

**Universidad Católica de Santa María**  
**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y**  
**Formales**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica**



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO PARA EL  
CONTROL DE TEMPERATURA, EMPLEANDO CONTROLADORES PI, PID Y  
PREDICTOR DE SMITH**

Tesis presentada por el Bachiller:

**Alviz Blanco, Edgar Raymundo**

para optar el Título Profesional de

**Ingeniero Electrónico con  
Especialidad en Automatización y  
Control**

Asesor:

**Ing. Rodríguez Gonzales, Pedro Alex**

**Arequipa- Perú**

**2022**

UCSM-ERP

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**INGENIERIA ELECTRONICA**  
**TITULACIÓN CON TESIS**  
**DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR**

Arequipa, 03 de Marzo del 2022

**Dictamen: 001013-C-EPIE-2022**

Visto el borrador del expediente 001013, presentado por:

**2012600691 - ALVIZ BLANCO EDGAR RAYMUNDO**

Titulado:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO PARA EL CONTROL DE  
TEMPERATURA, EMPLEANDO CONTROLADORES PI, PID Y PREDICTOR DE SMITH**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

**1547 - RODRIGUEZ GONZALES PEDRO ALEX  
DICTAMINADOR**



**1886 - COPA PINEDA JUAN CARLOS  
DICTAMINADOR**



**2465 - ZEGARRA GAGO HENRY CHRISTIAN  
DICTAMINADOR**



## *Dedicatoria*

*Dedico el presente trabajo a mi niña Isabella, mi mamita, mi madre, mis tías y a mi hermana, por su incondicional apoyo, paciencia, amor y ser el soporte necesario para seguir siempre adelante.*

*A mis instructores y amigos por sus enseñanzas y ser una gran dirección en mi vida profesional.*



## RESUMEN

El desarrollo de la presente tesis está orientada a demostrar y resolver problemas que se encuentran en el control de procesos de industriales. Actualmente se requiere la optimización de los sistemas de control, es por ello que se requiere profesionales que tengan aptitudes relacionadas al dominio de la instrumentación, automatización y control de procesos, las cuales están relacionadas a la ingeniería electrónica.

Debido a la necesidad de obtener módulos educativos de control que complementen la formación profesional del estudiante, se propone desarrollar e implementar un sistema de control de temperatura de un tanque de agua. Para obtener la correcta regulación de temperatura del fluido, es necesario también la implementación de un sistema de control de nivel, ya que el modelamiento matemático, el sistema de temperatura dependerá de la masa existente de agua dentro del tanque.

Dicho módulo permitirá conectarse a programas de control avanzado, en el cual se podrá implementar diferentes técnicas de control, y dar un análisis diferencial entre algunos tipos de controladores, como es el caso del control PI (Proporcional – Integrador), PID (Proporcional – Integrador - Derivador) y el controlador PI dentro de la estructura del PS (Predictor de Smith). El controlador PI dentro de la estructura de un PS es usado comúnmente en sistemas que cuentan con retardos de tipo dominante.

Actualmente en el mercado local existe equipos sofisticados que cumplen los requisitos para formar parte de un módulo educativo, sin embargo, estos tienen un elevado precio. Es por ello que en el presente trabajo se considera el factor económico para la elección del sistema de instrumentación.

La programación del sistema de control se realizó utilizando Simulink, a través de la comunicación Modbus TCP/IP. Adicionalmente se desarrolló una interfaz de usuario, la cual permite visualizar los parámetros importantes y el comportamiento de la variable proceso, así como el control de otros factores que involucran a la respuesta del sistema de control.

### **Palabras claves:**

Predictor de Smith, control avanzado, controladores PID, control de temperatura, Modbus TCP/IP, Simulink

## ABSTRACT

The development of this thesis is aimed at demonstrating and solving problems found in the control of industrial processes. Currently, the optimization of control systems is required, which is why professionals who have skills related to the domain of instrumentation, automation, and process control, which are related to electronic engineering, are required.

Due to the need to obtain educational control modules that complement the student's professional training, it is proposed to develop and implement a temperature control system for a water tank. To obtain the correct temperature regulation of the fluid, it is also necessary to implement a level control system, since mathematical modeling, the temperature system will depend on the existing mass of water inside the tank.

This module will allow connecting to advanced control programs, in which different control techniques can be implemented, and give a differential analysis between some types of controllers, as is the case of PI control (Proportional - Integrator), PID (Proportional - Integrator - Derivate) and the PI controller within the structure of the PS (Smith's Predictor). The PI controller within the structure of a PS is commonly used in systems that have dominant type delays.

Currently in the local market there is sophisticated equipment that meets the requirements to be part of an educational module, however, these have a high price. That is why in the present work the economic factor is considered for the choice of the instrumentation system.

The programming of the control system was carried out using Simulink, through Modbus TCP/IP communication. Additionally, a user interface was developed, which allows visualizing the important parameters and the behavior of the process variable, as well as the control of other factors that involve the response of the control system.

### **Key words:**

Smith Predictor, modern control, PID controller, temperature controller, Modbus TCP/IP Communication, Simulink.

## INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, el uso de controladores electrónicos ha permitido que las plantas industriales se conviertan en lugares automatizados. El ingeniero electrónico desarrolla tareas en los sistemas automatizados, tales como: integración de señales, la lógica de programación, interfaces hombre – máquina y protocolos de comunicación. En consecuencia, ha permitido que los sistemas auxiliares y principales de una planta pasen de lugares de supervisión constante por una persona a ser monitoreadas desde una sala de control.

El principio de funcionamiento de un sistema de control está basado en un algoritmo matemático, como es el caso del controlador PID. Este tipo de controlador es el más usado en la industria, por su robustez y fácil manejo de ser insertado en los procesos de sistemas lineales. Sin embargo, este tipo de controlador cuenta con desventajas ante sistemas no lineales o con un retardo dominante.

Es por ello que, en la presente tesis, se propone diseñar e implementar el controlador Predictor de Smith, que es recomendable para sistemas que cuenta con retardo, como es el ejemplo de los sistemas de control de temperatura, o lugares donde el sensor presenta retardos para percibir la magnitud física que se quiere controlar. Además de ello, se realizará una comparación entre los controladores clásicos como lo es el PI y PID.

Se plantea obtener la diferencia de comportamientos entre el tiempo de respuesta, el sobre impulso y el error en estado estacionario.

## ÍNDICE

DICTAMEN APROBATORIO

DEDICATORIA

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

INDICE

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

CAPITULO I .....	1
1. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO.....	1
1.1 Identificación del problema .....	2
1.2 Descripción del problema.....	2
1.3 Justificación del problema .....	2
1.4 Objetivos .....	2
1.4.1 Objetivo principal.....	2
1.4.2 Objetivo específico .....	3
1.5 Alcance del proyecto .....	3
1.6 Variables .....	3
1.6.1 Variable independiente .....	3
1.6.2 Variable dependiente.....	3
1.7 Antecedentes investigativos.....	4
CAPITULO II.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Instrumento de medición.....	6
2.2 Clasificación de los instrumentos .....	6
2.2.1 Elemento primario.....	6
2.2.2 Transmisores.....	6
2.2.3 Indicadores .....	6
2.2.4 Convertidores.....	6

2.3	Medidas de temperatura .....	6
2.3.1	Indicadores locales de temperatura .....	7
2.3.2	Termopar.....	7
2.3.3	Termorresistencia.....	9
2.4	Medidas de nivel.....	12
2.4.1	Sensor Mecánico .....	12
2.4.2	Sensor eléctrico .....	12
2.4.3	Sensor de ultrasonido .....	12
2.4.4	Sensor de presión.....	12
2.5	Elemento final de control .....	12
2.6	Control.....	13
2.6.1	Control de temperatura .....	14
2.6.2	Control de nivel.....	14
2.7	Control PI .....	14
2.8	Control PID .....	15
2.9	Predictor de Smith .....	16
2.10	Controlador Lógico Programable .....	17
2.10.1	Arquitectura del PLC.....	17
2.11	Microcontrolador PIC.....	19
2.11.1	Arquitectura de un microcontrolador .....	19
2.12	OPC (OLE for Process Control).....	21
2.12.1	Arquitectura OPC cliente/servidor .....	22
2.13	MODBUS .....	22
2.13.1	Puerto serie.....	23
2.13.2	Ethernet .....	24
CAPITULO III .....		25
3.	DESARROLLO DE INGENIERIA .....	25
3.1	Memoria descriptiva .....	26
3.2	Diseño del sistema de control de temperatura .....	26
3.3	Diseño de tanque .....	28
3.4	Actuadores .....	29
3.4.1	Válvula de control.....	29
3.4.2	Resistencia calefactora .....	32

3.4.3	<b>Agitador .....</b>	<b>43</b>
3.4.4	<b>Motobomba .....</b>	<b>45</b>
3.5	<b>Sensor de temperatura .....</b>	<b>46</b>
3.5.1	<b>Transmisor de PT100 .....</b>	<b>48</b>
3.6	<b>Sensores de nivel .....</b>	<b>53</b>
3.6.1	<b>Sensor de nivel de señal análoga .....</b>	<b>53</b>
3.7	<b>Fuente de alimentación.....</b>	<b>59</b>
3.8	<b>Controlador Lógico Programable .....</b>	<b>60</b>
3.9	<b>Tablero de control.....</b>	<b>62</b>
3.10	<b>Dimensionamiento del alambre y cableado .....</b>	<b>63</b>
3.10.1	<b>Bomba de agua.....</b>	<b>64</b>
3.10.2	<b>Resistencias calefactoras .....</b>	<b>64</b>
3.10.3	<b>Dispositivos de control .....</b>	<b>64</b>
3.10.4	<b>Interruptor termo magnético principal.....</b>	<b>64</b>
3.11	<b>Interruptor principal de tablero.....</b>	<b>65</b>
3.12	<b>Relés .....</b>	<b>66</b>
3.13	<b>Implementación del módulo de control .....</b>	<b>68</b>
3.13.1	<b>PLC LOGO8!.....</b>	<b>69</b>
3.13.2	<b>Módulo de expansión de PLC LOGO8! .....</b>	<b>69</b>
3.13.3	<b>Fuente de alimentación de PLC .....</b>	<b>70</b>
3.13.4	<b>Interruptor termomagnético .....</b>	<b>71</b>
3.13.5	<b>Tarjeta de detección de cruce por cero y microcontrolador .....</b>	<b>71</b>
3.13.6	<b>Tarjetas de control de potencia de resistencias calefactoras .....</b>	<b>72</b>
3.13.7	<b>Tarjeta de acondicionamiento de transmisor de temperatura .....</b>	<b>72</b>
3.13.8	<b>Tarjeta de acondicionamiento de sensor de presión.....</b>	<b>73</b>
3.13.9	<b>Fuente de alimentación para tarjeta de control.....</b>	<b>73</b>
3.13.10	<b>Transmisor de temperatura .....</b>	<b>74</b>
3.13.11	<b>Relé .....</b>	<b>74</b>
3.13.12	<b>Contactador .....</b>	<b>75</b>
3.14	<b>Comunicación.....</b>	<b>75</b>
3.14.1	<b>Configuración de la comunicación entre Simulink y Logo8! a través de Modbus TCP/IP.....</b>	<b>76</b>
3.15	<b>Identificación del sistema de control de nivel.....</b>	<b>81</b>
3.15.1	<b>Sintonización del controlador PID para el sistema de control de nivel..</b>	<b>86</b>

3.16	Identificación del sistema de control de temperatura .....	88
3.16.1	Sintonizaciones de controlador a través del modelamiento matemático obtenido del sistema de control de temperatura .....	90
3.17	Elaboración del sistema de control de temperatura para el módulo educativo .....	98
3.17.1	Implementación del sistema de control .....	98
3.17.2	Desarrollo del sistema de control de nivel .....	99
3.17.3	Desarrollo del sistema de control de temperatura.....	101
3.17.4	Implementación del HMI según la norma ANSI .....	102
CAPITULO IV.....		103
4.	PRUEBAS Y RESULTADOS .....	103
4.1	Pruebas de comunicación MODBUS TCP/IP .....	104
4.1.1	Tabla de asignación de variables.....	106
4.2	Pruebas de funcionamiento del sistema de control de nivel.....	106
4.2.1	Filtrado de señal .....	106
4.2.2	Sintonización del controlador PI.....	107
4.3	Pruebas del sistema de control de temperatura .....	108
4.4	Análisis comparativo de las técnicas de control PI, PID y PI + Predictor de Smith .....	111
4.5	Resultados del funcionamiento del HMI .....	112
CONCLUSIONES .....		114
RECOMENDACIONES .....		116
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....		117
ANEXOS .....		123

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1: Efecto Seebeck .....	8
Fig. 2: Curvas características fem/temperatura de los termopares .....	8
Fig. 3: Curvas de resistencia relativa de varios metales/temperatura.....	11
Fig. 4: Sistema de control de temperatura .....	13
Fig. 5: Diagrama de control de temperatura .....	13
Fig. 6: Diagrama de bloques de control PI .....	15
Fig. 7: Diagrama de bloques de control PID .....	16
Fig. 8: Diagrama de bloques de la estructura de predictor de Smith.....	17
Fig. 9: Diagrama de bloques de la arquitectura Harvard.....	20
Fig. 10: Arquitectura de información para el control de procesos .....	21
Fig. 11: Arquitectura OPC cliente/servidor.....	22
Fig. 12: Transferencia de datos entre maestro y esclavo.....	22
Fig. 13: Codificación de datos Big-Endian .....	23
Fig. 14: Plano P&ID del módulo educativo de sistema del control de temperatura.....	27
Fig. 15: Esquema básico de los tanques de almacenamiento .....	29
Fig. 16: Válvula de control proporcional .....	31
Fig. 17: Coeficiente de flujo - Recorrido del vástago .....	32
Fig. 18: Resistencias calefactoras de Ni Cr .....	34
Fig. 19: Diagrama del circuito de acondicionamiento de la resistencia calefactora.....	35
Fig. 20: Diagrama del circuito de cruce por cero .....	36
Fig. 21: Diagrama del circuito de etapa de control de las resistencias calefactoras.....	38
Fig. 22: Partes de un fototriac.....	38
Fig. 23: Circuito de etapa de control y potencia de la resistencia calefactora.....	41
Fig. 24: Curva de disipación de potencia (W) vs. corriente RMS (A) .....	42
Fig. 25: Curvas de numero de caudal y potencia.....	44
Fig. 26: Bomba de agua QB-60 de 0.5HP .....	45
Fig. 27: Sensor de temperatura, PT100 .....	48
Fig. 28: Transmisor de sensor de temperatura RTD PT100 .....	50
Fig. 29: Circuito de acondicionamiento de señal del sensor de temperatura .....	53
Fig. 30: Tanque abierto de agua .....	55
Fig. 31: Salida de voltaje con respecto a la presión de entrada al sensor .....	56

Fig. 32: Sensor de presión diferencial de la serie ABP de Honeywell .....	57
Fig. 33: Circuito de acondicionamiento para el sensor de presión .....	59
Fig. 34: Fuente de alimentación de tarjetas de control .....	60
Fig. 35: Modulo educativo de sistema de control de temperatura.....	68
Fig. 36: Interior del tablero de control.....	69
Fig. 37: Controlador lógico programable LOGO8! Siemens .....	69
Fig. 38: Modulo de salidas análogas 0-10VDC y 4-20mA .....	70
Fig. 39: Fuente de alimentación de 24VDC .....	70
Fig. 40: Llave termomagnética de 220V/32A .....	71
Fig. 41: Circuito de detección de cruce por cero de la red eléctrica.....	71
Fig. 42: Circuito de control de potencia de resistencia calefactora .....	72
Fig. 43: Circuito de acondicionamiento del transmisor de temperatura.....	72
Fig. 44: Circuito de acondicionamiento del medición de nivel.....	73
Fig. 45: Fuente de alimentación de tarjetas de control .....	73
Fig. 46: Transmisor de sensor RTD PT100.....	74
Fig. 47: Interruptores electromecánicos de agitador y motobomba .....	74
Fig. 48: Contactor de 220V/15A para la motobomba .....	75
Fig. 49: Selección de red en el PLC .....	76
Fig. 50: Configuración de la dirección del PLC.....	76
Fig. 51: Icono del LOGO!Soft Comfort desde el escritorio .....	77
Fig. 52: Configuración offline del LOGO8!.....	77
Fig. 53: Selección del tipo de Hardware del LOGO! .....	77
Fig. 54: Selección de tipos de conexiones ethernet.....	78
Fig. 55: Creación de servidor Modbus .....	78
Fig. 56: Direccionamiento Modbus del PLC LOGO8! .....	79
Fig. 57: Programa de establecimiento de comunicación del PLC con Matlab.....	80
Fig. 58: Diagrama del sistema de control de nivel .....	81
Fig. 59: Modelamiento matemático del nivel de un tanque .....	82
Fig. 60: Comportamiento dinámico del cambio de nivel .....	84
Fig. 61: Comportamiento dinámico del cambio de volumen .....	84
Fig. 62: Constante de la válvula de control .....	85
Fig. 63: Parámetros de sintonización de controlador PID, a través del método de Ziegler-Nichols.....	86
Fig. 64: Sintonización del sistema de control de nivel, $K_p=34.5$ y $T_i= 3.66$ .....	87

Fig. 65: Sintonización fina del sistema de control de nivel, $K_p=8$ y $T_i= 0.03$ .....	87
Fig. 66: Respuesta de la temperatura ante un cambio en la entrada.....	88
Fig. 67: Variable de proceso vs Entrada escalón.....	89
Fig. 68: Algoritmo de control PI .....	91
Fig. 69: Elaboración de control en lazo cerrado en Simulink, aplicando el controlador PI 91	
Fig. 70: Primera sintonización de controlador PI para un control de temperatura simulado en Simulink. $K_p= 8.62$ , $T_i=61.2$ .....	92
Fig. 71: Segunda sintonización de controlador PI para un control de temperatura simulado en Simulink. $K_p= 3.8$ , $T_i=175$ .....	92
Fig. 72: Elaboración de control en lazo cerrado en Simulink, aplicando el controlador PID .....	93
Fig. 73: Primera sintonización de controlador PID para el control de temperatura a través del método de Ziegler- Nichols .....	94
Fig. 74: Segunda sintonización de controlador PID para un control de temperatura simulado en Simulink. $K_p= 0.7$ , $T_i= 350$ , $T_d=9.18$ .....	94
Fig. 75: Diagrama de bloques del Predictor de Smith.....	95
Fig. 76: Simplificación del diagrama de bloques, reducción del diagrama en lazo cerrado del controlador y la ganancia del modelamiento matemático del sistema .....	95
Fig. 77: Simplificación del diagrama de bloques, reducción del diagrama en lazo cerrado de $C_s$ y la función de transferencia del sistema .....	96
Fig. 78: Diagrama de control con respecto a $C_{eq}(s)$ y $P(s)$ en lazo cerrado .....	96
Fig. 79: Sistema de control PID dentro de la estructura del Predictor de Smith, para un control de temperatura. Elaborado en Simulink .....	97
Fig. 80: Comportamiento de la variable de proceso frente a un cambio de entrada (Predictor de Smith) .....	98
Fig. 81: Condiciones para el arranque de la motobomba en automático y cierre del lazo de control de temperatura .....	99
Fig. 82: Selector de modo manual y automático de la bomba.....	99
Fig. 83: Algoritmo del controlador PID del nivel del tanque.....	100
Fig. 84: Recepción de señales de entradas análogas a través de comunicación Modbus..	100
Fig. 85: Condiciones para el cierre de interruptor de lazo de temperatura y del funcionamiento del agitador .....	101
Fig. 86: Algoritmo de control PID + Predictor de Smith del sistema de temperatura .....	101
Fig. 87: HMI del Sistema de control de temperatura .....	102

Fig. 88: Prueba de comunicación entre el PLC y la computadora .....	104
Fig. 89: Prueba de comunicación Modbus entre el PLC y Matlab.....	105
Fig. 90: Filtro pasa bajos EMA .....	107
Fig. 91: Comportamiento dinámico del sistema de control de nivel.....	107
Fig. 92: Respuesta del sistema de control de nivel ante un cambio de entrada de 30 cm .	108
Fig. 93: Validación y simulación del sistema de control de temperatura, obtenido a través de la prueba experimental.....	109
Fig. 94: Prueba experimental y real del sistema de temperatura.....	109
Fig. 95: Primera prueba de ajuste del predictor de Smith ante los parámetros $K=2.07$ , $T=406.24$ .....	110
Fig. 96: Segunda prueba de ajuste del predictor de Smith ante los parámetros $K=2.12$ , $T=510$ .....	110
Fig. 97: Tercera prueba de ajuste del predictor de Smith ante los parámetros $K=2.22$ , $T=680$ .....	111
Fig. 98: Ingreso de diferentes Setpoint para el sistema de control de temperatura .....	111
Fig. 99: Prueba operativa del HMI .....	112
Fig. 100: Diagrama de bloques del módulo educativo .....	113

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tolerancias y temperaturas de trabajo de termopares. Norma IEC 584-1 .....	9
Tabla 2: Características de las termorresistencias .....	11
Tabla 3: Direccionamiento de datos Modbus .....	23
Tabla 4: Comparación de materiales de construcción de tanque.....	28
Tabla 5: Comparación de válvulas de control proporcional.....	30
Tabla 6: Características principales de la válvula de control .....	31
Tabla 7: Diferencia de Microcontroladores .....	37
Tabla 8: Comparación de especificaciones eléctricas de TRIACs .....	40
Tabla 9: Ancho de pista del PCB, según la corriente que circula .....	41
Tabla 10: Comparación de especificaciones técnicas de motobombas .....	46
Tabla 11: Comparación de especificaciones técnicas de sensores de temperatura .....	47
Tabla 12: Comparación de transmisores de temperatura para RTD PT100 .....	49
Tabla 13: Comparación de amplificadores de instrumentación .....	51
Tabla 14: Comparación de los sensores de nivel de señal análoga .....	54
Tabla 15: Comparación de PLCs.....	61
Tabla 16: Norma NEMA para tableros eléctricos .....	62
Tabla 17: Datos técnicos de alambres y cables .....	63
Tabla 18: Diferencia de interruptores termo magnéticos .....	66
Tabla 19: Comparación de relés de control .....	67
Tabla 20: Tabla de asignacion de variables de E/S del PLC y de comunicación Modbus	106
Tabla 21: Análisis de datos y graficas comparativas.....	112



**CAPITULO I**  
**PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO**

## **1.1 Identificación del problema**

Existe una gran importancia en el uso de módulos educativos en las instituciones que se dedican en la enseñanza en temas relacionados al campo de automatización, instrumentación y control. Esto se origina en las industrias donde se requiere personal calificado y preparado para innovar, resolver y obtener un mejor control de sus procesos. Por consiguiente, existen muchas empresas destinadas a fabricar módulos educativos que usan procesos como el control de flujo, presión, nivel, temperatura, etc. Estos módulos permiten complementar los conocimientos teóricos y prácticos que se requiere en el mercado laboral. Por consiguiente, esta tesis plantea una alternativa de solución para implementar a bajo costo, los laboratorios de instrumentación, control y automatización de las escuelas profesionales de Ingeniería Electrónica y ramas a fines instituciones de nivel superior.

## **1.2 Descripción del problema**

En la mayoría de las instituciones de nivel superior no se cuenta con todos los módulos educativos para desarrollar las áreas de instrumentación, control y automatización, debido alto costo que requiere su adquisición en determinadas marcas de equipos. Además, se requieren los módulos educativos para complementar el proceso de enseñanza y aprendizaje para la formación de los futuros profesionales en instrumentación, control y automatización.

## **1.3 Justificación del problema**

Actualmente muchos sectores como la minería, energía, producción, manufactura y otras industrias requieren de profesionales del área de instrumentación, control y automatización capacitados para aplicar nuevas técnicas de control en sus procesos. En las instituciones de nivel superior se recibe la enseñanza de técnicas de control avanzado y controladores lógicos programables para lo cual se necesita los módulos educativos que ayuden a demostrar y resolver problemas en el control de sistemas de proceso industriales.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo principal**

Diseñar e implementar un módulo educativo con un sistema de control de temperatura aplicando control PI, PID y Predictor de Smith.

#### **1.4.2 Objetivo específico**

- Conocer y entender las características principales de los sensores y actuadores para el empleo en un sistema de control de temperatura.
- Diseñar el sistema de control empleando el Predictor de Smith y PID.
- Diseñar e implementar circuitos de acondicionamiento para los sensores y actuadores del módulo educativo.
- Desarrollar la interfaz de comunicación entre Simulink y el PLC Logo8!.
- Implementar el módulo educativo del sistema de control de temperatura.
- Analizar comparativamente las técnicas de control PI, PID y PI + Predictor de Smith.
- Elaborar guías de prácticas de laboratorio para un mejor afianzamiento del conocimiento del usuario.

#### **1.5 Alcance del proyecto**

El diseño e implementación del presente proyecto de control de temperatura tiene características técnicas, tales como sintonización del controlador PID, visualización del comportamiento de las magnitudes físicas en tiempo real, mayor velocidad al tiempo de respuesta, interfaz gráfica para variar los parámetros del controlador PID, análisis y estudio comparativo de las técnicas de control PI, PID y Predictor de Smith. Este módulo didáctico tendrá como variable principal la medición de temperatura, de la cual su estabilidad y robustez dependerá del constante nivel del tanque, tanto, así como la aplicación de técnicas de control PID y Predictor de Smith.

#### **1.6 Variables**

##### **1.6.1 Variable independiente**

Módulo educativo de control de temperatura.

##### **1.6.2 Variables dependientes**

Resistencia calefactora, control de resistencias calefactoras, nivel de agua, electrobomba.

### 1.7 Antecedentes investigativos

En la tesis de maestría presentada por D. Rueda, muestra el desarrollo de un control avanzado en un horno siderúrgico de una industria de planchadores, en el cual se modificó su estructura de control para la integración de un controlador feed-forward, se concluyó que mediante estas modificaciones es posible compensar en gran medida el efecto de las perturbaciones. [1]

En el proyecto de tesis presentado por S. Condori, muestra el diseño de un control de temperatura para un horno industrial a través de la modulación de ancho de pulsos, usando un PLC Modicom M241, en el cual se concluyó que pudo controlar la temperatura a un margen de error de 1.8% sobre el punto de ajuste establecido. [2]

En la tesis presentada por Y. Fuertes, titulada como desarrollo e implementación de un módulo educativo para un sistema de control de temperatura muestra la aplicación de un control PID basado en el sistema de LabVIEW, a través de la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009, en el cual se concluyó la correcta identificación de planta y la sintonización de los parámetros de control PID. [3]

En la tesis presentada por J. Arguedas, muestra el desarrollo de la automatización de un horno industrial, usando un controlador PID, en el cual concluyó que el uso de esta técnica de control evidenció la disminución de tiempo de estabilización de temperatura de horno y la corrección del error estacionario. [4]

En el proyecto de tesis presentada por A. Camargo y E. Villamizar, muestran el desarrollo del control de temperatura de un horno a través de dos diferentes controladores, en el cual se realizó la comparación de las técnicas lógica difuso y PID, por consiguiente, se concluyó que el control difuso tiene una mejor respuesta ante este tipo de proceso. [5]



## **CAPITULO II**

# **MARCO TEÓRICO**

## 2.1 Instrumento de medición

El valor medido de la condición del proceso que se está controlando, es llamada variable de proceso. [6]

Las variables de proceso son magnitudes físicas tales como la presión, nivel, temperatura, caudal, pH, conductividad, viscosidad, posición, turbidez, vibración, etc.

En muchas plantas industriales existen instrumentos de medición que pueden medir una magnitud física de forma local, es decir un instrumento que solo puede reportar su medición in situ, tales como los manómetros e indicadores de temperatura, mientras que para otro tipo de procesos complejos es necesario el uso de un control y monitoreo, para este tipo de proceso existen instrumentos capaces de convertir la magnitud física en una señal eléctrica y transmitirlo hacia un computador.

## 2.2 Clasificación de los instrumentos

### 2.2.1 Elemento primario

Son aquellos instrumentos que están en contacto con el fluido del proceso y entregan al sistema de medición una señal predeterminada.

### 2.2.2 Transmisores

Este tipo de instrumento es capaz de transmitir a distancia la variable del proceso. Su transmisión puede ser dada como una señal neumática (3 a 15 psi) o electrónica (señal normalizada de 4 a 20 mA c.c.) o digital. [7]

### 2.2.3 Indicadores

Los instrumentos indicadores, disponen de un índice y de una escala graduada en la que puede leerse el valor de la variable. [7]

### 2.2.4 Convertidores

Son aquellos instrumentos que tienen la capacidad de modificar la señal que recibe en otra para la necesidad que exista en el sistema de control. Pueden ser convertidores de señal neumática a electrónica, de corriente a voltaje, etc.

## 2.3 Medidas de temperatura

Este tipo de instrumento está clasificado por estar compuesto de diversos materiales. La elección del tipo de sensor de temperatura se basa en el tipo de fluido o proceso en el cual se vaya a instalar, sus principios de funcionamiento del sensor de temperatura se basan en:

- Variación en volumen o en estado de cuerpo (sólido, líquidos o gases). [7]
- Variación de resistencia de un conductor (sondas de resistencia). [7]
- Variación de resistencia de un semiconductor (termistores). [7]
- La f.e.m. creada en la unión de dos metales distintos (termopares). [7]
- Intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo (pirómetros de radiación). [7]
- Otros fenómenos utilizados en laboratorio (velocidad del sonido en un gas, frecuencia de resonancia de un cristal, etc. [7]

Los sensores de temperatura más usados en la industria son los termopares, RTD y termistores.

### **2.3.1 Indicadores locales de temperatura**

Los indicadores de temperatura más utilizados en las industrias son los termómetros bimetalicos, y los de bulbo y capilar.

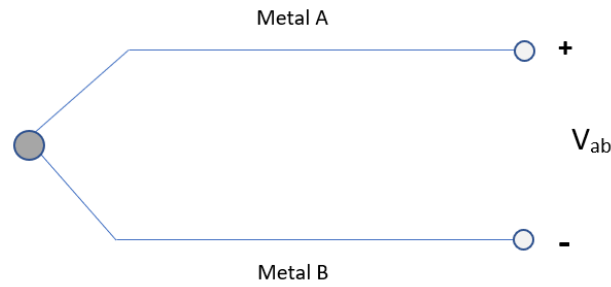
Los termómetros bimetalicos tienen como principio de funcionamiento la medición de temperatura mediante un muelle espiral, que consiste en dos metales diferentes. Ambos metales tienen la característica importante de tener una distinta dilatación térmica.

Los termómetros de bulbo y capilar consisten en la medición de temperatura a través de un bulbo conectado por un capilar a una espiral. Cuando exista variaciones de temperatura en el bulbo, el fluido que se encuentre en la parte interna del capilar se expandirá, por consiguiente, la espiral tenderá a desenrollarse. [7]

### **2.3.2 Termopar**

El principio de funcionamiento del termopar o termocupla se basa en el efecto que fue descubierto por Seebeck. Este efecto consiste en la circulación de corriente en un circuito constituido por dos metales diferentes, cuyas uniones de metales se encuentran a diferente temperatura, estas uniones son denominados unión o junta caliente y unión o junta fría.

“Esta circulación de corriente obedece a la suma de dos efectos termoeléctricos, el efecto Peltier (1834) que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de dos metales diferentes cuando una corriente circula a través de la unión, y el efecto Thomson, que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperatura.” [7]



$V_{ab}$ : Voltaje Seebeck

Fig. 1: Efecto Seebeck

Fuente adaptada: [7]

En la figura 1, se muestra la apertura de la junta fría en un termopar, obteniendo así el voltaje del sensor desde el lado de la junta fría. La tensión entregada es proporcional a la temperatura absoluta medida, y es expresada a través de la ecuación (2.1).

$$V_{ab} = \alpha T \quad (2.1)$$

Donde  $T$  es la temperatura absoluta,  $\alpha$  es el coeficiente de Seebeck, lo cual significa la variación de tensión producida por el primer cambio de temperatura para cada diferente tipo de termocupla construida por varios materiales. Esta ecuación trata de linealizar la respuesta de cada de termopar.

En la figura 2, se observa las curvas características de respuesta de los diferentes tipos de termocuplas.

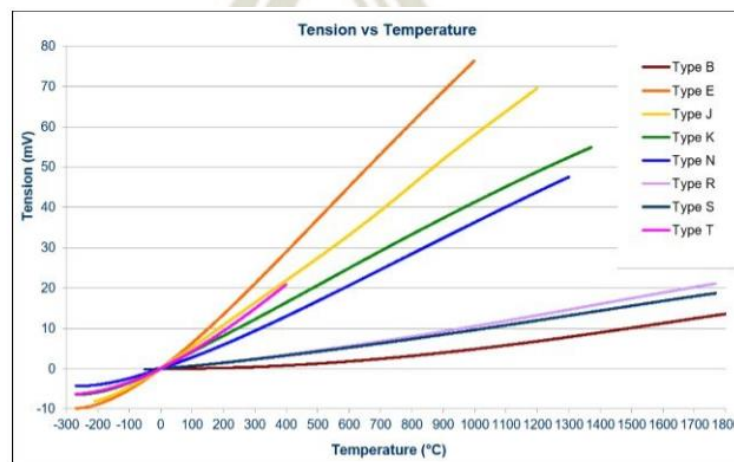


Fig. 2: Curvas características fem/temperatura de los termopares

Fuente: [7]

En la tabla 1, se muestra los termopares más comunes que se usan en las industrias. Las termocuplas se distinguen por soportar grandes cambios de temperatura, es por ello que es usada en las industrias, tales como plantas de generación y de Oil & Gas.

Termopar	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Temperaturas de trabajo
TIPO E Ni Cr/Cu Ni	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.004 \times t)$ $-40^{\circ}\text{C}$ a $800^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0075 \times t)$ $-40^{\circ}\text{C}$ a $900^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0015 \times t)$ $-200^{\circ}\text{C}$ a $40^{\circ}\text{C}$	$-200$ a $915^{\circ}\text{C}$
Tipo T Cu/Cu Ni	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.004 \times t)$ $-40^{\circ}\text{C}$ a $350^{\circ}\text{C}$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0075 \times t)$ $-40^{\circ}\text{C}$ a $350^{\circ}\text{C}$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0015 \times t)$ $-200^{\circ}\text{C}$ a $40^{\circ}\text{C}$	$-200$ a $400^{\circ}\text{C}$
Tipo J Fe/CU Ni	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.004 \times t)$ $-40^{\circ}\text{C}$ a $750^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0075 \times t)$ $-40^{\circ}\text{C}$ a $750^{\circ}\text{C}$	-----	$-200$ a $1200^{\circ}\text{C}$
Tipo K Ni Cr/Ni Al	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.004 \times t)$ $-40^{\circ}\text{C}$ a $1000^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0075 \times t)$ $-40^{\circ}\text{C}$ a $1200^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0015 \times t)$ $-200^{\circ}\text{C}$ a $40^{\circ}\text{C}$	$-200$ a $1372^{\circ}\text{C}$
Tipo R Pt13%Rh/Pt	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ ó $(1+0.003(t-1100))$ $0^{\circ}\text{C}$ a $1600^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0075 \times t)$ $0^{\circ}\text{C}$ a $1600^{\circ}\text{C}$	-----	$-50$ a $1768^{\circ}\text{C}$
Tipo S Pt10%Rh/Pt	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ ó $(1+0.003(t-1100))$ $0^{\circ}\text{C}$ a $1600^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0075 \times t)$ $0^{\circ}\text{C}$ a $1600^{\circ}\text{C}$	-----	$-50$ a $1768^{\circ}\text{C}$
Tipo B Pt30%Rh/Pt6%Rh	-----	-----	$\pm 4^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0015 \times t)$ $-600^{\circ}\text{C}$ a $1700^{\circ}\text{C}$	$0$ a $820^{\circ}\text{C}$
Tipo N Ni Cr Si/Ni Si Mg	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.004 \times t)$ $40^{\circ}\text{C}$ a $1000^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.004 \times t)$ $40^{\circ}\text{C}$ a $1200^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0015 \times t)$ $-200^{\circ}\text{C}$ a $40^{\circ}\text{C}$	$-270$ a $1300^{\circ}\text{C}$

Tabla 1: Tolerancias y temperaturas de trabajo de termopares. Norma IEC 584-1

Fuente: [7]

### 2.3.3 Termorresistencia

Es un sensor de temperatura formado por un arrollamiento de hilo fino del conductor adecuado, bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o cerámica. [7]

El material que formará el conductor será caracterizado por el llamado coeficiente de temperatura de resistencia, que es expresado a una temperatura específica y la variación de la resistencia en ohmios del conductor por cada grado que cambia su temperatura. [7]

La relación entre estos factores puede verse en la ecuación (2.2).

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (2.2)$$

Donde:

$R_0$ : Resistencia en ohmios a 0°C

$R_t$ : Resistencia en ohmios a t°C

$\alpha$ : Coeficiente de temperatura de la resistencia cuyo valor entre 0° y 100°C es de 0.00385

Los materiales que forman el conductor de la termorresistencia tienen las siguientes características. [7]

- Alto coeficiente de temperatura de la resistencia, ya que de este modo el instrumento de medida será muy sensible.
- Alta resistividad, ya que cuanto mayor sea la resistencia a una temperatura dada tanto mayor será la variación por grado (mayor sensibilidad).
- Relación lineal resistencia-temperatura.
- Rigidez y ductilidad, lo que permite realizar los procesos de fabricación de estirado y arrollamiento del conductor en las bobinas de la sonda, a fin de obtener tamaños pequeños (rapidez de respuesta).
- Estabilidad de las características durante la vida útil del material.

Los materiales que se usan normalmente en las sondas de resistencia son el platino, níquel y cobre, estos se diferencian principalmente por su rango de medición y por el comportamiento de la resistencia ante diferentes temperaturas como se muestra en la tabla 2 y figura 3.

Elemento	Intervalo útil de temperatura °C	Resistencia básica	Sensibilidad	Coefficiente	Ventajas	Desventajas
Platino	-260 a 850 °C	100Ω a 0°C 1000Ω a 0°C	0.39, 3.9	0.0375 a 0.003927	Mayor intervalo. Mejor estabilidad Buena linealidad	Coste
Níquel	-100 a 260 °C	10Ω a 25°C	0.04	0.00427	Buena linealidad	Baja resistividad
Cobre	-100 a 260 °C	100Ω a 0°C 120Ω a 0°C	0.62, 0.81	0.00618 a 0.00672	Bajo coste. Alta sensibilidad	Falta de linealidad, variaciones coeficiente de resistencia
Níquel-Hierro	-100 a 204 °C	604Ω a 0°C	3.13	0.00518 a 0.00527	Bajo coste. Muy alta sensibilidad	Relación reducida R100/R0

Tabla 2: Características de las termorresistencias

Fuente: [7]

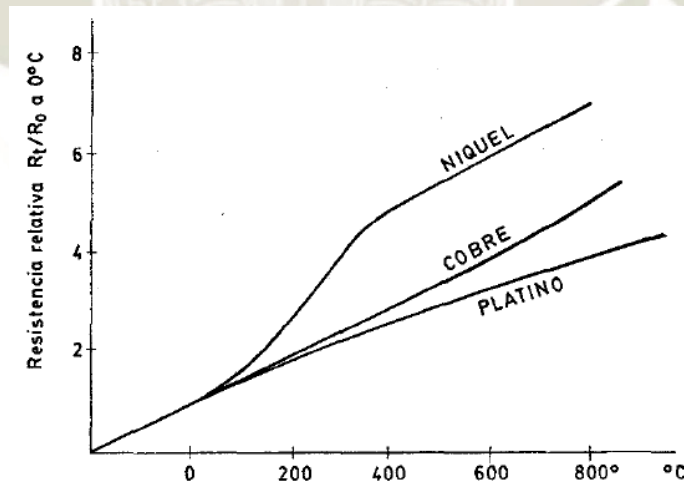


Fig. 3: Curvas de resistencia relativa de varios metales/temperatura

Fuente: [7]

## **2.4 Medidas de nivel**

### **2.4.1 Sensor Mecánico**

Una de las técnicas más comunes para la medición de nivel, particularmente de los fluidos líquidos, es el uso de un flotador que puede ascender y descender con las variaciones de nivel. Este flotador está conectado a un sistema de medición de desplazamiento secundario, como un potenciómetro o un LVDT.

### **2.4.2 Sensor eléctrico**

Existen varios métodos puramente eléctricos para medir nivel, por ejemplo, se puede usar la conductividad inherente del fluido para variar la resistencia detectada por la sonda. Otra técnica común es la aplicación de dos cilindros concéntricos en el tanque. El nivel del líquido ocupa parcialmente el espacio entre los cilindros, con aire en la parte sobrante. Este dispositivo actúa como dos capacitores en paralelo, uno con la constante dieléctrica de aire, y el otro con la de líquido. Por lo tanto, la variación de nivel de líquido generaría variaciones en la capacidad eléctrica medida entre los cilindros.

### **2.4.3 Sensor de ultrasonido**

Este tipo de medición por ultrasonido es una técnica no invasiva, es decir el sensor no estará en contacto con el fluido a medir. Su principio de funcionamiento se basa en la medición de la velocidad del sonido dentro del fluido. La medida es realizada por la disposición del conjunto emisor-receptor que puede estar en el interior o exterior al tanque, o en la misma tubería. Las variaciones del fluido son provocadas por los cambios de densidad.

### **2.4.4 Sensor de presión**

Este tipo de medición de nivel se basa en la diferencia de presiones entre la presión hidrostática del tanque y la presión atmosférica. La variación de temperatura en el fluido puede ocasionar una variación en la densidad, lo cual provocaría mediciones erróneas. Para solucionar este tipo de perturbaciones se hace el uso de un compensador de temperatura.

## **2.5 Elemento final de control**

Los elementos finales de control de un proceso juegan un papel muy importante para llegar a la regulación consignada. Estos realizan la función de variar la magnitud física a la cual se pretende llegar.

En un bucle cerrado de control este elemento final tiene tanto valor como el elemento primario (variable del proceso) y el controlador.

En la figura 4, se muestra un sistema de control de temperatura, en el cual se utiliza como elemento final de control unas resistencias calefactoras, así mismo se hace empleo de una termorresistencia como sensor de temperatura. Cada vez que se ingrese un nuevo valor en la consigna de temperatura a la cual se pretenda llegar, las resistencias calefactoras tendrán un diferente comportamiento para entregar la tanta energía como corresponda para llegar a ese punto de consigna o también llamado SETPOINT.

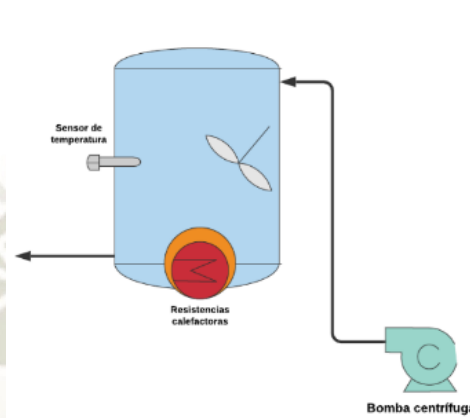


Fig. 4: Sistema de control de temperatura

Fuente: Elaboración propia

## 2.6 Control

Hay diferentes formas de efectuar el control de un proceso, esto va a depender de las especificaciones de la planta. En este caso, es la obtención de temperatura que el usuario ha establecido como parámetro de SETPOINT. En la siguiente gráfica indica los bloques que contemplan para lograr obtener la temperatura deseada.

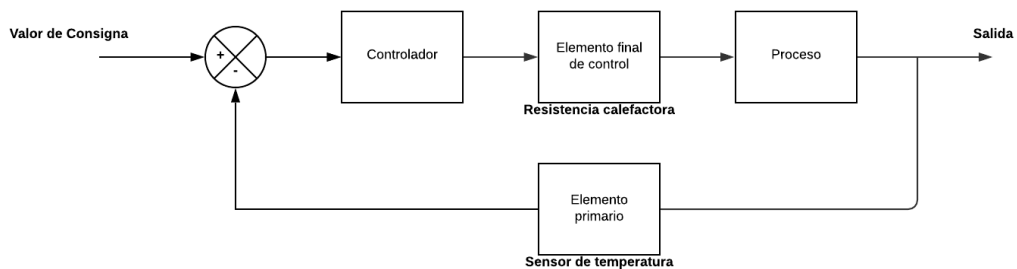


Fig. 5: Diagrama de control de temperatura

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5, se muestra que el valor de la consigna ingresa a un bloque, en el cual posteriormente se resta con el valor de salida, es decir el dato medido que obtuvo el sensor de temperatura. El resultado pasa por un controlador, el cual ajustará adecuadamente a elemento final de control, que finalmente regulará la temperatura del fluido del proceso, este puede aumentar o disminuir la energía calorífica en el sistema. El actuador es manipulado por el controlador para obtener un mejor ajuste del proceso.

Para alcanzar una mejor respuesta de este sistema, se utilizará un sistema de control de nivel independientemente del sistema de control de temperatura. El sistema de control de nivel permitirá ayudar a mantener la estabilidad, ya que de lo contrario la masa de agua que es calentada sería variable y en consecuencia el modelo matemático de la planta también lo sería. Ambos sistemas se encontrarán en lazo cerrado, el controlador puede ser un control PID, Predictor de Smith, lógica difusa, control óptimo o un control predictivo.

### **2.6.1 Control de temperatura**

En este sistema de control, la temperatura del fluido del tanque es la variable de proceso principal, esta actúa directamente con la operación de las resistencias calefactoras. El sensor de temperatura se encarga de percibir los cambios del grado de calor del fluido, mientras que la resistencia calefactora se comportará como un actuador.

La temperatura final del fluido del tanque de proceso se utiliza como variable de proceso del controlador del sistema principal. El algoritmo, y el ajuste que se haga a los parámetros del controlador permitirá obtener una mejor respuesta antes los cambios de proceso y las perturbaciones del sistema.

### **2.6.2 Control de nivel**

En este sistema de control secundario, el nivel del fluido del tanque es la variable de proceso, esta actúa directamente con la operación de una válvula de control que se encuentra al ingreso del tanque.

El nivel de fluido del tanque de proceso se utiliza como variable de proceso del controlador del segundo sistema. El ajuste que se realice en los parámetros del controlador secundario podrá hacerse para poder permitir una mejor respuesta antes las perturbaciones del sistema.

## **2.7 Control PI**

No existen controladores que actúen únicamente con la acción integral, estos siempre actúan en combinación con la acción proporcional. Ambas acciones se complementan,

originalmente ingresa en acción el control proporcional, en tanto que el control integral ejerce en un trascurso de tiempo. [8]

La introducción de la acción integral es la manera más sencilla de eliminar el error en régimen permanente. Para ciertas ocasiones el incluir una acción derivativa al controlador provocaría un problema ya que amplifica el ruido existente, como para el caso de procesos de tipo integrador. [9]

La función de transferencia del bloque de control PI responde a la ecuación:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = K_p * \left( \frac{1}{T_i s} + 1 \right) \quad (2.3)$$

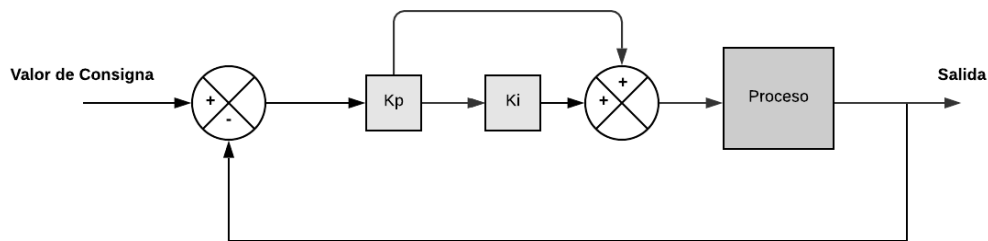


Fig. 6: Diagrama de bloques de control PI

Fuente: Elaboración propia

## 2.8 Control PID

El propósito de la acción derivativa es mejorar la estabilidad en lazo cerrado. El mecanismo de inestabilidad se puede describir intuitivamente de la siguiente manera. Debido a la dinámica del proceso, pasará algún tiempo antes de que se note un cambio en la variable de control en la salida del proceso. Por lo tanto, el sistema de control tardará en corregir un error. la acción de un controlador con acción proporcional y derivativa puede interpretarse como si el control se hiciera proporcional a la salida del proceso prevista, donde la predicción se realiza extrapolando el error por la tangente a la curva de error. [10]

“Si se puede obtener un modelo matemático de la planta, es posible aplicar diversas técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones en estado transitorio y en estado estable del sistema en lazo cerrado.” [11]

El regulador del control PID viene dado por la siguiente expresión:

$$\frac{Y(s)}{E(s)} = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.4)$$

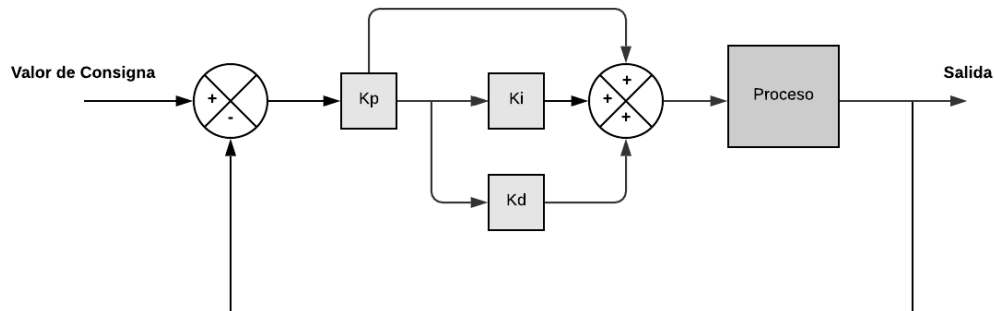


Fig. 7: Diagrama de bloques de control PID

Fuente: Elaboración propia

## 2.9 Predictor de Smith

Una de las grandes desventajas de los controladores clásicos, como es el caso del PID, es su respuesta frente a plantas con retardos considerables. El retardo de un sistema se puede originar por la ubicación de los actuadores y los sensores, así como un mismo tiempo de demora de respuesta de los actuadores. Una forma simple de reducir este efecto, es decrementar la ganancia del controlador con la finalidad de lograr esperar el resultado del comportamiento del actuador luego de un tiempo de retardo.

El retardo en lazo cerrado es un obstáculo para tener un comportamiento de bucle cerrado rápido y robusto, ya que este retraso reduce el margen de fase del sistema, lo que termina degradando el rendimiento del controlador. Para este tipo de problemas en los sistemas de control, Otto Smith, sugirió un compensador de tiempo muerto, que elimina satisfactoriamente el efecto de retardo de tiempo de la ecuación característica del sistema. Lo que posteriormente sería llamado el Predictor de Smith. [12]

Como el predictor de Smith tuvo un buen desempeño en plantas estables mono variable, varios investigadores buscaron formas de extender estos resultados al dominio discreto y también a sistemas multivariados con retraso simple. [13]

El predictor de Smith es un compensador de retraso, este tiene una modificación que se realizó años después de su investigación, llamado predictor de Smith filtrado, este permite tratar problemas integrales e inestables. Este tipo de control predictivo muestra una importancia para el rechazo de perturbaciones y la robustez del sistema. [12]

En 1957, Otto Smith propuso la estructura de control presentada en la figura 8, llamado el predictor Smith (PS).  $P_n(s) = G_n(s)e^{-L_n s}$  es el modelo nominal del proceso,  $G_n(s)$  es el modelo sin retraso, conocido en la literatura como un modelo rápido,  $L_n s$  es el tiempo de retardo del modelo nominal,  $C(s)$  es el controlador primario,  $P(s)$  es la planta real,  $u(t)$  es la señal de control,  $y(t)$  es la variable de proceso,  $q(t)$  es una perturbación de carga,  $n_1(t)$  es una perturbación de salida,  $n_2(t)$  es un ruido de medición,  $r(t)$  es la señal de referencia,  $p(t)$  es el error de predicción y,  $f(t)$  es la salida predicha. [12]

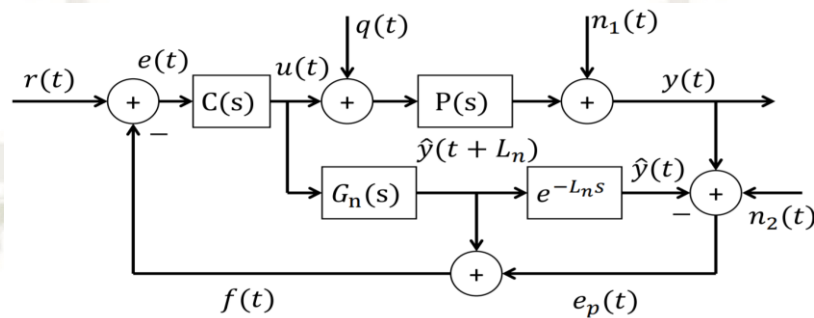


Fig. 8: Diagrama de bloques de la estructura de predictor de Smith

Fuente: [12]

## 2.10 Controlador Lógico Programable

Un controlador lógico programable, llamado también por sus siglas PLC, es un ordenador industrial que está destinado a cumplir tareas de control de procesos. Estos ordenadores cuentan con una memoria de almacenamiento en el cual son guardadas las instrucciones que cumplirán las funciones específicas por el programador.

Las funciones básicas de un PLC suelen ser: temporizadores, lógicas, secuenciales, de conteo y aritméticas. Estos equipos electrónicos trabajan de forma cíclica y puede ser interrumpida momentáneamente para realizar otras tareas consideradas más prioritarias, pero las características más importantes es la garantía de ejecución completa del programa principal.

### 2.10.1 Arquitectura del PLC

#### 2.10.1.1 CPU

La unidad central de procesamiento, es la parte más compleja e imprescindible del controlador lógico programable, es la unidad principal que dirige todo el funcionamiento de un sistema físico en el mundo real. Funciona debido a las especificaciones que el usuario lo

ha programado, el CPU se encarga de leer estas instrucciones programas y las ejecuta consultando el estado de entradas y salidas del PLC.

### **2.10.1.2 Entradas**

En la parte externa del PLC, se encuentran sus borneras, en los cuales es conectado la extensión del cable que proviene de los transductores.

#### **2.10.1.2.1 Entradas analógicas**

Perciben señales analógicas de los instrumentos de campo. Son señales emitidas por sensores que tienen la capacidad de medir magnitudes físicas y tener una variación continua con el tiempo. Por ejemplo, los termopares detectan cambios de temperatura en un proceso y luego es transducido a una señal eléctrica que también cambia de forma análoga conforme la temperatura varíe. Internamente en el PLC la señal analógica es transformado a una señal digital para que el procesador la pueda interpretar y procesar.

#### **2.10.1.2.2 Entradas digitales**

“También llamadas binarias u “on-off”, son las que pueden tomar sólo dos estados: encendido o apagado, estado lógico 1 ó 0. Los módulos de entradas digitales trabajan con señales de tensión. Cuando por un borne de entrada llega tensión, se interpreta como “1” y cuando llega cero tensión se interpreta como “0”. Existen módulos o interfases de entradas de corriente continua para tensiones de 5, 12, 24 ó 48 Vcc y otros para tensión de 110 ó 220 Vca. Los PLC modernos tienen módulos de entrada que permiten conectar dispositivos con salida PNP o NPN en forma indistinta. La diferencia entre dispositivos con salida PNP o NPN es como la carga (en este caso la carga es la entrada del PLC) está conectada con respecto al neutro o al positivo.” [14]

### **2.10.1.3 Módulo de salida**

Las salidas del PLC o de un módulo de expansión del PLC, también son clasificadas al igual que las entradas, es decir también abarca señales digitales y analógicas. Las salidas digitales pueden dividirse en salidas transistor y de relé. Las salidas transistor aplican una tensión de salida, su nivel de tensión para el estado “1” lógico y “0” lógico dependerá del fabricante. Mientras tanto la salidas relé son contactos secos que se encuentran en los bornes del PLC.

En el caso de la salida analógica, pueden configurarse como salidas de tensión analógico de 0 a 10Vdc, o salidas de corriente de 4 a 20mA. Esta configuración dependerá de la señal con la que es controlada el actuador.

#### **2.10.1.4 Fuente de alimentación**

Es el suministro de energía que alimenta al CPU, módulos y todos los componentes electrónicos del PLC. La mayoría de PLC trabajan con voltajes de corriente continua. La fuente de alimentación es un convertidor de voltaje AC a voltaje DC.

#### **2.10.1.5 Memorias de Controlador Lógico Programable**

Es el componente electrónico que está destinado para almacenar la información de manera pasajera o permanente. En los PLC existen dos tipos de memorias, volátiles (RAM) y no volátiles (EEPROM).

- Memoria RAM: Es una memoria de acceso aleatorio, sirve para guardar el avance del programa mientras se esté generando. Es de tipo volátil, por lo que, si la memoria pierde su suministro de energía, sus datos son borrados. [15]
- Memoria EEPROM: Esta memoria conserva el programa principal, aun cuando el suministro de energía es cortado o suspendido. Para guardar la información en esta memoria se necesita equipos de programación destinados para este propósito, así como se guarda información de forma eléctrica, el eliminado de ésta es también de forma eléctrica.

### **2.11 Microcontrolador PIC**

Un microcontrolador es un circuito integrado programable de bajo costo. Todo el sistema de computador forma parte de un pequeño circuito encapsulado de silicio. El microcontrolador tiene varias características similares a las de un ordenador estándar, ya que éste tiene una CPU (unidad central de procesamiento), memoria ROM (memoria sólo lectura), memoria RAM (memoria de acceso aleatorio), periféricos, puertos serie y paralelo. [16]

#### **2.11.1 Arquitectura de un microcontrolador**

El microcontrolador posee todos los componentes de un mismo computador por con características fijas.

### 2.11.1.1 Procesador

Existen dos tipos de arquitectura en los procesadores:

- Arquitectura Von Neumann.
- Arquitectura Harvard.

En estos momentos la arquitectura Harvard es la más utilizada en los microcontroladores por tener mejores capacidades y características. En la Arquitectura Harvard la memoria de datos y la de instrucciones son independientes. [17]



Fig. 9: Diagrama de bloques de la arquitectura Harvard

Fuente: [17]

### 2.11.1.2 Memoria de programa

El microcontrolador está diseñado para que en su memoria de programa se almacenen todas las instrucciones del programa de control. La lógica a ejecutar siempre es el mismo, por tanto, debe estar grabado de forma permanente. Esta característica de no volatilidad garantiza que la memoria mantenga su contenido aún sin la alimentación, de forma que el programa no necesita volver a ser cargado en el sistema cada vez que se utilice. [18]

La información almacenada en la memoria de programa debe ser grabada mediante un equipo llamado quemador o programador. Este equipo se conecta mediante un cable de comunicación a la computadora y al microcontrolador a grabar.

### 2.11.1.3 Memoria de datos

Es una memoria de lectura y escritura, denominados también registros de propósito general. Estos datos varían constantemente en función del tiempo, es por ello que se utiliza las memorias RAM, ya que son de tipo volátil, con lo cual los datos se borran en caso de que se corte la alimentación.

#### 2.11.1.4 Líneas de entrada y salida para periféricos

Sirven para comunicarse con el mundo exterior, se agrupan en conjunto y son denominados puertos. Para los microcontroladores de la familia de 12F del fabricante Microchip, estos puertos están constituidos por líneas digitales de entra/salida que operan entre 0 y 5 V.

#### 2.12 OPC (OLE for Process Control)

OPC es un estándar de comunicaciones accesible a cualquiera que pretenda intercambiar datos libremente, permite la comunicación de dos distintos softwares basados en el Sistema Operativo Windows y/o hardware de control de procesos, este tipo de comunicación se realiza a través de la arquitectura cliente/servidor. OPC permite arquitecturas de varios clientes y servidores, accediendo a los datos de forma local o remota y gestionando la información en tiempo real.

El gran propósito de la comunicación por OPC es la estandarización de comunicación entre varios dispositivos como sensores, actuadores, controladores y softwares, así como la integración de diferentes fabricantes en un mismo sistema de control, tal como se muestra en la figura 10. [19]

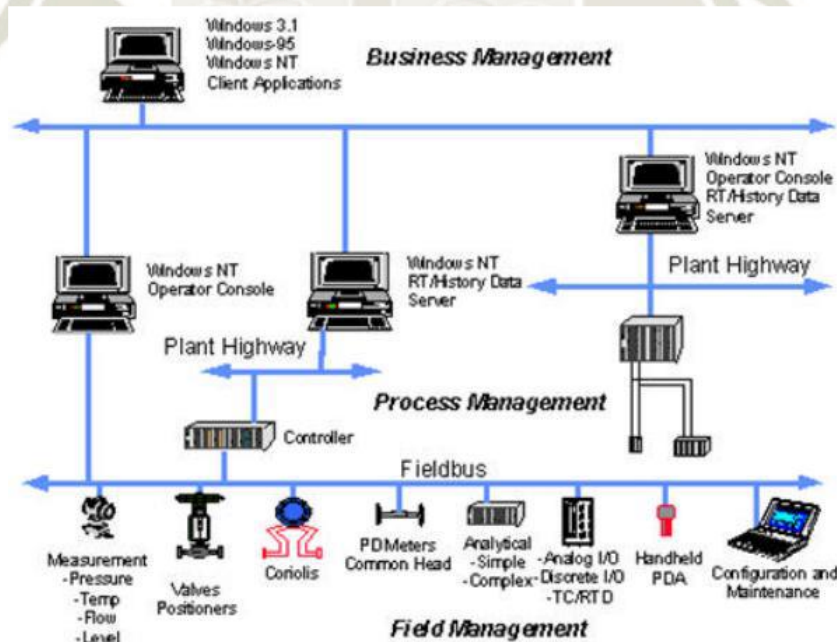
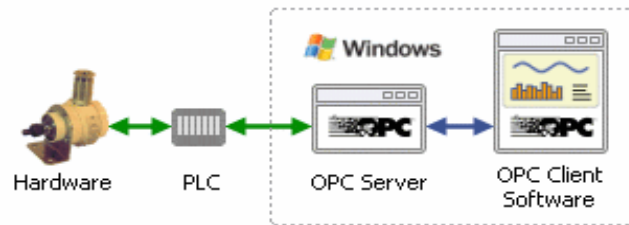


Fig. 10: Arquitectura de información para el control de procesos

Fuente: [19]

### 2.12.1 Arquitectura OPC cliente/servidor

Según la figura 11, se muestra que el servidor OPC sirve como un objeto COM, el cual permitirá la comunicación entre los procesos solicitados.



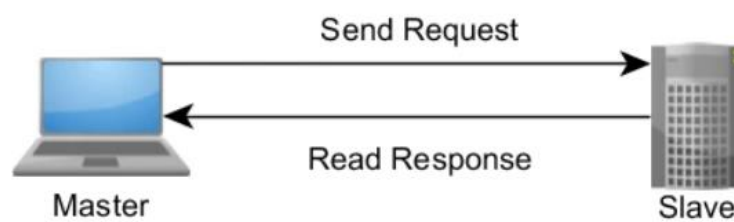
*Fig. 11: Arquitectura OPC cliente/servidor*

Fuente: [20]

### 2.13 MODBUS

El protocolo Modbus proporciona un método estándar de la industria que utilizan los dispositivos Modbus para analizar mensajes. Este protocolo fue desarrollado por Modicon, para sistemas de automatización industrial y controladores programables Modicon.

Los dispositivos Modbus se comunican utilizando una técnica maestro-esclavo en la que solo un dispositivo (el maestro) puede iniciar transacciones (llamadas consultas). Los demás dispositivos (esclavos) responden suministrando los datos solicitados al maestro, o realizando la acción solicitada en la consulta. Un esclavo es cualquier dispositivo periférico (transductor de E/S, válvula, controlador de red u otro dispositivo de medición) que procesa información y envía su salida al maestro mediante Modbus. [21]



*Fig. 12: Transferencia de datos entre maestro y esclavo*

Fuente: [22]

Los equipos que se encuentran integrados en la red Modbus tienen una dirección única, sin embargo, cualquier dispositivo tiene la capacidad de enviar ordenes Modbus, pero lo común es permitirlo solo al dispositivo maestro. Lo característico de esta comunicación Modbus es

que cada comando almacena la dirección del dispositivo del maestro. Cada uno de los mensajes enviados contiene información redundante para asegurar la recepción de este. Modbus usa codificación de tipo big-endian para las direcciones y datos, en el cual el MSB se encuentra primero, quiere decir que en una transmisión de datos el byte mas significativo es enviado primero, como se muestra en la figura 13.

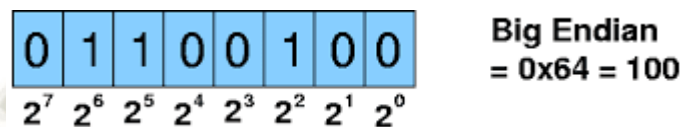


Fig. 13: Codificación de datos Big-Endian

Fuente: Elaboración propia

El modelo de datos en este tipo de comunicación se diferencia entre entradas digitales (DI), salidas digitales (coils), registros de entrada (IR) y registros de retención (HR). Las entradas y salidas almacena un bit, mientras que los otros registros ocupan 16 bits.

Bloque de memoria	Tipo de datos	Acceso de maestro	Acceso de Esclavo
Bobinas	Booleano	Lectura/Escritura	Lectura/Escritura
Entradas discretas	Booleano	Solo lectura	Lectura/Escritura
Registros de retención	Palabra sin signo	Lectura/Escritura	Lectura/Escritura
registros de entradas	Palabra sin signo	Solo lectura	Lectura/Escritura

Tabla 3: Direccionamiento de datos Modbus

Fuente: [22]

El protocolo de comunicación Modbus tiene dos versiones:

### 2.13.1 Puerto serie

#### 2.13.1.1 RTU

La comunicación Modbus RTU (Remote Terminal Unit) es una de la mas usadas en las industrias, en el cual sus mensajes contienen dos dígitos hexadecimales de 4 bits, una de sus mayores ventajas es que en los mensajes transmitidos son de flujo continuo, su campo de comprobación de error es la Comprobación Cíclica Redundante (CRC). [23]

### 2.13.1.2 ASCII

En la comunicación ASCII (American Standard Code for Information Interchange), un mensaje transportado contiene dos caracteres ASCII, lo cual es 1 byte u 8 bits. Su principal ventaja es que en el envío de caracteres pueden tener hasta un un segundo como intervalo de tiempo con el fin de lograr obtener cero errores en la transferencia. Su campo de comprobación de error es la comprobación Longitudinal Redundante (LRC). [23]

## 2.13.2 Ethernet

### 2.13.2.1 Modbus TCP/IP

Este tipo de protocolo de comunicación se encuentra diseñado a través de una red ethernet, se caracteriza por ser muy simple de implementar en cualquier dispositivo que soporte sockets TCP/IP. Comúnmente el puerto por defecto es el 502. En la comunicación MODBUS TCP/IP, TCP es quien se asegura que los paquetes de datos sean recibidos correctamente, mientras que IP se asegura que los mensajes sean abordados correctamente. Lo que da a entender que esta combinación de TCP/IP es un protocolo de transporte. Modbus es quien le define el significado e interpretación de los datos. [24]



**CAPITULO III**  
**DESARROLLO DE INGENIERIA**

### 3.1 Memoria descriptiva

- a) Diseño del esquema conceptual del módulo de control de temperatura.
- b) Medidas de los tanques de almacenamiento y de proceso. Ubicación de conectores, niples, mangueras para los actuadores y sensores.
- c) Diseño de circuitos de acondicionamiento de los sensores de temperatura y de presión diferencial y de las resistencias calefactoras.
- d) Pruebas e instalación de sensores y actuadores en el módulo.
- e) Ubicación de los equipos de control, tarjetas electrónicas, llave termomagnética, relés, fuente de alimentación, dimensionamiento de tablero de control y cableado.
- f) Instalación de tubería y válvulas controladas y manuales.
- g) Comunicación de PLC con Simulink, a través de Modbus.
- h) Desarrollo de la lógica de control previa para la operación del sistema de control principal y secundaria.
- i) Identificación del sistema de control de nivel a través de Simulink. Sintonización del controlador a través del método de Ziegler and Nichols.
- j) Identificación del sistema de control de temperatura a través de Simulink.
- k) Sintonización del control PI, PID a través del método de Ziegler and Nichols, pruebas en la estructura del predictor de Smith del sistema de control de temperatura.
- l) Pruebas de funcionamiento.

### 3.2 Diseño del sistema de control de temperatura

En la figura 14, se observa el control de temperatura que se realiza dentro del tanque de agua (T-1). El sistema utiliza el ingreso de agua constante, este siempre retorna al tanque de agua inferior. No obstante, para conservar la estabilidad en el sistema, es útil obtener un volumen ininterrumpido de agua en el tanque T-1, puesto que se encontraría con el problema de la variación del modelamiento matemático de la planta por el cambio concurrente de la masa de agua. El volumen de agua se logra a través de la precisión del nivel en el tanque. El tipo de proceso del módulo, es mantener la válvula manual HV-2 abierta, lo cual permitirá recircular el agua al tanque T-1, y posteriormente ser controlado el nivel por la válvula proporcional LCV-1.

La resistencia calefactora provee el flujo de calor al sistema, obteniendo así un fluido a temperatura predeterminada a la salida del tanque. Para una mejor medición de la temperatura de agua, se considera el uso de un agitador (MM-1) lo cual permitirá obtener un excelente y rápido intercambio térmico del agua, provocando así también una eficiente

medición del sensor de temperatura. El tanque T-2 funciona como almacenamiento de agua para el suministro de la bomba.

En el sistema de control de nivel, se considera el uso de una estrategia de control de lazo por realimentación con un controlador PI para aumentar la robustez de dicho sistema. De tal manera en el sistema de control de temperatura se considera usar también una técnica de control, para ello se hará la comparación entre los controladores más usados en la industria y un control avanzado como el PI, PID, y el PI + Predictor de Smith para después de ello, decidir cuál es el control más adecuado para el sistema.

El sensor de nivel y temperatura recoge datos de los sensores y los envía a la computadora para la aplicación de las técnicas de control ejercidas en Simulink, este envío de datos es llevado mediante un medio de comunicación a través del PLC, quien se encarga de digitalizar la lectura. El programa en Simulink compara la medición las variables de proceso, luego este envía una señal análoga al PLC para la activación de la válvula de control y resistencia calefactora. De esta manera es como se consigue controlar estas magnitudes físicas en el sistema.

El comportamiento del sistema y el ajuste de parámetros se visualizarán en una interfaz gráfica hecha en Matlab, para lo cual también se podrá sintonizar el controlador, ajustar el punto de consigna, monitorear valores de las variables de proceso, la salida del controlador y valores actuales de los actuadores. El uso del agitador y el motor de la bomba trabajará de forma independiente, por lo tanto, el usuario de la planta tendrá la decisión de elegir la operatividad de los dos actuadores.

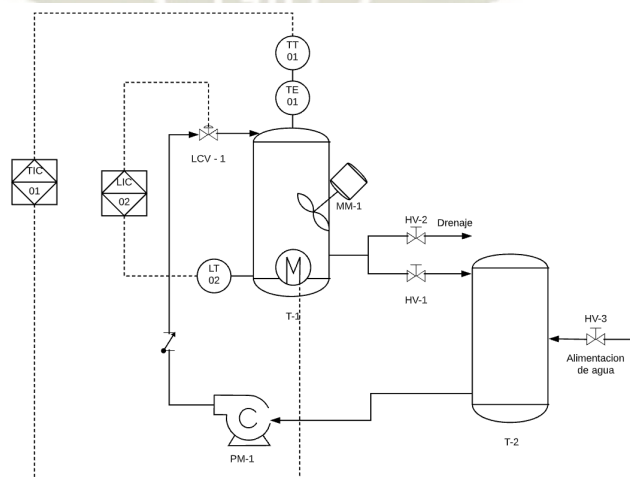


Fig. 14: Plano P&ID del módulo educativo del sistema del control de temperatura

Fuente: Elaboración propia

### 3.3 Diseño de tanque

Considerando que el módulo educativo de automatización y control es un proceso a escala de dos variables independientes. Se asume que los tanques de almacenamiento y de proceso deben contar con las siguientes medidas:

Tanque de proceso (T-1):

- Volumen:  $0.05775m^3$
- Perímetro:  $1.70 m$
- Área total:  $0.925 m^2$

Tanque de almacenamiento (T-2):

- Volumen:  $0.078 m^3$
- Perímetro:  $1.58 m$
- Área total:  $1.102 m^2$

Para la elaboración del tanque, se toma en consideración la temperatura máxima del agua a la cual va a estar expuesto en operación. En este caso será de  $50^{\circ}C$ . En la siguiente tabla se realiza la comparación de los materiales posibles para la construcción del tanque.

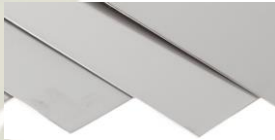

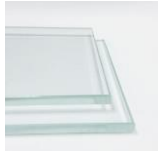
Material	Temperatura máxima	Costo	Imagen
Inox 304	$870^{\circ}C$	S./ 1500	
Acrílico	$114^{\circ}C$	S./ 450	
Vidrio templado	$200^{\circ}C$	S./ 750	

Tabla 4: Comparación de materiales de construcción de tanque

Fuente: [25], [26], [27]

De la tabla 4, se observa que los tres materiales de construcción cumplen con el requisito de resistencia temperatura a 50°C, en base a ello, se opta por elegir el acrílico ya que este es de menor precio. Ambos tanques son realizados con el mismo material, el cual es resistente a temperaturas mayores a 100°C.

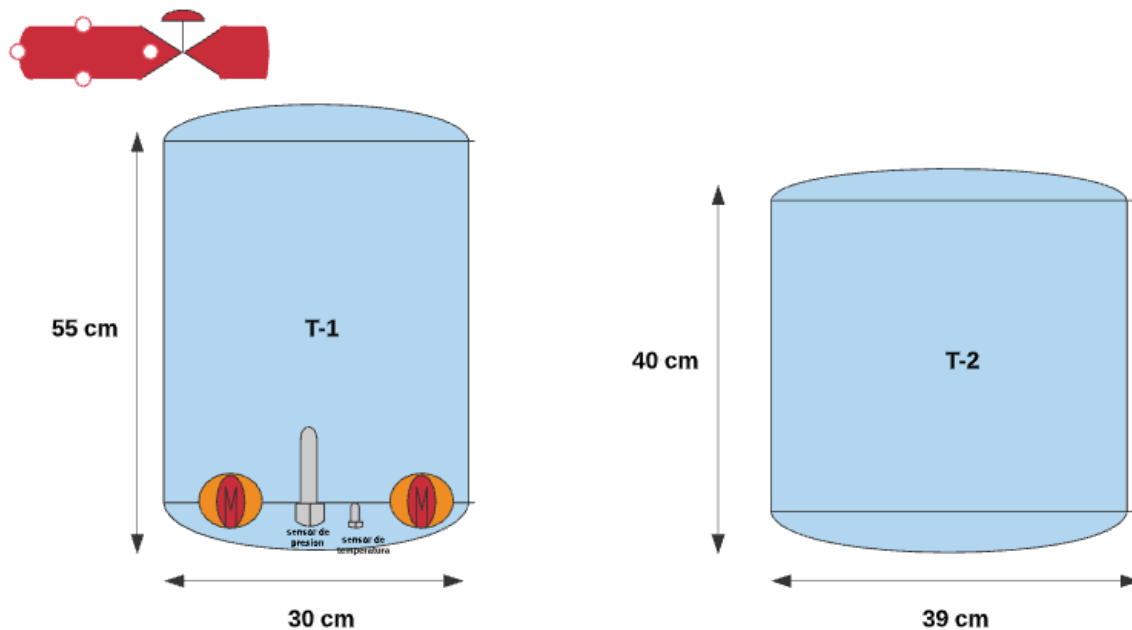


Fig. 15: Esquema básico de los tanques de almacenamiento

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4 Actuadores

#### 3.4.1 Válvula de control

La válvula de control es operada por una tarjeta electrónica que trabaja por PWM, esta tarjeta de control se encuentra acondicionada y estandarizada para trabajar con señales análogas, con las cuales un PLC se puede comunicar.

Existe una variedad de tipo de válvulas de control, las cuales pueden ser comandadas por energía eléctrica, neumática e hidráulica. El modulo educativo cuenta únicamente con energía eléctrica, así que la válvula debe ser también capaz de recibir este tipo de suministro de energía, mientras que su cuerpo mecánico deberá tener dos vías, controlada a través de señales de tensión de 0 a 10 VDC y con una capacidad de alimentación menor a 24 VDC, ya que son las señales y tensiones de suministro más comunes que utilizan los PLC. Así mismo debe de contar con una conexión de tipo NPT ya que es el conector más comercial en el mercado, y soportar fluidos como el agua a una temperatura menor a 50°C.

En la tabla 5, se realiza la comparación de tres tipos de válvulas que se encontraron en el mercado local.

Actuador	Características	Costo	Imagen
Válvula HSH-FLO A20-M20- B2-C	Temperatura de operación: 0-100°C Voltaje de alimentación: 9-24 VDC Señal de control: 0 a 10 VDC Conector: ¾” NPTF Tipo: Bola	S./ 500	
Válvula TFV4	Temperatura de operación: -40 a 80°C Voltaje de alimentación: 24 VAC/DC Señal de control: 4 a 20 mA Conector: ¾ G Tipo: Bola	S./ 1300	

Tabla 5: Comparación de válvulas de control proporcional

Fuente: [28], [29]

De la tabla 5, se verifica que la válvula HSH-FLO guarda relación con las características necesarias para el módulo de control, en cuanto a la válvula TFV4, es controlada por lazo de corriente de 4 a 20 mA, en consecuencia se tendría que adquirir un módulo de expansión de salidas análogas de corriente para el PLC, además de ello, su tipo de conector al proceso es BSP o G.

Es por ello, que se elige la válvula HSH-FLO A20-M20-B2-C que es operada por un motor que trabaja en proporción a la salida de una señal analógica de un controlador. Esta válvula es de tipo bola, lo cual garantiza un movimiento de apertura y cierre con baja torsión.

El accionamiento que se emplea tiene una gran aplicación en HVAC, tratamiento de aguas, procesos químicos, proyectos de control en termas solares, drenajes de compresor de aire.

Las características principales del actuador son las siguientes:

Especificaciones técnicas de la válvula de control	
Modelo:	A20-M20-B2-C
Alimentación:	9 -24 VDC
Tipo de rosca de conector y dimensión:	NPTF ¾"
Señal de control:	0 – 10V
Material del cuerpo de válvula:	Latón
Grado de protección de ingreso:	IP-65
Potencia máxima:	2W
Presión máxima de trabajo:	145 PSI
Temperatura de medio:	0 – 100°C
Tiempo de apertura/cierre	3 a 5 segundos.

*Tabla 6: Características principales de la válvula de control*

Fuente: [30]



*Fig. 16: Válvula de control proporcional*

Fuente: [30]

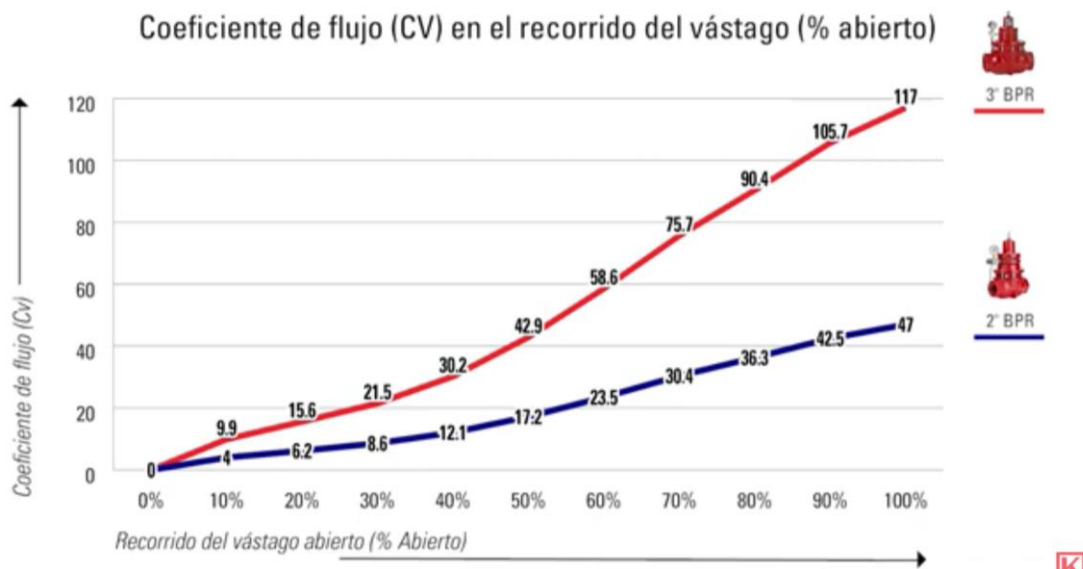
Para determinar el flujo del líquido o gas que pasa a través de la válvula de control se hace uso de la ecuación (3.1).

$$f = Cv \sqrt{\frac{\Delta P}{SG}} \quad (3.1)$$

Donde:

- $f$ : flujo del líquido.
- $C_v$ : Coeficiente o capacidad de la válvula.
- $SG$ : gravedad específica del fluido.
- $\Delta P$ : diferencia de presión de entrada y salida de la válvula.

Para regular un flujo, la capacidad de una válvula de control varía desde cero, cuando la abertura está cerrada, a un máximo cuando está completamente abierta, es decir, cuando la fracción de abertura de la válvula es uno o 100 %. La capacidad de flujo de una válvula de control se determina por su “Factor de Capacidad o Coeficiente de la Válvula,  $C_v$ , que es una constante específica de una válvula que depende de sus características, principalmente tipo y tamaño. Por definición, el coeficiente de una válvula es el flujo en galones por minuto (gpm) de agua que fluyen a través de la válvula con una caída de presión de 1 psi. [31]



*Fig. 17: Coeficiente de flujo - Recorrido del vástago*

Fuente: [32]

### 3.4.2 Resistencia calefactora

Las resistencias calentadoras convierten energía eléctrica en calor. Procedimiento descubierto por James Prescott Joule cuando en 1841 al hacer circular corriente eléctrica a través de un conductor se liberó calor por encontrar resistencia. [33]

En la actualidad las resistencias calentadoras se utilizan para infinidad de aplicaciones. La gran mayoría de ellas son fabricadas con un alambre de una aleación de níquel (80%)

y cromo (20%). Esta aleación soporta temperaturas muy altas (1000° C), es resistivo (condición necesaria para generar calor), es muy resistente a los impactos y es inoxidable. [33]

En la implementación del módulo de control de temperatura, es necesario el uso de un elemento que realice la disipación de transferencia de calor, para ello se emplea las resistencias calefactoras de inmersión ya que son de fácil instalación y de bajo costo.

Para la elección de la resistencia calefactora, se tiene en consideración los siguientes parámetros:

- Volumen de agua (V): 36.75 litros
- Calor específico del agua a 20°C ( $C_p$ ):  $4.182 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C}$
- Densidad del agua ( $\rho$ ):  $998 \frac{Kg}{m^3}$
- Gradiente de temperatura ( $\Delta T$ ):  $25^{\circ}C$
- Tiempo de calentamiento (t): 720 segundos o 12 minutos

Con los datos anteriores se aplica la ecuación de transferencia de calor en un determinado tiempo.

$$V = \frac{m}{\rho} \tag{3.1}$$

$$\Delta h = C_p * \Delta T \tag{3.2}$$

$$Q(t) = \frac{m * \Delta h}{t} \tag{3.3}$$

$$Q(t) = \frac{V * \rho * C_p * \Delta T}{t} \tag{3.4}$$

$$Q(t) = \frac{0.03675 * 998 * 4.182 * 25}{720}$$

$$Q(t) = 5.32 \text{ KW}$$

La potencia de las resistencias debe ser de 5.32 KW, lo cual demandaría una circulación de corriente muy alta para la tarjeta de etapa de potencia. En el mercado local, los valores de los componentes electrónicos son muy limitados, en consecuencia se opta por implementar dos resistencias calefactoras de 3 KW, en lo cual beneficiaría la división de corriente en los componentes electrónicos de la tarjeta de potencia.

Existen muchos otros materiales exóticos empleados para hacer resistencias calentadoras: platino, disiliciuro de molibdeno y el carburo de silicio. El carburo de silicio tiene un punto de fusión de  $2730^{\circ}\text{C}$ , lo usan los calentadores de gas para detectar llama. [33]

Por consiguiente se opta el uso de las resistencias de Ni Cr, ya que además de cumplir con los requerimientos del módulo de control, son de fácil adquisición en el mercado.

Las características de la resistencia calefactora encontradas en el mercado local son:

- Material: Níquel y Cromo
- Diámetro de conexión: 1"
- Temperatura máxima:  $90^{\circ}\text{C}$



*Fig. 18: Resistencias calefactoras de Ni Cr*

Fuente: [33]

#### **3.4.2.1 Acondicionamiento para el control de resistencia calefactora**

Debido a que las resistencias calefactoras utilizan un voltaje de corriente alterna para su operación, se considera el diseño de circuitos de acondicionamiento que permitan la regulación de calor que producen estas resistencias en proporción al voltaje de la salida análoga del PLC. Para este propósito se usa el control por ángulos de disparo que se realiza a través de un interruptor capaz de conmutar la corriente alterna, el dispositivo que puede realizar tal función es el TRIAC, el cual se activará después que se produzca el cruce por cero, seguidamente de ello se activará y se sincronizará la programación establecida en un microcontrolador. En la figura 19 se muestra el esquema aplicado al módulo de control.

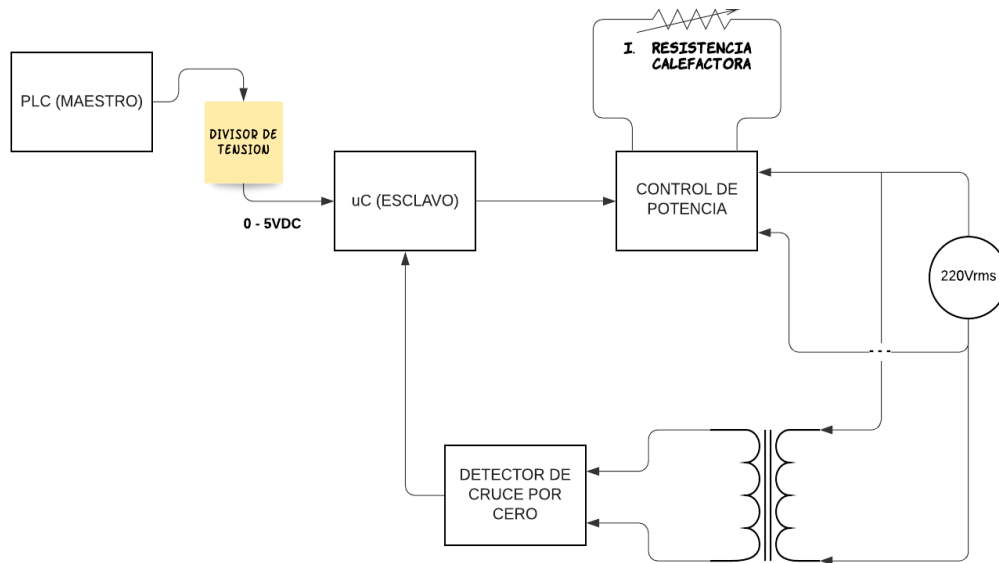


Fig. 19: Diagrama del circuito de acondicionamiento de la resistencia calefactora

Fuente: Elaboración propia

#### 3.4.2.1.1 Detector de cruce por cero

Para la correcta regulación de potencia de disipación de la resistencia calefactora, es necesario obtener los momentos en que la señal eléctrica de 220 VAC pasan por cero, ya que el microcontrolador necesita recoger esta información para poder trabajar de forma sincronizada con la energía eléctrica. Este cruce por cero será entregado al microcontrolador en forma de una onda cuadrada con la misma frecuencia de la red eléctrica, es decir 60 Hz, dicha señal será leída como entrada digital.

El circuito de detección de cruce por cero se observa en la figura 20. Se coloca un transformador que reduce la tensión de 220 a 12 VAC, y a su vez mantiene la frecuencia de 60 Hz. Este voltaje atraviesa un rectificador de onda completa, quedando así solo la onda positiva de la tensión de ingreso.

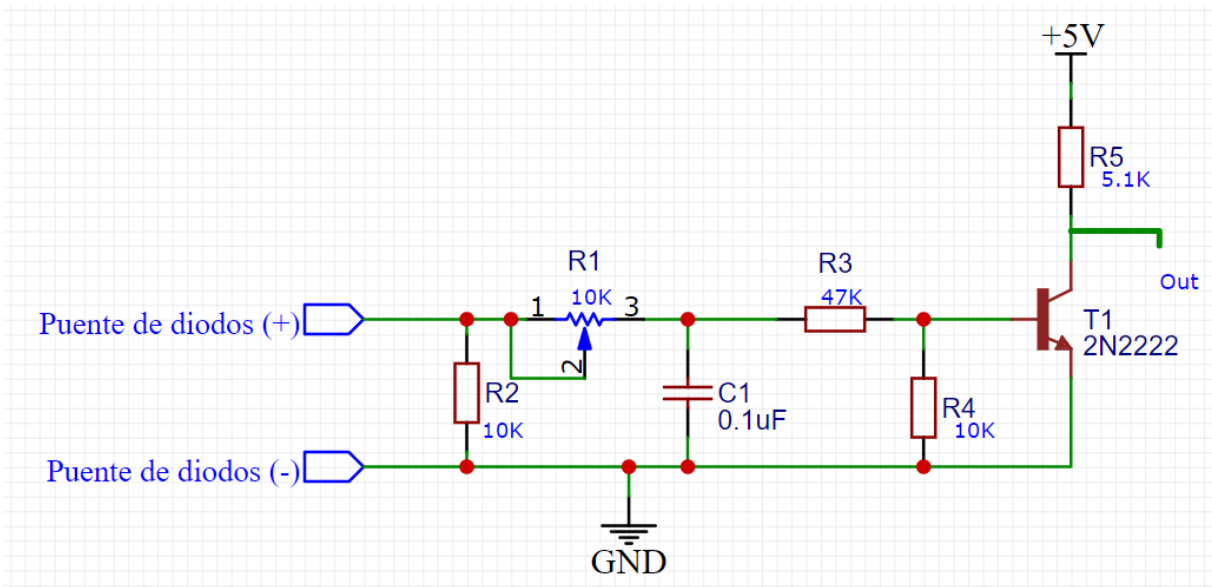


Fig. 20: Diagrama del circuito de cruce por cero

Fuente: [34]

### 3.4.2.2 Microcontrolador

Se utiliza un microcontrolador para variar el ángulo de disparo del TRIAC que se encuentra en el control de disipación de las resistencias calefactoras. El microcontrolador recibe como señal de entrada digital la sincronización de la red eléctrica, y a su vez una señal de entrada analógica de 0 a 5 VDC, que es recibido por el PLC a través de un divisor de tensión. Es utilizado un circuito previo a la entrada análoga del microcontrolador, ya que las salidas del PLC son de 0 a 10 VDC. Este voltaje de salida sirve para regular la potencia de las resistencias calefactoras. El microcontrolador a elegir debe ser suficientemente capaz de obtener las señales análogas con una excelente resolución y así mismo, tener la configuración de interrupción externa por cambio de estado.

Hoy en día existen muchos diferentes tipos de microcontroladores en el mercado, siendo los más reconocidos los fabricados por la empresa de Microchip. En la siguiente tabla se visualiza la comparación entre varios uC. El microcontrolador a elegir, debe tener una entrada análoga para la señal de comando del PLC, las dos entradas digitales deben ser para la interrupción del cruce por cero y el RESET del microcontrolador, así mismo también debe de contar con una salida digital para salida de control hacia los TRIACs.




Actuador	Características	Costo	Imagen
PIC 12F683	Voltaje de alimentación: 2-5.5 VDC 4 canales A/D de 10 bits 256 bytes de memoria Rango de temperatura (° C): -40 a 125 1 Módulo de captura / comparación / PWM estándar (CCP). Oscilador interno de precisión de 8 MHz	S./ 5	
PIC 18F4550	Voltaje de alimentación: 4.2-5.5 VDC 13 canales A/D de 10 bits 2 KB de memoria Rango de temperatura (° C): -40 a 125 2 Módulos de captura / comparación / PWM estándar (CCP). Comunicación I2C y SPI Oscilador interno de precisión de 48 MHz	S./ 28	
PIC16F628	Voltaje de alimentación: 3.3-5.5 VDC 6 canales A/D de 10 bits 1 KB de memoria Rango de temperatura (° C): -40 a 125 1 Módulo de captura / comparación / PWM estándar (CCP). Comunicación UART Oscilador interno de precisión de 20 MHz	S./ 12	

Tabla 7: Diferencia de Microcontroladores

Fuente: [35]

La clasificación de microcontroladores de este fabricante varía en sus robustez, configuraciones y características que pueda ofrecer para las diferentes gamas del PIC. Ya que la aplicación para el modulo no requiere de una memoria muy grande, ni tampoco es muy imprescindible la precisión de los pulsos enviados hacia el TRIAC; es decir con una resolución de 8 o 10 bits el programa puede trabajar sin ninguna complicación. Se observa también que los microcontroladores PIC16F628 y 18F4550 cuentan con un gran número de

puertos de entrada y salida, así como el puerto para interrupción por cambio de estado, además de la ventaja de tener un tipo de comunicación con sus periféricos. En consecuencia se elige el PIC 12F683 por tener los requerimientos planteados y ser de bajo costo.

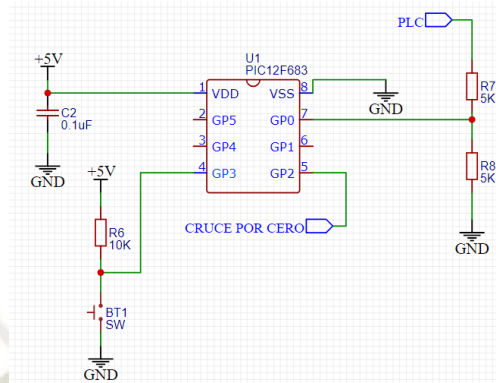


Fig. 21: Diagrama del circuito de etapa de control de las resistencias calefactoras

Fuente.: Elaboración propia

Considerando que el voltaje de salida del PLC es de 10V, se realiza el siguiente cálculo:

$$V_{GP0} = \frac{V_{in} * R_8}{R_7 + R_8} \quad (3.5)$$

$$V_{GP0} = \frac{10 * 5K}{10K}$$

$$V_{GP0} = 5V$$

### 3.4.2.3 Control de potencia

Después de haber obtenido la señal de control de activación del TRIAC, es útil el aplicar un dispositivo que posibilite aislar la etapa de control y de potencia. Uno de los métodos mas empleados para este tipo de casos, es el uso de un optoacoplador de tipo fototriac, como se muestra en la figura 22.

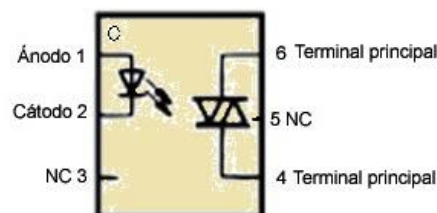


Fig. 22: Partes de un fototriac

Fuente: [36]

En la figura 20, se observa que la señal que ingresa al optotriac es por medio de un transistor que se encuentra configurado para que opere en corte y saturación. Se emplea este componente electrónico, ya que el microcontrolador no puede suministrar la corriente indispensable al diodo emisor de luz del opto aislador.

Considerando que el  $V_{CE_{sat}} = 0.3 \text{ VDC}$ ,  $V_{BE_{sat}} = 0.7 \text{ VDC}$ ,  $h_{fe} = 20$ , la caída de tensión de led es  $1.1 \text{ VDC}$  y que su corriente de operación es  $10 \text{ mA}$ , se realizaría el calculo de las resistencias  $R_9$  y  $R_{10}$  a través de las ecuaciones (3.7) y (3.8)

$$I_B \geq \frac{I_C}{\beta} \quad (3.6)$$

$$R_9 = \beta * \left( \frac{V_{bb} - V_{be}}{I_C} \right) \quad (3.7)$$

$$R_9 = 20 * \frac{5 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{0.01 \text{ A}}$$

$$R_9 = 8.6 \text{ K}\Omega$$

$$R_{10} = \left( \frac{V_{cc} - V_{LED} - V_{CE}}{I_C} \right) \quad (3.8)$$

$$R_{10} = \frac{5 \text{ V} - 1.1 \text{ V} - 0.2 \text{ V}}{0.01 \text{ A}}$$

$$R_{10} = 370 \Omega$$

Los valores de las resistencias obtenidas no son comerciales, por lo tanto, se escoge  $R_9 = 8.2 \text{ K}\Omega$  y  $R_{10} = 330 \Omega$  para el diseño del circuito. Seguidamente se selecciona una resistencia de  $330 \Omega$  para  $R_{11}$ , lo cual garantiza la limitación de corriente permitida en el TRIAC del optoacoplador. En la hoja de datos del MOC3021 se sugiere usar dos redes Snubber con los valores de los capacitores y resistencias recomendados también por el fabricante.

Para la elección del TRIAC, se debe de considerar la corriente máxima de operación de las resistencias calefactoras de  $3 \text{ KW}$ , para ello se considera un factor de seguridad de  $1.2$  a la corriente que circulará por las tarjetas, tal como se observa en la ecuación (3.9).

$$I_{max} = \frac{3000 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 13.63 \quad (3.9)$$

$$I_{max} = 1.2 * 13.63 \text{ A} = 16.35 \text{ A}$$

En la siguiente tabla se realiza la comparación de varios TRIACs, considerando las especificaciones eléctricas halladas a través de la ecuación 3.9.

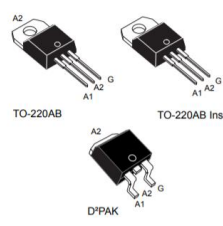
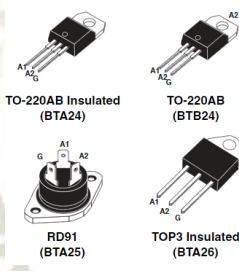
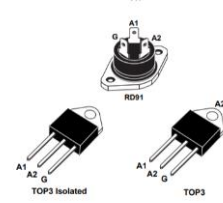
Dispositivo	Características	Costo	Imagen
BTA-16	$I_{T(RMS)}$ : 16 A $I_{GT}$ : 50 mA $V_{DRM}$ : 400 V Tipo de encapsulado: TO-220	S./ 4	
BTA-26	$I_{T(RMS)}$ : 26 A $I_{GT}$ : 50 mA $V_{DRM}$ : 600/800 V Tipo de encapsulado: TO-220, TOP3 y RD91	S./ 10	
BTA-40	$I_{T(RMS)}$ : 40 A $I_{GT}$ : 50 mA $V_{DRM}$ : 600/800 V Tipo de encapsulado: TOP3 Y RD91	S./ 19	

Tabla 8: Comparación de especificaciones eléctricas de TRIACs

Fuente: [37]

De la tabla 8, se observa que el TRIAC BTA16, soporta una corriente de operación de 16A, para lo cual se estaría trabajando en el límite del factor de seguridad, en cambio los TRIAC BTA26 y BTA40, cumple con las características necesarias para la aplicación, no obstante, estos se diferencian por su costo y sobredimensionamiento. Es por ello que se selecciona el TRIAC BTA-26. Este interruptor de potencia cumple con las especificaciones calculadas, ya que soporta corrientes hasta 26 A. Además de ello, el tipo de encapsulado permite tener una gran separación entre sus pines, lo cual favorece colocar un ancho considerable en las pistas de la tarjeta.

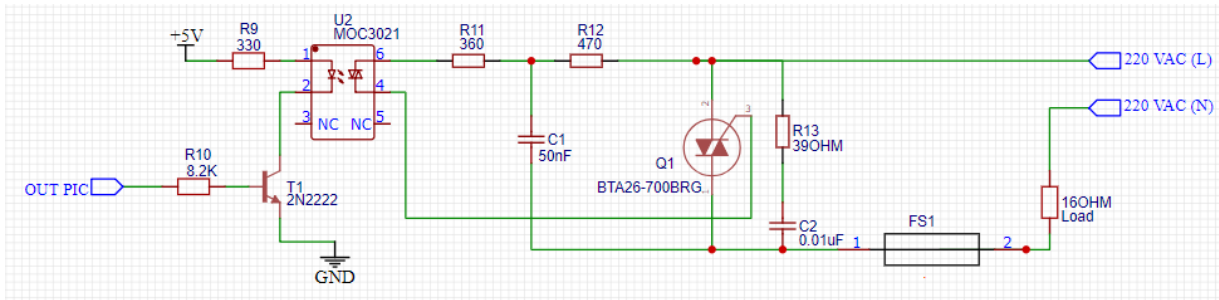


Fig. 23: Circuito de etapa de control y potencia de la resistencia calefactors

Fuente: [38]

Se observa en la tabla 5, que para una corriente de 10 A, el ancho de la pista es de 7 mm, y la separación entre pines del TRIAC BTA26 de encapsulado tipo TOP3 es de 5.4mm, lo que para el diseño del ancho de las pistas para una corriente mayor a 16 A causaría el corto circuito entre sus pines, es por ello que se realiza el reforzado de las pistas con cobre de calibre 12.

Anchura de la pista	Tipo de corriente que circula por la pista
7 milímetros	Para corriente de 10 A
5.2 milímetros	Para corriente de 8 A
2.7 milímetros	Para corriente de 5 A
2 milímetros	Para corriente de 4 A
1.3 milímetros	Para corriente de 3 A
0.78 milímetros	Para corriente de 2 A
0.25 milímetros	Para corriente de 500 mA

Tabla 9: Ancho de pista del PCB, según la corriente que circula

Fuente: [39]

Dado que los componentes electrónicos en funcionamiento llegan a disipar calor, se procede a calcular este factor a través de la siguiente información entregada en la hoja de datos del TRIAC.

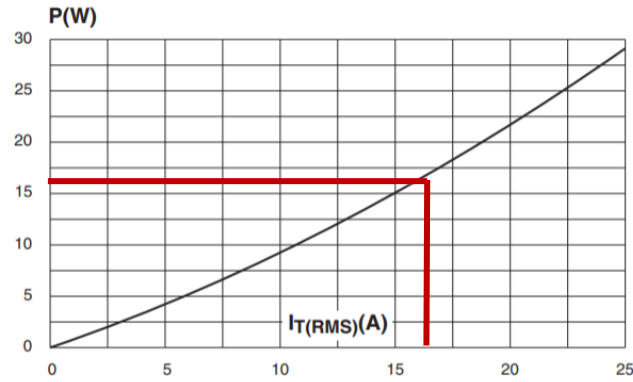


Fig. 24: Curva de disipación de potencia (W) vs. corriente RMS (A)

Fuente: [40]

Según la corriente máxima de operación del TRIAC, se obtiene que la máxima potencia de disipación es de aproximadamente 17W.

Para el cálculo del disipador se realiza a través de los siguientes datos suministrados por la hoja de datos del TRIAC BTA-26:

- Potencia de disipación.

$$P = 17 \text{ W}$$

- Resistencia térmica entre la unión y capsula TOP 3.

$$R_{th(j-c)} = 0.6 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

- Resistencia térmica entre la capsula y el disipador.

$$R_{th(c-d)} = 1 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

- Rango de temperatura en operación de la unión.

$$T_j = -40 \text{ a } 125 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

- Temperatura ambiente.

$$T_a = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Temperatura máxima de la unión en operación.

$$T_j = 70 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La resistencia térmica del disipador es obtenida mediante la ecuación (3.10).

$$R_{th(d-a)} = \frac{T_j - T_a}{P} - R_{th(j-c)} + R_{th(c-d)} \quad (3.10)$$

$$R_{th(d-a)} = \frac{70 - 25}{17} - 0.6 + 1$$

$$R_{th(d-a)} = 3 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

Por consiguiente, el valor de la resistencia térmica del disipador debe ser de  $3 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$ . Adicional a la implementación del disipador con estas características, se le agrega un sistema de convección forzada para lograr reducir su resistencia.

### 3.4.3 Agitador

El proceso físico llamado transferencia de calor se produce siempre cuando existe una diferencia térmica entre los dos diferentes fluidos o materiales que se encuentran en contacto, este efecto provoca que haya varias temperaturas en diferentes zonas de la masa del líquido. Por consiguiente, se considera el uso de un sistema de homogenización de temperatura dentro del tanque de proceso. Se implementa un motor que tenga en el eje unas hélices que permitirá mantener la temperatura uniforme en toda la masa del agua dentro del tanque.

Existen agitadores industriales de un gran costo, pero para el caso un módulo educativo se determina la implementación de un agitador, usando un motorreductor DC, un eje, un acople, y hélices.

Para la correcta selección del motor, se considera la potencia que requiere el sistema de homogenización de temperatura. Por lo tanto, se calcula el número de Reynolds con los siguientes parámetros especificados:

- Densidad del agua ( $\rho$ ):  $998 \frac{Kg}{m^3}$
- Viscosidad dinámica de agua ( $\mu$ ):  $0.001002 \frac{Kg}{m.s}$
- Velocidad del agitador ( $v$ ): 240 RPM o 4RPS
- Diámetro de paleta ( $d$ ): 0.09 m

$$R_E = \frac{\rho * v * D}{\mu} \quad (3.11)$$

$$R_E = \frac{998 \frac{Kg}{m^3} * 4 RPS * 0.07^2 m}{0.001002 \frac{Kg}{m.s}}$$

$$R_E = 19521.75$$

Se determina el número de potencia ( $N_e$ ), en base al número de Reynolds calculador y al tipo de paleta a usar.

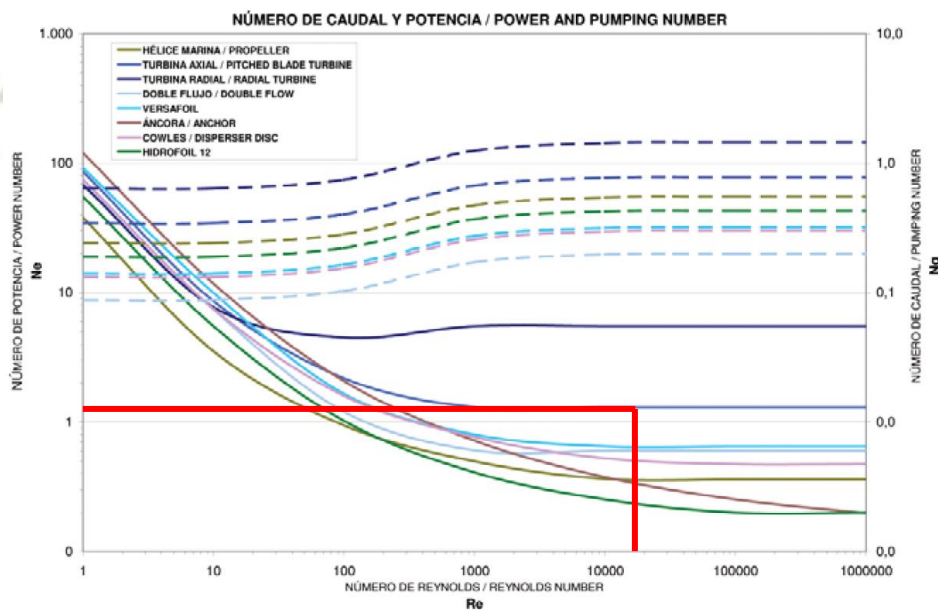


Fig. 25: Curvas de número de caudal y potencia

Fuente: [41]

De acuerdo a la figura 25, el valor del número de potencia ( $N_e$ ) es 1.3. Este parámetro es reemplazado en la ecuación (3.11), para calcular la potencia del agitador.

$$P = N_e * \rho * v^3 * d^5 \quad (3.12)$$

$$P = 1.3 * 998 \frac{Kg}{m^3} * 4^3 RPS * 0.1^5 m$$
$$P = 0.83 W$$

Se obtiene una potencia de 0.83W para el motor del agitador.

Debido a que en el mercado local se encuentra una muy baja demanda de motores DC con las especificaciones eléctricas calculadas, se opta por seleccionar un motor DC de 1.5W con un voltaje de alimentación de 24 VDC. La potencia del motor garantizará la fuerza necesaria para asegurar la homogenización del fluido dentro del tanque.

#### 3.4.4 Motobomba

En el diseño del módulo de control de temperatura, se realiza la implementación de una motobomba de agua, ya que el tanque de almacenamiento se encuentra en el nivel bajo del tanque de proceso.

La bomba a elegir debe tener pequeñas dimensiones, por tener poco trayecto en el desplazamiento del agua. La distancia entre la bomba y el tanque de proceso es de 1.2 metros. Los equipos con menos potencia en el mercado son de ¼ HP.

De la tabla 10, se observa que todas las bombas sobrepasan la altura máxima de elevación solicitada como requisito, es por ello que, para evitar sobredimensionamientos del sistema, se elige la bomba de agua Lecco QB-50 0.5HP, quien tiene una elevación máxima de agua a 36 metros.

- Marca: Lecco
- Modelo: QB-60
- Voltaje: 220 VAC
- Potencia: 0.5HP



*Fig. 26: Bomba de agua QB-60 de 0.5HP*

Fuente: Elaboración propia.




Motobomba	Características	Costo	Imagen
Bomba 1" x 1" 0.5HP LEO	Voltaje de alimentación: 220 VAC Altura máxima de elevación: 35 Metros Potencia: 0.5HP Presión máxima: 50 PSI Diámetro: 1"	S./ 289.90	
Bomba De Agua Jet JSWM 1b 0.7 HP Pedrollo	Voltaje de alimentación: 220 VAC Altura máxima de elevación: 41 Metros Potencia: 0.7HP Caudal: 50 LPM Diámetro: 1"	S./ 679.90	
Bomba de agua Lecco QB-60 0.5HP	Voltaje de alimentación: 220 VAC Altura máxima de elevación: 36 Metros Potencia: 0.5HP Caudal: 50 LPM Diámetro: 1"	S./ 190	

Tabla 10: Comparación de especificaciones técnicas de motobombas

Fuente: [42]

### 3.5 Sensor de temperatura

Se empleará el sensor de temperatura para convertir la variación de temperatura en señales eléctricas que posteriormente serán medidas e interpretadas por el PLC LOGO8!

Como requisito importante es que, para la implementación del módulo, se emplee un equipo económico, con la capacidad de ser instalado dentro de un tanque. Además de ello, el sensor



mediciones. En cuanto al sensor LM35, se descarta por el hecho de ser un dispositivo que no puede sumergirse en el agua.

Dentro otras características principales del RTD se encuentra: aislamiento en el cable ante los posibles ruidos en el ambiente, lo cual garantiza una excelente medición de temperatura. El conector del sensor se encuentra fabricado con acero inoxidable para una larga duración de vida útil, es resistente al agua y otros gases.

- Tipo de sensor de temperatura: RTD PT100
- Rango de temperatura: -50 a 300°C
- Numero de hilos: 3 hilos

El principio de funcionamiento de la termorresistencia se basa en la variación de temperatura en la resistencia del material del elemento primario que será proporcional a la modificación de la resistencia del mismo material.



*Fig. 27: Sensor de temperatura, PT100*

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.1 Transmisor de PT100

La mayoría de PLCs cuentan solo con entradas análogas de voltaje y de corriente, según sea las características del dispositivo. En consecuente las termorresistencias no pueden conectarse directamente al controlador, ya que se tendría falsas mediciones de lectura en el dispositivo. Es por ello que este tipo de sensores utilizan un transmisor para poder emitir sus variaciones de temperatura en forma de corriente hacia una de las entradas análogas del

PLC. El transmisor de temperatura a elegir debe tener la capacidad de medir rangos de temperatura de 0 a 50°C para sensores de 3 hilos.




Sensor	Rango de medición	Características importantes	Costo	Imagen
Sitrans TH-300 Siemens	-200 a 850°C	Precisión: $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ Comunicación HART Corriente de salida: 4 a 20 mA	S./ 1050	 <b>TH300</b> <b>SIEMENS</b>
Wika T15.H-AIZZZ	-40 a 85°C	Voltaje de alimentación: 8 a 35 VDC Exactitud $< 0,2 \text{ K} / 0,1 \%$ Programable a través de modulo PU-548 Corriente de salida: 4 a 20 mA	S./ 540	
IDT PT100 SBW	0°C a 50°C	Precisión: 0.2%F.S Voltaje de alimentación: 24VDC Corriente de salida: 4 a 20 mA	S./ 40	

Tabla 12: Comparación de transmisores de temperatura para RTD PT100

Fuente: [44], [45], [46]

En la tabla 12, se muestra tres transmisores de temperatura, de los cuales se diferencian por su amplio rango de medición y configuración, también se destacan por el costo del equipo. Se selecciona el transmisor IDT PT100 SBW, ya que a comparación de los otros dispositivos, este tendría una excelente resolución de lectura de temperatura, por estar mas cercano a los valores del rango de trabajo, además de ello su calibración es a través de unos tornillos, mientras que los otros dos dispositivos es a través de protocolos de comunicación.

El transmisor IDT PT100 SBW, es un equipo económico, apto para PT100 de 3 hilos y emplea una señal de salida de corriente de 4 a 20 mA.



*Fig. 28: Transmisor de sensor de temperatura RTD PT100*

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.1.1 Acondicionamiento de señal de sensor de temperatura

Dado que el transmisor de temperatura presenta una señal de corriente de salida de 4 a 20 mA, y el PLC LOGO8! solo cuenta con entradas análogas de 0 a 10 V, se procede a realizar un circuito de estandarización de señales.

El circuito de acondicionamiento se centra en el uso de un amplificador de instrumentación, el cual debe contar con una alta relación al rechazo en modo común, y una baja variación offset en la temperatura. Se realiza una tabla de comparación entre diferentes In Amp.

In Amp	Características importantes	Costo	Imagen
INA121PA	Fabricante: Burr-Brown Gain: 1 a 10 000 V/V $V_s: \pm 18V$ CMRR: 90 dB (10KHz) LOW INPUT OFFSET DRIFT: $\pm 2\mu V/^{\circ}C$	S./ 38	
AD8221	Fabricante: Analog Devices Gain: 1 a 1000 V/V $V_s: \pm 18V$ CMRR: 90 dB (10KHz) LOW INPUT OFFSET DRIFT: $\pm 3\mu V/^{\circ}C$	S./54	
AD620AN	Fabricante: Analog Devices Gain: 1 a 10 000 V/V $V_s: \pm 18V$ CMRR: 70 dB (10KHz) LOW INPUT OFFSET DRIFT: $\pm 3\mu V/^{\circ}C$	S./ 24	

Tabla 13: Comparación de amplificadores de instrumentación

Fuente: [47], [48]

De la tabla 13, se verifica que el amplificador de instrumentación AD620AN cuenta con una baja relación al rechazo de modo común de 70dB y  $TCV_{os}: \pm 3\mu V/^{\circ}C$ , lo cual, ante repentinos cambios de tensión de entrada, podría alterar la ganancia del InAmp, mientras que el INA121 y AD8221 se diferencian por  $\pm 1\mu V/^{\circ}C$  en el offset de entrada por cambios de temperatura,

mientras que el CMRR tiene la misma magnitud. Es por ello que se elige el INA121PA, ya que sería el más indicado para el módulo de control.

Para el diseño del circuito, se emplea la resistencia R17 en serie a la salida del transmisor. Posteriormente es conectado a la entrada positiva del amplificador de instrumentación. Es utilizado una resistencia para convertir la corriente de salida a un voltaje conocido, tal como lo demuestra a través de la ecuación (3.13).

$$R17 = \frac{V}{I} \quad (3.13)$$

$$R17 = \frac{10V}{0.02A}$$

$$R17 = 500 \Omega$$

Cuando se obtenga una señal de corriente de salida del transmisor de 4 mA, este sería proporcional a un voltaje de 2 V, y considerando que la temperatura inicial en el tanque T-1 es de alrededor de 10°C, su proporción en tensión sería 2 V. Para eliminar ambos offset, se ingresa un voltaje de 4V en la entrada negativa del amplificador de instrumentación, esto se logra a través del potenciómetro R16. En la ecuación (3.14) se muestra la ganancia del circuito INA121.

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{50K\Omega}{R_g} \quad (3.14)$$

$$G = \frac{10V}{(10V - 4V)}$$

$$G = 1.67 V/V$$

$$1.67 V/V = 1 + \frac{50K\Omega}{R_g} \quad (3.15)$$

$$R_g = 74.62 K\Omega$$

Puesto que el valor obtenido en Rg no es comercial, se opta por implementar en serie la resistencia R14 y el potenciómetro lineal R15 para así mejorar la precisión de la suma de ambas resistencias en la amplificación del circuito. Los capacitores C3 y C4, son usados como filtros de la alimentación de los amplificadores operacionales, sus valores son recomendados por el fabricante Burr-Brown.

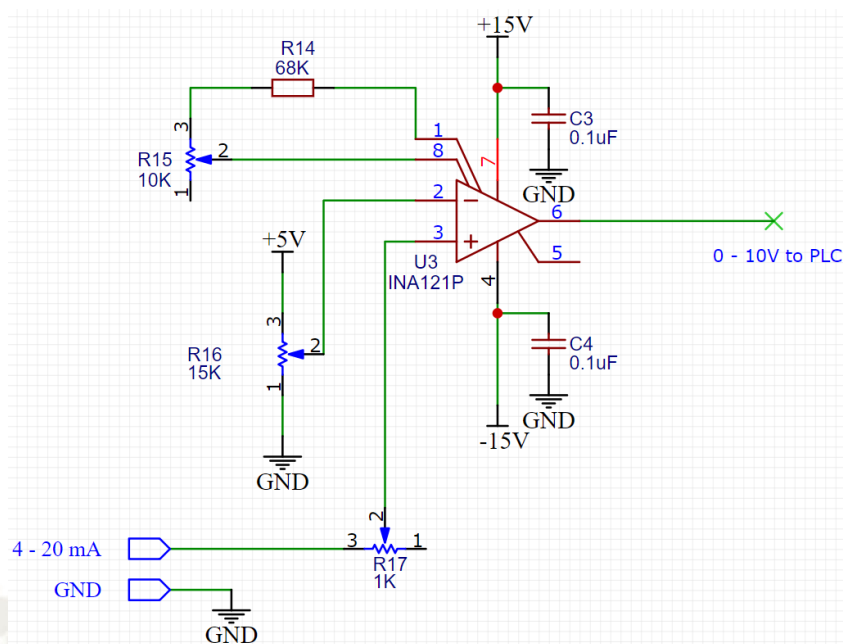


Fig. 29: Circuito de acondicionamiento de señal del sensor de temperatura

Fuente: Elaboración propia

### 3.6 Sensores de nivel

#### 3.6.1 Sensor de nivel de señal análoga

Existen sensores de nivel con diferentes principios de medición, para los cuales se diferencian por su precisión, ambientes de operación y aplicación.

Para el módulo de control, se necesita un sensor de nivel capaz de medir distancias hasta 30 cm, que cuente una compensación de temperatura igual o mayor a 50°C, y que tenga como señal de control de tipo análoga con una tensión de 0 a 10 VDC.

Por consiguiente, se realiza la tabla 14 para identificar las características de los sensores de nivel.

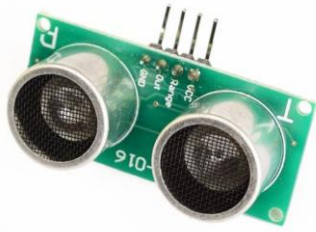
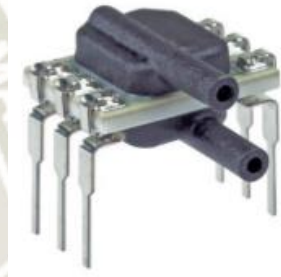

Sensor	Características importantes	Costo	Imagen
Sensor ultrasonido: US-016	Fabricante: Adafruit Precisión: 0.3cm Frecuencia de Rango de medición: 0 a 3 metros Angulo de apertura 15° Salida análoga de 0 a 5 VDC Voltaje de alimentación: 5V	S./ 18	
Sensor de presión diferencial: ABPDJTT001PG AA5	Fabricante: Honeywell Precisión: +-0.25% FSS Resolución: 0.03% FSS Rango de medición: 0 a 1 PSI Compensación de temperatura: 0 a 50°C Salida análoga de 0.5 a 5 VDC Voltaje de alimentación: 5 VDC	S./152	
Transmisor de nivel ultrasónico Series ULT	Fabricante: Mercoid Precisión: +-0.2% FSS Resolución: 2 mm. Rango de medición: 0 a 10 m. Salida análoga de 4 a 20 mA Compensación de temperatura: -40 a 60°C Voltaje de alimentación: 24 VDC	S./ 1540	

Tabla 14: Comparación de los sensores de nivel de señal análoga

Fuente: [49]

De la tabla 14, se observa que los tres sensores no cuentan con salidas análogas de 0 a 10 VDC, por lo cual se tendría que usar un circuito de acondicionamiento de señal. Así mismo

se observa que el sensor de ultrasonido US-016, no tiene un sistema de compensación de temperatura, en consecuencia, provocaría un error en régimen permanente cuando la temperatura del agua ascienda. La resolución del transmisor ultrasónico ULT es menor a la del sensor de presión ABP, ya que su rango de operación es mayor. Es por ello que se opta por elegir el sensor de presión diferencial ABPDJIT001PGAA5 de Honeywell.

Otra de sus características de este tipo de dispositivo, es que es un sensor de bajo costo y excelente para este tipo de aplicaciones. El sensor medirá de forma indirecta el nivel del tanque de agua. Ello es posible a través de la ecuación (3.16) y (3.17).

$$P_2 = P_1 + \rho gh \quad (3.16)$$

$$h = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} \quad (3.17)$$

Donde:

- P1 = Presión atmosférica (Pa)
- P2 = Presión de agua (Pa)
- $\rho$  = densidad de agua (Kg/m<sup>3</sup>)
- g = gravedad (m/s<sup>2</sup>)

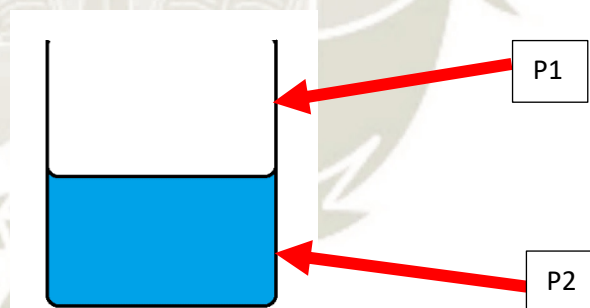


Fig. 30: Tanque abierto de agua

Fuente: Elaboración propia

### 3.6.1.1 Rango de presión de operación

Considerando que el nivel máximo de agua en operación es de 40 cm, y la presión atmosférica es normalmente 14.69 psi, se asume que la medición de presión manométrica del segundo puerto del sensor es 0 PSI o Pascales. Se toma como dato que el peso específico del agua es  $9777.6 \frac{Kg}{m^2s^2}$ . Aplicando los valores en la ecuación (3.16), se obtiene:

$$P = 997 \frac{Kg}{m^3} * 9.8 \frac{m}{s^2} * 0.40 m$$

$$P = 3908.2 \frac{Kg}{m^3} * \frac{m}{s^2} * m$$

$$P = 3908.2 \frac{Kg}{m * s^2}$$

Convirtiendo a unidades del S.I:

$$P_1 = 0.567 \text{ psi}$$

Dado que en el mercado existe muy pocos sensores con este tipo de características para la aplicación que requerimos, se opta por usar el sensor de presión diferencial de la serie ABP de Honeywell con un rango de 0 a 1 PSI. El dispositivo presenta una precisión de 0.25%FSS, con una alimentación de 5VDC, es de tipo piezorresistivo, el cual uno de sus puertos se encuentra cubierto de silicona, lo que le permite mantener en contacto con fluidos líquidos y aislarlo de la electrónica del sensor, mientras que el otro solo es usado para medios secos y libres de contaminación. El sensor cuenta con una resolución de 0.03%FSS y una compensación de temperatura hasta 50°C, así mismo presenta una salida analógica identificada a través de una función de transferencia, como se muestra en la figura 31 y la ecuación (3.18).

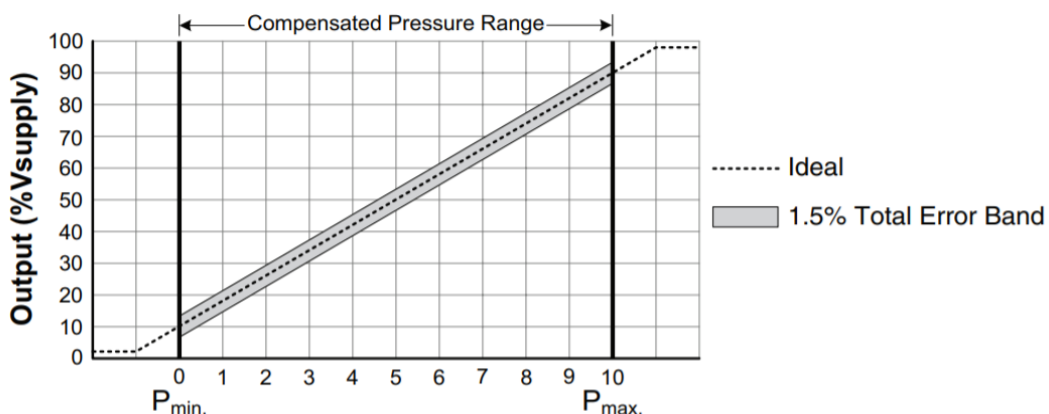


Fig. 31: Salida de voltaje con respecto a la presión de entrada al sensor

Fuente: [50]

$$Output (V) = \frac{0.8 * V_{supply}}{P_{max} - P_{min}} * (P_{applied} - P_{min}) + 0.10 * V_{supply} \quad (3.18)$$

El sensor es obligado a usar una tarjeta de acondicionamiento, ya que presenta una salida de tensión no estándar para las entradas análogas del PLC LOGO8!

Según la figura 30, el puerto P1 del sensor será colocado en la base del tanque T1, ya que en esta ubicación el instrumento permitirá evadir los golpes de presión provocados por el mezclador homogeneizador de temperatura que se encuentra instalado desde la parte superior del recipiente. De su mismo modo el puerto P2 medirá de forma continua los cambios de presión del aire en su ambiente.

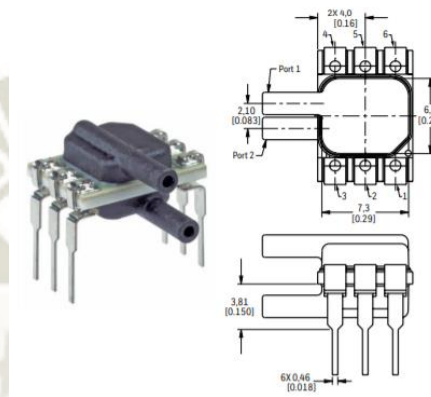


Fig. 32: Sensor de presión diferencial de la serie ABP de Honeywell

Fuente: [50]

### 3.6.1.2 Acondicionamiento de sensor de presión

Para conseguir el valor de la presión del tanque se utilizó el sensor ABPDJIT001PGAA5, el cual tiene una salida aproximada desde los 0.5 VDC hasta los 5 VDC, en consecuencia, es útil el diseño de un circuito de acondicionamiento para alcanzar la estandarización de las entradas análogas de un PLC, y así también obtener la mayor resolución en la lectura del controlador. El LOGO8! De Siemens cuenta con un microprocesador de 10 bits, esto significa que la tensión analógica de entrada se convierte en un valor numérico entre 0 y 1023.

Con la finalidad de ocupar de forma correcta todo el rango de valores en el microprocesador, se selecciona el amplificador de instrumentación INA121 de la tabla 8, que presenta como característica principal una alta relación de rechazo en modo común máximo de 90 dB, y una baja variación de offset en la temperatura ( $TCV \approx 2 \mu V/^{\circ}C$ ). Estas características son importantes ya que garantizara un bajo nivel de ruido y error cuando se presenten variaciones de temperatura. La ganancia es ajustable mediante una resistencia externa al circuito y es seleccionado a través de la ecuación (3.14).

Para obtener la ganancia del amplificador de instrumentación, primeramente, se debe calcular el voltaje máximo de operación del sensor de presión diferencial. Por motivos de dimensionamiento del instrumento se considera el uso de una línea de impulso de 8 cm conectado entre el sensor y la base del tanque, el cual a su vez generará una presión estática cuando el fluido ocupe lugar en esta tubería. La diferencia de presión inicial es de 8 cm H<sub>2</sub>O ó 0.113 psi, por lo que el voltaje de salida del sensor es de 950 mV. Para lograr reducir el offset se agrega un voltaje con la misma magnitud en la entrada negativa por medio del potenciómetro de precisión R19, así como se muestra en la figura 33.

Dado que el nivel máximo de operación del módulo educativo es de 40 cm, lo cual es equivalente a 0.567 psi, y que además de ello el voltaje máximo a una de las entradas análogas del PLC es de 10VDC. Se calcula la ganancia G y el valor de la resistencia R18.

$$Output (V) = \frac{0.8 * 4.985}{1psi - 0psi} * (0.567 - 0) + 0.10 * 4.985$$

$$Output (V) = 2.75V$$

Eliminación de voltaje offset:

$$Output (V) = 2.75 V - 0.95 V$$

$$Output (V) = 1.8 V$$

Calculo de ganancia:

$$G = \frac{10 V}{1.8 V}$$

$$G = 5.55 V/V$$

Reemplazando

$$5.05 V/V = 1 + \frac{50K\Omega}{R18}$$

$$R18 = \frac{50K\Omega}{4.05V/V}$$

$$R18 = 12.35 K\Omega$$

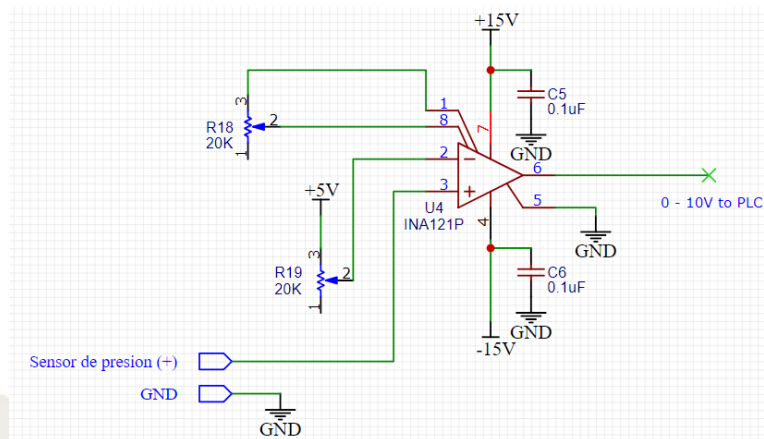


Fig. 33: Circuito de acondicionamiento para el sensor de presión

Fuente: Elaboración propia

El valor obtenido de la resistencia R18, no es de tipo comercial, por ende, se utiliza un potenciómetro de precisión de 20K $\Omega$ . Los capacitores C5 y C6, son usados como filtros de la alimentación de los amplificadores operacionales, sus valores son recomendados por el fabricante Burr-Brown.

### 3.7 Fuente de alimentación

Las tarjetas implementadas en el módulo educativo, necesitan de un suministro de energía en corriente continua para poder operar. En consiguiente se desarrolla e implementa una fuente de alimentación con los diferentes voltajes para las siguientes tarjetas de control.

- Microcontrolador.
- Circuito de detección de cruce por cero.
- Circuito aislador de potencia.
- Tarjeta de acondicionamiento del sensor de presión.
- Tarjeta de acondicionamiento del sensor de temperatura.

En la figura 34, se muestra la implementación de los reguladores lineales de voltaje LM 7805 de 5V/1A, 7815 de 15V/1A, 7915 de -15V/1A, con los respectivos valores de condensadores que el fabricante recomienda en su hoja de datos. Es aprovechado el transformador y el puente de rectificación de onda completa que usa el circuito de detección de cruce por cero para la construcción de la fuente de alimentación.

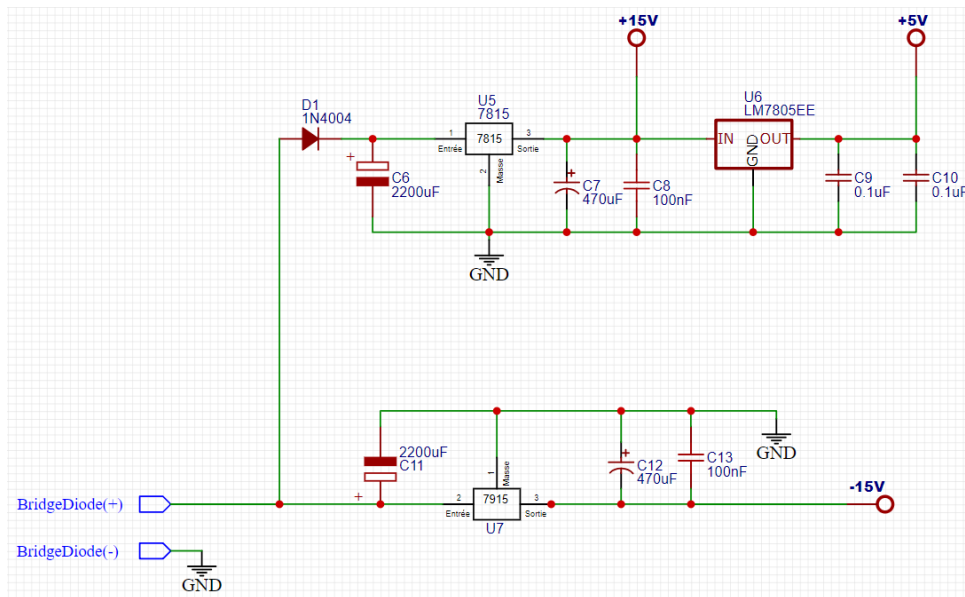


Fig. 34: Fuente de alimentación de tarjetas de control

Fuente: [51]

### 3.8 Controlador Lógico Programable

Se utiliza un controlador lógico programable para establecer las lecturas y escritura de los sensores y actuadores respectivamente, que posteriormente será comunicado con el software de Matlab. Para ello, el PLC debe tener acceso a la lectura de entradas análogas de 0 a 10V para el sensor de temperatura y nivel, de igual manera el PLC debe contar con salidas análogas de 0 a 10V. Así mismo para el control manual de la bomba y el agitador, se deberá contar con salidas de tipo relé. El equipo debe contar con una alimentación de 12/24 VDC y un tipo de comunicación con el computador.




PLC	Características importantes	Costo	Imagen
<b>Siemens Logo8!</b>	Voltaje de alimentación: 12/24VDC 4 DO tipo relé (10A) 8 DI de las cuales 4 pueden usarse como entrada AI (0 a 10 VDC) Módulo de 2 salidas análoga de 0-10VDC/0-20mA Comunicación Modbus TCP/IP	S./ 900	
<b>Schneider Zelio</b>	Voltaje de alimentación: 24VDC 4 DO tipo relé (8A) DI y 4 AI (0 a 10 VDC) Módulo de 2 E/S análoga de 0- 10VDC Comunicación serial a través del cable SR2USB01	S./ 1110	
<b>Allen Bradley Micrologix 1100</b>	Voltaje de alimentación: 12/24VDC 6 DO tipo relé (10A) 6 DI y 2 AI (0 a 10 VDC) Comunicación Modbus Master/Slave, ASCII, DH-485	S./ 1492	

Tabla 15: Comparación de PLCs

Fuente: [52]

De la tabla 15, se verifica que los tres PLC cuentan con el tipo de alimentación requerido, tanto como el número de entradas y salidas digitales, así como el tipo de entradas análogas para los sensores, y la ventaja de poder de comunicarse con la computadora a través de un cable físico, sin embargo, estos equipos no cuentan con salidas análogas de 0 a 10 VDC, es por ello que debe usarse un módulo de salidas análogas. Debido a que los equipos guardan una gran similitud a los requerimientos que demanda el modulo, se elige el PLC de menor precio, es decir el PLC Logo8!.

### 3.9 Tablero de control

El tablero de control fue diseñado por motivos de seguridad al operador, este cuenta con características normadas que se mencionan a continuación:

La Norma 250 de la National Electrical Manufacturer’s Association (NEMA). Similar a la IEC 60529, la norma NEMA 250 cubre gabinetes para equipo eléctrico. Igual que la IEC 60529, NEMA 250 se ocupa de la protección contra el ingreso, pero difiere en que también se ocupa de las especificaciones que detallan los criterios mínimos de la construcción, el rendimiento, de pruebas, la resistencia a la corrosión y mucho más. Aun cuando su comienzo está basado en los Estados Unidos, NEMA es una organización global que trabaja para promover las normas eléctricas en todo el mundo. [53]

NEMA		Clasificación del gabinete	
Sólidos	Líquidos		
Interiores	Proporciona un grado de protección contra el acceso a pizas peligrosas y contra el ingreso de objetos extraños sólidos	Sin protección	Tipo 1
	Proporciona un grado de protección contra el acceso a piezas peligrosas y control el ingreso de objetos extraños solidos (suciedad que cae)	Proporciona un grado de protección contra el ingreso de agua (goteo y salpicaduras ligeras)	Tipo 2
	Proporciona un grado de protección contra el acceso a piezas peligrosas y contra el ingreso de objetos extraños solidos (suciedad que cae y asentamiento de polvo, pelusa, fibras y contaminantes aéreos)	Proporciona un grado de protección contra el ingreso de agua (goteo y salpicaduras ligeras)	Tipo 5
	Proporciona un grado de protección contra el acceso a piezas peligrosas y el ingreso de objetos extraños solidos (suciedad que cae y polvo, pelusa, fibras y contaminantes circulantes)	Proporciona protección contra el ingreso de agua (goteo y salpicadura ligeras) o filtración de aceite y refrigerantes no corrosivos	Tipo 12
	Proporciona un grado de protección contra el acceso a piezas peligrosas y el ingreso de objetos extraños solidos (suciedad que cae y polvo, pelusa, fibras y contaminantes circulantes)	Proporciona protección contra el ingreso de agua (goteo o salpicaduras filtración de aceite y refrigerantes no corrosivos)	Tipo 13

*Tabla 16: Norma NEMA para tableros eléctricos*

Fuente: [53]

El tablero eléctrico cumple con las normas NEMA tipo 5, el cual describe claramente que para elementos solidos proporciona un grado de protección contra el acceso a piezas peligrosas y contra el ingreso de objetos extraños solidos (suciedad que cae y asentamiento de polvo, pelusas fibra y contaminantes aéreos), mientras para que líquidos proporciona un grado de protección contra el ingreso de agua (goteo y salpicaduras ligeras). [53]

### 3.10 Dimensionamiento del alambre y cableado

Para el conexionado de los actuadores, sensores, tarjetas de control y potencia, borneras y relés. Se realiza el cálculo de corriente para estimar el cable que se requiera. En este caso se usa cable de la marca INDECO TW-80, el cual en su ficha técnica indica lo siguiente:

TABLA DE DATOS TECNICOS TW - 80 (AWG / MCM)									
CALIBRE CONDUCTOR	SECCION NOMINAL	Nº HILOS	DIAMETRO HILO	DIAMETRO CONDUCTOR	ESPESOR AISLAMIENTO	DIAMETRO EXTERIOR	PESO	AMPERAJE (*)	
								AIRE	DUCTO
AWG/MCM	mm <sup>2</sup>		mm	mm	mm	mm	Kg/Km	A	A
<b>ALAMBRES</b>									
16	1.3	1	1.24	1.24	0.7	2.7	17	15	12
14	2.1	1	1.57	1.57	0.8	3.2	26	28	22
12	3.3	1	1.98	1.98	0.8	3.6	38	33	28
10	5.3	1	2.50	2.50	0.8	4.1	56	44	33
8	8.4	1	3.15	3.15	1	5.2	88	66	44
<b>CABLES</b>									
14	2.1	7	0.60	1.75	0.8	3.4	28	28	22
12	3.3	7	0.76	2.20	0.8	3.8	40	33	28
10	5.3	7	0.96	2.78	0.8	4.4	60	44	33
8	8.4	7	1.20	3.61	1	5.6	96	66	44
6	13.3	7	1.53	4.60	1	6.6	147	88	61
4	21.1	7	1.93	5.80	1.2	8.2	231	116	77
2	33.6	7	2.44	7.31	1.2	9.7	353	154	105
1/0	53.4	19	1.87	8.58	1.4	11.4	539	215	138
2/0	67.4	19	2.10	9.60	1.4	12.4	671	248	160
3/0	85.1	19	2.35	10.82	1.6	14.1	850	286	182
4/0	107.2	19	2.64	12.15	1.6	15.4	1058	330	215
350	177.5	37	2.44	15.69	2	19.7	1740	462	286

Tabla 17: Datos técnicos de alambres y cables

Fuente: [54]

Se usa la fórmula de potencia eléctrica para calcular la corriente que circulará en el cable.

### 3.10.1 Bomba de agua

$$P(HP) * (746W) = P(W) \quad (3.19)$$

$$0.5 * (746W) = 373 W$$

$$I = \frac{373 W}{220 V} = 1.7 A$$

Dada que la corriente de arranque de un motor puede ser de cinco veces su corriente nominal, y por motivo de no sobre esforzar y calentar el cable se considera este factor.

$$I = 1.7 * 4 = 6.8 A$$

Según la tabla 17, el cable indicado es el de calibre 16AWG.

### 3.10.2 Resistencias calefactoras

Se realiza la medición de la resistencia del actuador, el cual tiene un valor de 19.2  $\Omega$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (3.19)$$

$$P = \frac{220^2}{19.2} = 2.52 KW$$

$$I = \frac{2.52 KW}{220 V} = 11.45 A$$

Según la ficha técnica del fabricante indica que el alambre de calibre 16 AWG soportaría la circulación de corriente de 11.45 A. Por un factor de seguridad se considera la implementación del alambre de calibre 14 AWG.

### 3.10.3 Dispositivos de control

Para los demás componentes que se encuentran energizado a una fuente de alimentación de 5 A, se implementa un cable de calibre 18 AWG.

### 3.10.4 Interruptor termo magnético principal

Se realiza el cálculo de corriente que deba tener el interruptor a través de la suma de corrientes calculadas anteriormente y multiplicada por un factor de seguridad de 1.2.

$$I = I_{Res.Cal} + I_{maxFuente} + I_{Bomba} \quad (3.20)$$
$$I = (11.45 * 2) + 1.5A + 6.8A = 31.2 A$$

Según la ficha técnica del fabricante indica que el cable debe ser de calibre 10 AWG

### 3.11 Interruptor principal de tablero

Como parte del sistema de protección del tablero eléctrico, se debe emplear un interruptor termo magnético principal, el cual se debe elegir en base a las características técnicas y eléctricas del tablero. Para ello es necesario obtener un interruptor que se pueda adosar a un riel DIN. El interruptor debe ser capaz de conducir una tensión de 220 VAC y dar una apertura del circuito cuando sobrepase una corriente de 32 A. Esto es calculado a través de la ecuación (3.20).

De la tabla 18, se observa que hay tres interruptores termomagnéticos con las mismas especificaciones eléctricas y técnicas requeridas por el tablero. Su única diferencia es el costo del interruptor, es por ello que se elige la llave 2X32A Chint. Este interruptor proporcionará más seguridad a los equipos, evitando así sobre corrientes y cortocircuitos.




Interrupitor	Características importantes	Costo	Imagen
<b>Interrupitor Termomagnético 2x32A Bticino</b>	Marca: BTICINO Cantidad de polos: 2 Corriente: 32 A Voltaje 230/400 VAC Adosable a riel din	S./ 41.90	
<b>Interrupitor Termomagnético 2x32A General Electric</b>	Marca: General Electric Cantidad de polos: 2 Corriente: 32 A Voltaje 240 VAC Adosable a riel din	S./ 32.9	
<b>Interrupitor Termomagnético 2x32A Chint</b>	Marca: Chint Cantidad de polos: 2 Corriente: 32 A Voltaje 240 VAC Adosable a riel din	S./ 19.9	

Tabla 18: Diferencia de interruptores termo magnéticos

Fuente: [55]

### 3.12 Relés

El PLC cuenta con salidas digitales tipo Relé, el cuál puede soportar hasta 10 A. Para la extensión de tiempo de vida de relé del PLC, se utilizan otros relés capaces de soportar las corrientes exigidas por los equipos que se encuentran en serie.

Según la ecuación (3.12) el contacto del relé a elegir, debe soportar 220V/10A como mínimo, así como su bobina deberá energizarse con 24VDC, ya que es el mismo voltaje que usa el PLC de Siemens. En la siguiente tabla se observa los relés que se encontraron en el mercado local:




Relé	Características importantes	Costo	Imagen
<b>Phoenix Contact 2909519</b>	Marca: Phoenix Contact Disposición de contacto: SPDT $V_{max}$ conmutación: 250 VAC $I_{max}$ (contacto): 10 A Voltaje de bobina: 24 VDC Corriente de bobina: 18 mA	S./ 83.90	
<b>ZHNQI QLY2N</b>	Marca: ZHNQI Disposición de contacto: SPDT $V_{max}$ conmutación: 250 VAC $I_{max}$ (contacto): 10 A Voltaje de bobina: 24 VDC Corriente de bobina: 18 mA	S./ 15.9	
<b>TE-Connectivity – 6-1419128-4</b>	Marca: Phoenix Contact Disposición de contacto: SPDT $V_{max}$ conmutación: 265 VAC $I_{max}$ (contacto): 10 A Voltaje de bobina: 24 VDC Corriente de bobina: 18.8 mA	S./ 3	

Tabla 19: Comparación de relés de control

Fuente: [56]

De la tabla 19, se observa que los tres dispositivos cuentan con las características eléctricas que requiere el módulo educativo, sin embargo, el relé TE-Connectivity – 6-1419128-4, es

un dispositivo que se adosa únicamente en PCB. En cuanto a los otros relés, estos cuentan con un sócalo con enclavamiento al riel din. La diferencia entre estos dos relés es el precio. Debido a ello se opta por elegir el relé ZHNQI – QLY2N.

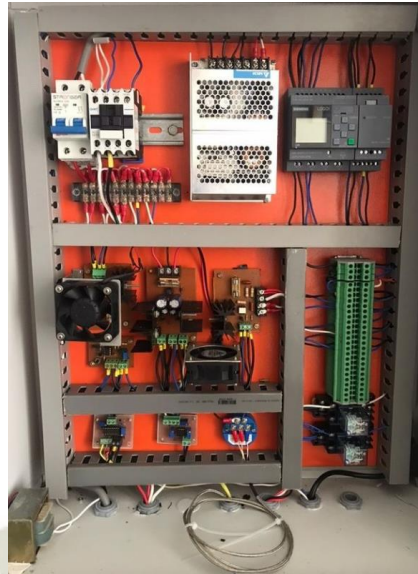
### 3.13 Implementación del módulo de control



*Fig. 35: Modulo educativo de sistema de control de temperatura*

Fuente: Elaboración propia

El tablero de control cuenta con las dimensiones de 60 cm de ancho y 50 cm de alto, el cual cumple con la normativa NEMA de tipo 5 descrita en el capítulo 3.13. Así mismo la estructura física del tablero guarda relación con la clasificación del sistema estándar internacional IEC60529 que hace referencia a los grados de protección, para este caso, el tablero cuenta con un IP43, que indica que se encuentra protegido contra objetos sólidos de mas de 1mm y contra el rocío a 60° de la vertical. A continuación, se señalan las características más importantes de los equipos y tarjetas de control instaladas dentro del tablero.



*Fig. 36: Interior del tablero de control*

Fuente: Elaboración propia

### 3.13.1 PLC LOGO8!

Marca: SIEMENS

Modelo: 6ED1052-1M008-0BA0

Alimentación: 24 VDC

E/S: 4 DO, 8 DI / 4 AI (4 a 20mA)



*Fig. 37: Controlador lógico programable LOGO8! Siemens*

Fuente: Elaboración propia

### 3.13.2 Módulo de expansión de PLC LOGO8!

Modelo: 6ED1055-1MM00-0BA2

Alimentación: 24 VDC

E/S: 2 salidas análogas de 4 a 20 mA / 0 a 10 V

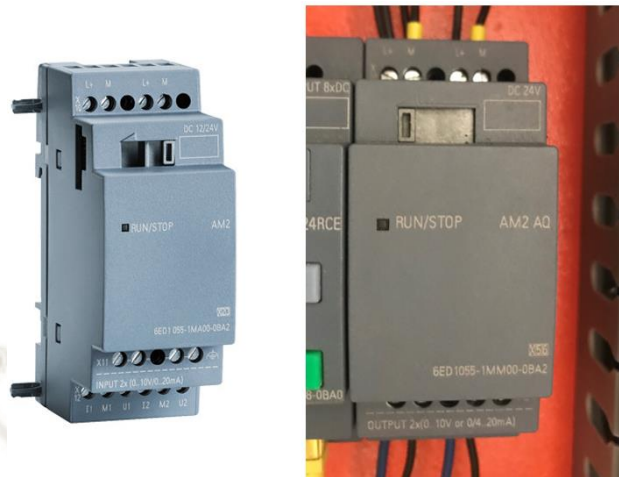


Fig. 38: Módulo de salidas análogas 0-10VDC y 4-20mA

Fuente: Elaboración propia

### 3.13.3 Fuente de alimentación de PLC

Marca:	DELTA ELECTRONICS. INC.
Modelo:	PMH-24V100WCAA
Voltaje de alimentación:	220 – 240 VAC
Potencia:	100 W
Voltaje de salida:	24 VDC
Función:	Suministrar voltaje a PLC, módulo de salidas análogas y Válvula de control



Fig. 39: Fuente de alimentación de 24VDC

Fuente: Elaboración propia

### 3.13.4 Interruptor termomagnético

Marca:	STRONGER
Modelo:	ALF6K/2
Máxima corriente:	32 A
Función:	Protección contra cortocircuitos y superación de corriente del interruptor



*Fig. 40: Llave termomagnética de 220V/32A*

Fuente: Elaboración propia.

### 3.13.5 Tarjeta de detección de cruce por cero y microcontrolador

Voltaje de operación:	5VDC
Señal de salida:	PWM
Señal de entrada:	12VAC
Función:	Detectar los cruces por cero de la red eléctrica

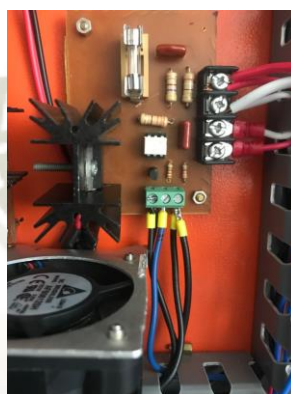


*Fig. 41: Circuito de detección de cruce por cero de la red eléctrica*

Fuente: Elaboración propia.

### 3.13.6 Tarjetas de control de potencia de resistencias calefactoras

Circuito de control de potencia:	TRIAC BTA26
Circuito de control de mando:	MOC3021
Corriente máxima:	6A
Tipo de control:	Angulo de disparo por TRIAC
Función:	Controlar la potencia a disipar por las resistencias calefactoras



*Fig. 42: Circuito de control de potencia de resistencia calefactora*

Fuente: Elaboración propia.

### 3.13.7 Tarjeta de acondicionamiento de transmisor de temperatura

Voltaje de alimentación:	-12 y 12VDC
Señal de entrada:	2 a 10 VDC
Señal de salida:	0 a 10 VDC
Función:	Eliminar offset y amplificar la señal de salida del transmisor de temperatura del PT 100.

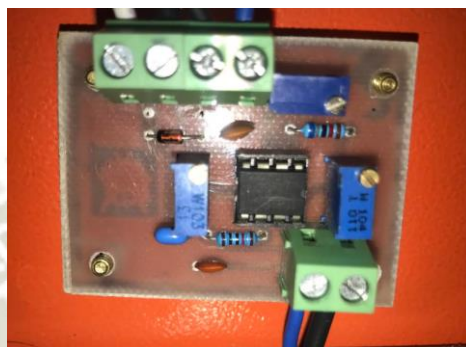


*Fig. 43: Circuito de acondicionamiento del transmisor de temperatura*

Fuente: Elaboración propia.

### 3.13.8 Tarjeta de acondicionamiento de sensor de presión

Voltaje de alimentación:	-12 y 12 VDC
Señal de entrada:	0.5 a 5VDC
Señal de salida:	0 a 10 VDC
Función:	Eliminar offset y amplificar la señal de salida del sensor de presión diferencial



*Fig. 44: Circuito de acondicionamiento del medición de nivel*

Fuente: Elaboración propia.

### 3.13.9 Fuente de alimentación para tarjeta de control

Voltaje de entrada:	12 VAC
Voltaje de salida:	12 VDC, -12VDC, 5VDC, 12 VAC
Función:	Suministrar voltaje a las tarjetas electrónica y voltaje de referencia del transformador al circuito de cruce por cero.



*Fig. 45: Fuente de alimentación de tarjetas de control*

Fuente: Elaboración propia.

### 3.13.10 Transmisor de temperatura

Señal de entrada: Resistencia del PT100

Señal de salida: 4 – 20 mA

Función: Convierte la medición de resistencia del sensor de temperatura PT 100 a una señal estándar



*Fig. 46: Transmisor de sensor RTD PT100*

Fuente: Elaboración propia.

### 3.13.11 Relé

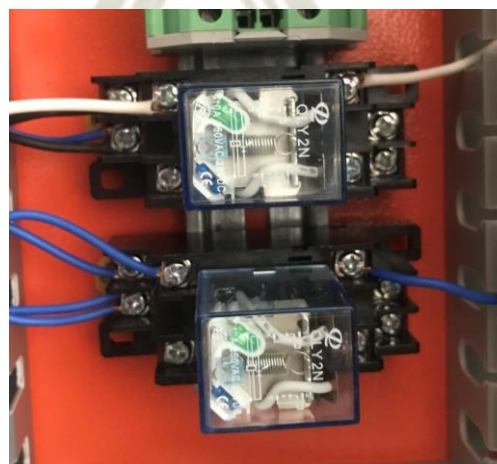
Marca: ZHNQI

Modelo: QLY-2N

Capacidad de carga: 220 VAC / 10 A

Voltaje: 24VDC

Función: Proteger los contactos de salida de los relés del PLC



*Fig. 47: Interruptores electromecánicos de agitador y motobomba*

Fuente: Elaboración propia.

### 3.13.12 Contactor

Marca:	CHINT
Modelo:	NC1- 0910
Corriente:	20A
Voltaje:	220 V
Función:	Energizar a la bomba.



*Fig. 48: Contactor de 220V/15A para la motobomba*

Fuente: Elaboración propia.

### 3.14 Comunicación

Los diseños de las técnicas de control son elaborados en la aplicación Simulink de Matlab, para lograr ello es necesario establecer una comunicación entre el software y el dispositivo de adquisición de datos o en este caso un PLC. Se evalúa el tipo de medio de comunicación, en el cual se estima el uso de un OPC o el protocolo de comunicación Modbus TCP/IP.

OPC es un software muy sencillo de usar en el cual simplemente las variables de entrada y salida del PLC son publicadas en el servidor de OPC, y posteriormente ser accedidas desde el cliente de OPC en Simulink. Pero su principal desventaja es que los servidores de OPC tienen un costo alto.

Modbus TCP/IP es un protocolo de comunicación por el cual el PLC LOGO8! tiene acceso, sin embargo, Simulink no cuenta con este tipo de comunicación, no obstante, el registro de datos se puede hacer a través del script de Matlab que posteriormente serían enviados hacia Simulink.

Luego de haber realizado el análisis de elección de medio de comunicación, se opta por usar Modbus TCP/IP.

### 3.14.1 Configuración de la comunicación entre Simulink y Logo8! a través de Modbus TCP/IP

Previamente a la conexión del PLC con la computadora, es necesario la configuración de la dirección IP, máscara de subred y pasarela predeterminada. Estos parámetros deben ser establecidos en la ventana de la configuración del LOGO! en el LOGO!Soft Comfort. Los parámetros a registrar deben guardar relación con los ingresados en el software. En la figura 49 y 50 se muestra la pantalla inicial del PLC. Se selecciona la opción Network y seguidamente se observa la configuración IP.



*Fig. 49: Selección de red en el PLC*

Fuente: Elaboración propia.



*Fig. 50: Configuración de la dirección del PLC*

Fuente: Elaboración propia.

Luego de haber verificado los parámetros de identificación del PLC, se abre el software LOGO!Soft Comfort



Fig. 51: Icono del LOGO!Soft Comfort desde el escritorio

Fuente: Elaboración propia.

Para llegar al cuadro de configuración del LOGO! primeramente se ingresa a archivo y luego a propiedades. Seguido de ello se lleva a cabo el registro de los mismos datos que contiene el PLC, tal como se muestra en la figura 52.

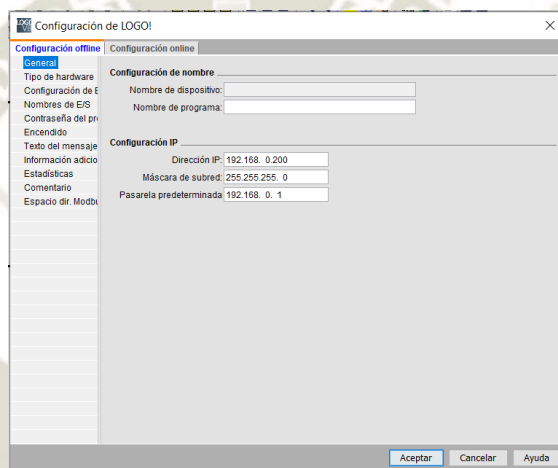


Fig. 52: Configuración offline del LOGO!

Fuente: Elaboración propia.

El tipo de hardware es el LOGO! 8. FS4.

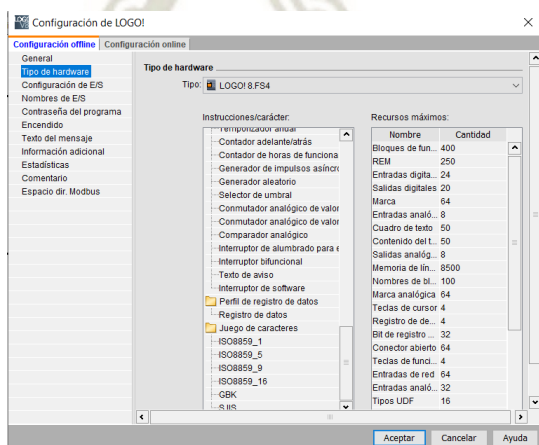
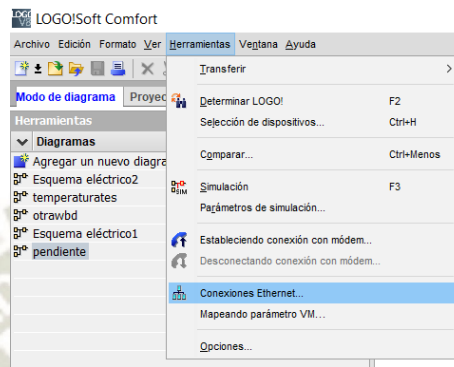


Fig. 53: Selección del tipo de Hardware del LOGO!

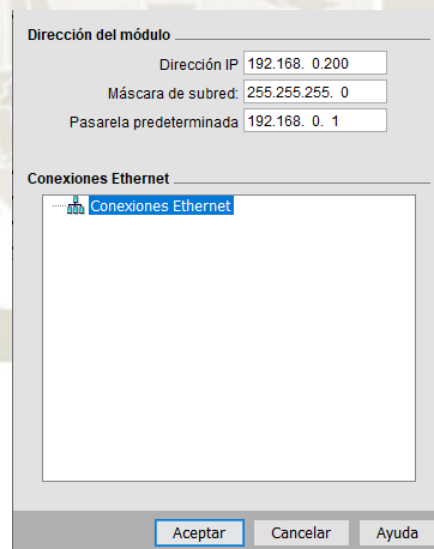
Fuente: Elaboración propia.

El establecimiento del protocolo de comunicación Modbus se realiza desde una conexión directa al PLC a través del adaptador red de la computadora. A continuación, se muestra el procedimiento para realizar la correcta configuración de la conectividad para la comunicación. Para ello se ingresa a herramientas y luego Conexiones Ethernet, tal como se muestra en la figura 54 y 55.



*Fig. 54: Selección de tipos de conexiones ethernet*

Fuente: Elaboración propia.




*Fig. 55: Creación de servidor Modbus*

Fuente: Elaboración propia.

Se procede a crear el servidor Modbus a través de Conexiones Ethernet, tal como se observa en la figura 55. El puerto establecido por defecto es el 502. Finalmente, terminado con la configuración de reconocimiento de dirección del PLC y creación del servidor Modbus, se realiza la descarga de datos al controlador desde la computadora mediante un cable ethernet.

En la figura 56 se observa las direcciones Modbus equivalentes a las direcciones de las variables de entrada, salida y de memorias del PLC. Estas direcciones servirán para que Matlab logre reconocer las variables que registra el PLC.

 Configuración de LOGO!

Configuración offline | Configuración online

General  
Tipo de hardware  
Configuración de E/S  
Nombres de E/S  
Contraseña del programa  
Encendido  
Texto del mensaje  
Información adicional  
Estadísticas  
Comentario  
**Espacio dir. Modbus**

**Espacio dir. Modbus**

Tipo direc.	Rango	Direc.Modbus asignada	Dirección	Ud.
I	1 - 24	Entr. discreta (DI) 1 - 24	R	bit
Q	1 - 20	Bob. 8193 - 8212	R/W	bit
M	1 - 64	Bob. 8257 - 8320	R/W	bit
V	0.0 - 850.7	Bob. 1 - 6808	R/W	bit
AI	1 - 8	Reg. entrada (IR) 1 - 8	R	word
VW	0 - 850	Registro paradas (HR) 1 - 425	R/W	word
AQ	1 - 8	Registro paradas (HR) 513 - 5...	R/W	word
AM	1 - 64	Registro paradas (HR) 529 - 5...	R/W	word

*Fig. 56: Direccionamiento Modbus del PLC LOGO8!*

Fuente: Elaboración propia.

La programación realizada en el PLC se encuentra en el Anexo 4.

En el software de Matlab se realiza la implementación de un programa que permita establecer la comunicación entre los datos de entrada y salida del PLC hacia Simulink, así como se muestra en la figura 57.

```
function [x] = mod1(input)
%Variables
persistent init_Server
persistent serverId;
persistent m;
persistent testVal;
persistent val1;
persistent val2;

%Inicialización de variables
if (isempty(init_Server))
    val1=0;
    val2=0;
    testVal = 0;
    init_Server = 0;
end
%Servidor Modbus (PLC) Direccion IP y puerto
if init_Server == 0
    init_Server = 1;

    m = modbus('tcpip','192.168.0.200',502);
    m.Timeout=3;
    m.WordOrder='little-endian';
    serverId=1;

end

    val1 = read(m,'holdingregs',529,1,serverId,'uint16');
%Temperatura
    val2 = read(m,'holdingregs',535,1,serverId,'uint16');
%Nivel
    A=[val1 val2]; %Almacenado en vector
    write(m,'coils',8196,input(1)); %DQ 3
    write(m,'coils',67,input(2)) %DQ 4
    write(m,'holdingregs',425,input(3),'uint16'); %Valvula
de control
    write(m,'holdingregs',1,input(4),'uint16');
%Resistencia calefactora

    testVal = A;

x = double(testVal);
end
```

Fig. 57: Programa de establecimiento de comunicación del PLC con Matlab

Fuente: Elaboración propia

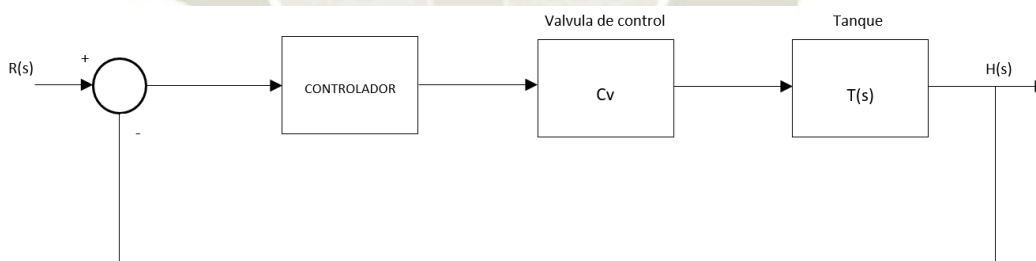
En la figura 57, se muestra el programa realizado en el script de Matlab, en el cual se declaran las variables locales con el comando `persistent`, se utiliza este comando para lograr retener el valor de los datos en una memoria.

Seguidamente pasan a ser declarado los valores de seguridad para la previa inicialización de conectividad con el servidor Modbus. Se establecen las configuraciones IP y sus características principales. Luego de ello las variables de lectura y escritura son direccionadas.

### 3.15 Identificación del sistema de control de nivel

Una vez que los instrumentos y actuadores se encuentren implementados en el módulo de control, se procede a realizar la identificación del sistema de nivel. Se realiza este procedimiento para observar la repuesta dinámica que tiene nuestra variable de proceso ante la salida de control del actuador en lazo abierto, y finalmente llevar a cabo la sintonización de control PID.

El sistema de control está representado por un controlador, la válvula de ingreso y el tanque de agua. Esto es mostrado en la figura 58, donde  $R(s)$  es el valor deseado,  $H(s)$  es el nivel de agua actual,  $C_v$  es el factor de ganancia que la válvula aporta al sistema, y  $T(s)$  es la función de transferencia del tanque.



*Fig. 58: Diagrama del sistema de control de nivel*

Fuente: Elaboración propia

Para llevar a cabo el modelamiento matemático del tanque se debe de considerar los factores que aportan a su sistema dinámico. Esto es representado en la figura 59.

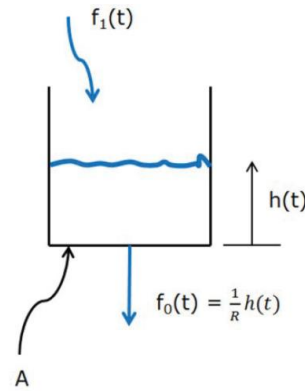


Fig. 59: Modelamiento matemático del nivel de un tanque

Fuente: Elaboración propia.

Donde  $f_1(t)$  y  $f_0(t)$  son las tasas de flujo de entrada y de salida respectivamente,  $h(t)$  representa el nivel del agua en el tanque, y  $R$  la resistencia del fluido del tanque.

La ecuación diferencial que denomina la transición temporal del sistema de nivel de la figura 60, se obtiene a través del caudal de entrada y que luego es disminuido y visto como un valor de caudal de salida en función del tiempo. Esto es expresado a través de la ecuación (3.21). Donde  $A$  es la capacitancia, el cual significa el cambio de la cantidad de líquido almacenado que origina un cambio en la altura.

$$A = \frac{\Delta \text{Volumen}}{\Delta h} \quad (3.21)$$

$$A dh = (f_i - f_o) dt \quad (3.22)$$

$$f_o = \frac{h}{R} \quad (3.23)$$

Se asume que  $R$  es un valor constante, para luego reemplazar la ecuación (3.23) en (3.22), obteniendo así:

$$A dh = \left( f_i - \frac{h}{R} \right) dt \quad (3.24)$$

$$R f_i = AR \frac{dh}{dt} + h \quad (3.25)$$

Se realiza la transformada de Laplace y se establece como condición inicial el valor de cero, por cual se obtiene:

$$(RA_s + 1)H(s) = RF_i(s) \quad (3.26)$$

$$\frac{H(s)}{F_i(s)} = \frac{R}{(RA_s + 1)} \quad (3.27)$$

Donde el flujo de entrada está dado por una constante que es generada por un cambio de nivel de tipo escalón, el cual se expresa de la siguiente manera:

$$f_i(s) = C u(t) \quad (3.28)$$

Aplicando transformada de Laplace

$$F_i(s) = \frac{C}{s} \quad (3.29)$$

Reemplazando la ecuación (3.29) en (3.27).

$$H(s) = \frac{RC}{RA_s + 1} \quad (3.30)$$

Para llevar a cabo la identificación de cada constante de la función de transferencia, se procede a realizar un programa en Simulink, con el cual se le suministra agua al tanque hasta los 30 cm, que posteriormente será su capacidad máxima en operación. Después de ello se realiza la descarga hacia el tanque inferior, mientras los datos se están guardando en el osciloscopio. En la figura 60, se muestra un decaimiento de la altura con respecto al tiempo, de tipo exponencial. Lo valores se encuentran en la unidad de medida centímetro (cm).

Con la ayuda de Matlab, se obtiene la ecuación que representa a  $h(t)$ .

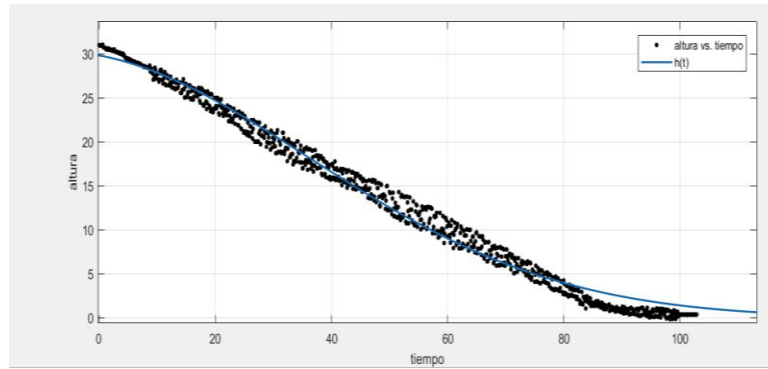


Fig. 60: Comportamiento dinámico del cambio de nivel

Fuente: Elaboración propia

$$h(t) = 30.34 * e^{(-0.02246t)} \quad (3.31)$$

Para hallar el decaimiento del volumen de agua, se multiplica la altura por el área de sección de transversal del tanque. La ecuación del comportamiento del volumen en función del tiempo es obtenida por la figura 61.

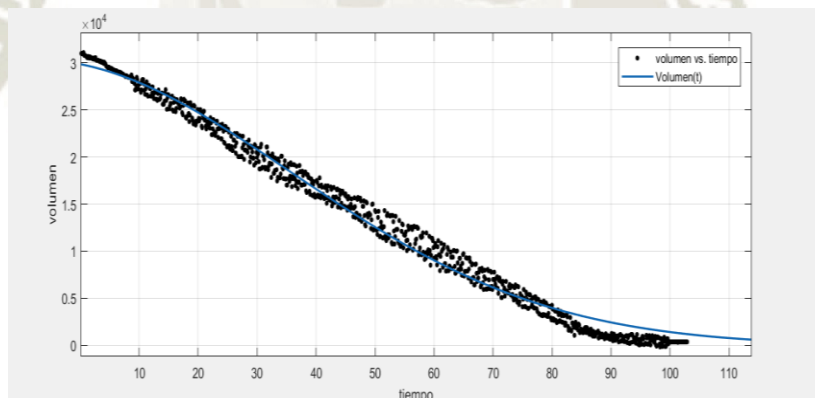


Fig. 61: Comportamiento dinámico del cambio de volumen

Fuente: Elaboración propia

$$Volumen(t) = 30350 * e^{(-0.02246t)} \quad (3.32)$$

Para obtener el flujo de salida, simplemente se utiliza la ecuación (3.33).

$$f_0(t) = \frac{dVolumen(t)}{dt} \quad (3.33)$$

$$R = \frac{h(t)}{Volumen(t)} \quad (3.34)$$

$$R = 0.0385 \frac{\text{seg}}{\text{cm}^2}$$

Para hallar la constante de la válvula de control, se le realiza diferentes tipos de aperturas correspondientes a un tiempo determinado, es decir para esta prueba a la válvula de control se le suministró diferentes voltajes, en el cual cada uno tenía una periodicidad de 180 segundos, estas operaciones se realizaron con voltajes de salida del PLC de 4 a 10 VDC. Para cada suministro de tensión, se le realizó la misma prueba 3 veces, y luego de ellos fueron promediados, con la finalidad de obtener una mejor precisión en la ganancia de la válvula. Por lo cual la constante es calculada como se muestra en la figura 62.

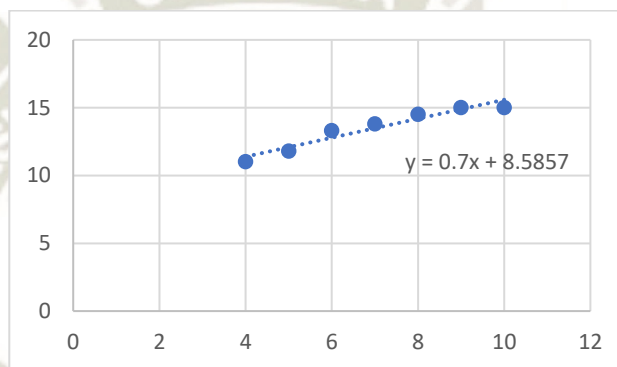


Fig. 62: Constante de la válvula de control

Fuente: Elaboración propia.

$$C = 0.7$$

Durante las pruebas de medición de nivel, se observa que existe un retardo de tiempo de 1.1 segundos. Este tiempo de retraso es sometido a la función de transferencia.

El área de la sección transversal del tanque es  $A_B = 986 \text{ cm}^2$ , Esto es reemplazado en la ecuación (3.30), así como también la ecuación (3.34) y el valor de  $C = 0.7$ . Por consiguiente, se logró obtener la siguiente función de transferencia.

$$H(s) = \frac{0.02695}{37.96s + 1} * e^{-1.1s} \quad (3.35)$$

### 3.15.1 Sintonización del controlador PID para el sistema de control de nivel

Dado que se requiere alcanzar un control eficaz del nivel, para así poder lograr controlar la temperatura del agua, es necesario el uso de un controlador, para lo cual se elige el controlador PI.

La sintonización se lleva a cabo a través del método de Ziegler-Nichols, las fórmulas son obtenidas de la figura 63.

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Fig. 63: Parámetros de sintonización de controlador PID, a través del método de Ziegler-Nichols

Fuente: [11]

La identificación de las constantes de la función de transferencia de la ecuación (3.35), se muestran en la ecuación (3.36):

$$G = \frac{K_g}{\tau s + 1} \quad (3.36)$$

Donde:

$$K_g: 0.02695$$

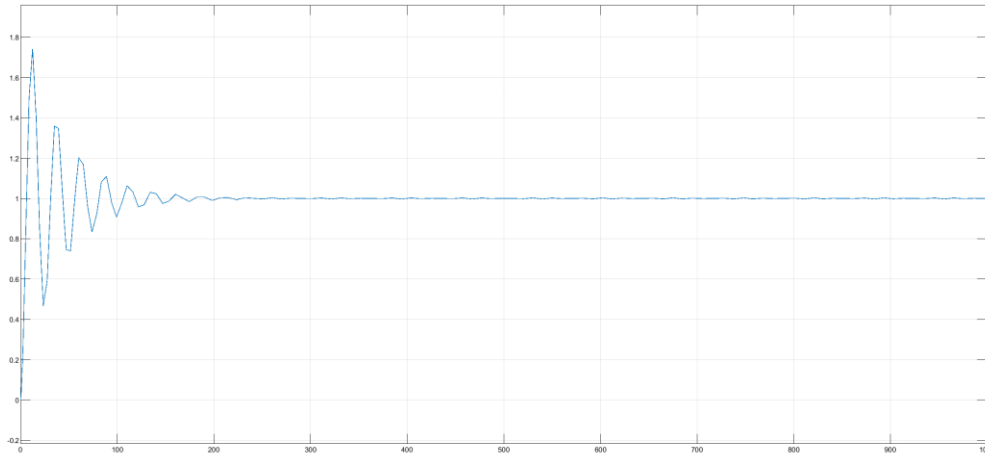
$$\tau: 37.96$$

Reemplazando:

$$K_p: \frac{37.96}{1.1} = 34.5$$

$$T_i: \frac{1.1}{0.3} = 3.66$$

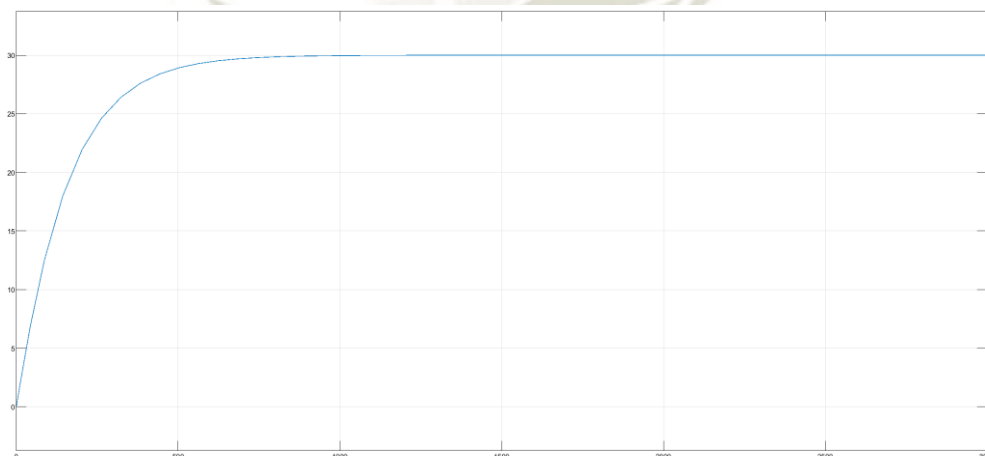
Los parámetros del controlador son ingresados a un programa hecho en Simulink, el cuál simulará el comportamiento del sistema ante el controlador PI, tal como se muestra en la figura 64.



*Fig. 64: Sintonización del sistema de control de nivel,  $K_p=34.5$  y  $T_i= 3.66$*

Fuente: Elaboración propia

Se observa en la figura 64, que una ganancia proporcional de 34.5 ha afectado al sistema, provocando una oscilación y un máximo sobre impulso del 75%, para lo cual se procede a reducir la ganancia proporcional a un valor de 8. El tiempo integral también es reducido a un valor de 0.03, obteniendo así, la figura 65.



*Fig. 65: Sintonización fina del sistema de control de nivel,  $K_p=8$  y  $T_i= 0.03$*

Fuente: Elaboración propia.

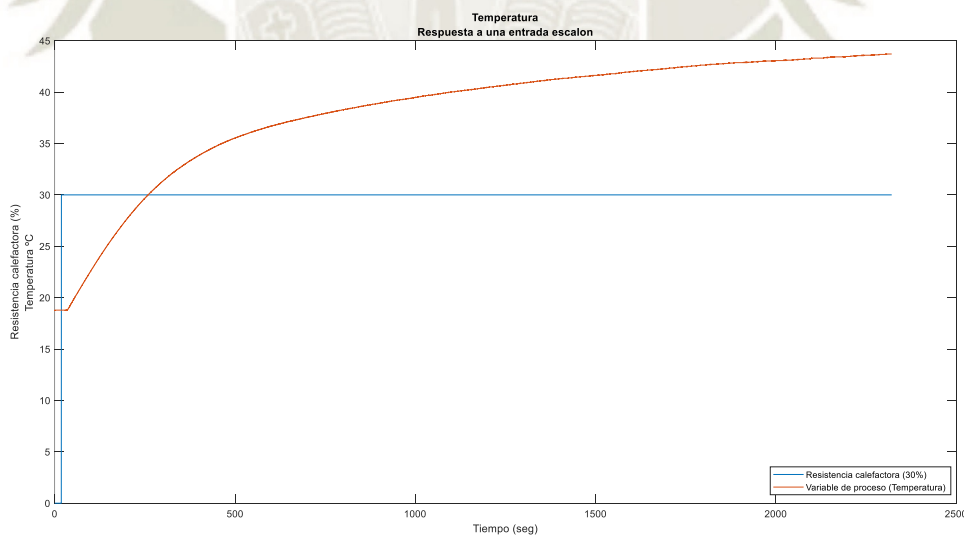
De la figura 65, se demuestra que el sistema de nivel ante la sintonización fina, ha obtenido un error estacionario de cero, y un tiempo de establecimiento aproximado de 1000 segundos. Lo cual para este módulo educativo es una condición óptima para su uso.

### 3.16 Identificación del sistema de control de temperatura

Para llevar a cabo la identificación del sistema de temperatura se le realizan pruebas en lazo abierto, con el sensor de temperatura conectado al proceso.

En esta configuración el controlador no realiza ninguna acción para corregir el error. Este procedimiento también es llamado colocar el sistema de control en modo manual, ya que las resistencias calefactoras serán controladas por el operador colocándole así tanta potencia que se requiera que entregue, mientras que la RTD únicamente solo monitoreará y reportará la temperatura actual del sistema hacia el operador.

Se desarrolló un programa en Simulink para obtener los valores del comportamiento de la temperatura frente a una entrada escalón, que en este caso sería la potencia que disipa las resistencias calefactoras. En la figura 66, se observa la curva de respuesta de la temperatura frente a un cambio de porcentaje de potencia.



*Fig. 66: Respuesta de la temperatura ante un cambio en la entrada*

Fuente: Elaboración propia.

Luego de haber conseguido el comportamiento de la variable de proceso frente a una entrada escalón, se identifica que el proceso obedece a un sistema de primer orden con retardo. La

función de transferencia de la planta es obtenida a través de las ecuaciones (3.37), (3.38), (3.39) y (3.40).

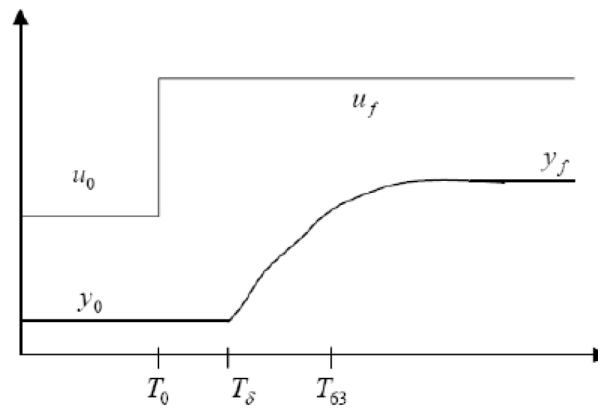


Fig. 67: Variable de proceso vs Entrada escalón

Fuente: Elaboración propia

$$G = \frac{K_p e^{-Ls}}{\tau s + 1} \quad (3.37)$$

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (3.38)$$

$$\tau = T_{63.2} - T_\delta \quad (3.39)$$

$$L = T_\delta - T_0 \quad (3.40)$$

Los valores de cada constante son obtenidos de la curva de reacción del proceso. Para ello se unifican y normalizan los valores en unidad de voltaje a través de las ecuaciones (3.41) y (3.42).

$$V_{out} = \frac{Pot(\%)}{10} \quad (3.41)$$

$$V_{in} = \frac{T - 10}{4} \quad (3.42)$$

Condiciones del modelado de la figura 66:

$$u_0 = 0 \text{ V}$$

$$u_f = 3 \text{ V}$$

$$y_f = 8.42 V$$

$$y_0 = 2.19 V$$

$$T_0 = 15 \text{ seg}$$

$$T_\delta = 33.36 \text{ seg}$$

$$T_{63.2} = 439.6 \text{ seg}$$

Aplicando los los valores obtenidos anteriormente en la ecuación (3.37), se obtiene:

$$\begin{aligned} K &= \frac{8.42 - 2.19}{3} = 2.07 \\ \tau &= 439.6 - 33.36 = 406.24 \text{ seg} \\ L &= 33.36 - 15 = 18.36 \text{ seg} \\ G(s) &= \frac{2.07 e^{-18.36s}}{406.24s + 1} \end{aligned} \quad (3.43)$$

### 3.16.1 Sintonizaciones de controlador a través del modelamiento matemático obtenido del sistema de control de temperatura

#### 3.16.1.1 Sintonización del controlador PI

Luego de haber obtenido el valor la función de transferencia del sistema, se procede a hallar los parámetros del controlador PI

El cálculo es realizado a través de los parámetros de sintonización del primer método de Ziegler-Nichols, el cual nos muestra las reglas de sintonía en la figura 64.

$$\begin{aligned} K_p &= 0.9 * \frac{406.24}{18.36} = 8.62 \\ T_i &= \frac{18.36}{0.3} = 61.2 \end{aligned}$$

La sintonización del controlador PI, es dado para el algoritmo de control expresado en diagrama de bloques de la figura 68.

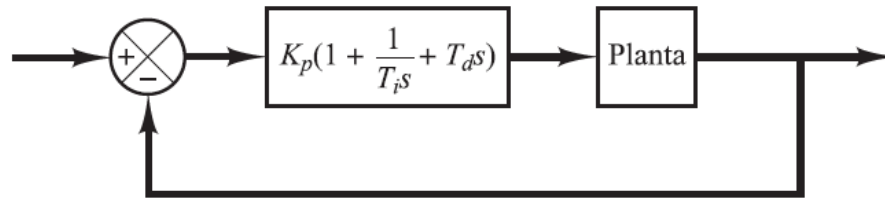


Fig. 68: Algoritmo de control PI

Fuente: [11]

En la figura 68, se observa que la ganancia proporcional  $K_p$  multiplica a los parámetros de la integral y derivativa, lo que para este caso la parte derivativa es igual a cero, mientras que  $K_p$  podría llamarse la ganancia del controlador, convirtiéndola así en  $K_c$ , por lo tanto para obtener la ganancia integral se daría a través de la formula (3.44).

$$PI = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i} + 0 \right) \quad (3.44)$$

$$PI = K_c + \left( K_c * \frac{1}{T_i} \right) \quad (3.45)$$

Donde:

$$K_p = K_c = 8.62$$

$$K_i = \frac{1}{T_i} = \frac{1}{61.2} = 0.016$$

Se realiza un programa en Simulink para obtener las respuestas del sistema de control ante las nuevas ganancias del controlador PI

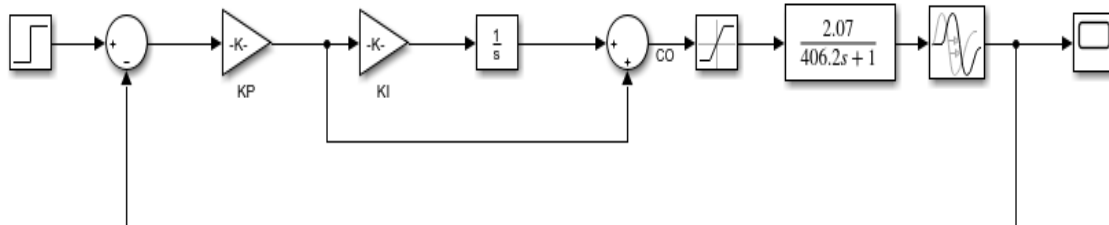
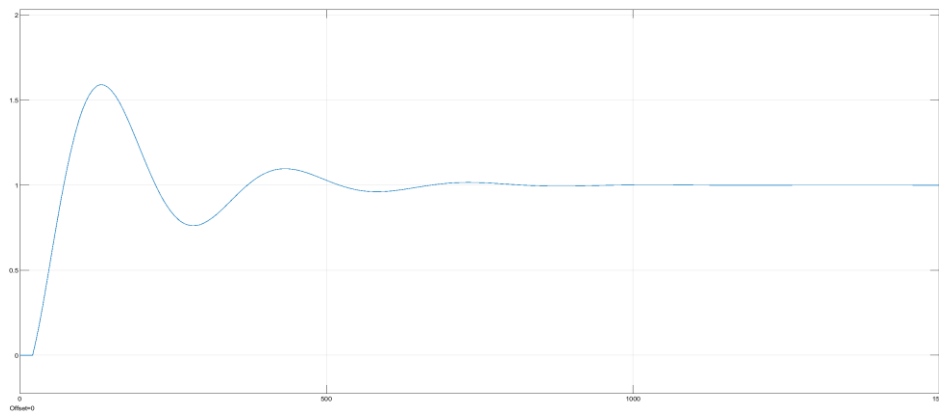


Fig. 69: Elaboración de control en lazo cerrado en Simulink, aplicando el controlador PI

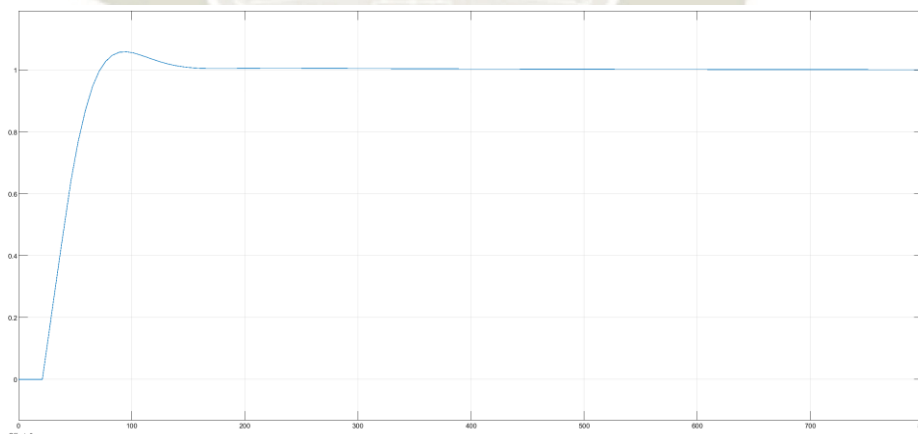
Fuente: Elaboración propia



*Fig. 70: Primera sintonización de controlador PI para un control de temperatura simulado en Simulink.  $K_p= 8.62$ ,  $T_i=61.2$*

Fuente: Elaboración propia

En la figura 70, se observa un sobre impulso del 60% y con un tiempo de establecimiento aproximado a los 800 segundos. Para lograr reducir el sobre impulso y el tiempo de establecimiento, se regulan los parámetros de la ganancia integral, aumentándolo así a 175. Luego de realizar la simulación con el nuevo dato, se observa en la gráfica del osciloscopio que aun sigue presentando un sobre impulso, por lo cual se opta por disminuir la ganancia proporcional  $K_p$  a 3.8, teniendo así la figura 71.



*Fig. 71: Segunda sintonización de controlador PI para un control de temperatura simulado en Simulink.  $K_p= 3.8$ ,  $T_i=175$*

Fuente: Elaboración propia

Con lo nuevos parámetros ingresados, se observa que el sobre impulso del sistema disminuyo a un valor cercano de 1.06, con la condición de poder mantener o disminuir el

tiempo de establecimiento, en este caso, el tiempo se mantuvo en un valor cercano a los 180 segundos.

### 3.16.1.2 Sintonización de control PID

Para la sintonización del controlador PID, se utiliza nuevamente el método de sintonización de Ziegler-Nichols.

$$K_p = 1.2 * \frac{T}{L} \tag{3.46}$$

$$K_p = 1.2 * \frac{406.24}{18.36} = 26.55$$

$$T_i = 2 * L \tag{3.47}$$

$$T_i = 2 * 18.36 = 36.72$$

$$T_d = 0.5 * L \tag{3.48}$$

$$T_d = 9.18$$

Del programa realizado, que se muestra en la figura 72 se agrega la acción derivativa. Obteniendo así:

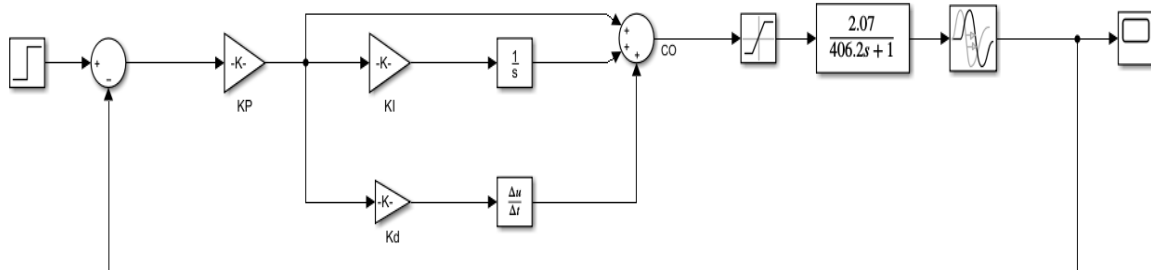
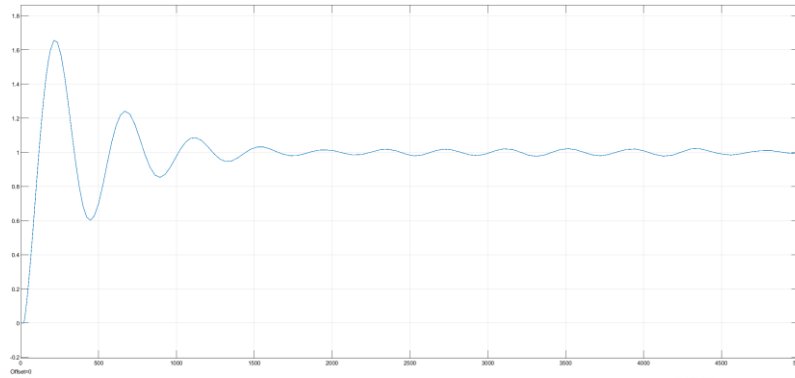


Fig. 72: Elaboración de control en lazo cerrado en Simulink, aplicando el controlador PID

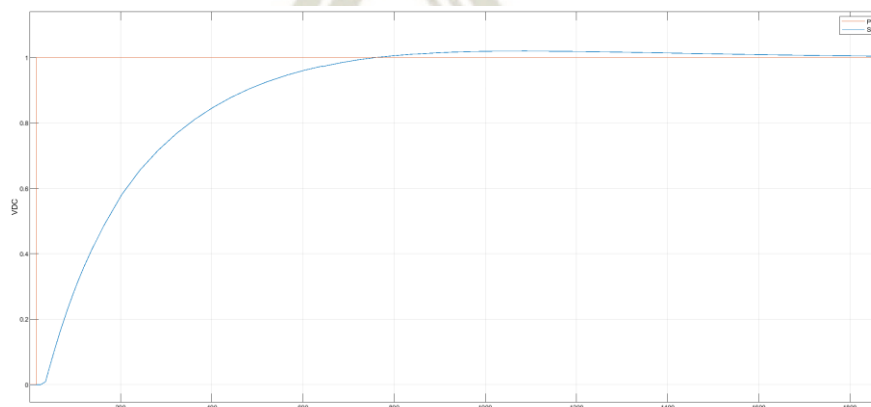
Fuente: Elaboración propia.



*Fig. 73: Primera sintonización de controlador PID para el control de temperatura a través del método de Ziegler- Nichols*

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 73, se muestra que después de haber sintonizado el controlador PID, la variable de proceso presenta un comportamiento muy agresivo, lo cual perjudica notablemente al sistema de control en el cual se requiera evitar sobre impulsos, ya que este cuenta con un sobre impulso de 0.65 mayor a la entrada escalón del sistema, aparte de ello se observa que este presenta una oscilación frecuente, obteniendo así un error estacionario permanente. Para lograr reducir el sobre impulso y el tiempo de establecimiento, se considera la ventaja de la acción derivativa el cual nos permite reducir la ganancia proporcional y aumentar la acción integral, para ello  $T_i$  se aumentó a 350. Luego de realizar la simulación con el nuevo dato, se observa en la gráfica del osciloscopio que aún sigue presentando un sobre impulso con una oscilación en régimen permanente, por lo cual se opta por disminuir la ganancia proporcional  $K_p$  a 0.7, teniendo así la figura 74.



*Fig. 74: Segunda sintonización de controlador PID para un control de temperatura simulado en Simulink.  $K_p= 0.7$ ,  $T_i= 350$ ,  $T_d=9.18$*

Fuente: Elaboración propia.

Luego de haber regulado los parámetros PID, se observa que en la figura 74, el controlador ha mejorado notoriamente el comportamiento de la variable de proceso. Este cuenta con un sobre impulso de 4%, y con un tiempo de establecimiento aproximado a los 1600 segundos.

### 3.16.1.3 Incorporación del controlador PI en la estructura del predictor de Smith

Los procesos con grandes tiempos de retardo son difíciles para controladores convencionales debido a que el tiempo muerto introduce una disminución adicional en la fase de sistemas, que puede causar a veces inestabilidad.

El predictor de Smith es una solución eficiente para procesos con grandes tiempos de retardo, a lo cual también permite mejorar la respuesta del alcance a punto de consigna que un PID.

La manera de como consigue controlar procesos con atrasos dominantes se explica en la siguientes figuras y ecuaciones.

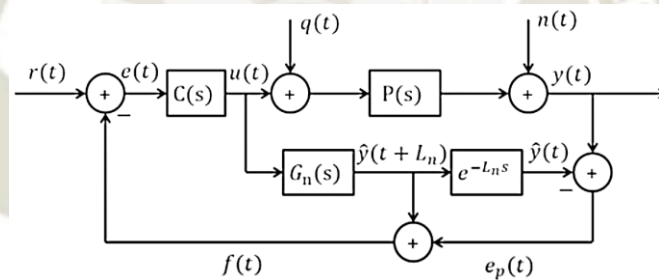


Fig. 75: Diagrama de bloques del Predictor de Smith

Fuente: [57]

Simplificando:

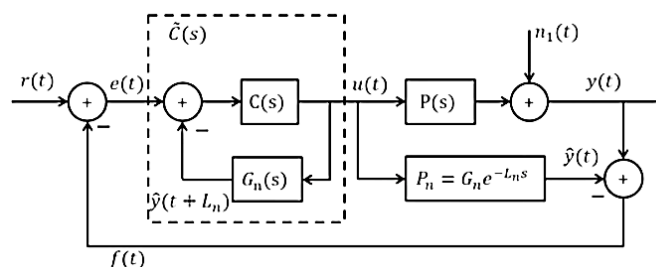


Fig. 76: Simplificación del diagrama de bloques, reducción del diagrama en lazo cerrado del controlador y la ganancia del modelamiento matemático del sistema

Fuente: [57]

$$\tilde{C}(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)G_n(s)} \quad (3.49)$$

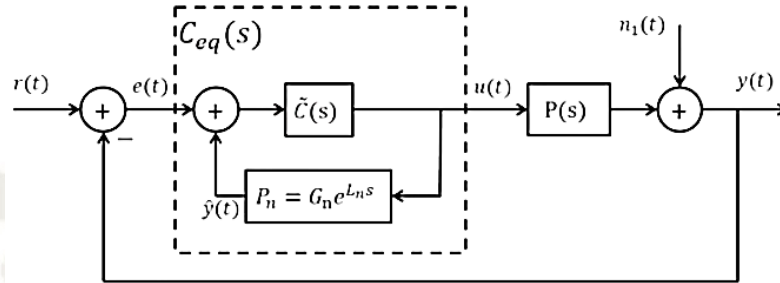


Fig. 77: Simplificación del diagrama de bloques, reducción del diagrama en lazo cerrado de  $\tilde{C}(s)$  y la función de transferencia del sistema

Fuente: [57]

Donde:

$$C_{eq}(s) = \frac{\tilde{C}(s)}{1 - \tilde{C}(s)P_n(s)} \quad (3.50)$$

$$C_{eq}(s) = \frac{\frac{C(s)}{1 + C(s)P_n(s)}}{1 - \frac{C(s)}{1 + C(s)P_n(s)}P_n(s)} \quad (3.51)$$

$$C_{eq}(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)G_n(s) - C(s)P_n(s)} \quad (3.52)$$

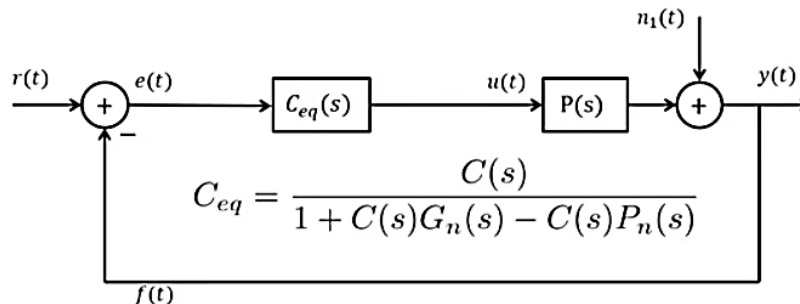


Fig. 78: Diagrama de control con respecto a  $C_{eq}(s)$  y  $P(s)$  en lazo cerrado

Fuente: [57]

$$H(s) = \frac{C_{eq}P}{1 + C_{eq}P} \quad (3.53)$$

$$H(s) = \frac{\frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)G_n(s) - C(s)P_n(s)}}{1 + \frac{C(s)}{1 + C(s)G_n(s) - C(s)P_n(s)}} \quad (3.54)$$

$$H(s) = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s) - C(s)P_n(s) + C(s)G_n(s)} \quad (3.55)$$

$$H(s) = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)[P(s) - P_n(s) + G_n(s)]} \quad (3.56)$$

Dada la identificación del sistema del sistema, se toma en cuenta que  $P(s) = P_n(s)$

$$H(s) = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)G_n(s)} \quad (3.57)$$

$$H(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G_n(s)} e^{-Ls} \quad (3.58)$$

Como se observa en la ecuación (3.57) el denominador o también llamado la ecuación característica del sistema se encontraría libre de atraso, lo que ayudaría a diseñar un controlador robusto, sin el efecto del retardo de tiempo.

En la figura 79, se observa el programa implementado en Simulink con el controlador PI dentro de la estructura del predictor de Smith. La sintonización del controlador PI, fue realizada sin incluir el retardo en la función de transferencia de la planta, ya que es una de las bondades que ofrece el Predictor de Smith, obteniendo así un  $K_p$ : 8 y  $K_i$ :0.0025.

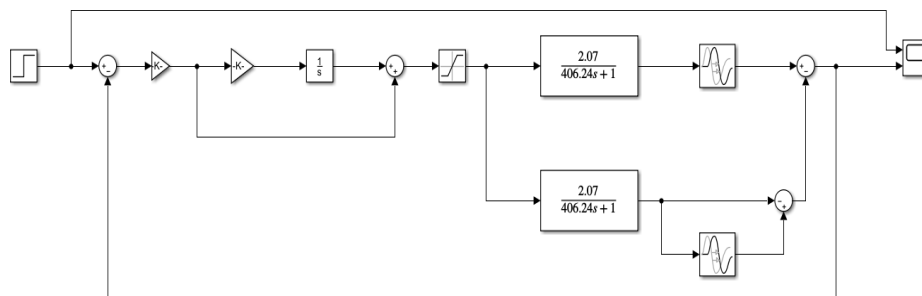
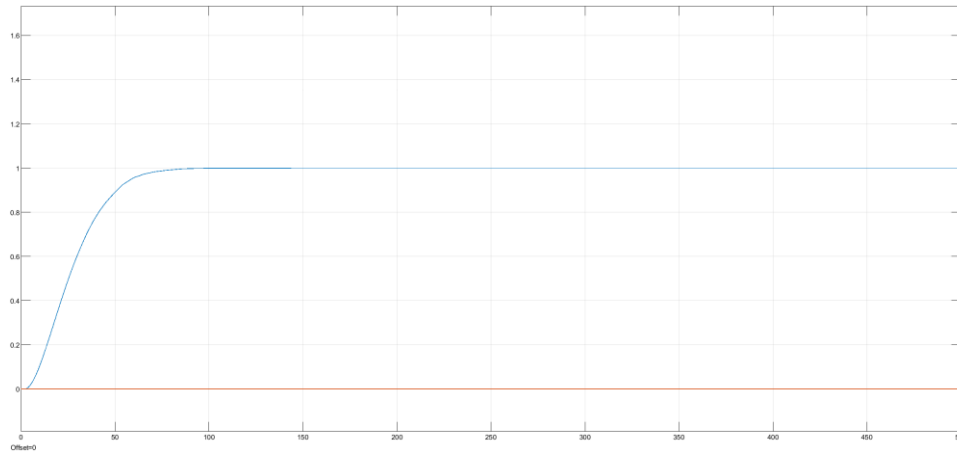


Fig. 79: Sistema de control PID dentro de la estructura del Predictor de Smith, para un control de temperatura. Elaborado en Simulink

Fuente: Elaboración propia



*Fig. 80: Comportamiento de la variable de proceso frente a un cambio de entrada  
(Predictor de Smith)*

Fuente: Elaboración propia

En la figura 80, se observa que la integración de la estructura del predictor de Smith a un controlador del tipo PID, provoca que el sistema tenga una respuesta muy rápida ante la entrada escalón o cambio de punto de consigna. El sistema cuenta con un pequeño sobreimpulso del 1%.

### **3.17 Elaboración del sistema de control de temperatura para el módulo educativo**

#### **3.17.1 Implementación del sistema de control**

Se implementa un sistema de control de nivel para no variar el modelamiento matemático del sistema de control de temperatura del agua que se encuentra dentro del tanque. Cuando el sistema de control de nivel alcance niveles cercanos al establecido en el punto de consigna, el sistema de control de temperatura iniciará con su proceso, así como la excitación del motor del agitador.

De la figura 14, en el sistema de control de nivel se muestra que cuenta con dos actuadores en serie. La finalidad de la motobomba es ser el impulsor que mantenga una presión y flujo constante, mientras que la válvula de control es quien regulará el flujo de agua que se requiera para alcanzar al valor deseado. Por motivos de eficiencia y contrarrestar un posible tiempo de retardo, se utiliza una válvula check en la tubería de ascenso hacia la válvula de control.

Las consideraciones de seguridad se toman en cuenta para la implementación correspondiente en Simulink. Las identificaciones de sistema tanto de temperatura y de nivel

son llevadas también al software de Simulink, se analizan los controles PID y Predictor de Smith para verificar su robustez y rapidez del sistema.

### 3.17.2 Desarrollo del sistema de control de nivel

Previo a implementar el controlador del sistema se plantea una lógica de programación para colocar la bomba en modo manual o automático. En modo manual, el operador será capaz de encender o apagar el motor de la bomba tantas veces lo requiera, mientras que en automático será comandado por el lazo de control del sistema.

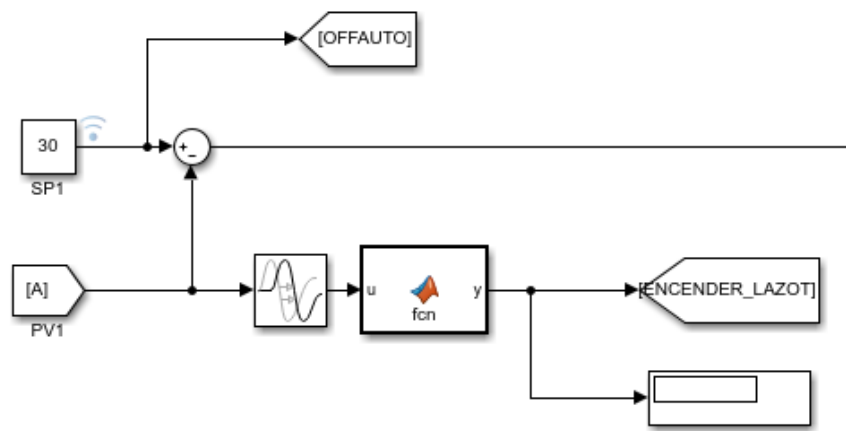


Fig. 81: Condiciones para el arranque de la motobomba en automático y cierre del lazo de control de temperatura

Fuente: Elaboración propia.

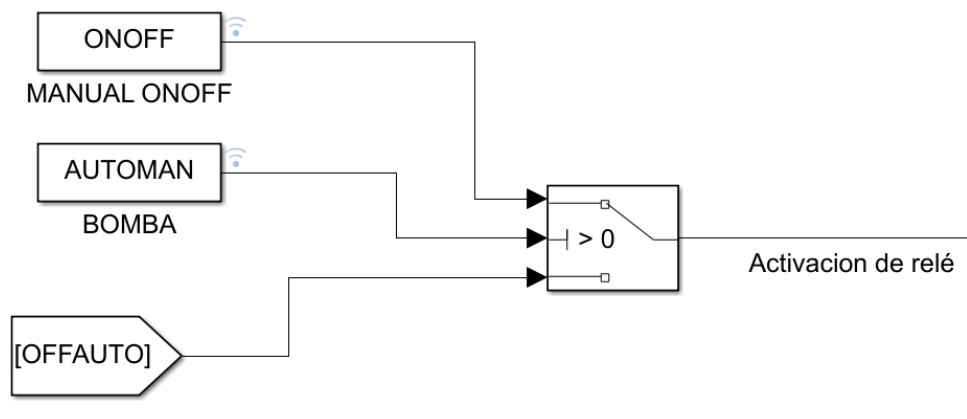


Fig. 82: Selector de modo manual y automático de la bomba

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 81, se muestra que el bloque SP1, es conectado a la entrada de un interruptor a través de los bloques GOTO y FROM. Esta asignación está dada para que cada vez que el interruptor se encuentre en modo automático, y haya un setpoint igual a cero, dará por consiguiente parar o no arrancar el motor hasta que supere esta condición. La finalidad de esta implementación es aumentar el tiempo de vida del actuador.

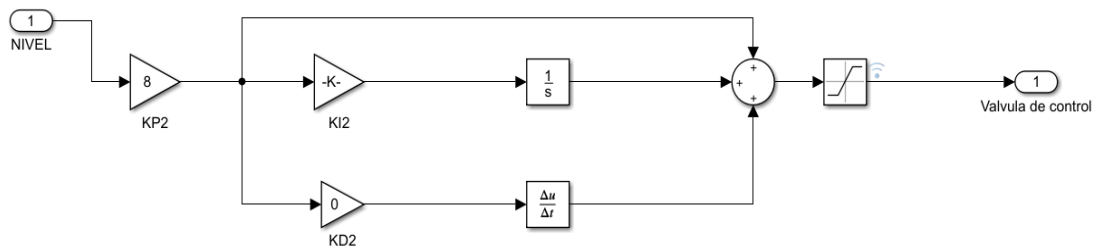


Fig. 83: Algoritmo del controlador PID del nivel del tanque

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 83, se observa la implementación del controlador PID del algoritmo ideal. El controlador se encuentra almacenado en un subsistema para un mejor orden y optimización del programa. Los parámetros de controlador son obtenidos mediante la sintonización PID.

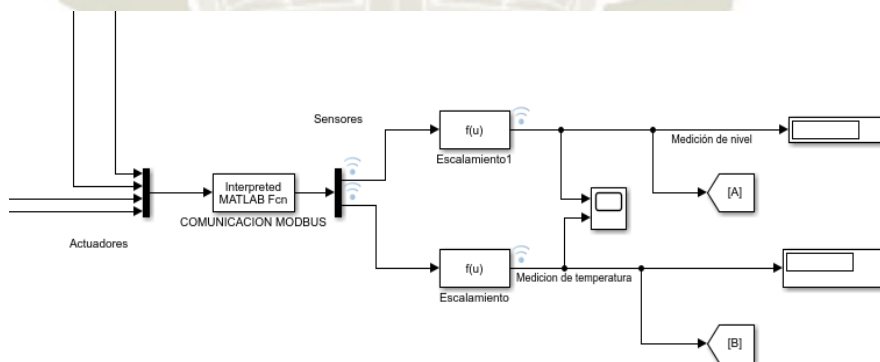


Fig. 84: Recepción de señales de entradas análogas a través de comunicación Modbus

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 84, se muestra las entradas y salidas del PLC que se encuentran conectados a él, tanto como los sensores RTD PT100 y el sensor de nivel de presión diferencial conectados a través de la comunicación Modbus por medio del bloque Interpreted MATLAB Fcn. Las señales recibidas de los sensores son escalizadas en función de la magnitud física que está midiendo.

### 3.17.3 Desarrollo del sistema de control de temperatura

El arranque del control de temperatura es dado luego de conseguir el nivel de agua adecuado. Se logra el inicio del sistema a través de un interruptor y también por medio de una función hecha en el bloque Fcn Matlab que se muestra en las figuras 81 y 85.

En la figura 85, se observa que a través de un bloque de función se consigue encender el agitador en modo automático cada vez que el lazo de control de temperatura esté funcionando y también cada vez que el nivel del tanque sea mayor a 15 cm.

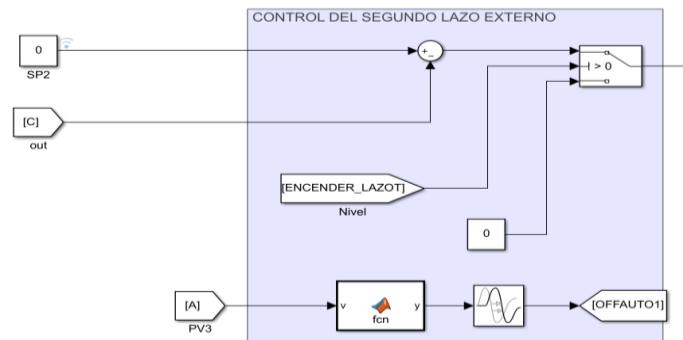


Fig. 85: Condiciones para el cierre de interruptor de lazo de temperatura y del funcionamiento del agitador

Fuente: Elaboración propia.

El algoritmo de control PID del sistema de temperatura, está dado por el de tipo ISA o también llamado ideal. Las acción integral y derivativa son afectadas por la ganancia proporcional. Este algoritmo se encuentra dentro de la estructura del Predictor de Smith. Para el uso de esta estructura se debe identificar correctamente el sistema dinámico del proceso.

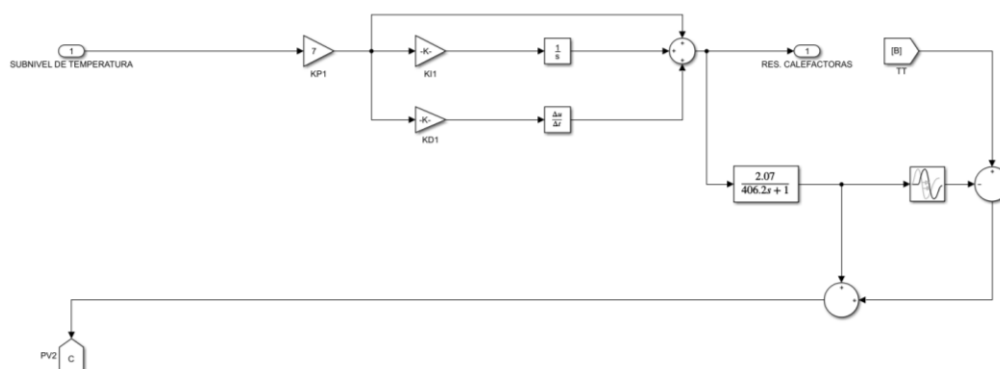


Fig. 86: Algoritmo de control PID + Predictor de Smith del sistema de temperatura

Fuente: Elaboración propia.

### 3.17.4 Implementación del HMI según la norma ANSI

La interfaz hombre – máquina llamada también por sus siglas en inglés HMI (Human Machine-Interface) fue diseñado para tener un rápido afianzamiento y acercamiento al operador.

El HMI cumple con ciertas características normadas que a continuación se describe:

La norma ANSI/ISA-101.01-2015 de la Instrument Society American (ISA), describe los criterios mínimos del diseño e implementación de las interfaces hombre – máquina para los sistemas de automatización de procesos, tanto en la iluminación de la pantalla, el color, las interacciones fondo-primer plano, densidad de la información mostrada, la dinámica visual y la ubicación de los parámetros.

En la figura 88, se demuestra que cuenta con tonalidades superficies conservadores y consistentes para la denotación de la información, así mismo se mitiga los degradado del color para los elementos dinámicos en la pantalla.

Las interacciones de fondo son de color neutro, lo cual garantiza la relevancia de la información principal. La densidad de esta información es limitada pero suficiente, el cual nos muestra la información pertinente que el operador deba saber y pueda interpretar rápidamente mientras evita información inútil.

En consiguiente el HMI cumple con la norma La norma ANSI/ISA-101.01-2015.

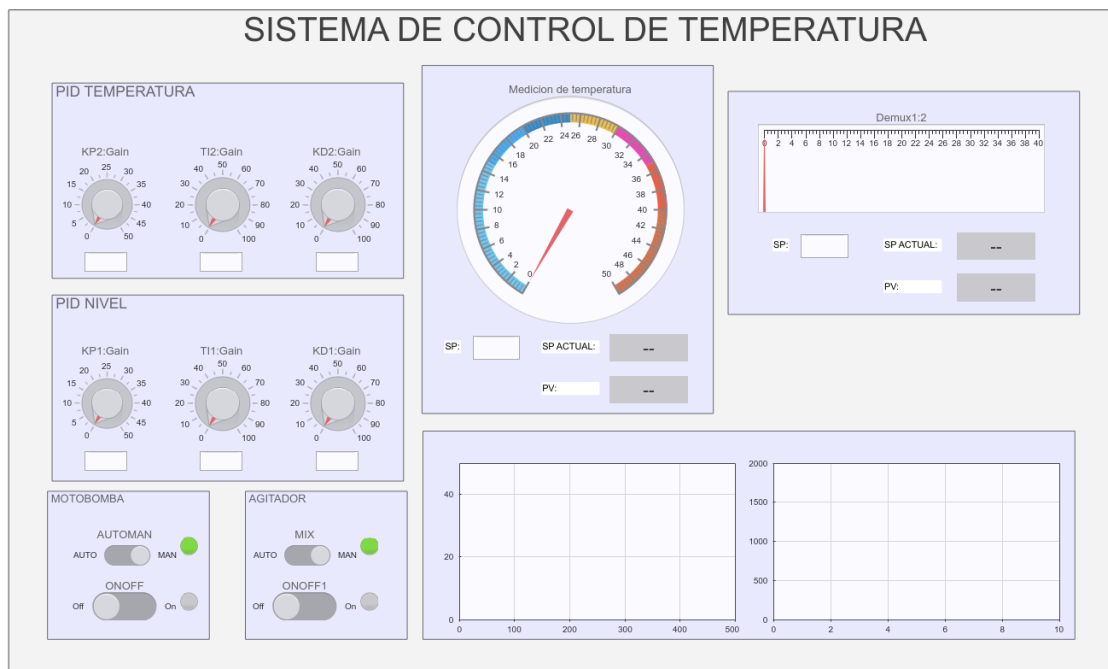
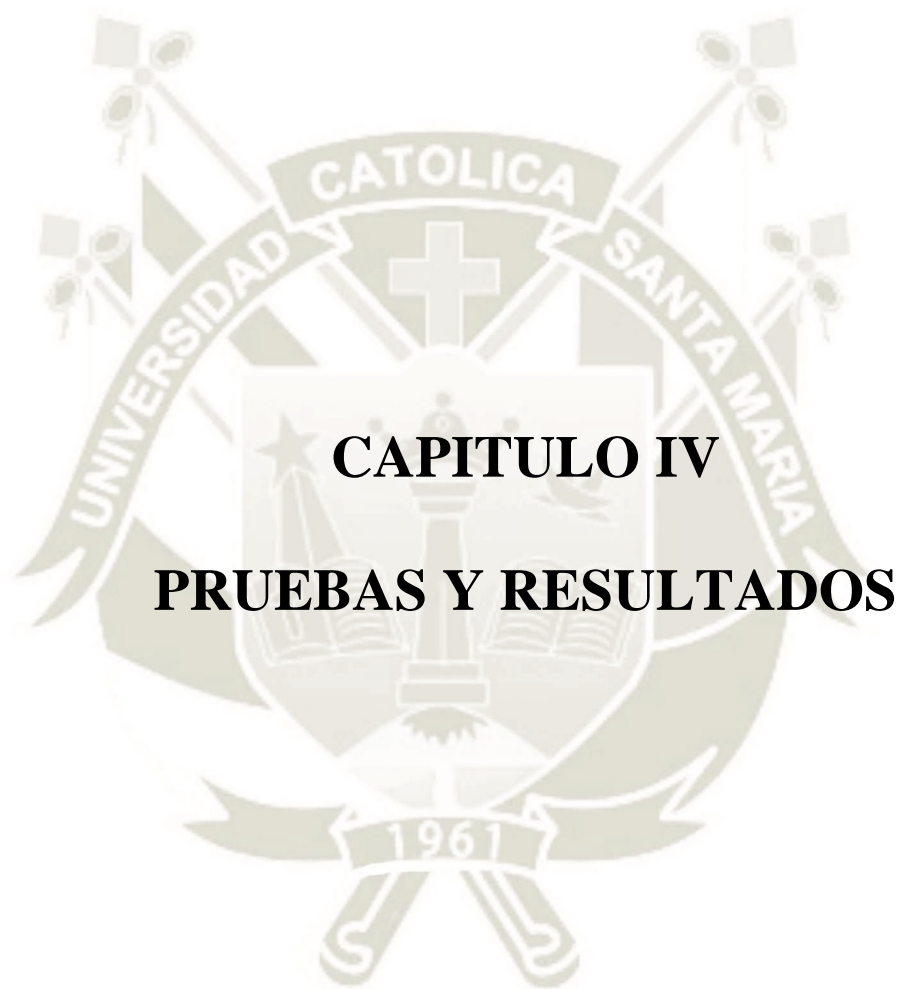


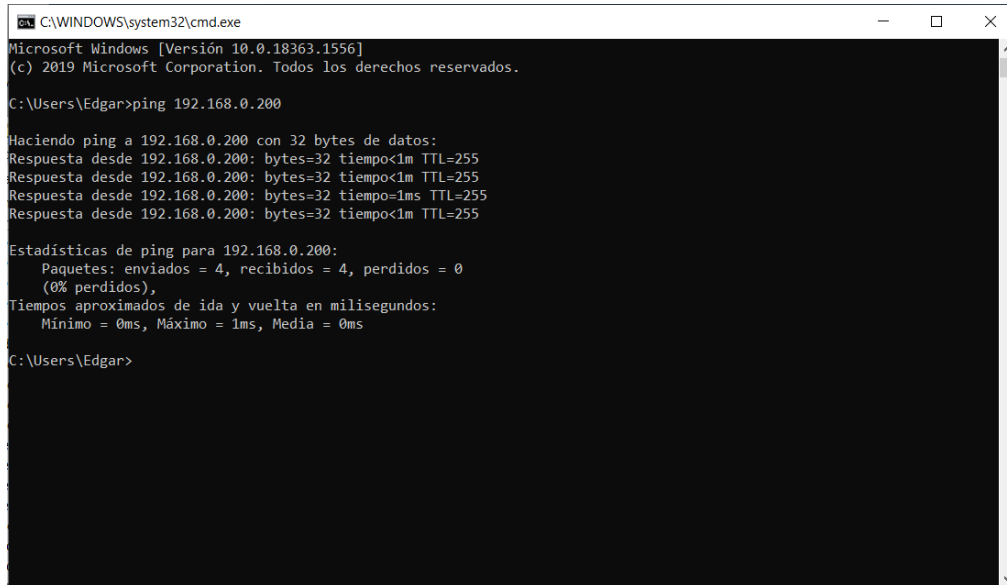
Fig. 87: HMI del Sistema de control de temperatura

Fuente: Elaboración propia.



#### 4.1 Pruebas de comunicación MODBUS TCP/IP

Se realiza una prueba de comunicación entre el PLC y la computadora a través de cmd.exe, se envían paquetes de datos hacia el dispositivo, en el cual se verifica su tiempo de respuesta, la emisión y recepción.



```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [Versión 10.0.18363.1556]
(c) 2019 Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\Edgar>ping 192.168.0.200

Haciendo ping a 192.168.0.200 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.0.200: bytes=32 tiempo<1m TTL=255
Respuesta desde 192.168.0.200: bytes=32 tiempo<1m TTL=255
Respuesta desde 192.168.0.200: bytes=32 tiempo=1ms TTL=255
Respuesta desde 192.168.0.200: bytes=32 tiempo<1m TTL=255

Estadísticas de ping para 192.168.0.200:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
              (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
        Mínimo = 0ms, Máximo = 1ms, Media = 0ms

C:\Users\Edgar>
```

*Fig. 88: Prueba de comunicación entre el PLC y la computadora*

Fuente: Elaboración propia.

Una vez verificada la comunicación que existe entre ambos dispositivos, se realiza un código en Matlab en el cual se visualizará la comunicación Modbus que existe entre el software y el PLC. Nos conectamos al servidor MODBUS a través de la dirección del controlador (“192.168.0.200”), luego se escribe los comandos tanto para escritura y lectura de las señales analógicas y digitales a través de las direcciones Modbus que se observa en la figura 56. El código escrito se muestra en la figura 89.

```
Command Window
>> m = modbus('tcpip','192.168.0.200',502)

m =

Modbus TCPIP with properties:

    DeviceAddress: '192.168.0.200'
           Port: 502
        Status: 'Connected'
    NumRetries: 1
        Timeout: 10 (seconds)
    ByteOrder: 'big-endian'
    WordOrder: 'big-endian'

>> read(m,'holdingregs',529,1,1,'uint16')

ans =

    60

>> read(m,'holdingregs',535,1,1,'uint16')

ans =

    1472

>> write(m,'holdingregs',425,100,'uint16')
>> write(m,'holdingregs',100,100,'uint16')
>> write(m,'coils',67,0)
>> write(m,'coils',8196,0)
```

*Fig. 89: Prueba de comunicación Modbus entre el PLC y Matlab*

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la comunicación Modbus se encuentra operativa y los comandos de READ y WRITE funcionan de acuerdo con lo que se encuentra en campo, por lo tanto, la comunicación Modbus TCP/IP es exitosa.

#### 4.1.1 Tabla de asignación de variables

ENTRADAS/SALIDAS PLC	DIRECCION MODBUS	DESCRIPCIÓN
AI3	529	Sensor de temperatura
AI4	535	Sensor de nivel
AO1	425	Resistencias calefactoras
AO2	100	Válvula de control
DO1	67	Motor del agitador del tanque
DO2	8196	Motor de la bomba de suministro de agua

Tabla 20: Tabla de asignación de variables de E/S del PLC y de comunicación Modbus

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2 Pruebas de funcionamiento del sistema de control de nivel

##### 4.2.1 Filtrado de señal

Se implementó los parámetros de configuración del controlador PI en Simulink para el sistema de control y medición de nivel. En la figura 91, se observa que el osciloscopio arroja el comportamiento del sistema con un sobre impulso de 1.3 cm para un cambio de entrada de 19 cm a 25 cm, además de ello se aprecia que la medición de nivel cuenta con ruido, el cual es producido por el golpe de presión del desfogue de la tubería de ingreso al tanque. Para lograr atenuar el ruido, se realiza un filtro pasa bajos en el programa de Simulink, este filtro es de tipo media móvil exponencial, el cual realiza el promedio ponderado multiplicado por un factor exponencial.

El filtro EMA para una señal R puede calcularse de la siguiente manera:

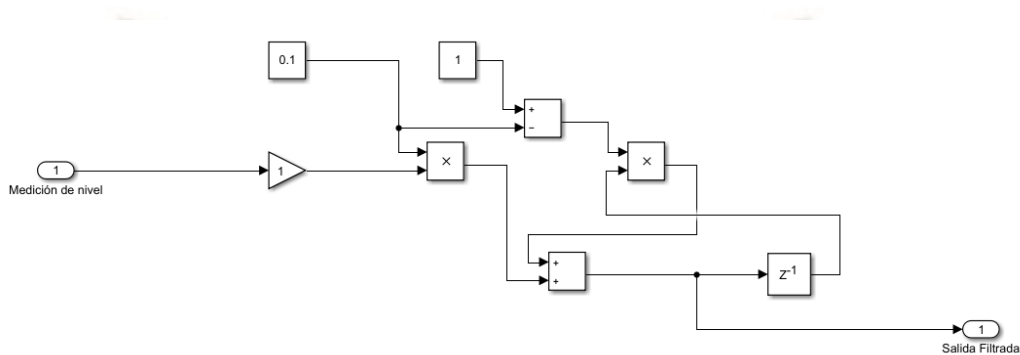
$$S(t) = \begin{cases} R(0) & t = 0 \\ aR(t) + (1 - a)S(t - 1) & t > 0 \end{cases}$$

Donde el coeficiente a es un factor de suavizado entre 0 y 1.

- R(t) es el valor de la señal que se va a filtrar en un periodo de tiempo t.
- S(t) es el valor de la EMA en cualquier periodo de tiempo t.

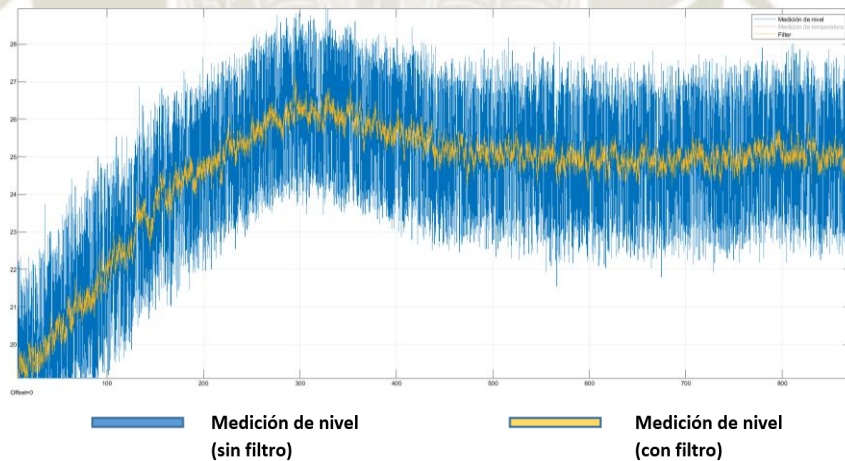
- $S(t-1)$  es el valor de la EMA en el periodo de tiempo  $t-1$ .

En la figura 90, se visualiza la implementación del filtro pasa bajo de primer orden implementado en Simulink. Se logró reducir el ruido, pero no de forma completa. La lectura de oscilación del sensor ahora es de  $\pm 1$  cm. Para lo cual este valor pasa a ser aceptable para nuestro módulo de control de temperatura.



*Fig. 90: Filtro pasa bajos EMA*

Fuente: Elaboración propia



*Fig. 91: Comportamiento dinámico del sistema de control de nivel*

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2 Sintonización del controlador PI

Dado que en la figura 91, se observó un sobre impulso para un cambio de entrada, se procede a realizar el ajuste fino del controlador PID.

Se realiza la sintonización del controlador PID, el cual parte con los parámetros ya obtenidos anteriormente, donde  $K_p=8$  y  $K_i=0.03$ , como recomendación para el módulo educativo, es que el valor deseado ingresado al sistema de control debe ser de acuerdo a un valor igual o muy cercano al nivel con el que se obtuvo el modelamiento matemático del sistema de temperatura, para lo cual fue a los 30 cm de altura.

La respuesta del sistema obtenido con un cambio de entrada de 0 a 30 cm ante los nuevos parámetros de configuración del control PI, fueron  $K_p= 8$  y  $K_i=0.006$ . En la figura 93, se observa que se logró eliminar el sobre impulso, además de ello, el tiempo de establecimiento es de aproximadamente 1000 segundos.

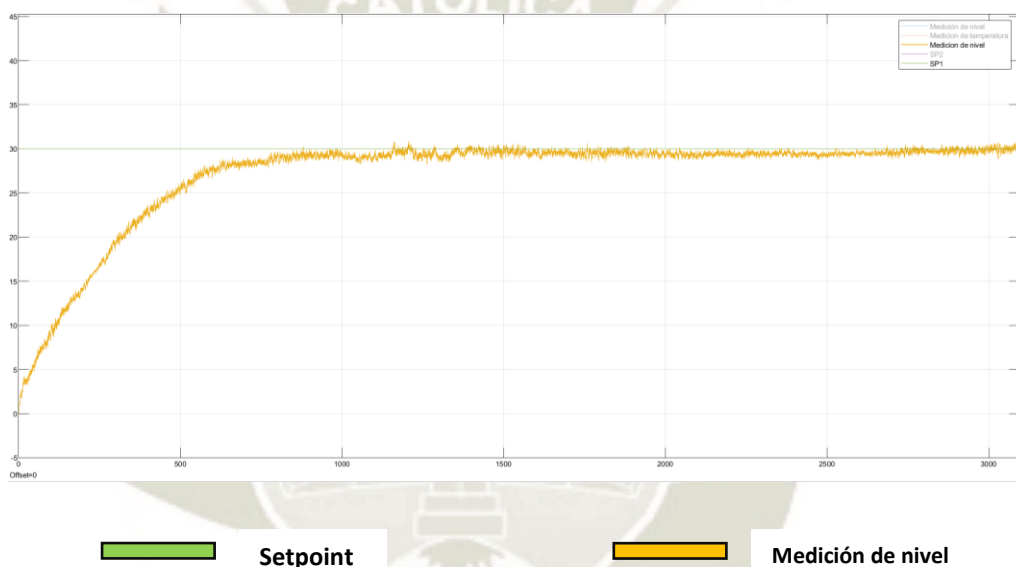


Fig. 92: Respuesta del sistema de control de nivel ante un cambio de entrada de 30 cm

Fuente Elaboración propia

### 4.3 Pruebas del sistema de control de temperatura

Dado que la implementación del Predictor de Smith necesita de la función de transferencia más próxima al modelo matemático de la planta real, se procede a realizar la comprobación del modelo matemático calculado, a través de un programa hecho en Simulink, como se muestra en la figura 93.

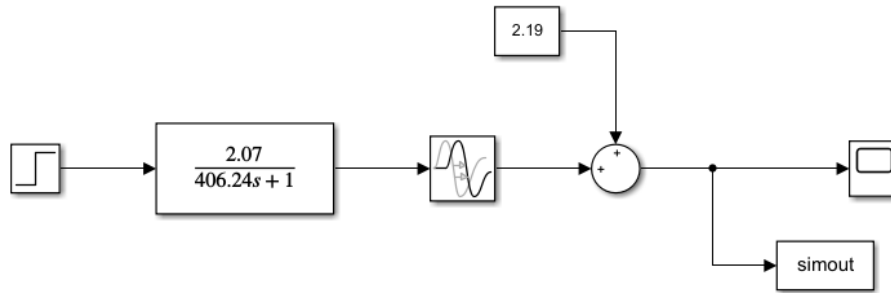


Fig. 93: Validación y simulación del sistema de control de temperatura, obtenido a través de la prueba experimental

Fuente: Elaboración propia

La respuesta obtenida para un cambio de entrada de 0 a 50% de potencia disipada por la resistencia calefactora se observa en la figura 94, así como la función de transferencia hallada de forma experimental, el cual presenta un retardo de 18.36 segundos, A este se le agrega un offset de 2.19 VDC, ya que fue el voltaje inicial con el que se empezó a calcular el modelamiento matemático. En la figura 94, se muestra el comportamiento del sistema calculado y experimental.

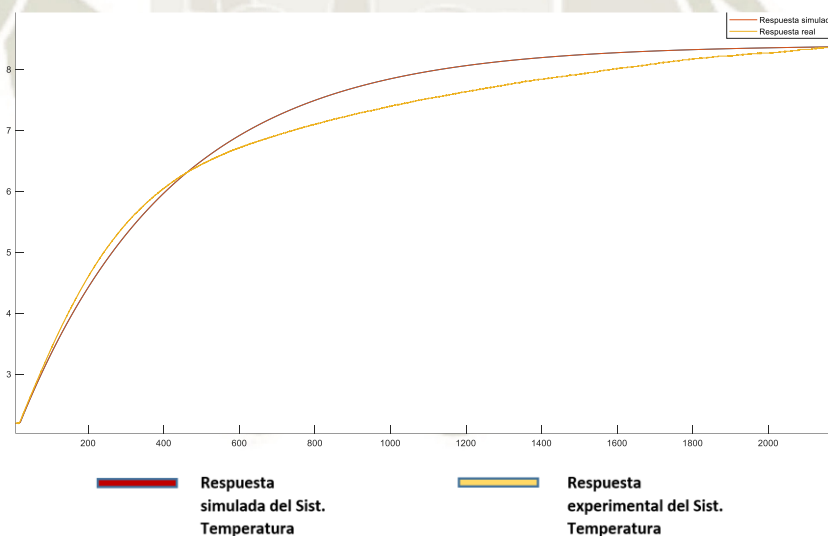


Fig. 94: Prueba experimental y real del sistema de temperatura

Fuente: Elaboración propia.

Se implementa el Predictor de Smith y el control PI a través de los diagramas de bloque de Simulink. El análisis del comportamiento de la planta bajo este controlador se muestra en la figura 95.

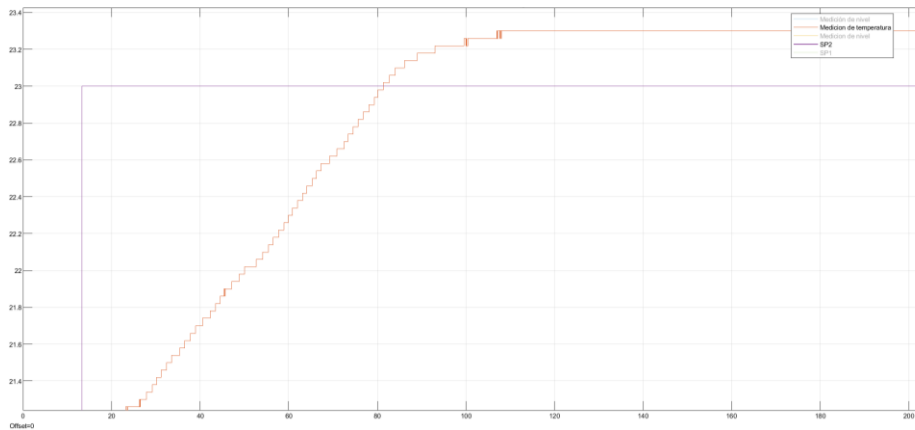


Fig. 95: Primera prueba de ajuste del predictor de Smith ante los parámetros  $K=2.07$ ,  $T=406.24$

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 95, se muestra que para una entrada escalón con una diferencia de  $2^{\circ}\text{C}$  entre el valor final y el inicial, el sistema presenta un sobre impulso del 15%. Por lo cual se procede a ajustar los parámetros de la función de transferencia del modelamiento matemático de la planta.

Se aumenta la constante de tiempo a 510 segundos, así como la ganancia del sistema a 2.12. El resultado de la nueva función de transferencia se visualiza en la figura 97.

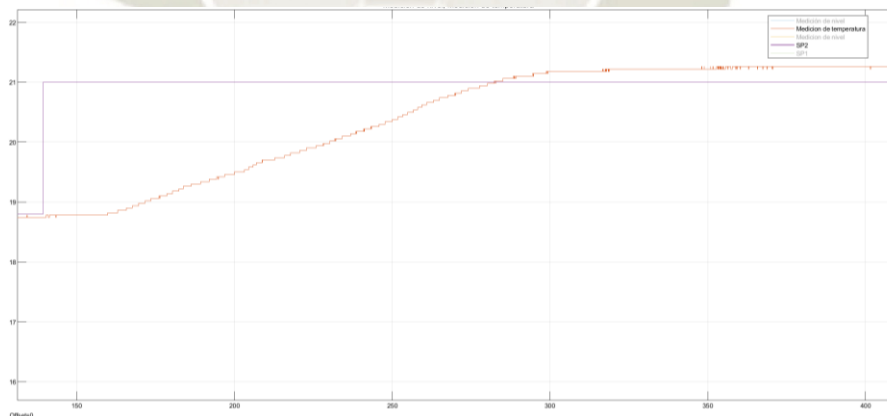


Fig. 96: Segunda prueba de ajuste del predictor de Smith ante los parámetros  $K=2.12$ ,  $T=510$

Fuente: Elaboración propia.

La figura 96, muestra que el comportamiento del sistema arroja un sobre impulso del 11%. Se procede nuevamente a aumentar la ganancia a 2.20 y la constante de tiempo a 680 segundos. La figura 97, muestra el comportamiento del sistema antes estos nuevos

parámetros, para una entrada escalón de una diferencia entre el valor final y el valor inicial de 1°C. El tiempo de establecimiento es de aproximadamente 122 segundos, con un sobre impulso del 1% y un error estacionario de 0.06°C.

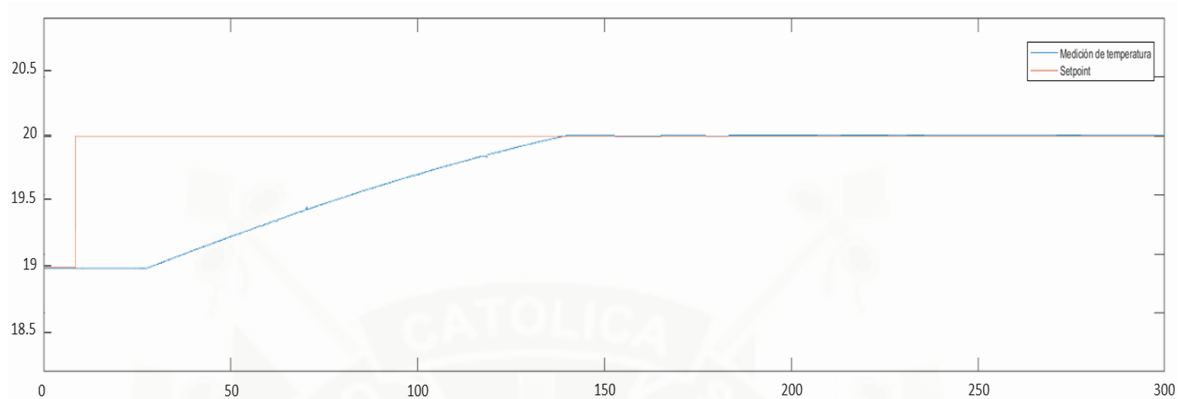


Fig. 97: Tercera prueba de ajuste del predictor de Smith ante los parámetros  $K=2.22$ ,  $T=680$

Fuente: Elaboración propia

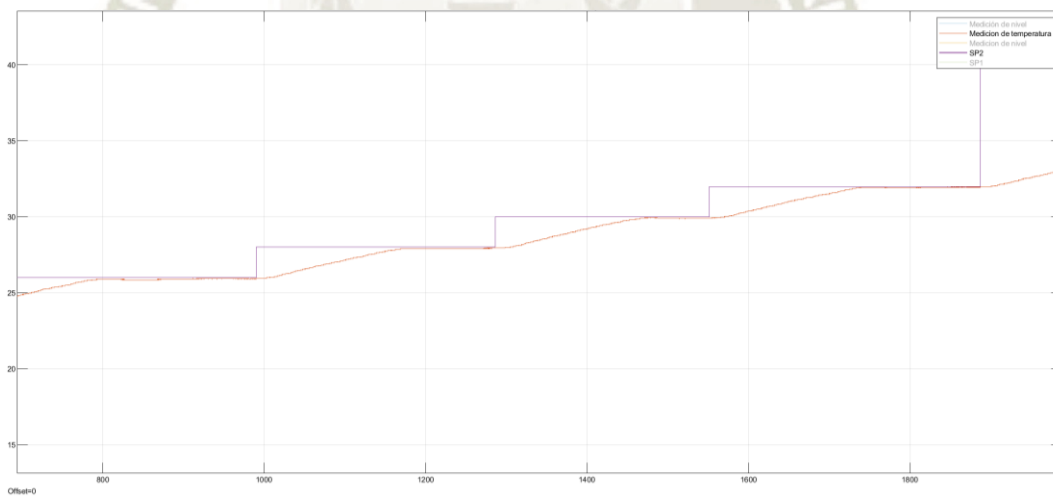


Fig. 98: Ingreso de diferentes Setpoint para el sistema de control de temperatura

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4 Análisis comparativo de las técnicas de control PI, PID y PI + Predictor de Smith

Para un análisis de respuesta, se tiene en consideración los datos más resaltantes de las gráficas de las sintonizaciones finas realizadas, como lo es el tiempo de establecimiento, máximo sobre impulso y error.

Parámetro	Control PI	Control PID	Control PI + Predictor de Smith
Tiempo de establecimiento	180 segundos	1600 segundos	122 segundos
Máximo sobre impulso	6%	4%	1%
Error en estado estacionario	0.1°C	0.16°C	0.06°C
Figura de referencia	Fig. 71	Fig. 74	Fig. 97

Tabla 21: Análisis de datos y graficas comparativas

Fuente: Elaboración propia

Como se puede deducir de la tabla 21, si bien el comportamiento del controlador PI dentro de la estructura del Predictor de Smith tiene un tiempo de establecimiento más rápido, así mismo también presenta un sobre impulso del 1%, lo cual no sucede frente a los controladores PI y PID.

#### 4.5 Resultados del funcionamiento del HMI

Se implementó las configuraciones y algoritmo de los controladores en Simulink, a su vez se desarrolló también la interfaz hombre máquina que se muestra en la figura 99.

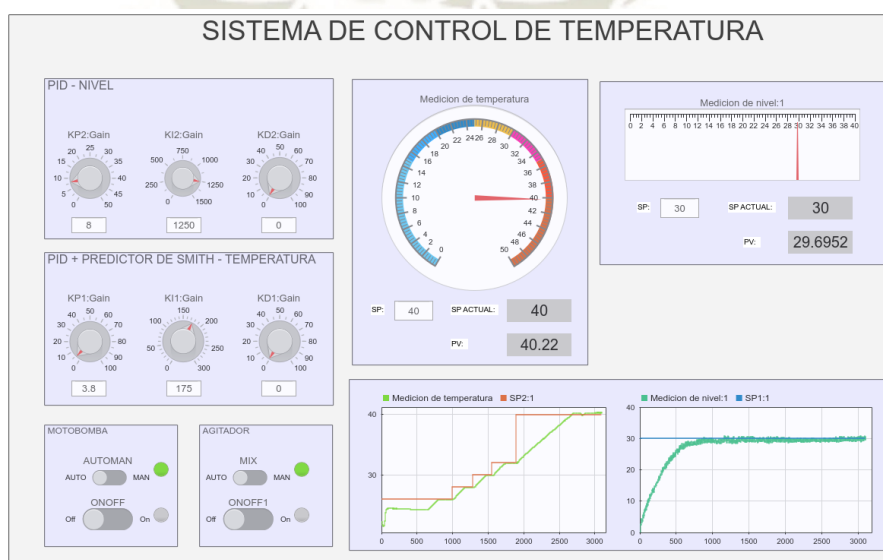
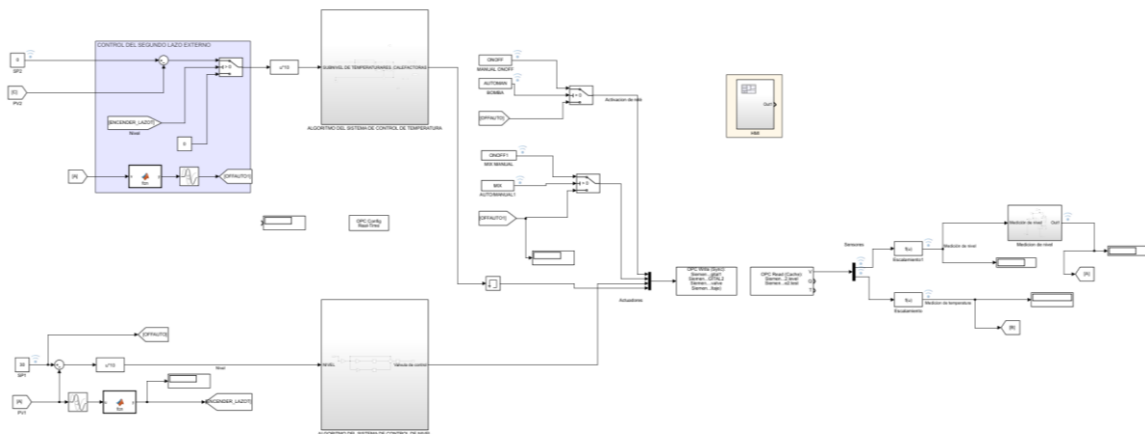


Fig. 99: Prueba operativa del HMI

Fuente: Elaboración propia.

En la parte superior izquierda se encuentra la sintonización manual de los controladores PID de nivel y temperatura. Se puede ingresar los valores de forma escrita y también con la regulación de la perilla. En la parte inferior izquierda se encuentra la activación del modo manual y automática del agitador y la bomba de agua. Además de ello, en la parte inferior central del HMI se dispone de 2 gráficas que muestran la tendencia del comportamiento de la temperatura, se muestrean los valores del Setpoint y la variable de proceso. Así mismo, ya que el sistema de temperatura depende de un sistema de nivel, se coloca también la gráfica del comportamiento de nivel de agua en el tanque. En la parte superior derecha, se colocaron también indicadores de temperatura y nivel, tanto, así como el Setpoint actual y la variable de proceso en la que se encuentran ambos sistemas. La lógica de control diseñada en Simulink a través de los diagramas de bloques, se puede observar en la figura 100.



*Fig. 100: Diagrama de bloques del módulo educativo*

Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

1. Se diseñó e implementó el módulo de control de temperatura, en el cual se realizó la comparación entre las técnicas de control PI, PID y Predictor de Smith.
2. Se seleccionó adecuadamente el sensor de temperatura y nivel, las resistencias calefactoras, y el agitador, en base a la precisión, exactitud, tiempo de respuesta, medio de operación, y principio de funcionamiento, todo ello a través de la disponibilidad de los equipos que brinda el mercado local.
3. Se logró obtener la función de transferencia del sistema de nivel a través de los parámetros del modelamiento matemático del tanque de proceso, el cual se muestra en la ecuación (3.35), de igual forma se logró obtener la función de transferencia de la planta del sistema de temperatura, lo cual fue realizado a través de la curva de reacción generada por el forzado al actuador, a través de ello se permitió reconocer el comportamiento del proceso como un sistema de primer orden con retardo, tal como se muestra en la ecuación (3.43). Mediante el modelamiento matemático del sistema de temperatura, se consigue diseñar el controlador PI y el Predictor de Smith.
4. Se diseñó e implementó de manera satisfactoria los circuitos de acondicionamiento para el sensor de temperatura y nivel, como también para las resistencias calefactoras. Se pudo controlar señales con gran precisión, los cuales fueron acondicionados por la etapa de amplificadores de instrumentación. Se logró el control de potencia de las resistencias calefactoras desde una señal análoga del PLC, a través de un microcontrolador de bajo costo.
5. Se logró implementar el módulo educativo del sistema de control de temperatura a través de un controlador lógico programable, tarjetas de acondicionamiento, sensores y actuadores.
6. Se implementó una interfaz de comunicación entre el PLC y Simulink a través la red MODBUS TCP/IP, el cual es una de las funciones que brinda el PLC de Siemens. La comunicación se realizó con el reconocimiento de la dirección IP y el puerto,

teniendo como Servidor/Maestro al Logo8! y a Matlab como esclavo. Se realizó un programa de establecimiento de la comunicación y reconocimiento de las variables en el Script de Matlab, el cual es visto por Simulink a través de uno de sus bloques de funciones. Además de ello, se realizó la interfaz gráfica el Software de Simulink con la norma ANSI 101, el cual lo vuelve muy amigable y de uso recomendado para el usuario. En la interfaz gráfica se permite variar los parámetros del controlador PID, ajustar los puntos de consigna y visualizar los comportamientos de las variables de proceso antes los diferentes setpoint.

7. En la figura 71, se muestra que la respuesta del controlador PI presenta un tiempo de establecimiento de 800 segundos, con un sobre impulso del 8% aproximadamente, mientras que el controlador PID tiene un sobre impulso del 65%. En el caso del controlador PI dentro de la estructura del Predictor de Smith, se logra observar que el tiempo de establecimiento frente a los otros controladores mencionados, es reducido considerablemente, obteniendo así un tiempo de establecimiento del 54% menor a la respuesta del controlador PI y con un sobre impulso del 1%. Por consiguiente, se deduce que el Predictor de Smith, es el controlador adecuado para sistemas que contienen un retardo significativo.
8. Se realizaron las guías de prácticas del módulo de control de temperatura, con lo cual se podrá obtener un mejor afianzamiento del conocimiento del estudiante. El desarrollo de la práctica permitirá al usuario poner en práctica sus conocimientos teóricos, y así mismo relacionarlo con el ámbito industrial.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda no forzar o energizar las resistencias calefactoras cuando estas no se encuentren aun inmersas en el agua, ya que acelera el deterioro y su tiempo de vida.
2. Para una mayor seguridad del operador o estudiantes se recomienda la implementación de un paro de emergencia, ya que al momento de alguna anomalía del sistema se podría dar por finalizado el proceso.
3. Se recomienda ajustar los terminales de las borneras y darle una limpieza al tablero de manera periódica, y así lograr evitar sobrecalentamiento en las tarjetas y falsas lecturas de los sensores y circuitos.
4. Para un mayor control del módulo educativo, se recomienda usar más sensores y actuadores, como por ejemplo para el llenado del tanque de almacenamiento de agua, se recomienda la implementación de sensores de nivel y una electroválvula.
5. Se podría implementar un variador de frecuencia para el motor de la bomba de agua del tanque de proceso, o en todo caso un tanque de expansión, el cual permitirá reducir la presión en las tuberías, y poder realizar ingresos de valores deseado de nivel bajo.
6. Se recomienda realizar limpieza periódica a los tanques y el motor de la bomba, con la finalidad de evitar suciedad y obstrucción en las tuberías, lo cual podría daños a los sensores o el proceso.
7. Ya que el módulo educativo no necesita de un PLC de gama alta para analizar las diferentes técnicas de control avanzado, se recomienda implementar nuevos diseños de controles en el software de Simulink, lo cual afianzará aún más el conocimiento del estudiante.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] D. Rueda, "Desarrollo de un predictor de Smith modificado para el control de plantas industriales con retardo de tiempo dominante y sometidas al efecto de perturbaciones externas," Tesis de maestría, PUCP, Lima, Perú, 2017.
- [2] S. Condori, "Diseño del control de temperatura para un horno industrial, mediante la modulación de ancho de pulso usando un PLC de gama alta," Tesis de grado, UNAP, Puno, Perú, 2017.
- [3] Y. G. Fuertes, "Diseño e implementación de un módulo educativo para el control de temperatura," Tesis de grado, PUCP, Lima, Perú, 2017.
- [4] J. F. Arguedas, "Sistema de control automático para un horno industrial," Tesis de grado, TEC, Cartago, Costa Rica, 2010.
- [5] A. Camargo and E. Villamizar, "Control de temperatura de un horno por medio de lógica difusa," Tesis de grado, UPB, Medellín, Colombia, 2013.
- [6] J. F. Smuts, *Process Control for Practitioners: How to Tune PID Controllers and Optimize Control Loops*, Texas: Opticontrol, 2011.
- [7] A. Creus Solé, *Instrumentación industrial*, 8 ed., Barcelona: Marcombo, 2011, pp. 63-314.
- [8] Cienciasfera. [Online]. Available: [http://cienciasfera.com/materiales/tecnologia/tecno02/tema14/23\\_controlador\\_de\\_a\\_ccin\\_proporcional\\_e\\_integral\\_pi.html](http://cienciasfera.com/materiales/tecnologia/tecno02/tema14/23_controlador_de_a_ccin_proporcional_e_integral_pi.html).
- [9] T. Alamo, *Diseño del controlador PID*, Sevilla, 2001.
- [10] K. Astrom and H. Tore, *PID Controllers: Theory, Desing, and Tuning*, Estados unidos: Library of Congress Cataloging, 1995.
- [11] K. Ogata, *Ingenieria de control moderna*, 5ed., Madrid: Prentice Hall, 2010.

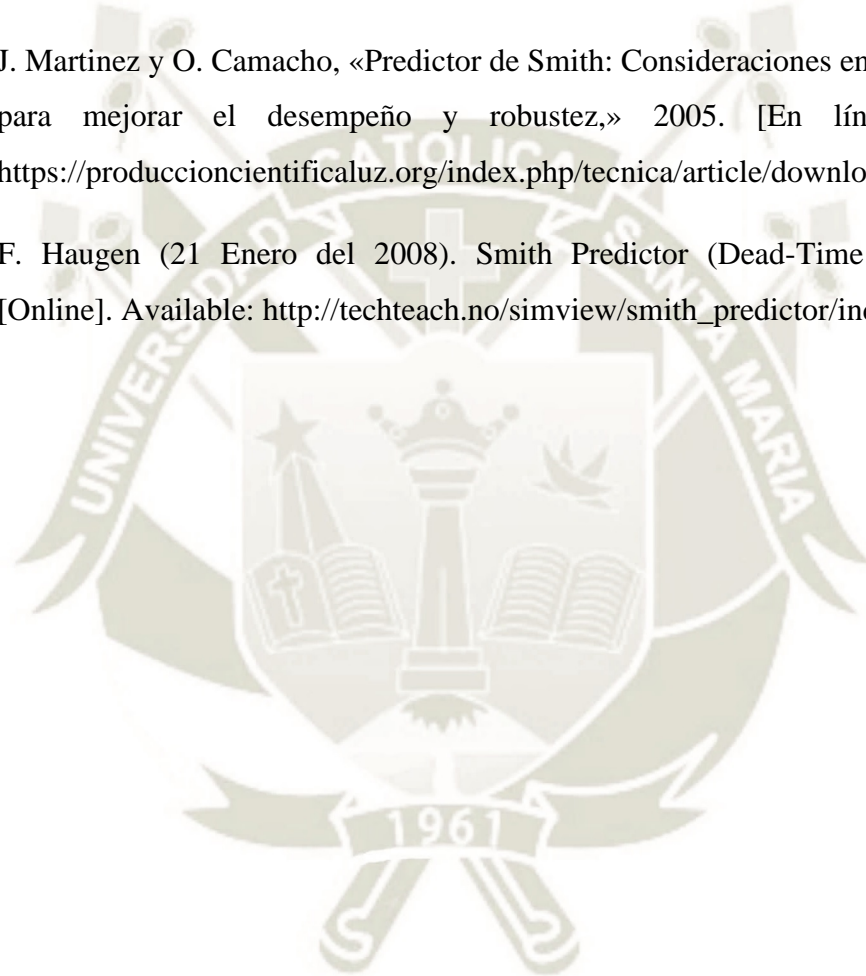
- [12] S. Castaño Giraldo, "Estudo de tecnicas de sintonia do predictor de smith filtrado para sistemas multivariaveis com atraso," Tesis de maestría, UFSC, Santa Catarina, Brasil, 2016.
- [13] G. Alevisakis and D. Serborg, *An extension of the Smith predictor method to multivariable linear systems containing time delays*, International Journal of Control, 1973.
- [14] Electrinblog. (25 Abril del 2016). Entradas y salidas de un PLC. [En línea]. Available: <https://electrinblog.wordpress.com/2016/04/25/post-3/>.
- [15] J. Villajulca. (15 Septiembre 2012). Instrumentación y control. [En línea]. Available: <https://instrumentacionycontrol.net/estructura-de-un-plc-modulos-de-memoria/>.
- [16] Microcontrolador. [En línea]. Available: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2015/03/23/microcontroladores/>.
- [17] E. Esquivel, "Introducción a los microcontroladores PIC", presentado en el curso de Microcontroladores, Arequipa, Perú, 2016.
- [18] P. Enrique, F. Remiro and L. López, *Microcontrolador PIC16F84. Desarrollo de proyectos*, 3ed., México: Alfaomega, 2006.
- [19] Centro Integrado Politécnico Tudela. Entrenador de comunicaciones industriales. [Online]. Available: <http://www.etitudela.com/entrenadorcomunicaciones/downloads/labviewintroduccionpcserver.pdf>.
- [20] PDAControl. (12 de Julio del 2016). Servidores OPC. [Online]. Available: <http://pdacontroles.com/introduccion-servidores-opc/>.
- [21] Introducción a Modbus. (31 diciembre 1969). [En línea]. Available: [http://www.sapiensman.com/tecnoficio/computacion/redes\\_MODBUS.php](http://www.sapiensman.com/tecnoficio/computacion/redes_MODBUS.php).
- [22] National Instruments. (05 Marzo 2019). Protocolo Modbus [Online]. Available: <https://www.ni.com/es-cr/innovations/white-papers/14/the-modbus-protocol-in-depth.html>.

- [23] A. De la Espriella y O. Mancera, "Implementación en laboratorio del protocolo MODBUS", Universidad Tecnológica de Bolívar, 2005.
- [24] Automation Networks. Modbus:TCP/IP. [En línea]. Available: <http://automation-networks.es/glossary/modbus-tcpip>.
- [25] Carbone Stainlees Steel. Ficha técnica de acero inox. [Online]. Available: <https://www.empresascarbhone.com/pdf/ficha-tecnica-del-acero-inoxidable.pdf>.
- [26] Limatambo. Hoja de datos de acrílico. [Online]. Available: <https://www.corporacionlimatambo.com/wp-content/uploads/2020/06/FICHA-TECNICA-DE-ACRILICO.pdf>.
- [27] Limatambo. Hoja de datos del vidrio 6mm. [Online]. Available: <https://www.corporacionlimatambo.com/wp-content/uploads/2019/10/FT-Stopsol-Supersilver-Darkblue-6mm.pdf>.
- [28] Amazon. Valvula proporcional de control. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/HSH-Flo-Proportional-Integral-Modulating-Motorized/dp/B07WHQX6JK>.
- [29] Tsai Fan. Válvula de control. [Online]. Available: <http://www.china-electricvalves.com/product/product150.html>.
- [30] Amazon. Valvula proporcional de control. [Online]. Available: [https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/611AlfaqpIL.\\_AC\\_SL1200\\_.jpg](https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/611AlfaqpIL._AC_SL1200_.jpg).
- [31] I. J. Gonzáles. (31 de Julio del 2013). Introducción a la valvula de control. [Online]. Available: [2valvulas-130731143006-phpapp02.pdf](https://www.researchgate.net/publication/3171143006-2valvulas-130731143006-phpapp02.pdf).
- [32] C. Casas-Morales. ¿Qué es el coeficiente de flujo de la válvula (CV)?. [En línea]. Available: <https://kimray.com/training/que-es-el-coeficiente-de-flujo-de-la-valvula-cv>.
- [33] Wikipedia. (14 Abril 2021). Resistencia calefactora. [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia\\_calentadora](https://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia_calentadora).

- [34] "Electrónica Industrial", notas de clase por 7408218, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica, Universidad Católica de Santa María, 2017 II.
- [35] Arrow. Microcontroladores y procesadores. [Online]. Available: <https://www.arrow.com/en/categories/microcontrollers-and-processors>.
- [36] EcuRed. Optoaislador MOC3021. [Online]. Available: <http://ecuadmin.ecured.cu/MOC3021>.
- [37] ST Microelectronics. Tiristores. [Online]. Available: <https://estore.st.com/en/products/thyristors-scr-and-ac-switches/triacs/standard-and-snubberless-triacs-page4.html>.
- [38] Farnell Semiconductor. Optoaislador Triac. [Online]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/97984.pdf>.
- [39] Electronicamain. Diseño de fuente regulable. [Online]. Available: <https://electronicamain.com/8-capitulo-diseno-desde-ceros-de-fuente-variable-version-3-0-en-kicad/>.
- [40] ST. (05 Julio 2007). Triac BTA24. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/bta24.pdf>.
- [41] Process Engineering Equipment. (2011). Diseño de agitadores industriales. [Online]. Available: [https://www.interempresas.net/feriavirtual/catalogos\\_y\\_documentos/7932/agitadores\\_2.pdf](https://www.interempresas.net/feriavirtual/catalogos_y_documentos/7932/agitadores_2.pdf).
- [42] Sodimac. Bombas de agua y accesorios. [Online]. Available: <https://www.sodimac.com.pe/sodimac-pe/category/cat1069002/motobombas/>.
- [43] Mouser. Temperature Sensors. [Online]. Available: [https://www.mouser.pe/Sensors/Temperature-Sensors/\\_/N-7gz50](https://www.mouser.pe/Sensors/Temperature-Sensors/_/N-7gz50).
- [44] Wi Automation. Variadores - Motores - Protección de circuitos. [Online]. Available: <https://pe.wiautomation.com/siemens/variadores-motores-proteccion-de-circuitos/>

- [45] Wika. Digital Temperature Transmitter. [Online]. Available: <https://www.wika.com/en-en/t15.WIKA>.
- [46] Electropro. Módulo transmisor de temperatura PT100. [Online]. Available: [https://electropro.pe/index.php?route=product/product&product\\_id=710](https://electropro.pe/index.php?route=product/product&product_id=710).
- [47] Texas Instrument. Amplificador de instrumentación INA121. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/INA121>.
- [48] Analog Device. Instrumentation Amplifier. [Online]. Available: [https://www.analog.com/en/parametricsearch/11080#/.](https://www.analog.com/en/parametricsearch/11080#/)
- [49] Mouser. Liquid Level Sensors. [Online]. Available: [https://www.mouser.pe/Sensors/Liquid-Level-Sensors/\\_/N-zqig](https://www.mouser.pe/Sensors/Liquid-Level-Sensors/_/N-zqig).
- [50] Honeywell. (Septiembre 2020). Sensor de presión de la serie ABP de Honeywell. [Online]. Available: <https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-basic-board-mount-pressure-abp-series-datasheet-32305128-en.pdf>.
- [51] Fairchild. Regulador de voltaje 12VDC. [Online]. Available: <https://www.mouser.com/datasheet/2/149/LM7812-461970.pdf>.
- [52] Wi Automation. Controladores Lógicos Programables. [Online]. Available: <https://pe.wiautomation.com/controllers>.
- [53] Inversores & Controles. (Diciembre del 2020). Normas globales para gabinetes en la industria eléctrica. [Online]. Available: <https://www.inversoresycontroles.com/wp-content/uploads/2017/12/NORMAS-GLOBALES-PARA-GABINETES.pdf?cv=1>.
- [54] Cables Electricos Perú. Cables Indeco TW. [Online]. Available: <http://www.cableselectricos.pe/indeco/indeco.html>.
- [55] Sodimac. Llaves termomagneticas y tableros. [Online]. Available: <https://www.sodimac.com.pe/sodimac-pe/category/cat10356/llaves-termomagneticas-y-tableros/>
- [56] Arrow. Equipos electromecánicos, Relays. [En línea]. Available: <https://www.arrow.com/en/categories/relays/signal-relays>.

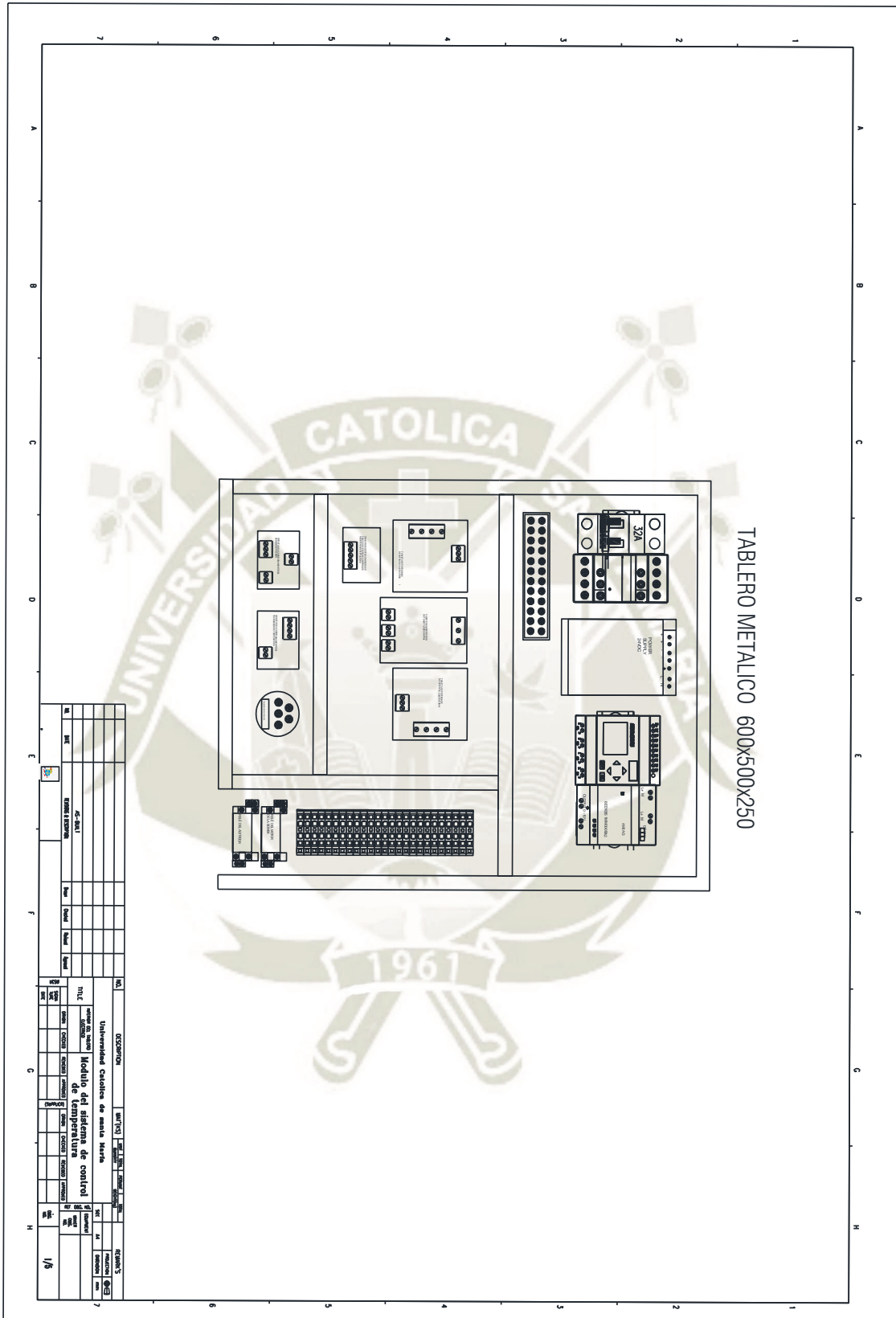
- [57] S. Castaño. (2016). Control Automático Educación. [Online]. Available: <http://controlautomaticoeducacion.com/predictordesmith/>.
- [58] J. Villajulca, «Instrumentación y control: Sintonización de controladores,» 21 Agosto 2011. [En línea]. Available: <https://instrumentacionycontrol.net/sintonizacion-de-controladores-a-lazo-abierto-analizando-la-curva-de-reaccion-del-proceso/>.
- [59] K. J. Astrom and H. Tore, Control PID Avanzado, Prentice Hall, 2009.
- [60] J. Martinez y O. Camacho, «Predictor de Smith: Consideraciones en la sintonización para mejorar el desempeño y robustez,» 2005. [En línea]. Available: <https://produccioncientificaluz.org/index.php/tecnica/article/download/5879/5868/>.
- [61] F. Haugen (21 Enero del 2008). Smith Predictor (Dead-Time Compensation). [Online]. Available: [http://techtch.no/simview/smith\\_predictor/index.php](http://techtch.no/simview/smith_predictor/index.php)

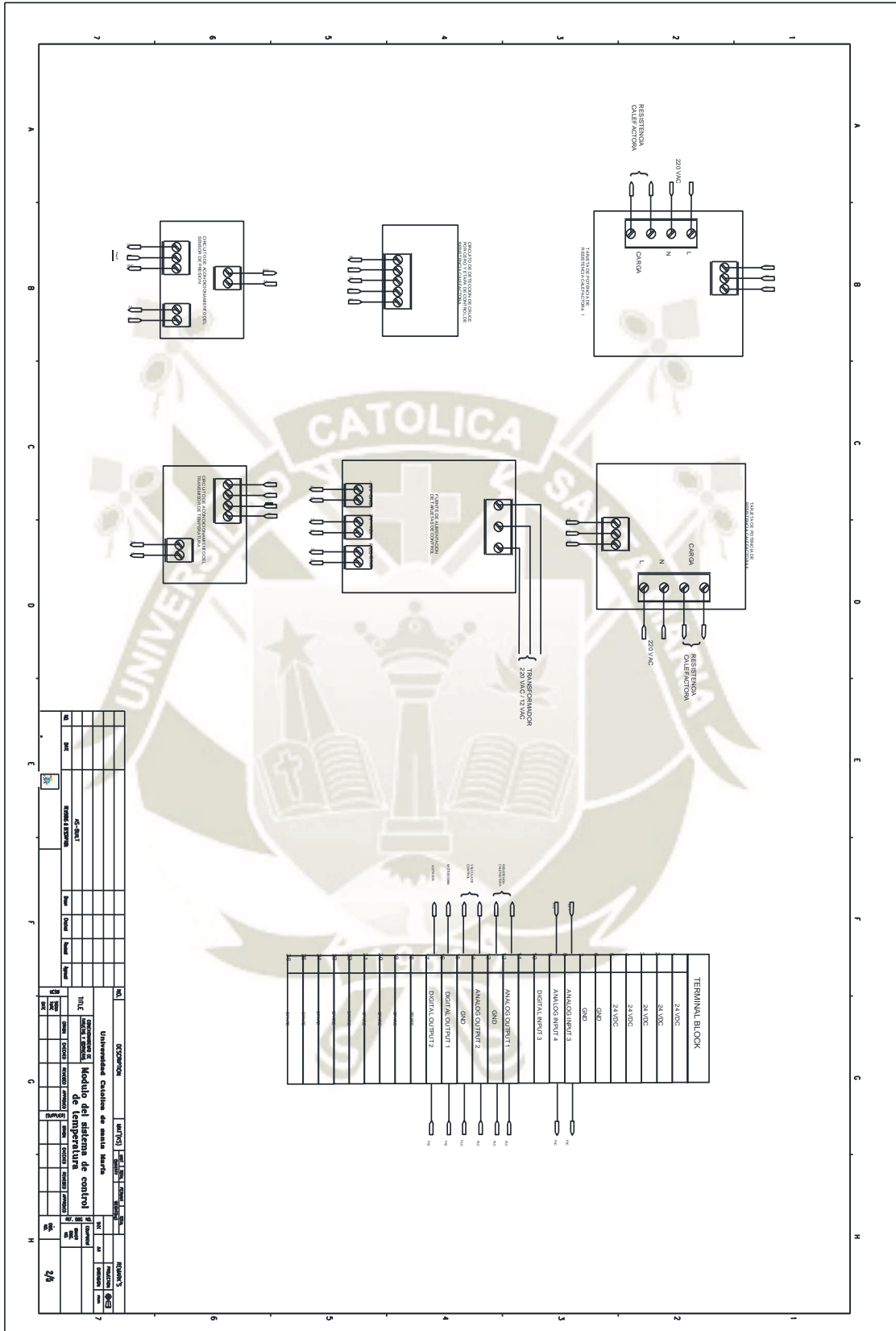


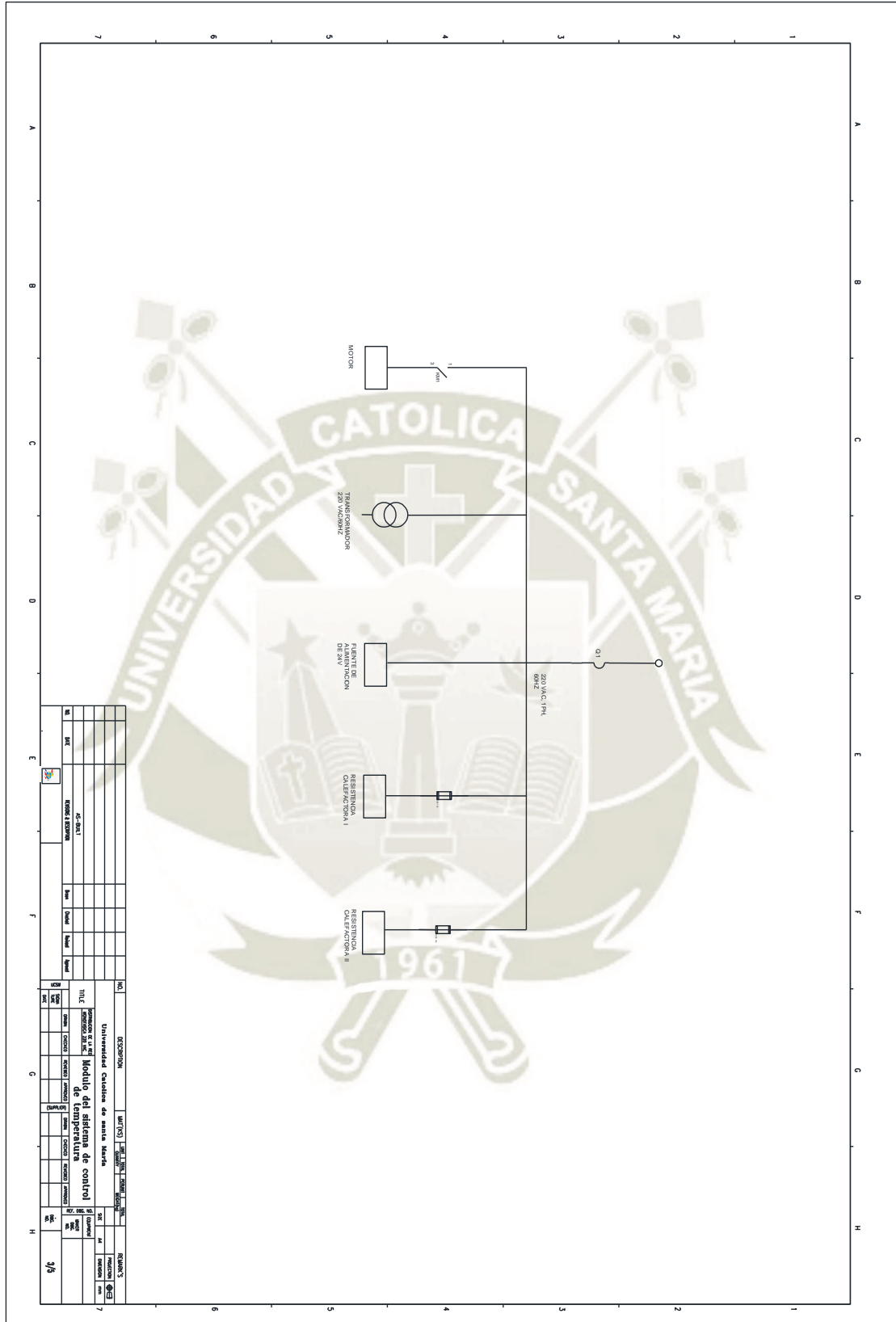
## ANEXOS

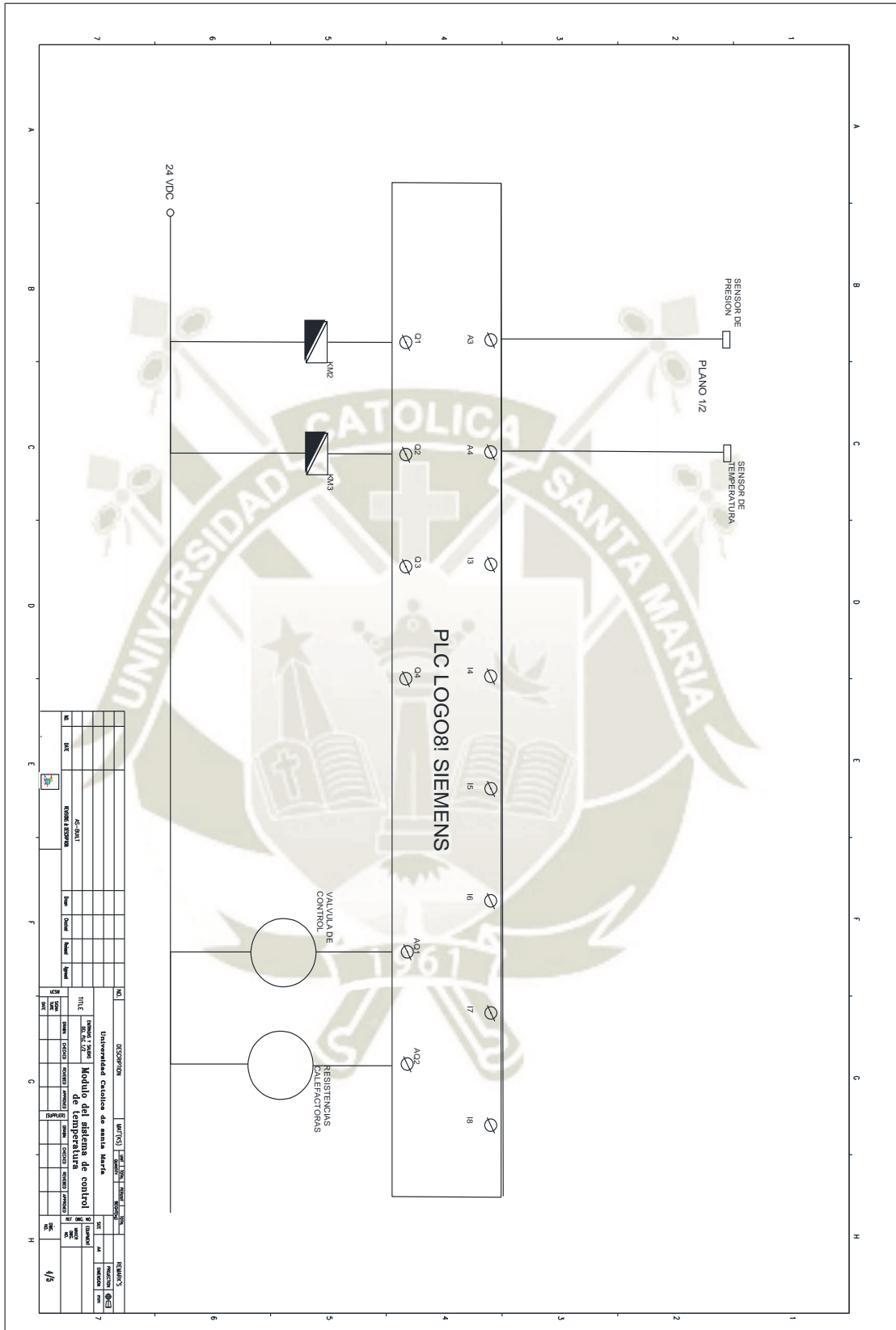


### ANEXO I: PLANOS ELECTRICOS







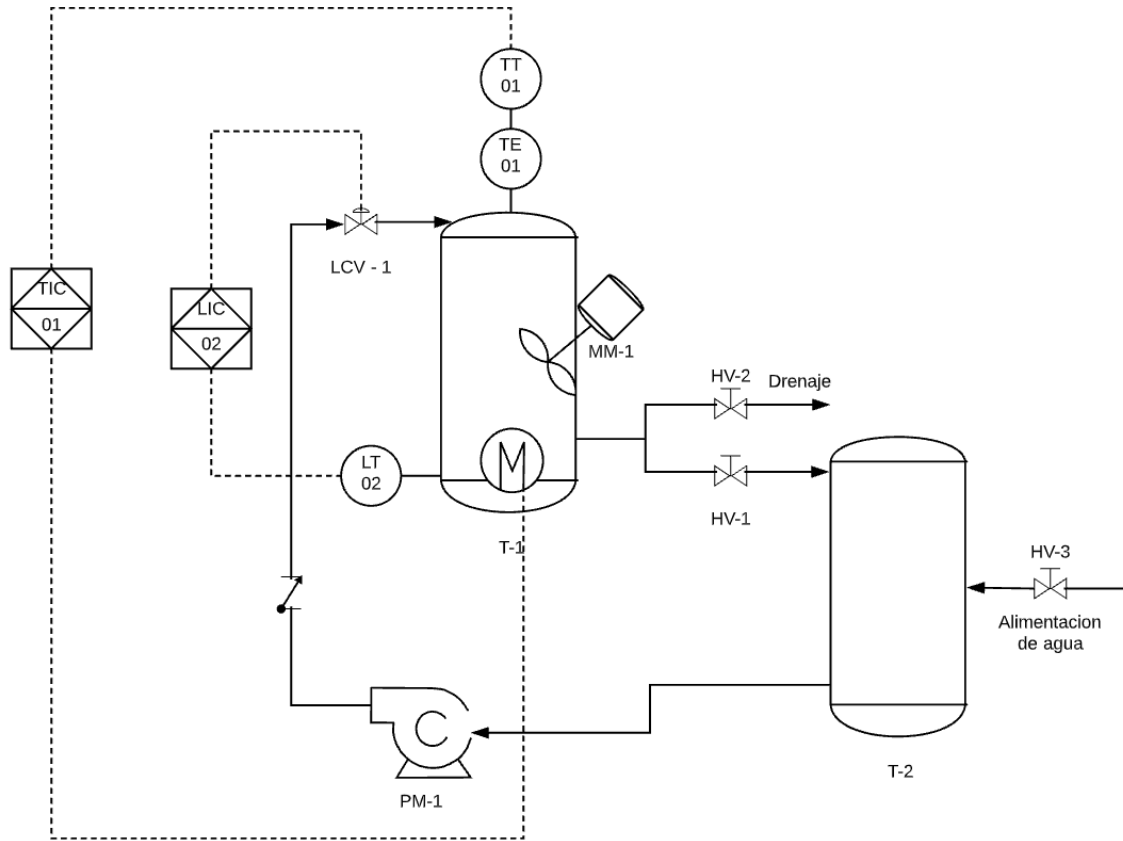




## ANEXO 2: CARACTERÍSTICAS Y DETALLES TECNICOS DEL MÓDULO EDUCATIVO DE CONTROL DE TEMPERATURA

<b>Características del Módulo Educativo</b>	
Dimensionamiento de la estructura del módulo educativo:	1.30 X 0.50 X 1.00 m
Material de construcción del tanque:	Acrílico
Medio de operación:	Agua
Rango de operación del sistema de control de temperatura:	0 - 50 °C
Rango de operación del sistema de control de nivel:	0 - 40 cm
Voltaje de alimentación de circuitos de potencia:	220 VAC
Tipo de red de alimentación:	Monofásica
Voltaje de alimentación de circuitos de control:	24 VDC, 15VDC, -15VDC y 5V
Sensor de presión:	ABPDJIT001PGAA5 – Honeywell
Sensor de temperatura:	RTD PT100
Material de construcción y potencia de la resistencia calefactora:	NiCr de 3KW
Válvula de control:	HSH-FLO A20-M20-B2-C
Electrobomba:	LECCO QB-60 de 0.5HP
Controlador principal:	PLC LOGO 8!
Controlador secundario:	Microcontrolador PIC12F683
Protocolo de comunicación:	MODBUS TCP/IP

### ANEXO 3: PLANO P&ID



## ANEXO 4: PROGRAMACION DEL PLC

El PLC Logo8! ofrece dos maneras de realizar su programación, ya sea a través del software LOGO!Soft Comfort o con el teclado que se encuentra en el mismo PLC, para este caso se realizó la programación con los cursores y botones que ofrece el controlador.

- A través de los cursores y el botón OK se ingresa a Program.



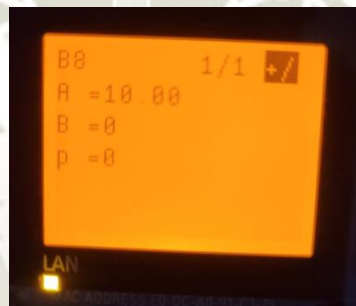
- Seguidamente se procede a ingresar a la opción Edit Prog.



- En el menú Edit Prog. Se implementa el amplificador análogo B8 con una ganancia igual a 10, esto es dado para obtener un mejor manejo al momento de realizar las operaciones en Simulink para la entrada AI3, sin embargo, es necesario colocar una marca (memoria) a la salida del amplificador, ya que el bloque B8 no tiene una dirección Modbus.



- En la siguiente pantalla se observa la ganancia del amplificador analógico de la entrada AI3



- De igual manera como se indicó para el caso del uso de un amplificador analógico para la entrada análoga AI3, también se realiza lo mismo para el caso de la entrada analógica AI4, el cual también llevaría una marca analógica, denominado AM1.



- El factor de ganancia del amplificador analógico B2 es de 10.



- Para el caso de escribir las salidas digitales, no es necesario declarar la variable que se vaya a usar, sin embargo, durante la comunicación de Simulink con el PLC hubo un problema de comunicación con la salida Q3, es por ello que se implementó con una entrada de red NI2, cabe mencionar que este problema no sucedió con la salida digital Q4, ni con las salidas analógicas AQ1 y AQ2.



- A continuación, se muestra el programa completo desarrollado desde el PLC



## ANEXO 5: GASTOS DE CONSTRUCCION DEL MODULO DE CONTROL DE TEMEPRATURA

GASTOS DE CONSTRUCCION DEL MODULO DE CONTROL DE TEMPERATURA					
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANT.	COSTO UNIT	COSTO FINAL
1	Estructura metálica para soporte de los tanques y el tablero	UNIDAD	1	220	220
2	Tanques de acrílico	UNIDAD	2	220	440
3	Niples, conectores, uniones universales y pernos	UNIDAD	1	60	60
4	Válvula check	UNIDAD	1	45	45
5	Tubería PVC de 3/4"	M	3	6.5	19.5
6	Válvulas manuales tipo compuerta	UNIDAD	2	20	40
7	Tablero y camisa metálica	UNIDAD	1	150	150
8	Motorreductor 24VDC, varilla de 50 cm y aletas tipo axial	UNIDAD	1	100	100
9	Motobomba 1/4HP 220VAC	UNIDAD	1	130	130
10	Sensor de presión 0-1psi Honeywell	UNIDAD	1	150	150
11	Sensor de temperatura RTD PT100	UNIDAD	1	90	90
12	Resistencias calefactoras de 3000W	UNIDAD	2	37	74
13	Válvula de control 3/4"	UNIDAD	1	550	550
14	Interruptor termomagnético 220VAC/32A	UNIDAD	1	40	40
15	Conjunto de componentes electrónicos (capacitores, transistores, PIC12F683, optotriac, TRIAC, disipadores, borneras, resistencias, amplificadores de instrumentación, zócalos para integrados, reguladores de tensión, fusibles, placas de cobre)	UNIDAD	1	250	250
16	Disipadores de calor	UNIDAD	2	10	20
17	Ventiladores	UNIDAD	2	15	30
18	Contactador 220VAC/15A	UNIDAD	1	30	30
19	Fuente de alimentación de 24VDC/5A	UNIDAD	1	70	70
20	Borneras 400V - Phoenix Contact	UNIDAD	30	3	90
21	Relés de 24VDC/10A y Zócalos	UNIDAD	2	15	30
22	PLC LOGO8! SIEMENS	UNIDAD	1	300	300
23	Modulo de expansión de salidas análogas	UNIDAD	1	420	420
24	Cables 12 AWG	M	4	6	24
25	Cables 14 AWG	M	8	4.5	36
26	Cables 18 AWG	M	30	3	90
27	Mano de obra	UNIDAD	1	4600	4600
28	Matlab	UNIDAD	1	3600	3600
<b>Total</b>				<b>11145</b>	<b>11698.5</b>

## ANEXOS 3: EJERCICIOS DE PRACTICA

### PRIMERA PRACTICA DE LABORATORIO

#### CONTROL PI

#### OBJETIVOS

1. Regular correctamente los parámetros de sintonización del controlador PI
2. Verificar las acciones proporcional e integral
3. Sintonizar el controlador para el tanque de agua

#### II. TEMAS A TRATAR

1. Concepto de control PI
2. Métodos para obtener los parámetros de sintonización

#### III. MARCO TEORICO

##### a) Control PI

##### Acción proporcional:

En el caso del control proporcional puro, la ley de control viene dada por la siguiente ecuación:

$$u(t) = Ke(t) + ub.$$

la acción de control es simplemente proporcional al error de control. La variable  $u_b$  es una polarización o un reset. Cuando el error de control  $e$  es cero, la señal de control toma el valor  $u(t) = ub$ . La polarización  $u_b$  a menudo se fija a  $(U_{max} + U_{min})/2$ , pero puede algunas veces ajustarse manualmente de forma que el error de control estacionario es cero en un punto de consigna dado. [59]

**Acción integral:**

La función principal de la acción integral es asegurarse de que la salida del proceso coincide con el punto de consigna en estado estacionario. Con control proporcional, hay normalmente un error de control en estado estacionario. Con acción integral, un pequeño error positivo conducirá siempre a una señal de control creciente, y un error negativo dará una señal de control decreciente sin tener en cuenta lo pequeño que sea el error. El siguiente argumento simple muestra que el error en estado estacionario siempre será cero con acción integral. Suponga que el sistema está en estado estacionario con una señal de control constante ( $u_0$ ) y un error constante ( $e_0$ ). [59]

$$u_0 = K(e_0 + \frac{e_0}{T_i} t)$$

Mientras que  $e_0 = 0$ , esto claramente contradice la hipótesis de que la señal de control  $u_0$  es constante. Un controlador con acción integral siempre dará error cero en estado estacionario. La acción integral se puede también visualizar como un dispositivo que automáticamente resetea el término de polarización  $u_b$  de un controlador proporcional. [59]

**a) Métodos de Sintonización**

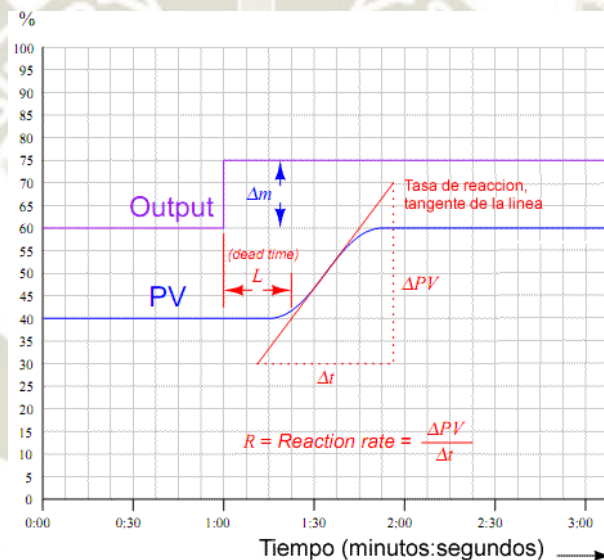
Existen varias técnicas de sintonización controlador PID como las siguientes:

- Técnica de sintonización por Ziegler-Nichols
- Técnica de sintonización mediante Cohen-Coon
- Técnica de sintonización por IMC
- Técnica de sintonización por Lambda
- Ensayos de prueba y error
- Por cancelación de polos

Para esta practica nos enfocaremos en el segundo criterio de Ziegler-Nichols:

El cual es obtener el modelamiento matemático del proceso a través del método de curva reacción. Consiste en hacer en modo manual un cambio en la salida y analizar los efectos resultados en la variable de proceso.

Después de realizar este step-change en la señal de salida con el controlador en modo manual, la tendencia de la variable de proceso es íntimamente analizada para encontrar dos valores: el tiempo muerto, la constante de tiempo y la ganancia del sistema. El tiempo muerto (L) es la cantidad de retardo entre el cambio en la salida y la primera indicación de cambio en la variable de proceso. [58]



El tiempo muerto y la tasa de reacción son respuestas comunes de los procesos autorregulatorios e integrativos. Sin importar si la variable de proceso se estabiliza en algún nuevo valor, su tasa de crecimiento tendrá algún valor máximo en el tiempo seguido del cambio en la salida, y esto será la tasa de reacción del proceso. La unidad de medida de la tasa de reacción es en porcentaje por minuto. [58]

$$R = \Delta PV / \Delta t$$

Mientras el tiempo muerto en una tendencia de proceso es constante sin importar la magnitud del cambio en la salida o step-change, la tasa de reacción varía directamente con la magnitud

del cambio en la salida. Por ejemplo, un cambio en la salida de 10% generalmente causara que PV crezca a una tasa dos veces más rápido comparado con el efecto de un cambio de 5% en la salida del controlador. Para asegurarnos de que nuestros cálculos predictivos capturen solo lo que es inherente del proceso y no nuestra propia acciones, debemos incluir la magnitud del cambio en la salida o step-change en nuestros cálculos. Si el controlador en cuestión es netamente proporcional, Ziegler y Nichols nos recomiendan configurar el controlador como sigue. [58]

$$K_p = \Delta m / RL$$

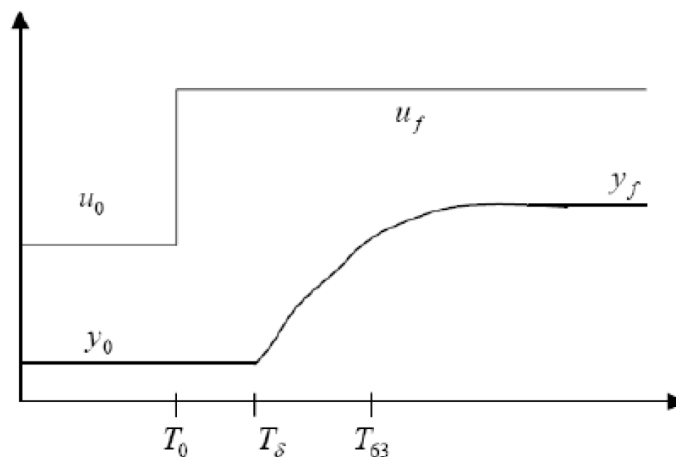
#### IV Cuestionario Previo

1. Cual es la acción de la ganancia proporcional?
2. Cual es la acción del tiempo integral?
3. Cual es la acción del tiempo derivativo?
4. Con una grafica demuestra el comportamiento de un sistema de primer orden con retardo puro
5. Que es el tiempo de retardo puro y la constante de tiempo?.

#### V. Actividades

##### **Realizar la identificación del modelamiento matemático del proceso.**

1. Abrir el programa “Control\_Manual.slx”
2. Colocar como forzado de señal de la resistencia calefactora el valor de 30%. Verificar que el comportamiento de la variable de proceso este incrementando, y cuando se encuentre establecida se puede parar el proceso dándole un ingreso de 0% a la resistencia calefactora.
3. Asegurarse de almacenar los datos obtenidos en la prueba anterior y guardarlos en las tablas de Matlab
4. Determinar los parámetros de la curva de reacción para la generación función de transferencia del sistema a través de las siguientes formulas:



$$G = \frac{K_p e^{-Ls}}{\tau s + 1}$$

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

$$\tau = T_{63.2} - T_\delta$$

$$L = T_\delta - T_0$$

5. Validar el comportamiento del modelo matemático obtenido teóricamente y experimentalmente a través de las funciones Matlab o Simulink.

### Sintonización de controlador PI

Después de haber obtenido la función de transferencia con retardo puro, reemplazar los datos con los que se muestra en la siguiente figura

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

1. Calcular los valores de los parámetros del controlador PI.
2. Usar Simulink para comprobar el comportamiento de la función de transferencia sometida por el controlador PI. Es posible que la curva de reacción tenga demasiado sobre impulso, de ser necesario ajustar los parámetros de las constantes del PI para mejorar su respuesta.
3. Después de haber ajustado los parámetros PI, abrir el programa “Control\_de\_Temperatura.slx”
4. Colocar los valores mejorados obtenidos anteriormente del PI.
5. Ingresar el valor del setpoint y luego presionar el botón de RUN. Verificar la respuesta del sistema y analizar su comportamiento respecto al sobre impulso, error en estado estacionario y el tiempo de establecimiento.
6. Realizar los siguientes pasos:
  - Aumentar la ganancia proporcional y verificar como altera al sistema de control
  - Reducir el tiempo integral y verificar como altera al sistema de control
  - Reducir considerablemente el volumen de agua del tanque y verificar como altera al sistema.

## VI. CONCLUSIONES

## SEGUNDA PRACTICA DE LABORATORIO

### CONTROL PID

#### OBJETIVOS

1. Regular correctamente los parámetros de sintonización del controlador PI
2. Verificar las acciones proporcional e integral
3. Sintonizar el controlador para el tanque de agua

#### II. TEMAS A TRATAR

1. Concepto de control PI
2. Métodos para obtener los parámetros de sintonización

#### III. MARCO TEORICO

##### a) Control PI

##### Acción proporcional:

En el caso del control proporcional puro, la ley de control viene dada por la siguiente ecuación:

$$u(t) = Ke(t) + ub.$$

la acción de control es simplemente proporcional al error de control. La variable  $u_b$  es una polarización o un reset. Cuando el error de control  $e$  es cero, la señal de control toma el valor  $u(t) = ub$ . La polarización  $u_b$  a menudo se fija a  $(U_{max} + U_{min})/2$ , pero puede algunas veces ajustarse manualmente de forma que el error de control estacionario es cero en un punto de consigna dado. [59]

##### Acción integral:

La función principal de la acción integral es asegurarse de que la salida del proceso coincide con el punto de consigna en estado estacionario. Con control proporcional, hay normalmente

un error de control en estado estacionario. Con acción integral, un pequeño error positivo conducirá siempre a una señal de control creciente, y un error negativo dará una señal de control decreciente sin tener en cuenta lo pequeño que sea el error. El siguiente argumento simple muestra que el error en estado estacionario siempre será cero con acción integral. Suponga que el sistema está en estado estacionario con una señal de control constante ( $u_0$ ) y un error constante ( $e_0$ ). [59]

$$u_0 = K(e_0 + \frac{e_0}{T_i} t)$$

Mientras que  $e_0 = 0$ , esto claramente contradice la hipótesis de que la señal de control  $u_0$  es constante. Un controlador con acción integral siempre dará error cero en estado estacionario. La acción integral se puede también visualizar como un dispositivo que automáticamente resetea el término de polarización  $u_b$  de un controlador proporcional. [59]

#### **Acción derivativa:**

El objetivo de la acción derivativa es mejorar la estabilidad en lazo cerrado. El mecanismo de inestabilidad se puede describir intuitivamente como sigue. Causa de la dinámica del proceso, llevará algún tiempo antes de que un cambio en la variable de control sea detectable en la salida del proceso. Así, el sistema de control tardará en corregir un error. La acción de un controlador con acción proporcional y derivativa se puede interpretar como si el control se hiciese proporcional a la salida *predicha* del proceso, donde la predicción se hace extrapolando el error por la tangente a la curva del error. [59]

#### **b) Métodos de Sintonización**

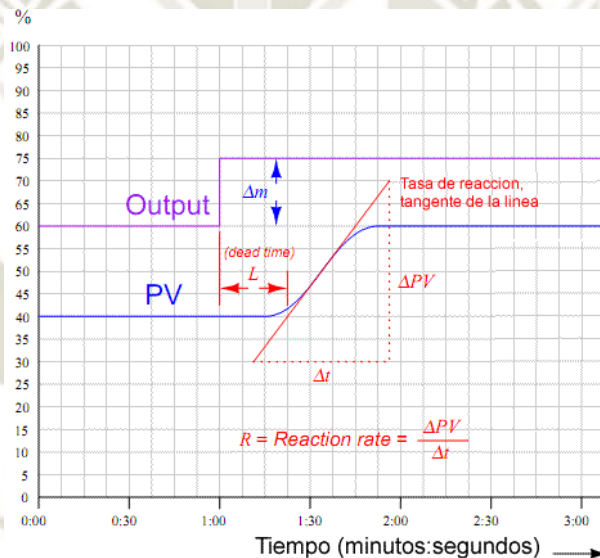
Existen varias técnicas de sintonización controlador PID como las siguientes:

- Técnica de sintonización por Ziegler-Nichols
- Técnica de sintonización mediante Cohen-Coon
- Técnica de sintonización por IMC
- Técnica de sintonización por Lambda
- Ensayos de prueba y error
- Por cancelación de polos

Para esta practica nos enfocaremos en el segundo criterio de Ziegler-Nichols:

El cual es obtener el modelamiento matemático del proceso a través del método de curva reacción. Consiste en hacer en modo manual un cambio en la salida y analizar los efectos resultados en la variable de proceso.

Después de realizar este step-change en la señal de salida con el controlador en modo manual, la tendencia de la variable de proceso es íntimamente analizada para encontrar dos valores: el tiempo muerto, la constante de tiempo y la ganancia del sistema. El tiempo muerto (L) es la cantidad de retardo entre el cambio en la salida y la primera indicación de cambio en la variable de proceso. [58]



El tiempo muerto y la tasa de reacción son respuestas comunes de los procesos autorregulatorios e integrativos. Sin importar si la variable de proceso se estabiliza en algún nuevo valor, su tasa de crecimiento tendrá algún valor máximo en el tiempo seguido del cambio en la salida, y esto será la tasa de reacción del proceso. La unidad de medida de la tasa de reacción es en porcentaje por minuto. [58]

$$R = \Delta PV / \Delta t$$

Mientras el tiempo muerto en una tendencia de proceso es constante sin importar la magnitud del cambio en la salida o step-change, la tasa de reacción varía directamente con la magnitud del cambio en la salida. Por ejemplo, un cambio en la salida de 10% generalmente causara que PV crezca a una tasa dos veces más rápido comparado con el efecto de un cambio de 5% en la salida del controlador. Para asegurarnos de que nuestros cálculos predictivos capturen solo lo que es inherente del proceso y no nuestra propia acciones, debemos incluir la magnitud del cambio en la salida o step-change en nuestros cálculos. Si el controlador en cuestión es netamente proporcional, Ziegler y Nichols nos recomiendan configurar el controlador como sigue. [58]

$$K_p = \Delta m / RL$$

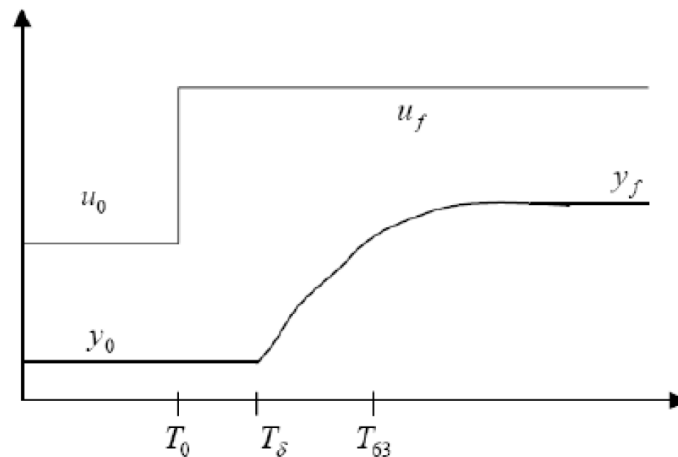
#### IV Cuestionario Previo

1. Cual es la acción de la ganancia proporcional?
2. Cual es la acción del tiempo integral?
3. Cual es la acción del tiempo derivativo?
4. Con una grafica demuestra el comportamiento de un sistema de primer orden con retardo puro
5. Que es el tiempo de retardo puro y la constante de tiempo?.

#### V. Actividades

##### **Realizar la identificación del modelamiento matemático del proceso.**

1. Abrir el programa "Control\_Manual.slx"
2. Colocar como forzado de señal de la resistencia calefactora el valor de 30%. Verificar que el comportamiento de la variable de proceso este incrementando, y cuando se encuentre establecida se puede parar el proceso dándole un ingreso de 0% a la resistencia calefactora.
3. Asegurarse de almacenar los datos obtenidos en la prueba anterior y guardarlos en las tablas de Matlab
4. Determinar los parámetros de la curva de reacción para la generación función de transferencia del sistema a través de las siguientes formulas:



$$G = \frac{K_p e^{-Ls}}{\tau s + 1}$$

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

$$\tau = T_{63.2} - T_\delta$$

$$L = T_\delta - T_0$$

5. Validar el comportamiento del modelo matemático obtenido teóricamente y experimentalmente a través de las funciones Matlab o Simulink.

### Sintonización de controlador PID

Después de haber obtenido la función de transferencia con retardo puro, reemplazar los datos con los que se muestra en la siguiente figura.

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

7. Calcular los valores de los parámetros del controlador PI.
8. Usar Simulink para comprobar el comportamiento de la función de transferencia sometida por el controlador PID. Es posible que la curva de reacción tenga demasiado sobre impulso, de ser necesario ajustar los parámetros de las constantes del PID para mejorar su respuesta.
9. Después de haber ajustado los parámetros PI, abrir el programa “Control\_de\_Temperatura.slx”
10. Colocar los valores mejorados obtenidos anteriormente del PI.
11. Ingresar el valor del setpoint y luego presionar el botón de RUN. Verificar la respuesta del sistema y analizar su comportamiento respecto al sobre impulso, error en estado estacionario y el tiempo de establecimiento.
12. Realizar los siguientes pasos:
  - Aumentar la ganancia proporcional y verificar como altera al sistema de control
  - Reducir el tiempo integral y verificar como altera al sistema de control
  - Aumentar el tiempo derivativo y verificar como altera al sistema de control
  - Reducir considerablemente el volumen de agua del tanque y verificar como altera al sistema.

## VI. CONCLUSIONES

## TERCERA PRACTICA DE LABORATORIO

### PREDICTOR DE SMITH

#### OBJETIVOS

1. Comprobar el funcionamiento del DTC Predictor de Smith
2. Verificar la acción del controlador PI dentro de la estructura del Predictor de Smith
3. Sintonizar el controlador para el tanque de agua

#### II. TEMAS A TRATAR

1. Métodos para obtener los parámetros de sintonización
2. Sintonización de control PI
3. Concepto de Predictor de Smith

#### III. MARCO TEORICO

##### b) Control PI

##### **Acción proporcional:**

En el caso del control proporcional puro, la ley de control viene dada por la siguiente ecuación:

$$u(t) = Ke(t) + ub.$$

la acción de control es simplemente proporcional al error de control. La variable  $u_b$  es una polarización o un reset. Cuando el error de control  $e$  es cero, la señal de control toma el valor  $u(t) = u_b$ . La polarización  $u_b$  a menudo se fija a  $(U_{max} + U_{min})/2$ , pero puede algunas veces ajustarse manualmente de forma que el error de control estacionario es cero en un punto de consigna dado. [59]

##### **Acción integral:**

La función principal de la acción integral es asegurarse de que la salida del proceso coincide con el punto de consigna en estado estacionario. Con control proporcional, hay normalmente

un error de control en estado estacionario. Con acción integral, un pequeño error positivo conducirá siempre a una señal de control creciente, y un error negativo dará una señal de control decreciente sin tener en cuenta lo pequeño que sea el error. El siguiente argumento simple muestra que el error en estado estacionario siempre será cero con acción integral. Suponga que el sistema está en estado estacionario con una señal de control constante ( $u_0$ ) y un error constante ( $e_0$ ). [59]

$$u_0 = K(e_0 + \frac{e_0}{T_i} t)$$

Mientras que  $e_0 = 0$ , esto claramente contradice la hipótesis de que la señal de control  $u_0$  es constante. Un controlador con acción integral siempre dará error cero en estado estacionario. La acción integral se puede también visualizar como un dispositivo que automáticamente resetea el término de polarización  $u_b$  de un controlador proporcional. [59]

### c) Métodos de Sintonización

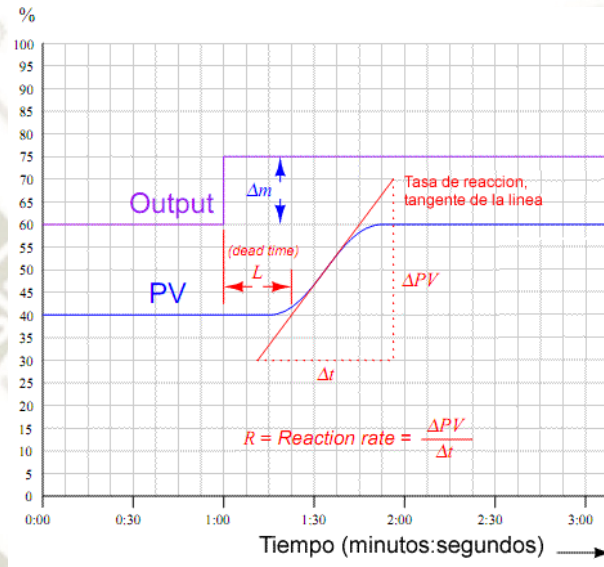
Existen varias técnicas de sintonización controlador PID como las siguientes:

- Técnica de sintonización por Ziegler-Nichols
- Técnica de sintonización mediante Cohen-Coon
- Técnica de sintonización por IMC
- Técnica de sintonización por Lambda
- Ensayos de prueba y error
- Por cancelación de polos

Para esta practica nos enfocaremos en el segundo criterio de Ziegler-Nichols:

El cual es obtener el modelamiento matemático del proceso a través del método de curva reacción. Consiste en hacer en modo manual un cambio en la salida y analizar los efectos resultados en la variable de proceso.

Después de realizar este step-change en la señal de salida con el controlador en modo manual, la tendencia de la variable de proceso es íntimamente analizada para encontrar dos valores: el tiempo muerto, la constante de tiempo y la ganancia del sistema. El tiempo muerto ( $L$ ) es la cantidad de retardo entre el cambio en la salida y la primera indicación de cambio en la variable de proceso. [58]



El tiempo muerto y la tasa de reacción son respuestas comunes de los procesos autorregulatorios e integrativos. Sin importar si la variable de proceso se estabiliza en algún nuevo valor, su tasa de crecimiento tendrá algún valor máximo en el tiempo seguido del cambio en la salida, y esto será la tasa de reacción del proceso. La unidad de medida de la tasa de reacción es en porcentaje por minuto. [58]

$$R = \Delta PV / \Delta t$$

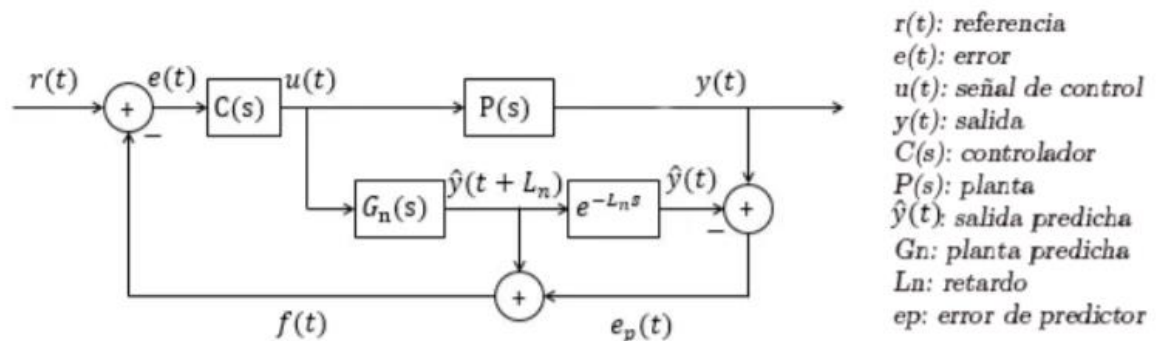
Mientras el tiempo muerto en una tendencia de proceso es constante sin importar la magnitud del cambio en la salida o step-change, la tasa de reacción varía directamente con la magnitud del cambio en la salida. Por ejemplo, un cambio en la salida de 10% generalmente causará que PV crezca a una tasa dos veces más rápida comparado con el efecto de un cambio de 5% en la salida del controlador. Para asegurarnos de que nuestros cálculos predictivos capturen solo lo que es inherente del proceso y no nuestras propias acciones, debemos incluir la magnitud del cambio en la salida o step-change en nuestros cálculos. Si el controlador en

cuestión es netamente proporcional, Ziegler y Nichols nos recomiendan configurar el controlador como sigue. [58]

$$K_p = \Delta m / RL$$

#### d) Predicador de Smith

Uno de los primeros esquemas de control implementados para mejorar el comportamiento en lazo cerrado de sistemas que contienen retardo fue propuesto por O.J. Smith a finales de 1950 y actualmente es conocido como predicador de Smith o SP, consiste en el uso de un modelo para predecir la salida en el esquema de control. En la figura 2 se puede apreciar la estructura del SP, los bloques  $C(s)$  y  $P(s)$  corresponden respectivamente al controlador y a la planta real con  $P(s) = G(s)e^{-Ls}$  donde  $L$  es el retardo. En esta estructura se realimenta la predicción de la salida del proceso, calculada usando un modelo de la planta sin retardo  $G_n(s)$ . Además, para compensar el efecto de las perturbaciones y corregir los efectos de los errores de modelado, se realimenta también la diferencia entre la salida del proceso y la salida del modelo incluyendo el retardo estimado ( $P_n(s) = G_n(s) e^{-L_n s}$ ). [60]



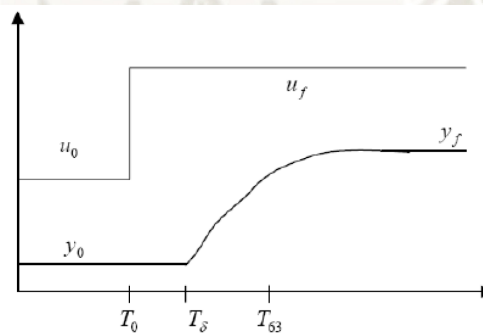
#### IV Cuestionario Previo

1. Cual es la acción de la ganancia proporcional?
2. Cual es la acción del tiempo integral?
3. Cual es la acción del tiempo derivativo?
4. Con una grafica demuestra el comportamiento de un sistema de primer orden con retardo puro
5. Como funciona el Predicador de Smith?

## V. Actividades

### Realizar la identificación del modelamiento matemático del proceso.

1. Abrir el programa “Control\_Manual.slx”
2. Colocar como forzado de señal de la resistencia calefactora el valor de 30%. Verificar que el comportamiento de la variable de proceso este incrementando, y cuando se encuentre establecida se puede parar el proceso dándole un ingreso de 0% a la resistencia calefactora.
3. Asegurarse de almacenar los datos obtenidos en la prueba anterior y guardarlos en las tablas de Matlab
4. Determinar los parámetros de la curva de reacción para la generación función de transferencia del sistema a través de las siguientes formulas:



$$G = \frac{K_p e^{-Ls}}{\tau s + 1}$$

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

$$\tau = T_{63.2} - T_{\delta}$$

$$L = T_{\delta} - T_0$$

5. Validar el comportamiento del modelo matemático obtenido teóricamente y experimentalmente a través de las funciones Matlab o Simulink.

## Sintonización de controlador PI y análisis de la respuesta ante el DTC Predictor de Smith

Después de haber obtenido la función de transferencia con retardo puro, reemplazar los datos con los que se muestra en la siguiente figura.

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

6. Calcular los valores de los parámetros del controlador PID.
7. Usar Simulink para comprobar el comportamiento de la función de transferencia sometida por el controlador PID. Es posible que la curva de reacción tenga sobre impulso, de ser necesario ajustar los parámetros de las constantes del PID para mejorar su respuesta.
8. Después de haber ajustado los parámetros PID, abrir el programa "Control\_de\_Temperatura.slx"
9. Colocar los valores de la sintonización fina realizada para el controlador PID.
10. Ingresar el valor del setpoint y luego presionar el botón de RUN. Verificar la respuesta del sistema y analizar su comportamiento respecto al sobre impulso, error en estado estacionario y el tiempo de establecimiento.
11. Ingresar la estructura del predictor de Smith al sistema de control de temperatura
12. Aumente el tiempo muerto del proceso controlado de 2,0 a 2,5 segundos (sin ajustar ningún parámetro del controlador). ¿Es robusto el predictor de Smith frente a este cambio de parámetro, que introduce un error de modelo? (Observe la estabilidad del sistema de control). ¿Qué pasa con el sistema de control tradicional, tiene mayor robustez contra el error del modelo? [61]
13. Analizar la diferencia de los controladores PI y PID con Predictor de Smith.

## VI. CONCLUSIONES

