

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS

**EVALUACIÓN DE LOS CONTROLADORES: PID Y
REGULADOR CUADRÁTICO LINEAL (LQR) APLICADO AL
MÓDULO DE CONTROL DE TEMPERATURA MCT-02**

PRESENTADO POR:

Br. LUCIA MAMANI CONDORI

Br. ROSSILDA HANCCO VARGAS

PARA OPTAR AL TÍTULO

PROFESIONAL DE INGENIERO

QUÍMICO

ASESOR:

Mgt. WILBER EULOGIO PINARES

GAMARRA

CUSCO – PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Mgt. WILBER EULOGIO PINARES GAMARRA
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: EVALUACIÓN DE LOS CONTROLADORES : PID Y
REGULADOR CUADRÁTICO LINEAL (LQR) APLICADO AL MÓDULO
DE CONTROL DE TEMPERATURA MCT-02

Presentado por: ROSSILDA HANCCO VARGAS DNI N° 76195216 ;
presentado por: LUCIA MANANI CONDORI DNI N°: 75176011
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO QUÍMICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 1 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 3 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 19 de JUNIO de 2026



.....
Firma

Post firma WILBER PINARES GAMARRA

Nro. de DNI 23879839

ORCID del Asesor 0000-0002-6008-1522

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:600383256

TESIS-EVALUACION DE LOS CONTROLADORES PID Y LQR PARA EL MODULO DE CONTROL DE TEMPERATURA.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:600383256

Fecha de entrega

15 jun 2026, 9:00 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

15 jun 2026, 9:04 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS-EVALUACION DE LOS CONTROLADORES PID Y LQR PARA EL MODULO DE CONTROL DE TEMP....pdf

Tamaño del archivo

6.7 MB

224 páginas

40.597 palabras

228.060 caracteres

3% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 25 palabras)

Fuentes principales

- 2%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
75 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

A mis padres Rosalia Vargas Ccapatinta y Roberto Hanco Escalante, por su amor incondicional, su esfuerzo constante y por haber estado siempre a mi lado, brindándome su apoyo y dándome las oportunidades necesarias para alcanzar mis metas profesionales. Su fortaleza y dedicación han sido mi mayor inspiración.

A mi hermana Corina, por ser mucho más que compañía; por celebrar conmigo cada pequeño avance y recordarme que los sueños se alcanzan paso a paso. Gracias por tu paciencia, tu apoyo y por ser una motivación constante en mi vida.

Este logro es tan mío como de ustedes.

Rossilda Hanco Vargas

A mi padre Eulogio Mamani Chalco y a mi madre Valentina Feliciano Condori Pocco, por su amor incondicional, su esfuerzo y los sacrificios que permitieron que hoy alcance este logro tan importante. Gracias por enseñarme a luchar por mis sueños y por acompañarme en cada paso de mi formación.

A mis hermanos, por ser mi apoyo constante, por su compañía, por su ánimo en los momentos difíciles y por recordarme siempre que no camino sola. Cada uno de ustedes ha sido una motivación para continuar y dar lo mejor de mí.

Este trabajo y este logro también les pertenecen.

Lucia Mamani Condori

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento al Ingeniero Wilbert Eulogio Pinares Gamarra y al Ingeniero Franklin Andree Salas Camacho, quienes desempeñaron un rol fundamental como asesores en el desarrollo de nuestra tesis. Su dedicación, acompañamiento constante y orientación profesional fueron esenciales para consolidar cada etapa de esta investigación.

Agradecemos profundamente sus observaciones, el tiempo brindado y la disposición para compartir sus conocimientos con claridad y paciencia. Gracias por motivarnos a mejorar, por guiarnos con rigor académico y por contribuir de manera significativa a nuestra formación profesional.

A ustedes, nuestro más profundo reconocimiento y gratitud.

INDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO I GENERALIDADES.....	5
1.1 Descripción del problema	5
1.2 Formulación del Problema	6
1.2.1 Problema General	6
1.2.2 Problemas Específicos.....	6
1.3 Justificación de la Investigación	7
1.4 Objetivos de la Investigación	9
1.4.1 Objetivo General	9
1.4.2 Objetivos Específicos	9
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	10
2.1 Antecedentes de la Investigación	10
2.2 Bases Teóricas.....	15
2.2.1 Transferencia de calor	15
2.2.2 Primera ley de la termodinámica.....	16
2.2.3 Sistemas cerrados y Balance de Energía en un Tanque de Calentamiento	16
2.2.4 Relación entre calor sensible y energía interna en el agua.....	18
2.2.5 Cambio de fase	19
2.2.6 Inercia térmica.....	19
2.2.7 Pérdidas de calor	20

2.2.8	Función de transferencia	22
2.2.9	Control Proporcional Integral y Derivativo (PID)	22
2.2.10	Control óptimo	25
2.2.11	Espacio de estados.....	25
2.2.12	Controlador Regulador Cuadrático Lineal (LQR).....	29
2.2.13	Desempeño frente a cambios de set point	34
2.2.14	Desempeño frente a perturbaciones	35
2.2.15	Características de desempeño.....	37
2.2.16	Efecto del tiempo muerto ($e - \theta s$).....	38
2.2.17	Modelado matemático para el control de procesos	40
2.2.18	Identificación de sistemas	45
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS		48
3.1	Muestra.....	48
3.2	Materiales, insumos y Equipos	48
3.2.1	Materiales	48
3.2.2	Insumos	48
3.2.3	Equipos.....	48
3.2.4	Softwares.....	66
3.3	Ámbito Espacial y Temporal	68
3.4	Diseño de la Investigación	68
3.5	Identificación de Variables	71
3.5.1	Variables para Proceso	71

3.5.2	Variables para control de Procesos	71
3.6	Métodos.....	71
3.6.1	Diagnóstico del Módulo de Control de Temperatura	71
3.6.2	Identificación del modelo del proceso usando el balance de energía.....	72
3.6.3	Identificación del modelo dinámico del Módulo de Control Temperatura MCT-02 usando la técnica de identificación de sistemas.....	74
3.6.4	Sintonización del controlador PID mediante la técnica de Ziegler-Nichols	80
3.6.5	Sintonización del controlador LQR.....	87
3.6.6	Evaluación del desempeño de los controladores PID y LQR	90
3.6.7	Comparación de los controladores PID y LQR, frente a cambios de set point y perturbaciones.....	91
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN		94
4.1	Resultados y discusión del diagnóstico del Módulo de Control de Temperatura .	94
4.2	Descripción del proceso de calentamiento	105
4.3	Determinación del modelo fenomenológico del proceso de calentamiento y balance de energía	107
4.4	Prueba de calentamiento del tanque 1	111
4.5	Resultados del modelo del proceso usando el balance de energía	117
4.6	Resultados del modelo dinámico del módulo de control de temperatura MCT-02 usando la técnica de identificación de sistemas.....	122
4.7	Comparación entre el modelo experimental, modelo teórico y modelo de referencia	128
4.8	Lazo de control cerrado para el proceso de calentamiento de agua	134

4.9	Resultados de sintonización del controlador PID para el Módulo de Control de Temperatura (mediante la técnica de Ziegler – Nichols)	135
4.9.1	Interfaz del sistema de control PID	135
4.9.2	Implementación del controlador PID en el LabVIEW	137
4.9.3	Obtención del valor de K_{cu} y P_u del controlador PID	143
4.9.4	Sintonización de los controladores PID, mediante la técnica de Ziegler Nichols	145
4.9.5	Respuesta de los controladores PI y PID.....	146
4.10	Resultados de sintonización del controlador LQR para el Módulo de Control de temperatura	148
4.10.1	Aproximación por PADE de primer orden de la función de transferencia	148
4.10.2	Conversión de función de transferencia equivalente al espacio estados	149
4.10.3	Discretización de las matrices A, B, C, D	152
4.10.4	Determinación de las matrices Q y R.....	152
4.10.5	Ganancia del controlador LQR discreto	152
4.10.6	Normalización de la referencia (N_{bar}).....	153
4.10.7	Observador discreto.....	153
4.10.8	Simulación del controlador LQR discreto.....	153
4.10.9	Implementación del controlador LQR.....	154
4.10.10	Respuesta del controlador LQR	157
4.11	Discusión de los resultados de la respuesta de los controladores PI, PID y LQR	158
4.11.1	Características de la respuesta de los controladores PI, PID Y LQR	158

4.11.2	Análisis de error de la respuesta de los controladores PI, PID y LQR.....	160
4.11.3	Análisis energético acumulado de los controladores PI, PID y LQR	162
4.12	Resultados y discusión de la comparación de los controladores PI y LQR, frente a cambios de set point y perturbaciones en el sistema	164
4.12.1	Resultados discusión de la comparación de los controladores PI y LQR frente a cambios de set point	165
4.12.2	Resultados y discusión de la comparación de los controladores PI y LQR frente a perturbaciones del sistema.	179
CONCLUSIONES		186
RECOMENDACIONES		189
REFERENCIAS		191
APENDICE		195
ANEXOS		203

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de lazo cerrado para un controlador PID.....	23
Figura 2 Sistema Regulador Cuadrático Lineal.....	31
Figura 3 Servosistema de tipo 1 cuando la planta tiene un integrador.	32
Figura 4 Respuesta del lazo de control (girado para la respuesta del set point).....	34
Figura 5 Respuesta del Proceso: Seguimiento del Punto de Ajuste.	35
Figura 6 Rechazo de perturbaciones.....	36
Figura 7 Respuesta del lazo de control (ajustado a las perturbaciones del proceso).....	36
Figura 8 Características de la respuesta al escalón.....	37
Figura 9 La aproximación de Pade para un sistema de primer orden con retardo temporal.	40
Figura 10 Clasificación de los Modelo.....	41
Figura 11 Respuesta de procesos autorregulables y procesos integradores.	44
Figura 12 Esquema de la identificación de Sistemas.	46
Figura 13 Diagrama de bloques del circuito abierto.	47
Figura 14 Módulo de Control de Temperatura MCT-02.....	49
Figura 15 Bomba eléctrica (PP-01)	52
Figura 16 Bomba eléctrica (PP-02)	53
Figura 17 Radiador.....	54
Figura 18 Sensor de temperatura.....	55
Figura 19 Válvula de control con actuador motorizado	56
Figura 20 Medidor de caudal tipo paleta giratorio	57
Figura 21 Sensor y alarma de nivel, interruptor plástico de nivel.....	59
Figura 22 Tanque de recogida de agua (TK-1)	59
Figura 23 Tanque de enfriamiento (TK-2)	60
Figura 24 Resistencia	60

Figura 25 Variador de velocidad para motores asincrónicos-ATV 12.....	61
Figura 26 Variador de velocidad para motores asincrónicos-ATV 11.....	62
Figura 27 Guardamotor	63
Figura 28 NI cRIO-9063 – Controlador CompactRIO Integrado	64
Figura 29 Llaves termomagnéticas.....	65
Figura 30 Crydom D2410 – Relé de Estado Sólido (SSR)	66
Figura 31 Sección del plano del sistema de control de temperatura resaltando el tanque 1	69
Figura 32 Ventana System Identification de Matlab.....	76
Figura 33 Pestaña de Time Domain Signals.....	77
Figura 34 Sección de Estimación y la opción Process Models	78
Figura 35 Pestaña Process Models.	79
Figura 36 Diagrama de lazo de control cerrado para un controlador PID en el Simulink.	80
Figura 37 Ventana de Solver de Simulink.....	81
Figura 38 Ventana de Data Import/Export de Simulink.....	82
Figura 39 Control de proceso de calentamiento mediante un controlador PID	84
Figura 40 Bloque de control PID en LabVIEW	85
Figura 41 Diagrama Esquemático del Balance de Energía para un Sistema de Calentamiento en Tanque Agitado	108
Figura 42 Datos de la prueba 3.....	122
Figura 43 Datos de la prueba 3 en formato tabla.....	123
Figura 44 Grafica inicial de la prueba 3	124
Figura 45 Importación de los datos de calentamiento	125

Figura 46 Parámetros estimados para el modelo integrador con tiempo muerto (P0DI)	125
Figura 47 Modelo estimado en la sección Import models	126
Figura 48 Porcentaje de ajuste del modelo identificado, tomando como referencia el “Idendata”	127
Figura 49 Parámetros de la función de transferencia del modelo P0DI	128
Figura 50 Diagrama de lazo de control para el proceso de calentamiento del agua del tanque 1	135
Figura 51 Panel Frontal Del Programa Para El Sistema De Control PID Del Módulo De Temperatura En LabVIEW	136
Figura 52 Diagrama de bloques de la secuencia 1	138
Figura 53 Diagrama de bloques de la secuencia 2	140
Figura 54 Diagrama de bloques de la secuencia 3	141
Figura 55 Diagrama de bloques de la secuencia 4	142
Figura 56 Interfaz del controlador PWM	143
Figura 57 Diagrama de lazo cerrado para el modelo P0DI	144
Figura 58 Respuesta de oscilación continua del Módulo de Control de Temperatura	144
Figura 59 Simulación con referencia constante de 50 °C	154
Figura 60 Panel Frontal Del Programa Para El Sistema De Control LQR Del Módulo De Temperatura En LabVIEW	155
Figura 61 Diagrama de implementación del controlador LQR discreto, estimación de estados mediante observador y generación de la señal PWM en LabVIEW	156

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Ajuste del controlador Ziegler-Nichols de circuito cerrado (ciclado).....	24
Tabla 2 Características de la respuesta al escalón	38
Tabla 3 Variables de entrada de bloque PID de LabVIEW	85
Tabla 4 Variables de salida del bloque PID de LabVIEW	86
Tabla 5 Valores para generar cambios de set point	91
Tabla 6 Evaluación del error en la medición de temperatura entre el sistema TK-1 y un instrumento de referencia	94
Tabla 7 Análisis comparativo del caudal medido por el sistema de control y el flujómetro en función de la apertura de la válvula	95
Tabla 8 Análisis comparativo de la frecuencia de operación en bombas controladas por variadores de velocidad (ATV) y su discrepancia con el panel de control	95
Tabla 9 Comparación general de desempeño	101
Tabla 10 Ventajas, desventajas y limitaciones	102
Tabla 11 Aplicación en procesos térmicos, industria y variables.....	103
Tabla 12 Determinación de la potencia térmica efectiva, calor perdido y eficiencia del sistema en función de la pendiente de calentamiento.....	115
Tabla 13 Parámetros de operación y propiedades del fluido para el análisis térmico del sistema	120
Tabla 14 El modelo P0DI y sus parámetros	128
Tabla 15 Cuadro comparativo de funciones de transferencia.....	130
Tabla 16 Parámetros de sintonización para los controladores PID y PI.....	145
Tabla 17 Parámetros de sintonización de los controladores PID convertidos para su implementación en LabVIEW	146
Tabla 18 Características de las respuestas de los controladores.....	158
Tabla 19 Criterio de error para los controladores PID, PI y LQR.....	162

Tabla 20 Características de los métodos sintonizados frente al primer cambio de set point 55°C	168
Tabla 21 Características de los métodos sintonizados frente al segundo cambio de set point 40°C	170
Tabla 22 Características de los métodos sintonizados frente al tercer cambio de set point 60°C	172
Tabla 23 Características de los métodos sintonizados frente al cuarto cambio de set point 55°C	175
Tabla 24 Criterio de error para los controladores PI y LQR	177
Tabla 25 Condiciones del agua de perturbación.....	179
Tabla 26 Características de los métodos sintonizados frente a perturbaciones	184

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1 Datos de la primera prueba de calentamiento del tanque 1 del módulo de control de temperatura	112
Gráfica 2 Sistema de calentamiento completo con comportamiento lineal y constante.	113
Gráfica 3 Datos de la segunda y tercera prueba de calentamiento del tanque 1 del módulo de control de temperatura	114
Gráfica 4 Respuesta de los controladores PI y PID para un set point de 50°C para el Módulo de Control de Temperatura	147
Gráfica 5 Respuesta escalón para la función de transferencia original (P0D1) y equivalente (aproximación de PADE).....	149
Gráfica 6 Respuesta del controlador LQR discreto para un set point de 50 °C.....	157
Gráfica 7 Señal de error de los controladores PI, PID y LQR	160
Gráfica 8 Cambios de set point	166
Gráfica 9 Respuesta del controlador PI y LQR para el primer cambio de set point 55°C	167
Gráfica 10 Respuesta del controlador PI y LQR para el segundo cambio de set point 40°C	169
Gráfica 11 Respuesta del controlador PI y LQR para el tercer cambio de set point 60°C	171
Gráfica 12 Respuesta del controlador PI y LQR para el cuarto cambio de set point 55°C	174
Gráfica 13 Señal de error de los controladores PI y LQR frente a cambios de set point	176
Gráfica 14 Respuesta del controlador PI frente a perturbaciones	181

Gráfica 15 Recorte de la respuesta de la temperatura del tanque 1, desde que se inicia la perturbación.....	183
--	-----

RESUMEN

El control de la temperatura es una variable fundamental en los procesos de transferencia de calor debido a su impacto en la calidad del producto, la eficiencia energética y la estabilidad operativa. En este contexto, el Módulo de Control de Temperatura MCT-02 presenta una dinámica compleja, caracterizada por alta inercia térmica y tiempo muerto, lo que dificulta su regulación precisa.

El objetivo de este trabajo fue modelar, diseñar e implementar estrategias de control para optimizar el proceso de calentamiento de agua en el tanque TK-1. Inicialmente, se diagnosticó el sistema, identificándose su operación en modo manual, se desarrolló un modelo matemático mediante balances de energía e identificación experimental, obteniéndose una representación adecuada del comportamiento real del proceso.

Con base en este modelo, se diseñaron controladores PI, PID y LQR, evaluados bajo una referencia fija de 50 °C. Los resultados mostraron que el controlador LQR presentó el mejor desempeño, con mayor estabilidad, menor error en estado estacionario y menor oscilación. El controlador PI obtuvo resultados aceptables, aunque con mayor tiempo de establecimiento y sobreimpulso, mientras que el PID mostró un desempeño intermedio.

Posteriormente, los controladores PI y LQR fueron evaluados ante cambios de referencia y perturbaciones externas. El LQR mantuvo un desempeño superior, con respuesta más rápida, menor error acumulado, mejor rechazo de perturbaciones y transiciones más suaves. En conclusión, el controlador LQR demostró ser la estrategia más adecuada para sistemas térmicos complejos.

Palabras claves: Control de temperatura, Controlador PID, Controlador LQR, Identificación de sistemas.

ABSTRACT

Temperature control is a fundamental variable in heat transfer processes due to its impact on product quality, energy efficiency, and operational stability. In this context, the MCT-02 Temperature Control Module presents a complex dynamic characterized by high thermal inertia and dead time, which hinders its precise regulation.

The objective of this work was to model, design, and implement control strategies to optimize the water heating process in the TK-1 tank. Initially, the system was diagnosed, identifying its operation in manual mode; then, a mathematical model was developed through energy balances and experimental identification, obtaining an adequate representation of the real behavior of the process.

Based on this model, PI, PID, and LQR controllers were designed and evaluated under a fixed reference of 50 °C. The results showed that the LQR controller presented the best performance, with greater stability, lower steady-state error, and less oscillation. The PI controller achieved acceptable results, although with longer settling time and overshoot, while the PID showed an intermediate performance.

Subsequently, the PI and LQR controllers were evaluated against reference changes and external disturbances. The LQR maintained superior performance, with a faster response, lower cumulative error, better disturbance rejection, and smoother transitions. In conclusion, the LQR controller proved to be the most suitable strategy for complex thermal systems.

Keywords: Temperature control, PID controller, LQR controller, System identification.

INTRODUCCIÓN

El control de la temperatura es un aspecto fundamental en los procesos industriales que involucran transferencia de calor, debido a su impacto directo en la calidad del producto, la eficiencia energética y la estabilidad operativa del sistema. Sin embargo, los sistemas térmicos presentan características dinámicas complejas, como alta inercia térmica y la presencia de tiempo muerto, lo que dificulta su regulación precisa mediante estrategias de control convencionales.

En este contexto, el Módulo de Control de Temperatura MCT-02 constituye una plataforma representativa para el estudio de procesos térmicos. No obstante, su operación en modo manual limita el desempeño del sistema, generando oscilaciones, errores en la regulación y una alta dependencia del operador, lo que evidencia la necesidad de implementar estrategias de control automático que permitan mejorar su funcionamiento.

El presente trabajo tiene como objetivo el modelamiento, diseño e implementación de estrategias de control aplicadas al proceso de calentamiento de agua en el tanque TK-1. Para ello, se desarrolla un modelo matemático del sistema mediante un enfoque teórico basado en balances de energía y un enfoque experimental utilizando técnicas de identificación de sistemas, con el fin de obtener una representación adecuada de la dinámica del proceso.

A partir del modelo obtenido, se diseñan tres estrategias de control: PI, PID y LQR. Inicialmente, se realiza una evaluación comparativa de los tres controladores bajo condiciones de regulación a una referencia fija de 50 °C, con el propósito de analizar su desempeño en términos de estabilidad, error y eficiencia energética. Posteriormente, se seleccionan los controladores PI y LQR para ser evaluados en condiciones más

exigentes, incluyendo cambios de set point y perturbaciones externas, con el fin de analizar su capacidad de seguimiento y robustez.

De esta manera, el estudio busca aportar criterios técnicos para la selección de estrategias de control adecuadas en sistemas térmicos con dinámica compleja, destacando la importancia del uso de técnicas basadas en modelos para mejorar el desempeño, la eficiencia energética y la confiabilidad en aplicaciones industriales.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 Descripción del problema

En sectores industriales como el alimentario, farmacéutico, paplero y petroquímico, numerosos procesos productivos dependen de sistemas de transferencia de calor, donde el control preciso de la temperatura es fundamental para garantizar la calidad del producto y la estabilidad operativa. Equipos como intercambiadores de calor, módulos de calentamiento y sistemas de acondicionamiento térmico requieren operar dentro de rangos específicos de temperatura, ya que desviaciones pueden generar pérdidas de eficiencia, deterioro del producto final y un incremento en el consumo energético.

Desde el punto de vista del proceso, los sistemas térmicos presentan dinámicas complejas asociadas a la transferencia de calor, acumulación de energía y pérdidas hacia el entorno. Estas características introducen fenómenos como la inercia térmica y retardos de transporte, los cuales dificultan la respuesta del sistema ante cambios en las condiciones de operación, tales como variaciones en el flujo de energía o perturbaciones externas.

En el Laboratorio de Control de Procesos de la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco se dispone del Módulo de Control de Temperatura MCT-02, utilizado para el estudio de procesos térmicos. El funcionamiento de este equipo se basa en el calentamiento de un flujo de agua mediante una resistencia eléctrica bajo el principio del efecto Joule, donde la transferencia de calor ocurre principalmente por convección forzada. Esta configuración da lugar a un sistema con alta inercia térmica y un retardo de transporte significativo debido a la separación física entre el elemento calefactor y el sensor de temperatura.

Adicionalmente, se determinó que el módulo no cuenta con un sistema de control operativo, debido a la obsolescencia de su interfaz original, lo que impide la ejecución de algoritmos de regulación en tiempo real. Esta condición limita la capacidad del sistema para mantener la temperatura en un valor de referencia, afectando directamente el desempeño del proceso térmico.

Como consecuencia de estas limitaciones, el sistema presenta oscilaciones, errores en estado estacionario y una baja eficiencia energética, evidenciando la necesidad de analizar su comportamiento dinámico y desarrollar estrategias que permitan mejorar su estabilidad y desempeño.

En este contexto, se plantea la implementación de técnicas de control que, basadas en el entendimiento del proceso térmico, permitan reducir los efectos de la inercia y el tiempo muerto, logrando una regulación más precisa y eficiente de la temperatura.

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema General

¿El controlador LQR se desempeña más eficientemente que el controlador PID en el Módulo de Control de Temperatura MCT-02?

1.2.2 Problemas Específicos

- ¿Cuál es el modelo dinámico del Módulo de Control de Temperatura MCT-02 usando la técnica de identificación de sistema?
- ¿Cómo será la sintonización del controlador PID mediante la técnica de Ziegler-Nichols, para el Módulo de Control de Temperatura MCT-02?
- ¿Cómo será la sintonización del controlador LQR para el Módulo de Control de Temperatura MCT-02?

- ¿Tendrá un mejor desempeño el controlador LQR que el controlador PID, frente a cambios de set point y perturbaciones del sistema?

1.3 Justificación de la Investigación

Los procesos industriales tienen como objetivo la obtención de productos que cumplan con características, especificaciones y estándares de calidad previamente establecidos. Para ello, es indispensable mantener condiciones de operación controladas, siendo la temperatura una de las variables más críticas en los procesos de transferencia de calor. Su adecuada regulación no solo garantiza la calidad del producto final, sino que también influye directamente en la seguridad, eficiencia energética y confiabilidad del sistema.

Desde el punto de vista dinámico, los sistemas térmicos presentan un comportamiento inherentemente complejo, caracterizado por fenómenos de acumulación de energía, pérdidas de calor hacia el entorno y la presencia de retardos asociados al transporte y a la inercia térmica. Estas características dificultan el mantenimiento de condiciones estables de operación, especialmente cuando el sistema es operado sin una estrategia de control adecuada. En este contexto, la ausencia de mecanismos de regulación automática, como se evidenció en el diagnóstico del módulo, limita significativamente el desempeño del proceso.

En particular, la operación manual del sistema introduce variabilidad, reduce la precisión en el control de la temperatura y dificulta la respuesta ante perturbaciones, lo que puede derivar en sobreimpulsos, oscilaciones o tiempos prolongados de estabilización. Estas deficiencias no solo afectan la calidad del proceso, sino que también incrementan el consumo energético y el desgaste de los equipos, generando ineficiencias operativas.

Ante esta problemática, resulta fundamental implementar estrategias de control que permitan regular de manera automática y continua la temperatura del sistema, mejorando su comportamiento dinámico y garantizando condiciones de operación más estables y eficientes. En este sentido, el uso de técnicas de control como el controlador PID, ampliamente utilizado en la industria por su simplicidad y efectividad, y el controlador LQR, basado en control óptimo, representa una alternativa viable para abordar las limitaciones identificadas.

La relevancia de la presente investigación radica en la evaluación comparativa del desempeño de estas estrategias de control aplicadas al Módulo de Control de Temperatura MCT-02, con el objetivo de determinar su capacidad para mejorar la estabilidad, optimizar la respuesta transitoria y garantizar un adecuado seguimiento de la consigna. Este análisis permitirá establecer criterios técnicos para la selección de métodos de control adecuados en sistemas térmicos con características similares.

Asimismo, la implementación de un sistema de control automático contribuye a la optimización del uso de los recursos energéticos, reduciendo pérdidas innecesarias y mejorando la eficiencia global del proceso. De igual manera, disminuye la dependencia de la intervención del operador, favoreciendo la repetibilidad y estandarización de las condiciones de operación.

Finalmente, esta investigación aporta al entendimiento del comportamiento dinámico de sistemas térmicos y al desarrollo de soluciones de control que permitan mejorar su desempeño. Los resultados obtenidos no solo tienen aplicación en el ámbito académico, sino que también pueden ser extrapolados a entornos industriales, contribuyendo al diseño de sistemas más eficientes, robustos y energéticamente optimizados.

1.4 Objetivos de la Investigación

1.4.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño del controlador PID y del controlador LQR aplicado al Módulo de Control de Temperatura MCT-02.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Obtener el modelo dinámico del Módulo de Control Temperatura MCT-02 usando la técnica de identificación de sistemas.
- Sintonizar el controlador PID mediante la técnica de Ziegler – Nichols para el modelo del Módulo de Control de Temperatura MCT-02.
- Sintonizar el controlador LQR para el modelo del Módulo de Control de Temperatura MCT-02.
- Comparar el desempeño del controlador PID y controlador LQR, frente a cambios de set point y perturbaciones del sistema.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la Investigación

Álvarez et al., (2020, pp. 41-49), estudiaron el “*Control de temperatura en intercambiadores de calor tipo coraza-tubo: una revisión realizada a la industria*”, en el campo de la ingeniería de control de los intercambiadores de calor. Mencionan que para un adecuado control de la temperatura del producto se emplean diversas estrategias de control tales como: control FeedForward, control FeedBack, control cascada y control por derivación, que actúa sobre la válvula control para regular el flujo del intercambiador. Hace referencia a la metodología analítica y experimental para la identificación de procesos. La identificación se basa en la observación de datos experimentales a los cuales se aproxima a un modelo matemático a la respuesta. Mencionan que las industrias, en su mayoría emplean el controlador PID sintonizado con el método Ziegler-Nichols, pero su uso puede ocasionar poca robustez debido a altas ganancias del controlador y del pobre amortiguamiento, debido a esto, su uso no es apropiado para procesos no lineales o de tiempos muertos. Los autores sugieren que las técnicas de control clásicas, robustas e inteligentes se comprueben en plantas piloto o industriales que impliquen los retos reales de implementación.

Mohammadi Asl et al., (2019, pp. 5143-5155), en su trabajo “Controlador PID y LQR combinado que utiliza reglas difusas optimizadas”, proponen una combinación de los controladores PID y el Regulador Cuadrático Lineal (LQR). Para ello, se propusieron un sistema de conmutación basado en la lógica difusa para ver su función con cada controlador. Los errores y sobre impulsos del controlador PID son bajos en comparación con los controladores LQR, pero el tiempo de subida y el tiempo de ajuste del controlador LQR son bajos que el controlador PID. Como ambos controladores

presentan ventajas aceptables, realizaron una combinación de LQR-PID en un sistema control. Como conclusión, los autores señalan que el controlador LQR-PID mantienen el sistema estable, con una alta exactitud.

Kesavan et al., (2018, pp. 578-581), en su publicación “*Optimización y control paramétrico de intercambiadores de calor mediante controlador cuadrático lineal y controlador matricial dinámico*”, controlaron la temperatura de salida en un intercambiador de calor, evaluando el rendimiento del control mediante el Regulador Cuadrático Lineal (LQR) y el Controlador Matricial Dinámico (DMC). Con los datos experimentales de entrada y salida, y mediante la técnica de identificación de sistemas encontraron el modelo de espacio de estado. Para el diseño del control LQR emplearon la ecuación de Riccati y para el controlador DMC determinaron mediante el método de ajuste dado por Cooper y Shridhar. Ambos controladores se simularon en el software de MATLAB, encontrando el tiempo de subida para el DMC y el LQR, el sobreimpulso el tiempo de estabilización. Los resultados sugieren que el DMC es más eficiente para procesos no lineales y de alta constante de tiempo.

Oravec, et al., (2018) en su estudio “*Control predictivo de modelos robustos y control PID de intercambiadores de calor de carcasa y tubos*”. Los autores utilizaron el control avanzado con el propósito de optimizar el rendimiento del sistema, considerando que la acumulación de suciedad afecta el funcionamiento de los intercambiadores y genera variaciones en sus parámetros. Dichas variaciones, al ser consideradas como incertidumbres paramétricas, justifican el uso de un MPC robusto, ya que este permite gestionar procesos sometidos a condiciones inciertas. Incorporaron la acción integral en el MPC robusto asegurando respuestas de control sin desfase. Los resultados que obtuvieron a partir de estudios de simulación, en los que compararon el desempeño del MPC robusto con acción integral frente al control proporcional-integral-

derivado (PID), mostraron una mejora significativa en la calidad del control, así como un ahorro energético en el funcionamiento de los intercambiadores tubulares.

Rawat et al., (2017, pp. 561-567) en su trabajo “*Técnica de diseño LQR y PID para un sistema de control de temperatura de un horno eléctrico*”, diseñaron un controlador Regulador Cuadrático Lineal (LQR) y un controlador PID, para controlar la temperatura de un horno eléctrico. Utilizaron el programa MATLAB para realizar las simulaciones. Para el controlador PID emplearon los métodos de sintonización de Ziegler–Nichols y Tyreus–Luyben, obteniendo los parámetros: K_p , K_i y K_d . En el caso del controlador LQR, primero definieron el modelo de estado mediante el par de matrices (A, B) y, a partir de la formulación del regulador cuadrático lineal, calcularon la ganancia K que asegura la estabilización del sistema y el desempeño deseado. En ambos casos evaluaron indicadores de desempeño, como el sobreimpulso y el tiempo de estabilización. Los resultados sugieren que el controlador LQR presenta un sobreimpulso menor en comparación con el PID, lo que implica que la temperatura máxima alcanzada por el horno es más baja. Además, el tiempo de estabilización también es más favorable con el LQR, evidenciando un mejor rendimiento global frente al controlador PID.

Maquilón & Sandoya, (2019), en su artículo “*Diseño e implementación de un sistema de control avanzado para regular la temperatura y velocidad de un túnel de viento*”, el túnel de viento (planta didáctica) presenta como variables a controlar la temperatura y velocidad, los cuales son fundamentales para el proceso de secado de granos. Los datos que obtuvieron experimentalmente, lo procesaron y analizaron en el software MATLAB, identificando el modelo matemático que representa al sistema y con la herramienta SIMULINK diseñaron el control PID y LQR. Asumieron que el flujo en el túnel de viento es laminar, ya que no presentó turbulencia. Trataron al sistema

identificado como una caja negra y evidenciaron que el controlador PID tiene mejor desempeño ante cambios en la referencia y perturbaciones, a comparación con el LQR.

Delatore et al., (2016, pp. 133-143), en su estudio “*Control óptimo multivariable de una red de intercambiadores de calor con derivaciones*”, aplicaron una técnica de control óptimo de retroalimentación, el Regulador Cuadrático Lineal (LQR), a una red de intercambiadores a escala de laboratorio conformada por dos intercambiadores de calor, con dos corrientes calientes y una corriente fría. Definieron el arreglo físico de los intercambiadores, así como las variables manipuladas (posición de las válvulas de derivación), las variables controladas (temperatura intermedia y temperatura de salida de la corriente fría) y las variables perturbadas (temperaturas de entrada de las corrientes calientes, caudal y temperatura de la corriente fría). Realizaron tres pruebas experimentales para la evaluación del sistema de control. En la primera, se introdujo una perturbación en la temperatura de entrada de la corriente caliente. En la segunda, destinada al análisis de los problemas servo y regulatorio, se incrementó el caudal de la corriente fría. En la tercera prueba, la perturbación se aplicó en el caudal de la corriente fría. Los resultados mostraron el esfuerzo de control de los tres controladores implementados (LQR, PID y desacoplador dinámico), cuyo desempeño lo evaluaron mediante el Índice de Error Absoluto (IAE) y el análisis evidenció que el LQR presentó un mejor rendimiento frente a los problemas de regulación y servo.

Essahafi & Ait Lafkih, (2014), estudiaron “*Evaluación del rendimiento de los controladores PID, LQR y de colocación de polos para intercambiadores de calor*”, presentaron el control de la temperatura en un intercambiador de calor mediante la comparación de tres controladores: LQR, PID y de Colocación de Polos. Realizaron el modelado del sistema, la descripción de los algoritmos de los tres controladores mediante modelos en espacio de estados y la simulación. Los resultados evidenciaron

que los tres controladores son adecuados para su implementación en el control de temperatura. No obstante, el método LQR evidenció un mejor desempeño en relación con el PID y la Colocación de Polos, al proporcionar una respuesta más rápida y con menores sobreimpulsos.

Estrada, F. (2017) en su tesis denominada “*Identificación del modelo de planta para el diseño de un sistema de control en lazo cerrado de un intercambiador de calor*” estudió y elaboró el modelo matemático de un intercambiador de calor del laboratorio de Control y Automatización de la Sección Electricidad y Electrónica de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Realizó el modelamiento mediante pruebas experimentales, utilizando el método de Identificación de Sistemas para obtener un modelo matemático que describa el comportamiento de la planta. Primeramente, aplicó técnicas de Identificación No Paramétrica. Posteriormente, esta información la empleó para planificar el experimento de Identificación Paramétrica, para determinar las características dinámicas de la planta. Para el diseño de la señal de entrada, la estimación de modelos y la validación, empleó comandos de MATLAB a través de la Toolbox de Identificación de Sistemas. Asimismo, desarrolló el diseño del sistema de control en lazo cerrado para el modelo obtenido, en el cual implementó dos controladores: PID y PID con Predictor de Smith.

Salas-Camacho, F. (2017). En su tesis “*Sistema de control en un intercambiador de calor de doble tubo*”. Obtuvo un modelo de la función de transferencia del proceso por el método de caja negra empleando las señales de entrada y salida del intercambiador de calor de doble tubo, haciendo uso del método de System Identification Toolbox de MATLAB y para la adquisición de las señales de los sensores de flujo y temperatura una tarjeta Arduino. Para la sintonización de los controladores P, PI y PID, utilizó el método de la ganancia última de Ziegler – Nichols. Para una mejor

comprensión del proceso de transferencia de calor empleó el software LabVIEW para el diseño del sistema SCADA, integrando la adquisición de datos, el control del proceso, y la supervisión de las variables del proceso.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Transferencia de calor

En la transmisión de calor por convección ocurre cuando el fluido está en movimiento constante, pero cuando el fluido está sin movimiento existe transferencia de calor por conducción. Por lo tanto, la conducción en un fluido se puede concebir como el caso límite de la convección correspondiente al caso del fluido en reposo (Cengel & Ghajar, 2011).

La transferencia de calor por convección comprende el movimiento del fluido y la conducción de calor. Cuando el fluido está en movimiento existe una mejora en la transferencia de calor, ya que, las porciones calientes y frías del fluido se ponen en contacto, lo que genera un alto índice de conducción. Haciendo que la velocidad de transferencia de calor sea mucho más alta por convección que por conducción en un fluido. De hecho, entre más alta es la velocidad del fluido, mayor es la velocidad de la transferencia de calor (Cengel & Ghajar, 2011).

La transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa de manera conveniente por la ley de Newton de enfriamiento. El coeficiente de transferencia de calor por convección “ h ” se puede definir como la razón de la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de área superficial por unidad de diferencia en la temperatura (Cengel & Ghajar, 2011).

2.2.2 Primera ley de la termodinámica

La energía puede existir en múltiples formas, incluyendo trabajo, energía cinética, potencial, interna, calor, así como otras como energía superficial, eléctrica o magnética. La primera ley de la termodinámica generaliza la conservación de la energía mecánica, estableciendo que, aunque la energía puede transformarse de una forma a otra, la cantidad total de energía permanece constante. Formalmente, cuando la energía desaparece en una forma, surge simultáneamente en otra (Smith, Abbott, & M., 2007).

Al analizar un proceso, se distingue entre sistema y alrededores: el sistema es la región donde ocurre el proceso, mientras que los alrededores son todo aquello con lo que el sistema interactúa. Las fronteras del sistema pueden ser reales o imaginarias, rígidas o flexibles, y su estudio permite aplicar las ecuaciones termodinámicas de manera precisa (Smith, Abbott, & M., 2007).

En términos matemáticos, la primera ley se expresa como:

$$\Delta E_{sistema} + \Delta E_{alrededores} = 0 \quad (1)$$

donde Δ indica un cambio finito en la energía. El sistema puede experimentar variaciones en su energía interna, potencial o cinética, y estas energías pueden almacenarse en la materia. Por otro lado, calor y trabajo representan energía en tránsito entre el sistema y sus alrededores, sin almacenarse en el sistema (Smith, Abbott, & M., 2007).

Esta ley permite desarrollar ecuaciones especializadas para aplicaciones prácticas, constituyendo la base para el análisis energético de procesos en ingeniería y termodinámica aplicada (Smith, Abbott, & M., 2007).

2.2.3 Sistemas cerrados y Balance de Energía en un Tanque de Calentamiento

En termodinámica, un sistema cerrado es aquel que no intercambia materia con sus alrededores, por lo que su masa permanece constante. Este tipo de sistema es

adecuado para describir procesos batch, como el calentamiento de agua en un tanque, donde no existen flujos de entrada ni salida durante la operación (Smith, Abbott, & M., 2007).

En el caso de un tanque agitado con resistencia eléctrica, el sistema está constituido por el fluido contenido en el tanque. La ausencia de flujo de masa implica que no existe transporte de energía asociado a corrientes, por lo que el intercambio energético con los alrededores ocurre únicamente en forma de calor y trabajo.

El suministro de energía al sistema se realiza principalmente a través de la resistencia eléctrica, la cual transfiere energía en forma de calor al fluido.

Adicionalmente, el agitador introduce energía mecánica en forma de trabajo, favoreciendo la mezcla y la distribución uniforme de la temperatura dentro del tanque.

Bajo estas condiciones, según (Smith, Abbott, & M., 2007) la primera ley de la termodinámica para un sistema cerrado se expresa como:

$$\Delta E_{sistema} = Q + W \quad (2)$$

Sin embargo, en este tipo de proceso, los cambios en la energía cinética y potencial son despreciables, por lo que la variación de energía del sistema se manifiesta principalmente como un cambio en la energía interna del fluido. Por ello, el balance de energía se simplifica a:

$$\Delta U = Q + W \quad (3)$$

donde Q representa el calor suministrado por la resistencia eléctrica y W corresponde al trabajo del agitador sobre el sistema.

Para un análisis más detallado del proceso dinámico de calentamiento, la ecuación puede expresarse en forma diferencial:

$$dU = dQ + dW \quad (4)$$

Este balance permite describir cómo la energía suministrada al sistema incrementa la temperatura del fluido, siendo la base para el modelado dinámico del proceso de calentamiento en tanques agitados y el posterior diseño de estrategias de control de temperatura (Smith, Abbott, & M., 2007).

2.2.4 Relación entre calor sensible y energía interna en el agua

En termodinámica, el **calor sensible** se define como la energía transferida a una sustancia que produce un cambio en su temperatura sin que ocurra un cambio de fase. Este concepto es fundamental en el análisis de procesos de calentamiento de líquidos, como el agua, especialmente en sistemas cerrados donde no existe intercambio de masa con los alrededores (Smith, Abbott, & M., 2007).

La cantidad de calor sensible transferido a una sustancia se expresa mediante la relación:

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad (5)$$

donde “Q” es el calor transferido, “m” la masa del fluido, “c” el calor específico y “ ΔT ” el cambio de temperatura. Esta ecuación establece que el incremento de temperatura es proporcional a la energía suministrada al sistema (Smith, Abbott, & M., 2007).

Desde el punto de vista termodinámico, en un sistema cerrado donde no existen cambios significativos de energía cinética ni potencial, el calor transferido al sistema se traduce directamente en una variación de la **energía interna**. Por lo tanto, se cumple que:

$$\Delta U = Q \quad (6)$$

Al combinar ambas expresiones, se obtiene:

$$\Delta U = m \times c \times \Delta T \quad (7)$$

Esta ecuación indica que el cambio en la energía interna del agua es directamente proporcional a la variación de su temperatura, siendo el calor específico una propiedad que determina la capacidad del fluido para almacenar energía térmica (Smith, Abbott, & M., 2007).

El agua presenta un alto valor de calor específico, lo que implica que puede absorber o liberar grandes cantidades de energía con cambios relativamente pequeños de temperatura. Esta característica es relevante en sistemas de calentamiento, ya que influye en la dinámica del proceso y en la respuesta térmica del sistema.

Para el análisis de procesos transitorios, esta relación puede expresarse en forma diferencial como:

$$\frac{dU}{dt} = m \times c \times \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

lo que permite describir la evolución temporal de la energía interna en función de la variación de la temperatura, constituyendo la base para el modelado matemático de sistemas térmicos y el diseño de estrategias de control (Smith, Abbott, & M., 2007).

2.2.5 Cambio de fase

El cambio de fase es el proceso mediante el cual una sustancia pasa de un estado físico a otro, como de sólido a líquido, de líquido a vapor o viceversa, debido a la transferencia de energía térmica. A diferencia del calentamiento por calor sensible, durante un cambio de fase la temperatura permanece constante, mientras la sustancia absorbe o libera energía (Smith, Abbott, & M., 2007).

2.2.6 Inercia térmica

La inercia térmica es la propiedad de un sistema para resistir cambios en su temperatura cuando se le aplica o se le retira energía térmica. Esta característica está directamente relacionada con la capacidad del sistema para almacenar energía interna,

dependiendo principalmente de su masa y de su calor específico (Smith, Abbott, & M., 2007).

Matemáticamente, la inercia térmica puede asociarse al producto: $m \times c$

donde:

- m es la masa del sistema,
- c es el calor específico de la sustancia.

Este producto representa la cantidad de energía necesaria para producir un cambio de temperatura en el sistema. Cuanto mayor sea este valor, mayor será la inercia térmica, lo que implica que el sistema cambiará su temperatura más lentamente frente a una perturbación térmica.

En sistemas dinámicos, como un tanque de calentamiento, la inercia térmica se manifiesta en la respuesta lenta de la temperatura ante la aplicación de calor. Es decir, aunque se suministre energía mediante una resistencia eléctrica, la temperatura del fluido no aumenta instantáneamente, sino de manera gradual debido a la capacidad del sistema para almacenar energía.

Este comportamiento es fundamental en el análisis y modelado de procesos térmicos, ya que determina la rapidez de respuesta del sistema y su estabilidad. En términos de control de procesos, una alta inercia térmica puede generar retardos en la respuesta, lo cual debe considerarse en el diseño de estrategias de control para evitar sobreimpulsos o tiempos de establecimiento prolongados.

2.2.7 Pérdidas de calor

Las pérdidas de calor representan la energía térmica que un sistema transfiere hacia sus alrededores de manera no deseada, debido a la diferencia de temperatura entre el sistema y el entorno. Este fenómeno es fundamental en el análisis de procesos

térmicos, ya que afecta directamente la eficiencia energética y el comportamiento dinámico del sistema (Smith, Abbott, & M., 2007).

En sistemas como un tanque de calentamiento, las pérdidas de calor ocurren principalmente a través de tres mecanismos de transferencia: conducción, convección y radiación. La conducción se presenta a través de las paredes del tanque, la convección ocurre entre la superficie del tanque y el aire circundante, y la radiación se da mediante la emisión de energía térmica hacia el ambiente.

De manera simplificada, las pérdidas de calor pueden modelarse mediante la siguiente expresión:

$$Q_{p\acute{e}rdidas} = UA(T - T_{amb}) \quad (9)$$

donde:

- U es el coeficiente global de transferencia de calor,
- A es el área de intercambio térmico,
- T es la temperatura del sistema,
- T_{amb} es la temperatura ambiente.

Esta relación indica que las pérdidas de calor son proporcionales a la diferencia de temperatura entre el sistema y el entorno. A medida que dicha diferencia aumenta, también lo hacen las pérdidas energéticas.

En el balance de energía de un sistema cerrado, estas pérdidas se incorporan como un término de salida de energía, modificando la ecuación de la siguiente manera:

$$\frac{dU}{dt} = Q_{entrada} - Q_{perdidas} + W \quad (10)$$

En muchos casos prácticos, especialmente en modelos simplificados, las pérdidas de calor pueden despreciarse si el sistema está adecuadamente aislado. Sin embargo, en aplicaciones reales, su consideración es importante para lograr una representación más precisa del comportamiento térmico del sistema.

2.2.8 Función de transferencia

Una función de transferencia describe la relación entre la salida y la entrada de un sistema en el dominio de Laplace. Esta función refleja tanto la amplificación como el desfase entre ambas señales. Para facilitar el análisis y diseño de sistemas, es común representar los bloques mediante funciones de transferencia, las cuales se expresan como el cociente de dos polinomios en el operador de Laplaces. (Brian, 2014)

2.2.9 Control Proporcional Integral y Derivativo (PID)

Combina tres tipos de acciones de control. El término proporcional “P” corresponde a control proporcional. El término integral “I” da una acción de control que es proporcional a la integral del error. Esto asegura que el error en estado estacionario se haga cero. El término derivativo “D” es proporcional a la derivada del error de control. Este término permite la predicción del error futuro. (Åström & Hägglund, 2009). Esta acción combinada aprovecha las ventajas de cada una de las tres estrategias de control por separado.

El algoritmo de control PID se define mediante la siguiente expresión (Åström & Hägglund, 2009):

$$u(t) = K_p(e(t)) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t)dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

Donde:

- $u(t)$: Señal de control
- $e(t)$: Señal de error
- K_p : ganancia proporcional
- T_i : tiempo integral
- T_d : tiempo derivativo

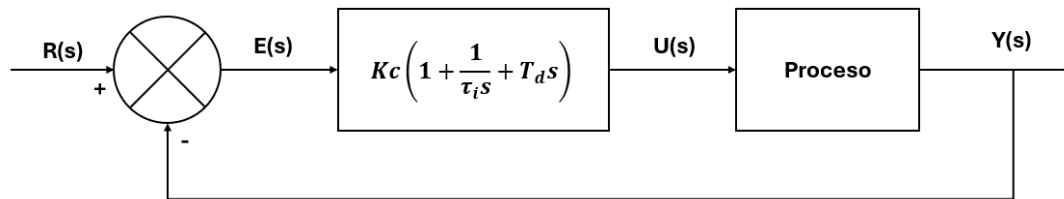
La función de transferencia del control PID en el dominio de Laplace es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp \left(1 + \frac{1}{Tis} + Tds \right) \quad (12)$$

Diagrama de lazo cerrado

Figura 1

Diagrama de lazo cerrado para un controlador PID



Fuente: Adaptado de (O'Dwyer, 2006)

Sintonización mediante Ziegler – Nichols

Ziegler y Nichols propusieron el método de sintonización en lazo cerrado (método de ganancia última). Para obtener una respuesta característica del sistema, definieron el criterio denominado razón de asentamiento de un cuarto.

El término asentamiento hace referencia al comportamiento dinámico de la respuesta del sistema, específicamente a cómo las oscilaciones disminuyen progresivamente hasta estabilizarse alrededor del valor de referencia. Este concepto está relacionado con la amortiguación del sistema y la rapidez con la que las perturbaciones o cambios en la entrada son corregidos.

Por otro lado, la expresión “de un cuarto” indica que la amplitud de cada oscilación sucesiva debe ser aproximadamente la cuarta parte de la amplitud de la oscilación anterior. Es decir, si se consideran dos picos consecutivos en la respuesta, la relación entre sus amplitudes debe ser cercana a 1/4. Esta condición establece un compromiso entre rapidez de respuesta y nivel de oscilación.

En este contexto, la razón de asentamiento se define como el cociente entre las amplitudes de dos oscilaciones sucesivas, siendo una característica que debe ser independiente de la entrada del sistema y depender únicamente de las raíces de la ecuación característica del lazo (Smith & Corripio, 2014).

La respuesta con razón de asentamiento de un cuarto es adecuada para compensar perturbaciones, ya que limita la desviación inicial respecto a la referencia y evita oscilaciones excesivas. Sin embargo, no es la más apropiada para cambios tipo escalón en la referencia, debido a que produce un sobrepaso cercano al 50 %. Este efecto puede corregirse reduciendo la ganancia proporcional. En consecuencia, si la respuesta del sistema resulta muy oscilatoria, una disminución de dicha ganancia permitirá obtener un comportamiento más amortiguado y uniforme (Smith & Corripio, 2014).

Se incrementa gradualmente la ganancia proporcional del controlador (K_c) hasta que la salida del sistema presente un ciclo oscilatorio continuo. A este valor de ganancia se le denomina ganancia última (K_{cu}). Una vez alcanzadas las oscilaciones sostenidas, se mide el período de oscilación, conocido como período último (P_u) (Mellichamp, Seborg, Doyle, & Edgar, 2011). Con estos dos parámetros, se determinan los ajustes del controlador PID de acuerdo con la tabla 1.

Tabla 1
Ajuste del controlador Ziegler-Nichols de circuito cerrado (ciclado)

	K_c	τ_i	τ_d
PI	$0.45 K_{cu}$	$\frac{P_u}{1.2}$	-----
PID	$0.6 K_{cu}$	$\frac{P_u}{2}$	$\frac{P_u}{8}$

Fuente: (Sohrab, 2017)

2.2.10 Control óptimo

El control óptimo es una rama particular del control moderno que busca proporcionar diseños analíticos especialmente atractivos. El sistema resultante de un diseño óptimo no solo debe ser estable, tener un ancho de banda determinado o satisfacer alguna de las restricciones deseables asociadas con el control clásico, sino que debe ser el mejor sistema posible de un tipo particular; de ahí el término «óptimo». Si es óptimo y posee varias de las propiedades que el control clásico considera deseables, mucho mejor. El control óptimo lineal es un tipo especial de control óptimo (Anderson & Moore, 1989)

2.2.11 Espacio de estados

El estado de un sistema dinámico se entiende como su condición interna en un instante dado, mientras que las variables de estado son las magnitudes mínimas necesarias para describir dicha condición y predecir la evolución futura del sistema. Por su parte, el espacio de estados corresponde al conjunto de todos los valores posibles que estas variables pueden adoptar, representado como un espacio n-dimensional en el que cada eje corresponde a una variable de estado y cada punto a un estado particular del sistema. El análisis en espacio de estados se enfoca en tres tipos de variables fundamentales en el modelado de sistemas dinámicos: las variables de entrada, las variables de salida y las variables de estado (Ogata & Dormido, 2010).

Ecuación de estado y ecuación de salida:

Considérese la siguiente ecuación diferencial de n-ésimo orden:

$$\begin{aligned} y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y \\ = b_0 u^{(n)} + b_1 u^{(n-1)} + \dots + b_{n-1} \dot{u} + b_n u \end{aligned} \quad (13)$$

Las técnicas de representación en el espacio de estados, también llamadas representación interna, se fundamentan en la propiedad de que cualquier sistema o

proceso puede describirse mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden, aun cuando su dinámica sea de orden superior. De esta forma, en vez de tener una ecuación diferencial de n-ésimo orden, se van a tener n ecuaciones diferenciales de primer orden. Cada uno de estas n ecuaciones tendrá la forma general siguiente:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij}x_j(t) + \beta_i u(t)$$

Con:

$$y(t) = \sum_{j=1}^n c_j x_j(t)$$

Así, desarrollando la expresión para las n variables de estado:

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = \dot{x}_1(t) = \sum_{j=1}^n \alpha_{1j}x_j(t) + \beta_1 u(t) = \alpha_{11}x_1(t) + \alpha_{12}x_2(t) + \cdots + \alpha_{1n}x_n(t) + \beta_1 u(t)$$

$$\frac{dx_2(t)}{dt} = \dot{x}_2(t) = \sum_{j=1}^n \alpha_{2j}x_j(t) + \beta_2 u(t) = \alpha_{21}x_1(t) + \alpha_{22}x_2(t) + \cdots + \alpha_{2n}x_n(t) + \beta_2 u(t)$$

⋮

$$\frac{dx_n(t)}{dt} = \dot{x}_n(t) = \sum_{j=1}^n \alpha_{nj}x_j(t) + \beta_n u(t) = \alpha_{n1}x_1(t) + \alpha_{n2}x_2(t) + \cdots + \alpha_{nn}x_n(t) + \beta_n u(t)$$

Estas “n” ecuaciones diferenciales se pueden expresar con una única ecuación matricial:

$$\begin{Bmatrix} \frac{dx_1(t)}{dt} \\ \frac{dx_2(t)}{dt} \\ \vdots \\ \frac{dx_n(t)}{dt} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_n(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & \alpha_{1n} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \cdots & \alpha_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \alpha_{n3} & \cdots & \alpha_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} u(t) \quad (14)$$

La ecuación (14) suele denominarse ecuación de estado del sistema. Esta expresión describe cómo evoluciona el estado a partir de su valor actual y de la influencia de la señal de entrada.

Además, como se mencionó previamente, algunas variables de estado pueden coincidir con las salidas. En esencia, la salida del sistema se obtiene como una combinación lineal de dichas variables de estado.

$$y(t) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Expresado en forma matricial se obtiene lo que se conoce como ecuación de salida:

$$y(t) = [c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_n] \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{Bmatrix} + [d]u(t)$$

Las ecuaciones anteriores se pueden expresar de una forma más compactada como:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (\text{ecuación de estado}) \quad (15)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (\text{ecuación de salida}) \quad (16)$$

Donde:

- $x(t)$: *vector de estado*, es el conjunto de variables internas que describen completamente el comportamiento del sistema en cualquier instante de tiempo.
- $u(t)$: *vector de entradas*, representa las señales externas o de control que actúan sobre el sistema y determinan, junto con el estado, su comportamiento dinámico.
- $y(t)$: *vector de salida*, está formado por las variables del sistema que pueden medirse u observarse directamente.
- A : matriz (n×n), matriz del sistema, define la dinámica interna

- B: matriz (nx1), matriz de control, como influyen las entradas en los estados
- C: matriz (1xn) matriz de salida, relación entre estados y salidas
- D: escalar (1x1) de transmisión directa, influencia directa de la entrada en la salida

Forma canónica controlable de las ecuaciones de estado de sistemas

continuos:

La forma canónica controlable asegura que el sistema sea controlable, ya que su construcción garantiza la independencia lineal de los vectores que conforman la matriz de controlabilidad. De este modo, se cumple la condición necesaria para aplicar técnicas de asignación de polos y controladores óptimos LQR, ya que asegura que el par (A, B) sea controlable, condición indispensable en dichas técnicas.

Para obtener la representación interna de un sistema continuo mediante el método de la forma canónica controlable se parte de la función de transferencia del sistema continuo de orden “n”:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s^n + b_1 s^{n-1} + \dots + b_{n-1} s + b_n}{s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (17)$$

Mediante la cual obtiene la representación en espacio de estados en su **forma canónica controlable**:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \vdots \\ \dot{X}_{n-1} \\ \dot{X}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_{n-1} \\ X_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

$$y = [b_n - a_n b_0 : b_{n-1} - a_{n-1} b_0 : \dots : b_1 - a_1 b_0] \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} + b_0 u$$

Donde las matrices A, B, C y D en el espacio controlable son las siguientes:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \cdots & -a_1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C = [b_n - a_n b_0 : b_{n-1} - a_{n-1} b_0 : \cdots : b_1 - a_1 b_0]$$

$$D = b_0$$

2.2.12 Controlador Regulador Cuadrático Lineal (LQR)

El controlador Regulador Cuadrático Lineal es un regulador diseñado para sistemas lineales, en los que determina una ley de control basada en la realimentación de estados que minimiza una función de costo cuadrática, la cual mide simultáneamente el desempeño del sistema y el esfuerzo de control.

Diseño del controlador Regulador Cuadrático Lineal (LQR)

Dadas las ecuaciones de un sistema dinámico:

$$\dot{x}(t) = Ax + Bu \quad (18)$$

$$y(t) = Cx \quad (19)$$

El diseño del controlador LQR se basa en la aplicación de una ley de control expresada mediante la siguiente ecuación, en la cual la matriz K representa el vector de realimentación óptimo (Ogata & Dormido, 2010).

$$u(t) = -Kx(t) \quad (20)$$

No obstante, se define una función de costo, mostrada en la siguiente ecuación, cuyo propósito es ser minimizada, de manera que un valor más reducido implica un mejor compromiso entre precisión en el seguimiento y eficiencia en el uso de la acción de control (Ogata & Dormido, 2010).

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (21)$$

Donde:

- x^T : *transpuesta del vector de estados x*
- u^T : *transpuesta del vector de control u*
- Q : es una matriz simétrica real, semidefinida positiva, que asigna ponderaciones a los estados según su importancia.

La matriz Q posee la misma dimensión que la matriz de estados A , puesto que ambas operan directamente sobre el vector de estados, a medida que aumenta el valor de la matriz Q , se incrementa también la penalización asociada a ese estado (Ogata & Dormido, 2010).

- R : es una matriz simétrica real, definida positiva, que establece el costo asociado al uso de la acción de control. Valores elevados en R llevan al controlador a aplicar un menor esfuerzo de control, produciendo acciones más suaves (Ogata & Dormido, 2010).
- $x^T Q x$: Término cuadrático que **penaliza las desviaciones de los estados** respecto al punto de equilibrio, es decir, representa el rendimiento.
- $u^T R u$: Término cuadrático que **penaliza el esfuerzo de control**, es decir, es la energía gastada para llevar el estado a cero.

En conjunto, las matrices Q y R ajustan el equilibrio entre el rendimiento del sistema y la magnitud del esfuerzo de control requerido. Su elección no obedece a una regla única, sino que depende del criterio del diseñador, quien las define para ponderar la importancia relativa de los estados y de las señales de entrada (Ogata & Dormido, 2010).

La solución al problema de optimización del regulador cuadrático lineal (LQR) se obtiene aplicando el principio de programación dinámica. Se considera que la

función de costo óptima se puede representar mediante una expresión cuadrática $V(x) = x^T P x$, donde P corresponde a una matriz simétrica positiva definida (Ogata & Dormido, 2010). Al sustituir esta hipótesis en la ecuación de Hamilton–Jacobi–Bellman, se obtiene la llamada *ecuación algebraica de Riccati continua*:

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (22)$$

La cual debe resolverse para encontrar la matriz P

Una vez determinada esta matriz, la ley de control óptima se expresa como una realimentación lineal del estado:

$$u(t) = -K x(t) \quad (23)$$

donde la ganancia de realimentación “ K ” es:

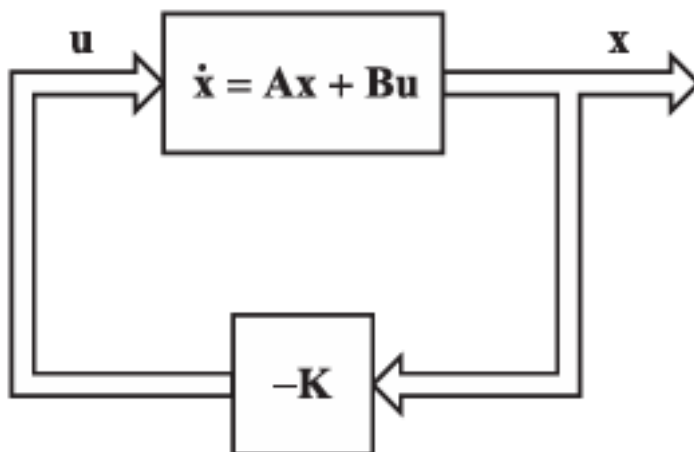
$$K = R^{-1} B^T P \quad (24)$$

Si el sistema es controlable y observable, la solución P es única y asegura que la dinámica en lazo cerrado ($A - BK$) sea estable, logrando así el compromiso óptimo entre desempeño y esfuerzo de control (Ogata & Dormido, 2010).

En la figura 2 se muestra el diagrama de bloques que da la configuración óptima.

Figura 2

Sistema Regulador Cuadrático Lineal



Fuente: (Ogata & Dormido, 2010)

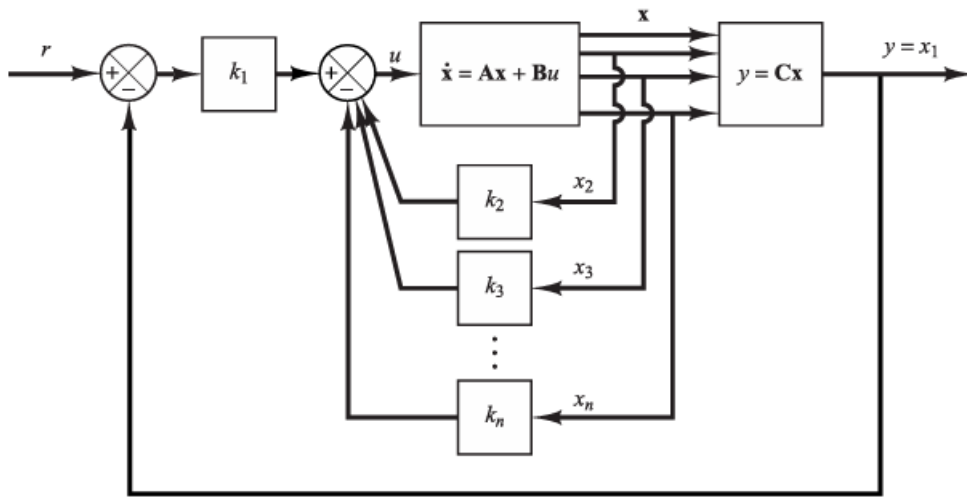
Diseño del controlador LQR tipo servo

Como ya se ha dicho, se supone que la señal de control u y la señal de salida y son escalares. Mediante una elección adecuada de un conjunto de variables de estado, es posible seleccionar la salida igual a una de las variables de estado.

La figura 3 muestra una configuración general del servosistema de tipo 1 cuando la planta tiene un integrador

Figura 3

Servosistema de tipo 1 cuando la planta tiene un integrador.



Fuente: (Ogata & Dormido, 2010)

Se supone que $y=x_1$. En el análisis que se efectúa, se supone que la entrada de referencia r es una función escalón. En este sistema se utiliza el siguiente esquema de control mediante realimentación del estado (Ogata & Dormido, 2010):

$$u = -[0 \ k_2 \ k_3 \ \dots \ k_n] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + k_1(r - x_1)$$

$$u = -Kx + k_1 r \quad (25)$$

Donde, $K = [k_1 \ k_2 \ \dots \ k_n]$, r es la referencia.

Supóngase que se aplica la señal de referencia correspondiente a un escalón en $t = 0$. Así, para $t > 0$, la dinámica del sistema se puede describir mediante la siguiente ecuación (Ogata & Dormido, 2010):

$$\dot{x} = Ax + Bu = (A - BK)x + Bk_1r \quad (26)$$

El sistema diseñado será un sistema asintóticamente estable, y $x(\infty)$ tenderá al valor constante r y $u(\infty)$ tenderá a cero. (r es una entrada escalón). Obsérvese que, en estado estacionario (Ogata & Dormido, 2010), se tiene que:

$$\dot{x}(\infty) = (A - BK)x(\infty) + Bk_1r(\infty) \quad (27)$$

Considerando que $r(t)$ es una entrada escalón, se tiene $r(\infty) = r(t) = r$ (*constante*) para $t > 0$. Se tiene la siguiente ecuación:

$$\dot{x}(t) - \dot{x}(\infty) = (A - BK)[x(t) - x(\infty)] \quad (28)$$

Se define:

$$x(t) - x(\infty) = e(t)$$

La ecuación 27 se convierte en:

$$\dot{e} = (A - BK)e \quad (29)$$

La ecuación 29 describe la dinámica del error.

El diseño del servosistema de tipo 1 se convierte aquí en el diseño de un sistema regulador asintóticamente estable tal que $e(t)$ tiende a cero, para cualquier condición inicial $e(0)$ (Ogata & Dormido, 2010).

El valor en estado estacionario de $x(t)$ y $u(t)$ se encuentran del modo siguiente.

En estado estacionario ($t = \infty$), a partir de la Ecuación 26, se tiene que:

$$\dot{x}(\infty) = 0 = (A - BK)x(\infty) + Bk_1r$$

Como todos los valores propios deseados de $A-BK$ están en el semiplano izquierdo del plano s , existe la inversa de la matriz $A-BK$. En consecuencia, $x(\infty)$ se determina como:

$$x(\infty) = -(A - BK)^{-1}Bk_1r \quad (30)$$

Asimismo, $u(\infty)$ se obtiene como:

$$u(\infty) = -Kx(\infty) + k_1r = 0 \quad (31)$$

Donde $k_1 = -[C(A - BK)^{-1}B]^{-1}$

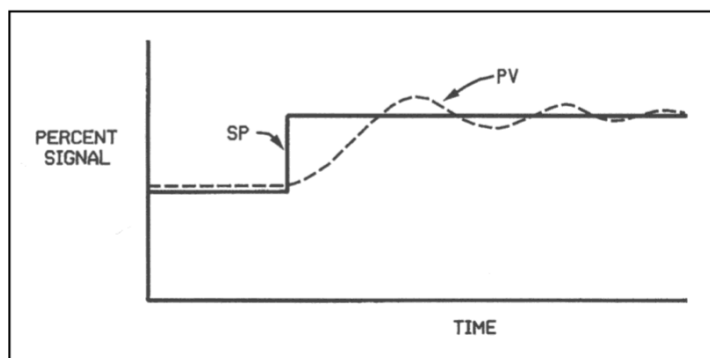
2.2.13 Desempeño frente a cambios de set point

Los cambios de set point, son cambios deliberados en las condiciones de operación, como un cambio en el grado del polímero para un reactor de polimerización, cambio en la composición del destilado para una columna de destilación, etc. (Simons, 2007).

Los controladores que están ajustados para cambios en el set point reaccionan rápidamente a los cambios en el set point del controlador. La respuesta del lazo de control se puede comprobar observando la respuesta de la variable de proceso a un cambio de set point del controlador que se realiza después de que el proceso se ha mantenido estable durante un período de tiempo suficiente para que la única condición alterada sea un cambio de set point intencional. La variable del proceso puede sobrepasar el punto establecido y exhibir oscilaciones amortiguadas antes de alcanzar el punto establecido, como se muestra la figura 4. Los lazos de control que se benefician de esta estrategia de ajuste no suelen estar sujetos a perturbaciones significativas del proceso (Spitzer, 2009).

Figura 4

Respuesta del lazo de control (girado para la respuesta del set point)

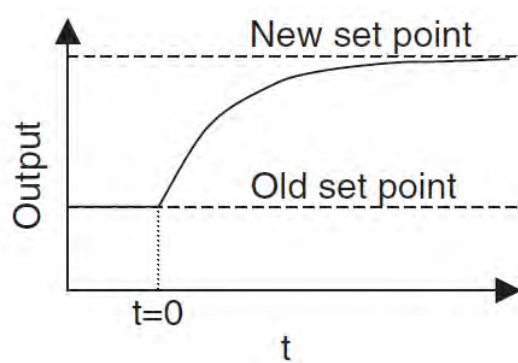


Fuente: (Spitzer, 2009)

En un proceso, es frecuente que el valor de referencia o set point del controlador sea ajustado en función de nuevas condiciones de operación, requerimientos del proceso o cambios en la producción, por tanto, cuando esto sucede, el objetivo del controlador es llevar el proceso al nuevo set point lo más rápido posible (Simons, 2007). Como se muestra en la figura 5, un viejo set point y un nuevo set point de un proceso.

Figura 5

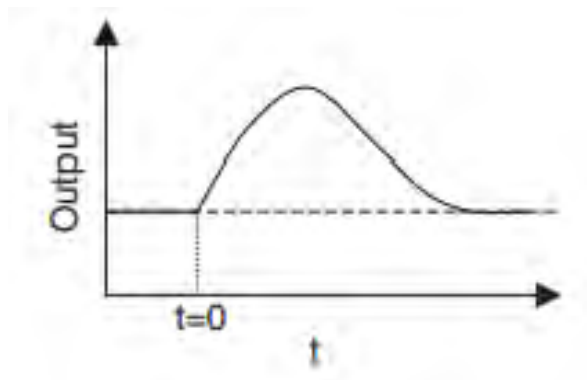
Respuesta del Proceso: Seguimiento del Punto de Ajuste.



Fuente: (Simons, 2007)

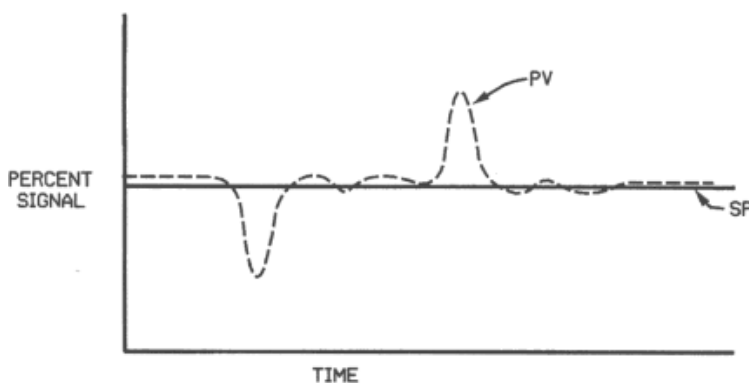
2.2.14 Desempeño frente a perturbaciones

Las perturbaciones son cambios en caudales, composiciones, temperaturas, niveles o presiones en el proceso que no se pueden controlar porque están dados por las condiciones de alimentación (supuestamente controlado por una unidad aguas arriba), condiciones ambientales, como el clima, o servicios públicos, como vapor o agua de refrigeración. En el rechazo de perturbaciones, el objetivo de control es rechazar la perturbación lo más rápido posible, es decir, devolver el proceso al estado estacionario original contrarrestando el efecto de la perturbación como se observa en la figura 6 (Simons, 2007).

Figura 6*Rechazo de perturbaciones*

Fuente: (Simons, 2007)

El ajuste de un controlador para detectar perturbaciones debidas a cambios en el proceso implica el examen del funcionamiento del lazo de control cuando ocurren cambios en las variables del proceso y no se realizan cambios en el punto de ajuste. Los lazos de control que se benefician de esta estrategia de ajuste normalmente no requieren cambios en el punto de ajuste durante el funcionamiento normal, pero deberían responder con mayor frecuencia a perturbaciones significativas del proceso. La respuesta del lazo de control se puede verificar observando la variable del proceso durante el tiempo en que se sabe que ocurren las alteraciones del proceso (Spitzer, 2009).

Figura 7*Respuesta del lazo de control (ajustado a las perturbaciones del proceso)*

Fuente: (Spitzer, 2009)

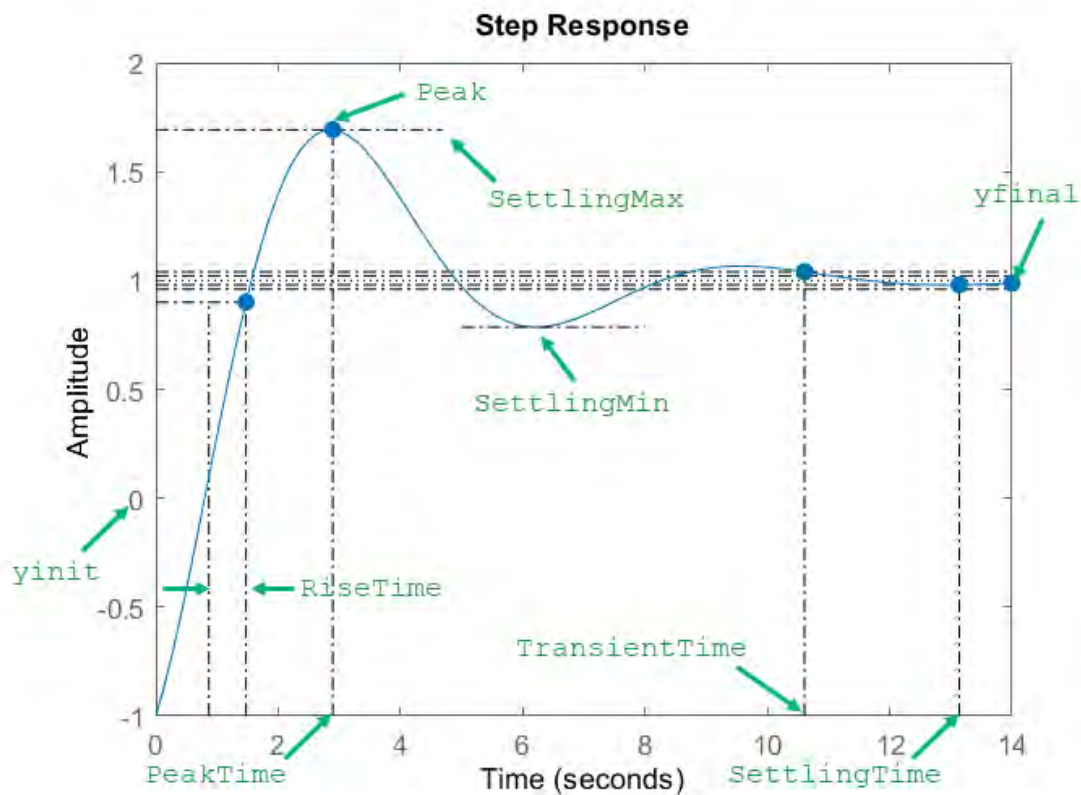
2.2.15 Características de desempeño

En muchos casos prácticos, las características de desempeño deseadas del sistema de control se especifican en términos de cantidades en el dominio del tiempo. Los sistemas que pueden almacenar energía no responden instantáneamente y presentan respuestas transitorias cada vez que están sujetos a entradas o perturbaciones (Ogata & Dormido, 2010).

La respuesta transitoria de un sistema de control práctico muestra con frecuencia oscilaciones amortiguadas antes de alcanzar el estado estacionario. Al especificar las características de la respuesta transitoria de un sistema de control para una entrada escalón unitario (Ogata & Dormido, 2010), es común especificar lo siguiente:

Figura 8

Características de la respuesta al escalón



Fuente: (The MathWorks, Inc., s.f.)

Tabla 2
Características de la respuesta al escalón

CARACTERÍSTICAS DE LA RESPUESTA AL ESCALÓN	DESCRIPCIÓN
RiseTime (tiempo de subida)	Tiempo que tarda la respuesta en subir del 10% al 90% del recorrido desde y_{init} hasta y_{final}
TransientTime (tiempo transitorio)	El primer tiempo T es tal que el error $ y(t) - y_{final} \leq \text{SettlingTimeThreshold} \times e_{max}$ para $t \geq T$, donde e_{max} es el error máximo $ y(t) - y_{final} $ para $t \geq 0$. De forma predeterminada, $\text{SettlingTimeThreshold} = 0.02$ (2% del error pico). El tiempo transitorio mide la rapidez con la que la dinámica transitoria desaparece.
SettlingTime (tiempo de asentamiento)	El primer tiempo T es tal que el error $ y(t) - y_{final} \leq \text{SettlingTimeThreshold} \times y_{final} - y_{init} $ para $t \geq T$. De forma predeterminada, SettlingTime mide el tiempo que tarda el error en permanecer por debajo del 2% de $ y_{final} - y_{init} $.
SettlingMin (asentamiento mínimo)	Valor mínimo de $y(t)$ una vez que ha subido la respuesta
SettlingMax (asentamiento máximo)	Valor máximo de $y(t)$ una vez que ha subido la respuesta
Overshoot (sobreimpulso)	Porcentaje de sobreimpulso. Relacionado con la respuesta normalizada $y_{norm}(t) = (y(t) - y_{init}) / (y_{final} - y_{init})$, el sobreimpulso es el mayor de cero y $100 \times \max(y_{norm}(t) - 1)$.
Undershoot (subimpulso)	Porcentaje con subimpulso. Relacionado con la respuesta normalizada $y_{norm}(t)$, el subimpulso es el menor de cero y $-100 \times \min(y_{norm}(t))$.
Peak (pico)	Valor pico de $ y(t) - y_{init} $
PeakTime (tiempo de pico)	Tiempo en el que se produce el valor pico

Fuente: (The MathWorks, Inc., s.f.)

2.2.16 Efecto del tiempo muerto ($e^{-\theta s}$)

Esta técnica permite reemplazar el retardo por una función racional equivalente, facilitando su incorporación al modelo del sistema y permitiendo aplicar técnicas de

control modernas de manera adecuada. La aproximación de PADÉ garantiza una representación más precisa del comportamiento dinámico en el dominio temporal y frecuencial, conservando las características esenciales del retardo mientras se mantiene la compatibilidad con el diseño en espacio de estados (Sohrab, 2017).

En determinadas condiciones, el retardo temporal aparece en el denominador de la función de transferencia (control por retroalimentación de un proceso con un retardo temporal o con un ciclo de energía o materia), y la única manera de obtener la transformada inversa es aproximar el término de retardo, $e^{-\theta s}$, mediante una serie de Taylor o una aproximación de Padé de primer o segundo orden (Sohrab, 2017).

Aproximación de Padé de primer y segundo orden:

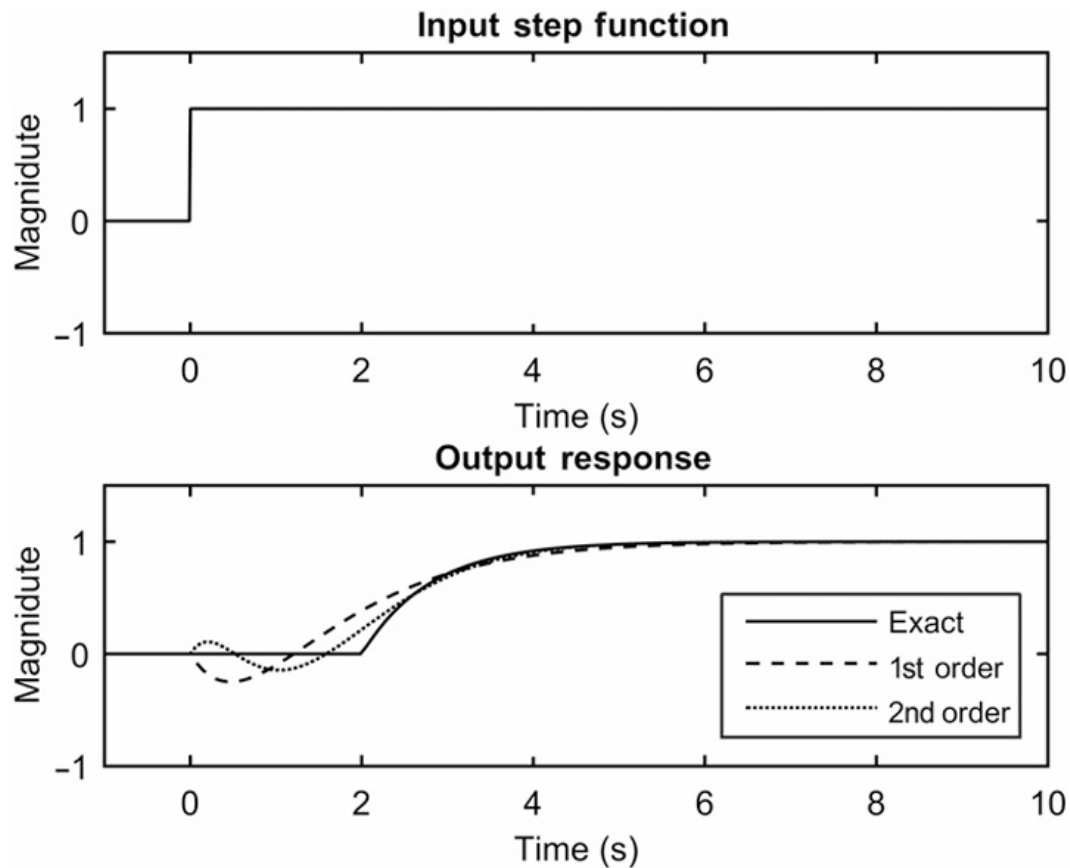
$$\text{Padé de primer orden: } e^{-\theta s} \approx \frac{1 - \frac{\theta s}{2}}{1 + \frac{\theta s}{2}}$$

$$\text{Padé de segundo orden: } e^{-\theta s} \approx \frac{1 - \frac{\theta s}{2} + \frac{(\theta s)^2}{12}}{1 + \frac{\theta s}{2} + \frac{(\theta s)^2}{12}}$$

La figura 9 muestra las aproximaciones exactas de Padé de primer y segundo orden de un término de retardo temporal.

Figura 9

La aproximación de Pade para un sistema de primer orden con retardo temporal.

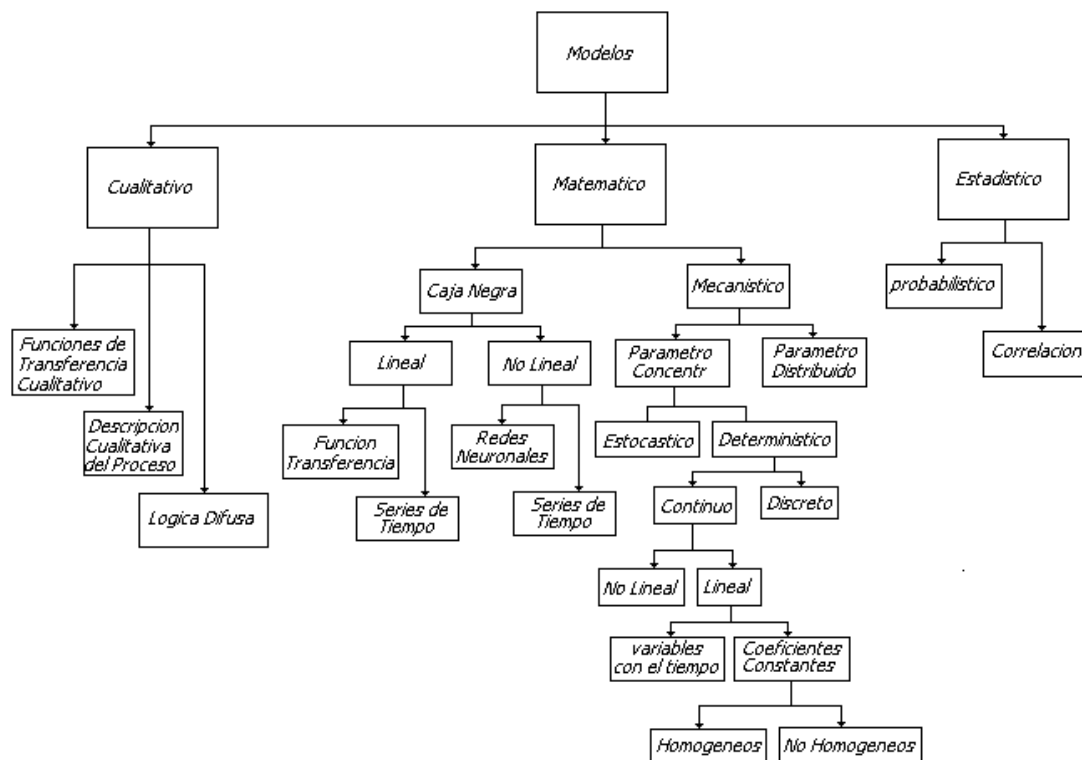


Fuente: (Sohrab, 2017).

2.2.17 Modelado matemático para el control de procesos

En general un modelo puede definirse como una representación; matemática, estadística o cualitativa de un sistema o proceso, eliminando elementos que resultan innecesarios debido a su escasa relevancia en el comportamiento global del proceso. Los modelos matemáticos clasifican, (Rasmuson, Andersson, Olsson, & Andersson, 2014), en; pares opuestos, complejidad matemática y grado de resolución. La figura 10, muestra una clasificación aproximada de los modelos según (Willis & Tham, 1994).

Figura 10
Clasificación de los Modelos



Para obtener un diseño efectivo y confiable de un sistema de control, es fundamental entender y describir el comportamiento dinámico del proceso a controlar. En este sentido, los modelos representan una herramienta fundamental y cualquier descripción del sistema puede ser considerado como el modelo de ese sistema.

El modelo debe contener información que sea capaz de predecir los cambios de las condiciones de operación de los procesos. Dentro de este contexto, un modelo puede ser una descripción *matemática o estadística* de aspectos específicos del proceso. Este también puede ser una *descripción cualitativa* del comportamiento del proceso. La Figura 10, muestra una clasificación aproximada de los modelos.

El *modelo mecánico* conocido también como el modelo de “caja blanca”, es usualmente derivado a partir de los fenómenos físico- químicos que ocurren en los

procesos, una serie de ecuaciones diferenciales pueden describir su comportamiento dinámico. Dependiendo del sistema en estudio, la estructura del modelo final puede ser una representación de *parámetro concentrado* o *parámetro distribuido*. Los modelos de parámetro concentrado “*lumped*” son descritos por las ecuaciones diferenciales ordinarias, EDO, obtenidos a partir de los balances globales de masa y/o energía. Mientras que la representación de los sistemas de parámetro distribuido requiere el uso ecuaciones diferenciales parciales, EDP, obtenidos por medio de los balances diferenciales. Las EDO son usadas para describir el comportamiento en una dimensión, normalmente el tiempo, significa que las variables son independientes de la ubicación o espacio. Los modelos de EDP incluyen el espacio y el tiempo, ejemplo, el perfil de temperatura a lo largo de un reactor tubular como una función del tiempo.

Se denomina *modelo determinista* si los datos de entrada, $u(t)$, son conocidos y aplicados con las condiciones iniciales, en un sistema dinámico, determina únicamente la variable de salida $y(t)$. Por el contrario, si los datos de entrada y las condiciones iniciales no son suficientes para determinar la salida del sistema, estaremos ante un *modelo estocástico*. La descripción completa del sistema estocástico exige la especificación de las características estadísticas de las señales aleatorias que afectan su comportamiento.

El modelado mecanístico permite reproducir y explicar fenómenos observados, entender algunos de los mecanismos del proceso, predecir la evolución del sistema, estimar variables y parámetros no medidos, detectar fallas y evaluar diversas estrategias de control como un paso preliminar a la optimización del proceso.

Algunas veces los modelos mecanístico son complejos y sus ecuaciones no pueden ser resueltas. Bajo tales circunstancias, los **modelos experimentales o modelos**

“**caja negra**” pueden ser contruidos, usando los datos de la planta, mediante la técnica de la identificación de sistemas.

Los modelos de Caja Negra, simplemente describen la relación funcional entre la entrada y la salida de un sistema, únicamente reproduce el comportamiento observado del sistema sin atender a los mecanismos internos que regulan el comportamiento del mismo, permite inferir propiedades dinámicas y estadísticas del sistema original. Generalmente están relacionados a los modelos ordinarios (EDO). Los parámetros de estas funciones no tienen significado físico, esta es la desventaja de los modelos de caja negra en comparación con los modelos mecanístico. Sin embargo, si se requiere la representación global del comportamiento de un proceso el modelo de caja negra es efectivo, adicionalmente contribuye al bajo costo de su implementación.

Los Modelos Cualitativos se emplean cuando la naturaleza del proceso no permite una descripción matemática o cuando existen limitaciones físicas. La forma más simple de un modelo cualitativo, como la lógica difusa, se basa en una regla que hace uso del constructor **Si (situación) – Entonces (acción)**, en inglés “**if – then**”, para describir el comportamiento del proceso que modifica el ingreso en salida. Por ejemplo, el enunciado de un proceso de transferencia de calor, verbalmente puede ser: **Si** la Temperatura del proceso se incrementa, sobre el valor deseado – **entonces** aumentar el flujo de refrigeración.

Los Modelos Estadísticos se hacen necesarios para algunos procesos con incertidumbre en los alrededores. Esta técnica tiene sus raíces en el análisis de datos, teoría de la información, teoría de juegos y la teoría de decisiones. Los modelos probabilísticos son caracterizados por la probabilidad de la función densidad de las variables, el más común es la distribución normal. Los modelos de correlación son los más usados y son analizados empleando técnicas de regresión.

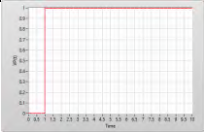
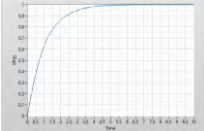
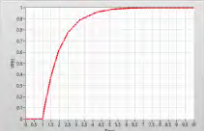
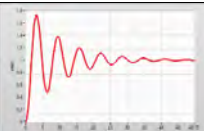
Obviamente los modelos dinámicos no son capturados por los modelos estadísticos. Sin embargo, toman un rol importante en la toma de decisiones, monitoreo de los procesos, análisis de datos y fundamentalmente en el Control Estadístico de Procesos.

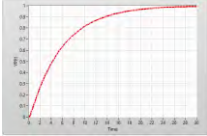
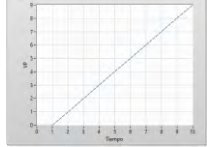
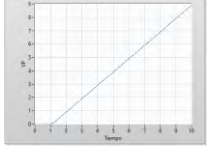
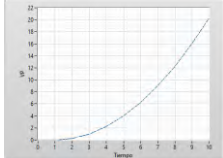
La solución en LabView de las ecuaciones resultantes del modelado mecánico, de primer, segundo orden y los procesos integradores, para la condición de entrada escalón, es presentada en la figura 11, (Pinares, 2021). Es importante distinguir el comportamiento de los procesos a la señal de entrada; en algunos casos el proceso se comporta como autorregulable es decir alcanza un nuevo estado estacionario. Mientras que, en otros casos, como en los procesos integradores, el comportamiento del proceso es inestable.

Figura

11

Respuesta de procesos autorregulables y procesos integradores.

Tipo de proceso	Forma de la respuesta	Parámetros del modelado
<i>Ganancia pura</i>		K_p
<i>Primer orden</i>		K_p, τ_p
<i>Primer orden más tiempo muerto</i>		K_p, τ_p, t_d
<i>Segundo orden sub amortiguado.</i>		K_p, τ_p, ξ, θ
<i>Segundo orden críticamente amortiguado</i>		K_p, τ_p, ξ, θ

Segundo orden sobre amortiguado		K_p, τ_p, ξ, θ
Proceso integrador + tiempo muerto. $G(s) = \frac{K}{s} e^{-t_d s}$		K_p, t_d
Proceso integrador POMTM $G(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)} e^{-t_d s}$		K_p, τ_p, t_d
Proceso integrador doble + tiempo muerto. $G(s) = \frac{K}{s^2} e^{-t_d s}$		K_p, τ_p, t_d

2.2.18 Identificación de sistemas

La aplicación de técnicas de control a sistemas dinámicos requiere de una representación que caracterice el proceso físico, o sea, un modelo matemático del mismo. Esta representación matemática puede obtenerse en forma estrictamente teórica, lo que se denomina *Modelado*; así como también en forma empírica, mediante experimentos sobre el sistema real, basándose en datos de entrada y salida del proceso, llamado *Identificación*.

Por lo tanto, la identificación de sistemas está íntimamente relacionada con la construcción de los modelos matemáticos, de sistemas dinámicos, a partir de datos experimentales. Los modelos obtenidos mediante esta técnica describen con elevada precisión el comportamiento dinámico más relevante de los procesos. Por consiguiente, estos modelos pueden ser utilizados directamente en el diseño de sistemas de control. Tienen aplicaciones importantes en diversas áreas como las ingenierías, biología, ecología y economía; en el diagnóstico, predicción, simulación y control.

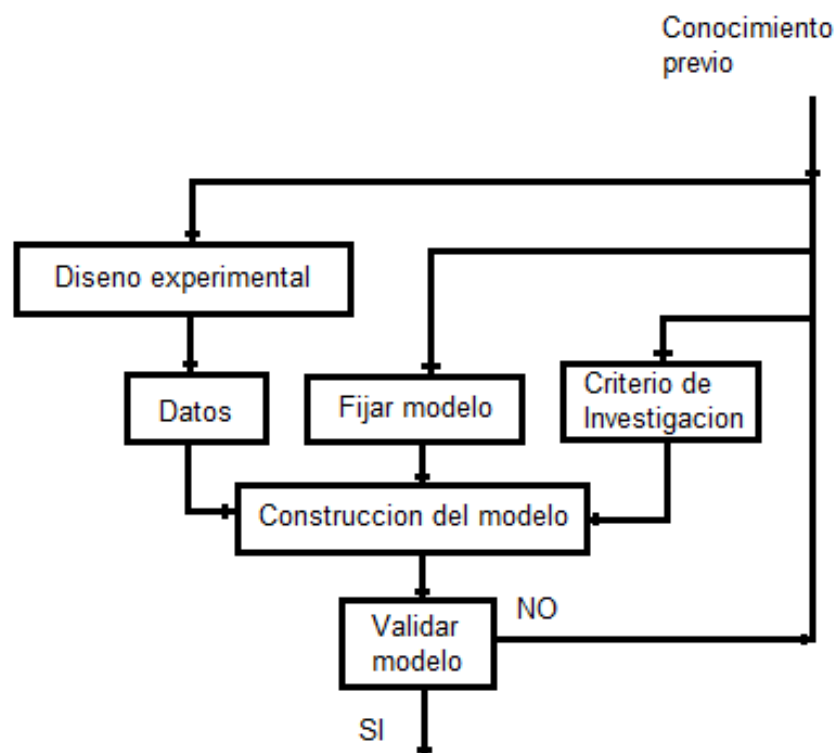
En general, la Identificación, puede ser dividido en sub etapas tales como:

- Diseño experimental.

- Recolección de datos.
- Selección de la estructura del modelo.
- Estimación de los parámetros del modelo.
- Validación del modelo.

Figura 12

Esquema de la identificación de Sistemas.



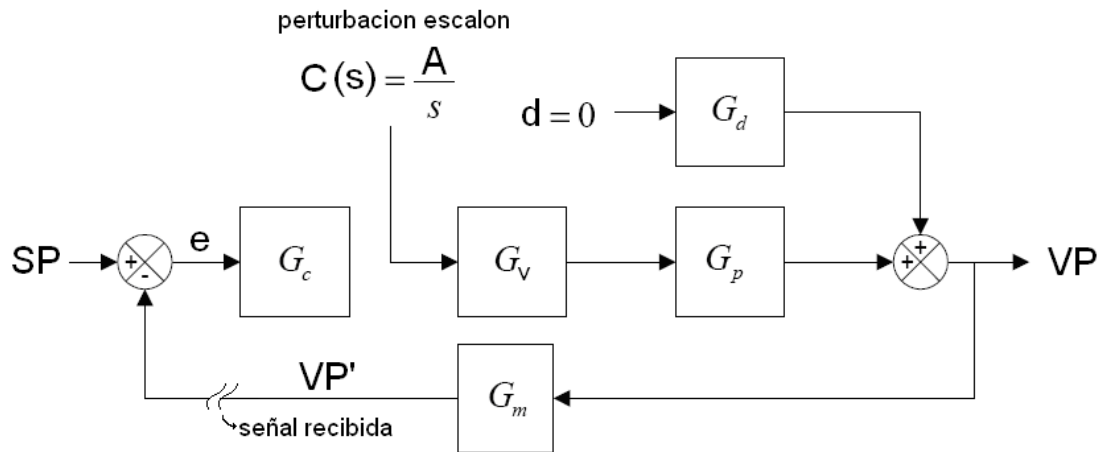
La figura 13, (Smith & Corripio, 2014) muestra en forma explícita un sistema en circuito abierto (desconectado). La señal de entrada corresponde a la señal de salida del controlador (CO), cuando este se encuentra en manual. La señal de respuesta se mide con el sensor transmisor, en concordancia con el diseño experimental.

A los datos experimentales de la variable del proceso (VP) obtenidos como una función del tiempo se denomina **curva de reacción del proceso**, resultado de una perturbación o cambio en la entrada del proceso. A la función de transferencia de la curva de reacción del proceso se le conoce como *función de transferencia del circuito abierto*.

Una desventaja de la identificación en circuito abierto es que el control del proceso tiene que ser tomado en manual, mientras la prueba se está llevando a cabo, esta acción tiende a causar inestabilidad en el proceso.

Figura 13

Diagrama de bloques del circuito abierto.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Muestra

- Datos recopilados de temperatura del tanque (TK-1) y de la resistencia, mediante experimentos realizados al Módulo de Temperatura.

3.2 Materiales, insumos y Equipos

3.2.1 Materiales

Los materiales utilizados son los siguientes:

- 01 jarra graduada de plástico de 500 ml
- 01 termómetro digital
- 01 regla de 30 cm

3.2.2 Insumos

- Agua potable

3.2.3 Equipos

El equipo que se utilizó es el Módulo de Control de Temperatura MCT-02, el que se observa en la figura 14.

Figura 14*Módulo de Control de Temperatura MCT-02*

Para la operación del módulo de control de temperatura MCT-02, el sistema emplea agua como fluido de proceso y está constituido por dos tanques interconectados que permiten desarrollar etapas de calentamiento y enfriamiento de manera controlada (Energy Perú, 2017).

En el tanque inferior (tanque 1), el fluido de proceso es calentado mediante una resistencia eléctrica de 3000 W, cuyo ciclo de encendido es regulado por un sistema CRIO mediante modulación por ancho de pulso (PWM). Este tanque dispone además de un agitador, cuya función es homogenizar el fluido, garantizando una distribución uniforme de la temperatura en todo el volumen; por tanto, la transferencia de calor en esta etapa se produce principalmente por convección forzada. Asimismo, cuenta con un sensor de temperatura tipo PT-100 para la medición y monitoreo continuo de la variable térmica.

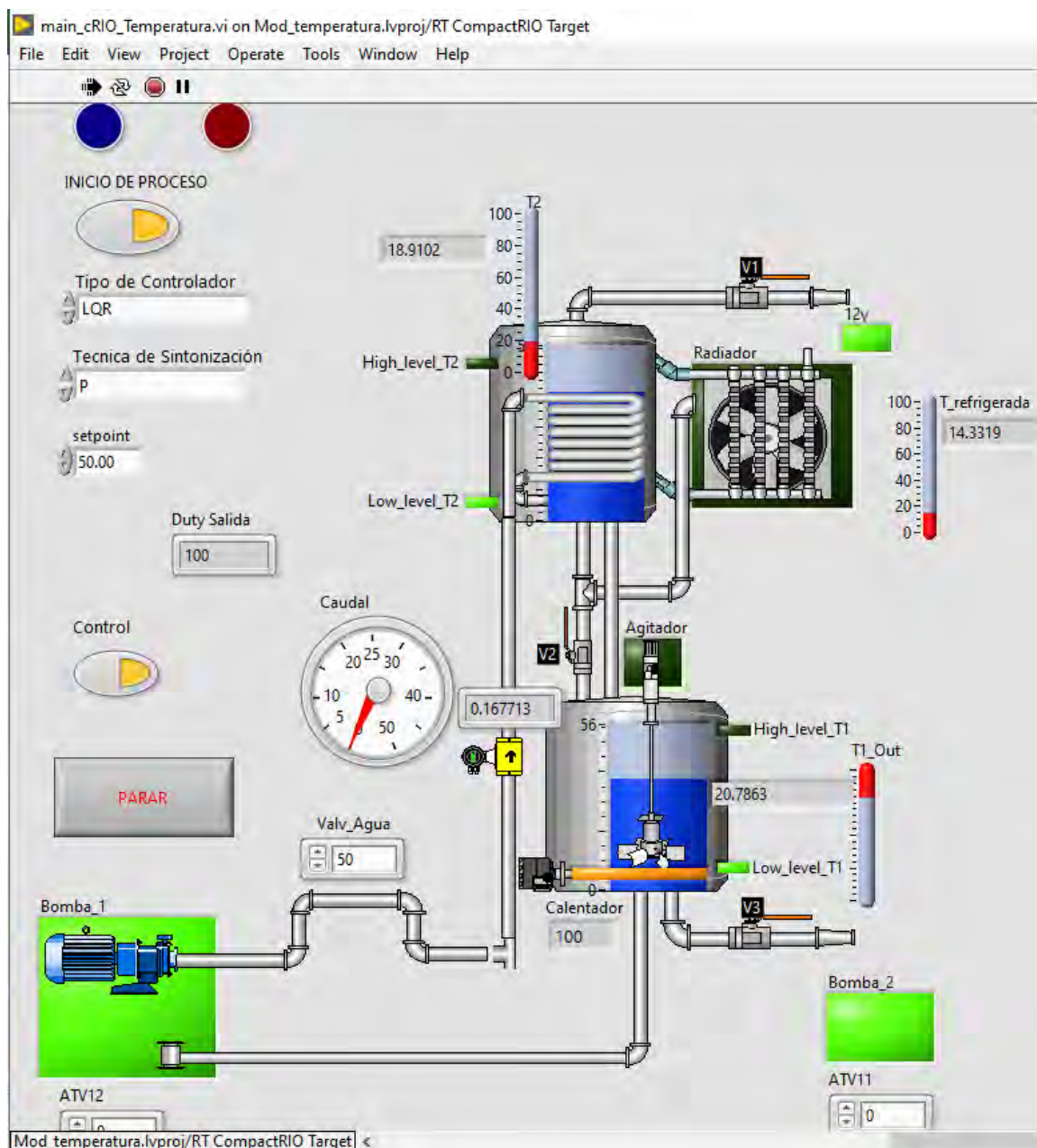
Cuando la temperatura del fluido a la salida del tanque 1 supera el valor de referencia (*set point*), se activa el sistema de enfriamiento. En esta fase, una electrobomba centrífuga (bomba 1), operando a una frecuencia de 35 Hz, impulsa el

fluido de proceso a través de una válvula motorizada con una apertura del 50 %, conduciéndolo hacia el tanque superior (tanque 2).

En el tanque 2 se lleva a cabo el proceso de enfriamiento mediante un serpentín instalado en su interior, donde ocurre la transferencia de calor entre el fluido de proceso y el medio de enfriamiento. Una vez enfriado, el fluido retorna al tanque 1, registrándose su temperatura de entrada mediante un sensor adicional, lo que permite evaluar el desempeño térmico del sistema.

Por otro lado, el agua contenida en el tanque 2 incrementa su temperatura debido al intercambio térmico. Para mantener la eficiencia del sistema, esta agua es recirculada mediante una segunda electrobomba (bomba 2), operando a una frecuencia de 30 Hz, hacia un radiador de 180 W, donde se enfría por convección forzada asistida por ventilación. Posteriormente, el fluido de enfriamiento retorna al tanque 2, cerrando así el ciclo térmico.

Adicionalmente, el sistema permite la introducción de perturbaciones mediante la manipulación manual de válvulas, lo que facilita el análisis del comportamiento dinámico y la evaluación de estrategias de control en condiciones variables de operación.



De acuerdo con el diagrama de instrumentación y tuberías (P&ID) del módulo de control de temperatura, presentado en el anexo F, el sistema está constituido por los siguientes equipos, accesorios e instrumentos:

a. Bomba eléctrica (PP-01)

El accionamiento de la bomba centrífuga consiste en un impulsor que gira dentro de una caja circular; el fluido entra a la bomba cerca del centro del impulsor rotatorio (rodete) y es llevado hacia arriba por acción centrífuga. La energía cinética del fluido

aumenta desde el centro del impulsor hasta los extremos de las aletas impulsoras. Esta carga de velocidad se convierte en carga de presión cuando el fluido sale de la bomba (Energy Perú, 2017).

Aplicaciones:

- Para líquidos moderadamente agresivos
- Manejo de fluidos, agua y líquidos mecánicos no agresivos.
- Circulación de agua (frío, caliente, refrigerado).

Características:

- Tipo: Centrífuga
- Fabricante: Pentax
- Modelo: U3SV-250/7T
- Potencia: 2.5 HP
- Caudal: 10-80 l/min
- Tmax liquido: 90°C

Figura 15

Bomba eléctrica (PP-01)



b. Bomba eléctrica (PP-02)

La bomba centrífuga de enfriamiento es un elemento actuador del sistema, ya que su funcionamiento será accionado por el PAC, quien determinará cuánta agua bombear para enfriar el sistema en caso este supere el valor consigna de temperatura en

el tanque. el accionamiento de la bomba centrífuga consiste en un impulsor que gira dentro de una caja circular; el fluido entra a la bomba cerca del centro del impulsor rotatorio (rodete) y es llevado hacia arriba por acción centrífuga. La energía cinética del fluido aumenta desde el centro del impulsor hasta los extremos de las aletas impulsoras. Esta carga de velocidad se convierte en carga de presión cuando el fluido sale de la bomba (Energy Perú, 2017).

- Tipo: Centrífuga
- Fabricante: Lowara
- Modelo: PSA706/A
- Potencia: 0.5 HP
- Caudal: 2-16 l/min
- Tmax liquido: 80°C

Figura 16

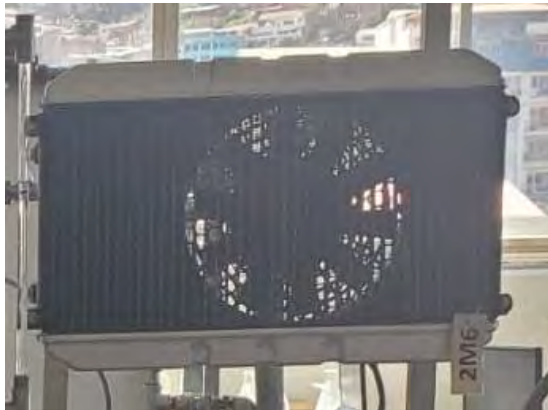
Bomba eléctrica (PP-02)



c. Radiador (2M6)

El radiador es un componente del sistema de intercambio de calor que permite la disipación de energía térmica del fluido caliente al ambiente, ayudando a mantener la temperatura adecuada en el proceso. El radiador tiene una potencia de 180.00 watts.

Figura 17
Radiador



d. Sensores de temperatura

El sensor de temperatura es el elemento de medida, son usados para medir y tomar temperaturas en sistemas hidráulicos y plantas de refrigeración en instalaciones marítimas o en todos aquellos lugares donde sea necesario un equipamiento fiable, robusto y preciso. Se utilizan en medios gaseosos o líquidos como: aire, agua, gas, vapor y aceite. El sensor aprovecha la característica física del medio y este es capaz de variar la resistencia eléctrica en función de la temperatura ambiente, gracias a este principio podemos describir su funcionamiento. El módulo cuenta con dos sensores de temperatura (Energy Perú, 2017).

Características:

- Fabricante: DANFOSS
- Modelo: MBT 5252
- Rango del sensor: $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Elemento sensor: Pt100 Clase B
- Transmisor de temperatura: de 4 a 20mA

Figura 18*Sensor de temperatura***e. Válvula de control con actuador motorizado Danfoss**

El actuador AME 435 se utiliza con válvulas de dos y tres vías tipo VRB, VRG, VF y VL hasta diámetro DN 80. El actuador adapta automáticamente su carrera a las posiciones finales de la válvula, lo que reduce el tiempo de puesta en marcha (auto-recorrido). Su diseño avanzado incorpora un sistema de desconexión en función de la carga para garantizar que los actuadores y las válvulas no se sobrecargue (IndiaMART, 2006)

Las válvulas de control motorizadas aseguran una regulación estable y precisa del flujo de agua, lo que contribuye a un control más eficiente de la temperatura y, en consecuencia, a un mayor confort para el usuario final. (IndiaMART, 2006)

Características:

- Tipo de actuador: Actuador eléctrico.
- Marca: DANFOSS
- Estructura: Pelota
- Voltaje: 24 V CC
- Nombre/ Número de modelo: AME435

- Longitud del trazo: 2"
- Fuerza: 24 V
- Presión: Presión media

Figura 19

Válvula de control con actuador motorizado



f. Medidor de caudal tipo paleta giratorio

Los medidores de caudal con paleta giratoria KOBOLD serie DRG se utilizan para medición y monitoreo de líquidos de baja viscosidad.

los medidores de caudal DRG trabajan bajo el muy conocido principio de paleta giratoria. Un magneto acoplado a la paleta y herméticamente sellado del medio transmite el movimiento giratorio sin contacto a un sensor de Efecto Hall montado en el cuerpo. El sensor convierte el movimiento giratorio, que es proporcional al caudal, en una señal de frecuencia. una unidad electrónica convierte la señal a una salida analógica, contactos limite o un indicador (Zertifizierte QM-System, 2024).

Características:

- Rango de caudal: 0.5 – 12...140 l/min agua
- Precisión de medición: $\pm 3\%$ fondo de escala
- Presión max: 40 bar
- Temperatura max: 80°C

- Conexión: G 1/8, G 1/4, G 1/2, G 3/4, G 1 hembra, 1/8" NPT, 1/4" NPT, 1/2" NPT, 3/4" NPT, 1" NPT hembra.
- Material: latón, acero inoxidable, PP
- Rango de viscosidad: baja
- Salida: pulsos, 4 – 20 mA, indicador LED

Figura 20

Medidor de caudal tipo paleta giratorio



g. Sensor y alarma de nivel, interruptor plástico de nivel

El interruptor de nivel plástico NKP está diseñado para el control económico de líquidos en recipientes. El interruptor se monta en la cara del recipiente. Un flotador plástico con bisagras con un imán flota hacia arriba y hacia abajo a través del nivel líquido. El contacto reed encapsulado es manejado por el imán. La función de conmutación (contacto N/A, contacto N/C) es determinada por la posición de la instalación. La función es invertida simplemente rotando el interruptor 180°C (Energy Perú, 2017). El módulo cuenta con 4 sensores y alarma de nivel.

Aplicaciones:

Lavado de automóviles, limpieza de máquinas, tanques plásticos y refrigeración con láser.

Características:

- Fabricante: Kobold
- Modelo: NKP
- Tipo de sensor: Interruptor de nivel por flotador (instalación horizontal)
- Material típico: Polipropileno (PP) o Nylon, adecuado para agua y líquidos no corrosivos
- Temperatura máxima: 100°C
- Presión máxima: 10 bar
- Conexión: Rosca (G ½, ½" NPT, M16)
- Puede configurarse como Normalmente Abierto (NO) o Normalmente Cerrado (NC) dependiendo de cómo se instala.
- Tensión y corriente típica: 250 V máx., 1 A máx. (según especificaciones del fabricante)

Figura 21

Sensor y alarma de nivel, interruptor plástico de nivel



h. Tanque de recogida de agua (TK-1)

- Material: acero inoxidable AISI 316
- Capacidad: 25.10 L
- Incluye un medidor de nivel de vidrio
- Incluye un agitador
- En su interior se encuentra una resistencia
- Cuenta con agitador y un motor de 5W, con velocidad 1300 / 1550 HZ.

Figura 22

Tanque de recogida de agua (TK-1)



i. Tanque de enfriamiento (TK-2)

- Material: acero inoxidable AISI 316
- Capacidad: 25.10 L
- Incluye un medidor de nivel de vidrio
- Dentro del tanque, se encuentra un serpentín

Figura 23

Tanque de enfriamiento (TK-2)



j. Resistencia

Las resistencias para calentar fluidos son elementos calefactores que funcionan mediante el efecto Joule, donde la corriente eléctrica al pasar por un conductor de alta resistencia genera calor, el cual se transmite al fluido en contacto con la superficie del elemento. La resistencia tiene una potencia de 3000.00 Watts.

Figura 24

Resistencia



k. Tablero de control

El tablero de control cuenta con varios accesorios electricos, entre ellos los más principales son los siguientes:

- **Variador de velocidad para motores asincrónicos-ATV 12**

Características

- o Modelo: ATV12HU22M3 (Altivar 12)
- o Potencia nominal: 2.2 kW (3 hp)
- o Alimentación: trifásica, 200 V a 240 V CA (50/60 Hz)
- o Corriente de salida máxima: aproximadamente 10 A
- o Protección: grado IP20, apto para ambientes normales con disipador de calor y ventilación forzada
- o Control de velocidad por entrada analógica (0–10 V o 4–20 mA).

Figura 25

Variador de velocidad para motores asincrónicos-ATV 12



- **Variador de velocidad para motores asincrónicos-ATV 11**

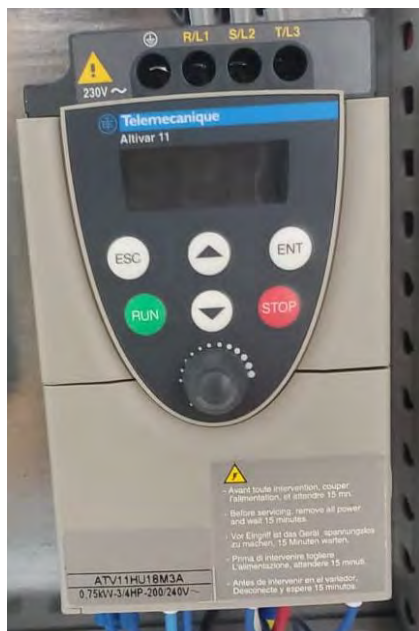
Características

- o Modelo: ATV11HU18M3A

- o Marca / Serie: Schneider Electric / Altivar 11
- o Potencia nominal: 1.8 kW ($\approx$ 2 HP)
- o Tensión de alimentación: 200–240 V AC, trifásica
- o Frecuencia de entrada: 50 / 60 Hz
- o Frecuencia de salida (ajustable): 0.5 a 200 Hz
- o Corriente nominal de salida: 7.5 A
- o Tipo de motor controlado: Motor asíncrono trifásico
- o Modo de control: Local (teclas en panel) o remoto (señales externas / PLC)
- o Control de velocidad por entrada analógica (0–10 V o 4–20 mA).

Figura 26

Variador de velocidad para motores asíncronos-ATV 11



- **Guardamotor**

Guardamotor termomagnético con conexión por terminales atornillables con botones pulsadores. El tablero cuenta con dos guardamotores.

Características

- o Fabricante: SCHNEIDER ELECTRIC
- o Modelo: GV2ME10

- o Rango de ajuste para disparo térmico: 4-6.3 A
- o Corriente de disparo magnético: 78 +- 20% A
- o Voltaje de operación: 690 V
- o Corriente: 3A

Figura 27
Guardamotor



- **NI cRIO-9063 – Controlador CompactRIO Integrado**

El Controlador CompactRIO Integrado (de National Instruments – NI) es un sistema de control y adquisición de datos programable, ampliamente utilizado en automatización industrial, robótica, control de procesos y monitoreo en tiempo real.

Características generales

Diseño: Controlador embedded, robusto y *fanless* (sin ventilador), ideal para aplicaciones de control y monitoreo avanzado.

Procesador: ARM Cortex-A9 de doble núcleo a 667 MHz, integrado en un sistema en chip (SoC) Xilinx Zynq-7000 XC7Z020.

Memoria:

- o RAM volátil: 256 MB DDR3.

- o Memoria no volátil: 512 MB (para almacenamiento o registro de datos).

Sistemas de tiempo real y programabilidad:

- o Ejecuta NI Linux Real-Time (32-bit).
- o FPGA programable accesible con LabVIEW FPGA Module (requerido para programación FPGA; no necesario si usas modo *Scan Interface*).

Figura 28

NI cRIO-9063 – Controlador CompactRIO Integrado



- **Llaves termomagnéticas**

Llave termomagnética 2FE:

- o Fabricante: Schneider Electric
- o Modelo: C60N
- o Tipo: Tripolar y bipolar
- o Voltaje de operación: 400 V
- o Corriente Nominal: 32A

Llave termomagnética 1F3:

- o Fabricante: Schneider Electric
- o Modelo: IC60N
- o Tipo: Bipolar

- o Voltaje de operación: 230/400 V
- o Corriente Nominal: 2A

Llave termomagnética 1Q1:

- o Fabricante: Schneider Electric
- o Modelo: IC60N
- o Tipo: tripolar
- o Voltaje de operación: 230/400 V
- o Corriente Nominal: 40A

Figura 29

Llaves termomagnéticas



1. Crydom D2410 – Relé de Estado Sólido (SSR)

El Crydom D2410 es un relé de estado sólido utilizado para controlar cargas de corriente alterna (AC) mediante una señal de control de corriente continua (DC).

Funciona electrónicamente, sin partes móviles, lo que garantiza mayor durabilidad, respuesta rápida y conmutación silenciosa.

Opera con una entrada de control de 3–32 VDC y puede manejar cargas de hasta 10 A y 24–280 VAC.

Utiliza el modo de conmutación “zero crossing”, activándose cuando la tensión

AC pasa por cero para reducir interferencias eléctricas.

Se emplea ampliamente en sistemas de control de temperatura, automatización industrial y control de resistencias calefactoras.

Características principales

- Tipo: Relé de estado sólido, SPST-NO (un solo polo, normalmente abierto).
- Tensión de carga (salida): 24–280 VAC.
- Corriente de carga: hasta 10 A.
- Tensión de control (entrada): 3–32 VDC (en algunas fichas: 4–32 VDC).
- Conmutación: por cruce por cero (zero-crossing, reduce ruidos eléctricos) o encendido instantáneo según variante.
- Tecnología de salida: SCR (rectificador controlado de silicio).

Figura 30

Crydom D2410 – Relé de Estado Sólido (SSR)



3.2.4 Softwares

Para el desarrollo de la simulación se hará uso de los softwares:

MATLAB es un entorno de programación orientado al cálculo numérico y análisis, que permite trabajar de forma eficiente con matrices y desarrollar scripts interactivos mediante el Editor en Vivo. Simulink complementa a MATLAB al ofrecer un entorno gráfico basado en diagramas de bloques para modelar, simular y diseñar

sistemas dinámicos multidominio, facilitando además la generación de código y la verificación de sistemas.

Por su parte, System Identification Toolbox permite modelar y analizar sistemas dinámicos a partir de datos, generando funciones de transferencia, modelos en espacio de estados y predicciones de series temporales. También incluye herramientas avanzadas para sistemas no lineales, integrando técnicas de Machine Learning y Deep Learning, y posibilita la identificación de modelos tipo caja gris. Todo esto se integra con Simulink para realizar simulaciones y apoyar el diseño de control, diagnóstico y pronóstico de sistemas. (The MathWorks, Inc., s.f.)

Microsoft Excel es una herramienta muy eficaz para obtener información con significado a partir de grandes cantidades de datos. También funciona muy bien con cálculos sencillos y para realizar el seguimiento de casi cualquier tipo de información. La clave para desbloquear todo este potencial es la cuadrícula de las celdas. Las celdas pueden contener números, texto o fórmulas. Los datos se escriben en las celdas y se agrupan en filas y columnas. Esto permite sumar datos, ordenarlos y filtrarlos, ponerlos en tablas y crear gráficos muy visuales (Microsoft.com, s.f.).

LabVIEW es un entorno de programación gráfica orientado al desarrollo de sistemas de pruebas e ingeniería, que destaca por su facilidad de uso y enfoque intuitivo. Permite integrar fácilmente hardware de NI y de terceros, simplificando la adquisición de datos y reduciendo la complejidad de la programación para que el usuario se concentre en resolver problemas de ingeniería. Además, ofrece herramientas integradas para crear interfaces de usuario, visualizar resultados en tiempo real y desarrollar algoritmos de análisis y control avanzado. También es compatible con otros lenguajes y software, facilitando la reutilización de bibliotecas y la integración con diversas herramientas de ingeniería. (LabVIEW, 2023).

3.3 Ámbito Espacial y Temporal

El trabajo se desarrollará en el Laboratorio de Control de Procesos, IQ 211, de la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

El trabajo se desarrolló desde el julio del 2024 hasta diciembre del 2025.

3.4 Diseño de la Investigación

a. Tipo y alcance de la investigación

El diseño de la investigación es de tipo experimental, ya que se manipulan las variables independientes mediante pruebas al módulo de control de temperatura, con el fin de obtener la temperatura del tanque 1 como variable dependiente. Asimismo, presenta un alcance explicativo, debido a que identifica y analiza las relaciones causales entre variables, profundizando en los mecanismos y procesos internos que conducen a los resultados observados.

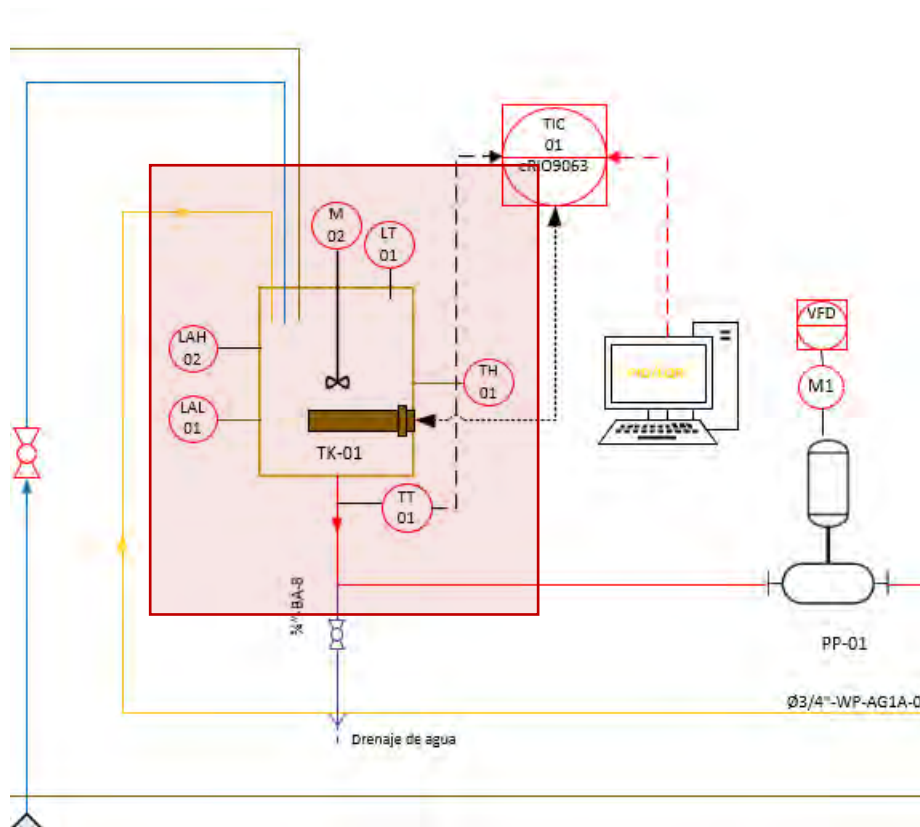
b. Delimitación del sistema de estudio

El presente estudio de control se centra exclusivamente en el tanque 1, el cual constituye el objeto de análisis dentro del sistema de control de temperatura. Esta delimitación permite abordar de manera específica el comportamiento dinámico del proceso, así como la evaluación de los controladores implementados.

Asimismo, se incluye el plano del sistema en el que se resalta el tanque 1, como se muestra en la figura 31, con la finalidad de facilitar su identificación y contextualización dentro del sistema general.

Figura 31

Sección del plano del sistema de control de temperatura resaltando el tanque 1



c. Pruebas experimentales y evaluación de controladores

Para el desarrollo de la investigación, se realizaron pruebas experimentales orientadas a la obtención de datos del tanque 1 del módulo de control de temperatura. Dichos datos fueron procesados para determinar la función de transferencia del sistema, así como para la sintonización de los controladores PID y LQR.

La evaluación del desempeño de estos controladores se llevó a cabo mediante pruebas que incluyeron cambios en el set point y la introducción de perturbaciones en el sistema, permitiendo analizar la respuesta dinámica bajo diferentes condiciones de operación.

Todas las pruebas experimentales se realizaron en dos repeticiones, abarcando desde la obtención de datos de calentamiento, la aplicación de cambios de set point y

perturbaciones, hasta la evaluación del desempeño de los controladores PID y LQR.

Finalmente, la comparación entre ambos controladores se efectuó mediante el análisis de las características de las curvas de respuesta obtenidas, así como a través del criterio de minimización del error.

d. Condiciones de operación y selección del punto de trabajo

El rango de operación del sistema se establece entre 15 °C y 50 °C de acuerdo con el manual del módulo MCT-02, dentro del cual se garantiza un funcionamiento seguro y estable del proceso. Dentro de este rango, se seleccionó como punto de operación el valor de 50 °C, correspondiente al límite superior, con el objetivo de maximizar el gradiente térmico entre el sistema y el ambiente.

No se seleccionaron temperaturas cercanas a la temperatura ambiente (16 °C – 26 °C), debido a que en estas condiciones el gradiente térmico es reducido. Por ejemplo, operar a 25 °C implicaría una diferencia mínima con el entorno, lo que ocasiona una baja transferencia de calor y una respuesta lenta del sistema, dificultando la evaluación de la dinámica del controlador.

Por otro lado, no se consideraron temperaturas elevadas cercanas al punto de ebullición del agua (89 °C en condiciones locales), ya que en este rango pueden presentarse fenómenos no lineales. Por ejemplo, a temperaturas próximas a ebullición se generan burbujas y cambios en las propiedades del fluido, lo que altera la transferencia de calor y puede introducir inestabilidad o comportamientos no representativos del modelo del sistema.

En consecuencia, la elección de 50 °C como punto de operación permite trabajar dentro de un rango seguro, con un gradiente térmico suficientemente elevado para obtener una respuesta dinámica clara, evitando tanto zonas de baja sensibilidad como regiones con comportamiento no lineal.

Además, para la evaluación del desempeño del sistema de control, se realizarán variaciones en el set point tomando valores de temperatura tanto inferiores como superiores al punto de operación seleccionado de 50 °C, con el fin de analizar el comportamiento dinámico del sistema frente a cambios de referencia y verificar su capacidad de seguimiento y estabilidad.

3.5 Identificación de Variables

3.5.1 Variables para Proceso

- Variable dependiente: Temperatura del fluido del tanque 1 (TK-1)
- Variable independiente: Tiempo

3.5.2 Variables para control de Procesos

- Variable de entrada: Temperatura
- Variable de salida: Tiempo
- Variable manipulada: El calor de calentamiento de la resistencia

3.6 Métodos

3.6.1 Diagnóstico del Módulo de Control de Temperatura

Como parte de la metodología, se realizó un diagnóstico inicial del módulo de control de temperatura con el propósito de verificar su estado operativo antes de la ejecución de las pruebas experimentales. Para ello, se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Se verificó la disponibilidad y el correcto funcionamiento del programa de control instalado en la computadora, ubicado en la carpeta “Temperatura_Base_MOD”.
- Se verificó el estado inicial de los instrumentos de medición, específicamente el termómetro del tanque 1 (TK-1) y el flujómetro, comprobando que sus lecturas sean coherentes con las visualizadas en el programa de control.

- Se evaluó el estado operativo de los equipos, específicamente la bomba 1 y la bomba 2, verificando su encendido y apagado, así como la posibilidad de regular su frecuencia mediante el programa de control.
- Se comprobó el funcionamiento del radiador, verificando su encendido y apagado a través del programa de control.
- Se verificó el funcionamiento de la resistencia eléctrica de calentamiento, evaluando su encendido y apagado mediante el programa, así como su capacidad para generar un incremento de temperatura.
- Se evaluó la operatividad de la válvula de control con actuador motorizado (BV-003), verificando que el porcentaje de apertura sea correctamente regulado mediante el programa de control.
- Se inspeccionó el sistema de tuberías del módulo de control de temperatura con el fin de identificar posibles obstrucciones, fugas o daños estructurales.
- Se revisó la integridad estructural del módulo, con el propósito de prevenir fugas de agua durante su operación.
- Se verificó que el tanque 1 (TK-1) del módulo de control de temperatura disponga de un sistema de control funcional, que permita la regulación, supervisión y registro de la temperatura durante la operación.

3.6.2 Identificación del modelo del proceso usando el balance de energía

Para el desarrollo del presente estudio, se siguió un procedimiento sistemático orientado a la obtención del modelo dinámico del proceso de calentamiento de agua en un tanque agitado.

- **Se definió el sistema de estudio**, el cual corresponde a un tanque agitado operando en régimen batch, considerado como un sistema cerrado debido a la ausencia de flujo de entrada y salida de masa.

- Se **realizó la caracterización del sistema físico**, identificando como fluido de trabajo el agua, una resistencia eléctrica de potencia constante de 3000 W como fuente de energía térmica y un agitador mecánico cuya función es garantizar la homogeneidad de la temperatura en todo el sistema.
- Se **establecieron los supuestos de modelamiento**, considerando que el sistema se encuentra perfectamente mezclado, que el volumen de operación permanece constante, que las propiedades físicas del fluido son constantes y que las pérdidas de calor hacia el ambiente pueden representarse mediante un coeficiente global de transferencia de calor. Asimismo, se despreciaron los efectos del trabajo del agitador y los cambios en la energía cinética y potencial.
- Se **formuló el balance de energía**, aplicando la primera ley de la termodinámica para sistemas cerrados, tomando en cuenta la acumulación de energía interna, el calor suministrado por la resistencia eléctrica y las pérdidas térmicas hacia el entorno.
- Se **desarrolló el modelo matemático en el dominio del tiempo**, expresando la energía interna como función de la temperatura y obteniendo una ecuación diferencial que describe el comportamiento dinámico del sistema.
- Se **incorporó el término de pérdidas térmicas**, modelándolo en función de la diferencia entre la temperatura del sistema y la temperatura ambiente.
- Se **definieron variables de desviación**, expresando la temperatura del sistema respecto a la temperatura ambiente, lo que permitió reformular el modelo en una forma más adecuada para su tratamiento matemático.
- Se **aplicó la transformada de Laplace**, con el fin de transformar la ecuación diferencial al dominio de la Laplace, facilitando su resolución y análisis.

- **Se obtuvo la función de transferencia del sistema**, estableciendo la relación entre la entrada (potencia térmica) y la salida (temperatura), identificando su comportamiento como un sistema de primer orden.
- **Se expresó el modelo en su forma estándar**, determinando la ganancia del sistema y la constante de tiempo característica.
- **Se calcularon los parámetros del modelo**, empleando datos teóricos y experimentales tales como volumen, densidad, calor específico, potencia suministrada y temperaturas de operación. Asimismo, **se estimó el coeficiente global de transferencia de calor por el área (UA)** a partir de condiciones de estado estacionario.
- **Se obtuvo el modelo dinámico final**, el cual permitió describir el comportamiento térmico del sistema y analizar su respuesta dinámica.

3.6.3 Identificación del modelo dinámico del Módulo de Control Temperatura MCT-02 usando la técnica de identificación de sistemas

Para la obtención del modelo dinámico del módulo de control de temperatura MCT-02 se empleó el **método de caja negra**, mediante la técnica de identificación de sistemas. Este enfoque permite modelar el comportamiento del sistema a partir de datos experimentales de entrada y salida, sin requerir un conocimiento detallado de los fenómenos físicos internos.

A) Operación del equipo, en circuito abierto

Primeramente, se prendió el módulo de control de temperatura, con las condiciones de operación, como se muestra en el anexo A. Así mismo, se prendió el termohigrómetro, que se utilizó para medir la temperatura y la humedad ambiental. Después, se inició con el proceso de calentamiento del tanque 1, prendiendo el agitador y la resistencia.

B) Exportación de los datos de Excel al Matlab

Los datos obtenidos durante la prueba se exportan a Excel desde LabView. Los datos exportados al Excel, se ordenaron de la siguiente manera, en la primera columna el tiempo (t); la segunda columna la temperatura (T); en la tercera columna la variable de entrada (Q), lo que indica el apagado o encendido de la resistencia, con valores de 0 como apagado y 1 como encendido al 100%; finalmente en la cuarta columna la variable de desviación de la temperatura (Td). Usando la expresión $T^d(t) = T(t) - \bar{T}$, donde $T(t)$ es la temperatura en el tiempo capturada por el programa y $\bar{T}$ es la temperatura inicial.

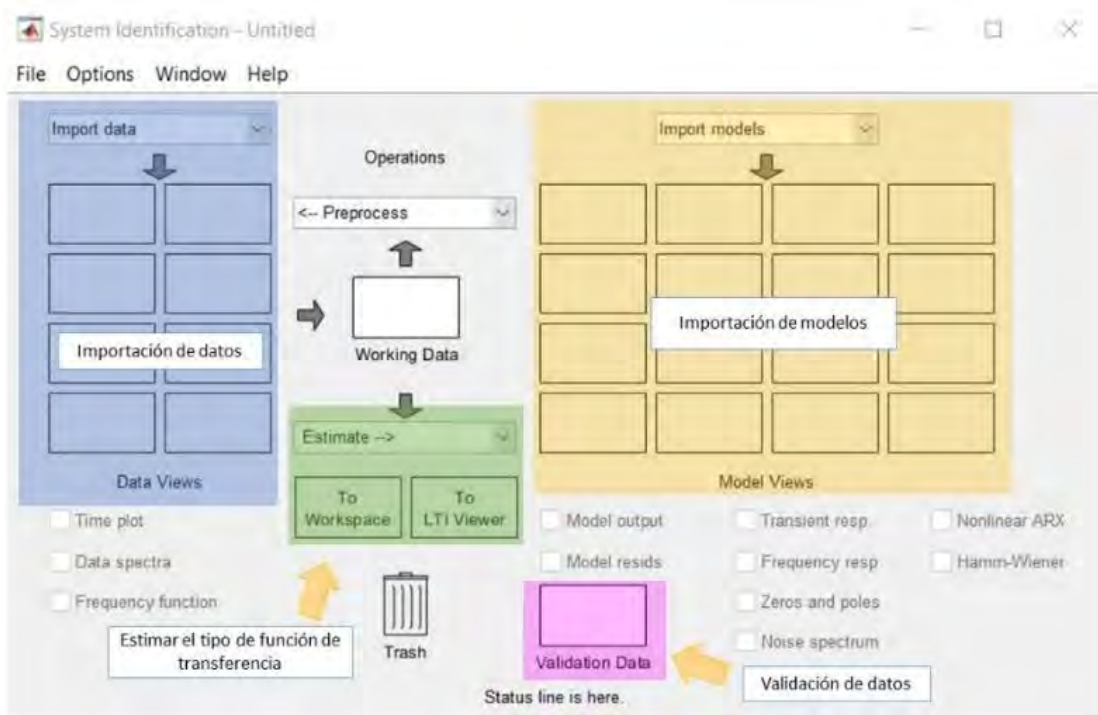
Los datos del Excel se importaron al entorno de Matlab, en formato tabla, luego se realizó el código para graficar los datos de variable de desviación de la temperatura en función del tiempo. Para tener la gráfica entrada (u) y salida (y).

C) Determinación del modelo del proceso, como función de transferencia

La herramienta de identificación de sistemas de Matlab es **System Identification Toolbox**, esta herramienta requiere los datos de la variable de entrada y salida. Para ingresar a esta herramienta se selecciona **Apps - System Identification**.

En la figura 32 se observa la herramienta System Identification Toolbox, en esta ventana se importaron los datos, se estimaron el tipo de función de transferencia, se importaron los modelos y se validaron los datos.

Figura 32
 Ventana System Identification de Matlab.



- **Importación de datos**

Para importar los datos entrada y salida, se selecciona Import data-Time Domain Data. En la figura 33 se muestra la pestaña de Time Domain Signals, donde se escribió la variable de entrada (Input) y salida (Output) del sistema, también, se redactó el nombre de los datos, el tiempo de inicio y el tiempo de muestreo.

Figura 33

Pestaña de Time Domain Signals.

Data Format for Signals
Time Domain Signals

Workspace Variable
Input:
Output:

Data Information
Data Name: mydata
Start Time: 1
Sample Time: 1
More

Import Reset
Close Help

Variable de espacio de trabajo:
- Datos de entrada
- Datos de salida

Información de datos:
- Nombre
- Tiempo de inicio
- Tiempo de muestreo

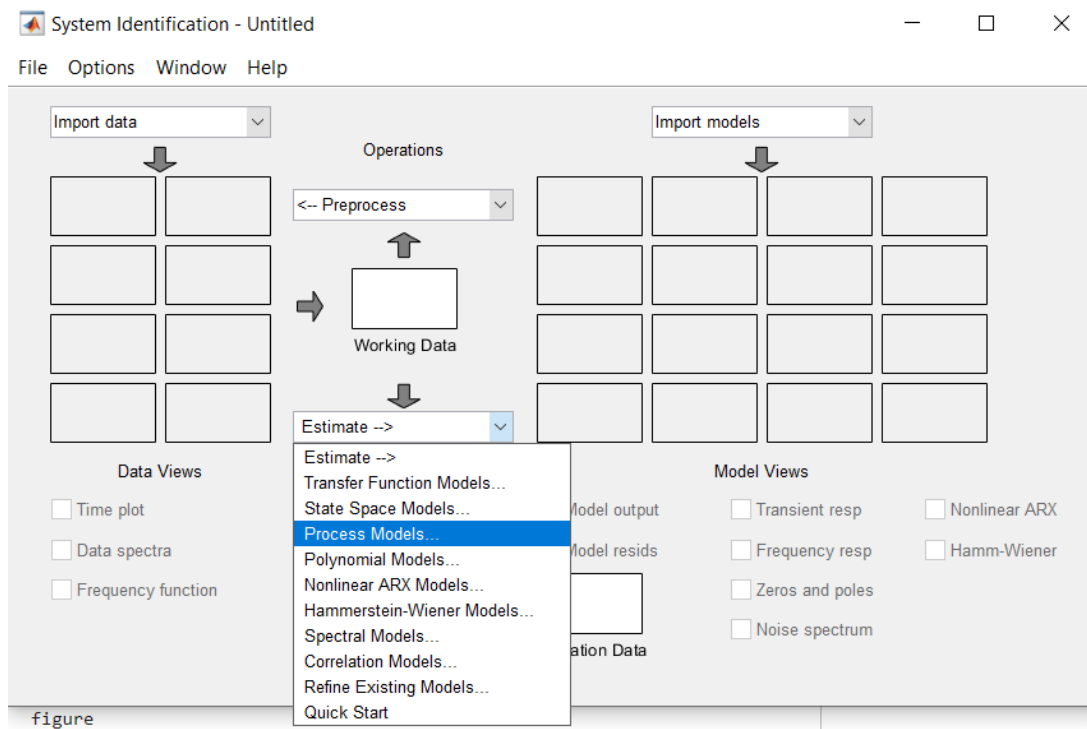
Después de completar los datos en la ventana *Time Domain Signals*, se selecciona primero *Import* y, a continuación, *Close*. Luego, en la sección de *Import data*, se muestra la gráfica de entrada y salida, que por comodidad se llamó *Idendata*. Para realizar la validación de los datos, el *Idendata* automáticamente se desplazó a la sección de *Validation Data*.

- **Estimación del modelo**

Después de la importación de los datos (*Idendata*), se estimó el modelo del proceso. En la figura 34 se muestran las opciones disponibles en la sección *Estimate*, donde se seleccionó *Process Models*, ya que la estimación realizada es de tipo no paramétrica.

Figura 34

Sección de Estimación y la opción Process Models



Luego, de seleccionar *Process Models*, se muestra una pestaña que este compuesta por dos secciones: *Transfer Funtion* y valores de K y Td. Para esta pestaña se seleccionó *Simulation* en *Focus*, pero en condiciones iniciales se deja como *Auto* porque se va a realizar una estimación y en *Covariance* se selecciona *Estimate* ya que se va a analizar el tema de la covarianza entre los valores estimados y los valores reales.

Figura 35
Pestaña Process Models.

En la sección *Transfer Function* se determinó el número de polos, ceros, tiempo muerto y el tipo de integrador. Una vez especificados estos parámetros, se realizó la estimación del modelo de proceso seleccionado.

La estimación se realizó para un modelo, el cual se importa automáticamente en la sección *Import Models* de la ventana *System Identification*. Con el modelo obtenido, se seleccionó la opción *Model Output* para comparar el modelo con los datos de validación (*Valdata*) y se visualizó el porcentaje de ajuste obtenido.

• Importación de los modelos a Matlab

El modelo de función de transferencia obtenido se importó a MATLAB desplazando dicho modelo al recuadro *To Workspace*. Para visualizar el modelo de manera más detallada en el entorno de MATLAB, se introdujo el código del apéndice 1. Asimismo, para observar el porcentaje de ajuste, el Error de Predicción Final (FPE) y el Error Cuadrático Medio (MSE) correspondiente al modelo obtenido, se ingresa el **nombre del modelo** en la ventana de comandos (*Command Window*) de MATLAB.

3.6.4 Sintonización del controlador PID mediante la técnica de Ziegler-Nichols

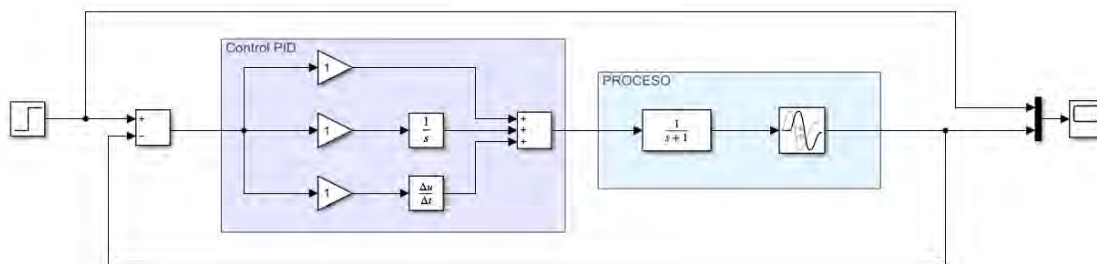
a) Diseñar el diagrama de lazo cerrado ideal para un controlador PID

Para sintonizar los controladores PID, se diseñó el diagrama de lazo cerrado ideal en Simulink. Desde la barra de menús de MATLAB se accede a esta herramienta, donde se abre su pestaña principal. Luego, se selecciona *Library Browser* para acceder a las bibliotecas de bloques. Se incorporaron los siguientes bloques al área de trabajo: *Transfer Fcn*, *Transport Delay*, *Gain*, *Integrator*, *Derivative*, *Scope*, *Add* y *Step*.

Después de realizar algunos ajustes, se conectan los componentes hasta conformar el modelo de lazo cerrado. Finalmente, se asignan nombres a los bloques y se enmarcan: el controlador y el proceso, para facilitar la visualización del esquema de control, como se muestra en la figura 36.

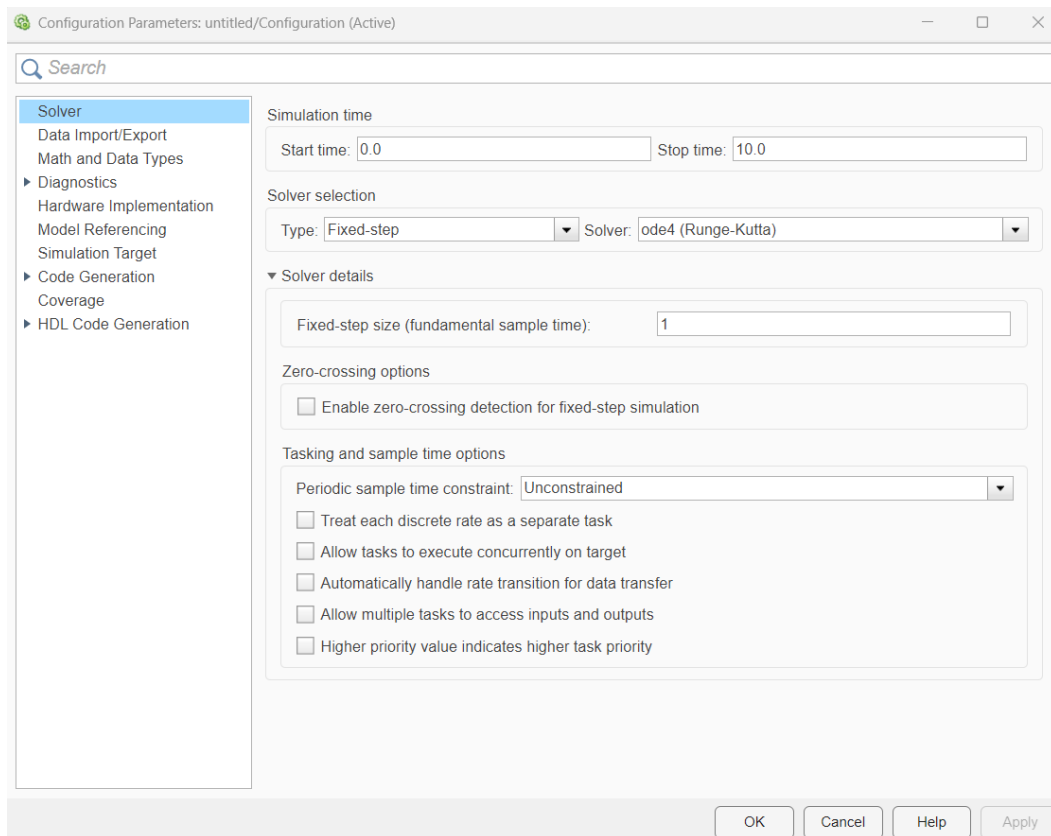
Figura 36

Diagrama de lazo de control cerrado para un controlador PID en el Simulink.

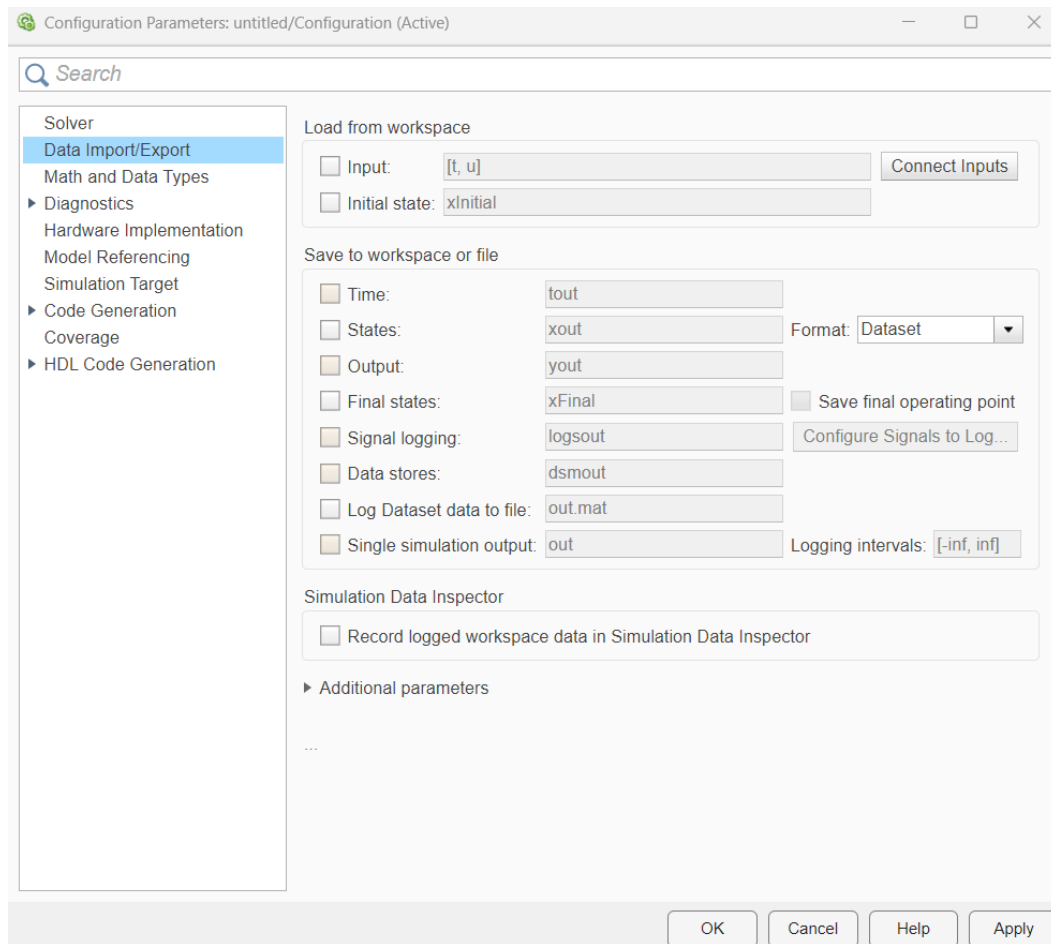


Después, se ingresó a la barra de menú del *Simulink* y se seleccionó configuración. Dentro de la pestaña de configuración se seleccionó *Solver*, ahí se elige *Fixed-step* en *Type*, *ode4(Runge-Kutta)* en *Solver* y en el *Fixed-step size* se colocó el intervalo de tiempo.

Figura 37
Ventana de Solver de Simulink



Dentro de la pestaña de configuración se ingresó a *Data Import/Export*, y se deseleccionó el *Time*, *Output*, *Limit data points to last*, *Signal logging* y *Data Store Memory*. Así mismo en *Format* se seleccionó *Dataset*.

Figura 38*Ventana de Data Import/Export de Simulink***b) Sintonización del controlador PID en lazo cerrado**

Para obtener las ganancias del controlador PID mediante el método de Ziegler–Nichols, el procedimiento se realizó en la herramienta Simulink, utilizando el diagrama de lazo cerrado del sistema.

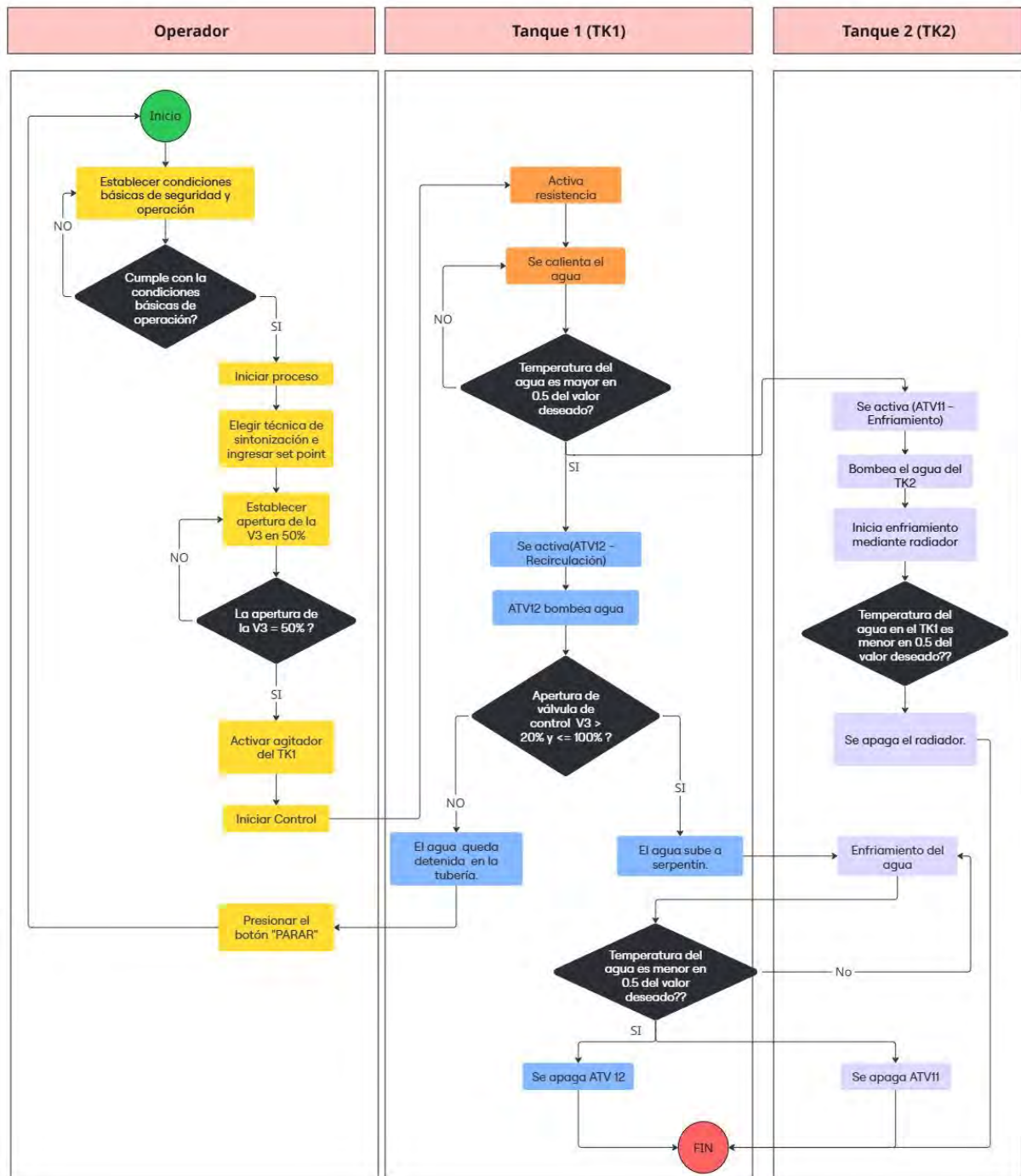
El proceso consistió en desactivar las acciones integral y derivativa, manteniendo únicamente la acción proporcional. Posteriormente, se incrementó gradualmente la ganancia K_c hasta que el sistema presentó oscilaciones continuas y sostenidas; a este valor se le denomina ganancia última (K_{cu}). Una vez alcanzadas las oscilaciones, se midió el período de oscilación, conocido como período último (P_u) (Mellichamp, Seborg, Doyle y Edgar, 2011).

Finalmente, las constantes del controlador PID se calcularon empleando los valores de K_{cu} y P_u según los parámetros establecidos en la Tabla 1.

c) Implementación del controlador PID en el LAVIEW

El controlador PID se implementó en LabVIEW mediante una estructura *While Loop*, la cual contiene cuatro secuencias destinadas al control del módulo de temperatura mediante la acción de un controlador PID.

En la figura 39 se presenta el diagrama de flujo del control de proceso de calentamiento mediante un controlador PID, en el cual se identifican tres fases principales: operador, tanque 1 y tanque 2. Este diagrama expone de manera secuencial las acciones que deben ejecutarse para el funcionamiento del sistema mediante la aplicación del controlador PID.

Figura 39*Control de proceso de calentamiento mediante un controlador PID*

A continuación, se describen las cuatro secuencias implementadas en el software LabVIEW:

En la secuencia 1, se implementó el bloque PID, configurando las variables correspondientes para cada terminal. Asimismo, en esta secuencia se habilita el sistema

de enfriamiento, el cual se activa cuando la temperatura del tanque 1 sobrepasa en 0.5 °C al *set point*, iniciando así la recirculación y el encendido del radiador. En la figura 40 se muestra el bloque PID y sus terminales, en la tabla 3 se describe las variables de entrada de bloque PID y en la tabla 4 se describe las variables de salida del bloque PID.

Figura 40

Bloque de control PID en LabVIEW

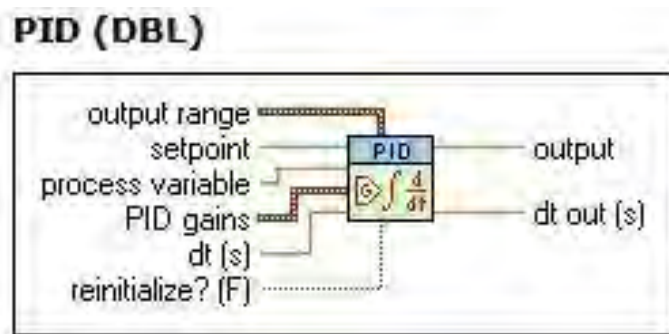


Tabla 3

Variables de entrada de bloque PID de LabVIEW

TERMINAL	DESCRIPCIÓN
Output range	Define el rango permitido para la salida de control, cuyo valor por defecto va de -100 a 100 % de la escala total.
Set point	Especifica el valor del punto de ajuste, o valor deseado, de la variable del proceso que se está controlando.
Process variable	Indica el valor medido de la variable de proceso, equivalente al valor de retroalimentación del lazo de control.
PID gains	Las ganancias PID definen los parámetros del controlador: ganancia proporcional (K_c), tiempo integral (T_i , min) y tiempo derivativo (T_d , min). Por defecto, $K_c = 1$, $T_i = 0,01$ y $T_d = 0$.
dt (s)	dt(s) define el tiempo de ciclo del bucle (VI) en segundos. Si es ≤ 0 , el VI usa un temporizador interno con resolución de 1 ms. El valor por defecto es -1.
Reinitialize? (F)	Indica si se deben reiniciar los parámetros internos del controlador, como el error integrado. Se establece en VERDADERO para reiniciar solo el bucle de control. El valor predeterminado es FALSO.

Fuente: Tomado del manual de ayuda de LabView (2017)

Tabla 4*Variables de salida del bloque PID de LabVIEW*

TERMINAL	DESCRIPCIÓN
Output	Devuelve la salida de control del algoritmo PID aplicado al proceso controlado. Si este VI recibe una entrada no válida, la salida devuelve NaN.
dt out (s)	Devuelve el intervalo de tiempo real en segundos. dt out (s) devuelve el valor de dt (s) o el intervalo calculado si establece dt (s) en -1.

Fuente: Tomado del manual de ayuda de LabView (2017)

En la Secuencia 2, se implementó el proceso de enfriamiento a través del radiador. Para ello, se activa la recirculación del sistema cuando la temperatura supera en 0.5 °C el valor del set point. En ese momento, se ponen en funcionamiento las bombas ATV11 y ATV12.

En la secuencia 3, se implementó la restricción del valor de la válvula, donde el porcentaje de apertura deberá estar entre los 20% y 100%. Por lo tanto, el valor predeterminado de la apertura de la válvula será de 50 %.

En la secuencia 4, se implementó el programa de generación de señal PWM para controlar la resistencia del módulo de temperatura:

- La señal PWM permite controlar la potencia de generación de la resistencia que calienta el líquido del **tanque_1** del módulo de temperatura.
- Para ello, se necesita generar una onda cuadrada con una frecuencia constante, es decir, con un periodo de un segundo. El Duty_Cycle es el ciclo de servicio, que también puede ser definido como el porcentaje de la onda que mantiene en nivel alto, siendo el rango de medida desde 0 a 100 %.

3.6.5 Sintonización del controlador LQR

a. Conversión de la función de transferencia al espacio de estados

“controlable”

Para convertir la función de transferencia al espacio de estados, esta no debe contener términos de retardo puro. En caso de que la función incluya un término de retardo, se *deberá aplicar una aproximación de Padé de primer orden* para su representación y así permitir su tratamiento dentro del dominio de Laplace.

Después de haber aproximado el retardo a una función racional equivalente, la función equivalente obtenida se convierte al espacio de estados usando la forma canónica controlable.

b. Discretización de las matrices A, B, C y D

Una vez determinadas las matrices del sistema en tiempo continuo, se procedió a realizar su discretización con el objetivo de adaptar el modelo a un entorno de control digital. Para ello, se aplicó el método de discretización correspondiente al periodo de muestreo seleccionado, asegurando que la dinámica del modelo discreto mantuviera las propiedades esenciales del sistema continuo.

El proceso consistió en transformar las matrices continuas del modelo en sus equivalentes discretas, obteniendo así la representación necesaria para la implementación del controlador LQR y del observador de estados dentro del sistema digital. El código empleado para llevar a cabo la discretización de las matrices A, B, C y D se encuentra detallado en el apéndice 3.

c. Determinación de las matrices Q y R mediante simulación en Matlab

La selección de las matrices Q y R se desarrolló mediante un proceso iterativo. Primero, se estableció el modelo del sistema en espacio de estados y se asignaron valores iniciales a ambas matrices. Luego, se aplicó un método de prueba y error en el

cual se modificaron los elementos de Q y R para evaluar cómo influían en el comportamiento dinámico del sistema.

Para cada ajuste, se realizó una simulación en MATLAB, analizando parámetros como el tiempo de respuesta, la estabilidad, la presencia de oscilaciones y el esfuerzo de control requerido. Este procedimiento se repitió hasta identificar la combinación de Q y R que ofreció el mejor compromiso entre rapidez, estabilidad y eficiencia del control. Finalmente, se verificó el desempeño del controlador mediante una simulación ante una referencia constante de temperatura de 50 °C, confirmando que la configuración seleccionada satisface los criterios de diseño establecidos.

El código empleado durante este proceso se presenta en el apéndice 4.

d. Ganancia del controlador LQR discreto

Una vez obtenidas las matrices del sistema en tiempo discreto (A, B, C y D) y definidos los valores de las matrices Q y R, se procedió al cálculo de la ganancia del controlador LQR en su versión discreta. Este proceso consistió en resolver la ecuación de Riccati discreta y, a partir de ella, determinar la matriz de realimentación de estados (K) que permite optimizar el desempeño del sistema bajo los criterios establecidos.

El procedimiento de cálculo y el código utilizado para obtener la ganancia del controlador LQR discreto se encuentran detallados en el apéndice 4.

e. Normalización de la referencia (N_{bar})

Para asegurar que el controlador LQR pudiera realizar un seguimiento adecuado de la señal de referencia, se aplicó un proceso de normalización de dicha señal. Este procedimiento permitió obtener el valor del factor N_{bar} , necesario para ajustar la acción del controlador frente a referencias constantes. El código utilizado para este cálculo se presenta en el apéndice 5.

f. Observador discreto

Debido a que no todos los estados del sistema podían ser medidos directamente, se diseñó un observador discreto que permitiera estimarlos a partir de la salida disponible. Para ello, y utilizando las matrices discretizadas de A y C, se determinó la ganancia L del observador mediante la ubicación de polos en posiciones adecuadas, garantizando así una convergencia rápida y estable del error de estimación. El código utilizado para este diseño se presenta en el apéndice 6.

g. Simulación del controlador LQR discreto

Para evaluar el desempeño del controlador LQR discreto y del observador diseñado, se realizaron simulaciones considerando una referencia de 50 °C. En este procedimiento se analizó la respuesta del sistema controlado, el comportamiento del observador en la estimación de los estados y la señal de la acción de control generada. El código utilizado para ejecutar dichas simulaciones se encuentra en el apéndice 7.

h. Implementación del controlador LQR

Para implementar el controlador LQR discreto en LabVIEW, se realizó siguiendo los siguientes:

- o Estimación de la Salida y Cálculo del Error del Observador: Se calcula la salida $\hat{y}$ estimada a partir de los estados estimados $\hat{x}_1$ y $\hat{x}_2$, luego se determina el error de estimación.
- o Cálculo de la Ley de Control (LQR): Se calcula la señal de control u_{in} utilizando la realimentación de los estados estimados y una acción de *pre-filtrado* (N_{bar}) para el punto de referencia (SP).
- o Saturación y Escalado de la Señal de Control: Se aplica la saturación u_{out} a la señal de control u_{in} y se escala esta señal al rango de salida final (PWM).

- o Actualización del Observador de Estado: Se actualizan los estados estimados $\hat{x}_1$ y $\hat{x}_2$ para el siguiente paso de tiempo, utilizando la dinámica del sistema y la corrección basada en el error del observador.

3.6.6 Evaluación del desempeño de los controladores PID y LQR

El desempeño de los controladores PID y LQR, se realizó en base a la información de la respuesta en el tiempo y el análisis de error.

Para el análisis de la respuesta en el tiempo del controlador PID, se importaron los datos de Excel al entorno de Matlab, en formato tabla y columna de vectores, una vez que los datos estén en Matlab, se creó el código del apéndice 2 para obtener las características del controlador y para el controlador LQR se muestra en el apéndice 8, con el comando *stepinfo*, dichas características corresponden a la tabla 2.

Para el análisis del error, se importaron los datos de Excel al entorno de Matlab, en formato tabla y columna de vectores, donde se crean dos variables: time y error. Los criterios para el análisis de error que se utilizaron fueron:

- ISE (Integral del error al cuadrado), este criterio penaliza los errores grandes

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t)dt \quad (32)$$

- IAE (Integral del valor absoluto del error), $e(t)$, es la diferencia entre el punto de ajuste y la medición

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)|dt \quad (33)$$

Dichos errores se determinaron utilizando el código del apéndice 2 en Matlab.

Para el análisis energético, se aplicó el balance de energía utilizando los datos experimentales procesados en Excel.

3.6.7 Comparación de los controladores PID y LQR, frente a cambios de set point y perturbaciones

A. Frente a cambios de set point

Para realizar las pruebas de cambio de *set point*, se arrancó el programa con el control activado y se cumplió los siguientes valores de *set point*, para cada tipo de controlador:

Tabla 5

Valores para generar cambios de set point

Set point	Duración de tiempo (min)	Qué se busca	Qué se interpreta
Inicio → 55	30	Llevar el sistema a estado estable	Condición base para comparar (referencia inicial estable)
55 → 40	12	Cambio descendente	Capacidad de seguimiento a la baja, tiempo de respuesta, posible sobreoscilación
40 → 60	12	Cambio ascendente grande	Respuesta ante incremento exigente, rapidez, sobreimpulso
60 → 55	8	Retorno a valor intermedio	Condición base para comparar (referencia inicial estable)

Los tiempos asignados a cada cambio de set point se definió con el propósito de permitir la adecuada observación de la respuesta dinámica del sistema en cada etapa del proceso.

- **Inicio → 55 °C (30 min)**

Se asigna el mayor tiempo para asegurar que el sistema alcance el **estado estacionario**, eliminando efectos transitorios iniciales. Esto permite establecer una **condición base estable** para comparar los cambios posteriores.

- **55 → 40 °C (12 min)**

Este tiempo es suficiente para observar la **respuesta transitoria del**

sistema ante una disminución en la referencia, incluyendo la velocidad de respuesta y la tendencia hacia la estabilización, sin necesidad de esperar un estado completamente estacionario.

- **40 → 60 °C (12 min)**

Se mantiene el mismo intervalo de tiempo para poder **comparar de manera consistente** la respuesta frente a un cambio ascendente. Este tiempo permite evaluar parámetros como rapidez de respuesta y posible sobreimpulso bajo una exigencia mayor.

- **60 → 55 °C (8 min)**

Se asigna un tiempo menor debido a que el sistema ya ha sido previamente excitado, por lo que se espera una **respuesta más rápida**. Este intervalo permite observar la **capacidad de recuperación y estabilización final** del sistema.

Para comparar el desempeño de los controladores frente a cambios de set point se evaluó las características de la curva, mediante el comando **stepinfo**, así como el criterio del error utilizando: ISE (Integral del error al cuadrado) e IAE (Integral del valor absoluto del error).

B. Frente a perturbaciones

Para realizar las pruebas ante una perturbación, el programa se inicia con el control activado y un set point de 50 °C. El fluido de proceso del tanque 1 se calienta durante 30 minutos y, una vez transcurrido este tiempo, se aplica la perturbación. Posteriormente, se espera un periodo de 10 minutos para observar la respuesta del sistema.

La perturbación consistió en adicionar aproximadamente 2.9 litros del volumen de agua de calentamiento inicial (14.52 L), abriendo manualmente la válvula V-1. De

manera simultánea, se registran los datos de temperatura ambiental y humedad, así como la temperatura del agua de perturbación.

Con los datos de tiempo y las señales de respuesta obtenidas para ambos métodos de sintonización (PID y LQR), se genera la gráfica correspondiente a la perturbación, recortando el intervalo desde el instante en que esta ocurre hasta el final del experimento. Finalmente, se extraen las características de la curva para cada método utilizando el comando *stepinfo*.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados y discusión del diagnóstico del Módulo de Control de Temperatura

Se confirmó la disponibilidad y el correcto funcionamiento del programa de control, ejecutándose sin errores desde la carpeta “Temperatura_Base_MOD”, con un tiempo de arranque promedio de 5 s y sin fallos durante un periodo de prueba de 45 min de operación continua.

Se evidenció que las mediciones de temperatura registradas en el panel de control del tanque TK-1 son coherentes con las obtenidas mediante el termohigrómetro, tanto antes como después del encendido de la resistencia, presentando un error relativo menor al ± 2 %. Esto confirma la precisión y confiabilidad del sistema de medición, siendo las pequeñas diferencias atribuibles a factores como la calibración y la ubicación de los sensores.

Tabla 6

Evaluación del error en la medición de temperatura entre el sistema TK-1 y un instrumento de referencia

Condición	Panel de control TK-1 (°C)	Termohigrómetro (°C)	Error absoluto (°C)	Error relativo (%)
Antes del encendido de la resistencia	18.1519	17.9	0.2519	1.41
Después del encendido de la resistencia	49.9901	49.9	0.0901	0.18

Se evidenció que las mediciones de caudal registradas en el panel de control son coherentes con las obtenidas mediante el flujómetro, tanto para aperturas del 25 % como del 50 %, presentando errores relativos de 0.80 % y 0.16 %, respectivamente, valores que se encuentran por debajo del ± 1 %. Esto confirma la precisión y confiabilidad del sistema de medición de caudal, siendo las pequeñas diferencias atribuibles a factores

como la calibración de los instrumentos, el tiempo de respuesta y las variaciones propias del flujo.

Tabla 7

Análisis comparativo del caudal medido por el sistema de control y el flujómetro en función de la apertura de la válvula

Condición apertura de la válvula de control	Panel de control caudal (L/min)	Flujómetro (L/min)	Error absoluto (L/min)	Error relativo (%)
25%	13.5078	13.4	0.1078	0.80
50 %	25.4600	25.5	0.0400	0,16

Se evidenció que la bomba 1 (ATV12) y la bomba 2 (ATV11) respondieron adecuadamente al encendido y apagado, con tiempos de respuesta menores a 2 s, y permitiendo la variación de frecuencia dentro del rango de operación establecido. Asimismo, las frecuencias registradas en el panel de control muestran alta concordancia con las indicadas en los variadores de velocidad, presentando errores relativos menores al 1 %, lo que confirma una respuesta estable del sistema sin oscilaciones apreciables

Tabla 8

Análisis comparativo de la frecuencia de operación en bombas controladas por variadores de velocidad (ATV) y su discrepancia con el panel de control

Condición	Equipo	Panel de control frecuencia (Hz)	Variador de velocidad frecuencia (Hz)	Error absoluto (Hz)	Error relativo (%)
PRUEBA 1	BOMBA 1/ATV12	35	35.1	0.10	0.29
	BOMBA 2/ATV11	35	35.2	0.20	0.57
PRUEBA 2	BOMBA 1/ATV12	35	35.1	0.10	0.29
	BOMBA 2/ATV11	30	30.1	0.10	0.33

Se verificó que el radiador respondió adecuadamente a las señales de control, presentando tiempos de activación menores a 3 s y evidenciando un funcionamiento estable durante las pruebas realizadas, sin interrupciones en su operación. Asimismo, se

comprobó que su encendido y apagado, gestionados desde el programa de control, contribuyen de manera efectiva a la reducción de la temperatura del sistema, manteniendo un comportamiento continuo y sin variaciones abruptas.

Se comprobó que la resistencia eléctrica de calentamiento se activa y desactiva conforme a las señales de control, presentando tiempos de respuesta menores a 3s, sin interrupciones en su funcionamiento ni fallas en la respuesta. Asimismo, se comprobó un incremento progresivo de la temperatura en el sistema, lo que confirma su adecuado desempeño térmico, alcanzando condiciones de estabilidad sin sobreimpulsos significativos y manteniendo un comportamiento continuo, uniforme y sin fluctuaciones bruscas.

Se evidenció que la válvula de control BV-003 permitió regular el porcentaje de apertura de acuerdo con las consignas evaluadas (25 % y 50 %), mostrando correspondencia entre los valores establecidos y la respuesta del sistema, con un comportamiento aproximadamente lineal en el rango operativo analizado y un tiempo de respuesta menor a 2 s ante cambios de consigna.

Se determinó que el sistema de tuberías no presenta obstrucciones ni daños, garantizando un flujo continuo y estable del fluido durante la operación, en concordancia con las condiciones de caudal evaluadas en el sistema.

Se comprobó que la estructura del módulo se encuentra en buen estado, sin presencia de fugas, manteniendo condiciones adecuadas de operación y asegurando la integridad del sistema durante el tiempo de funcionamiento.

Se verificó que el tanque 1 (TK-1) del módulo de control de temperatura dispone de un sistema de supervisión y registro de la temperatura mediante una interfaz HMI, la cual permite visualizar en tiempo real el comportamiento térmico del sistema durante su operación. Asimismo, se constató la existencia de actuadores asociados al proceso, tales

como la resistencia eléctrica y el sistema de enfriamiento, los cuales intervienen en la dinámica de transferencia de energía del tanque.

Sin embargo, desde el análisis de la arquitectura de control del sistema, se evidencia que el funcionamiento del TK-1 no corresponde a un lazo de control automático en retroalimentación. En su lugar, el sistema opera bajo un esquema de operación manual supervisada, en el cual el usuario interviene directamente en la activación de los equipos y en la regulación de las variables del proceso, tomando decisiones en función de las lecturas mostradas en la interfaz HMI.

Adicionalmente, se identificó una limitación importante en la interfaz de monitoreo, ya que no se dispone de tendencias gráficas en tiempo real de variables críticas como la temperatura del TK-1 ni del comportamiento del actuador principal (resistencia eléctrica). La ausencia de estas curvas de tendencia dificulta el análisis dinámico del proceso, la identificación de su respuesta temporal y la toma de decisiones basadas en el comportamiento histórico de las variables. En este sentido, se considera necesario exportar y procesar los datos adquiridos por el sistema para su posterior visualización mediante herramientas externas, permitiendo así la construcción de gráficas que representen la evolución temporal del proceso.

El diagrama de control asociado muestra que, si bien existe adquisición de señales provenientes de sensores de temperatura, caudal y otros estados del sistema, así como la activación de actuadores mediante lógica programada, no se implementan controladores automáticos que ajusten de forma continua la variable manipulada respecto a un set point. Por tanto, la regulación del proceso depende del criterio del operador y no de una estrategia de control autónoma.

Desde el punto de vista de ingeniería de procesos, esta configuración implica que la estabilidad térmica del TK-1, así como su respuesta ante perturbaciones, están

condicionadas por la intervención humana, lo que puede generar variabilidad en el desempeño del sistema y limitar la repetibilidad del proceso. La falta de visualización gráfica también restringe la capacidad de análisis del comportamiento dinámico, lo que dificulta la evaluación del desempeño del sistema en términos de estabilidad, tiempo de respuesta y eficiencia energética.

Finalmente, aunque el módulo permite la supervisión y el análisis del comportamiento del sistema térmico-hidráulico, su configuración actual corresponde a un sistema de monitoreo con operación manual, más que a un sistema de control automático en lazo cerrado. Por ello, se concluye que es necesario implementar no solo estrategias de control automático, sino también herramientas de visualización de tendencias en tiempo real para variables como la temperatura del TK-1 y la potencia de la resistencia, con el fin de mejorar la supervisión, el análisis y la toma de decisiones operativas.

Conclusión general del estado del equipo

El módulo de control de temperatura se encuentra en buen estado operativo, evidenciando el correcto funcionamiento de los sensores, actuadores y del sistema de control implementado. Las mediciones de temperatura y caudal son confiables y se mantienen dentro de rangos aceptables de error, lo que garantiza la adecuada instrumentación del proceso. Asimismo, los actuadores como bombas, válvulas, resistencia eléctrica y radiador presentan respuestas estables y tiempos de activación adecuados, permitiendo la operación continua del sistema.

Sin embargo, desde el enfoque de ingeniería de control de procesos, se identifica una limitación crítica en la arquitectura del sistema, ya que el TK-1 no cuenta con un lazo de control automático, operando únicamente bajo un esquema manual supervisado. Esto implica que la regulación de las variables del proceso depende directamente del

operador, generando variabilidad en el desempeño y reduciendo la repetibilidad y optimización del sistema. Adicionalmente, la interfaz HMI no dispone de tendencias gráficas ni de registro histórico de variables, lo que restringe el análisis del comportamiento dinámico del proceso y limita la evaluación de su estabilidad y respuesta en el tiempo.

En consecuencia, el sistema es adecuado para supervisión operativa y fines didácticos, pero presenta una limitación importante en términos de automatización y análisis avanzado, por lo que se requiere la implementación de un control automático en lazo cerrado y la incorporación de herramientas de registro y visualización de tendencias, con el fin de mejorar la estabilidad, precisión y eficiencia global del proceso.

Análisis y justificación de estrategias de control

De acuerdo con el diagnóstico del módulo de control de temperatura MCT-02, se determinó que el sistema se encuentra en buen estado operativo, con sensores y actuadores funcionando correctamente, mediciones confiables y un comportamiento estable del proceso térmico. Sin embargo, también se identificó una limitación crítica en su arquitectura de control: el sistema opera bajo un esquema de control manual supervisado, sin la implementación de un lazo de control automático.

Esta condición implica que la regulación de la temperatura del tanque TK-1 depende directamente de la intervención del operador, lo cual genera variabilidad en el desempeño del sistema, reduce la repetibilidad del proceso y limita su optimización. Además, ante perturbaciones o cambios en las condiciones de operación, el sistema no puede corregirse automáticamente, afectando la estabilidad térmica.

Asimismo, la ausencia de herramientas de visualización de tendencias y análisis dinámico dificulta la evaluación del comportamiento del sistema en el tiempo,

impidiendo analizar parámetros importantes como el tiempo de respuesta, el sobreimpulso o la estabilidad.

Bajo estas condiciones, se justifica la implementación de un sistema de control automático en lazo cerrado, ya que permitirá:

- Regular la temperatura de forma continua y autónoma
- Reducir el error respecto al valor de referencia
- Mejorar la estabilidad del sistema térmico
- Disminuir la dependencia del operador
- Aumentar la repetibilidad del proceso
- Mejorar el desempeño ante perturbaciones
- Optimizar el uso de los actuadores (energía y respuesta)

Además, considerando que el sistema presenta características como inercia térmica, dinámica lenta y posible tiempo muerto, resulta necesario aplicar estrategias de control adecuadas como PID o LQR, que permitan mejorar la respuesta del sistema y garantizar un funcionamiento más eficiente.

Con el fin de establecer una visión general de las diferencias entre los controladores PID y LQR, se presenta la siguiente tabla comparativa considerando aspectos fundamentales como el tipo de control, complejidad, requerimientos de modelado y desempeño dinámico. Este análisis permite identificar las características principales de cada estrategia y su comportamiento frente a las exigencias del sistema térmico del tanque TK-1.

Tabla 9*Comparación general de desempeño*

Criterio	PID	LQR
Tipo de control	Clásico	Moderno (óptimo basado en estados)
Complejidad	Baja	Alta
Requiere modelo	No	Sí
Facilidad de implementación	Muy alta (rápida puesta en marcha)	Media–alta (requiere modelado)
Desempeño general	Bueno en sistemas simples	Muy alto en sistemas dinámicos
Estabilidad	Depende de la sintonización	Alta estabilidad garantizada
Respuesta del sistema	Puede presentar oscilaciones	Suave, rápida y sin sobreimpulso significativo
Optimización del control	No optimiza energía	Optimiza error y esfuerzo de control
Rechazo a perturbaciones	Medio	Alto
Adaptación a cambios del proceso	Limitada	Mejor desempeño si el modelo es adecuado

Fuente: Basado en (Ogata & Dormido, 2010), (Sohrab, 2017)

Con el propósito de profundizar en el análisis de cada estrategia de control, se presenta a continuación una comparación detallada de las ventajas, desventajas y limitaciones de los controladores PID y LQR. Esta evaluación permite identificar los alcances y restricciones de cada método, facilitando la selección de la estrategia más adecuada según las condiciones del sistema y los objetivos de control planteados.

Tabla 10*Ventajas, desventajas y limitaciones*

Criterio	PID	LQR
Tipo de control	Clásico	Moderno (óptimo)
Ventajas	- Fácil implementación - No requiere modelo matemático - Bajo costo computacional - Amplio uso industrial - Adecuado para sistemas simples	- Control óptimo del sistema - Alta estabilidad - Respuesta suave y sin oscilaciones - Minimiza error y esfuerzo de control - Mejor desempeño ante perturbaciones
Desventajas	- Depende de la sintonización - Puede generar sobreimpulso - No optimiza el control - Menor precisión en sistemas complejos	- Requiere modelo matemático - Mayor complejidad de diseño - Necesita conocimiento avanzado - Mayor tiempo de implementación
Limitaciones	- No considera dinámica interna del sistema - Difícil de aplicar en sistemas multivariables - Sensible a cambios del proceso - No garantiza desempeño óptimo	- Depende de la exactitud del modelo - Requiere identificación del sistema - Puede ser sensible a errores de modelado - Mayor demanda computacional
Desempeño dinámico	Aceptable en sistemas simples	Superior en sistemas dinámicos complejos
Estabilidad	Depende del ajuste	Alta estabilidad garantizada
Respuesta ante perturbaciones	Media	Alta
Aplicación en TK-1	Control básico de temperatura	Control óptimo del sistema térmico

Fuente: Basado en (Ogata & Dormido, 2010), (Sohrab, 2017)

A fin de contextualizar la aplicabilidad de los controladores en entornos reales, se presenta la siguiente tabla que describe su uso en procesos térmicos como el tanque TK-1, así como su implementación en diferentes sectores industriales y variables típicas de control. Este análisis permite evidenciar la relevancia práctica de cada estrategia y su alcance en aplicaciones de ingeniería.

Tabla 11*Aplicación en procesos térmicos, industria y variables*

Categoría	Criterio	PID	LQR
Aplicación en procesos térmicos (TK-1)	Control de temperatura	Ampliamente utilizado en la industria debido a su simplicidad y efectividad	Alta precisión en la regulación de temperatura
	Sistemas con inercia térmica	Adecuado para sistemas de dinámica lenta	Altamente adecuado, considerando la dinámica del sistema
	Presencia de tiempo muerto	Limitada capacidad de compensación	Mejor desempeño al considerar el modelo del sistema
	Estabilidad térmica	Buena, dependiente de la sintonización	Excelente, con comportamiento más robusto
	Oscilaciones	Pueden presentarse si no está bien ajustado	Mínimas, con respuesta más suave
Uso en la industria	Industria química	Control de variables como temperatura y presión	Optimización de reactores y procesos complejos
	Industria alimentaria	Procesos de cocción y pasteurización	Control preciso de procesos térmicos
	Industria petrolera	Regulación de flujo y nivel	Optimización de sistemas multivariantes
	Automatización industrial	Amplio uso como estándar industrial	Aplicaciones avanzadas de control
	Industria aeroespacial	Uso limitado	Amplio uso en sistemas de alta precisión
	Sector energético	Regulación básica en plantas térmicas	Control óptimo y mejora de eficiencia energética
Variables de control en la industria	Temperatura	Variable principal, ampliamente controlada	Control con alta precisión
	Caudal	Control común	Control eficiente
	Presión	Control común	Control preciso
	Nivel	Control común	Control eficiente
	Energía / consumo	No optimiza el uso de energía	Optimiza el consumo energético
	Estados del sistema	No considera estados internos	Control completo de estados del sistema

Fuente: Basado en (Ogata & Dormido, 2010), (Sohrab, 2017)

El análisis comparativo de los controladores PID/PI y LQR evidencia que ambas estrategias presentan características complementarias para el control del sistema térmico del tanque TK-1. Los controladores PID/PI destacan por su simplicidad, facilidad de implementación y amplio uso en la industria, siendo adecuados para sistemas donde se requiere una solución práctica y de rápida aplicación.

Por otro lado, el controlador LQR ofrece un desempeño superior en términos de estabilidad, precisión y respuesta ante perturbaciones, debido a su capacidad de optimizar el comportamiento del sistema. Asimismo, permite un mejor aprovechamiento de la energía y un control más eficiente de las variables del proceso.

El análisis de su aplicación en procesos térmicos, así como en diferentes sectores industriales y variables de control, confirma que el PID/PI constituye una solución robusta y ampliamente utilizada, mientras que el LQR representa una alternativa más avanzada, adecuada para mejorar el desempeño global del sistema.

En conjunto, la implementación de ambos controladores permite realizar un análisis integral, comparando un enfoque clásico y uno moderno, lo que fortalece la propuesta de control y contribuye a la optimización del sistema térmico del tanque TK-1.

La selección de la técnica de Ziegler-Nichols para la sintonización del controlador PID/PI se justifica por su carácter práctico, sistemático y ampliamente validado en aplicaciones industriales. Esta metodología permite determinar de manera rápida y estructurada los parámetros del controlador, facilitando su implementación en sistemas reales sin requerir procedimientos complejos. En el contexto del sistema térmico del tanque TK-1, se requiere una estrategia de control que pueda ser implementada de forma eficiente y que proporcione resultados confiables en un corto tiempo. En este sentido, Ziegler-Nichols ofrece una ventaja significativa al permitir

obtener valores iniciales de sintonización adecuados, los cuales pueden ser posteriormente ajustados para mejorar el desempeño del sistema. Asimismo, esta técnica se caracteriza por su facilidad de aplicación en entornos experimentales, lo que la convierte en una herramienta apropiada para procesos donde se busca una transición rápida desde un sistema sin control automático hacia uno en lazo cerrado. Su uso permite garantizar un comportamiento estable del sistema en una primera etapa de implementación, sirviendo como base para comparaciones con estrategias de control más avanzadas.

Por otro lado, el uso de Ziegler-Nichols en la presente tesis también responde a su reconocimiento como un método estándar en la ingeniería de control, lo cual fortalece la validez técnica del desarrollo y asegura que los resultados obtenidos sean comparables con prácticas ampliamente aceptadas en la industria. En consecuencia, la elección de esta técnica no solo facilita la implementación del controlador PID/PI, sino que también contribuye a establecer una base sólida para el análisis y comparación con otras estrategias de control, como el controlador LQR.

4.2 Descripción del proceso de calentamiento

El proceso de calentamiento del tanque 1 del módulo de control de temperatura corresponde a un sistema cerrado operado en modo batch, en el cual una cantidad fija de agua es calentada mediante una resistencia eléctrica sumergida.

Al iniciar el proceso, el agua se encuentra a una temperatura inicial cercana a la temperatura ambiente. Al energizar la resistencia, esta convierte la energía eléctrica en energía térmica, la cual es transferida al agua, provocando un incremento progresivo de su temperatura.

Desde el punto de vista termodinámico, el sistema presenta una acumulación de energía interna, lo que se traduce en un aumento de la temperatura del agua en el tiempo.

Durante la etapa inicial del calentamiento, el comportamiento observado es aproximadamente lineal, lo que indica que el calor suministrado se emplea principalmente en elevar la temperatura del fluido. Este comportamiento puede evidenciarse en la región inicial de la gráfica 1 y en la gráfica 2, donde se aprecia una tendencia lineal de la temperatura con respecto al tiempo. En esta etapa, la evaporación superficial es despreciable, debido a que la temperatura del sistema se encuentra muy por debajo del punto de ebullición, lo que implica una baja presión de vapor y, por tanto, una pérdida mínima de masa y energía por evaporación.

A medida que la temperatura se incrementa, la evaporación superficial comienza a intensificarse, dejando de ser despreciable y contribuyendo a las pérdidas energéticas del sistema. Este comportamiento se mantiene hasta que el sistema alcanza la temperatura de ebullición.

A partir del punto de ebullición, se observa que la temperatura permanece constante, debido a que el calor suministrado se utiliza principalmente en el cambio de fase del agua, pasando de estado líquido a vapor. Este fenómeno puede identificarse en la Gráfica 2, donde se presenta una región de comportamiento constante.

Asimismo, se evidencia que no toda la energía suministrada por la resistencia es aprovechada por el sistema, debido a pérdidas de calor hacia el ambiente y al fenómeno de evaporación en la superficie del líquido. Estas pérdidas se deben a la falta de aislamiento térmico del tanque, a la interacción con el entorno y a la transferencia de masa en la interfaz líquido-vapor, lo que influye en la dinámica del proceso de calentamiento.

El proceso se caracteriza por un comportamiento de acumulación de energía con incremento progresivo de la temperatura, acompañado inicialmente por condiciones en las que la evaporación es despreciable, seguido de una etapa donde este fenómeno se vuelve significativo y, finalmente, por un régimen estacionario durante el cambio de fase, lo cual concuerda con los principios termodinámicos que rigen el calentamiento de líquidos en sistemas cerrados.

4.3 Determinación del modelo fenomenológico del proceso de calentamiento y balance de energía

El modelo dinámico del proceso de calentamiento de agua en un tanque agitado se desarrolló mediante un enfoque fenomenológico, empleando el balance de energía como herramienta principal. Este enfoque permite describir el comportamiento térmico del sistema a partir de principios físicos fundamentales, considerando las interacciones energéticas que ocurren durante el proceso.

Descripción del sistema

El sistema de estudio corresponde a un tanque agitado que opera en régimen batch, el cual se modela como un sistema cerrado desde el punto de vista termodinámico, debido a que no presenta flujo de entrada ni salida de masa durante su operación. En consecuencia, la masa del sistema permanece constante, lo que permite la aplicación de la primera ley de la termodinámica para sistemas cerrados.

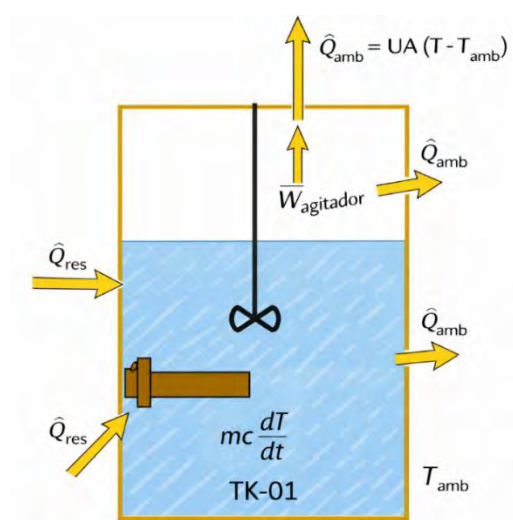
El sistema está constituido por el fluido contenido en el tanque, el cual corresponde a agua. El equipo se encuentra provisto de una resistencia eléctrica de potencia constante de 3000 W, encargada de suministrar energía en forma de calor al fluido. Asimismo, dispone de un agitador mecánico que introduce energía en forma de trabajo y permite mantener condiciones de mezcla homogénea, asegurando una distribución uniforme de la temperatura en todo el volumen de control.

Durante la operación, aunque no existe intercambio de masa, el sistema intercambia energía con los alrededores. Este intercambio ocurre mediante el calor suministrado por la resistencia eléctrica, el trabajo mecánico del agitador y las pérdidas térmicas hacia el ambiente, las cuales dependen de la diferencia de temperatura entre el sistema y su entorno.

Para efectos del modelamiento, se consideran despreciables los cambios en la energía cinética y potencial. En consecuencia, la variación de la energía del sistema se asocia principalmente a cambios en la energía interna del fluido, los cuales se manifiestan como variaciones en la temperatura.

Figura 41

Diagrama Esquemático del Balance de Energía para un Sistema de Calentamiento en Tanque Agitado



Supuestos del modelamiento

Para el desarrollo del modelo fenomenológico del proceso de calentamiento, se establecen los siguientes supuestos:

- El sistema se encuentra perfectamente mezclado, por lo que la temperatura es uniforme en todo el volumen de control.
- El volumen de operación permanece constante durante todo el proceso.

- Las propiedades físicas del agua, tales como la densidad “ ρ ” y el calor específico “ c ”, se consideran constantes.
- El proceso opera en régimen batch, por lo que no existe flujo de entrada ni salida de masa “ $\dot{m} = 0$ ”.
- El aporte energético del agitador mecánico (5 W) representa una fracción mínima en comparación con la potencia suministrada por la resistencia eléctrica (3000 W), por lo que no se incluye en el balance energético. Su función principal es garantizar la homogeneidad térmica del sistema.
- La transferencia de calor en el sistema se produce mediante:
 - o Generación interna de energía debido a la resistencia eléctrica $\dot{Q}$.
 - o Pérdidas térmicas hacia el ambiente, modeladas mediante un coeficiente global de transferencia de calor “UA”.

Balance de energía

Partiendo de la ecuación general:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dQ}{dt} + \frac{dW}{dt} \quad (34)$$

Considerando que el agua de proceso es un fluido prácticamente incompresible, los cambios de volumen y presión en el sistema no generan diferencias significativas en su capacidad de almacenar calor. Por lo tanto, de acuerdo con las definiciones termodinámicas:

$$C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v$$

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$$

Se asume que las capacidades caloríficas a volumen y presión constante son equivalentes ($C_v \approx C_p = c$).

Bajo esta justificación, la energía interna del sistema puede expresarse de forma simplificada como:

$$U = m c T$$

Donde:

- m: es la masa del fluido,
- c: es el calor específico,
- T: es la temperatura del agua de proceso.

Derivando respecto al tiempo:

$$\frac{dU}{dt} = m c \frac{dT}{dt} \quad (35)$$

Sustituyendo en el balance de energía:

$$m c \frac{dT}{dt} = \frac{dQ}{dt} + \frac{dW}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} \quad (36)$$

En el proceso real:

- El término $\dot{Q}$ es el flujo de calor efectivo.
- El término $\dot{W}$ es el flujo de trabajo realizado por el agitador, se desprecia.

Se tiene:

$$m c \frac{dT}{dt} = \dot{Q} \quad (37)$$

Se reemplaza el flujo de calor efectivo por flujo de calor entregado por la resistencia menos el flujo de calor perdido hacia el ambiente.

$$m c \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{resis} - \dot{Q}_{perdido} \quad (38)$$

$$m c \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{resis} - UA(T - T_{amb}) \quad (39)$$

Donde:

- $\dot{Q}_{resis}$: flujo de calor entregado por la resistencia
- $\dot{Q}_{perdido}$: flujo de calor perdido hacia el ambiente

- UA : coeficiente global de transferencia de calor
- T : temperatura del agua de proceso
- T_{amb} : temperatura ambiente

Interpretación física

- $m c \frac{dT}{dt}$: Representa la acumulación de energía térmica en el sistema

Indica qué tan rápido cambia la temperatura

- $\dot{Q}_{resis}$: Es la tasa de energía suministrada (potencia de la resistencia)
- $UA(T - T_{amb})$: Representa las pérdidas de calor al ambiente y dependen de la diferencia de temperatura

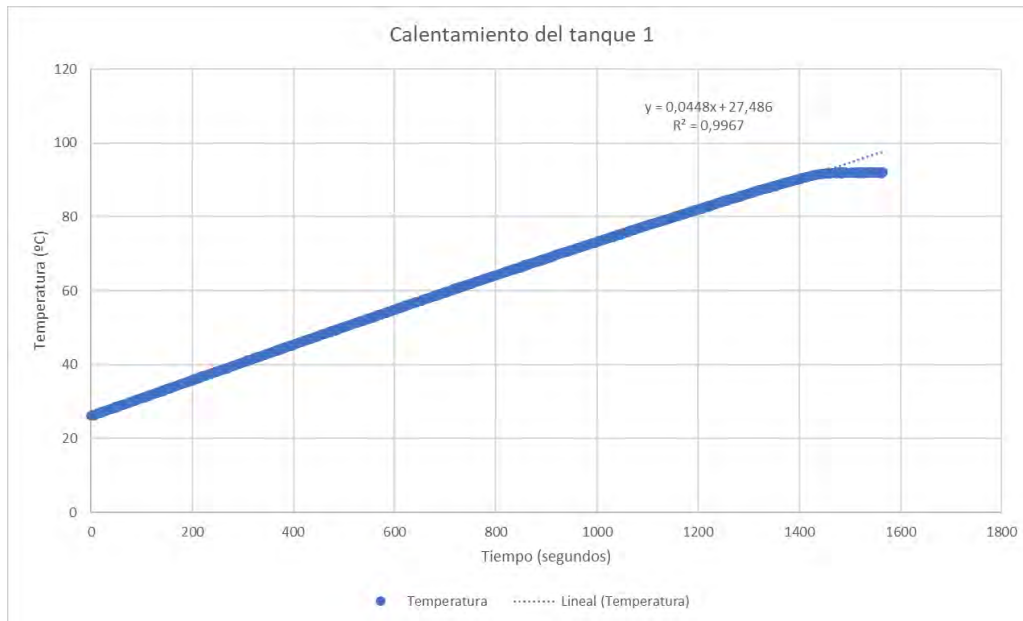
4.4 Prueba de calentamiento del tanque 1

Para obtener los datos de calentamiento se hicieron tres pruebas, la primera teniendo en cuenta el modelo completo del proceso, hasta llegar a una estabilidad; el segundo y la tercera experiencia hasta una temperatura menor de 90 °C.

En la gráfica 1 se muestra la prueba de calentamiento del tanque 1, se observa el proceso completo de calentamiento hasta el punto de cambio de fase (ebullición). Se realizó esta prueba con el objetivo de obtener el modelo de calentamiento completo.

Gráfica 1

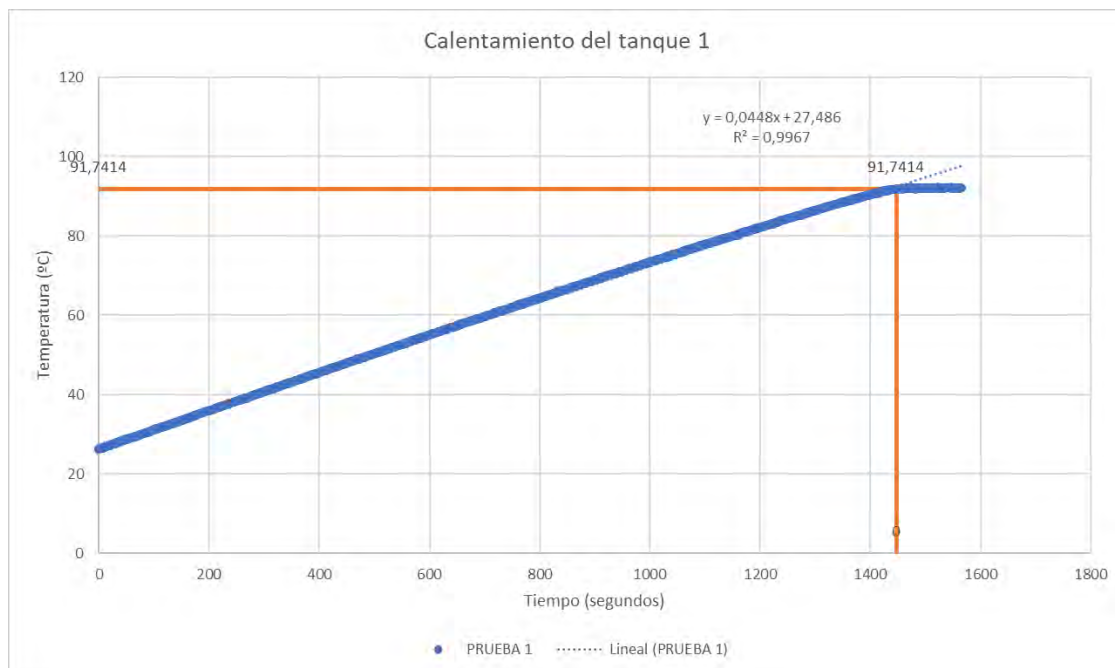
Datos de la primera prueba de calentamiento del tanque 1 del módulo de control de temperatura



La ecuación de línea recta representa al calentamiento del agua en el tanque 1 antes del cambio de fase. Los datos de temperatura después de que llega al punto de ebullición, son datos constantes. En la gráfica 2 se muestra las dos partes que lo componen, una recta y una constante.

Gráfica 2

Sistema de calentamiento completo con comportamiento lineal y constante.

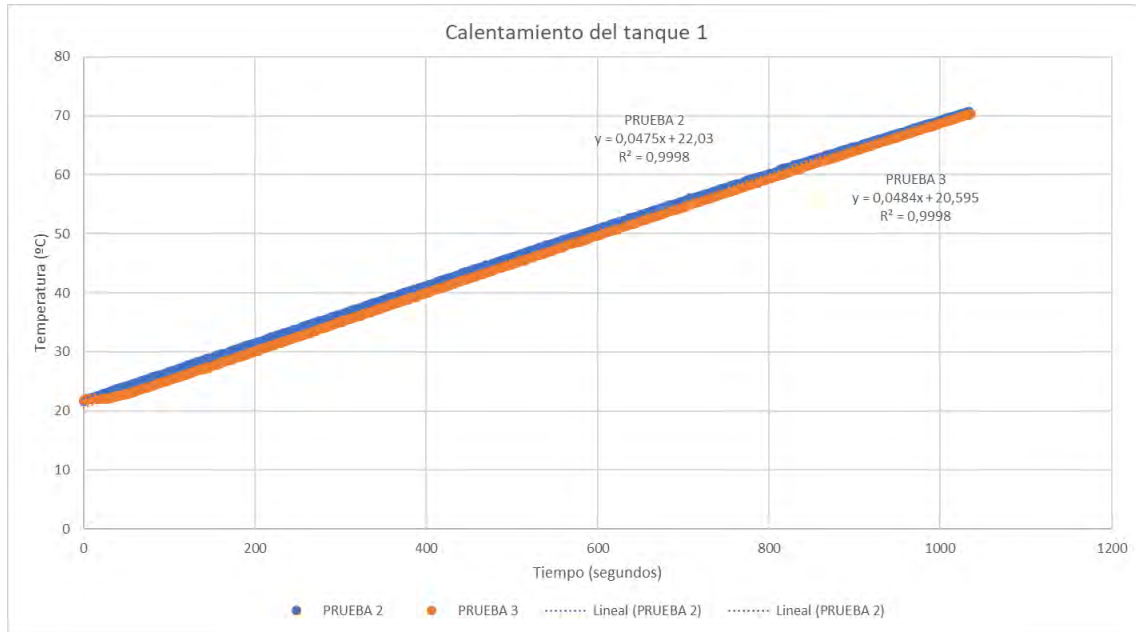


Nota. T_e (temperatura de ebullición), T_o (temperatura inicial), t_2 (tiempo cuando llega al punto de ebullición).

La segunda y tercera prueba de calentamiento de agua en el tanque 1, solo se realizó hasta una temperatura inferior a los 90°C.

Gráfica 3

Datos de la segunda y tercera prueba de calentamiento del tanque 1 del módulo de control de temperatura



Ambas pruebas muestran un comportamiento lineal, con pendientes similares, las constantes del ajuste lineal son diferentes debido a que estas dependen de la temperatura ambiental y de la temperatura inicial del agua en el tanque 1.

Calor efectivo, calor perdido y eficiencia para cada prueba

Balance de energía del sistema

El sistema de calentamiento se describe mediante el siguiente balance de energía:

$$m c \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{resistencia} - UA(T - T_{amb}) \quad (40)$$

Donde el valor del $\dot{Q}_{resistencia}$ es de 3000 W

Aproximación en el intervalo lineal

En el intervalo donde la temperatura presenta un comportamiento aproximadamente lineal, la tasa de cambio de temperatura puede considerarse constante, por lo que el balance se simplifica a:

$$m c \frac{dT}{dt} \approx \dot{Q}_{perdido} \quad (41)$$

Integrando se obtiene:

$$T_{(t)} = T_o + \frac{\dot{Q}_{efectivo}}{m * c} * t \quad (42)$$

Donde:

- $T_{(t)}$ = Temperatura del sistema en función del tiempo en °C
- T_o = temperatura inicial en °C
- m = masa del agua en kg
- c = calor específico del agua, 4186 J/kg°C
- t = tiempo en segundos

Relación con la pendiente experimental

La pendiente de la recta obtenida experimentalmente se expresa como:

$$pendiente = \frac{\dot{Q}_{efectivo}}{m * c} \quad (43)$$

Por tanto:

$$\dot{Q}_{efectivo} = m * c * (pendiente) = \dot{Q}_{resistencia} - \dot{Q}_{perdido}$$

Tabla 12

Determinación de la potencia térmica efectiva, calor perdido y eficiencia del sistema en función de la pendiente de calentamiento

Prueba	Pendiente (°C/s)	$\dot{Q}$ efectivo (W)	$\dot{Q}$ perdido (W)	Eficiencia (%)
1	0.0448	2722.98	277.02	90.77
2	0.0475	2886.08	113.92	96.20
3	0.0484	2941.79	58.21	98.06

En la prueba 1, se obtuvo un flujo de calor efectivo de 2722.98 W, lo que corresponde a una eficiencia térmica del 90.77%, evidenciando pérdidas de energía del orden de 277.02 W. De manera similar, en la prueba 2 y prueba 3, el calor efectivo

aumenta a 2886.08 W y 2941.79 W, respectivamente, mientras que las pérdidas térmicas disminuyen progresivamente hasta 113.92 W y 58.21 W, lo cual se traduce en eficiencias superiores al 96% y 98%.

Este comportamiento indica que, en las condiciones experimentales evaluadas, el sistema mejora su aprovechamiento energético entre pruebas, lo que puede atribuirse a una mayor estabilidad térmica, reducción de gradientes de temperatura o mejores condiciones operativas durante la ejecución de los ensayos.

Las pérdidas térmicas identificadas pueden atribuirse principalmente a la transferencia de calor hacia el ambiente, influenciada por factores como la falta de aislamiento térmico, la exposición del sistema al entorno y posibles incrustaciones en la resistencia, las cuales afectan la eficiencia de transferencia de calor.

Es importante destacar que, aunque el modelo empleado asume un flujo de calor neto constante, en el sistema real las pérdidas térmicas dependen de la diferencia de temperatura con el ambiente. En consecuencia, los valores de calor efectivo y calor perdido obtenidos corresponden a valores promedio en el intervalo donde el comportamiento es aproximadamente lineal, y no a valores instantáneos constantes durante todo el proceso.

El análisis conjunto de las tres pruebas muestra un comportamiento lineal consistente en el tramo previo al punto de ebullición (≈ 89 °C en las condiciones locales), lo que evidencia la reproducibilidad del sistema en dicho intervalo. Sin embargo, se selecciona la prueba 3 para la identificación del sistema, debido a que presenta el mayor valor de calor efectivo (2941.79 W), las menores pérdidas térmicas (58.21 W) y la mayor eficiencia (98.06%), lo que indica un mejor aprovechamiento de la energía suministrada.

Adicionalmente, la prueba 3 refleja condiciones más cercanas al comportamiento ideal del sistema, donde la mayor parte del calor suministrado se transfiere al fluido,

reduciendo la influencia de perturbaciones externas y errores experimentales. Por esta razón, se considera que esta prueba representa de manera más adecuada la dinámica real del proceso en el intervalo analizado, siendo la más apropiada para la identificación y validación del modelo.

Finalmente, se observa que, a medida que la temperatura se aproxima al punto de ebullición, el sistema comienza a desviarse del comportamiento lineal debido al incremento de las pérdidas térmicas, lo cual confirma que el modelo lineal constituye una aproximación válida únicamente en el intervalo inicial de calentamiento, mientras que el comportamiento completo del sistema responde a una dinámica de tipo exponencial.

4.5 Resultados del modelo del proceso usando el balance de energía

1. Modelo en el dominio del tiempo

Se parte del modelo fenomenológico:

$$m c \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{resis} - UA(T - T_{amb}) \quad (44)$$

2. Se expande el término de pérdidas

$$m c \frac{dT}{dt} + UAT = \dot{Q}_{resis} + UAT_{amb} \quad (45)$$

- UAT : calor que sale del sistema
- UAT_{amb} : referencia del ambiente

3. Se definen las variables de desviación.

Para eliminar T_{amb} :

En el sistema original tienes el término de pérdidas:

$$UA(T - T_{amb}) \quad (46)$$

El problema es que T_{amb} es una **constante externa** que dificulta la formulación del modelo.

En control, se trabaja con variables respecto a un **punto de operación** (estado base).

Se define:

$$T' = T - T_{amb} \quad (47)$$

Donde:

- **T' : exceso de temperatura respecto al ambiente**
- Si $T' = 0 \rightarrow$ el sistema está en equilibrio térmico con el ambiente
- Si $T' > 0 \rightarrow$ el sistema está más caliente que el entorno

Derivada de la variable de desviación

Se deriva:

$$\frac{dT'}{dt} = \frac{d}{dt}(T - T_{amb}) \quad (48)$$

Entonces:

$$\frac{dT'}{dt} = \frac{dT}{dt} - \frac{dT_{amb}}{dt} \quad (49)$$

Como T_{amb} es constante:

T_{amb} **no cambia con el tiempo** (en el modelo)

Por lo tanto:

$$\frac{dT_{amb}}{dt} = 0 \quad (50)$$

Entonces:

$$\frac{dT'}{dt} = \frac{dT}{dt} \quad (51)$$

El cambio de temperatura del sistema es exactamente igual al cambio de su desviación, porque el ambiente no varía.

Se sustituye:

$$m c \frac{dT'}{dt} + UAT' = \dot{Q} \quad (52)$$

Ahora el sistema está expresado respecto a su equilibrio. Esto simplifica el análisis dinámico

4. Forma estándar

$$mC_p \frac{dT'}{dt} + UAT' = \dot{Q} \quad (53)$$

5. Se aplica la transformada de Laplace

Se usa:

$$\mathcal{L}\left(\frac{dT'}{dt}\right) = sT'(s) - T'(0) \quad (54)$$

Entonces se aplica la transformada de Laplace a toda la ecuación:

$$mC_p[sT'(s) - T'(0)] + UA T'(s) = \dot{Q}_{resis}(s) \quad (55)$$

Variable de desviación:

$$T' = T - T_{amb} \quad (56)$$

Entonces, evaluar en $t = 0$:

$$T'(0) = T(0) - T_{amb} \quad (57)$$

$$T'(0) = 0 \Rightarrow T(0) = T_{amb} \quad (58)$$

- La temperatura inicial del sistema es igual a la de referencia (ambiente o estado base):

No hay “error inicial”

No hay energía acumulada adicional al inicio

Se asumen condiciones iniciales nulas:

$$m c sT'(s) + UA T'(s) = \dot{Q}_{resis}(s) \quad (59)$$

$$T'(s)(m c s + UA) = \dot{Q}_{resis}(s) \quad (60)$$

6. Función de transferencia

$$\frac{T'(s)}{\dot{Q}(s)} = \frac{1}{m c s + UA} \quad (61)$$

7. Forma estándar de primer orden

Se divide entre UA :

$$\frac{T'(s)}{\dot{Q}_{resis}(s)} = \frac{1/UA}{\left(\frac{m c}{UA}\right)s + 1} \quad (62)$$

8. Se identifica los parámetros

$$K = \frac{1}{UA}; \tau = \frac{m c}{UA} \quad (63)$$

9. Modelo teórico final en Laplace

$$G(s) = \frac{T'(s)}{\dot{Q}_{resis}(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (64)$$

Es un sistema de **primer orden**

- K : cuánto cambia la temperatura por unidad de potencia
- τ : rapidez del sistema

A partir de la ecuación del modelo final en Laplace para el calentamiento del tanque 1 y de las ecuaciones de identificación de parámetros (K y τ) se obtiene el modelo dinámico teórico:

Datos teóricos:

Tabla 13

Parámetros de operación y propiedades del fluido para el análisis térmico del sistema

Parámetro	Valor
Volumen de agua	14.52 L
Densidad	1000 kg/m ³
Calor específico	4186 J/kg·°C
Potencia	3000 W
Temperatura ambiente	20 °C
Temperatura estacionaria	88.5 °C

Capacidad térmica del sistema

$$V = 0.01452 m^3$$

$$m = \rho V = 14.52 \text{ kg}$$

$$m c = 14.52 \text{ kg} \times 4186 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} = 60780.72 \text{ J}/^\circ\text{C}$$

Este valor representa la **inercia térmica del sistema**, cuanto mayor sea, más difícil es cambiar la temperatura.

Estimación experimental del coeficiente UA

En estado estacionario:

$$\frac{dT}{dt} = 0$$

$$m c \frac{dT}{dt} = \dot{Q} - UA(T - T_{amb})$$

Entonces:

$$\dot{Q} = UA(T_{estacionario} - T_{amb})$$

$$UA = \frac{\dot{Q}}{T_{estacionario} - T_{amb}}$$

$$UA = \frac{3000 \text{ W}}{(88.5 - 20)^\circ\text{C}} = 43.80 \text{ W}/^\circ\text{C}$$

UA mide la **facilidad con la que el sistema pierde calor**.

Un valor alto implica mayores pérdidas térmicas

Valores de la ganancia K y del τ

$$K = \frac{1}{UA} = 0.02283 \text{ K/W}$$

$$\tau = \frac{m c}{UA} = 1387.2 \text{ s}$$

Modelo dinámico teórico

$$G(s) = \frac{T'(s)}{\dot{Q}_{resis}(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} = \frac{0.02283}{1387.2 s + 1}$$

4.6 Resultados del modelo dinámico del módulo de control de temperatura MCT-

02 usando la técnica de identificación de sistemas

Los datos para la identificación fueron obtenidos de la hoja DATOS_CALENTAMIENTO_02.xlsx, los cuales contienen los datos de las experiencias de calentamiento de agua en el tanque 1.

Específicamente se tomaron los datos de temperatura registrados en la hoja “CALENTAMIENTO_03”, prueba 3, y se copiaron en otra hoja “ident” para convertirlos en variable de desviación $T^d(t)$. Usando la expresión $T^d(t) = T(t) - \bar{T}$, donde $T(t)$ es la temperatura en el tiempo capturada por el programa y $\bar{T}$ es la temperatura inicial.

Donde T_d representa la variable de salida, la cual se considerará en adelante como la temperatura del proceso.

Figura 42

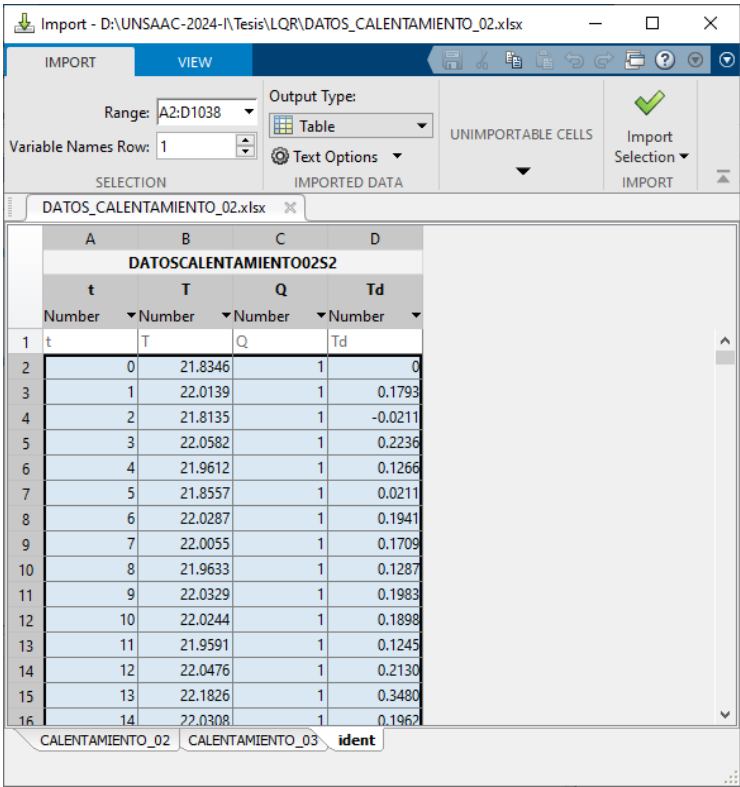
Datos de la prueba 3

	A	B	C	D
1	t	T	Q	Td
2	0	21.8346	1	0
3	1	22.0139	1	0.1793
4	2	21.8135	1	-0.0211
5	3	22.0582	1	0.2236
6	4	21.9612	1	0.1266
7	5	21.8557	1	0.0211
8	6	22.0287	1	0.1941
9	7	22.0055	1	0.1709
10	8	21.9633	1	0.1287
11	9	22.0329	1	0.1983
12	10	22.0244	1	0.1898
13	11	21.9591	1	0.1245
14	12	22.0476	1	0.213
15	13	22.1826	1	0.348
16	14	22.0308	1	0.1962
17	15	22.0498	1	0.2152
18	16	22.0244	1	0.1898
19	17	22.0244	1	0.1898

Se realizó la importación de datos hacia el entorno de MATLAB, con formato de tabla para su posterior manipulación.

Figura 43

Datos de la prueba 3 en formato tabla



Import - D:\UNSAAC-2024-I\Tesis\LQR\DATOS_CALENTAMIENTO_02.xlsx

IMPORT VIEW

Range: A2:D1038

Variable Names Row: 1

Output Type: Table

Text Options

UNIMPORTABLE CELLS

Import Selection

IMPORT

SELECTION IMPORTED DATA

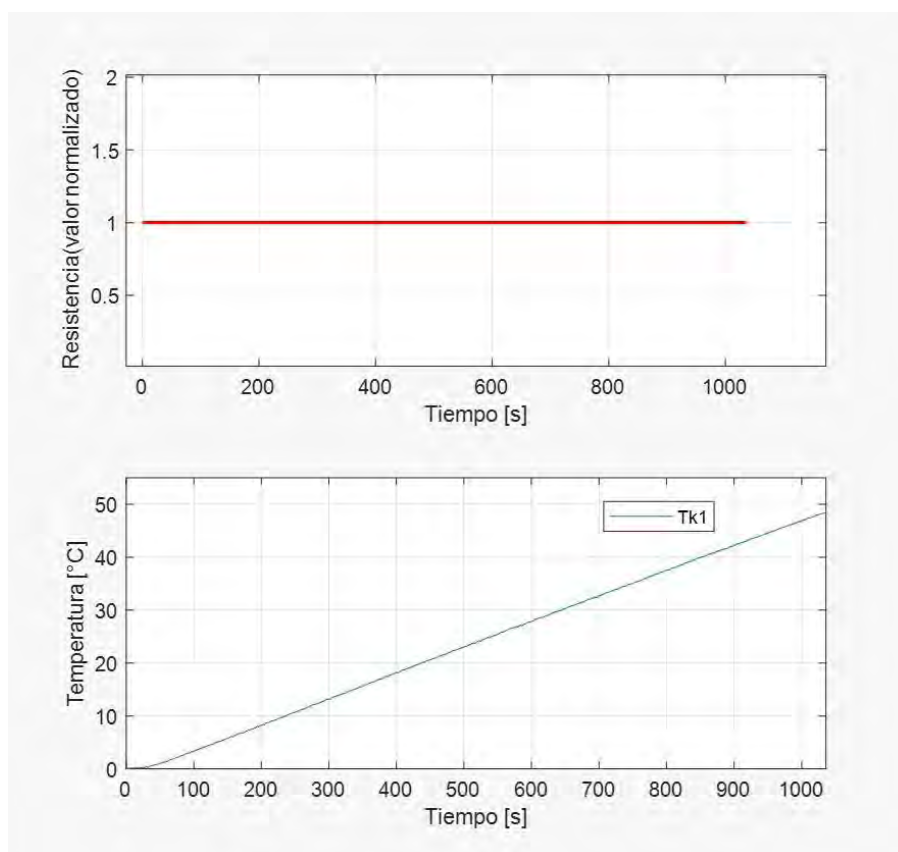
DATOS_CALENTAMIENTO_02.xlsx

	A	B	C	D
	DATOSCALENTAMIENTO02S2			
	t	T	Q	Td
	Number	Number	Number	Number
1	t	T	Q	Td
2	0	21.8346	1	0
3	1	22.0139	1	0.1793
4	2	21.8135	1	-0.0211
5	3	22.0582	1	0.2236
6	4	21.9612	1	0.1266
7	5	21.8557	1	0.0211
8	6	22.0287	1	0.1941
9	7	22.0055	1	0.1709
10	8	21.9633	1	0.1287
11	9	22.0329	1	0.1983
12	10	22.0244	1	0.1898
13	11	21.9591	1	0.1245
14	12	22.0476	1	0.2130
15	13	22.1826	1	0.3480
16	14	22.0308	1	0.1962

CALENTAMIENTO_02 CALENTAMIENTO_03 ident

Nota. Los valores de “Q” representan a la variable de entrada y los valores de “Td” representan a la variable de salida.

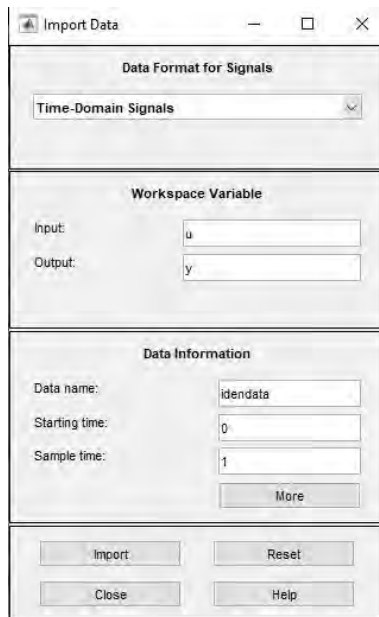
Luego se realizó una gráfica inicial en el Matlab según al código del apéndice 1 para proponer un modelo candidato del proceso. En la figura 44 se muestra la gráfica inicial que corresponde a la prueba 3, donde la primera grafica representa la entrada y la segunda grafica representa la a la salida.

Figura 44*Grafica inicial de la prueba 3*

En la gráfica de la resistencia vs el tiempo, se observa que en el eje “y”, la resistencia tiene valor de 1, ya que tiene valores normalizados, en donde el valor de “1” representa cuando la resistencia este prendido y el valor de “0” cuando esta apagada.

Luego se trabaja la identificación de sistemas en la *App System Identification* de MATLAB para obtener un modelo de proceso, aparentemente un proceso de tiempo integrador.

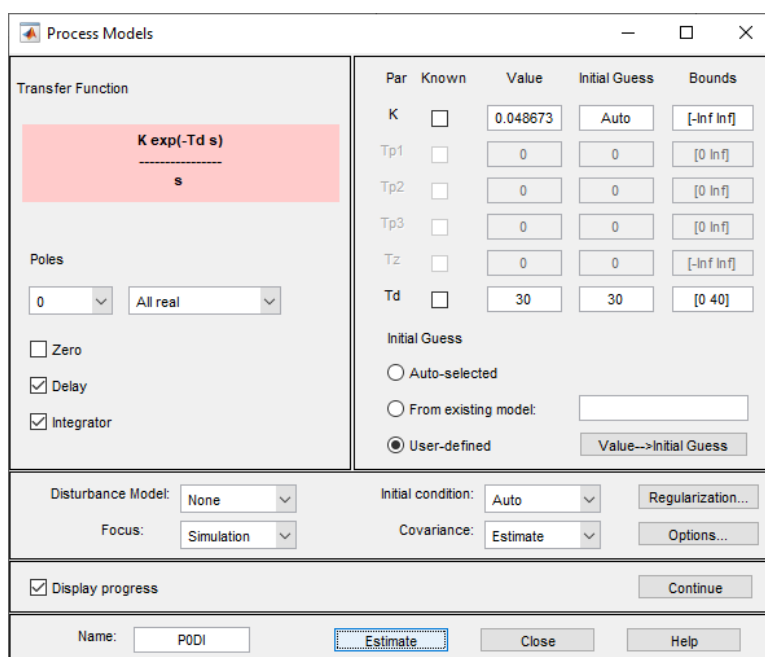
Para ello, primero se importó los datos, completando la pestaña de *Time Domain Signals* de la *App System Identification*. En la figura 45 se importan los datos de calentamiento, de entrada (u) y salida (y), el tiempo de inicio es de “0” y el tiempo de muestreo es de “1” segundo. Asimismo, el nombre de los datos de calentamiento es “idendata”.

Figura 45*Importación de los datos de calentamiento*


The 'Import Data' dialog box is shown with the following settings:

- Data Format for Signals:** Time-Domain Signals
- Workspace Variable:** Input: u, Output: y
- Data Information:** Data name: idendata, Starting time: 0, Sample time: 1
- Buttons:** Import, Reset, Close, Help

A continuación, se lleva a cabo la estimación del modelo. En la figura 46 se presentan los parámetros estimados correspondientes al modelo integrador con tiempo muerto (P0DI).

Figura 46*Parámetros estimados para el modelo integrador con tiempo muerto (P0DI)*


The 'Process Models' dialog box is shown with the following settings:

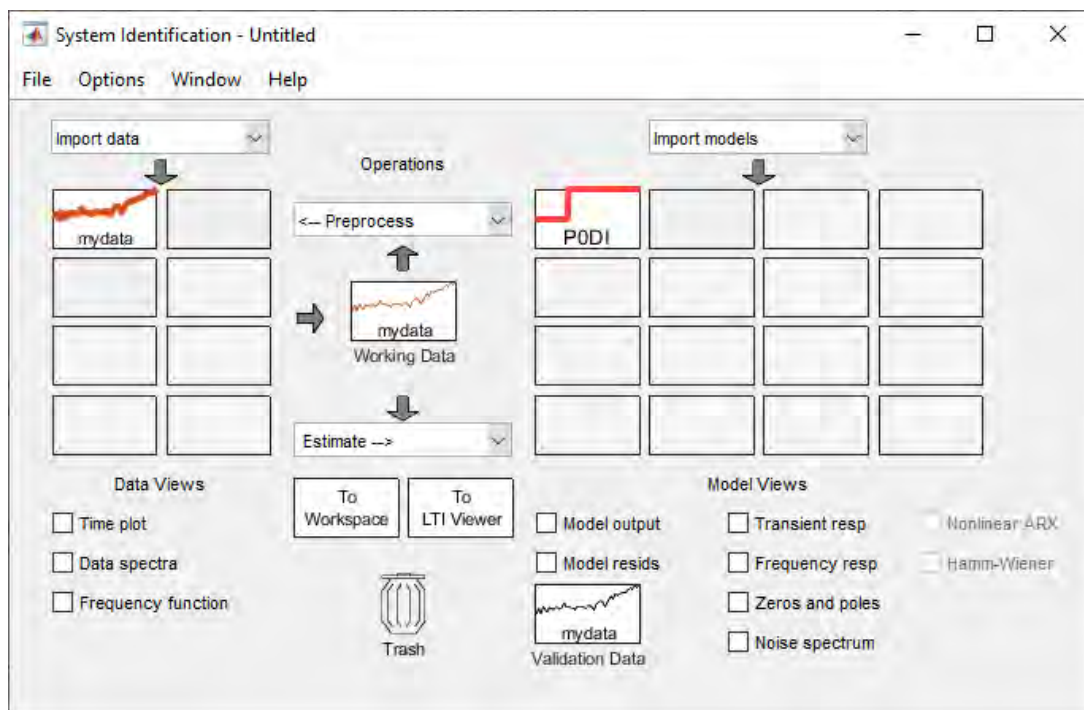
- Transfer Function:** $K \frac{\exp(-T_d s)}{s}$
- Poles:** 0, All real
- Initial Guess:**
 - ☐ Auto-selected
 - ☐ From existing model:
 - ☒ User-defined: Value-->Initial Guess
- Disturbance Model:** None
- Focus:** Simulation
- Initial condition:** Auto
- Covariance:** Estimate
- Buttons:** Regularization..., Options..., Continue
- Name:** P0DI
- Buttons:** Estimate, Close, Help

Par	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	☐	0.048673	Auto	[-Inf Inf]
Tp1	☐	0	0	[0 Inf]
Tp2	☐	0	0	[0 Inf]
Tp3	☐	0	0	[0 Inf]
Tz	☐	0	0	[-Inf Inf]
Td	☐	30	30	[0 40]

Posteriormente, se importa el modelo estimado del proceso de calentamiento del tanque 1. Este modelo aparece en el recuadro de la sección *Import models*, como se muestra en la figura 47.

Figura 47

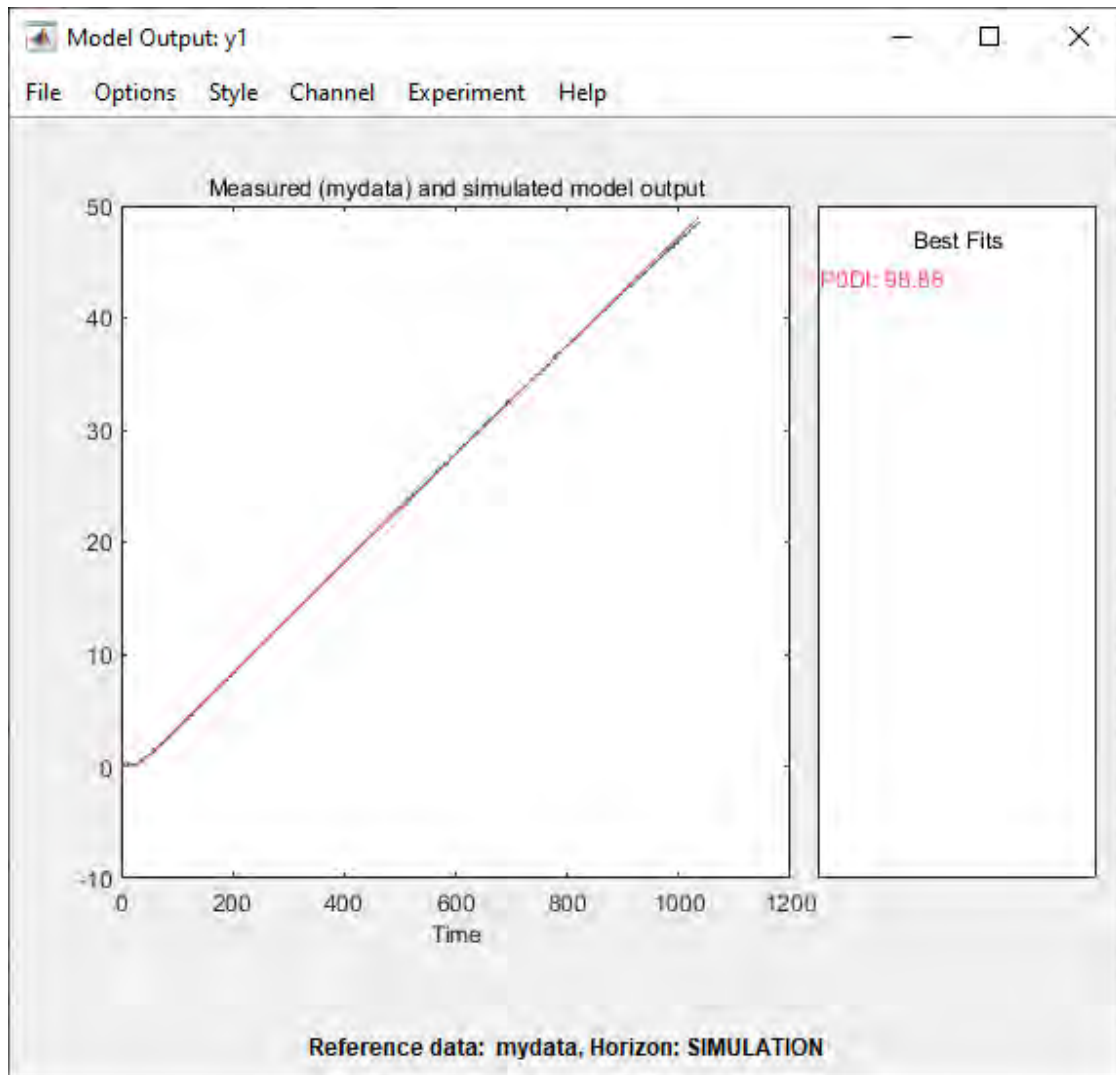
Modelo estimado en la sección Import models



La validación de los datos estimados se realizó mediante los datos importados del proceso de calentamiento (idendata). En la figura 48 se muestra el porcentaje de ajuste del modelo P0DI.

Figura 48

Porcentaje de ajuste del modelo identificado, tomando como referencia el “Idendata”.

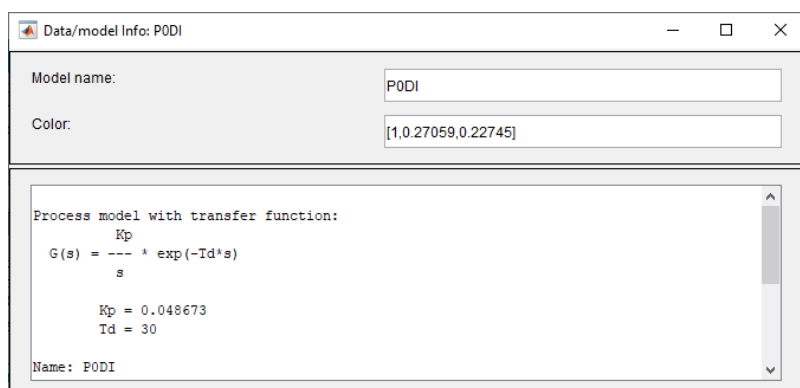


El modelo candidato que tiene la forma: $G(s) = \frac{K}{s} e^{-\theta s}$ presenta un porcentaje de ajuste del 98.88 %, por lo tanto, se tomara este modelo como el modelo de proceso de calentamiento, y tiene los siguientes parámetros de ganancia y tiempo muerto.

En la figura 49 se muestra los parámetros de la función de transferencia del modelo PODI, donde “Kp” es la ganancia estática y “Td” es el tiempo muerto en el sistema en segundos.

Figura 49

Parámetros de la función de transferencia del modelo P0DI



En la tabla 14 se muestra el modelo obtenido para el proceso de calentamiento del tanque 1 del módulo de control de temperatura, con sus respectivos parámetros, donde es un modelo de tipo integrador.

Tabla 14

El modelo P0DI y sus parámetros

Nombre del modelo	Función de transferencia del modelo	Parámetros	
		K	θ
P0DI	$G(s) = \frac{0.048673}{s} * e^{-30s}$	0.048673	30

4.7 Comparación entre el modelo experimental, modelo teórico y modelo de referencia

El modelo derivado del balance de energía representa adecuadamente el comportamiento global del sistema hasta alcanzar el estado estacionario, mostrando una dinámica de primer orden. Sin embargo, en la etapa inicial del calentamiento, cuando la diferencia de temperatura entre el sistema y el ambiente es pequeña, las pérdidas térmicas son despreciables. Bajo esta condición, el sistema presenta un comportamiento de tipo integrador, ya que la energía suministrada se acumula en el sistema sin mecanismos significativos de disipación.

La tabla 15 presenta una comparación de las funciones de transferencia obtenidas para el sistema de calentamiento de agua en un tanque agitado, considerando el modelo experimental, el modelo teórico desarrollado en este trabajo y el modelo reportado en la literatura por Dwivedi (2009).

A partir de esta comparación, se observa que los tres modelos difieren tanto en su estructura matemática como en los valores de sus parámetros, lo cual refleja los distintos enfoques utilizados para su obtención. El modelo experimental presenta un comportamiento tipo integrador con tiempo muerto, evidenciando la naturaleza acumulativa del proceso térmico y la presencia de retardos inherentes al sistema real. En contraste, el modelo teórico del trabajo y el modelo de Dwivedi corresponden a sistemas de primer orden, caracterizados por una respuesta asintótica hacia el estado estacionario.

Asimismo, se identifican diferencias importantes en la ganancia y en la constante de tiempo. El modelo teórico desarrollado en este trabajo presenta parámetros más cercanos al sistema real en comparación con el modelo de Dwivedi, debido a que fue formulado utilizando datos experimentales propios. Por otro lado, el modelo de Dwivedi muestra una constante de tiempo considerablemente mayor, lo que indica una dinámica mucho más lenta asociada a condiciones y parámetros distintos.

En cuanto al tiempo muerto, únicamente el modelo experimental considera este fenómeno, lo cual resalta su capacidad para representar efectos reales como retardos en la medición y en la transferencia de calor. Esta característica no es contemplada en los modelos teóricos, lo que constituye una de sus principales limitaciones.

La tabla 15 permite evidenciar que el modelo experimental ofrece la representación más precisa del comportamiento dinámico del sistema, mientras que los modelos teóricos resultan útiles como aproximaciones para el análisis físico y la comprensión del proceso.

Tabla 15*Cuadro comparativo de funciones de transferencia*

Criterio	Modelo experimental del trabajo	Modelo teórico del trabajo	Modelo de referencia según Dwivedi (2009)
Función de transferencia	$G(s) = \frac{0.048673}{s} * e^{-30s}$	$G(s) = \frac{0.02283}{1387.2 s + 1}$	$G(s) = \frac{1.09}{365000 s + 1}$
Tipo de sistema	Integrador con tiempo muerto	Primer orden	Primer orden
Ganancia estática	-	0.02283	1.09
Ganancia del integrador	0.048673	-	-
Constante de tiempo (τ)	No definida	1387.2 s	365000 s
Tiempo muerto	30 s	No considerado	No considerado
Origen del modelo	Datos experimentales del sistema real	Balance de energía del trabajo	Referencia bibliográfica
Comportamiento dinámico	Acumulativo y con retardo	Respuesta exponencial progresiva	Respuesta muy lenta
Representación del sistema real	Alta	Media	Baja
Aplicación principal	Validación y diseño de control	Análisis físico del proceso	Comparación teórica

A partir del análisis comparativo de los tres modelos (experimental, teórico y de referencia), se evidencian diferencias significativas en la representación del sistema, particularmente en términos de dinámica, tipo de ganancia y tiempo de respuesta, lo cual permite evaluar el grado de aproximación de cada modelo respecto al comportamiento real.

El modelo experimental describe al sistema como una ganancia dinámica integradora de valor 0.048673/s con un tiempo muerto de 30 s, lo que implica que la salida se acumula progresivamente ante una entrada constante y presenta un retardo antes de iniciar su respuesta. A diferencia de los otros modelos, este no posee una ganancia estática ni una constante de tiempo definida, debido a su naturaleza integradora: al estar representado por una función del tipo $K/sK/s$, el sistema no tiende a un estado estacionario mediante una respuesta exponencial, sino que su salida crece continuamente en el tiempo mientras exista una entrada. Por esta razón, no es posible caracterizar su dinámica mediante una constante de tiempo como en los sistemas de primer orden. Este comportamiento refleja de manera más fiel el sistema real, ya que incorpora fenómenos físicos reales como retardos en la transferencia de energía o en procesos de transporte, así como efectos acumulativos propios del sistema.

En contraste, el modelo teórico representa el sistema como uno de primer orden sin tiempo muerto, con una ganancia estática de 0.02283 y una constante de tiempo de 1387.2 s. Esta formulación se basa en suposiciones simplificadas, como el balance de energía ideal, lo que facilita el análisis matemático, pero introduce error al no considerar efectos reales del proceso. La constante de tiempo relativamente alta indica una dinámica lenta; sin embargo, al no incluir el tiempo muerto, el modelo no logra reproducir el retardo observado experimentalmente. Además, su baja ganancia estática

evidencia que subestima tanto la magnitud como la dinámica de la respuesta del sistema.

Por otro lado, el modelo de referencia (Dwivedi, 2009) corresponde a un sistema de primer orden con una ganancia estática de 1.09 y una constante de tiempo extremadamente elevada de 365000 s, lo que implica una respuesta muy lenta y una clara sobreestimación del comportamiento del sistema. Estas diferencias se explican porque dicho modelo fue desarrollado bajo condiciones, escalas y parámetros distintos, por lo que no está ajustado al sistema experimental analizado.

Las diferencias observadas entre los modelos se deben principalmente a la presencia de una ganancia dinámica integradora frente a ganancias estáticas, a la inclusión del tiempo muerto (30 s) en el modelo experimental, a las simplificaciones del modelo teórico y al contexto distinto del modelo de referencia.

Finalmente, el modelo experimental es el más adecuado para representar el sistema real, ya que incorpora los efectos físicos relevantes. El modelo teórico constituye una aproximación simplificada útil para el análisis conceptual, mientras que el modelo de referencia cumple un papel comparativo, pero no representativo del sistema estudiado.

Efecto del tiempo

En los procesos reales de ingeniería química, el tiempo muerto (o retardo) es un fenómeno común que afecta de manera significativa la dinámica de los sistemas, especialmente en operaciones térmicas como el calentamiento de fluidos en tanques agitados. Este efecto representa el intervalo de tiempo que transcurre entre la aplicación de una entrada (por ejemplo, el suministro de calor) y la respuesta observable en la salida del sistema (temperatura).

En el modelo experimental obtenido en este trabajo, el tiempo muerto de 30 s refleja la presencia de diversos fenómenos físicos inherentes al sistema. Entre ellos se encuentran la inercia térmica del fluido, el tiempo requerido para que el calor se distribuya dentro del tanque mediante agitación, y el retardo en la medición debido a la respuesta del sensor de temperatura. Estos efectos no son considerados en los modelos teóricos ideales, lo que explica parte de la discrepancia observada entre los modelos.

En términos de dinámica, la presencia de tiempo muerto introduce un desfase en la respuesta del sistema, lo cual puede dificultar su análisis y control. En procesos industriales, este retardo puede generar problemas como sobrecalentamiento, oscilaciones o inestabilidad si no se considera adecuadamente en el diseño del sistema de control. Por esta razón, los modelos que incorporan tiempo muerto, como el modelo experimental obtenido, resultan más representativos y útiles para aplicaciones prácticas.

Además, en sistemas térmicos reales, el tiempo muerto está estrechamente relacionado con la eficiencia de transferencia de calor y las condiciones de operación. Factores como la velocidad de agitación, la geometría del tanque, las propiedades del fluido y la ubicación del sensor influyen directamente en la magnitud del retardo observado.

En contraste, los modelos teóricos basados en balances de energía suelen asumir una respuesta instantánea del sistema, lo que simplifica el análisis, pero limita su aplicabilidad en escenarios reales. Por ello, aunque estos modelos son fundamentales para la comprensión del fenómeno físico, resulta necesario complementarlos con modelos experimentales que capturen efectos como el tiempo muerto.

4.8 Lazo de control cerrado para el proceso de calentamiento de agua

Después de obtener la función de transferencia del proceso de calentamiento de agua de proceso en el tanque, se construye el lazo de control considerando la resistencia eléctrica, el proceso térmico del agua de proceso, el sensor de temperatura y el controlador, como se muestra en la figura 50.

En dicha figura se presenta un bloque denominado ganancia total, que corresponde a la función de transferencia global del sistema. Esto se debe a que el modelo fue identificado aplicando una potencia conocida de 3000 W y midiendo directamente la temperatura dentro del tanque, por lo que la respuesta obtenida ya incluye:

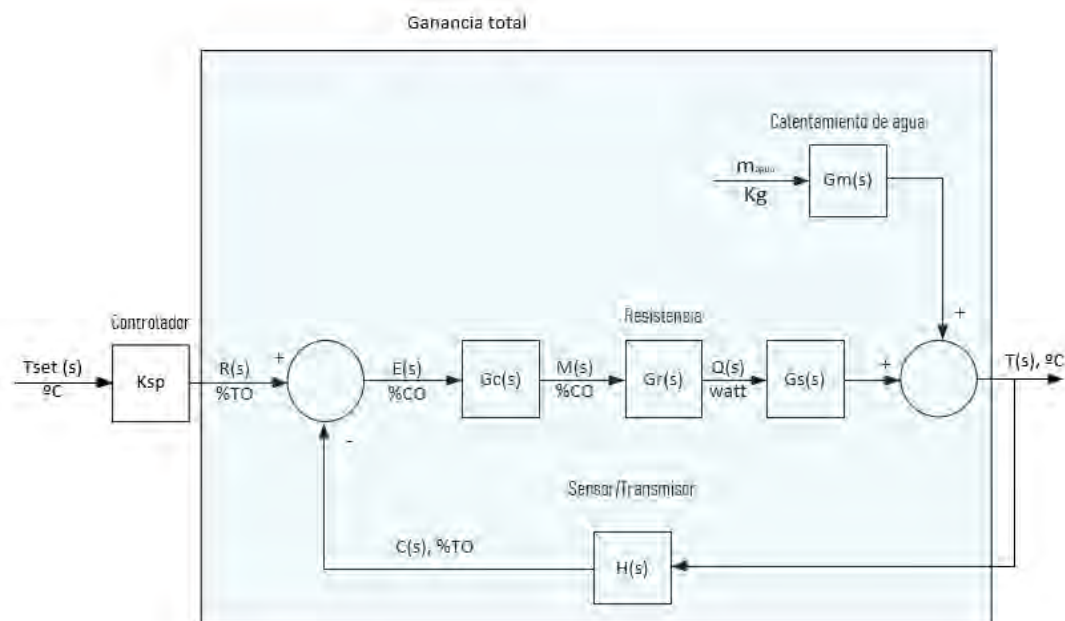
- La conversión energética de la resistencia (actuador),
- La dinámica térmica del agua con agitación,
- Y la medición del sensor.

En este caso, el sensor utilizado es un PT100, cuyo comportamiento es prácticamente lineal en el rango de operación y con una constante de tiempo pequeña respecto a la dinámica térmica, por lo que se modela como una ganancia unitaria. De esta manera, las ganancias del actuador y del sensor quedan absorbidas en la constante de la función de transferencia.

Por lo tanto, la función de transferencia obtenida representa el comportamiento global del proceso de calentamiento del agua de proceso y puede modelarse como un único bloque dentro del lazo de control.

Figura 50

Diagrama de lazo de control para el proceso de calentamiento del agua del tanque 1



Nota. Donde (s) es la función de la transferencia del controlador, $G_r(s)$ es la función de transferencia de la resistencia, $G_s(s)$ es la función de transferencia del sensor, $G_m(s)$ es la función de transferencia de la masa de agua.

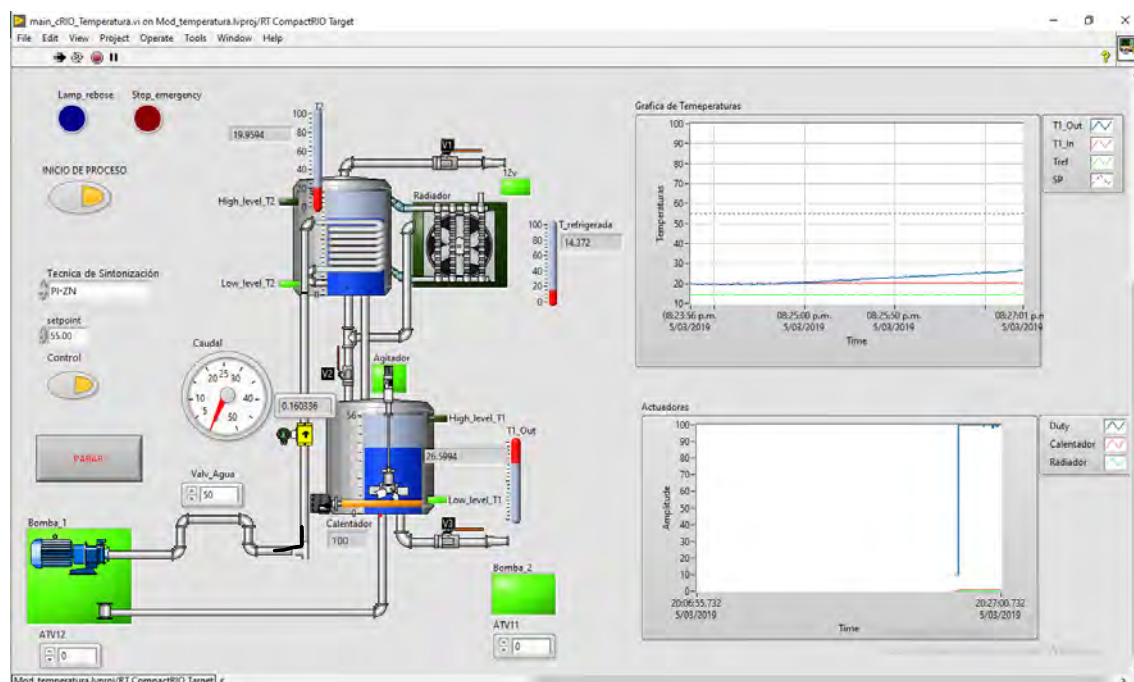
4.9 Resultados de sintonización del controlador PID para el Módulo de Control de Temperatura (mediante la técnica de Ziegler – Nichols)

4.9.1 Interfaz del sistema de control PID

La interfaz del sistema de control del módulo fue diseñada en el entorno de LabVIEW, y presenta tres secciones interactivas las cuales se dividen en pestañas donde se presenta con claridad toda la información relativa a la supervisión, adquisición y control del módulo en la figura 51.

Figura 51

Panel Frontal Del Programa Para El Sistema De Control PID Del Módulo De Temperatura En LabVIEW



En la primera sección, que se encuentra a la izquierda del panel, presenta el siguiente contenido:

- Lamp_rebose (lampara de rebose)
- Stop_Emergency
- Inicio de proceso
- Técnica de sintonización para el controlador PID
- Set point
- Control
- Parar

En la segunda sección, situado en la parte central del panel, presenta el siguiente contenido:

- Diagrama de control del módulo

En la tercera sección, situado en la parte derecha del panel, presenta el siguiente contenido:

- Grafica de la temperatura del agua del tanque 1 y del tanque 2, set point y de refrigeración
- Grafica de los actuadores: duty, calentador y radiador.

4.9.2 Implementación del controlador PID en el LabVIEW

La implementación del PID en LabVIEW, se realizó en 4 secuencias, las secuencias mostradas a continuación tienen como finalidad controlar la temperatura del agua de proceso mediante calentamiento, enfriamiento y recirculación, utilizando un controlador en tiempo real.

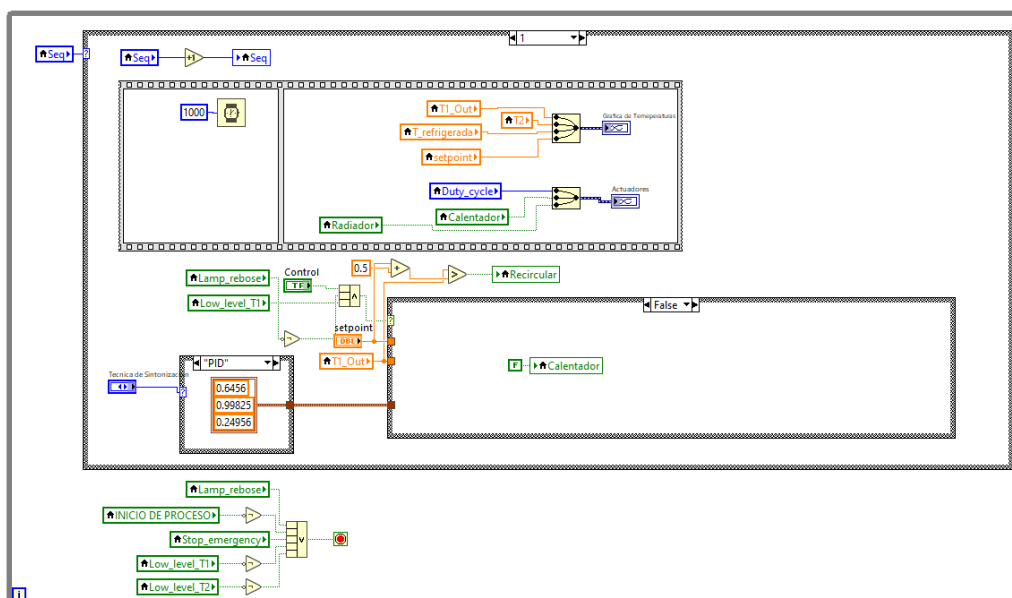
Antes del inicio de las secuencias se verifica que se cumplan las condiciones básicas de seguridad: el operador activa la señal de inicio, no hay una parada de emergencia activa, los sensores de nivel indican que hay suficiente agua en los tanques y no esta activa la lampara de rebose.

a. Secuencia 1

La figura 52 presenta la Secuencia 1 del proceso de control de temperatura. Una vez iniciado el sistema, este ejecuta un ciclo de control periódico con una frecuencia de un segundo. En cada iteración del ciclo, se mide la temperatura actual del sistema (T1) y se compara con el valor de referencia o set point.

La señal de error resultante es procesada por un controlador proporcional-integral-derivativo (PID), cuyas ganancias han sido previamente configuradas en la estructura interna del bloque de control. A partir de dicha información, el PID calcula la señal de control requerida para mantener la temperatura del sistema en el valor deseado.

La salida del controlador PID se transforma en un valor de duty cycle, que regula la potencia entregada al elemento calefactor (resistencia) mediante una técnica de modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés). Esta salida, expresada como un porcentaje entre 0 % y 100 %, representa el esfuerzo de control necesario. En



b)

b. Secuencia 2

La figura 53 muestra la Secuencia 2 del sistema, la cual se activa una vez que la temperatura supera en $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ al valor del set point, tal como se describe en la Secuencia 1. En esta etapa, se habilita el modo de enfriamiento del sistema.

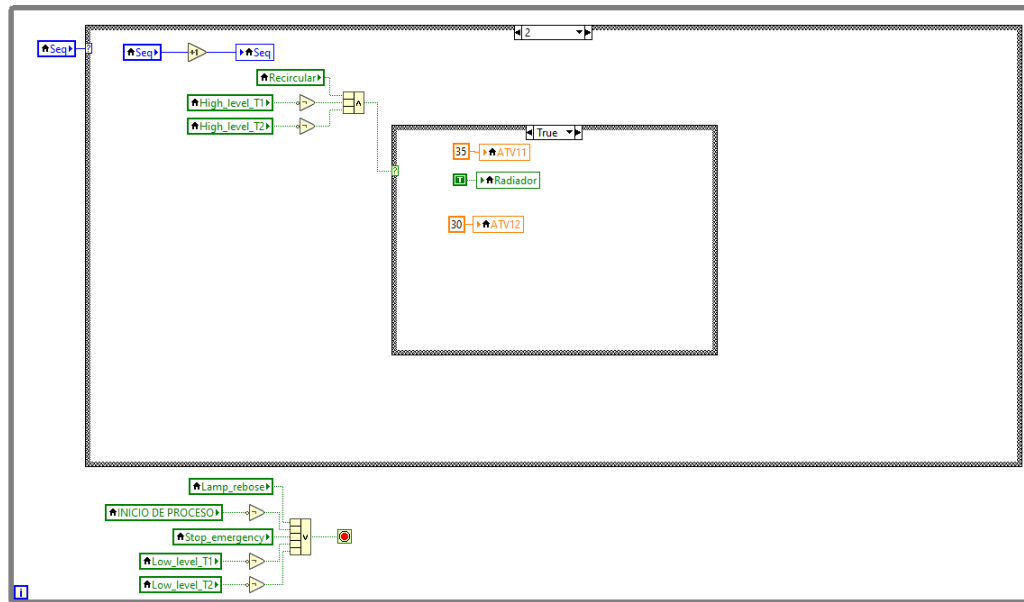
Antes de activar el proceso de recirculación de agua, el sistema verifica que exista un volumen adecuado de líquido en los tanques 1 y 2. Esta verificación se realiza mediante dos señales digitales de nivel alto: High_level_T1 y High_level_T2. Ambas condiciones deben cumplirse simultáneamente para que se habilite la señal de Recircular, que indica la activación del circuito de recirculación.

Dentro de una estructura condicional del tipo False/True, se define el comportamiento de los actuadores involucrados: las bombas ATV11 y ATV12, así como el radiador. Si la condición lógica es verdadera, se activa el conjunto del sistema de enfriamiento. La bomba ATV11 pone en funcionamiento el circuito de refrigeración a través del radiador, permitiendo disipar el exceso de calor y manteniendo la

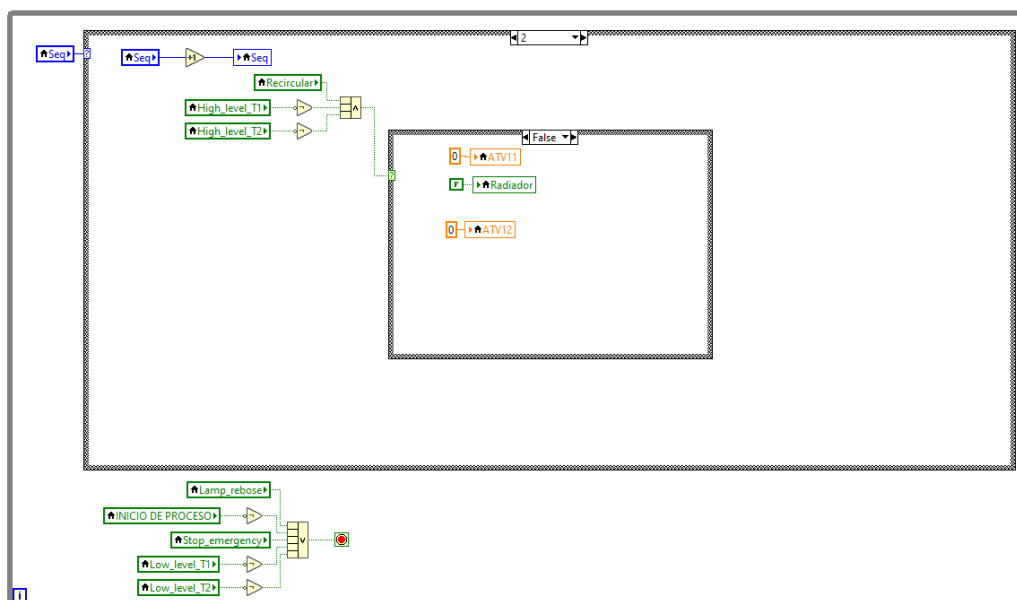
temperatura dentro del rango deseado. La bomba ATV12 pone en funcionamiento la recirculación del agua de proceso del tanque 1.

Figura 53

Diagrama de bloques de la secuencia 2



a)



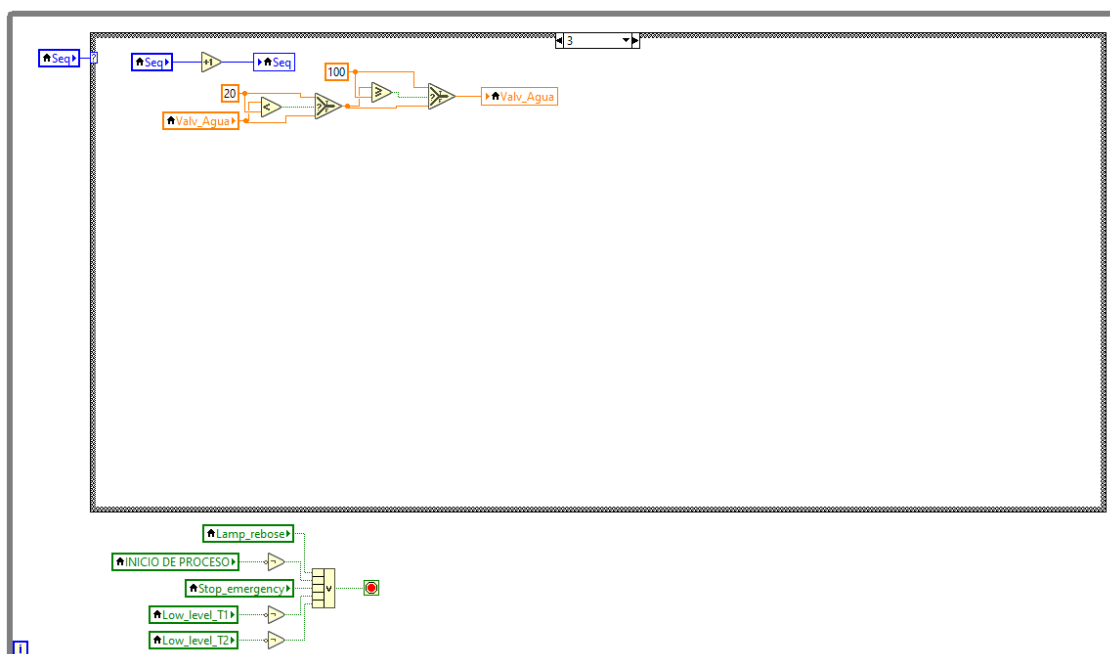
b)

c. Secuencia 3

En la figura 54 se muestra la secuencia 3 del sistema. Donde la apertura de la válvula de agua se ajusta dentro de un rango del 20% al 100%. Es importante tener en cuenta que, si se configura por debajo del 20%, no se permitirá el paso de agua. Para este trabajo de tesis la apertura de la válvula es de 50%.

Figura 54

Diagrama de bloques de la secuencia 3



d. Secuencia 4

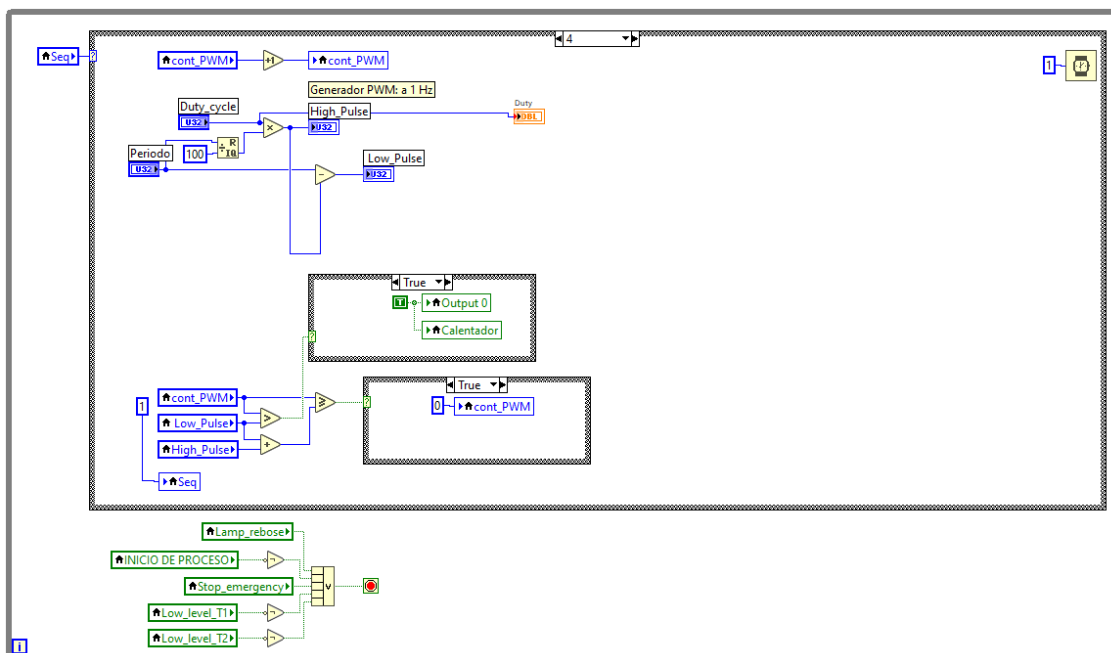
En la figura 55 se muestra la secuencia 4, donde el control PWM ya no se limitará únicamente a encender y apagar la resistencia, sino que se gestionará mediante una secuencia de pulsos. Para ello, se utilizan varios bloques intermedios: *duty cycle* (0-100%), *periodo* (1000), *pulso alto* (*high-pulse*) y *pulso bajo* (*low-pulse*). Estos parámetros permiten calcular con precisión los momentos en que la resistencia debe encenderse o apagarse. El funcionamiento es el siguiente: si el valor del contador (*cont_PWM*) es mayor que el del pulso bajo (figura 56), la resistencia se enciende; de lo

contrario, se apaga. Este control ajusta continuamente el valor del pulso, aumentando gradualmente o reiniciándolo a cero (apagado), según corresponda.

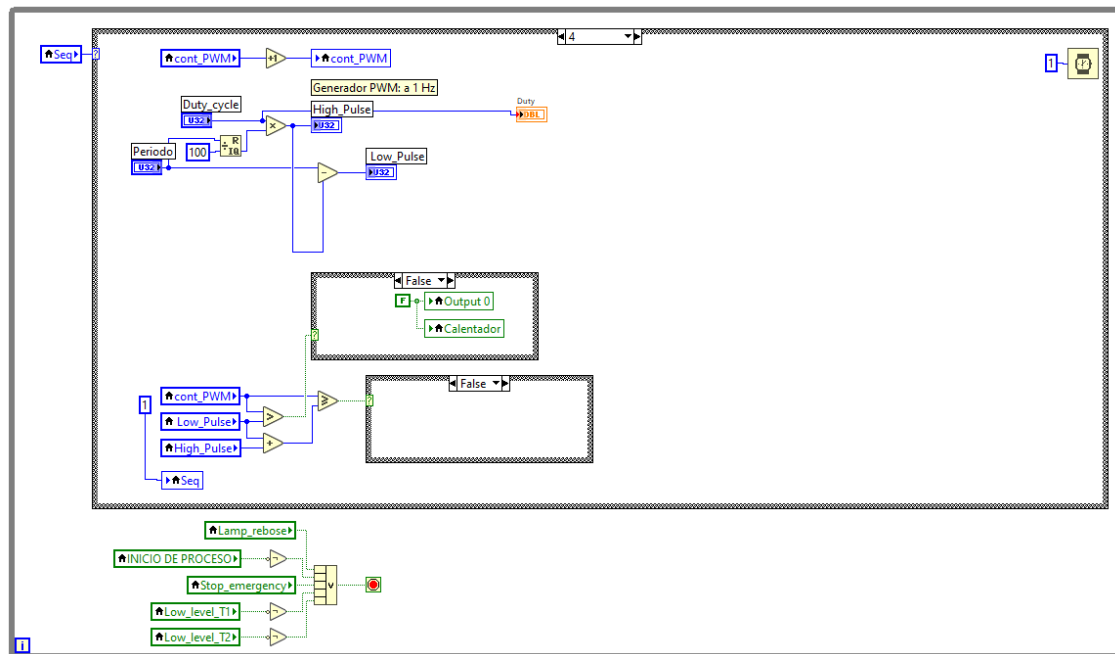
Una vez que se completa todo el proceso de control PWM, se activa el bloque llamado *1seq*, ubicado en la parte inferior del diagrama, el cual reinicia la secuencia desde el inicio.

Figura 55

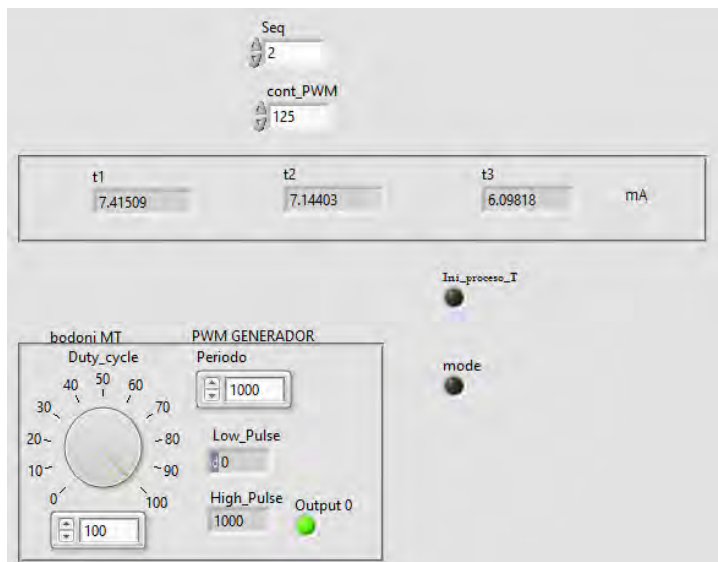
Diagrama de bloques de la secuencia 4



a)



b)

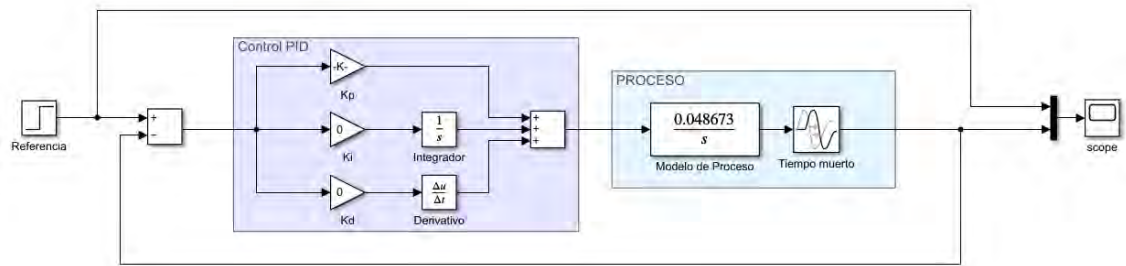
Figura 56*Interfaz del controlador PWM*

4.9.3 Obtención del valor de K_{cu} y P_u del controlador PID

En la figura 57 se muestra el diagrama de lazo cerrado para el modelo de tipo integrador más tiempo muerto.

Figura 57

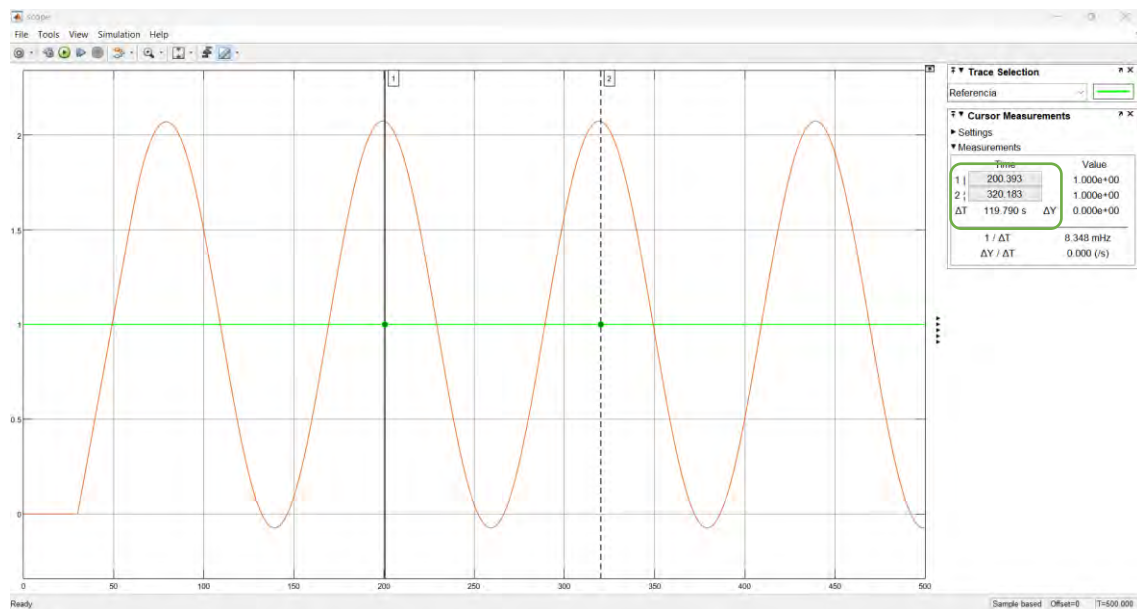
Diagrama de lazo cerrado para el modelo P0DI



Mediante prueba y error al incrementar el valor de K_p , se determinó el valor de la ganancia última (K_{cu}) igual a 1.076, donde el sistema tuvo una respuesta oscilatoria continua, como se muestra en la figura 58. Además, se determinó que el último periodo (P_u) es igual a 119.790 segundos.

Figura 58

Respuesta de oscilación continua del Módulo de Control de Temperatura.



Nota. La sección en cuadrado muestra el último periodo (P_u).

4.9.4 Sintonización de los controladores PID, mediante la técnica de Ziegler

Nichols

De acuerdo con la literatura clásica de control automático (Ogata & Dormido, 2010), el controlador PID puede adoptar diferentes configuraciones dependiendo de las acciones activas. En el caso en que únicamente se emplea la acción proporcional (P), el controlador sigue perteneciendo a la familia PID, considerando que las acciones integrales (I) y derivativa (D) son nulas. De manera análoga, cuando se utiliza una configuración PI, la acción derivativa es igual a cero, manteniéndose dentro de la estructura general del controlador PID.

No obstante, con fines de claridad y para evitar ambigüedades en la interpretación de resultados, en el presente trabajo se distinguirán explícitamente las configuraciones como controlador PI y controlador PID, tal como es común en estudios experimentales y comparativos.

Dado que ya se disponía de los valores de K_{cu} y P_u , se procedió a calcular los parámetros del controlador, los cuales se presentan en la tabla 16.

Para la sintonización de los controladores PID se emplearon las ecuaciones mostradas en la tabla 1, correspondientes al método de Ziegler-Nichols en lazo cerrado (método de ciclado). Los parámetros resultantes de este procedimiento se detallan en la tabla 16.

Tabla 16

Parámetros de sintonización para los controladores PID y PI

	K_p	τ_i	τ_d
PI	0.4842	99.825 s	0 s
PID	0.6456	59.895 s	14.97375 s

Posteriormente, los valores del tiempo integral (τ_i) y del tiempo derivativo (τ_d) se obtienen en segundos; sin embargo, para su implementación en LabVIEW es necesario que estén en minutos. Por ello, en la tabla 17 se presentan ambos tiempos convertidos a minutos.

Tabla 17

Parámetros de sintonización de los controladores PID convertidos para su implementación en LabVIEW

	K_p	τ_i	τ_d
PI	0.4842	1.664 min	-----
PID	0.6456	0.99825 min	0.2495625 min

4.9.5 Respuesta de los controladores PI y PID

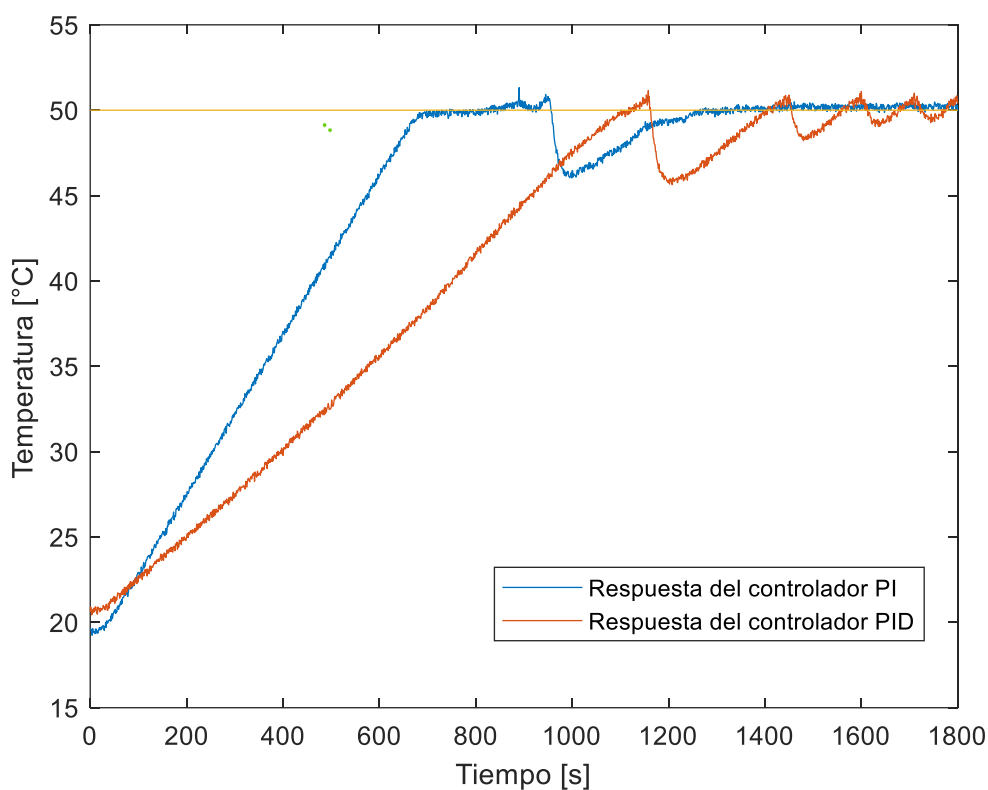
Una vez obtenidos los valores de sintonización, estos se ingresan en el controlador PID implementado en LabVIEW.

Primero se realizó el control utilizando el modo PI, ingresando la ganancia proporcional y el tiempo integral en el bloque correspondiente. Luego se realizó el control utilizando el modo PID ingresando los valores de ganancia, tiempo integral y derivativo.

A partir de las pruebas realizadas, se obtuvieron los datos experimentales de la respuesta de los controladores PI y PID ante un set point de 50 °C, los cuales se presentan en la gráfica 4.

Gráfica 4

Respuesta de los controladores PI y PID para un set point de 50°C para el Módulo de Control de Temperatura



En la gráfica 4 la temperatura inicial para la respuesta del controlador PI es de 19.6431 °C y para el PID es de 20.6387°C, esto debido a que se inició el trabajo a diferente temperatura y humedad ambiental. La temperatura y humedad ambiental inicial es de 19.3°C y 37% para el controlador PI y de 19.7°C y 41% para el PID.

En la gráfica 4 se observa que el controlador PI presenta oscilaciones leves, mientras que el controlador PID exhibe oscilaciones sostenidas. Además, el PID muestra picos que superan y descienden por debajo del punto de referencia, comportamiento que también se presenta en el controlador PI, aunque con menor intensidad.

4.10 Resultados de sintonización del controlador LQR para el Módulo de Control de temperatura

4.10.1 Aproximación por PADE de primer orden de la función de transferencia

La función de transferencia obtenida, es de tipo **integrador con tiempo muerto**, para lo cual se le convirtió el retardo mediante PADE, para manejar de forma compatible con el método de control.

Función de transferencia original

$$G(s) = \frac{0.048673}{s} * e^{-30s} \quad (65)$$

Aproximación del retador mediante Padé de primer orden

$$\text{Padé de primer orden: } e^{-\theta s} \approx \frac{1 - \frac{\theta s}{2}}{1 + \frac{\theta s}{2}} \quad (66)$$

Donde $\theta = 30$, reemplazar en la ecuación 66

$$e^{-30s} = \frac{1 - \frac{30s}{2}}{1 + \frac{30s}{2}}$$

$$e^{-30s} = \frac{1 - 15s}{1 + 15s}$$

El valor equivalente a e^{-30s} se reemplaza en la ecuación 65

$$G(s) = \frac{0.048673}{s} * e^{-30s}$$

$$G(s) = \frac{0.048673}{s} * \frac{1-15s}{1+15s}$$

$$G(s) = \frac{0.048673 - (0.048673 * 15)s}{s + 15s^2}$$

Multiplicar por $\frac{1}{15}$ al numerador y denominador

$$G(s) = \frac{\frac{1}{15} * [0.048673 - (0.048673 * 15)s]}{\frac{1}{15} * [s + 15s^2]}$$

$$G(s) = \frac{0.003245 - 0.048673s}{0.06667s + s^2}$$

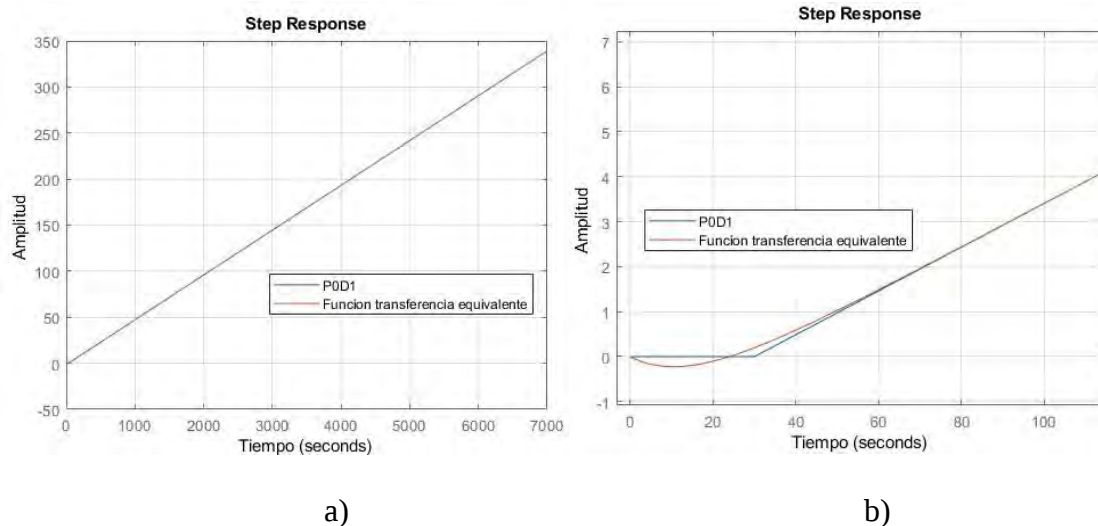
Función de transferencia equivalente

$$G1(s) = \frac{-0.04867 s + 0.003245}{s^2 + 0.06667 s} \quad (68)$$

En la Gráfica 5.a se presentan tanto la función de transferencia original como su equivalente, las cuales se visualizan como una línea recta, sin diferencias aparentes a simple vista. Sin embargo, al observar con mayor detalle el inicio de ambas funciones en la Gráfica 5.b, se puede notar que el modelo original P0D1 exhibe un retardo de 30 segundos, mientras que la función equivalente, obtenida mediante la aproximación de Padé, muestra una respuesta curva en esa misma región.

Gráfica 5

Respuesta escalón para la función de transferencia original (P0D1) y equivalente (aproximación de PADE)



4.10.2 Conversión de función de transferencia equivalente al espacio estados

La función de transferencia equivalente está representada con un numerador y denominador polinomial en “s”. Ya tendiendo el modelo se convierte al espacio de estados controlable, para ello se utilizó las siguientes ecuaciones:

i. Función de transferencia equivalente

$$G1(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{-0.048673s + 0.003245}{s^2 + 0.06667s}$$

ii. Definir las variables de estado (forma canónica controlable)

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0s^n + b_1s^{n-1} + \dots + b_{n-1}s + b_n}{s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n}$$

$$\mathbf{G1}(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{-0.048673s+0.003245}{s^2+0.06667s} = \frac{b_0s^2+b_1s+b_2}{s^2+a_1s+a_2}$$

Siendo “n” igual 2, e igualando las variables de la función de transferencia equivalente con la forma canónica controlable se obtiene:

$$b_0 = 0$$

$$b_1 = -0.048673$$

$$b_2 = 0.003245$$

$$\mathbf{a}_1 = 0.06667$$

$$\mathbf{a}_2 = 0$$

iii. Reemplazando en las matrices de la forma canónica controlable

a. Matriz de derivadas de estado

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \vdots \\ \dot{X}_{n-1} \\ \dot{X}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_{n-1} \\ X_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

De acuerdo a las variables obtenidas, la matriz de derivadas de estados se

reduce a:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

Y comparando se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.06667 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

b. Matriz de salida

$$y = [b_n - a_n b_0 : b_{n-1} - a_{n-1} b_0 : \dots : b_1 - a_1 b_0] \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} + b_0 u$$

De acuerdo a las variables obtenidas, la matriz de salida se reduce a:

$$y = [b_2 - a_2 b_0 \quad b_1 - a_1 b_0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + b_0 u$$

Y reemplazando las variables se tiene:

$$y = [0.003245 \quad -0.048673] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + 0 u$$

c. Forma canónica controlable, en el espacio de estados:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.06667 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \\ y &= [0.003245 \quad -0.048673] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + 0 u \end{aligned} \quad \xrightarrow{\quad} \quad G(s) \rightarrow \begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{A}x + \mathbf{B}u \\ y &= \mathbf{C}x + \mathbf{D}u \end{aligned}$$

Donde:

- $x \Rightarrow$ *Estados de Temperatura*
- $\dot{x} =$ *Derivadas de los estados (Temperatura)*
- $y \Rightarrow$ ***Temperatura del tanque 1***
- $u \Rightarrow$ ***Resistencia***

Según al resultado, los valores de las matrices son:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.06667 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C = [0.003245 \quad -0.048673]$$

$$D = 0$$

4.10.3 Discretización de las matrices A, B, C, D

Una vez determinadas las matrices en tiempo continuo, se procedió a realizar su discretización. Las matrices resultantes en tiempo discreto se presentan en las siguientes expresiones:

$$Ad = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.9674 \\ 0 & 0.9355 \end{bmatrix}$$

$$Bd = \begin{bmatrix} 0.4891 \\ 0.9674 \end{bmatrix}$$

$$Cd = [0.0032 \quad -0.0487]$$

$$Dd = 0$$

4.10.4 Determinación de las matrices Q y R

Los valores de las matrices de ponderación Q y R se determinaron mediante un proceso de prueba y error. Las diferentes pruebas realizadas se presentan en el apéndice 16. A partir de estas, se seleccionaron aquellos valores que proporcionaron el mejor desempeño del sistema, es decir, una respuesta adecuada frente a una referencia (set point) de 50 °C. Los valores finales de la matriz Q y R se muestran en la siguiente expresión:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}, R = 1$$

4.10.5 Ganancia del controlador LQR discreto

Con las matrices discretizadas A, B, C y D, y utilizando los valores de Q y R previamente definidos, se calculó la ganancia del controlador LQR en tiempo discreto, cuyo valor es:

$$K = [0.0975 \quad 1.0060]$$

4.10.6 Normalización de la referencia (N_{bar})

Con el propósito de que el controlador LQR pueda seguir adecuadamente una referencia, se efectuó la normalización de dicha señal, obteniéndose el valor de N_{bar} .

$$N_{bar} = 30.0411$$

4.10.7 Observador discreto

Debido a que no todos los estados del sistema pueden ser medidos directamente, se diseñó un observador discreto que permite estimarlos a partir de la salida disponible. Con las matrices discretizadas de A y C , se determinó la ganancia L del observador, ubicando sus polos en posiciones adecuadas para garantizar una rápida y estable convergencia del error de estimación. Los valores de L son:

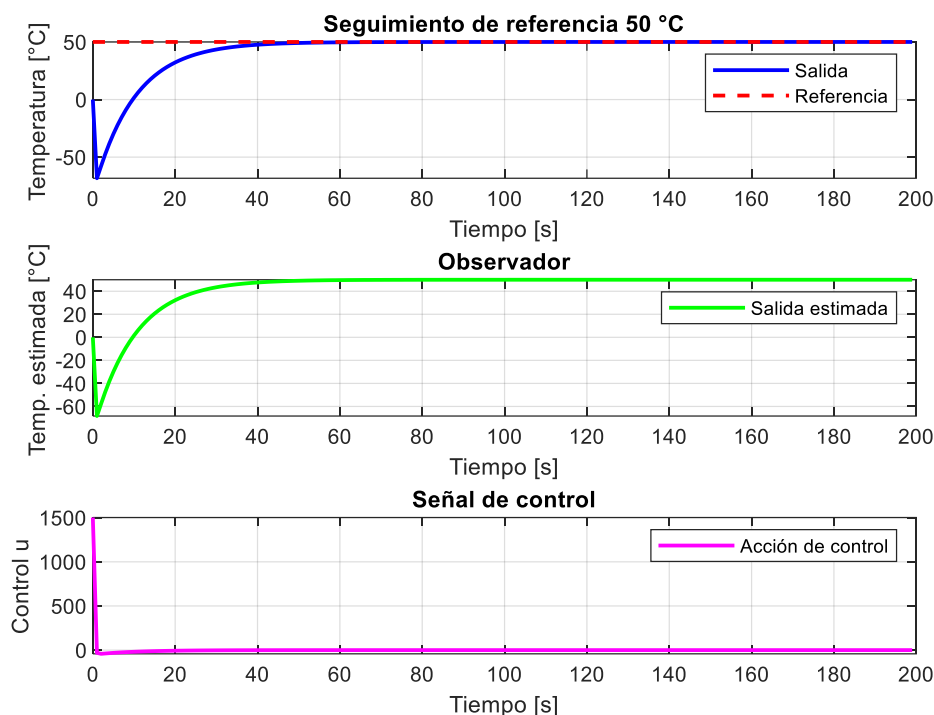
$$L = \begin{bmatrix} 84.0678 \\ 0.7663 \end{bmatrix}$$

4.10.8 Simulación del controlador LQR discreto

En la figura 59 se presentan las simulaciones obtenidas para una referencia de 50 °C. En la primera gráfica se muestra la respuesta del controlador LQR discreto; en la segunda, el comportamiento del observador discreto; y finalmente, en la tercera gráfica se observa la señal de la acción de control aplicada al sistema.

Figura 59

Simulación con referencia constante de 50 °C



4.10.9 Implementación del controlador LQR

En la figura 60 se muestra el panel frontal del programa para el sistema de control LQR del módulo de temperatura en LabVIEW. En la primera sección, que se encuentra a la izquierda del panel, se añadió el bloque: Tipo de controlador y Duty Salida.

La figura 61 muestra el diagrama de implementación del controlador LQR discreto en LabVIEW, donde se integra la estimación de estados mediante un observador y la normalización de la referencia para garantizar un adecuado seguimiento del punto de consigna. Asimismo, se incluye el cálculo y la generación de la señal PWM utilizada para accionar el elemento de control del sistema, permitiendo así la ejecución completa del algoritmo de control en la plataforma de adquisición.

Figura 60

Panel Frontal Del Programa Para El Sistema De Control LQR Del Módulo De Temperatura En LabVIEW

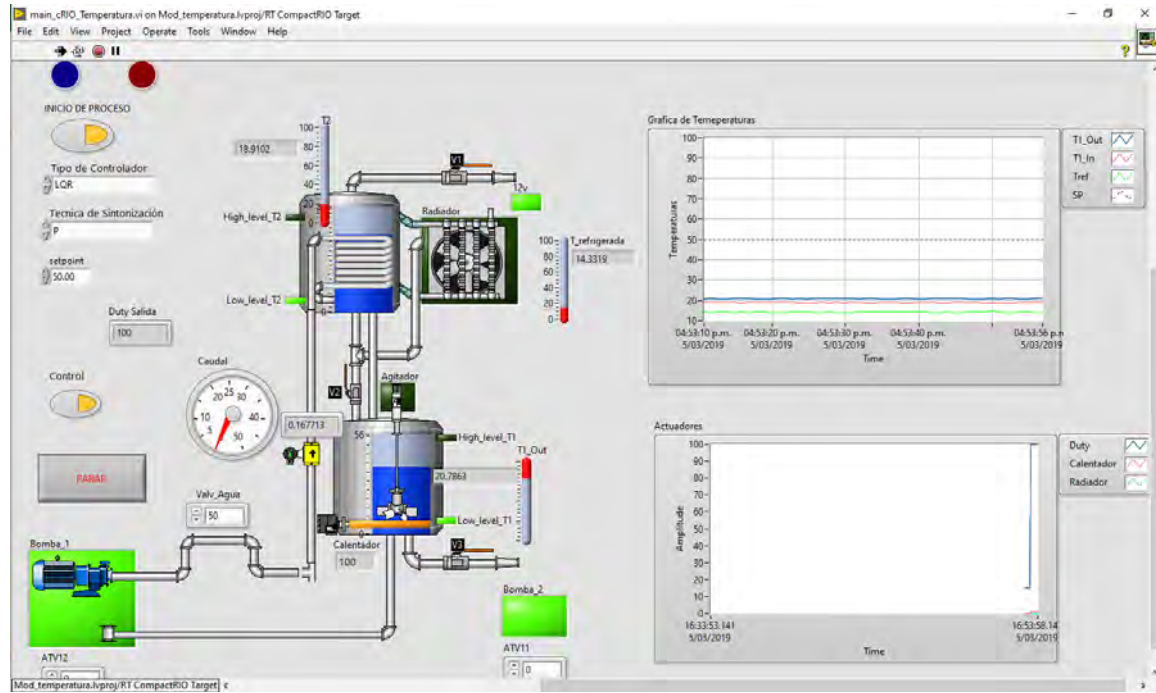
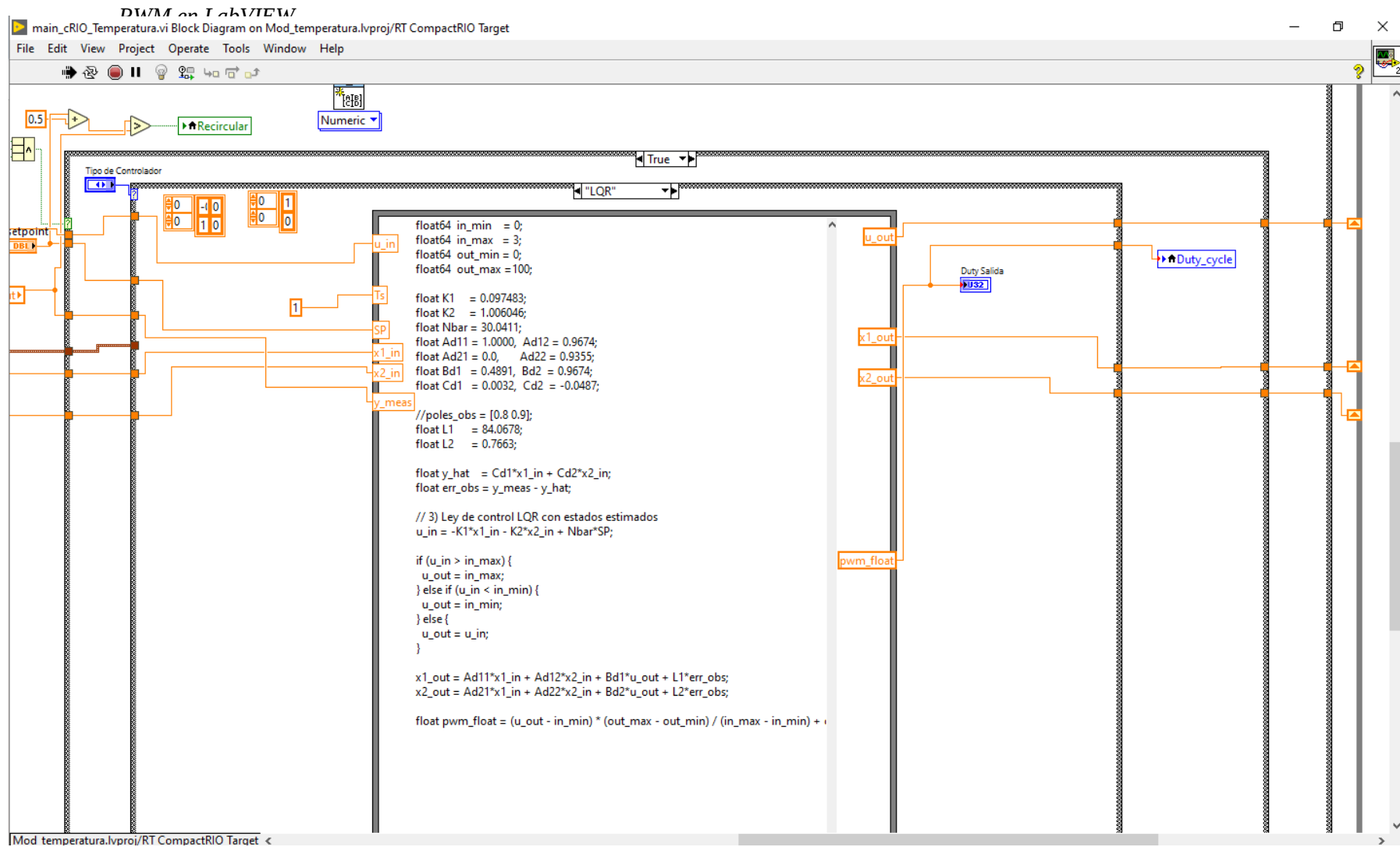


Figura 61

Diagrama de implementación del controlador LQR discreto, estimación de estados mediante observador y generación de la señal

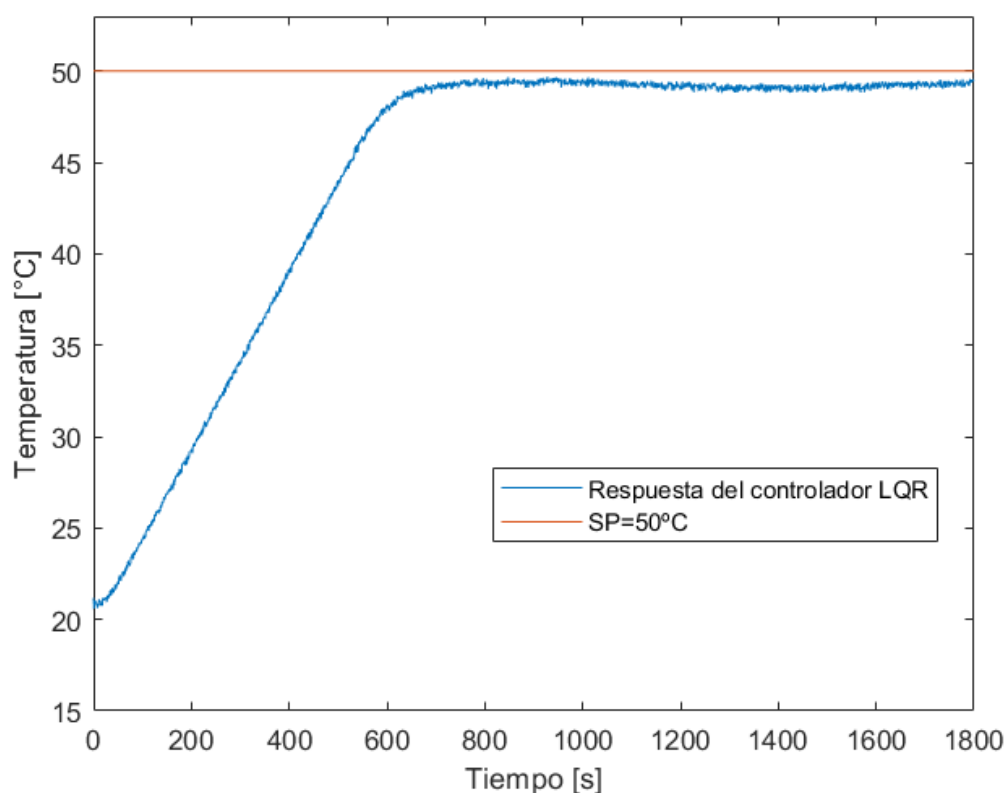


4.10.10 Respuesta del controlador LQR

La gráfica 6 muestra la respuesta temporal del sistema controlado mediante un controlador LQR ante una referencia de 50 °C. La temperatura inicia en 21.1829 °C y luego incrementa de manera continua y controlada hasta acercarse al punto de referencia.

Gráfica 6

Respuesta del controlador LQR discreto para un set point de 50 °C



En la primera parte de la respuesta, el sistema presenta un aumento casi lineal, característico de la dinámica térmica durante la etapa de calentamiento. Conforme la temperatura se aproxima al valor deseado, la pendiente del incremento comienza a disminuir, dando paso a una aproximación suave hacia los 50 °C.

La señal no presenta sobreimpulsos significativos; en cambio, converge de manera estable hacia el valor de referencia. En la etapa final se observan oscilaciones de

muy baja amplitud, indicando un buen comportamiento en régimen permanente y una adecuada estabilidad proporcionada por el controlador LQR.

En general, la respuesta muestra un ascenso progresivo, estable y bien amortiguado, logrando cumplir el objetivo de alcanzar y mantener la temperatura deseada sin variaciones abruptas.

4.11 Discusión de los resultados de la respuesta de los controladores PI, PID y LQR

4.11.1 Características de la respuesta de los controladores PI, PID Y LQR

En la tabla 18 se muestra las características de los controladores PID y PI sintonizados por el método de Ziegler-Nichols y el controlador LQR

Tabla 18

Características de las respuestas de los controladores

CARACTERÍSTICA	PID	PI	LQR
Tiempo de subida (segundos)	926.0853	570.9864	513.8898
Tiempo transitorio (segundos)	1769.5	1235	1588.3
Tiempo de asentamiento(segundos)	1752.1	1161.1	652.1639
Asentamiento mínimo (°C)	45.2380	44.7782	44.4956
Asentamiento máximo (°C)	51.1565	51.3211	49.6927
Sobreimpulso (%)	1.4937	2.7622	0
Subimpulso (%)	0	0	0
Pico (°C)	51.1565	51.3211	-
Tiempo pico (segundos)	1158	890	-

En la tabla 18 se observa que el controlador LQR presenta el menor tiempo de subida (513.8898 s), lo que le permite alcanzar más rápidamente la temperatura de referencia en comparación con los controladores PI y PID, cuyos tiempos de subida son de 570.9864 s y 926.0853 s, respectivamente. Este resultado evidencia un mejor desempeño dinámico inicial por parte del LQR, seguido del PI, mientras que el PID muestra una respuesta considerablemente más lenta.

En relación con el tiempo transitorio y el tiempo de asentamiento, el controlador PI presenta el menor tiempo transitorio (1235 s), seguido del LQR (1588.3 s) y finalmente el PID (1769.5 s). No obstante, el comportamiento del sistema difiere al analizar el tiempo de asentamiento, donde el LQR registra el menor valor (652.1639 s), en contraste con el PI (1161.1 s) y el PID (1752.1 s). Esto indica que, si bien el PI alcanza rápidamente una condición cercana al estado estable, el LQR logra estabilizar completamente el sistema en menor tiempo, reflejando un mejor desempeño global.

En cuanto a la respuesta máxima del sistema, el controlador PI alcanza el mayor valor pico (51.3211 °C), seguido del PID (51.1565 °C), mientras que el LQR no presenta pico. Asimismo, el tiempo pico es menor en el PI (890 s), seguido del PID (1158 s), mientras que el LQR no presenta tiempo pico. Este comportamiento pone en evidencia que el PI presenta una respuesta más agresiva, lo cual se traduce en un mayor sobreimpulso (2.7622 %), en comparación con el PID (1.4937 %) y el LQR (0 %), siendo este último el que exhibe la menor desviación respecto al valor de referencia.

Adicionalmente, ninguno de los controladores presenta subimpulso, lo que confirma la estabilidad del sistema en todos los casos evaluados. Sin embargo, el análisis comparativo de los indicadores dinámicos permite establecer que el controlador LQR ofrece el mejor desempeño general, debido a su menor tiempo de asentamiento, reducido sobreimpulso y adecuada rapidez de respuesta, características que contribuyen a una operación más estable y eficiente del proceso.

Por otro lado, el controlador PI presenta un comportamiento aceptable, especialmente en el régimen transitorio, aunque su naturaleza más agresiva genera mayores oscilaciones. En contraste, el controlador PID evidencia limitaciones en términos de rapidez y estabilización, lo que se traduce en un desempeño inferior frente a los otros controladores evaluados.

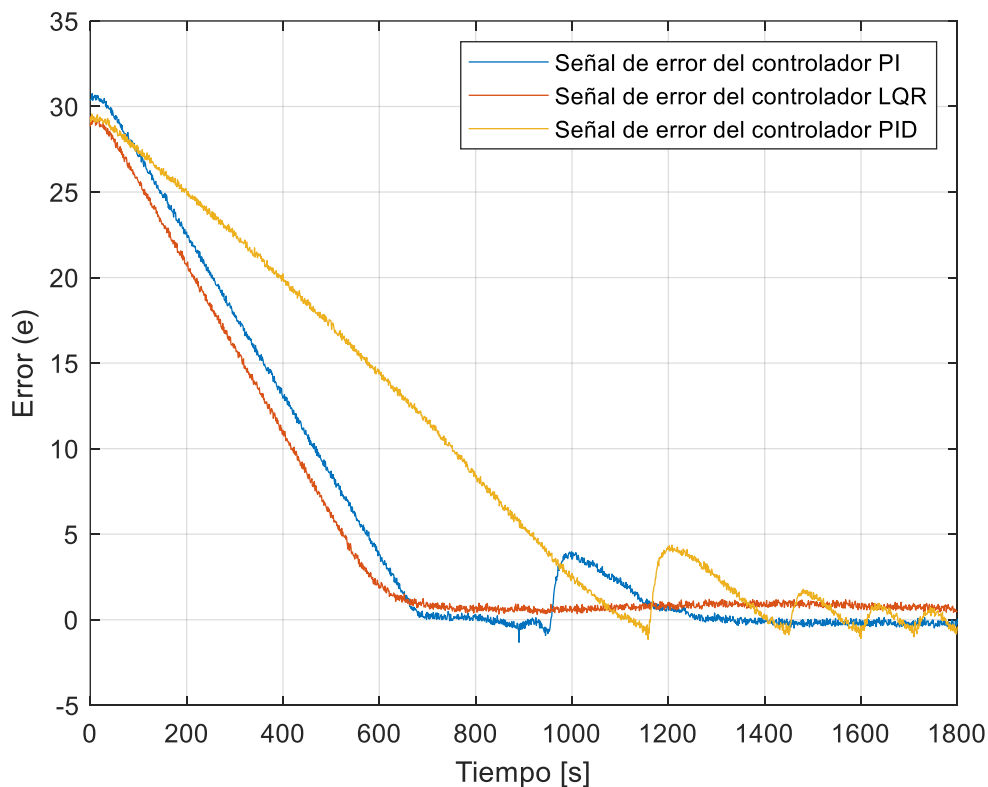
Bajo este contexto, para el análisis de cambios de set point y la evaluación del sistema ante perturbaciones, resulta más apropiado emplear los controladores PI y LQR, ya que permiten representar de manera más adecuada la dinámica del proceso. En particular, el controlador LQR se posiciona como la alternativa más robusta y eficiente, mientras que el controlador PID no presenta ventajas relevantes para este tipo de análisis.

4.11.2 Análisis de error de la respuesta de los controladores PI, PID y LQR

En la gráfica 7 se muestra la señal de error de los controladores PID, PI y LQR, donde el error hace referencia a la diferencia entre el punto de ajuste y la medición del sensor de temperatura.

Gráfica 7

Señal de error de los controladores PI, PID y LQR



En la tabla 19 se presentan los criterios de error IAE (Integral del Error Absoluto) e ISE (Integral del Error Cuadrático) para los controladores PID, PI y LQR,

los cuales permiten evaluar el desempeño del sistema en términos de precisión y acumulación del error a lo largo del tiempo.

Se observa que el controlador PID presenta los mayores valores tanto de IAE (17,760) como de ISE (347,260), lo que indica una mayor acumulación del error durante la respuesta del sistema. Este comportamiento refleja un menor desempeño en términos de precisión, así como una respuesta menos eficiente frente a las variaciones del set point.

Por su parte, el controlador PI muestra una mejora significativa respecto al PID, con valores de IAE (11,584) e ISE (231,010). Esto evidencia una reducción en el error acumulado y una mejor capacidad para seguir la referencia, aunque aún presenta desviaciones considerables en comparación con el controlador LQR.

En contraste, el controlador LQR presenta los menores valores de ambos criterios, con un IAE de 10,487 y un ISE de 193,650, lo que demuestra un desempeño superior en términos de minimización del error. Estos resultados indican que el LQR logra un seguimiento más preciso del set point, reduciendo tanto el error acumulado como las desviaciones significativas durante la respuesta del sistema.

En conjunto, el análisis de los criterios de error confirma que el controlador LQR ofrece el mejor desempeño entre los tres evaluados, seguido por el PI, mientras que el PID presenta las mayores limitaciones. La menor magnitud de los errores en el LQR no solo refleja una mayor precisión, sino también una operación más eficiente y estable del sistema, lo cual es consistente con los resultados obtenidos en los indicadores dinámicos previamente analizados.

Tabla 19*Criterio de error para los controladores PID, PI y LQR*

Criterio de error	PID	PI	LQR
IAE (°C. s)	17,760.00	11,584.00	10,487.00
ISE (°C ² . s)	347,260.00	231,010.00	193,650.00

4.11.3 Análisis energético acumulado de los controladores PI, PID y LQR**Controlador PID**

- Calor entregado acumulado: 3,036,990 J
- Calor útil acumulado: 1,809,132.05 J
- Calor perdido acumulado: 1,227,857.95 J
- Eficiencia PID

$$\eta_{PID} = \frac{Q_{entregado}}{Q_{util}} \times 100 = \frac{1,809,132.05}{3,036,990} \times 100 = 59.57\%$$

Controlador PI

- Calor entregado acumulado: 3,253,920 J
- Calor útil acumulado: 1,853,234.54 J
- Calor perdido acumulado: 1,400,685.46 J
- Eficiencia PI

$$\eta_{PI} = \frac{Q_{entregado}}{Q_{util}} \times 100 = \frac{1,853,234.54}{3,253,920} \times 100 = 56.95\%$$

Controlador LQR

- Calor entregado acumulado: 1,857,030.00 J
- Calor útil acumulado: 1,724,257.86 J
- Calor perdido acumulado: 132,772.14 J
- Eficiencia LQR

$$\eta_{LQR} = \frac{Q_{entregado}}{Q_{util}} \times 100 = \frac{1,724,257.86}{1,857,030.00} \times 100 = 92.9\%$$

En la comparación energética de los controladores PID, PI y LQR se observan diferencias significativas en la forma en que cada estrategia de control aprovecha la energía suministrada al sistema. El controlador PID registra un calor entregado acumulado de 3,036,990 J, de los cuales 1,809,132.05 J corresponden a calor útil acumulado y 1,227,857.95 J a calor perdido acumulado. Estos resultados indican que, aunque el PID logra transferir una cantidad considerable de energía al sistema, una fracción importante no se aprovecha efectivamente en el incremento térmico deseado, sino que se disipa en forma de pérdidas.

Por su parte, el controlador PI presenta un calor entregado acumulado aún mayor, de 3,253,920 J, junto con un calor útil acumulado de 1,853,234.54 J y un calor perdido acumulado de 1,400,685.46 J. Si bien el PI alcanza el mayor valor de calor útil entre los tres controladores, también presenta las mayores pérdidas energéticas. Esto sugiere que su acción de control es más intensa o agresiva, entregando más energía de la necesaria para mantener el sistema en torno al valor de referencia, lo que incrementa las pérdidas térmicas y reduce su desempeño desde el punto de vista de eficiencia energética.

En contraste, el controlador LQR muestra un comportamiento notablemente superior. El calor entregado acumulado es de 1,857,030.00 J, valor considerablemente menor al reportado para los controladores PID y PI. A pesar de ello, el calor útil acumulado alcanza 1,724,257.86 J, una magnitud cercana a la obtenida con los otros dos controladores. Asimismo, el calor perdido acumulado es de solo 132,772.14 J, siendo muy inferior al observado en el PID y en el PI. Este resultado evidencia que el LQR logra aprovechar de manera mucho más efectiva la energía suministrada, minimizando las pérdidas y maximizando el uso útil del calor transferido.

Desde una perspectiva comparativa, los resultados permiten afirmar que el controlador LQR presenta la mejor eficiencia energética del conjunto evaluado, ya que requiere menor energía total entregada para alcanzar un desempeño térmico similar al de los otros controladores. En cambio, tanto el PID como el PI demandan una mayor cantidad de energía y generan pérdidas considerablemente más elevadas, lo que refleja un menor aprovechamiento del recurso energético.

En términos de comportamiento del proceso, estos resultados son coherentes con el desempeño dinámico previamente analizado. El controlador LQR, al presentar menor sobreimpulso y mejor estabilización, evita aportes excesivos de energía y reduce la necesidad de correcciones posteriores, lo que repercute directamente en una menor disipación térmica. Por el contrario, el PI y el PID, al mostrar respuestas menos eficientes, incrementan el calor total suministrado y, en consecuencia, las pérdidas acumuladas.

En consecuencia, el análisis energético confirma que el controlador LQR constituye la alternativa más conveniente para la regulación del proceso térmico, no solo por su buen desempeño dinámico, sino también por su mayor eficiencia en el uso de la energía. El controlador PI puede considerarse una opción intermedia, mientras que el PID presenta el desempeño menos favorable bajo este criterio de evaluación.

4.12 Resultados y discusión de la comparación de los controladores PI y LQR, frente a cambios de set point y perturbaciones en el sistema

Si bien el objetivo del estudio plantea la comparación del desempeño de un controlador PID frente a un controlador LQR, es necesario precisar que el controlador PI implementado en esta investigación constituye un caso particular de la estructura general PID, en el cual la acción derivativa es nula. En este contexto, el empleo del

controlador PI no contradice el cumplimiento del objetivo propuesto, sino que corresponde a una realización específica del controlador PID.

Adicionalmente, la selección de la configuración PI se fundamenta en los resultados obtenidos durante la etapa previa de sintonización y evaluación, en la cual evidenció un desempeño superior respecto a otras configuraciones, caracterizado por una mejor respuesta dinámica, menor error y mayor eficiencia energética. En consecuencia, el análisis comparativo desarrollado en esta sección se centra en dicha configuración, garantizando coherencia metodológica con el objetivo general de la investigación.

4.12.1 Resultados discusión de la comparación de los controladores PI y LQR frente a cambios de set point

En la gráfica 8 se observa la respuesta de los controladores PI y LQR frente a una secuencia de cambios del set point. El ensayo inicia con una referencia fijada en 55 °C, la cual ambos controladores siguen hasta alcanzar un estado estable.

Posteriormente, el set point desciende de forma abrupta hasta 40 °C. En esta transición, el controlador LQR muestra una caída más rápida y estable, mientras que el controlador PI presenta oscilaciones más notorias durante el periodo transitorio.

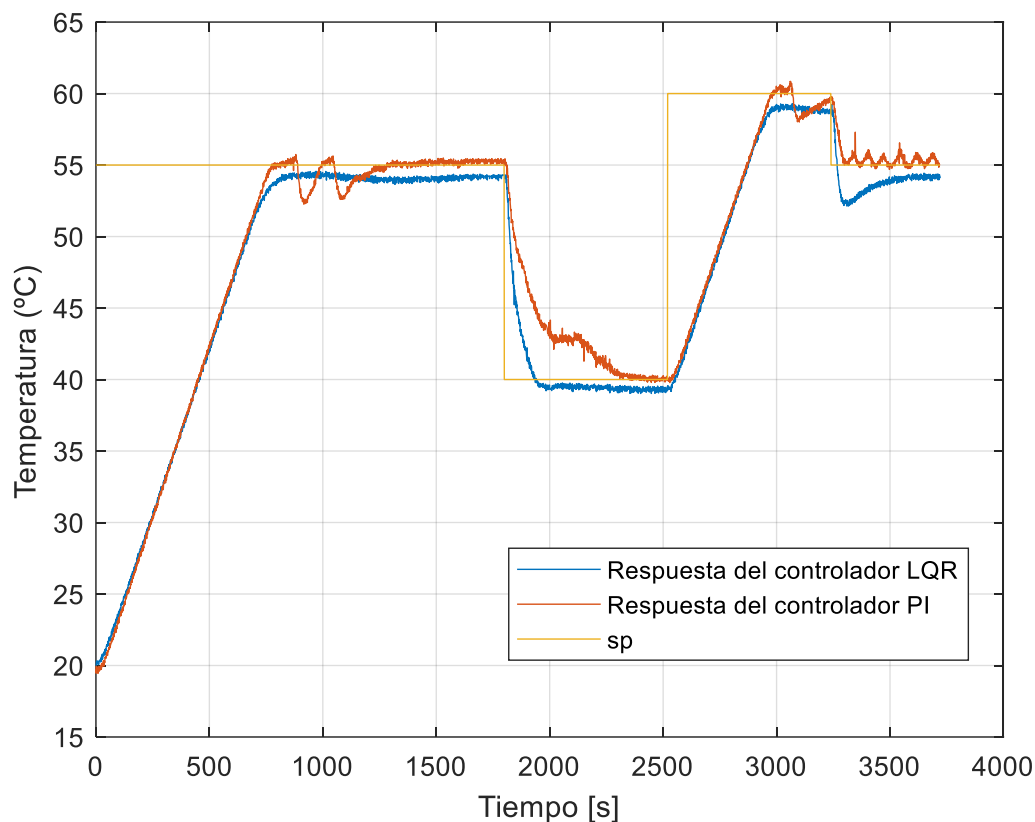
Luego, la referencia vuelve a incrementarse, esta vez hasta 60 °C, y ambos controladores siguen nuevamente el cambio. Sin embargo, el LQR mantiene una respuesta más suave y con menores fluctuaciones en comparación con el PI.

Finalmente, el set point retorna al valor inicial de 55 °C, donde se observan nuevamente diferencias en el comportamiento: el controlador PI presenta variaciones más marcadas en el régimen permanente, mientras que el LQR logra estabilizarse de manera más uniforme.

En conjunto, los resultados muestran que el controlador LQR ofrece un seguimiento más estable y con menor oscilación ante los cambios entre $55\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\rightarrow 60\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 55\text{ }^{\circ}\text{C}$, en comparación con el controlador PI.

Gráfica 8

Cambios de set point



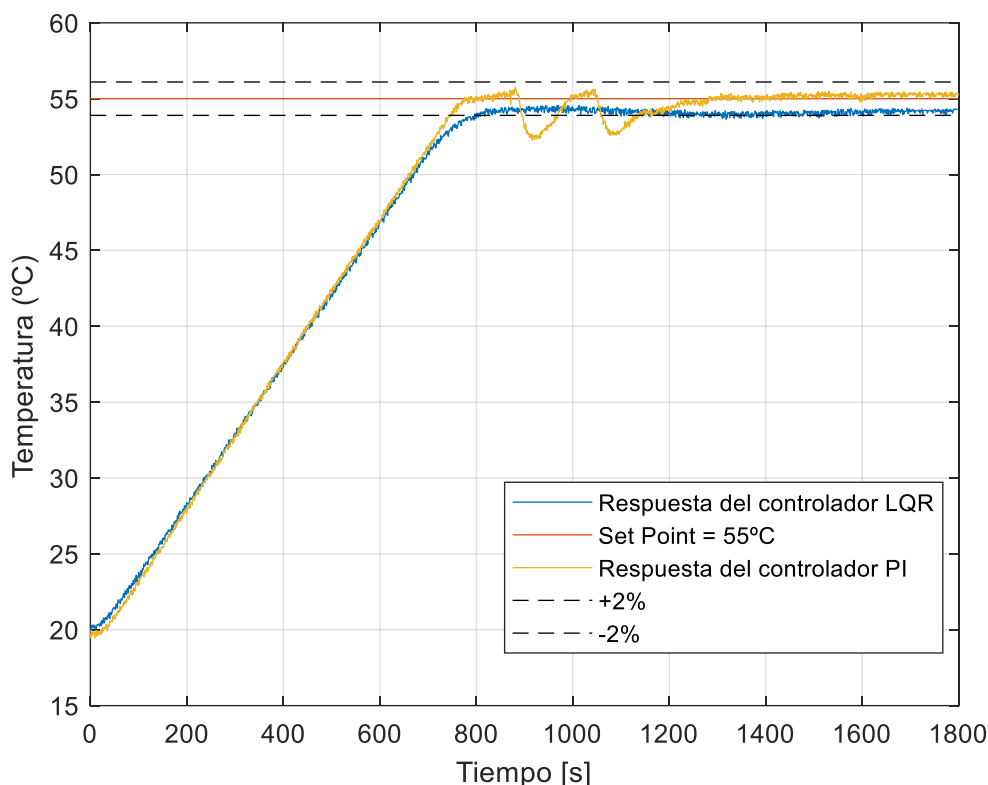
a. Análisis de las características por cada cambio de set point

Inicio $\rightarrow 55^{\circ}\text{C}$

En la gráfica 9 se muestra la respuesta de los controladores PI y LQR ante el primer cambio de set point de $55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ambos controladores siguen el incremento inicial de temperatura a lo largo de la prueba, cuya duración total es de 30 minutos. Sin embargo, al acercarse al valor de referencia, el controlador PI presenta dos oscilaciones visibles antes de estabilizarse, mientras que el controlador LQR alcanza el set point con una respuesta más uniforme, estable y con menor variación en el régimen permanente.

Gráfica 9

Respuesta del controlador PI y LQR para el primer cambio de set point 55°C



El análisis del régimen permanente, en relación con la banda de tolerancia de $\pm 2\%$ alrededor del set point de 55 °C, se encuentra directamente vinculado con el tiempo de asentamiento de cada controlador, tal como se muestra en la tabla 20. El controlador LQR presenta un tiempo de asentamiento de 761.4535 s, considerablemente menor que el del controlador PI (1185.3 s), lo que indica que alcanza condiciones estables con mayor rapidez. Este mejor desempeño se ve respaldado por un menor sobreimpulso (0% frente a 0.9512% del PI) y un valor máximo más cercano al set point (54.5670 °C), evidenciando una respuesta más controlada. Asimismo, aunque ambos controladores presentan tiempos de subida similares (653.6099 s para PI y 645.3555 s para LQR), el LQR reduce significativamente el tiempo transitorio (795.5062 s frente a 1269 s), lo que refleja una mayor eficiencia en la corrección de la dinámica del sistema.

Por otro lado, el controlador PI, debido a su mayor tiempo de asentamiento, tarda más en estabilizarse dentro de la banda de $\pm 2\%$, lo que se traduce en oscilaciones

prolongadas en régimen permanente. Su valor máximo (55.7397 °C) y su comportamiento dinámico más lento explican su tendencia a salir de la banda de tolerancia en varios intervalos. En contraste, el controlador LQR mantiene una respuesta más estable y con menor variabilidad, lo que se refleja en un rango de operación más controlado.

Tabla 20

Características de los métodos sintonizados frente al primer cambio de set point 55°C

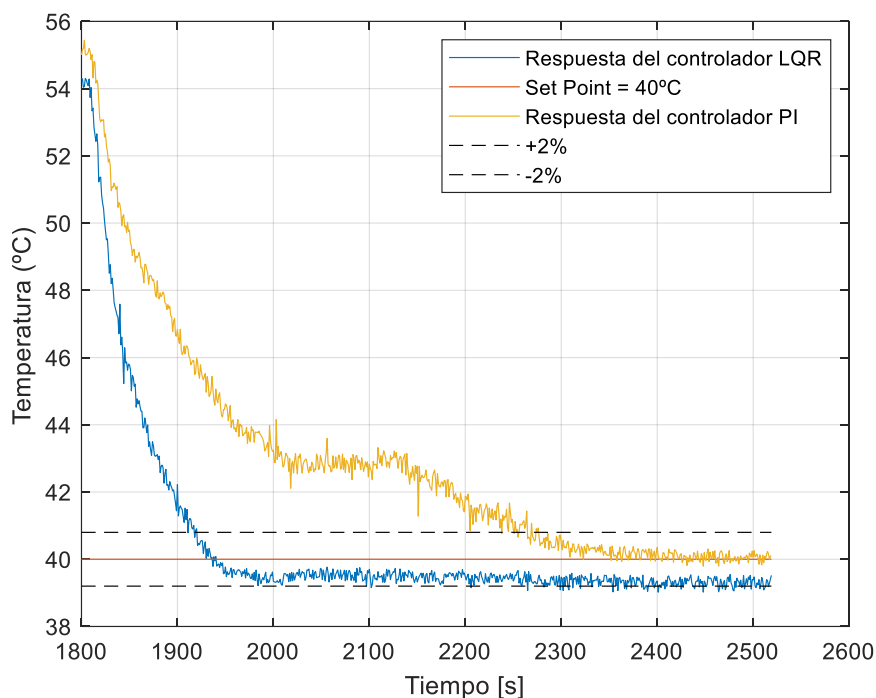
CARACTERÍSTICA	PI	LQR
Tiempo de subida (segundos)	653.6099	645.3555
Tiempo transitorio (segundos)	1269	795.5062
Tiempo de asentamiento (segundos)	1185.3	761.4535
Asentamiento mínimo (°C)	49.5915	48.7794
Asentamiento máximo (°C)	55.7397	54.5670
Sobreimpulso (%)	0.9512	0
Subimpulso (%)	0	0
Pico (°C)	55.7397	-
Tiempo pico (segundos)	881	-

55°C → 40°C

La gráfica 10 se muestra la respuesta de los controladores PI y LQR ante un cambio de set point de 55°C a 40°C, con una duración de 12 minutos, ilustrando una acción de enfriamiento. En esta transición, el controlador LQR demuestra una respuesta superior, presentando un descenso de temperatura muy pronunciado que lo lleva a establecerse en los 40°C en un tiempo transitorio significativamente menor. En contraste, la respuesta del controlador PI es más lenta, con un descenso gradual que le exige un periodo de tiempo mucho mayor, dentro de esos 12 minutos, para aproximarse y estabilizarse en la temperatura objetivo. El LQR ofrece una dinámica de respuesta superior para esta rápida acción de enfriamiento.

Gráfica 10

Respuesta del controlador PI y LQR para el segundo cambio de set point 40°C



El análisis del régimen permanente, en relación con la banda de tolerancia de $\pm 2\%$ alrededor del set point de 40 °C, se encuentra directamente vinculado con el tiempo de asentamiento de cada controlador, tal como se muestra en la Tabla 21 y se observa en la Gráfica 10. El controlador LQR presenta un tiempo de asentamiento de 1933.1 s, menor que el del controlador PI (2276.1 s), lo que indica que alcanza condiciones estables con mayor rapidez. Este comportamiento se ve respaldado por un menor sobreimpulso (37.4128% frente a 38.2638% del PI) y un valor máximo más cercano al set point (54.3054 °C), evidenciando una respuesta más controlada. Asimismo, aunque ambos controladores presentan un tiempo de subida nulo, el LQR muestra una trayectoria descendente más uniforme, mientras que el PI presenta mayor dispersión durante la transición.

Por otro lado, el controlador PI, debido a su mayor tiempo de asentamiento, tarda más en estabilizarse dentro de la banda de $\pm 2\%$, lo que se refleja en oscilaciones más prolongadas en régimen permanente, tal como se aprecia en la Gráfica 10. Su valor

máximo (55.4381 °C) y su comportamiento dinámico más lento explican su tendencia a permanecer fuera de la banda de tolerancia durante intervalos más extensos. En contraste, el controlador LQR ingresa más rápidamente a la banda y mantiene una respuesta más estable y con menor variabilidad, lo que se traduce en un rango de operación más controlado alrededor del set point

Tabla 21

Características de los métodos sintonizados frente al segundo cambio de set point 40°C

CARACTERÍSTICA	PI	LQR
Tiempo de subida (segundos)	0	0
Tiempo transitorio (segundos)	2342.2	2516.4
Tiempo de asentamiento (segundos)	2276.1	1933.1
Asentamiento mínimo (°C)	39.7943	39.0202
Asentamiento máximo (°C)	55.4381	54.3054
Sobreimpulso (%)	38.2638	37.4128
Subimpulso (%)	0	0
Pico (°C)	55.4381	54.3054
Tiempo pico (segundos)	1803	1804

40°C → 60°C

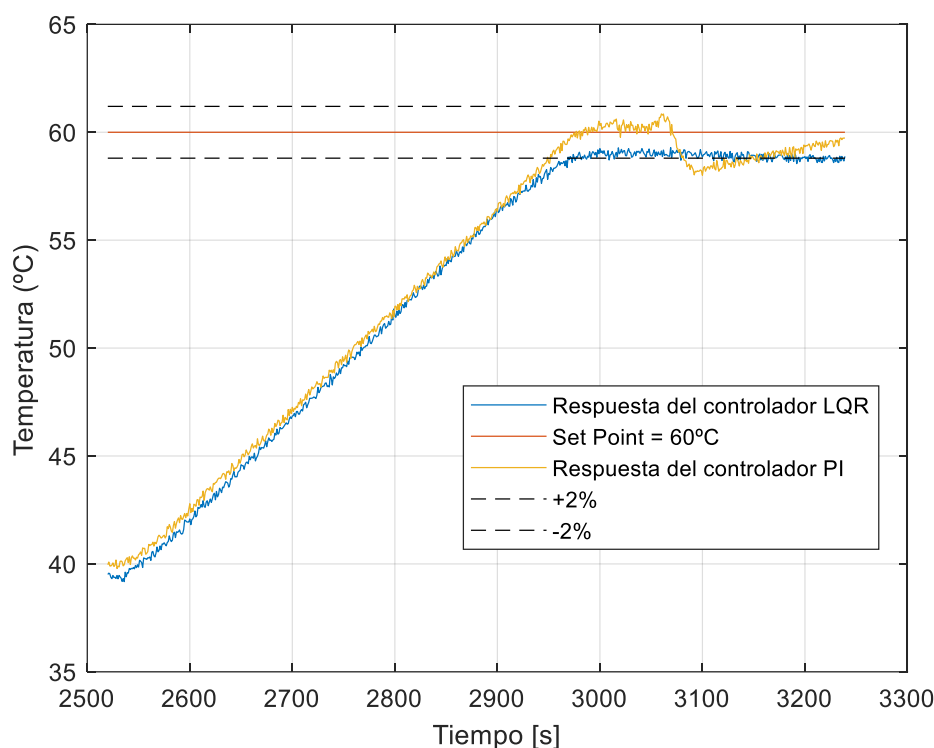
En la gráfica 11 se muestra la respuesta del sistema ante un cambio ascendente del set point de 40 °C a 60 °C, por un tiempo de 12 minutos, asociado a una acción de calentamiento. En la fase transitoria se evidencia un mejor desempeño del controlador LQR, ya que logra alcanzar la referencia de 60 °C sin generar un sobreimpulso apreciable. Esta ausencia de sobreimpulso es especialmente relevante en procesos térmicos, pues evita el riesgo de sobrecalentamiento y reduce el estrés en el sistema, asegurando un comportamiento más estable y predecible en el régimen permanente.

Por el contrario, aunque el controlador PI presenta una velocidad inicial de calentamiento similar, su respuesta muestra una superación del set point, lo que prolonga el tiempo de establecimiento efectivo, ya que el sistema debe corregir el exceso antes de estabilizarse en la referencia. En conjunto, aun cuando ambos

controladores cumplen la tarea de alcanzar los 60 °C, la estrategia LQR, basada en la optimización del comportamiento de los estados, demuestra ofrecer un control más robusto, preciso y eficiente al evitar picos excesivos y reducir las variaciones indeseadas durante la transición.

Gráfica 11

Respuesta del controlador PI y LQR para el tercer cambio de set point 60°C



El análisis del régimen permanente, en relación con la banda de tolerancia de $\pm 2\%$ alrededor del set point de 60 °C, se encuentra directamente vinculado con el tiempo de asentamiento de cada controlador, tal como se muestra en la Tabla 22 y se observa en la Gráfica 11. El controlador LQR presenta un tiempo de asentamiento de 2937.3 s, menor que el del controlador PI (3140.3 s), lo que indica que alcanza condiciones estables con mayor rapidez. Este mejor desempeño se ve respaldado por un menor sobreimpulso (0% frente a 1.8750% del PI) y un valor máximo más cercano al set point (59.2938 °C), evidenciando una respuesta más controlada. Asimismo, el LQR presenta un menor tiempo de subida (304.9220 s frente a 320.9930 s del PI) y un tiempo

transitorio inferior (3098.2 s frente a 3221.2 s), lo que refleja una mayor eficiencia en la dinámica del sistema durante el proceso de calentamiento.

Por otro lado, el controlador PI, debido a su mayor tiempo de asentamiento, tarda más en estabilizarse dentro de la banda de $\pm 2\%$, lo que se refleja en oscilaciones más pronunciadas en régimen permanente, tal como se aprecia en la Gráfica 11. Su valor máximo (60.8525 °C) y su comportamiento más oscilatorio explican su tendencia a salir de la banda de tolerancia en varios intervalos. En contraste, el controlador LQR ingresa más rápidamente a la banda y mantiene una respuesta más estable, con menor variabilidad alrededor del set point, lo que se traduce en un rango de operación más controlado. En conjunto, los resultados de la Tabla 22 confirman que el controlador LQR ofrece un desempeño más preciso, estable y eficiente en comparación con el controlador PI.

Tabla 22

Características de los métodos sintonizados frente al tercer cambio de set point 60°C

CARACTERÍSTICA	PI	LQR
Tiempo de subida (segundos)	320.9930	304.9220
Tiempo transitorio (segundos)	3221.2	3098.2
Tiempo de asentamiento (segundos)	3140.3	2937.3
Asentamiento mínimo (°C)	53.7444	52.7109
Asentamiento máximo (°C)	60.8525	59.2938
Sobreimpulso (%)	1.8750	0
Subimpulso (%)	0	0
Pico (°C)	60.8525	-
Tiempo pico (segundos)	3060	-

60°C → 55°C

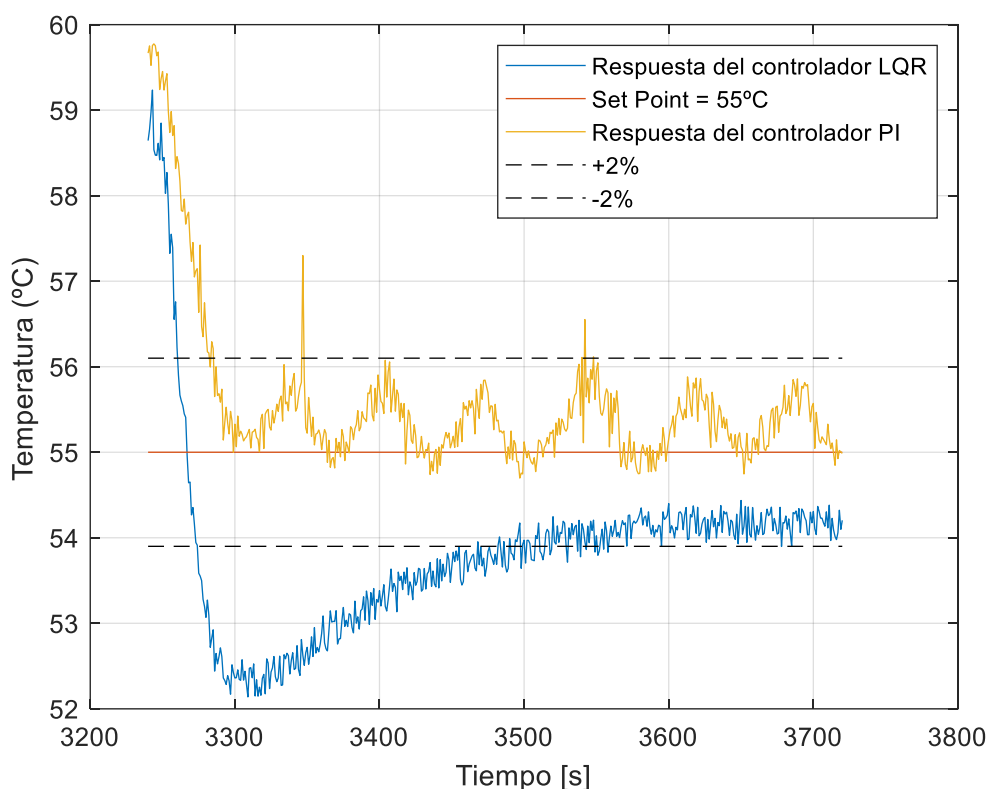
En la gráfica 12 se muestra la respuesta del sistema ante un cambio descendente del set point de 60 °C a 55°C, por un tiempo de 8 minutos, asociado a una acción de enfriamiento. Se muestra que el controlador LQR reduce la temperatura de manera rápida y estable, sin presentar oscilaciones marcadas durante el descenso. Aunque

experimenta un ligero subimpulso, este es corregido con eficiencia, permitiendo que la trayectoria continúe de forma suave hacia el valor deseado. Por el contrario, el controlador PI, después del descenso inicial, comienza a generar oscilaciones persistentes alrededor del set point, lo que indica una menor robustez frente a las no linealidades del sistema térmico y al ruido presente en la señal.

En régimen permanente, el LQR exhibe un comportamiento considerablemente más estable. Su respuesta se mantiene cercana al punto de consigna, con pequeñas variaciones atribuibles principalmente a perturbaciones del proceso, y sin ciclos oscilatorios sostenidos. El PI, en cambio, continúa mostrando oscilaciones que impiden una estabilización adecuada, lo cual implica un mayor esfuerzo del actuador y un control menos eficiente. En conjunto, la comparación evidencia que el controlador LQR proporciona una respuesta más suave, estable y energéticamente eficiente, siendo más adecuado para sistemas térmicos de dinámica lenta y con presencia de ruido

Gráfica 12

Respuesta del controlador PI y LQR para el cuarto cambio de set point 55°C



El análisis del régimen permanente, en relación con la banda de tolerancia de $\pm 2\%$ alrededor del set point de 55 °C, se encuentra directamente vinculado con el tiempo de asentamiento de cada controlador, tal como se muestra en la Tabla 23 y se observa en la Gráfica 12. En este caso, ambos controladores presentan un tiempo de subida nulo, debido a que la temperatura inicial se encuentra cercana al valor de referencia. En cuanto al comportamiento dinámico, el tiempo transitorio es prácticamente el mismo (3716.3 s para el PI y 3719.0 s para el LQR); sin embargo, el controlador LQR presenta un menor tiempo de asentamiento (3397.3 s frente a 3548.1 s del PI), lo que indica que alcanza condiciones estables con mayor rapidez.

Por otro lado, en relación con la banda de $\pm 2\%$, la Gráfica 12 evidencia que el controlador LQR logra ingresar y mantenerse dentro de esta banda en menor tiempo, mostrando una respuesta más estable y con menor variabilidad. En contraste, el

controlador PI presenta oscilaciones persistentes alrededor del set point, lo que provoca que su respuesta salga de la banda de tolerancia en varios intervalos. Aunque el PI presenta un sobreimpulso ligeramente menor (8.7076% frente a 9.2806% del LQR), su mayor dispersión (54.6978 °C a 59.7747 °C) refleja una menor estabilidad en régimen permanente. En conjunto, los resultados confirman que el controlador LQR ofrece un comportamiento más controlado y preciso, cumpliendo de manera más eficiente con el criterio de la banda de tolerancia en comparación con el controlador PI.

Tabla 23

Características de los métodos sintonizados frente al cuarto cambio de set point 55°C

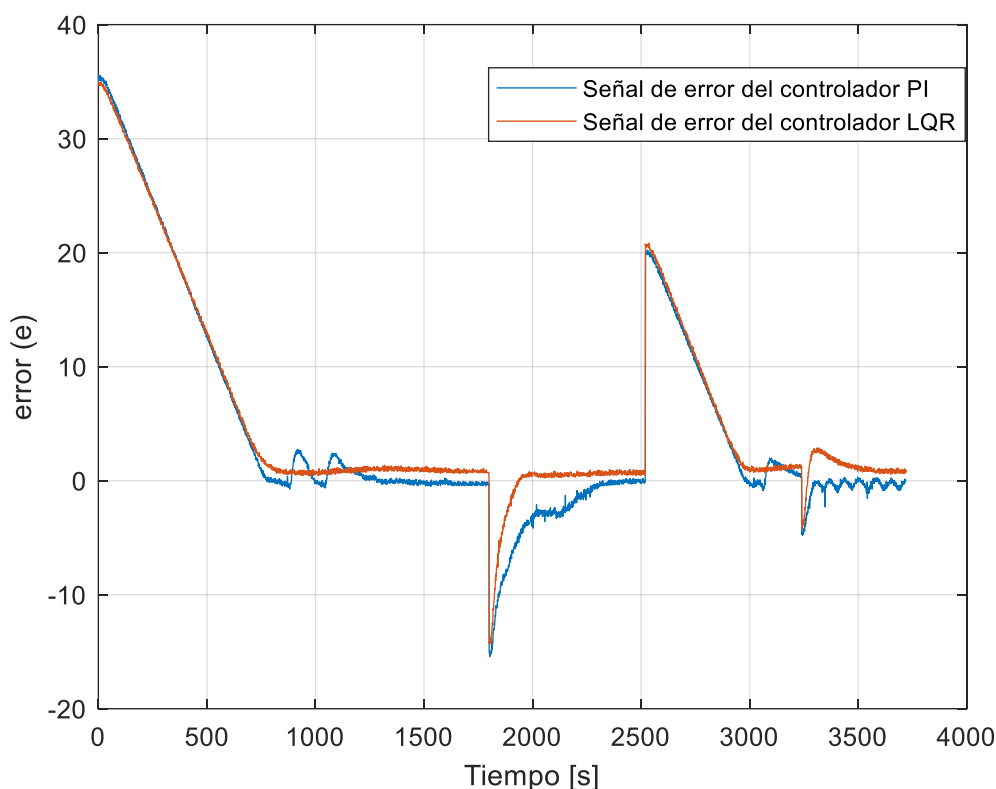
CARACTERÍSTICA	PI	LQR
Tiempo de subida (segundos)	0	0
Tiempo transitorio (segundos)	3716.3	3719.0
Tiempo de asentamiento (segundos)	3548.1	3397.3
Asentamiento mínimo (°C)	54.6978	52.1394
Asentamiento máximo (°C)	59.7747	59.2347
Sobreimpulso (%)	8.7076	9.2806
Subimpulso (%)	0	0
Pico (°C)	59.7747	59.2347
Tiempo pico (segundos)	3244	3243

b. Análisis del error de los controladores PI y LQR frente a cambios de set point

La gráfica 13 muestra la señal de error para los controladores PI y LQR durante distintos cambios de set point. En cada cambio de referencia, el error aumenta o disminuye bruscamente porque la temperatura medida aún no coincide con el nuevo valor deseado. Ambos controladores corrigen este error con el tiempo, pero el LQR lo hace con una señal más estable y menor oscilación, mientras que el PI presenta variaciones más pronunciadas alrededor del cero. Esto evidencia que el LQR maneja los cambios de set point de manera más suave y precisa.

Gráfica 13

Señal de error de los controladores PI y LQR frente a cambios de set point



La tabla 24 presenta los valores del criterio de error para los controladores PI y LQR, evaluados mediante las métricas IAE (Integral del Error Absoluto) e ISE (Integral del Error al Cuadrado). En ambos casos, el controlador LQR obtiene valores ligeramente menores, lo que indica un desempeño más eficiente en la reducción del error a lo largo del tiempo.

El controlador PI registra un IAE de 22078, mientras que el LQR obtiene 22025, reflejando que este último mantiene el error absoluto acumulado marginalmente menor. De manera similar, el ISE para el PI es de 425700, frente a 417580 para el LQR, evidenciando que el LQR penaliza mejor los errores grandes al cuadrado, disminuyendo más eficazmente desviaciones pronunciadas respecto al set point. En conjunto, estos resultados muestran que el LQR presenta un control más preciso y consistente, logrando

minimizar tanto la magnitud como la energía del error en comparación con el controlador PI.

Tabla 24

Criterio de error para los controladores PI y LQR

Criterio de error	PI	LQR
IAE (°C. s)	22078	22025
ISE (°C ² . s)	425700	417580

c. Análisis energético acumulado para los controladores LQR y PI frente a cambios de set point

Controlador PI

- Calor entregado acumulado: 6,551,520.00 J
- Calor útil acumulado: 2,143,462.48 J
- Calor perdido acumulado: 4,408,057.52 J
- Eficiencia PI

$$\eta_{PI} = \frac{Q_{entregado}}{Q_{util}} \times 100 = \frac{2,143,462.48}{6,551,520.00} \times 100 = 37.72\%$$

Controlador LQR

- Calor entregado acumulado: 3,887,070.00 J
- Calor útil acumulado: 2,079,752.13 J
- Calor perdido acumulado: 1,807,317.87 J
- Eficiencia LQR

$$\eta_{LQR} = \frac{Q_{entregado}}{Q_{util}} \times 100 = \frac{2,079,752.13}{3,887,070.00} \times 100 = 53.50\%$$

El análisis energético realizado está directamente relacionado con los cambios de set point, por lo que los valores de calor entregado, útil y perdido reflejan tanto el comportamiento del sistema en régimen transitorio como el esfuerzo de los controladores para alcanzar nuevas referencias.

En este contexto, el controlador PI presenta un mayor calor entregado acumulado, lo que indica un mayor consumo de energía durante las transiciones. Sin embargo, este incremento no se traduce en un mayor calor útil, sino en mayores pérdidas térmicas, evidenciando un aprovechamiento energético limitado.

Por otro lado, el controlador LQR logra un calor útil similar con un menor calor entregado, lo que demuestra un uso más eficiente de la energía. Esto se debe a su naturaleza óptima, que reduce el esfuerzo de control y evita el suministro excesivo de potencia durante los cambios de referencia.

En consecuencia, el LQR presenta una mayor eficiencia energética que el PI, siendo más adecuado para sistemas térmicos con variaciones de set point, donde no solo es importante alcanzar la referencia, sino hacerlo con el menor consumo de energía posible.

En procesos industriales de transferencia de calor con cambios de set point, el controlador PI es adecuado cuando las variaciones son moderadas y no se requiere un seguimiento altamente preciso, siendo una opción práctica por su simplicidad y facilidad de implementación. Sin embargo, puede presentar oscilaciones y mayor sobreimpulso ante cambios bruscos de referencia, lo que afecta la estabilidad y el consumo energético.

Por otro lado, el controlador LQR resulta más conveniente cuando existen cambios frecuentes o abruptos del set point, ya que permite un seguimiento más suave, estable y preciso, reduciendo el sobreimpulso y mejorando el tiempo de asentamiento.

Además, su enfoque óptimo contribuye a un menor esfuerzo de control y mayor eficiencia energética, como se evidenció en los resultados obtenidos.

En consecuencia, para aplicaciones industriales donde los cambios de set point son críticos, el LQR es la opción más robusta y eficiente, mientras que el PI sigue siendo útil en sistemas más simples o con exigencias de control menos estrictas.

4.12.2 Resultados y discusión de la comparación de los controladores PI y LQR frente a perturbaciones del sistema.

a. Condiciones de perturbación

La adición de agua fría al tanque genera una disminución inmediata de la temperatura del sistema, constituyendo una perturbación en el proceso. En el contexto de plantas químicas, este tipo de evento es representativo de variaciones en la temperatura de alimentación, cambios en el caudal de entrada y alteraciones en el balance térmico del sistema. Por lo tanto, la perturbación aplicada en este estudio reproduce de manera adecuada condiciones típicas de operación industrial, permitiendo evaluar la robustez de los controladores frente a este tipo de variaciones.

Tabla 25

Condiciones del agua de perturbación

ITEM	CONDICIONES DEL AGUA DE PERTURBACION	CONTROLADOR	
		PI	LQR
1	Altura de perturbación	4.5 cm	4.6 cm
2	Volumen de perturbación	2.97 L	3.04 L
3	Temperatura del agua	19.1 °C	19.2 °C
4	Tiempo de perturbación	15 seg	11 seg

b. Comportamiento de los controladores frente a perturbaciones del sistema

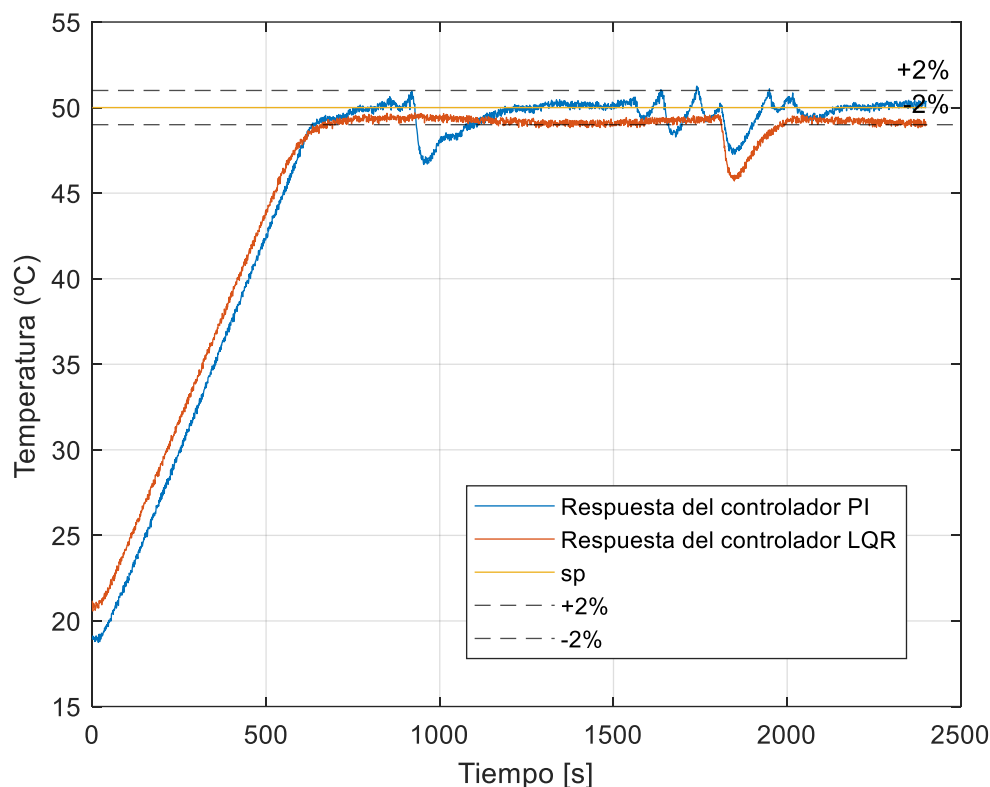
La gráfica 14 muestra la respuesta de los controladores PI y LQR ante un cambio brusco en el proceso, asociado a una perturbación aplicada alrededor de los 1800 segundos, manteniendo un set point de 50 °C. En la etapa inicial, ambos controladores elevan la temperatura desde aproximadamente 20 °C hasta el valor deseado, presentando trayectorias similares y tiempos de ascenso comparables. Una vez alcanzado el set point, el controlador PI evidencia pequeñas oscilaciones alrededor del valor objetivo, mientras que el LQR presenta un comportamiento más suave y estable.

Posteriormente, alrededor de los 1800 segundos, se induce una perturbación mediante la adición de agua fría al tanque. Las condiciones de esta perturbación incluyen una altura aproximada de 4.5–4.6 cm, un volumen entre 2.97 y 3.04 L, una temperatura cercana a 19 °C y un tiempo de ingreso de entre 11 s (LQR) y 15 s (PI), debido a variaciones en la dinámica de descarga. A partir de este instante, la respuesta del sistema es observada hasta aproximadamente los 2400 segundos, con el fin de evaluar con mayor claridad el comportamiento dinámico de recuperación de cada controlador.

Al producirse la perturbación, la temperatura controlada por el PI experimenta una caída más pronunciada y una recuperación con comportamiento oscilatorio. En contraste, el controlador LQR presenta una desviación más controlada y retorna al set point de manera más estable, con menores fluctuaciones. Este comportamiento evidencia una mayor capacidad de amortiguamiento y un mejor rechazo a perturbaciones por parte del LQR, lo que se traduce en un control más robusto y preciso frente a cambios inesperados en el proceso.

Gráfica 14

Respuesta del controlador PI frente a perturbaciones



En la gráfica 15 se observa que, justo después del ingreso del agua fría, ambos controladores experimentan una caída de temperatura. Sin embargo, la magnitud de la desviación difiere entre los dos esquemas de control. El controlador PI desciende hasta aproximadamente 48.5 °C, mientras que el controlador LQR alcanza una caída mayor, llegando a alrededor de 46 °C, lo cual está alineado con el hecho de que la perturbación asociada al ensayo del LQR tuvo un volumen ligeramente mayor (3.04 L) y un tiempo de ingreso más corto (11 s), lo que generó un impacto térmico más brusco.

Tras la caída inicial, el comportamiento de recuperación evidencia diferencias importantes entre ambos controladores. El PI regresa hacia el set point de manera rápida, pero lo hace generando sobreimpulso y oscilaciones significativas, llegando incluso a superar los 51 °C y manteniendo oscilaciones irregulares durante varios cientos de segundos. Este comportamiento indica una recuperación agresiva, pero menos estable, que compromete tanto la precisión como la eficiencia energética del

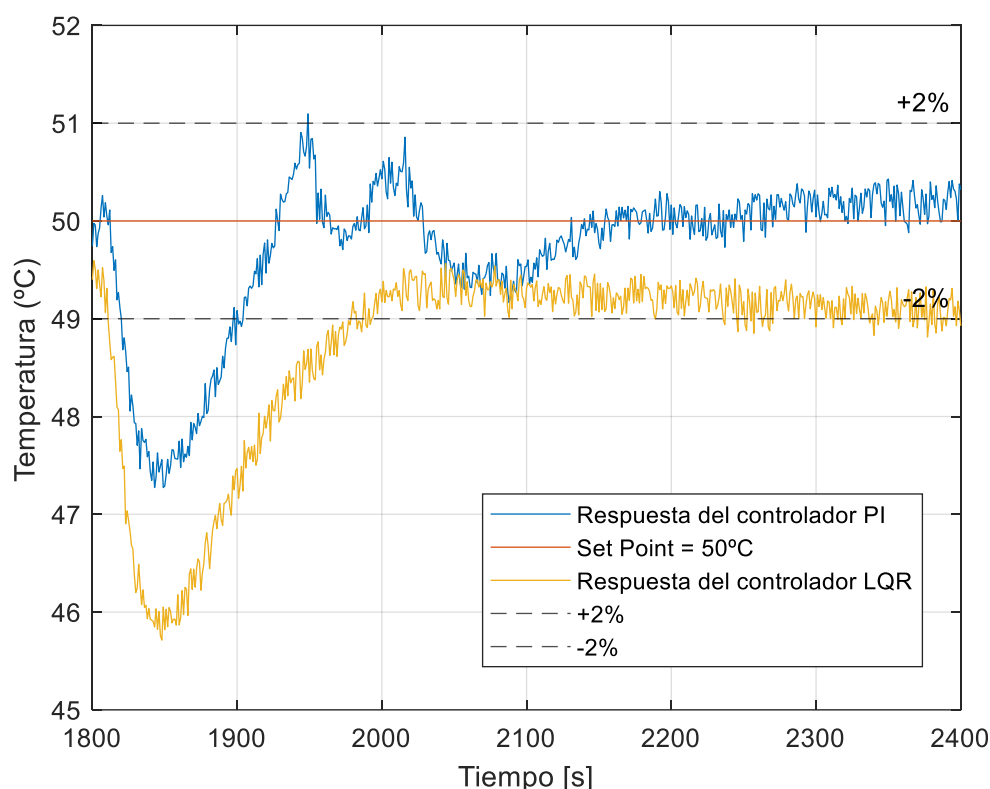
sistema, además de incrementar el estrés del actuador por acciones continuas de corrección.

Por el contrario, el controlador LQR presenta una recuperación más lenta, pero considerablemente más estable y amortiguada. Tras la perturbación, el LQR vuelve a aproximarse suavemente al set point sin generar picos pronunciados y mantiene una respuesta con menor oscilación. Aunque se observa un pequeño error estacionario cercano a $0.8\text{--}1\text{ }^{\circ}\text{C}$, la señal es mucho más estable y uniforme, demostrando una mayor capacidad para rechazar perturbaciones de manera suave y controlada.

El controlador PI ofrece una recuperación más rápida, pero con gran oscilación y sobreimpulso, mientras que el LQR ofrece una recuperación más lenta pero mucho más estable, suave y con menor variabilidad. Esto confirma que el LQR es más adecuado cuando se desea minimizar oscilaciones, mejorar la robustez frente a perturbaciones y reducir el desgaste del actuador. El PI, en cambio, resulta más reactivo, pero menos estable ante perturbaciones de este tipo, especialmente cuando involucran volúmenes de agua fría relativamente altos.

Gráfica 15

Recorte de la respuesta de la temperatura del tanque 1, desde que se inicia la perturbación



Tras el ingreso de agua fría, ambos controladores experimentan una caída de temperatura que la aleja de la banda de tolerancia de $\pm 2\%$ respecto al set point de 50 °C (49–51 °C). Esta desviación inicial es más pronunciada en el controlador LQR, que alcanza aproximadamente 46 °C, mientras que el PI desciende hasta cerca de 48.5 °C, lo cual coincide con los valores de asentamiento mínimo reportados en la Tabla 26 (45.7126 °C para LQR y 47.2735 °C para PI). Esta diferencia se explica por la mayor intensidad de la perturbación aplicada al sistema LQR. No obstante, el análisis no solo depende de la magnitud de la caída, sino también de la capacidad de recuperación. En este sentido, aunque ambos presentan tiempos transitorios prácticamente iguales, como se muestra en la Tabla 26 (2399.6 s para LQR y 2398.7 s para PI), el tiempo de asentamiento del LQR es menor (1929.1 s frente a 2093.1 s del PI), lo que indica que logra estabilizarse más rápidamente tras la perturbación.

Durante la fase de recuperación, las diferencias en el comportamiento dentro de la banda del $\pm 2\%$ se hacen más evidentes. El controlador PI reingresa más rápidamente a la banda, pero presenta oscilaciones que lo llevan a salir repetidamente de ella, lo cual se confirma con su valor máximo de 51.0954 °C, que supera el límite superior de la banda, según la Tabla 26. En contraste, el LQR alcanza un valor máximo de 49.5936 °C, manteniéndose dentro de la banda y evidenciando una respuesta más estable. Este comportamiento también se respalda con su menor sobreimpulso (0 % frente a 1.5383 % del PI) y la ausencia de tiempo pico en el LQR, en contraste con el PI (1949 s), tal como se detalla en la Tabla 26, lo que indica una recuperación más controlada. En conjunto, estos resultados confirman que, aunque el PI presenta una respuesta más rápida, el LQR ofrece un mejor desempeño en términos de permanencia dentro de la banda de $\pm 2\%$, con menor variabilidad y mayor estabilidad frente a perturbaciones.

Tabla 26

Características de los métodos sintonizados frente a perturbaciones

CARACTERÍSTICA	PI	LQR
Tiempo de subida (segundos)	0	0
Tiempo transitorio (segundos)	2398.7	2399.6
Tiempo de asentamiento (segundos)	2093.1	1929.1
Asentamiento mínimo (°C)	47.2735	45.7126
Asentamiento máximo (°C)	51.0954	49.5936
Sobreimpulso (%)	1.5383	0
Subimpulso (%)	0	0
Pico (°C)	51.0954	-
Tiempo pico (segundos)	1949	-

Los resultados obtenidos permiten analizar el desempeño de los controladores en un contexto más cercano a la operación de plantas químicas reales, donde las perturbaciones son inevitables y se manifiestan principalmente como variaciones en el caudal, la temperatura de alimentación y las condiciones de nivel dentro de los equipos.

En este tipo de sistemas, las perturbaciones no solo afectan la variable controlada de manera inmediata, sino que también pueden modificar la dinámica del proceso, generando respuestas no deseadas como oscilaciones, sobreimpulsos o tiempos prolongados de estabilización. Por ello, la robustez del sistema de control adquiere un papel fundamental para garantizar una operación segura, eficiente y continua.

A partir de los resultados experimentales, se observa que el controlador PI, aunque presenta una respuesta rápida, es más sensible a este tipo de variaciones, lo que se traduce en oscilaciones prolongadas y una mayor actividad del actuador. En un entorno industrial, este comportamiento puede generar ineficiencias energéticas, desgaste prematuro de los equipos y posibles desviaciones en la calidad del producto.

Por otro lado, el controlador LQR evidencia una menor sensibilidad ante perturbaciones equivalentes, mostrando una respuesta más amortiguada y estable. Esta característica es especialmente relevante en procesos químicos, donde las variaciones en caudal o temperatura de alimentación ocurren de forma continua y requieren estrategias de control que prioricen la estabilidad y la confiabilidad del sistema.

En este sentido, el mejor desempeño del LQR frente a perturbaciones sugiere una mayor capacidad para adaptarse a condiciones operativas variables, manteniendo el proceso dentro de rangos adecuados sin generar fluctuaciones significativas. Esto lo posiciona como una alternativa más adecuada para aplicaciones industriales donde la robustez frente a perturbaciones es un criterio clave de diseño del sistema de control.

CONCLUSIONES

Como parte fundamental del desarrollo del presente trabajo, se realizó el diagnóstico del Módulo de Control de Temperatura MCT-02, el cual permitió identificar las condiciones iniciales de operación y las limitaciones existentes del sistema, que operaba en modo manual y sin una adecuada regulación automática. Este análisis resultó clave para la recuperación y puesta en funcionamiento del módulo, posibilitando su uso como plataforma experimental para el estudio del proceso térmico. En este contexto, se comprendió la dinámica del sistema, caracterizada por una respuesta lenta y por la influencia de los fenómenos de transferencia de calor, lo cual constituyó la base para la posterior implementación y evaluación de las estrategias de control.

Los datos experimentales obtenidos del proceso de calentamiento del tanque 1 permitieron identificar un comportamiento térmico claramente lineal antes del punto de ebullición, lo que hizo posible aplicar de manera efectiva la técnica de identificación de sistemas. A partir de estos registros, procesados en MATLAB y analizados mediante la *App System Identification*, se determinó que la dinámica del proceso se representa mediante un modelo integrador con tiempo muerto (P0DI). El modelo identificado, expresado como $G(s) = \frac{K}{s} e^{-\theta s}$ con parámetros $K=0.048673$ K y $\theta = 30$ s, alcanzó un ajuste del 98.88 %, lo que confirma su capacidad para reproducir con precisión la respuesta térmica observada.

Se sintonizó los controladores PI y PID mediante el método de Ziegler–Nichols, a partir de la ganancia última ($K_{cu} = 1.076$) y el periodo último ($P_u = 119.790$ s), obteniendo parámetros adecuados para su implementación. La evaluación experimental a un set point de 50 °C permitió analizar el comportamiento dinámico de ambos controladores, evidenciándose que el controlador PI presenta una respuesta más estable

y con menor nivel de oscilaciones en comparación con el controlador PID, el cual mostró una mayor tendencia a la oscilación y un comportamiento menos amortiguado.

Se diseñó, sintonizó e implementó el controlador óptimo LQR a partir de un modelo equivalente sin retardo mediante la aproximación de Padé y su representación en espacio de estados. La selección adecuada de las matrices de ponderación Q y R permitió obtener un equilibrio entre estabilidad y esfuerzo de control. Los resultados experimentales evidenciaron que el controlador LQR conduce el sistema al set point de 50 °C con una respuesta estable, sin sobreimpulsos significativos y con buen comportamiento en régimen permanente.

A partir de la evaluación integral de los controladores PI, PID y LQR, considerando indicadores dinámicos, criterios de error (IAE e ISE) y análisis energético, se determinó que el controlador LQR presenta el mejor desempeño global, destacando por su mayor estabilidad, menor error acumulado, menor sobreimpulso y mayor eficiencia energética. El controlador PI mostró un comportamiento aceptable, con buen desempeño en régimen transitorio, aunque con mayores pérdidas energéticas. Por su parte, el controlador PID evidenció el desempeño más limitado, con mayores oscilaciones, mayor error acumulado y menor eficiencia. En consecuencia, el controlador LQR se posiciona como la estrategia más adecuada para el control del sistema térmico.

La comparación global del desempeño de los controladores PI y LQR frente a una secuencia de cambios de set point y perturbaciones térmicas demuestra que, aunque ambos esquemas son capaces de llevar el sistema hacia la referencia, el controlador LQR ofrece un comportamiento significativamente más estable, suave y robusto. En los cuatro cambios de set point analizados, el LQR presenta menores tiempos de asentamiento, menores sobreimpulsos y una reducción notable de las oscilaciones en el

régimen permanente, mientras que el PI tiende a generar fluctuaciones persistentes y respuestas más agresivas, especialmente en los cambios descendentes y cercanos al valor de operación. Asimismo, los criterios de error IAE e ISE confirman un mejor desempeño del LQR, al mostrar errores acumulados ligeramente menores y el análisis energético confirmó un menor calor entregado y menores pérdidas térmicas, lo que demuestra un uso más eficiente de la energía

Ante perturbaciones externas, el LQR evidencia una mayor capacidad de amortiguación y rechazo, recuperándose de forma más estable y con menor variabilidad que el PI, incluso cuando la perturbación aplicada fue más severa. El PI, si bien reacciona con mayor rapidez, presenta sobreimpulsos, oscilaciones prolongadas y un mayor esfuerzo de control. En conjunto, los resultados experimentales demuestran que el controlador LQR proporciona un control más robusto, preciso y eficiente frente a variaciones rápidas del set point y perturbaciones del proceso térmico, constituyendo una alternativa superior al controlador PI para este tipo de sistemas con dinámica lenta y sensibilidad a las oscilaciones.

RECOMENDACIONES

- Implementar un regulador de caudal en la válvula manual de perturbación BA-1, con el fin de asegurar un flujo constante y controlado durante las pruebas experimentales, evitando variaciones no deseadas que afecten la respuesta del sistema térmico.
- Incorporar un mecanismo automático para el encendido y apagado del agitador dentro de la rutina de control, garantizando una adecuada homogenización de la temperatura y evitando gradientes térmicos que puedan alterar las mediciones y la precisión del modelo.
- Realizar experimentos adicionales bajo distintas condiciones operativas, tales como variaciones de temperatura, caudal y perturbaciones externas, con el fin de evaluar la robustez de los controladores PI, PID y LQR frente a incertidumbres propias del proceso térmico.
- Considerar la integración de sensores adicionales o de mayor precisión para mejorar la observabilidad del sistema y fortalecer el desempeño del observador discreto utilizado en el diseño del LQR.
- Implementar un registro continuo de datos experimentales de alta resolución, que permita analizar con mayor detalle la respuesta dinámica del sistema y optimizar las etapas de sintonización y validación de los controladores.
- Integrar un controlador LQG (Linear Quadratic Gaussian) como alternativa avanzada de control, combinando el LQR con un filtro de Kalman para mejorar la estimación de estados y el rechazo de perturbaciones en presencia de ruido de medición.
- Se recomienda el uso de controladores PID en procesos de transferencia de calor donde se prioricen la simplicidad de implementación, bajo costo y facilidad de

sintonización, especialmente en sistemas con condiciones de operación estables y baja exigencia dinámica, donde no se requiera un alto nivel de precisión ni eficiencia energética.

- Se recomienda el uso del controlador LQR en sistemas térmicos que demanden alta precisión, rápida respuesta, menor sobreimpulso y mayor eficiencia energética, particularmente en procesos industriales con cambios frecuentes de set point o presencia de perturbaciones, donde se requiera mayor robustez y optimización del desempeño del sistema.

REFERENCIAS

- Álvarez, J. G., Armero, J. M., & Urrutia, C. A. (20 de Junio de 2020). Control de temperatura en intercambiadores de calor tipo coraza-tubo: una revisión realizada a la industria. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 41-49.
- Anderson, B. D., & Moore, J. B. (1989). *Optimal Control: Linear Quadratic Methods*. United States: Prentice-Hall.
- Arnáez Braschi, E. (2014). *Enfoque práctico del control moderno con aplicaciones Matlab*. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas S. A. C.
- Åström, K. J., & Häggglund, T. (2009). *Control PID avanzado*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Brian, W. (2014). Principles of Modern Grinding Technology . *ScienceDirect*, 2, 241-262. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-24271-4.00012-9>
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA. Fundamentos y aplicaciones* (4 ed.). McGraw-Hill.
- Delatore, F., Novazzi, L. F., Leonardi, F., & da Cruz, J. J. (2016). MULTIVARIABLE OPTIMAL CONTROL OF A HEAT EXCHANGER NETWORK WITH BYPASSES. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 33(1), 133-143.
- Dwivedi, V. (2009). *Thermal Modelling and Control of Domestic Hot Water Tank*. Indian Institute of Technology.
- Energy Perú. (2017). *Manual del Módulo de Temperatura MOD. MCT-02*. Perú: Energy Perú.
- ENERGY SOLUTIONS PERU. (2017). *Manual de Practicas* . Peru: ENERGY SOLUTIONS PERU.

- Essahafi, M., & Ait Lafkih, M. (5 de Junio de 2014). Evaluation Performance of PID, LQR, Pole Placement Controllers for Heat Exchanger. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 8(6).
- Estrada Obregón, F. G. (2017). Identificación del modelo de planta para el diseño de un sistema de control en lazo cerrado de un intercambiador de calor. [Tesis de Grado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/7821>
- IndiaMART. (2006). *Acerca de nosotros: IndiaMART*. Obtenido de IndiaMART Web site: <https://www.indiamart.com/proddetail/danfoss-modulating-actuator-ame435-22471538373.html>
- Kesavan, E., Divya, N., Gowthaman, N., & Manoharan, S. (25 de Abril de 2018). Parametric Optimization and Control of Heat Exchanger using Linear Quadratic Controller and Dynamic Matrix Controller. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(2.24), 578-581.
- LabVIEW. (02 de Agosto de 2023). Recuperado el 25 de Julio de 2025, de Wwww.ni.com: <https://www.ni.com/es/support/downloads/software-products/download.labview.html?srsId=AfmBOooA3laYX4ZheKjmLL5YWi2EZoIAmyZKlW1KCslpQ2naNjb343FO#559067>
- Maquilón Falconí, F. A., Sandoya Villafuerte, J. W., & Reyes Bacardí, A. (2019). Diseño e implementación de un sistema de control avanzado para regular la temperatura y velocidad de un túnel de viento. [Tesis de Maestría, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio EPSOL. Guayaquil. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/52571>

- Microsoft.com. (s.f.). *Tareas básicas en Excel*. Recuperado el 14 de Agosto de 2025, de <https://support.microsoft.com/es-es/office/tareas-b%C3%A1sicas-en-excel-dc775dd1-fa52-430f-9c3c-d998d1735fca>
- Mohammadi Asl, R., Mahdoudi, A., Pourabdollah, E., & Klančar, G. (1 de Julio de 2019). Combined PID and LQR controller using optimized fuzzy rules. *Soft Computing*, 23(13), 5143-5155.
- Ogata, K., & Dormido, S. (2010). *Ingeniería de control moderna 5 ed.* (S. Dormido, Trad.) Pearson Educación.
- Oravec, J., Bakosova, M., Trafczynski, M., Vasickaninová, A., Mészáros, A., & Markowski, M. (2018). Robust model predictive control and PID control of shell-and-tube heat exchangers. *Elsevier Ltd*, 159(8), 1-10. Obtenido de <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201800275957>
- Pinares, G. (2021). *Control de procesos con Labview*. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Rasmuson, A., Andersson, B., Olsson, L., & Andersson, R. (2014). *Mathematical Modelling in Chemical Engineering*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rawat, D., Bansal, K., & Pandey, A. K. (2017). LQR and PID design technique for an electric furnace temperature control system. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 479, 561-567.
- Salas Camacho, F. A. (2017). Sistema de control en un intercambiador de calor de doble tubo. [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Obtenido de <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/2714>
- Simons, S. J. (2007). *Concepts of Chemical Engineering 4 Chemists*. Royal Society of Chemistry.

- Smith, C. A., & Corripio, A. B. (2014). *Control automático de procesos: teoría y práctica* (2 ed.). Limusa.
- Smith, J., Abbott, H. C., & M., M. (2007). *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*. Mexico: McGraw-Hill Interamericana.
- Sohrab, R. (2017). *Coulson and Richardson's Chemical Engineering: Volume 3B: Process Control*. (R. Sohrab, Ed.) Elsevier Science.
- Spitzer, D. W. (2009). *Advanced Regulatory Control: Applications and Techniques*. Momentum Press.
- The MathWorks, Inc. (s.f.). *Centro de ayuda de MatLAB*. Recuperado el 8 de Junio de 2025, de <https://la.mathworks.com/help/control/ref/dynamicsystem.stepinfo.html>
- Willis, M. J., & Tham, M. T. (1994). *Advanced Process Control*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Zertifiziertes QM-System. (1 de 5 de 2024). *Acerca de nosotros: Zertifiziertes QM-System*. Obtenido de Zertifiziertes QM-System Web site: <https://www.kobold.com/uploads/files/drg-es-caudal.pdf>

APENDICE

Apéndice 1: Código para importar los datos de Excel a Matlab, del proceso de calentamiento

```

Editor - C:\Users\HP\Documents\MATLAB\MCT\Identificacion.m
Identificacion.m  LQR.m  pade1.m  pis.m  +
1  clc; close all; clearvars;
2  %% Importar datos de calentamiento
3  load ('Datos_calentamiento.mat') %Cargar datos
4  tiempo = t ; %variable de tiempo
5  y = Td; % Variable de Temperatura tanque 1
6  u = Q; % Variable de resistencia
7
8  figure
9  subplot(211)
10 plot(tiempo,u,'-r','LineWidth',1.5);
11 grid on; xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Resistencia(valor normalizado)');
12
13 subplot(212)
14 plot(tiempo,y)
15 grid on; xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Temperatura [°C]');
16 axis([0 inf 0 55])
17 legend('Tk1')
18

```

Apéndice 2: Obtener las características de la respuesta del controlador PID y PI, y el error

```

Editor - C:\Users\covi1\Desktop\DATOS DE SIMULACION\SIMULACION 50\CODIGO50.m
CODIGO50.m  untitled  +
1  %% Obtener características del modelo PID
2  load PID.mat;
3  time7=tiempo7;
4  ys17=TK17;
5  U7=SP7;
6  plot(time7,ys17,time7,U7); hold on;
7  stepinfo(ys17,time7)
8
9  %% obtener características del modelo PI
10 load PI.mat;
11 time1=tiempo1;
12 ys11=TK11;
13 U1=SP1;
14 plot(time1,ys11,time1,U1); hold on;
15 plot(time7,ys17,time7,U7);
16 xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Temperatura [°C]');
17 legend('Respuesta del controlador PI','Respuesta del controlador PID');
18 stepinfo(ys11,time1)
19
20 %% ERROR DE LA RESPUESTA DEL CONTROLADOR PID
21 error7=(50-ys17);
22 IEpid= sum(error7.^2);
23 IAEpid = sum(abs(error7));
24
25 %% ERROR DE LA RESPUESTA DEL CONTROLADOR PI
26 error1=(50-ys11);
27 IEpi= sum(error1.^2);
28 IAEpi = sum(abs(error1));
29 plot(time1,error1); hold on;
30 plot(time7,error7);
31 grid on;
32 xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Error (e)');
33 legend('Señal de error del controlador PI','Señal de error del controlador PID');

```

Apéndice 3: Discretización de las matrices A, B, C y D

```

Editor - C:\Users\covi1\Desktop\DATOS DE SIMULACION\SIMULACION 50\CODIGO LQR OBS.m
CODIGO50.m  CODIGO LQR OBS.m  CODIGO LQR.m  +
1
2  %% 1) Planta continua
3  A = [0 1;
4      0 -0.06667];
5  B = [0;
6      1];
7  C = [0.003245 -0.048673]; % salida = temperatura
8  D = 0;
9
10 %% 2) Discretización
11 Ts = 1.0; % periodo de muestreo
12 sysc = ss(A,B,C,D);
13 sysd = c2d(sysc, Ts, 'zoh');
14 Ad = sysd.A; Bd = sysd.B; Cd = sysd.C; Dd = sysd.D;
15

```

Apéndice 4: Ganancia del controlador LQR discreto y Determinación de las matrices Q y R mediante simulación en Matlab

```

Editor - C:\Users\covi1\Desktop\DATOS DE SIMULACION\SIMULACION 50\CODIGO LQR OBS.m
CODIGO50.m CODIGO LQR OBS.m CODIGO LQR.m +
16 %% 3) LQR discreto
17 Q = [1 0; 0 100];
18 R = 1;
19 K = dlqr(Ad, Bd, Q, R);
20

```

Apéndice 5: Normalización de la referencia (Nbar)

```

Editor - C:\Users\covi1\Desktop\DATOS DE SIMULACION\SIMULACION 50\CODIGO LQR OBS.m
CODIGO50.m CODIGO LQR OBS.m CODIGO LQR.m +
21 %% 4) Normalización de referencia (Nbar)
22 Ac1 = Ad - Bd*K;
23 Nbar = 1 / (Cd * ((eye(size(Ac1)) - Ac1) \ Bd));
24

```

Apéndice 6: Observador discreto

```

Editor - C:\Users\covi1\Desktop\DATOS DE SIMULACION\SIMULACION 50\CODIGO LQR OBS.m
CODIGO50.m CODIGO LQR OBS.m CODIGO LQR.m +
25 %% 5) Observador discreto
26 poles_obs = [0.8 0.9]; % polos dentro del círculo unitario
27 L = place(Ad', Cd', poles_obs)';
28

```

Apéndice 7: Simulación del controlador LQR discreto

```

Editor - C:\Users\covi1\Desktop\DATOS DE SIMULACION\SIMULACION 50\CODIGO LQR OBS.m
CODIGO50.m CODIGO LQR OBS.m CODIGO LQR.m +
29 %% 6) Simulación con referencia constante de 50 °C
30 Nsim = 200;
31 r = 50 * ones(Nsim,1);
32 x = [0;0]; % estado real
33 xhat = [0;0]; % estado estimado
34 u = 0;
35 Y = zeros(Nsim,1);
36 Yhat = zeros(Nsim,1);
37 U = zeros(Nsim,1);
38 for k = 1:Nsim
39     % 1) Salida real
40     y = Cd*x + Dd*u;
41     % 2) Control usando estados estimados
42     u = Nbar*r(k) - K*xhat;
43     % 3) Evolución real de la planta
44     x = Ad*x + Bd*u;
45     % 4) Observador (corrige con error de salida)
46     yhat = Cd*xhat + Dd*u;
47     xhat = Ad*xhat + Bd*u + L*(y - yhat);
48     % 5) Guardar datos
49     Y(k) = y;
50     Yhat(k) = yhat;
51     U(k) = u;
52 end
53 %% 7) Gráficas
54 t = (0:Nsim-1)*Ts;
55 figure('Name','LQR+Nbar con Observador (Setpoint 50°C)','Color','w');
56 subplot(3,1,1);
57 plot(t, Y, 'b', 'LineWidth', 1.5); hold on;
58 plot(t, r, 'r--', 'LineWidth', 1.5);
59 grid on; xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Temperatura [°C]');
60 legend('Salida','Referencia'); title('Seguimiento de referencia 50 °C');
61
62 subplot(3,1,2);
63 plot(t, Yhat, 'g', 'LineWidth', 1.5);
64 grid on; xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Temp. estimada [°C]');
65 legend('Salida estimada'); title('Observador');
66
67 subplot(3,1,3);
68 plot(t, U, 'm', 'LineWidth', 1.5);
69 grid on; xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Control u');
70 legend('Acción de control'); title('Señal de control');

```

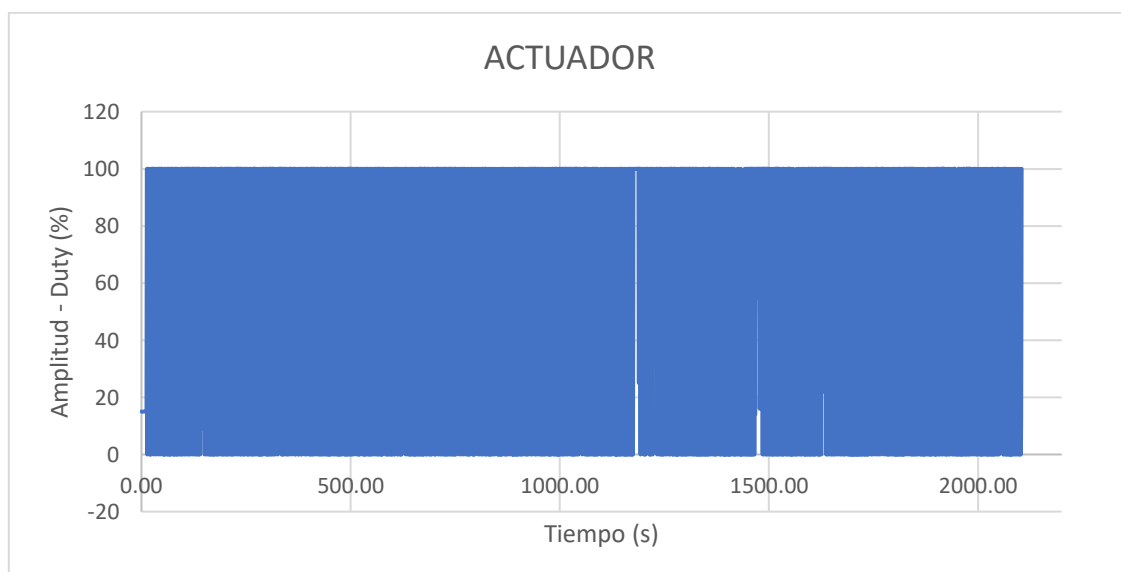
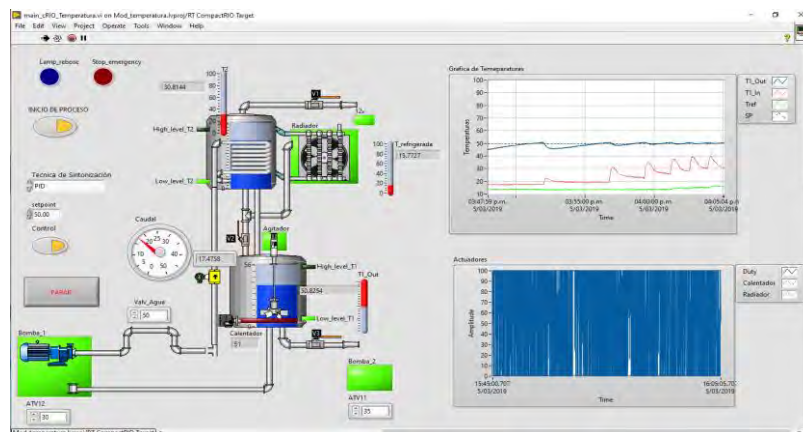
Apéndice 8: Código para el análisis del desempeño del controlador LQR

```

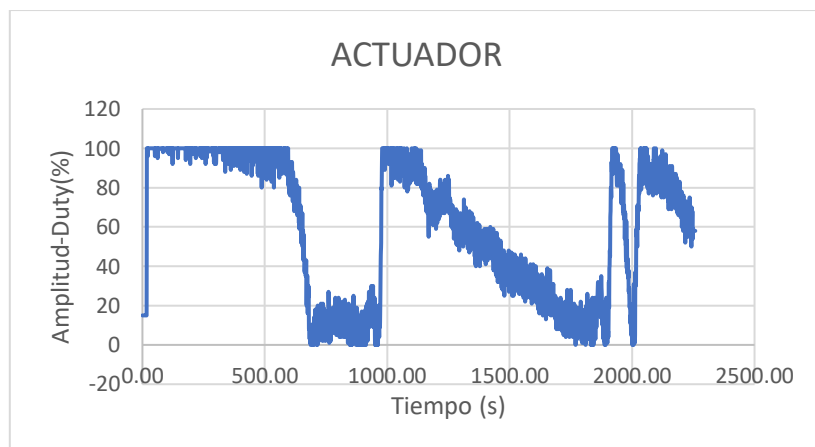
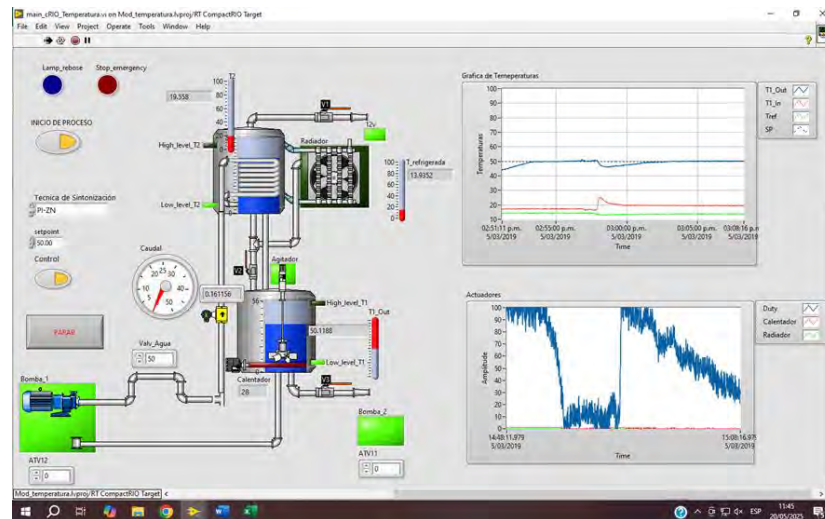
Editor - C:\Users\cov1\Desktop\DATOS DE SIMULACION\SIMULACION 50\CODIGO50.m
CODIGO LQR.m
42 %% Obtener características del modelo LQR-3
43 load LQR-3.mat;
44 time11=Tiempol1;
45 ysall1=TK111;
46 U11=SP11;
47 plot(time11,ysall1,time11,U11,time11,Y); hold on;
48 %plot(time1,ysall1,time1,U1);
49 stepinfo(ysall1,time11)
50 xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Temperatura [°C]');
51 ylim([15 53]);
52 legend('Respuesta del controlador LQR','SP=50°C');
53
54
55
56 %% ERROR DE LA RESPUESTA DEL CONTROLADOR LQR
57 error4=(50-ysall4);
58 ISElqr= sum(error4.^2);
59 IAElqr= sum(abs(error4));
60 plot(time4,error1); hold on;
61 plot(time4,error4);
62 grid on;
63 xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Error (e)');
64 legend('Señal de error del controlador PI','Señal de error del controlador LQR');

```

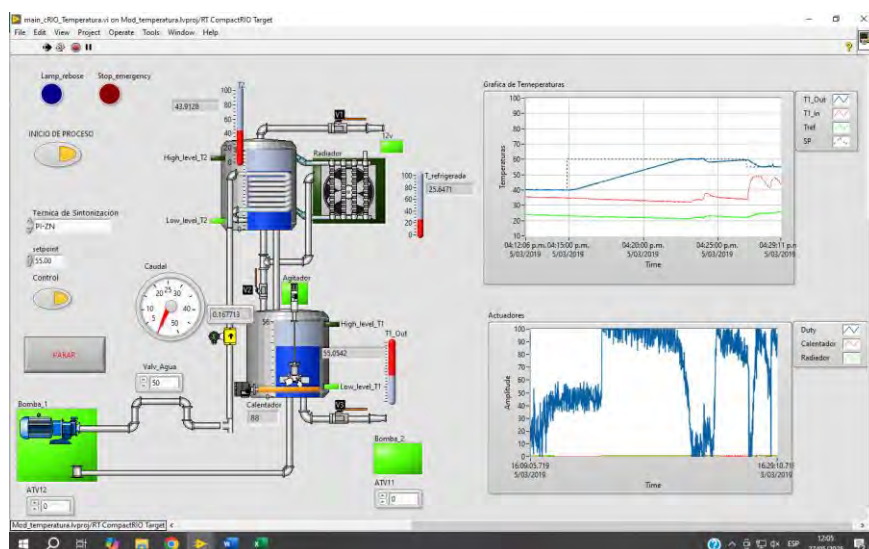
Apéndice 9: Panel Frontal de la Prueba del controlador PID para un set point de 50°C y gráfica del actuador.

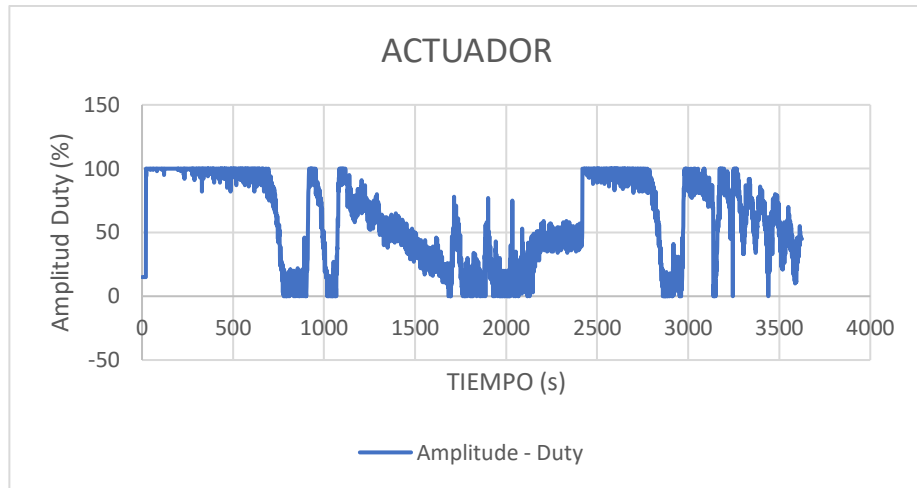


Apéndice 10: *Panel Frontal de la Prueba del controlador PI para un set point de 50°C y gráfica del actuador.*

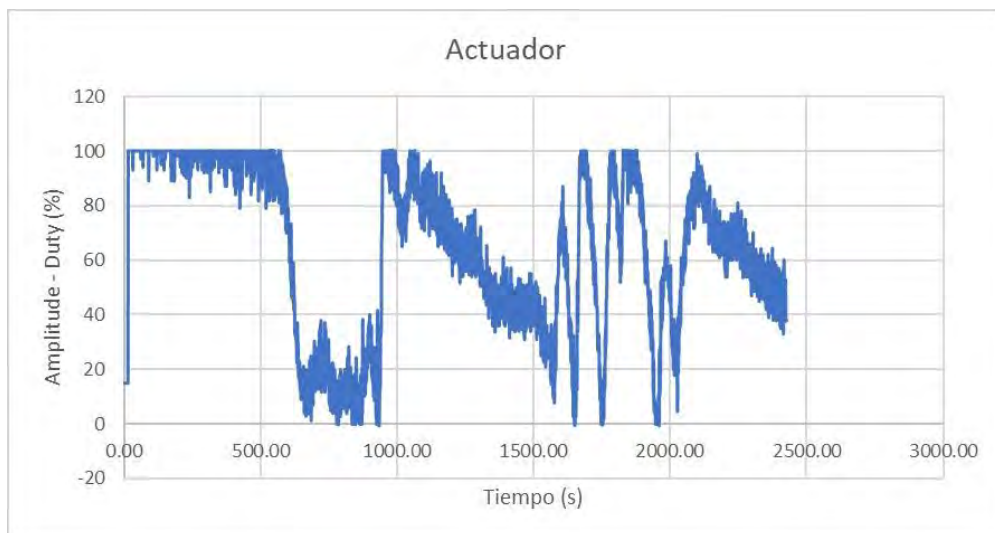
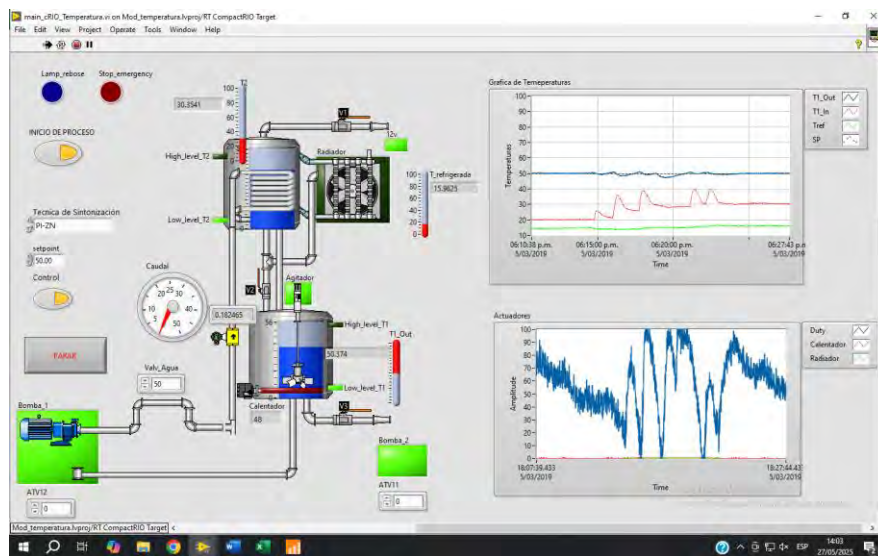


Apéndice 11: *Panel Frontal de la Prueba del controlador PI frente a cambios de set point y grafica del actuador*

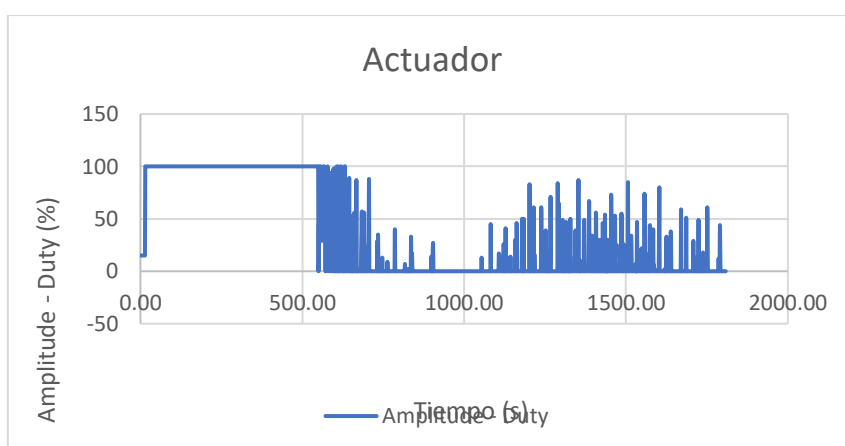
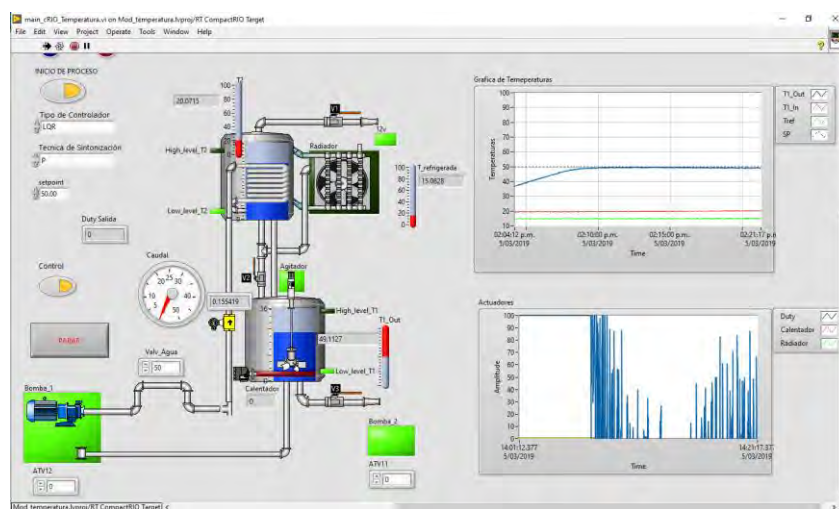




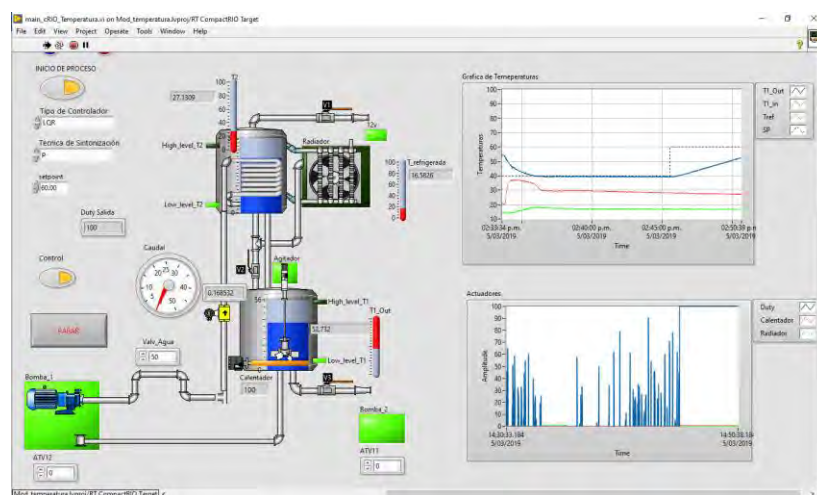
Apéndice 12: *Panel frontal de la Prueba del controlador PI frente a perturbaciones y grafica del actuador*

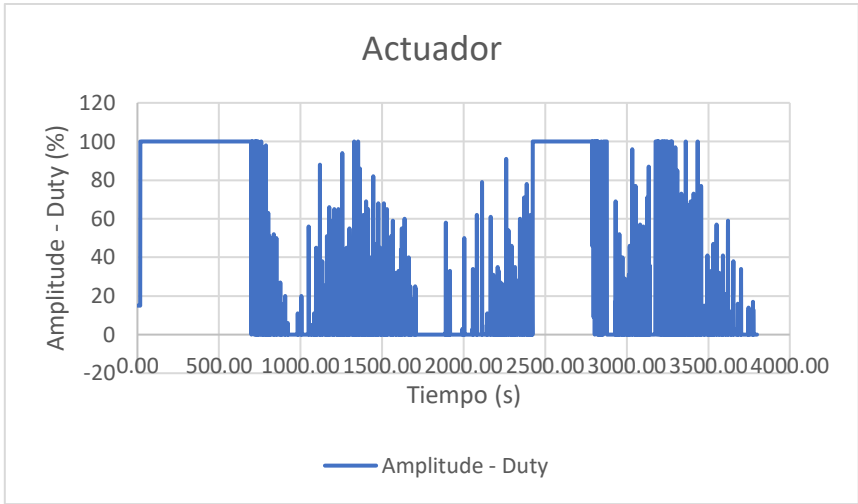


Apéndice 13: Panel Frontal de la Prueba del controlador LQR para un set point de 50°C y gráfica del actuador.

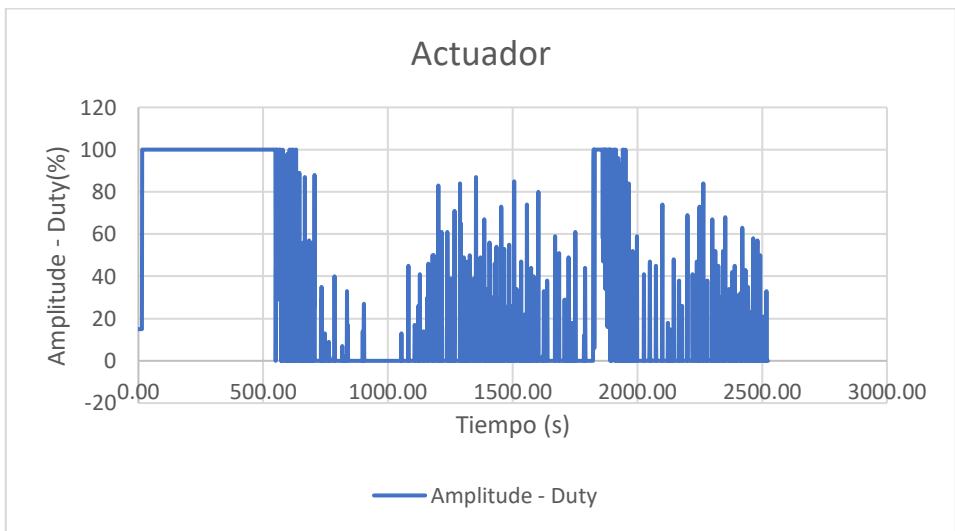
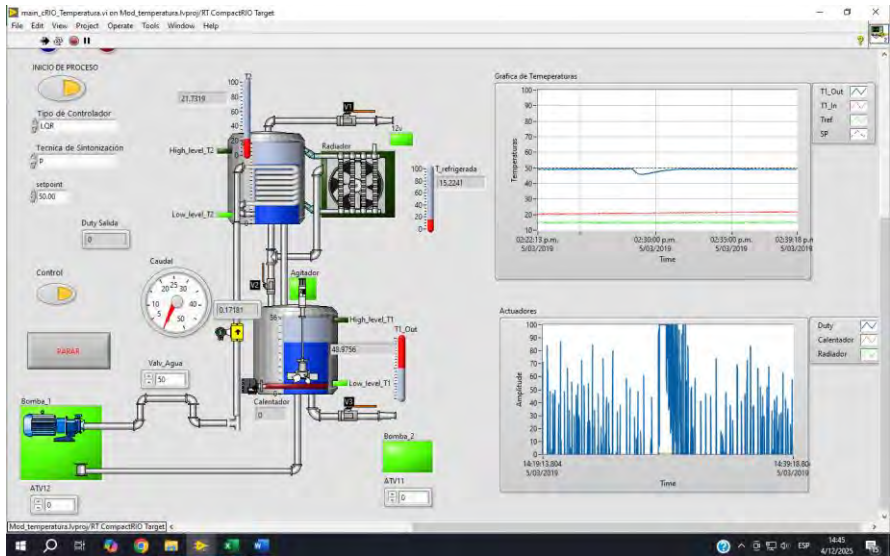


Apéndice 14: Panel Frontal de la Prueba del controlador PI frente a cambios de set point y grafica del actuador



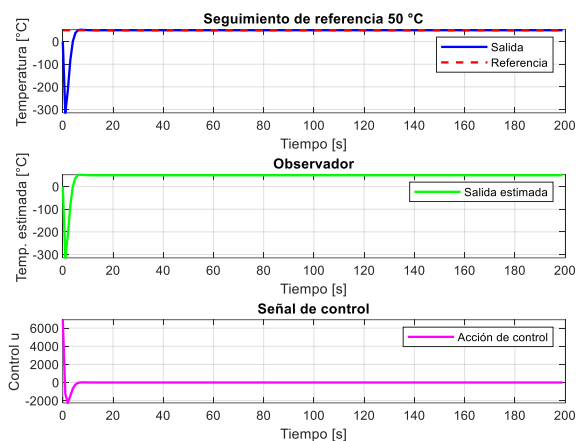


Apéndice 15: *Panel frontal de la Prueba del controlador PI frente a perturbaciones y grafica del actuador*

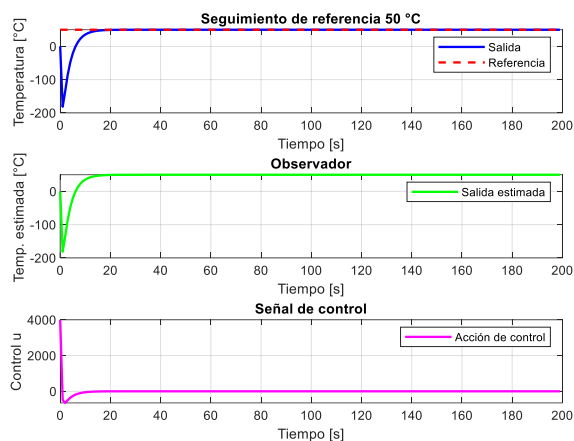


Apéndice 16: Pruebas con valore de Q y R para el controlador LQR mediante simulación

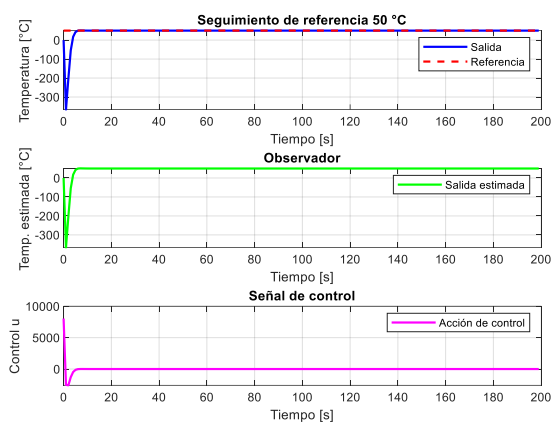
Prueba 1: $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ y $R=1$



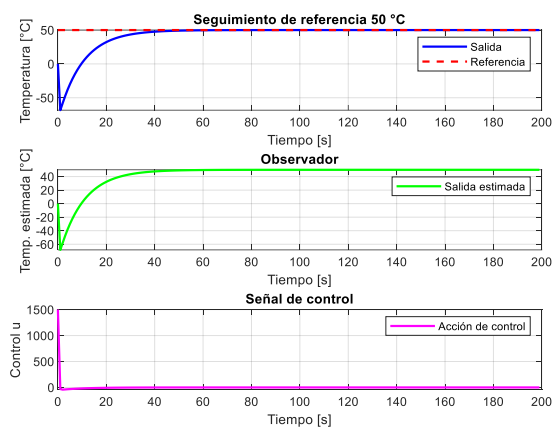
Prueba 4: $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$ y $R=1$



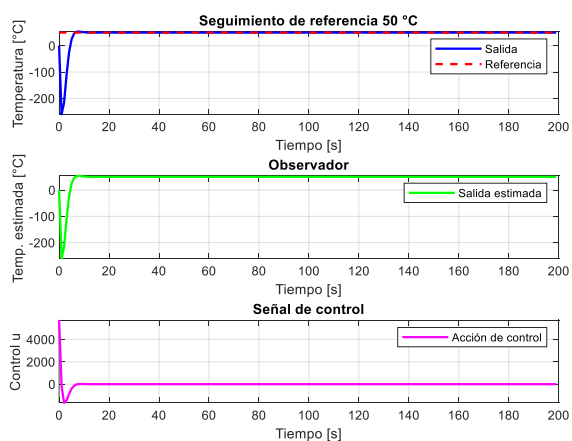
Prueba 2: $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ y $R=0.5$



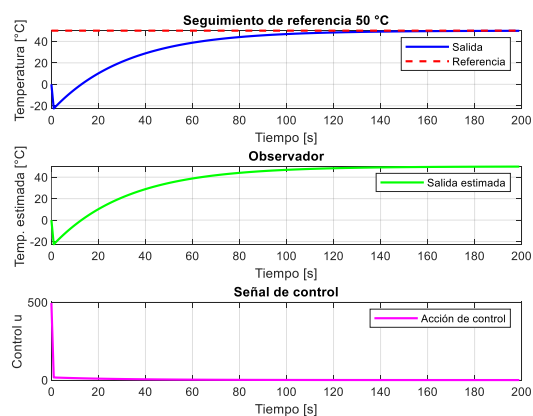
Prueba 5: $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$ y $R=1$



Prueba 3: $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ y $R=2$



Prueba 6: $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}$ y $R=1$



ANEXOS

Anexo A: Ficha técnica de la Operación del Módulo de Control de Temperatura MCT-02

FICHA TÉCNICA DE LA OPERACIÓN DEL MÓDULO DE CONTROL DE TEMPERATURA MCT-02	Versión: 01
	Página 1 de 2

1. IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO

- **Nombre:** Módulo de Control de Temperatura
- **Modelo:** MCT-02
- **Tipo de proceso:** Sistema batch de calentamiento de agua
- **Sistema de control:** LabVIEW – CompactRIO

2. CONDICIONES DE OPERACIÓN

- Verificar que el sistema se encontrara completamente desenergizado antes del inicio de las operaciones.
- Asegurar que las válvulas BA6, BA7, BA8 y BA4 permanecieran totalmente cerradas.
- Comprobar que el tanque 2 estuviera completamente limpio y libre de impurezas.
- Verificar que los tanques 1 alcanzaran un nivel de 22 cm medido desde la base, equivalente a un volumen de 14.52 L de agua. Para ello, se procedió a la apertura de las válvulas BA1 y BA2.
- Asegurar que la válvula BA5 se encontrara completamente abierta.
- Establecer la apertura de la válvula de control eléctrico BV003 en un 50 %.

3. OPERACIÓN EN REMOTO

- Habilitar el suministro eléctrico desde el tablero “TA MODULOS CONTROL” donde se encuentra el interruptor automático “MOD. SCT-02” que suministra de energía de 220 voltios de corriente alterna (vac) al Módulo de Temperatura y a la Pc.
- Abrir el tablero de control y subir la llave termomagnética trifásica 1Q1 a ON, 1F3 a ON, 2F2 a ON.
- También, confirmar la posición de **START** al guardamotor 3Q5 y 3Q1 que energizara a los variadores de velocidad ATV 12 y ATV 11 respectivamente.
- Cerrar el tablero de control.
- Encender la Pc, para abrir la carpeta “Temperatura_Base_MOD”, ejecutar el archivo “Mod_temperatura” de tipo *LabVIEW Project*.
- Se **conecta** el RT CompactRIO Target (172.22.11.2), es decir, la luz verde oscuro debe encenderse.
- Se hace click en VI_main_cRIO. Se hace anticlick en main_cRIO_Temperatura.vi y se selecciona Deploy para que habrá el programa.
- Ya abierto el proyecto se selecciona la flecha blanca (run), para que se conecte el módulo a la Pc para poder observar la lectura de los sensores de temperatura; para manipular y/o modificar la apertura de válvula, la frecuencia de las bombas; para encender o apagar la resistencia, las bombas, agitador y el radiador.
- Una vez terminada las experiencias, se detiene el proceso con el botón “STOP”, se cierra la pestaña *main_cRIO_Temperatura.vi on Mod_temperatura.hproj/RT CompactRIO Target*, **se desconecta RT CompactRIO Target (172.22.11.2)**.
- Finalmente, si ya no se va seguir utilizando el Módulo, se baja las llaves termomagnéticas (1Q1,1F3,2F2) a OFF, los guardamotors (3Q5 y 3Q1) a STOP.

FICHA TÉCNICA DE LA OPERACIÓN DEL MÓDULO DE CONTROL DE TEMPERATURA MCT-02	Versión: 01
	Página 2 de 2

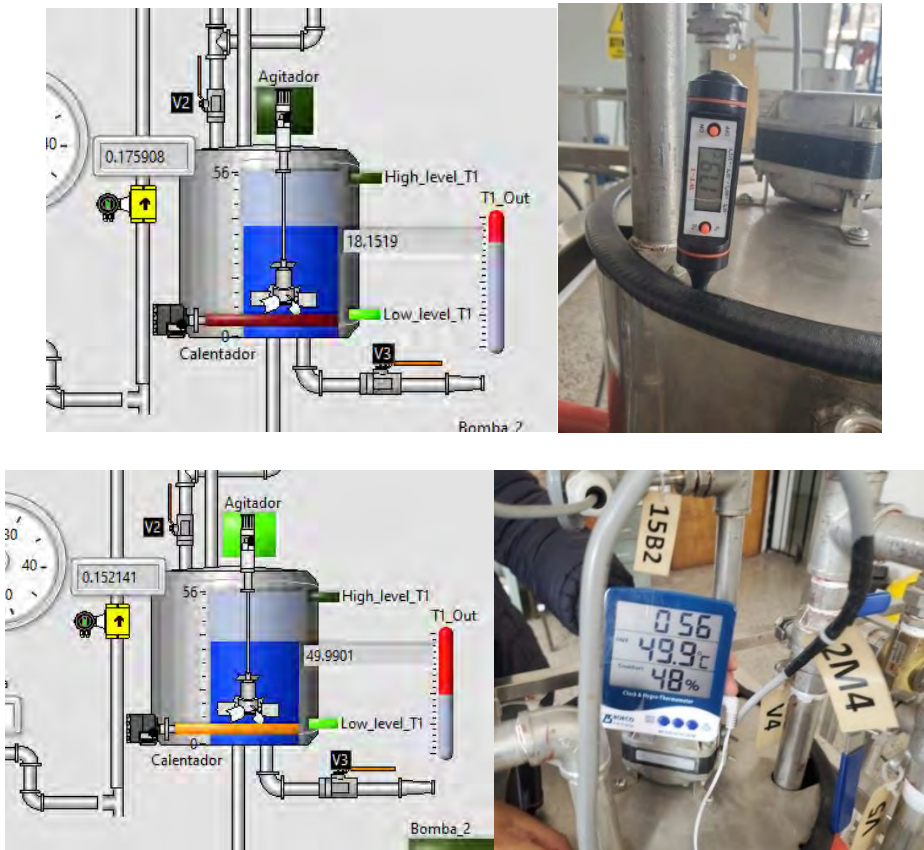
4. CONDICIONES DE SEGURIDAD DE OPERACIÓN

- La temperatura debe ser inferior a los 90°C en el tanque 1, cuando se esté realizando el calentamiento.
- Verificar constantemente la conexión del módulo a la Pc, si se observa una desconexión apretar el botón rojo de emergencia, que se encuentra en el tablero, para detener el proceso; e inmediatamente volver a conectar *RT CompactRIO Target* (172.22.11.2).

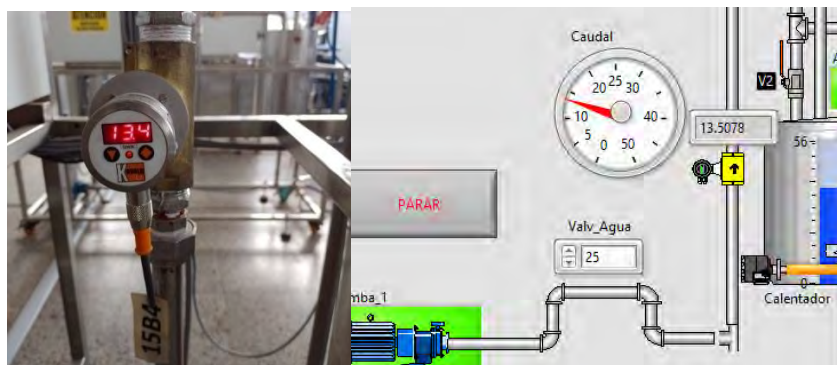
5. MANTENIMIENTO DESPUÉS DE LA OPERACIÓN

- Desconectar la alimentación trifásica general de 220 VAC del Tablero “TA MODULOS CONTROL”
- Vaciar el agua del tanque 1 mediante la apertura de la válvula BA8 y del tanque 2 mediante la válvula BA6.
- Drenar el agua de las tuberías que conectan el tanque 1 con el serpentín del tanque 2, mediante la apertura de la válvula BA7.
- Limpiar el interior del tanque 2 utilizando un paño limpio.
- Limpiar las cañerías y las estructuras externas del módulo.

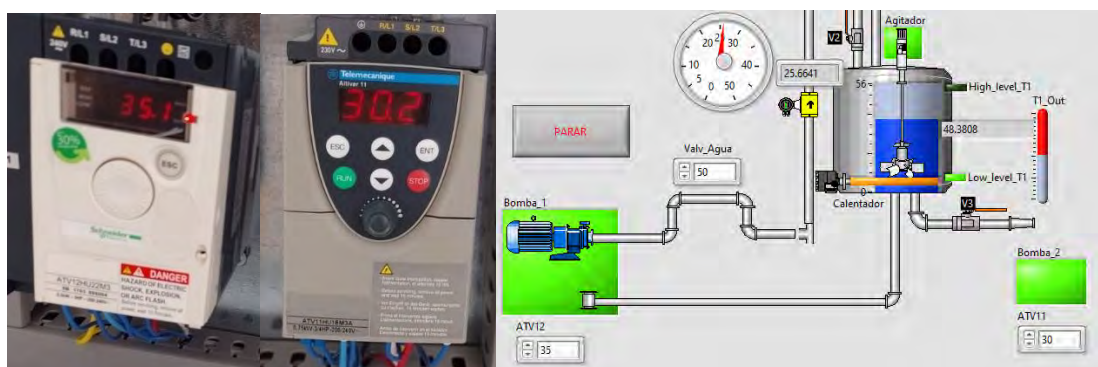
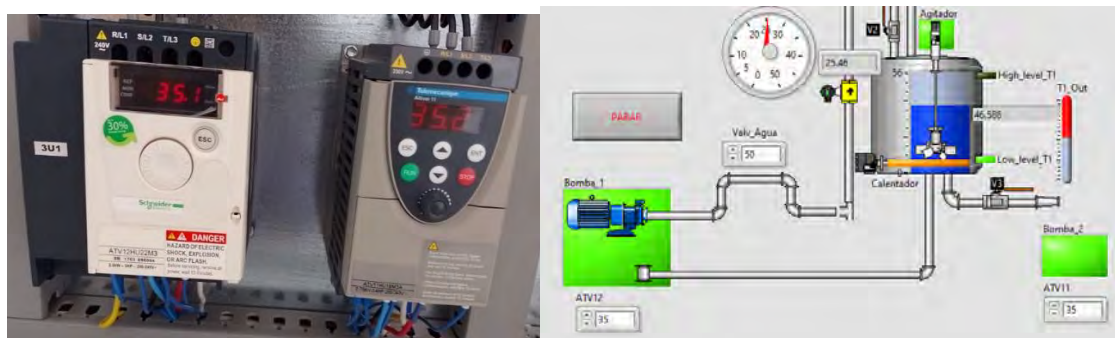
Anexo B: Validación de la temperatura medida en el sistema TK-1 mediante instrumento externo



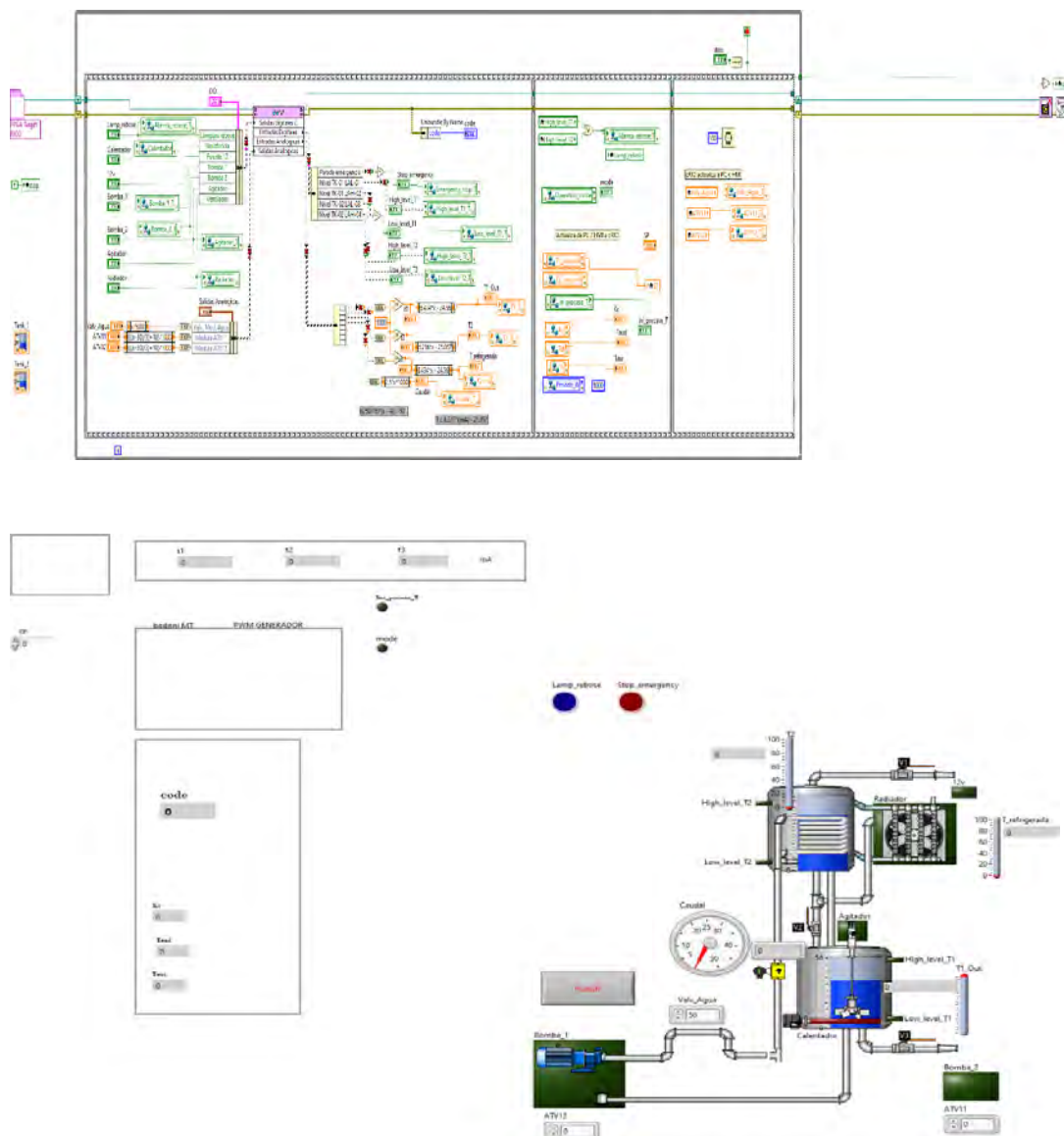
Anexo C: Comparación entre la lectura del caudal en el panel de control y el transmisor digital



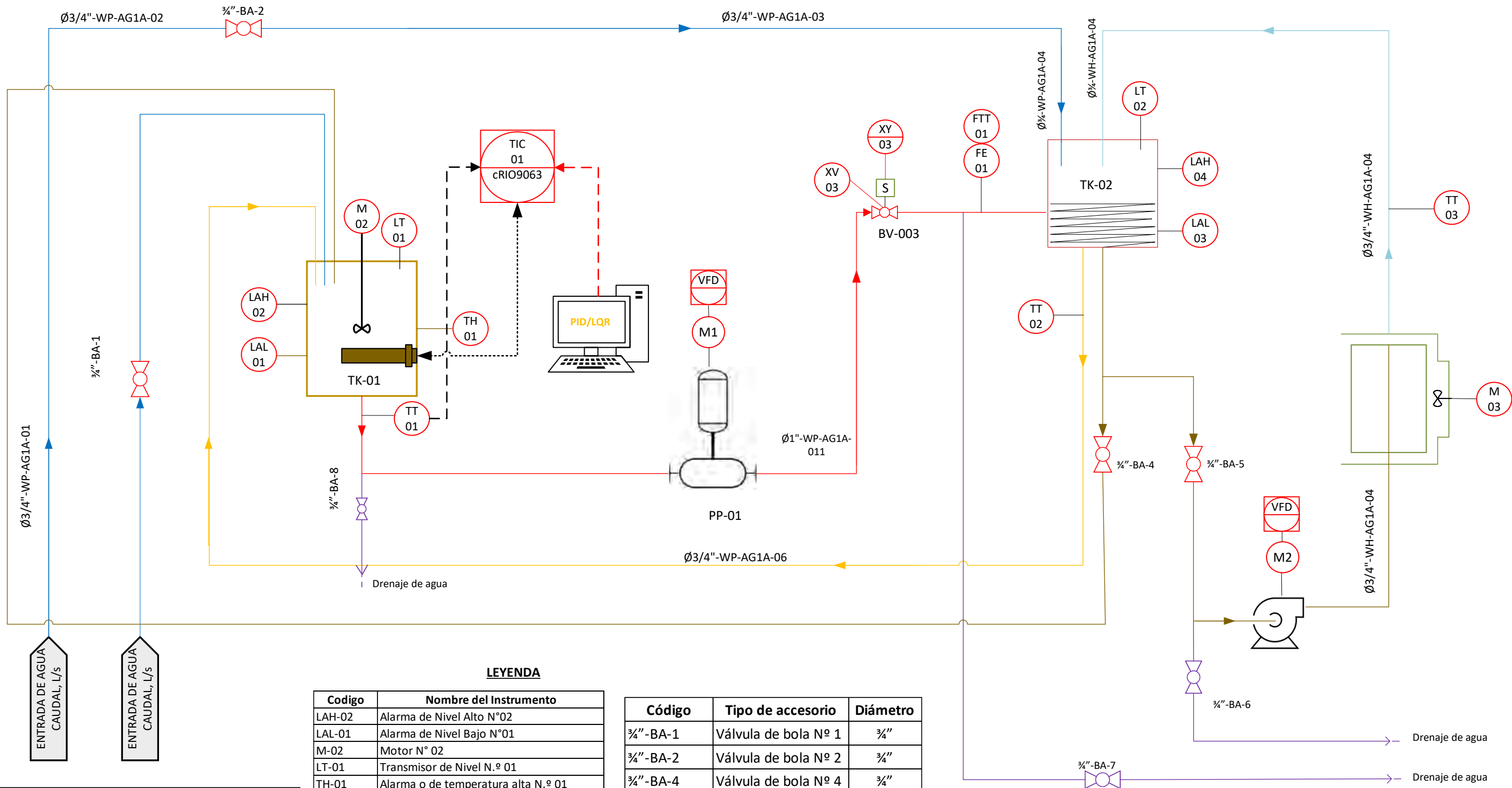
Anexo D: Registro visual de la frecuencia de operación en variadores y su correspondencia con el panel de control



Anexo E: Condición inicial del código y el panel de control implementado en el equipo



Anexo F: Diagrama de instrumentación y tuberías (P&ID) del módulo de control de temperatura,



Código de tubería	Diámetro	Sistema/Línea
Ø1\"-WP-AG1A-011	1 pulgada	Línea WP – AG1A
Ø3/4\"-WP-AG1A-01	¾ pulgada	Línea WP – AG1A
Ø3/4\"-WP-AG1A-02	¾ pulgada	Línea WP – AG1A
Ø3/4\"-WP-AG1A-03	¾ pulgada	Línea WP – AG1A
Ø3/4\"-WP-AG1A-04	¾ pulgada	Línea WP – AG1A
Ø3/4\"-WP-AG1A-06	¾ pulgada	Línea WP – AG1A
Ø3/4\"-WH-AG1A-04	¾ pulgada	Línea WH – AG1A

Código	Descripción
WP	Línea de agua
WH	Línea de agua caliente

Código	Nombre del Instrumento
LAH-02	Alarma de Nivel Alto N°02
LAL-01	Alarma de Nivel Bajo N°01
M-02	Motor N° 02
LT-01	Transmisor de Nivel N.º 01
TH-01	Alarma o de temperatura alta N.º 01
TT-01	Transmisor de temperatura N.º 01
VFD	Variador de frecuencia
M-1	Motor N°1
FE-01	Elemento primario de medición de caudal
FTT-01	Transmisor de caudal
BV-003	Válvula de bola N° 003
S	solenoides
XV-03	Válvula de control automática
XY-03	Relé o dispositivo auxiliar de control
LT-02	Transmisor de Nivel N.º 02
LAH-04	Alarma de Nivel Alto N°04
LAL-03	Alarma de Nivel Bajo N°01
TT-02	Transmisor de temperatura N.º 02
M-2	Motor N°2
TT-03	Transmisor de temperatura N.º 03
M-03	M-03 = Motor N° 03

Código	Tipo de accesorio	Diámetro
¾\"-BA-1	Válvula de bola N° 1	¾\"
¾\"-BA-2	Válvula de bola N° 2	¾\"
¾\"-BA-4	Válvula de bola N° 4	¾\"
¾\"-BA-5	Válvula de bola N° 5	¾\"
¾\"-BA-6	Válvula de bola N° 6	¾\"
¾\"-BA-7	Válvula de bola N° 7	¾\"
¾\"-BA-8	Válvula de bola N° 8	¾\"

T = Temperatura
I = Indicador
C = Controlador
01 = Numero de lazo
PID/LQR = Algoritmos de control seleccionados
Crio-9063 = Sistema CompactRIO Hardware
----- Señal eléctrica
..... Señal de control

UNSAAC		
FACULTAD DE INGENIERIA DE PROCESOS		
Escuela Profesional de Ingeniería Química		
Laboratorio de Control de Procesos (IQ 211)		
Diagrama de tuberías e instrumentos del Módulo de Control de Temperatura MCT-02		
Adaptado del Manual del Módulo de Control de Temperatura MCT-02		
Fecha: 25/03/2026	Diagrama: 1/1	IQ