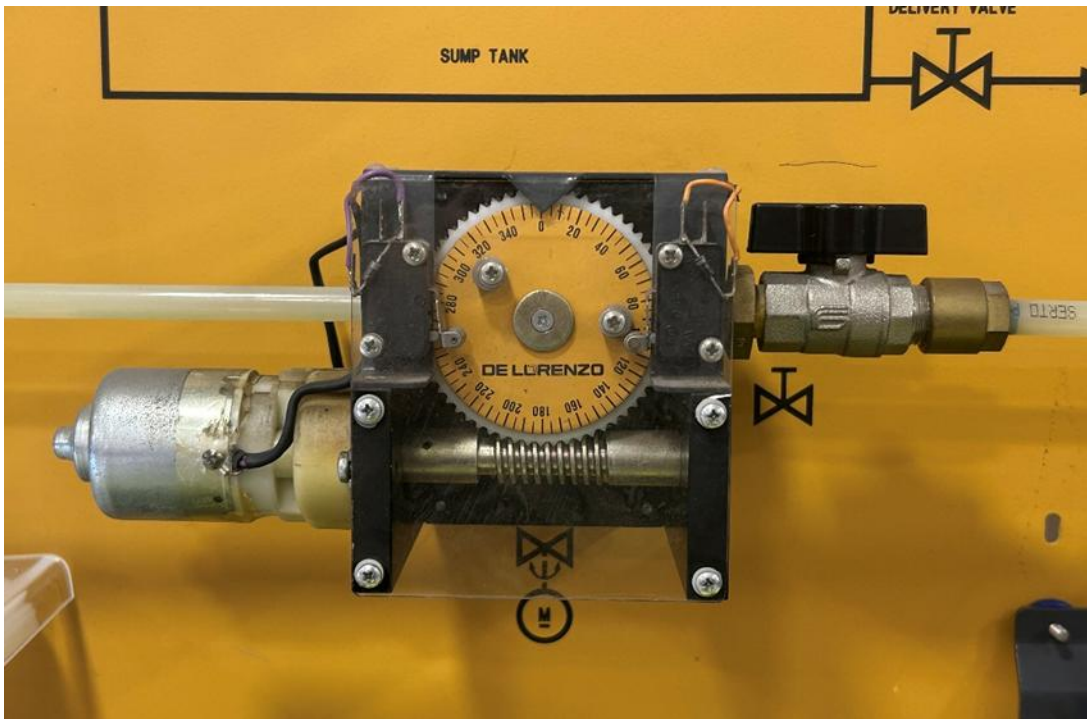
Desde el punto de vista funcional, la bomba actúa como el elemento generador de energía hidráulica del sistema. Al activarse, transforma la energía eléctrica suministrada al motor en energía mecánica, la cual es transferida al fluido en forma de incremento de presión y caudal. Esta acción permite llenar el estanque, mantener la circulación del fluido y generar las condiciones necesarias para el estudio de los distintos lazos de control.

En términos de control, la operación de la bomba puede ser supervisada a través de las variables de proceso medidas en el sistema, permitiendo analizar cómo las variaciones en el caudal impulsado afectan el comportamiento dinámico del nivel y la presión del sistema. De esta manera, la bomba no solo cumple una función operativa, sino que también permite estudiar la interacción entre variables dentro de un proceso dinámico.

En este sentido, su integración dentro de la planta didáctica facilita el análisis de fenómenos propios de sistemas hidráulicos, constituyendo un elemento fundamental para la comprensión del comportamiento del proceso y el desarrollo de estrategias de control en entornos educativos.



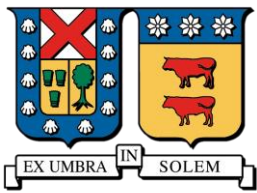
3.4.3 Válvulas



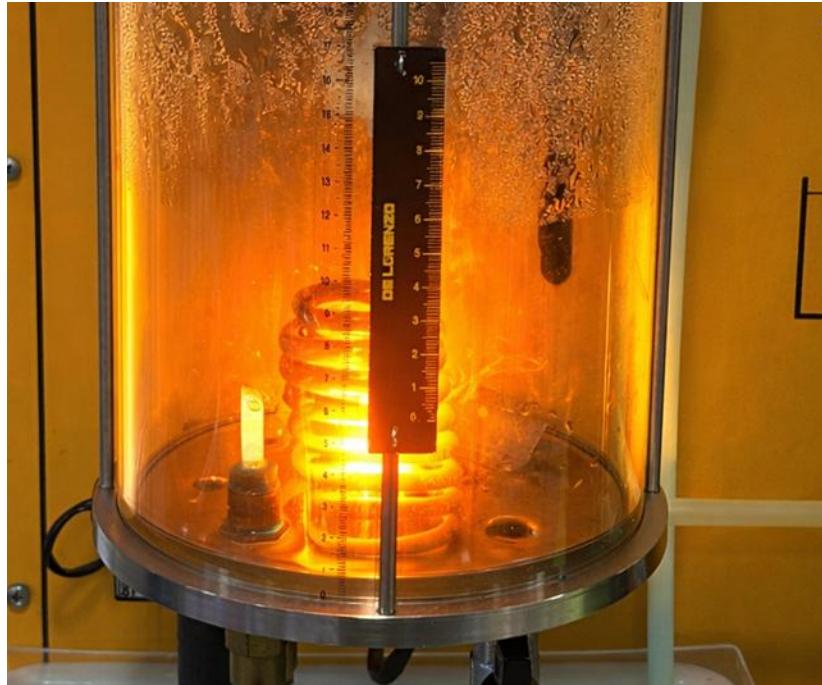
La válvula mostrada en la imagen corresponde a una válvula motorizada de regulación continua, instalada en la línea hidráulica de la planta didáctica De Lorenzo DL2314. Este tipo de válvula regula el paso del fluido dentro del circuito, actuando directamente sobre variables de proceso como el flujo (FT, Flow Transmitter) y la presión (PT, Pressure Transmitter), y de manera indirecta sobre el nivel del estanque (LT, Level Transmitter).

A diferencia de una válvula manual o una electroválvula ON/OFF, esta válvula permite una apertura variable, lo que la convierte en un elemento final de control adecuado para la implementación de estrategias de control proporcional o PID.

Su funcionamiento se basa en la conversión de una señal eléctrica proveniente del sistema de control en un movimiento mecánico, el cual ajusta de forma continua la posición del obturador, permitiendo regular la sección de paso del fluido y, en consecuencia, el comportamiento del proceso.



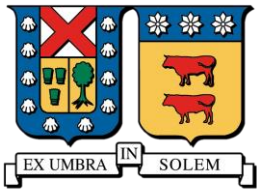
3.4.4 Calefactor



El calentador mostrado en la imagen corresponde a un elemento calefactor eléctrico sumergido, instalado en el interior del estanque principal del sistema. Su función es elevar y regular la temperatura del fluido, permitiendo el estudio práctico de procesos térmicos y la implementación de lazos de control de temperatura en tiempo real.

El dispositivo está compuesto por una resistencia eléctrica encapsulada, diseñada para operar de forma segura en contacto directo con el fluido. Su funcionamiento se basa en el efecto Joule, mediante el cual la energía eléctrica se transforma en calor al circular corriente a través de un material resistivo.

La temperatura del sistema es monitoreada mediante un transmisor de temperatura (TT, Temperature Transmitter), cuya señal es utilizada por el sistema de control para regular la potencia del calefactor, típicamente a través de estrategias de control PID. De esta forma, el calentador se constituye como el principal elemento actuador en el lazo de control de temperatura, siendo fundamental para el análisis y estudio de la dinámica térmica del proceso.



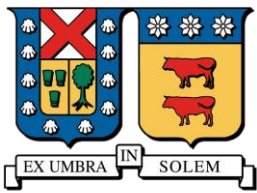
3.4.5 Flujómetro



El dispositivo mostrado en la imagen corresponde a un flujómetro electrónico en línea, instalado directamente en la tubería del circuito hidráulico de la planta. Su función principal es medir el caudal volumétrico del fluido que circula por el sistema, entregando una señal eléctrica proporcional que puede ser utilizada por el sistema de control para fines de monitoreo, regulación y análisis del comportamiento dinámico del proceso.

En un sistema de control de procesos industriales, el caudal constituye una variable fundamental, ya que determina la velocidad de llenado del estanque, influye en la presión interna del circuito y condiciona la dinámica térmica del sistema. Esta variable es medida mediante un transmisor de flujo (FT, Flow Transmitter), cuya señal permite evaluar en tiempo real el comportamiento del proceso.

El flujómetro utilizado corresponde a un sensor electrónico tipo turbina, cuyo principio de funcionamiento se basa en la rotación de un elemento interno impulsado por el paso del fluido. La velocidad de giro es proporcional al caudal, siendo detectada por un sensor electrónico que convierte esta información en una señal eléctrica, la cual es enviada al sistema de control para su procesamiento en el PLC.



3.5 Configuración de Entradas y Salidas Analógicas

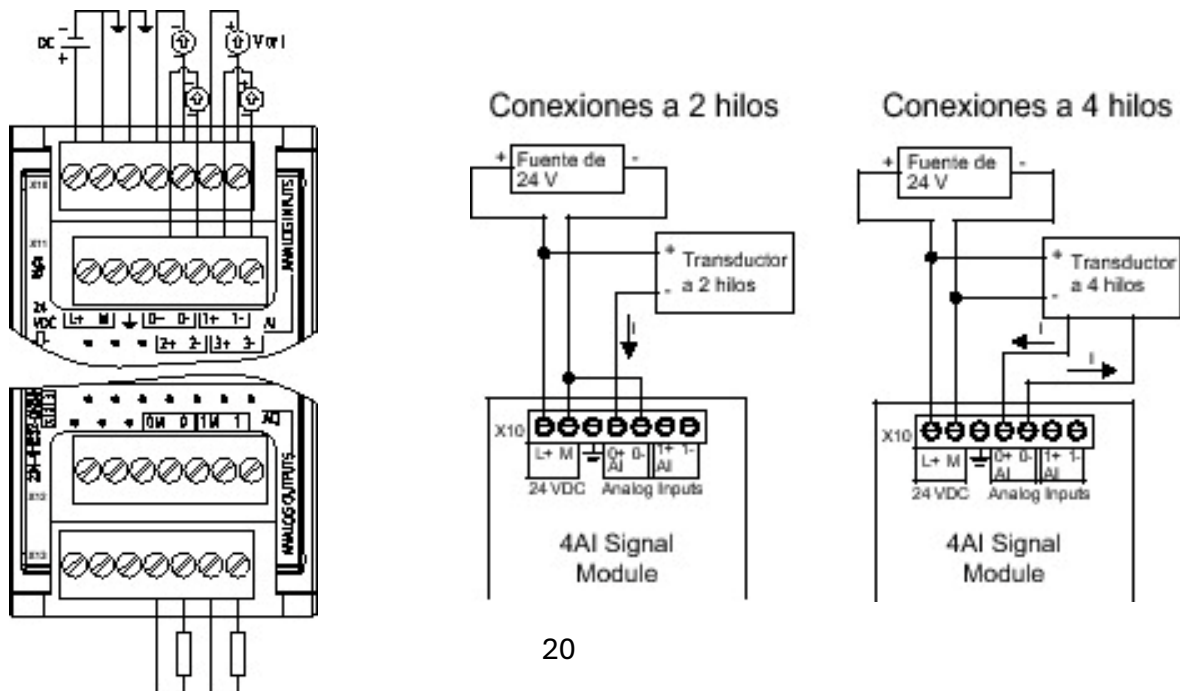
El módulo SM1234 dispone de múltiples canales de entrada y salida analógica, permitiendo la integración de distintos instrumentos dentro del sistema de control basado en PLC.

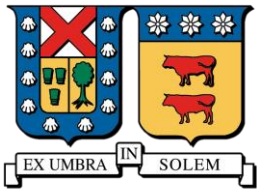
En el caso de la planta didáctica, la medición de la variable de temperatura se realiza mediante un sensor tipo RTD PT100, cuya señal es acondicionada a través de un transmisor de temperatura (TT, Temperature Transmitter). En esta planta, las señales provenientes de los transmisores se acondicionan para obtener salidas analógicas de 0 a 10 VDC, compatibles con las entradas analógicas del sistema de adquisición y control (ISA, 2009).

De este modo, la señal asociada a la variable de temperatura no es utilizada directamente en formato de corriente estándar (4–20 mA), sino como una señal de tensión acondicionada en el rango de 0 a 10 VDC. Esta adaptación permite una correcta compatibilidad con la configuración utilizada en la planta y asegura una adquisición estable de la variable de proceso.

Cabe destacar que, si bien en instrumentación industrial es común el uso de configuraciones de transmisión mediante lazos de corriente de 2 y 4 hilos como se muestra en la figura, en este sistema dichas señales son previamente acondicionadas para operar en el rango de 0 a 10 VDC antes de su ingreso al PLC.

En conjunto, esta configuración permite integrar adecuadamente los sensores y transmisores del sistema con el módulo analógico del PLC, asegurando que las señales adquiridas representen de manera confiable el comportamiento real del proceso (Siemens AG, 2020).





3.6 Sistema de Calentamiento del Proceso

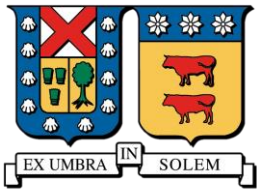
El proceso térmico analizado en la planta consiste en el calentamiento de un volumen aproximado de 5 litros de agua contenido en un recipiente cilíndrico.

El calentamiento del fluido se realiza mediante un calefactor eléctrico de potencia nominal de 1000 W, alimentado con señal de 48 VDC. La potencia suministrada es regulada a través de un relé de estado sólido (SSR), el cual permite controlar la energía entregada al sistema mediante técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM).

Este tipo de control permite variar la potencia efectiva aplicada al calefactor, constituyéndose como el mecanismo principal de actuación dentro del lazo de control de temperatura. La variable de proceso es monitoreada mediante un transmisor de temperatura (TT, Temperature Transmitter), cuya señal es utilizada por el sistema de control para ajustar la potencia suministrada y mantener la temperatura dentro de los valores deseados.

Desde el punto de vista dinámico, el sistema térmico presenta un comportamiento caracterizado por una respuesta lenta y con inercia, donde los cambios en la potencia aplicada no se reflejan de manera inmediata en la temperatura del fluido. Este comportamiento resulta fundamental para el estudio e implementación de estrategias de control automático, especialmente en la sintonización de controladores del tipo PID (Proporcional–Integral–Derivativo) (Ogata, 2010; Seborg et al., 2011).

En condiciones reales de operación, el sistema presenta limitaciones en su capacidad de calentamiento, alcanzando temperaturas máximas del orden de 40°C, sin llegar a este valor en condiciones normales de funcionamiento. Este comportamiento se debe a pérdidas térmicas hacia el entorno, así como a las características propias del sistema, lo cual debe ser considerado tanto en el modelado del proceso como en el diseño del sistema de control. (Incropera et al., 2007).



CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL GEMELO DIGITAL DE TEMPERATURA

4.1 Modelado Dinámico del Proceso Térmico

El desarrollo de un Gemelo Digital para el lazo de temperatura de la planta didáctica De Lorenzo comienza con la construcción de un modelo matemático que permita representar el comportamiento térmico del sistema real. En términos simples, este modelo busca describir cómo cambia la temperatura del agua cuando se aplica calor, considerando tanto el efecto del calefactor como las pérdidas de energía hacia el entorno.

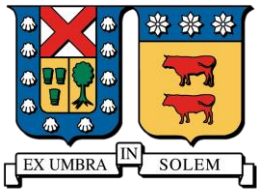
Un Gemelo Digital puede entenderse como una representación virtual de un sistema físico (Tao et al., 2019), que permite observar y analizar su comportamiento sin necesidad de intervenir directamente sobre la planta real. En el contexto de este proyecto, esto significa que el estudiante puede trabajar con una “copia digital” del proceso térmico, la cual responde de manera similar al sistema físico frente a las mismas condiciones de operación.

Para que esta herramienta sea útil desde el punto de vista formativo, no es necesario construir un modelo extremadamente complejo, sino uno que sea lo suficientemente representativo como para capturar el comportamiento principal del sistema (Åström & Murray, 2008). En este caso, se opta por un modelo simplificado, que permite describir la dinámica térmica del proceso y que además puede ser implementado y ejecutado en tiempo real dentro del PLC Siemens S7-1200.

Esta decisión responde a un enfoque tanto práctico como pedagógico. Por una parte, el modelo debe ser capaz de ejecutarse dentro del controlador sin afectar su desempeño. Por otra, debe ser comprensible para los estudiantes, permitiendo relacionar el comportamiento físico del sistema con su representación matemática.

El proceso térmico considerado corresponde al calentamiento de aproximadamente 5 litros de agua contenidos en un estanque (Incropera et al., 2007). La energía es suministrada mediante un calefactor eléctrico, cuya potencia es regulada a través de un relé de estado sólido (SSR). Desde el punto de vista del modelo, no es necesario representar cada encendido y apagado del calefactor, sino que se puede considerar una potencia promedio equivalente, lo que simplifica el análisis sin perder representatividad.

De esta manera, el modelo permite describir la evolución de la temperatura en el tiempo, constituyendo la base para la implementación del Gemelo Digital. Gracias a esto, es posible comparar en tiempo real el comportamiento del sistema físico con su representación virtual, facilitando el análisis, la comprensión del proceso y la validación de estrategias de control.



Para formular el modelo matemático se utiliza como fundamento el principio de conservación de la energía (Incropera et al., 2007). Este principio establece que la variación temporal de la energía interna acumulada en el sistema es igual a la energía que ingresa menos la energía que abandona el sistema. Aplicado al proceso térmico de calentamiento del agua, el balance energético puede expresarse de la siguiente manera:

$$\frac{dE}{dt} = Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{pérdidas}}$$

donde:

- E representa la energía interna almacenada en el sistema térmico,
- Q_{entrada} representa la potencia térmica entregada por el calefactor,
- $Q_{\text{pérdidas}}$ representa la potencia térmica disipada hacia el entorno.

Si se considera que el sistema térmico está dominado por la masa de agua contenida en el estanque, la energía interna puede aproximarse mediante la expresión:

$$E = mC_pT$$

donde:

- m es la masa del agua [kg],
- C_p es el calor específico del agua [$J/(kg \cdot ^\circ C)$],
- T es la temperatura del sistema [$^\circ C$].

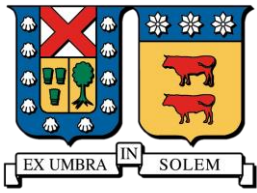
Derivando respecto del tiempo se obtiene:

$$\frac{dE}{dt} = mC_p \frac{dT}{dt}$$

Esta expresión indica que la variación de energía en el sistema está directamente relacionada con la rapidez con la que cambia la temperatura del agua. En términos más simples, muestra que el sistema no responde de manera instantánea cuando se le aplica calor.

En la práctica, esto significa que al encender el calefactor, la temperatura del agua no aumenta de inmediato, sino que lo hace de forma progresiva a lo largo del tiempo. Este comportamiento se debe a la capacidad del agua para almacenar energía térmica, lo que genera una respuesta lenta y gradual.

Esta característica es fundamental en el análisis del proceso, ya que explica por qué el sistema presenta una dinámica con inercia, la cual puede ser representada de manera adecuada mediante un modelo de primer orden (Ogata, 2010).



La potencia térmica suministrada por el calefactor puede modelarse como:

$$Q_{entrada} = P \cdot u$$

donde:

- P es la potencia máxima del calefactor [W],
- u es la señal de control normalizada, con valores en el rango $0 \leq u \leq 1$.

Esta formulación asume que la cantidad de energía entregada al sistema depende del tiempo en que el calefactor permanece activo dentro de un intervalo de control. En términos simples, si la señal de control es del 50%, se considera que el sistema está entregando aproximadamente la mitad de su potencia máxima.

Esto es válido en procesos térmicos como el analizado, donde los cambios de temperatura son lentos. En este tipo de sistemas, la temperatura del agua no responde a cada encendido o apagado del calefactor, sino al efecto promedio de la energía suministrada a lo largo del tiempo. (Incropera et al., 2007)

Por otra parte, las pérdidas de calor hacia el ambiente se representan mediante una relación proporcional a la diferencia de temperatura entre el agua y el entorno. Esto significa que mientras mayor sea la diferencia de temperatura, mayores serán las pérdidas de energía.

Esta aproximación permite modelar de forma simple el intercambio térmico del sistema, agrupando distintos fenómenos físicos, como conducción, convección y radiación, en un único término equivalente:

$$Q_{pérdidas} = h(T - T_{amb})$$

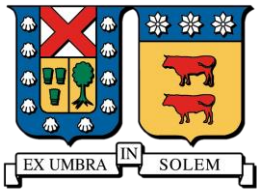
donde:

- h es el coeficiente global equivalente de pérdidas térmicas [$W/^\circ C$],
- T_{amb} es la temperatura ambiente [$^\circ C$].

Este término expresa que, a mayor diferencia entre la temperatura del agua y la temperatura del ambiente, mayor será la tasa de disipación de energía térmica. Desde un punto de vista físico, esto explica por qué el sistema calienta más rápido cuando parte desde temperatura ambiente y tiende a estabilizarse a medida que la temperatura aumenta: al subir la temperatura del agua, las pérdidas también aumentan, reduciendo el efecto neto del calefactor.

Sustituyendo las expresiones anteriores en el balance energético se obtiene la ecuación diferencial principal del proceso térmico:

$$mC_p \frac{dT}{dt} = P \cdot u - h(T - T_{amb})$$



Esta ecuación constituye el núcleo del modelo dinámico del gemelo digital. En ella se combinan tres fenómenos físicos fundamentales:

1. Acumulación térmica del agua, representada por $mC_p \frac{dT}{dt}$,
2. Aporte de energía del calefactor, representado por $P \cdot u$,
3. Pérdidas de calor al ambiente, representadas por $h(T - T_{amb})$.

La ecuación anterior permite describir cómo cambia la temperatura del sistema en cada instante de tiempo en función de la señal de control aplicada y de la diferencia de temperatura respecto del entorno. A nivel conceptual, esta formulación es coherente con el comportamiento esperado de un proceso térmico real: si la potencia suministrada supera las pérdidas, la temperatura aumenta; si ambas se equilibran, la temperatura se estabiliza; y si las pérdidas predominan, la temperatura disminuye.

Para utilizar esta ecuación dentro del proyecto es necesario definir y justificar los parámetros físicos involucrados. En primer lugar, la masa del agua puede aproximarse a partir del volumen contenido en el estanque. Considerando un volumen cercano a 5 litros:

$$V \approx 5 \text{ L} = 0.005 \text{ m}^3$$

y tomando la densidad del agua como aproximadamente:

$$\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$$

se obtiene:

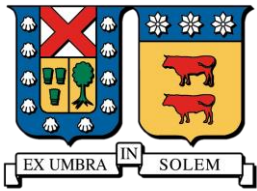
$$m = \rho V \approx 1000 \cdot 0.005 = 5 \text{ kg}$$

Por otra parte, el calor específico del agua puede considerarse aproximadamente constante en el rango de trabajo del sistema, con un valor cercano a:

$$C_p \approx 4186 \text{ J}/(\text{kg} \times ^\circ\text{C})$$

De este modo, la capacidad térmica total del volumen de agua queda dada por:

$$mC_p \approx 5 \cdot 4186 = 20930 \text{ J}/^\circ\text{C}$$



Este resultado tiene una interpretación física muy importante: se requieren aproximadamente 20930 joules de energía para aumentar en 1 °C la temperatura de los 5 litros de agua, despreciando pérdidas. Esta magnitud explica por qué el sistema presenta una respuesta lenta y gradual, característica típica de los procesos térmicos.

A partir de la ecuación diferencial general también puede obtenerse una forma clásica de sistema de primer orden. Reordenando términos:

$$mC_p \frac{dT}{dt} + hT = P \cdot u + hT_{amb}$$

Dividiendo toda la ecuación por h , se obtiene:

$$\frac{mC_p}{h} \frac{dT}{dt} + T = \frac{P}{h} u + T_{amb}$$

Definiendo:

$$\tau = \frac{mC_p}{h}$$

La ecuación puede escribirse como:

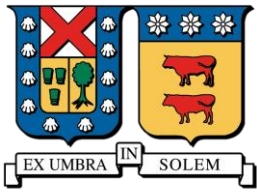
$$\tau \frac{dT}{dt} + T = \frac{P}{h} u + T_{amb}$$

Esta expresión muestra con claridad que el sistema puede interpretarse como un proceso de primer orden (Ogata, 2010). con constante de tiempo τ , excitado por la señal de control y desplazado por la temperatura ambiente. Si se desea expresar la ecuación en variables de desviación respecto del ambiente, se define:

$$\Delta T = T - T_{amb}$$

Y entonces la ecuación adopta la forma clásica:

$$\tau \frac{d(\Delta T)}{dt} + \Delta T = Ku$$



donde:

$$K = \frac{P}{h}$$

En esta formulación, el parámetro τ representa qué tan rápido responde el sistema frente a cambios en la señal de control, mientras que la ganancia K indica qué tan sensible es la temperatura del sistema frente a la acción del calefactor.

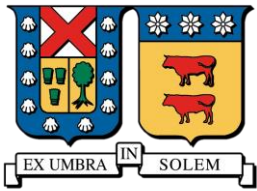
En términos simples, un valor alto de τ implica que el sistema responde de forma más lenta, mientras que un valor mayor de K significa que una misma acción de control genera un cambio de temperatura más significativo. Esta forma de representar el sistema permite relacionar el comportamiento físico del proceso con los modelos clásicos utilizados en el análisis de sistemas dinámicos.

Es importante señalar que el modelo propuesto corresponde a una aproximación simplificada, basada en parámetros concentrados. Esto significa que su validez depende de ciertos supuestos que permiten describir el comportamiento del sistema de forma práctica y comprensible. En este proyecto se consideran las siguientes hipótesis:

- El agua del estanque se encuentra perfectamente mezclada, por lo que su temperatura puede representarse mediante un único valor promedio.
- La masa de agua se considera aproximadamente constante durante la simulación del lazo térmico.
- El calor específico del agua se asume constante en el rango de temperaturas de operación.
- La temperatura ambiente se considera aproximadamente constante.
- Las pérdidas térmicas hacia el entorno se modelan como proporcionales a la diferencia de temperatura.
- La acción del calefactor se representa mediante una potencia media efectiva.
- Se desprecia la capacidad térmica del recipiente y de otros componentes sólidos en comparación con la del agua.
- No se considera, en esta etapa, el efecto del caudal de entrada o salida sobre la energía térmica del sistema.

Este último punto resulta relevante, ya que en una modelación más completa debería considerarse el efecto del flujo de entrada o salida de agua sobre la energía del sistema. Sin embargo, para los objetivos de este trabajo, se ha optado por un modelo simplificado que permita representar de manera adecuada la dinámica principal del proceso térmico.

Esta decisión busca lograr un equilibrio entre realismo físico, facilidad de implementación y claridad en la comprensión del modelo. Desde una perspectiva pedagógica, utilizar un modelo excesivamente complejo puede dificultar su interpretación y su aplicación práctica por parte de los estudiantes.



En este contexto, el uso de un modelo de primer orden permite:

- Representar de manera adecuada la tendencia general del sistema térmico.
- Comparar en tiempo real la planta física con su representación simulada en el PLC.
- Analizar la diferencia entre la temperatura real y la simulada.
- Facilitar su implementación en lenguaje SCL.
- Establecer una base para futuras mejoras del modelo.

Por lo tanto, el modelo desarrollado constituye una base técnicamente válida, coherente con los objetivos del proyecto y suficientemente representativa para sustentar la implementación del Gemelo Digital del lazo de temperatura.

4.2 Algoritmo de Simulación del Gemelo Digital

Una vez obtenido el modelo matemático del proceso térmico, el siguiente paso consiste en llevarlo a una forma que pueda ser utilizada dentro del PLC. Esto implica transformar la ecuación en un algoritmo que permita simular el comportamiento del sistema en tiempo real.

En este punto es importante destacar que el Gemelo Digital no se queda solo en una representación teórica, sino que debe funcionar como una simulación activa, capaz de evolucionar al mismo tiempo que la planta física y bajo las mismas condiciones de operación.

A diferencia de un modelo matemático continuo, el PLC ejecuta sus programas de manera cíclica. En cada ciclo de ejecución, el controlador lee las entradas, procesa la lógica y actualiza las salidas.

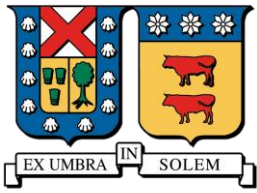
Debido a esta forma de funcionamiento, es necesario adaptar la ecuación del modelo a un formato discreto, es decir, a una expresión que permita calcular la temperatura simulada paso a paso en cada ciclo del programa.

Partiendo de la ecuación diferencial:

$$mC_p \frac{dT}{dt} = P \cdot u - h(T - T_{amb})$$

Se despeja la derivada de la temperatura:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{mC_p} (P \cdot u - h(T - T_{amb}))$$



Para discretizar esta ecuación se utiliza el método de Euler hacia adelante (Ogata, 2010), debido a su simplicidad y a su facilidad de implementación dentro de un entorno PLC. Este método aproxima la derivada como:

$$\frac{dT}{dt} \approx \frac{T(k+1) - T(k)}{\Delta t}$$

donde:

- $T(k)$ es la temperatura simulada en el instante actual,
- $T(k+1)$ es la temperatura simulada en el siguiente instante,
- Δt es el tiempo de muestreo o intervalo de actualización del modelo.

Sustituyendo esta aproximación en la ecuación diferencial se obtiene:

$$\frac{T(k+1) - T(k)}{\Delta t} = \frac{1}{mC_p} (P \cdot u(k) - h(T(k) - T_{amb}(k)))$$

Despejando la temperatura siguiente:

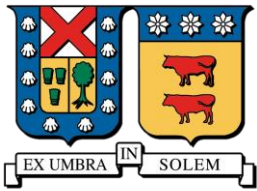
$$T(k+1) = T(k) + \frac{\Delta t}{mC_p} (P \cdot u(k) - h(T(k) - T_{amb}(k)))$$

Esta expresión corresponde a la ecuación utilizada para simular el comportamiento térmico dentro del Gemelo Digital. En términos simples, indica que la temperatura en el siguiente instante depende de la temperatura actual más un cambio, el cual está determinado por el balance entre la energía entregada por el calefactor y las pérdidas de calor hacia el ambiente.

Una de las principales ventajas de esta formulación es que puede implementarse fácilmente dentro del PLC, ya que solo requiere operaciones matemáticas básicas como suma, resta, multiplicación y división. Esto permite programarla de forma directa en un bloque de función (FB) utilizando lenguaje SCL. (Åström & Murray, 2008)

Además, esta forma de cálculo es especialmente útil en el ámbito educativo, ya que permite observar cómo la temperatura simulada evoluciona paso a paso en cada ciclo del PLC. De esta manera, el comportamiento del modelo resulta más fácil de comprender y analizar.

Para que la simulación sea coherente con el proceso real, es importante seleccionar adecuadamente el tiempo de muestreo Δt . En sistemas térmicos, donde la dinámica es lenta, se pueden utilizar tiempos del orden de algunos segundos sin afectar significativamente la calidad de la simulación. En la práctica, este valor dependerá del tiempo de ciclo del PLC y del nivel de detalle que se desee obtener.



Desde el punto de vista de su funcionamiento, el algoritmo del Gemelo Digital requiere como entradas las condiciones reales del proceso, entre las que destacan:

- La señal de control aplicada al calefactor (normalizada entre 0 y 1).
- La temperatura ambiente utilizada como referencia.
- El tiempo de muestreo del sistema.
- Los parámetros del modelo, tales como masa, calor específico, potencia y coeficiente de pérdidas.

Como salida, el modelo entrega la temperatura simulada del sistema, la cual puede ser visualizada en la HMI y comparada directamente con la temperatura medida por el sensor (TT, Temperature Transmitter) de la planta real.

En términos simples, el funcionamiento del algoritmo puede entenderse como una secuencia repetitiva en cada ciclo del PLC: se lee la señal de control, se calcula la energía entregada, se estiman las pérdidas térmicas y finalmente se actualiza la temperatura simulada.

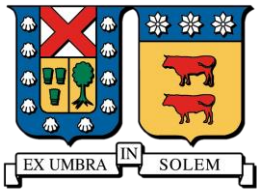
Es importante destacar que el Gemelo Digital no funciona de forma aislada, sino en paralelo con el proceso real. En cada instante, el modelo recibe la misma señal de control que actúa sobre el calefactor físico y calcula cuál debería ser la respuesta del sistema. Si el modelo está bien ajustado, ambas curvas deberían comportarse de forma similar.

Para lograr una buena comparación entre el sistema real y el modelo, es recomendable inicializar la temperatura simulada con el valor medido al inicio del proceso. De esta forma, ambos parten desde una misma condición, facilitando el análisis de sus diferencias.

Un aspecto importante del modelo es el parámetro de pérdidas térmicas h , el cual depende de múltiples factores del sistema y no siempre puede determinarse de forma exacta. Por esta razón, se considera un parámetro ajustable, que puede calibrarse experimentalmente comparando la respuesta del modelo con la respuesta real.

En términos de implementación, el Gemelo Digital se desarrolla como un bloque de función (FB) dentro del PLC, el cual mantiene en memoria la temperatura simulada entre cada ciclo de ejecución. Esto permite que el modelo evolucione de forma continua en el tiempo, replicando el comportamiento del proceso físico.

En síntesis, el algoritmo del Gemelo Digital permite transformar el modelo matemático en una herramienta práctica que se ejecuta en tiempo real dentro del PLC. Gracias a esto, es posible comparar de forma permanente el comportamiento del sistema real con su representación virtual, facilitando el análisis, la validación y el aprendizaje del proceso térmico.



4.3 Estrategia de Control de Temperatura

Una vez definido el modelo del proceso térmico y desarrollado el algoritmo del Gemelo Digital, es necesario establecer la estrategia de control que permitirá regular la temperatura del sistema físico.

En este caso, la variable que se desea controlar es la temperatura del agua en el estanque, mientras que la variable manipulada corresponde a la potencia entregada por el calefactor eléctrico, la cual es regulada mediante un relé de estado sólido (SSR).

El objetivo del sistema de control es lograr que la temperatura del proceso siga un valor de referencia (setpoint), manteniéndose lo más estable posible frente a perturbaciones y a las propias limitaciones del sistema.

Entre las distintas estrategias de control utilizadas en la industria, el controlador PID es una de las más empleadas, debido a su simplicidad, buen desempeño y facilidad de implementación en sistemas industriales (Ogata, 2010; Seborg et al., 2011). Por esta razón, en el presente proyecto se utiliza un controlador PID como estructura principal para el lazo de temperatura, lo cual resulta coherente tanto con el enfoque académico como con aplicaciones reales en procesos térmicos.

El funcionamiento del controlador PID se basa en el cálculo del error de control, definido como la diferencia entre la temperatura de referencia y la temperatura medida por el sistema:

$$e(t) = T_{SP}(t) - T_{real}(t)$$

donde:

- $e(t)$ es el error de control,
- $T_{SP}(t)$ es la temperatura de referencia deseada,
- $T_{real}(t)$ es la temperatura real medida por el sistema.

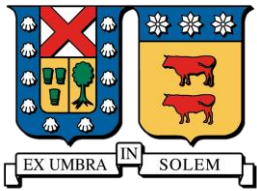
A partir de este error, el controlador genera una señal de mando $u(t)$ que actúa sobre el calefactor.

En su forma continua ideal, el algoritmo PID se expresa como:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

donde:

- K_p es la ganancia proporcional,
- K_i es la ganancia integral,
- K_d es la ganancia derivativa.



Cada uno de los términos del controlador PID cumple una función específica dentro del sistema. La acción proporcional genera una respuesta inmediata frente al error actual; la acción integral acumula el error en el tiempo y permite eliminar desviaciones sostenidas; y la acción derivativa considera la rapidez con la que cambia el error, ayudando a suavizar la respuesta del sistema (Ogata, 2010; Seborg et al., 2011).

En sistemas térmicos como el analizado, la acción proporcional suele ser la más relevante, debido a que el proceso presenta una dinámica lenta y estable. La acción integral resulta útil para corregir diferencias persistentes entre la temperatura real y el valor de referencia, mientras que la acción derivativa debe utilizarse con precaución, ya que la medición de temperatura puede presentar pequeñas variaciones o ruido que afectan su desempeño.

En muchas aplicaciones de calentamiento, el uso de un controlador PI es suficiente para lograr un buen desempeño. Sin embargo, en este proyecto se considera la estructura PID completa, tanto por su valor académico como por la flexibilidad que ofrece al momento de ajustar el sistema.

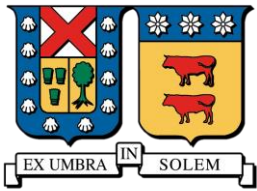
Un aspecto importante es que la señal de salida del controlador no actúa directamente sobre un dispositivo analógico continuo, sino sobre un calefactor eléctrico controlado mediante un relé de estado sólido (SSR). Por esta razón, la salida del PID se interpreta como una fracción de potencia deseada, la cual se traduce posteriormente en una estrategia de encendido y apagado del calefactor.

En este contexto, la señal de control u puede expresarse de forma normalizada entre 0 y 1, o bien en porcentaje entre 0% y 100%, representando el nivel de potencia aplicado al sistema. Bajo esta lógica:

- $u = 0$ significa calefactor completamente apagado,
- $u = 1$ significa calefactor operando a potencia máxima promedio,
- valores intermedios representan fracciones de potencia media efectiva.

Esta representación resulta especialmente útil porque permite unificar tres elementos del sistema:

1. la salida del controlador,
2. la acción física sobre el calefactor,
3. la entrada utilizada por el Gemelo Digital.



En este sistema, la misma señal de control que regula la potencia del calefactor real es utilizada también como entrada del modelo matemático. De esta forma, tanto la planta física como el Gemelo Digital reciben la misma acción de control, lo que permite comparar directamente sus respuestas. Este principio es fundamental para el correcto funcionamiento del gemelo digital implementado.

Desde el punto de vista funcional, el sistema opera de la siguiente manera: el operador define una temperatura de referencia en la HMI, el sensor de temperatura (TT, Temperature Transmitter) mide la variable real del proceso y el PLC adquiere esta señal. A partir de ella, el controlador PID calcula el error respecto del setpoint y genera una señal de control u , la cual se aplica al calefactor mediante el relé de estado sólido (SSR).

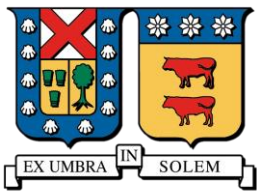
De manera simultánea, esta misma señal u es utilizada por el Gemelo Digital, el cual calcula la temperatura simulada del sistema. Ambas temperaturas, real y simulada, son visualizadas en la HMI, permitiendo su comparación en tiempo real.

Este enfoque presenta una ventaja pedagógica importante, ya que permite observar no solo el comportamiento del sistema real, sino también su representación matemática. De esta manera, el estudiante puede relacionar directamente lo que ocurre en la planta con el modelo implementado en el PLC.

En la práctica, el sistema debe considerar además ciertos aspectos de seguridad. Debido al uso de un calefactor eléctrico, es necesario incorporar protecciones básicas, tales como la limitación de temperatura máxima, la detección de fallas de sensor y la restricción de la señal de control dentro de rangos seguros. Estas medidas permiten asegurar una operación confiable y coherente con prácticas industriales reales.

En cuanto al ajuste del controlador, los parámetros PID pueden determinarse inicialmente de forma experimental y luego refinarse observando la respuesta del sistema. En este proceso, la comparación entre la temperatura real y la simulada resulta especialmente útil, ya que permite evaluar la calidad del ajuste. Por ejemplo, diferencias importantes entre ambas curvas pueden indicar errores en el modelo o en la sintonización del controlador.

Es importante destacar que el controlador PID y el Gemelo Digital cumplen funciones distintas dentro del sistema. El PID se encarga de regular el proceso físico, mientras que el modelo virtual tiene como objetivo simular el comportamiento esperado del sistema bajo las mismas condiciones. Esta separación permite analizar el proceso con mayor claridad y facilita futuras mejoras, tanto en el controlador como en el modelo.



4.4 Interfaz HMI y uso del Sistema

La interacción entre los estudiantes y el sistema de control se realiza mediante una interfaz hombre-máquina (HMI), la cual permite visualizar en tiempo real las variables del proceso y configurar los parámetros de control.

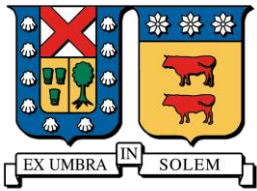
La Figura 4.4 muestra una interfaz HMI correspondiente al lazo de temperatura de la planta, utilizada como referencia del sistema actualmente implementado en el laboratorio. Esta interfaz permite comprender cómo los estudiantes interactúan con el proceso físico y constituye una base para el desarrollo del entorno de entrenamiento propuesto en este proyecto.



Figura 4.4: Interfaz HMI del lazo de temperatura de la planta didáctica.

A través de esta interfaz es posible observar de manera clara el comportamiento del sistema, incluyendo la temperatura actual del proceso, el valor de referencia (setpoint) y el estado del calefactor eléctrico. Además, se dispone de un gráfico de tendencia que permite visualizar la evolución de la temperatura en el tiempo, facilitando el análisis de la respuesta del sistema.

La interfaz también incorpora elementos de interacción, como la posibilidad de modificar el setpoint dentro de un rango definido, así como indicadores de estado y alertas de seguridad, por ejemplo en condiciones de temperatura elevada.



En el contexto del presente proyecto, una interfaz de características similares permite a los estudiantes interactuar tanto con el sistema real como con el Gemelo Digital. De esta manera, los usuarios pueden configurar parámetros del controlador PID, observar la respuesta del sistema y comparar el comportamiento de la temperatura real con la temperatura simulada.

Este enfoque permite que el estudiante no solo opere el sistema, sino que también comprenda de forma más intuitiva la relación entre la acción de control aplicada y la respuesta del proceso, fortaleciendo así el proceso de aprendizaje en control automático.

4.5 Arquitectura del Sistema Propuesto

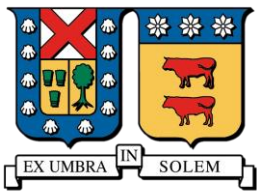
El sistema desarrollado se basa en una arquitectura de simulación distribuida implementada sobre una red Industrial Ethernet bajo protocolo Profinet. El objetivo de esta arquitectura es permitir que un único PLC físico, asociado a la planta, actúe como servidor del sistema, ejecutando múltiples instancias del Gemelo Digital para ser utilizadas por distintas estaciones de trabajo de manera simultánea.

En esta configuración, el PLC central de la planta cumple el rol de servidor y ejecuta el bloque de función denominado FB_Gemelo_Digital, programado en lenguaje SCL. Este bloque contiene el modelo matemático del proceso térmico, representado mediante una función de transferencia discretizada.

El diseño del bloque considera la utilización de múltiples instancias de memoria, permitiendo implementar seis simulaciones independientes en paralelo. Cada instancia recibe como entrada una señal de control (MV) proveniente de una estación de trabajo específica y genera como salida una variable de proceso simulada (PV_sim), correspondiente a la respuesta térmica del modelo para ese grupo.

Por otra parte, el sistema contempla seis estaciones de trabajo, cada una configurada como cliente dentro de la red. Estas estaciones están compuestas por un PLC Siemens S7-1200 y una interfaz HMI KTP700. En cada estación, los estudiantes implementan su propio lazo de control, pudiendo utilizar controladores PID o estrategias de control ON/OFF, de acuerdo con los objetivos de la práctica.

La interacción del usuario se realiza a través de la HMI, desde donde es posible ingresar el valor de referencia (Setpoint) y ajustar los parámetros de sintonía del controlador, tales como la ganancia proporcional (K_p), el tiempo integral (T_i) y el tiempo derivativo (T_d). De esta forma, cada grupo dispone de un entorno de control independiente, aun cuando comparte la misma infraestructura de simulación.



El intercambio de información entre las estaciones de trabajo y el PLC central se realiza mediante comunicación S7 utilizando instrucciones del tipo PUT/GET. El flujo de datos del sistema puede describirse en las siguientes etapas:

- El PLC de la estación de trabajo envía su señal de control (MV_sim) al PLC central.
- El PLC central recibe esta señal y la procesa mediante el algoritmo del Gemelo Digital implementado en SCL.
- Como resultado, se obtiene una temperatura simulada (PV_sim), correspondiente a la respuesta del modelo.
- Este valor es enviado de vuelta al PLC de la estación de trabajo.
- Finalmente, el PLC del estudiante utiliza esta variable como si fuese una medición real, cerrando el lazo de control de forma completamente virtual.

La Figura 4.5 muestra la arquitectura general del sistema, donde se observa la interacción entre el PLC central, las estaciones de trabajo y la planta física:

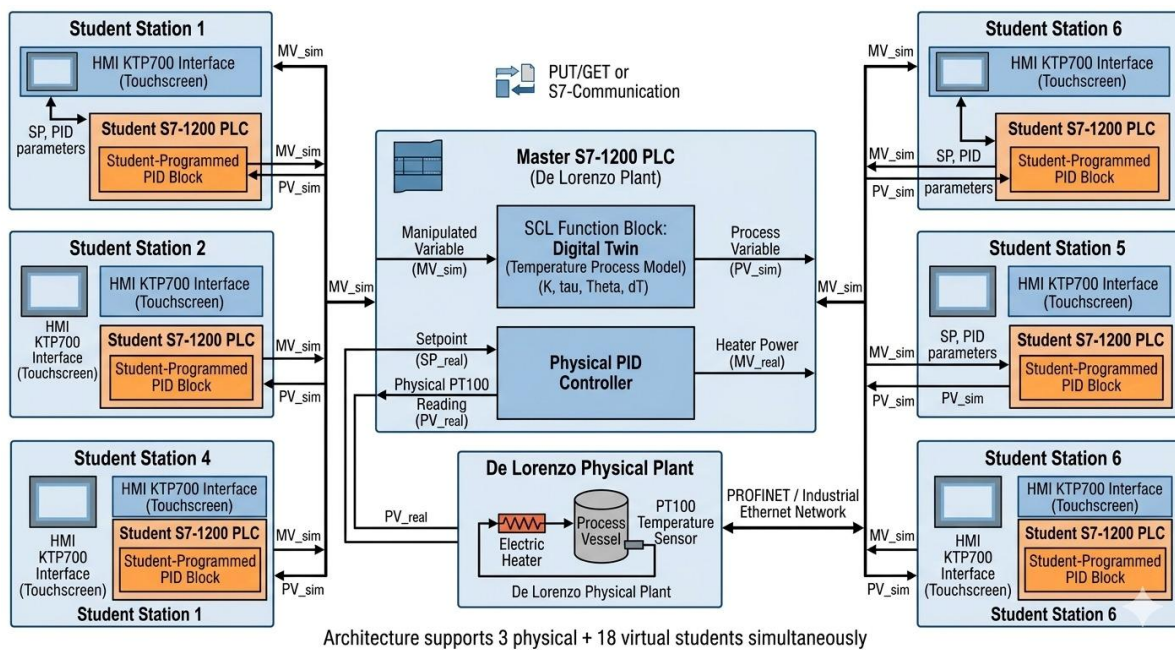
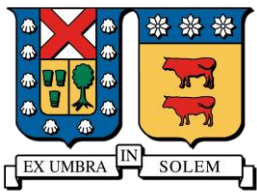


Figura 4.5: Arquitectura del sistema con implementación distribuida del Gemelo Digital.

Desde el punto de vista pedagógico, esta arquitectura permite aumentar significativamente la capacidad del laboratorio, posibilitando la atención simultánea de hasta 21 estudiantes por sesión. En este esquema, un grupo de tres estudiantes puede operar directamente la planta física, mientras que seis grupos adicionales trabajan en paralelo utilizando el Gemelo Digital.



CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y APLICACIÓN PEDAGÓGICA

5.1 Contraste de Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la implementación del Gemelo Digital del lazo de temperatura y su comparación con el comportamiento real de la planta didáctica. El propósito principal es evaluar si el modelo desarrollado logra representar de manera adecuada la dinámica del sistema térmico.

Para lograr una respuesta coherente, fue necesario realizar un proceso de ajuste de parámetros del modelo, modificando variables como la masa equivalente del sistema, la potencia del calefactor y el coeficiente de pérdidas térmicas. Este proceso permitió obtener un comportamiento simulado que, si bien no es idéntico al sistema real, reproduce de forma adecuada su tendencia y dinámica.

Inicialmente, el sistema se encuentra en condiciones cercanas a la temperatura ambiente, como se observa en la Figura 5.1, donde la temperatura es aproximadamente 20,5 °C. Esta condición representa el punto de partida del proceso antes de la aplicación del setpoint.

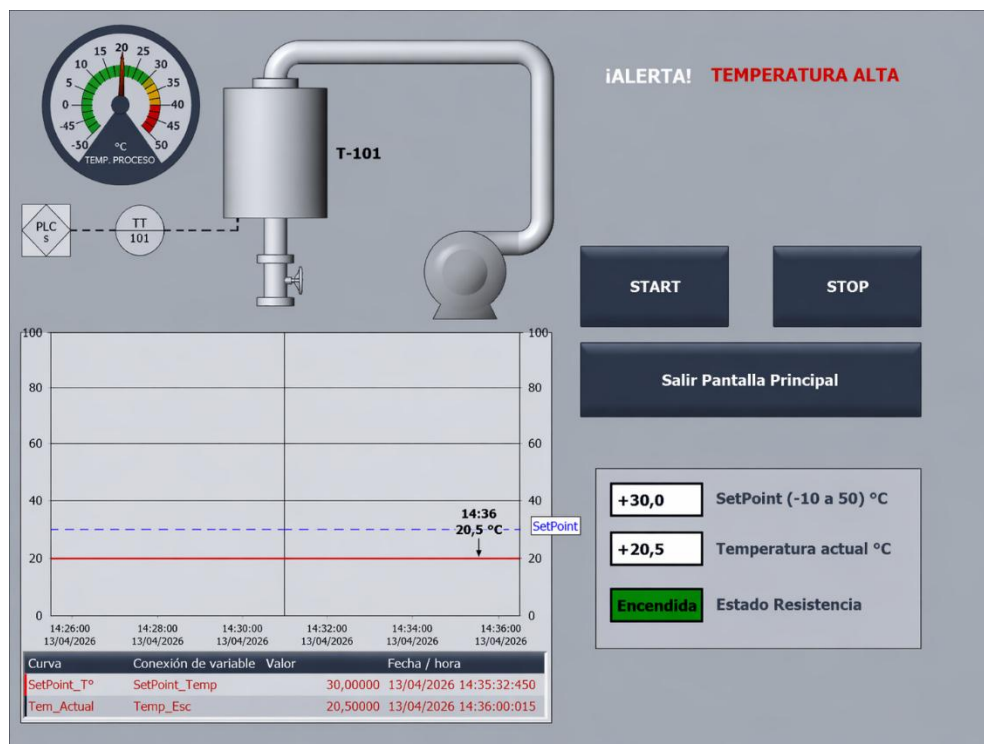
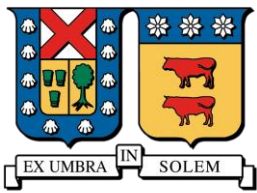


Figura 5.1: Condición inicial del sistema a temperatura ambiente.



Posteriormente, al aplicar un setpoint de 30 °C, el sistema comienza a responder de manera progresiva, incrementando su temperatura desde la condición inicial hasta aproximarse al valor de referencia. En la Figura 5.2 se aprecia este aumento gradual de la temperatura, evidenciando la inercia térmica propia del proceso, donde los cambios no se producen de manera instantánea debido a la acumulación de energía en el sistema. Este comportamiento refleja de forma adecuada la dinámica real de un sistema térmico, en el cual la transferencia de calor y las pérdidas asociadas generan una respuesta lenta y continua en el tiempo.

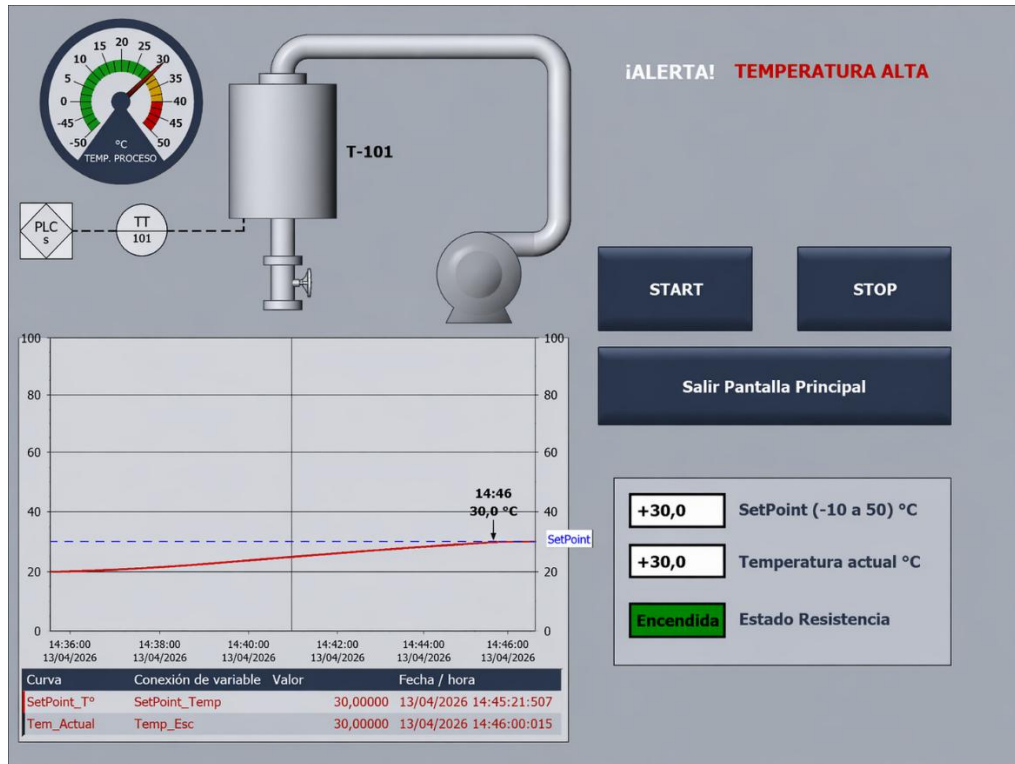


Figura 5.2: Respuesta del sistema durante el aumento de temperatura hacia el setpoint.

A medida que el sistema continúa su evolución, se observa un leve sobreimpulso en la planta real, lo cual es característico en sistemas dinámicos con inercia. Tal como se muestra en la Figura 5.3, la temperatura alcanza aproximadamente 32,1 °C, superando el valor de referencia establecido. Este comportamiento se debe principalmente a la acumulación de energía térmica en el sistema y al retardo en la disipación del calor, lo que provoca que la temperatura siga aumentando incluso después de alcanzar el setpoint. Este fenómeno resulta relevante desde el punto de vista del control, ya que permite analizar la estabilidad del sistema y la necesidad de ajustar adecuadamente los parámetros del controlador para minimizar este tipo de desviaciones.

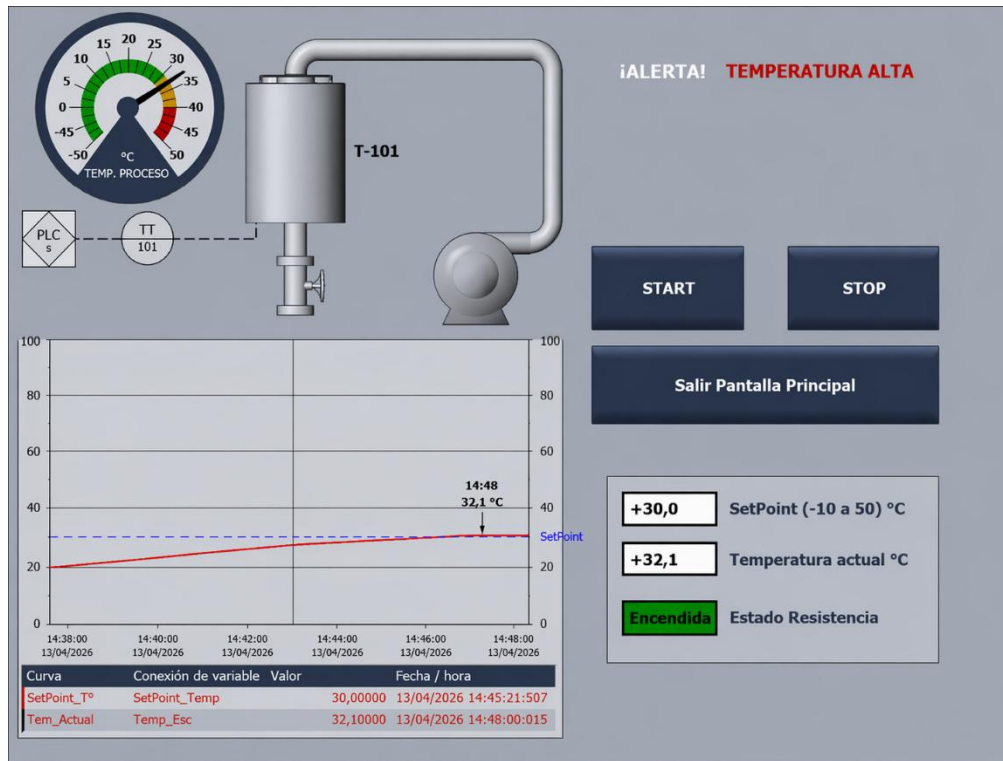
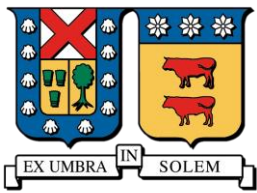


Figura 5.3: Sobreimpulso del sistema térmico respecto al setpoint.

Finalmente, se realiza la comparación directa entre el comportamiento del sistema real y el Gemelo Digital. En la Figura 5.4 se presentan ambas curvas, donde se puede observar que el modelo simulado sigue una tendencia similar a la planta real, alcanzando un valor cercano a 29,60 °C. Si bien no existe una coincidencia exacta entre ambas respuestas, el modelo logra reproducir de manera adecuada la forma de la curva, la velocidad de incremento y la aproximación al setpoint. Las diferencias observadas pueden atribuirse a simplificaciones propias del modelo matemático, así como a factores no considerados, tales como variaciones en las condiciones ambientales o incertidumbres en los parámetros físicos del sistema. No obstante, el nivel de aproximación obtenido resulta suficiente para fines de análisis y aprendizaje, validando el uso del Gemelo Digital como una herramienta representativa del comportamiento real del proceso.

La comparación entre el sistema real y el Gemelo Digital resulta fundamental, ya que permite validar el modelo desarrollado y comprobar qué tan representativo es respecto al comportamiento físico del proceso. A través de este contraste, es posible identificar diferencias, ajustar parámetros y mejorar la precisión del modelo. Además, desde el punto de vista pedagógico, esta comparación permite a los estudiantes comprender las limitaciones de las simulaciones y reconocer la importancia de considerar fenómenos reales en el análisis de sistemas de control.

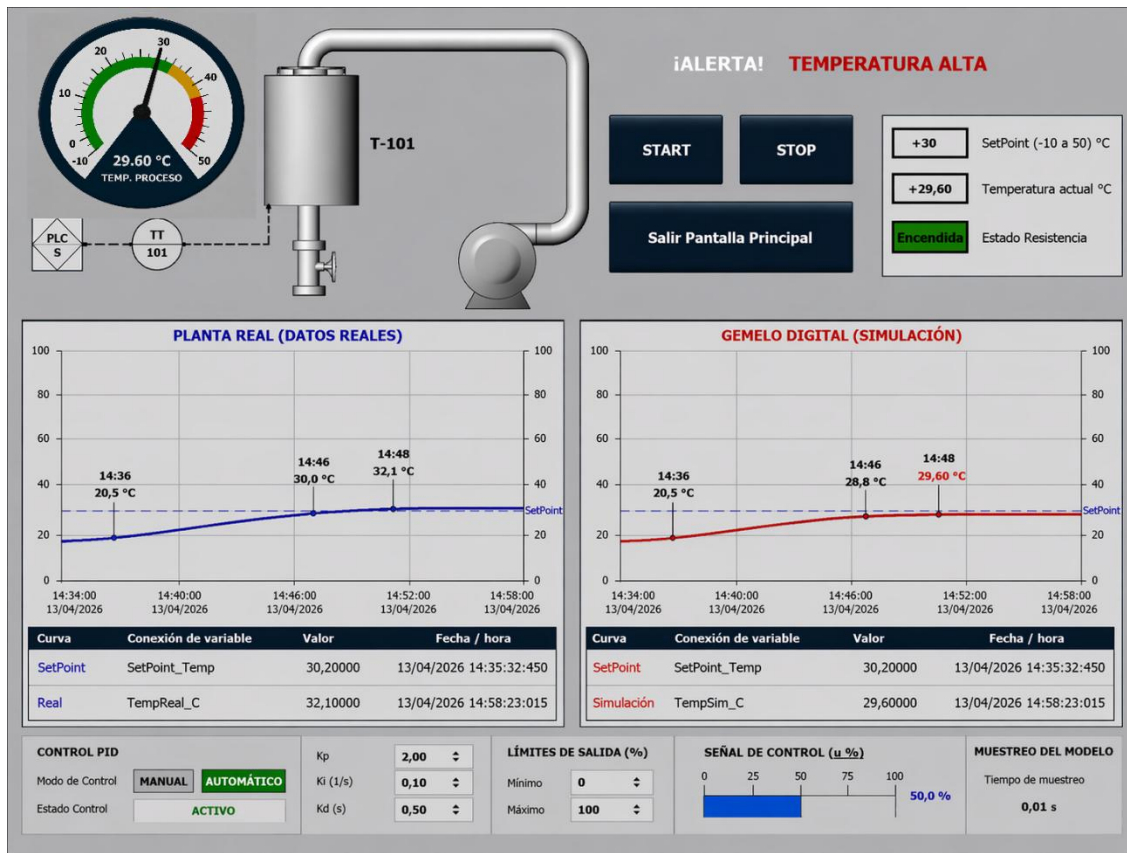
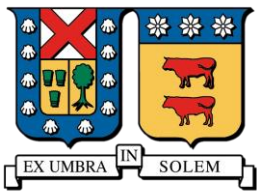
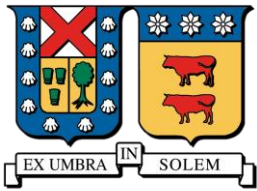


Figura 5.4: Comparación entre la temperatura de la planta real y el Gemelo Digital.

Si bien existen diferencias entre ambos comportamientos, estas se consideran normales dentro de una etapa inicial de modelación, ya que el Gemelo Digital se basa en una representación simplificada del sistema real. A pesar de ello, el modelo desarrollado logra capturar de manera efectiva las principales características del proceso, tales como la velocidad de respuesta, la inercia térmica y la tendencia hacia el estado estacionario. Esto demuestra que el Gemelo Digital constituye una aproximación válida y útil del sistema físico, permitiendo analizar su comportamiento de forma clara y comprensible. En este sentido, el modelo no solo cumple con representar adecuadamente la dinámica del proceso, sino que además se convierte en una herramienta valiosa para el aprendizaje, facilitando la comprensión de fenómenos reales a partir de su simulación.



5.2 Aplicación Pedagógica del Sistema

El desarrollo del Gemelo Digital del lazo de temperatura permite incorporar un enfoque pedagógico basado en la comparación entre el comportamiento del sistema físico y su representación simulada. A diferencia de una simulación aislada, este proyecto permite analizar un proceso real en conjunto con un modelo matemático ajustado, lo que facilita una comprensión más profunda de los sistemas de control.

A partir de las imágenes obtenidas durante el desarrollo experimental, es posible observar distintas etapas del comportamiento del sistema, desde la condición inicial hasta su evolución hacia el estado estacionario. En particular, las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 permiten visualizar cómo la temperatura del sistema cambia progresivamente en el tiempo, mientras que la Figura 5.4 muestra la comparación directa entre el sistema real y el Gemelo Digital.

Este conjunto de resultados permite que el estudiante no solo observe el comportamiento del proceso, sino que también pueda analizar su evolución paso a paso, identificando fenómenos como:

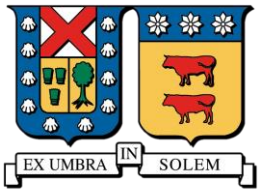
- Incremento progresivo de la temperatura
- Efecto de la inercia térmica
- Aproximación al setpoint
- Presencia de sobreimpulso
- Diferencias entre el sistema real y el modelo

En este sentido, el Gemelo Digital se transforma en una herramienta de aprendizaje, ya que permite comprender cómo un modelo matemático puede representar un sistema físico real, aun cuando existan diferencias entre ambos.

Además, este enfoque permite al estudiante desarrollar habilidades de análisis, tales como:

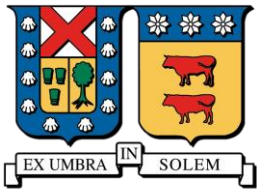
- Interpretación de curvas de respuesta
- Evaluación de la precisión de un modelo
- Comprensión de las limitaciones de las simulaciones
- Relación entre parámetros del modelo y comportamiento del sistema

Uno de los aspectos más relevantes desde el punto de vista educativo es que el proceso de ajuste del modelo forma parte del aprendizaje. El hecho de que el Gemelo Digital haya requerido modificar parámetros como la masa equivalente, la potencia del sistema y las pérdidas térmicas, permite evidenciar que los modelos no son exactos desde un inicio, sino que deben ser calibrados para representar adecuadamente la realidad.



De esta forma, el estudiante comprende que la ingeniería no consiste únicamente en aplicar fórmulas, sino también en interpretar resultados, ajustar modelos y validar su comportamiento frente a sistemas reales.

Finalmente, la comparación directa entre la planta física y el Gemelo Digital (Figura 5.4) permite consolidar el aprendizaje, ya que el estudiante puede visualizar de manera clara qué tan cercana es la simulación respecto al sistema real, identificando tanto sus aciertos como sus limitaciones.



CAPÍTULO 6: TRABAJOS FUTUROS

El desarrollo del presente proyecto permitió modernizar el sistema de control de la planta didáctica mediante la incorporación de un PLC Siemens S7-1200 y la implementación de un Gemelo Digital para el lazo de temperatura. Esta integración no solo mejoró las capacidades de control del sistema, sino que también permitió establecer una base para el análisis comparativo entre el comportamiento real del proceso y su representación simulada.

A partir de los resultados obtenidos, se evidenció que el Gemelo Digital desarrollado logra representar de manera adecuada la dinámica del sistema térmico, capturando características fundamentales como la inercia térmica, la velocidad de respuesta y la aproximación al estado estacionario. No obstante, al tratarse de un modelo ajustado en una etapa inicial de desarrollo, aún existen oportunidades de mejora orientadas a incrementar su nivel de precisión y fidelidad respecto al sistema real.

En este contexto, se recomienda como línea de trabajo futuro continuar con el proceso de ajuste y refinamiento del Gemelo Digital, considerando una mejor estimación de los parámetros físicos del sistema, tales como las pérdidas térmicas, la potencia efectiva del calefactor y la masa equivalente del fluido. Asimismo, podría incorporarse la modelación de fenómenos no lineales o condiciones variables de operación, con el fin de obtener una representación más completa del proceso.

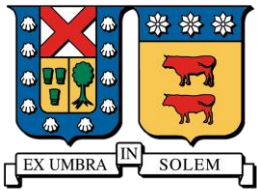
Desde el punto de vista pedagógico, este aspecto adquiere especial relevancia, ya que el Gemelo Digital puede ser utilizado como una herramienta de aprendizaje continuo. En este sentido, se propone que futuros estudiantes puedan trabajar sobre el modelo desarrollado, realizando ajustes, validaciones y mejoras, lo que les permitiría comprender en mayor profundidad el proceso de modelación, calibración y validación de sistemas reales.

6.1 Mejora del Lazo de Nivel

Como línea de trabajo futuro, se propone mejorar la representación del lazo de nivel mediante la incorporación de un modelo más realista basado en principios de la mecánica de fluidos, como la ecuación de Bernoulli.

Este enfoque permitiría describir de forma más precisa la relación entre el nivel del estanque y el caudal de salida, considerando que en sistemas reales dicha relación no es lineal, sino dependiente de la altura del fluido.

La incorporación de este comportamiento permitiría mejorar la fidelidad del Gemelo Digital, generando simulaciones más cercanas a la realidad y ampliando las capacidades de análisis del sistema.



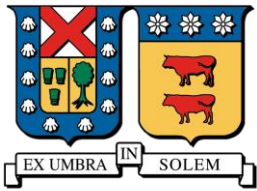
Desde el punto de vista del control, esto permitiría evaluar con mayor profundidad el desempeño de controladores PID en condiciones más exigentes, así como explorar estrategias de control más avanzadas.

Al igual que en el lazo de temperatura, este modelo podría implementarse dentro del PLC mediante ecuaciones discretizadas, permitiendo simular en tiempo real el comportamiento del nivel en paralelo con el proceso físico.

Además, su desarrollo requeriría un proceso de validación experimental, comparando los resultados del modelo con datos reales de la planta, lo que permitiría ajustar sus parámetros y mejorar progresivamente su precisión.

En este sentido, el presente proyecto no busca entregar un modelo completamente ajustado o definitivo, sino establecer una base funcional sobre la cual es posible continuar desarrollando mejoras. De manera explícita, se plantea que futuros estudiantes puedan seguir afinando el modelo propuesto, ya sea mediante la obtención de nuevos datos experimentales, el ajuste de parámetros del sistema o la incorporación de nuevas variables de proceso.

Esta posibilidad de mejora continua permite que el sistema evolucione progresivamente en términos de precisión y representatividad, reforzando su valor como herramienta de aprendizaje. De este modo, la planta didáctica no solo cumple una función experimental, sino que se transforma en una plataforma abierta de desarrollo, donde cada nuevo trabajo puede contribuir al perfeccionamiento del modelo y del sistema de control.



CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

El desarrollo del presente proyecto permitió abordar de manera efectiva la problemática de obsolescencia tecnológica del sistema de control de la planta didáctica De Lorenzo, mediante la implementación de un PLC Siemens S7-1200. Esta modernización permitió reemplazar un sistema limitado por una plataforma actual, robusta y alineada con los estándares de la automatización industrial, mejorando la confiabilidad operativa y la integración de los distintos elementos del proceso.

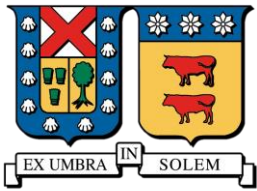
La incorporación del PLC posibilitó la adquisición y procesamiento de variables en tiempo real, así como la implementación de estrategias de control automático, destacando el uso de un controlador PID para la regulación de la temperatura. Esto permitió llevar a la práctica conceptos fundamentales del control de procesos en un entorno cercano a la realidad industrial.

Uno de los principales aportes del proyecto corresponde al desarrollo de un Gemelo Digital del lazo de temperatura, implementado directamente en el PLC. Este permitió replicar el comportamiento dinámico del sistema térmico y realizar comparaciones entre la respuesta real y la simulada. A partir de esto, se evidenció que el modelo logra representar de manera adecuada la tendencia y dinámica general del sistema, constituyendo una aproximación válida dentro de una etapa inicial de modelación.

Desde el punto de vista formativo, el proyecto permite transformar la planta en una herramienta de entrenamiento, donde los estudiantes pueden experimentar con la configuración de controladores PID y observar el comportamiento del sistema antes de aplicarlo en la planta física. Esto facilita una transferencia directa del aprendizaje y promueve un enfoque práctico en la enseñanza del control automático.

Si bien el modelo desarrollado corresponde a una aproximación simplificada, este cumple con el objetivo de representar el comportamiento del sistema de forma funcional. En este sentido, el proyecto deja una base sólida para futuros desarrollos, donde se recomienda continuar afinando el Gemelo Digital mediante nuevos datos experimentales y el ajuste de parámetros.

Finalmente, el trabajo realizado no solo moderniza el sistema de control, sino que también incorpora conceptos de la industria 4.0, tales como la simulación y la interacción entre sistemas físicos y digitales, transformando la planta didáctica en una plataforma de formación más completa y alineada con las necesidades actuales de la ingeniería.



REFERENCIAS

- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5ª ed.). Pearson Educación.
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle, F. J. (2011). *Process Dynamics and Control* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Siemens AG. (2020). *SIMATIC S7-1200 Programmable Controller System Manual*. Siemens.
- Siemens AG. (2021). *SIMATIC HMI Systems – User Manual*. Siemens.
- ISA (International Society of Automation). (2009). *Instrumentation, Systems, and Automation Handbook*. ISA.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6th ed.). John Wiley & Sons.
- Åström, K. J., & Murray, R. M. (2008). *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton University Press.
- Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., & Nee, A. Y. C. (2019). *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. Academic Press