

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TESIS

Diseño de un controlador PID no interactivo para el control de sistemas autónomos de tanques de nivel usando sintonización basada en automatización industrial

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecatrónico

Elaborado por

Essly Kennedy Carrión Almendrades

 [0009-0007-0501-4806](https://orcid.org/0009-0007-0501-4806)

Asesor

MSc. Chavez Palomino Ronald Eder

 [0000-0002-9195-228X](https://orcid.org/0000-0002-9195-228X)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	(Carrión, 2025)
Referencia/Reference	Carrión, E. (2025). <i>Diseño de un controlador PID no interactivo para el control de sistemas autónomos de tanques de nivel usando sintonización basada en automatización industrial</i> . [Tesis de titulación, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A Dios por darme salud y guiarme en cada etapa de mi vida.

A mi madre Dominica Almendrades Pérez y a mi padre Raúl Juan Carrión Maguiña por su amor, ejemplo de vida, apoyo incondicional a pesar de las circunstancias de la vida y por el gran amor que les tengo.

A mis hermanos Nilton, Angelita, Roy y Shirley Anahí por su apoyo moral y ejemplos de vida con ética profesional.

Agradecimientos

Gracias a Dios por darme su bendición, la luz de esperanza y la fe para superar las dificultades de la vida, a mis seres queridos por el apoyo incondicional y a todas las personas que conocí durante mi etapa universitaria y formación académica,

Agradecimiento especial al M.Sc. Ing. Ronald Eder Chavez Palomino y al Dr. Ing. Ricardo Raúl Rodríguez Bustinza, por su apoyo incondicional, dedicación y amistades brindados en la elaboración del presente trabajo.

A mi alma mater la Universidad Nacional de Ingeniería, mi casa de estudios por la formación profesional y a cada uno de los docentes por las enseñanzas impartidas durante los años de formación profesional.

Nada es más honorable que un corazón agradecido. (Séneca).

Resumen

El acceso y control del agua no solo ha sido clave para el surgimiento de las civilizaciones, sino que hoy representa un reto crítico frente a la creciente demanda y contaminación industrial. En este contexto, la presente investigación se propone el diseño automatizado de un sistema de control de nivel de agua usados en las industrias, integrando tecnologías como un Controlador Lógico Programable (PLC, Programmable Logic Controller) y la adecuada instrumentación industrial, así analizar las características en la aplicación, los protocolos de comunicación industriales como es el Modbus TCP/IP (Transmission Control Protocol/ Internet Protocol) y el RTU (Remote Terminal Unit), y la seguridad operacional aplicado a las industrias.

La adquisición de datos, el análisis de los sistemas digitales de control y la implementación del controlador PID no interactivo basado en el algoritmo en velocidades, los cuales se evaluarán a través de simulaciones en Simulink de Matlab.

El estudio aborda el análisis del sistema de control digital y la incorporación de estrategias de seguridad operacional basadas en el Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS), para determinar el aumento de la automatización del proceso a través de la aplicación de controladores digitales robustos en entornos industriales.

Palabras clave: Control digital, performance, instrumentación, adquisición de datos, modelamiento discreto, comunicación industrial.

Abstract

Access to and control of water have not only been key factors in the rise of civilizations but today represent a critical challenge in the face of increasing demand and industrial pollution. In this context, the present research proposes the automated design of a water level control system used in industrial applications, integrating technologies such as a Programmable Logic Controller (PLC) and appropriate industrial instrumentation. It also analyzes application characteristics, industrial communication protocols such as Modbus TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) and RTU (Remote Terminal Unit), and operational safety applied to industry.

The study includes data acquisition, analysis of digital control systems, and the implementation of a non-interactive PID controller based on a velocity-form algorithm, evaluated through simulations in MATLAB Simulink. Additionally, it addresses the analysis of the digital control system, and the incorporation of operational safety strategies based on the Safety Instrumented System (SIS), to assess the improvement of process automation through the application of robust digital controllers in industrial environments.

Keywords: Digital control, performance, instrumentation, data acquisition, discrete modeling, industrial communication.

Lista de Contenido

Resumen	v
Abstract.....	vi
Introducción	xx
Capítulo I.....	1
1. Generalidades.....	1
1.1 Antecedentes de la Investigación	1
1.2 Identificación y Descripción del problema de investigación	4
1.3 Formulación del Problema.....	7
1.3.1 Problema Principal	7
1.3.2 Problemas Específicos.....	7
1.4 Justificación e Importancia	7
1.5 Objetivos	8
1.5.1 Objetivo General	8
1.5.2 Objetivos Específicos.....	8
1.6 Hipótesis	9
1.6.1 Hipótesis General	9
1.6.2 Hipótesis Específicas	9
1.7 Variables y Operacionalización de Variables.....	9
1.7.1 Operacionalización de las Variables	9
1.8 Metodología de la Investigación	11
1.8.1 Unidad de Análisis	11
1.8.2 Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación	11

1.8.3	Diseño de Investigación	12
1.8.4	Fuente de Información	12
1.8.5	Población y Muestra.....	12
1.8.6	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	12
1.8.7	Análisis y Procesamiento de Datos	13
Capítulo II.		14
2.1	Bases Teóricas	14
2.1.1	Procesos Industriales.....	14
2.1.2	Plantas de Tratamiento de Agua: Una visión General	15
2.1.3	Importancia del Tratamiento de Agua	18
2.1.4	Procesos en las Plantas de Tratamiento de Agua.....	19
2.1.5	Sistema de Tanque de Nivel de Agua	19
2.1.6	Sistemas de Control.....	22
2.1.7	Discretización de los sistemas de Control	31
2.1.8	Control PID no interactivo	37
2.1.9	Método de Sintonización de Ziegler Nichols.....	39
2.1.10	Automatización Industrial	42
2.1.11	Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS)	72
2.2	Marco Conceptual	76
Capítulo III.		79
3.	Desarrollo del trabajo de investigación.....	79
3.1	Diseño e Implementación del Sistema de Tanques	79
3.1.1	Diseño del Diagrama P&ID	79

3.1.2	Diseño del Sistema Mecánico	80
3.1.3	Diseño del Sistema Eléctrico.....	84
3.1.4	Implementación del Sistema de Tanques.....	87
3.2	Adquisición de los Parámetros de la Planta.....	88
3.2.1	Diseño del Sistema de Control.....	88
3.2.2	Diseño Electrónico de Placa de Circuito Impreso para Adquisición de Datos.....	89
3.2.3	Adquisición de Parámetros desde LabVIEW	95
3.2.4	Obtención del Sistema de Transferencia de la Planta	98
3.3	Sintonización de Parámetros por Ziegler Nichols	106
3.4	Diseño del Control PID no interactivo	108
3.5	Diseño del Nivel de Seguridad Integral (SIL)	109
Capítulo IV.....		113
4.	Resultados, contratación de hipótesis y discusión de resultados	113
4.1	Resultados	113
4.2	Contrastación de hipótesis	130
4.3	Discusión de Resultados	133
Conclusiones		135
Recomendaciones		137
Referencias bibliográficas.....		138
Anexos		142

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Operacionalización de las Variables</i>	10
Tabla 2 <i>Comparación en la Aplicación de Control en los Procesos Industriales</i>	24
Tabla 3 <i>Sistema de Eventos Discretos y Acciones</i>	27
Tabla 4 <i>Características del Control Discreto</i>	32
Tabla 5 <i>Parámetros del Controlador del 1er Método de Ziegler Nichols</i>	41
Tabla 6 <i>Parámetros de Control a partir del Punto de Referencia de CHR</i>	42
Tabla 7 <i>Características Técnicas del Sensor de Nivel Industrial</i>	50
Tabla 8 <i>Características Sensor Ultrasónico HC-SR04</i>	52
Tabla 9 <i>Características del Sensor de Flujo YF-201</i>	53
Tabla 10 <i>Especificaciones Técnicas de la Bomba PKM 60</i>	55
Tabla 11 <i>Características de la Válvula de Control TFV4-306</i>	59
Tabla 12 <i>Características del PLC Industrial TM221CE16R</i>	64
Tabla 13 <i>Características del Arduino Due</i>	66
Tabla 14 <i>Comparación de Características entre NI DAQ 6008 y 6211</i>	68
Tabla 15 <i>Características del Módulo Max RS485</i>	72
Tabla 16 <i>Tabla del Nivel de Seguridad Integral</i>	74
Tabla 17 <i>Descripción de los Elementos Mecánicos</i>	81
Tabla 18 <i>Tuberías según Flujo de Agua</i>	81

Tabla 19 <i>Parámetros de los Controladores por Ziegler Nichols y CHR</i>	108
Tabla 20 <i>Parámetros de la Ecuación en Diferencias</i>	109
Tabla 21 <i>Análisis del Riesgo Identificado y Parámetros del Método Gráfico del SIL</i>	111
Tabla 22 <i>Características de la Respuesta Temporal del Controlador Ziegler Nichols Clásico y Discreto</i>	118
Tabla 23 <i>Características de la Respuesta Temporal del Controlador Ziegler Nichols Clásico y Discreto con Perturbación de 25% del SP</i>	119
Tabla 24 <i>Características de la Respuesta Temporal del Controlador Ziegler Nichols Clásico y Discreto con Perturbación de 25% de la Salida y</i>	119
Tabla 25 <i>Características de la Respuesta Temporal del Controlador CHR Clásico y Discreto</i>	124
Tabla 26 <i>Características de la Respuesta Temporal del Controlador CHR Clásico y Discreto con Perturbación de 25% del SP</i>	124
Tabla 27 <i>Características de la Respuesta Temporal del Controlador Ziegler Nichols Clásico y Discreto con Perturbación de 25% de la Salida y</i>	124

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Problemas en la salud derivados de la contaminación del agua</i>	4
Figura 2 <i>Problemas en los Servicios de las Empresas Prestadoras</i>	6
Figura 3 <i>Problemas en la Operación de las PTAR</i>	6
Figura 4 <i>Evolución del Poder Económico y el cambio en la Era Industrial</i>	15
Figura 5 <i>Lima la Sexta Ciudad con Mayor Cantidad de Habitantes</i>	16
Figura 6 <i>Descargas de aguas residuales domésticas sin tratamiento, según departamento</i>	18
Figura 7 <i>Procesos en una Planta de Tratamiento de Agua</i>	19
Figura 8 <i>Modelo del Sistema de Tanques de Nivel</i>	21
Figura 9 <i>Características de los Sistema de Control</i>	23
Figura 10 <i>Sistema de Control a Lazo Abierto</i>	24
Figura 11 <i>Sistema de Control a Lazo Cerrado</i>	25
Figura 12 <i>Concepción del Sistema de Control Industrial</i>	26
Figura 13 <i>Instrucción del Control PID del PLC TM221CE16R de Schneider</i>	29
Figura 14 <i>Solución de Modelos Discretos de los Sistemas Físicos</i>	31
Figura 15 <i>Control en los Sistemas Invariantes en el Tiempo</i>	33
Figura 16 <i>Claves para la implementación del Control Digital</i>	34
Figura 17 <i>Sistema de Adquisición de Datos y Control Discreto</i>	35

Figura 18 <i>Comparación del Tiempo Continuo y Discreto</i>	35
Figura 19 <i>Sistema de Adquisición de Datos para la Planta</i>	36
Figura 20 <i>Aproximación Backward de una Planta de 1er Orden</i>	37
Figura 21 <i>Aproximación Trapezoidal del Error en el Sistema Discreto</i>	38
Figura 22 <i>Comportamiento de los Sistemas Físicos</i>	40
Figura 23 <i>Parametrización del Método de Sintonización Ziegler Nichols</i>	41
Figura 24 <i>Nivel de Automatización Industrial</i>	43
Figura 25 <i>Sensores Industriales de Nivel de Líquido</i>	45
Figura 26 <i>Sensores de Flujo Tipo Turbina</i>	46
Figura 27 <i>Factor K para la Conversión de Impulsos a Litros</i>	47
Figura 28 <i>Acondicionamiento y Procesamiento de la Señal del Sensor Tipo Turbina</i>	48
Figura 29 <i>Sensor de Nivel Ultrasónico de Allen-Bradley</i>	49
Figura 30 <i>Características del Sensor de Nivel Industrial para una Medida de 30cm</i>	50
Figura 31 <i>Sensor Ultrasónico HC-SR04</i>	51
Figura 32 <i>Características de la Señal de Pulsos del Sensor Ultrasónico</i>	52
Figura 33 <i>Sensor de Flujo YF-201</i>	53
Figura 34 <i>Sistema Interno de las Válvulas de Control</i>	54
Figura 35 <i>Bomba PKM 60 de Pedrollo</i>	55
Figura 36 <i>Placa de Identificación de la Bomba PKM 60</i>	55

Figura 37 <i>Diagrama de Fuera y de Control o de Mando</i>	58
Figura 38 <i>Válvula de Control TFV4-306</i>	59
Figura 39 <i>Etiqueta de Identificación de las Señales de Control</i>	60
Figura 40 <i>Identificación de Colores de los Cables de Control</i>	61
Figura 41 <i>Característica del PLC TM221CE16R</i>	62
Figura 42 <i>PLC Industrial Compacto TM221CE16R</i>	64
Figura 43 <i>Microcontrolador Arduino Due Atmel SAM3X8E Cortex-M3</i>	66
Figura 44 <i>NI DAQ USB 6211</i>	67
Figura 45 <i>NI DAQ USB 6008</i>	67
Figura 46 <i>Configuración Maestro Esclavo del Modbus RTU</i>	69
Figura 47 <i>Protocolo de Comunicación Codificado del Modbus RTU</i>	70
Figura 48 <i>Protocolo de Comunicación Modbus TCP/IP</i>	70
Figura 49 <i>Codificación del Modbus TCP/IP</i>	71
Figura 50 <i>Módulo convertidor TTL a RS 485</i>	71
Figura 51 <i>Identificación de Riesgos y Medidas de Protección</i>	73
Figura 52 <i>Nivel Instrumentado de Seguridad y el SIF</i>	73
Figura 53 <i>Capas de Protección del Sistema Básico del Control de Procesos</i>	75
Figura 54 <i>Método Gráfico del Nivel de Seguridad Integral</i>	76
Figura 55 <i>Sistema de Adquisición de Datos</i>	77

Figura 56 <i>Diferencia Entre Exactitud y Precisión</i>	78
Figura 57 <i>Zona de Cavitación en el Impulsor</i>	82
Figura 58 <i>Curva Característica de Caudal Q vs Hmán de la Bomba PKM 60</i>	83
Figura 59 <i>Equivalencia Relacional de Q vs Altura (H) de la Bomba PKM 60</i>	83
Figura 60 <i>Ubicación de los Equipos Eléctricos y Shield de Comunicación Modbus RS-485</i>	85
Figura 61 <i>Consumo de Potencia Eléctrica de la Bomba PKM 60</i>	86
Figura 62 <i>Medida del Calibre del Cable de Conexionado</i>	86
Figura 63 <i>Implementación del Sistema de Tanques de Nivel de Agua</i>	87
Figura 64 <i>Sistema de Control y Monitoreo del Sistema de Tanques</i>	88
Figura 65 <i>Diagrama de Conexión para el Diseño de PCB – Integración de Sensores con Arduino Due Y PLC TM221CE16R vía RS-485</i>	90
Figura 66 <i>Shield para Arduino Due – para Comunicación Modbus RS-485</i>	91
Figura 67 <i>Implementación y Comunicación del PLC TM221CE16R y Arduino Due</i>	91
Figura 68 <i>Diseño de Placa PCB para Acondicionamiento de Señal Analógica</i>	92
Figura 69: <i>Configuración y direccionamiento del Modbus RTU del PLC M221 como Maestro</i>	93
Figura 70 <i>Envío de Datos de los Sensores del Esclavo (Arduino Due) al PLC M221</i>	94
Figura 71 <i>Factor de Conversión de Señal aplicado al Arduino Due</i>	94

Figura 72 Escalamiento del Sensor industrial de Allen-Bradley y señal Feedback de la Válvula de control	94
Figura 73 Función de escalamiento de la señal analógica a nivel del tanque TK-002	95
Figura 74 Lógica de funcionamiento del control ON-OFF de la bomba	95
Figura 75 Diagrama del Sistema de Adquisición de Datos	96
Figura 76 Sistema de Adquisición de Datos en LabVIEW y Comunicación entre DAQ USB 6211 y Arduino Due	97
Figura 77 Implementación del Sistema de Adquisición de Datos DAQ USB 6008.....	97
Figura 78 Señal Impulso de Amplitud 10V	99
Figura 79 Nivel del Tanque Superior TK 002	99
Figura 80 Flujo en la Tubería de Alimentación por la Bomba PKM 60.....	99
Figura 81 Sensor de Flujo de la Tubería de Control	100
Figura 82 Flujo de la Tubería de Desfogue del Tanque TK 003	100
Figura 83 Señal del Sensor Industrial del Cambio de Nivel en cm	101
Figura 84 Señal de Control y Cambio en la Apertura de la Válvula de Control	101
Figura 85 Modelo Aproximado de 1er Orden de la Planta de Nivel	102
Figura 86 Comparación del Sistema Identificado y el Sistema Real.....	102
Figura 87 Análisis de la Señal de Control y la Apertura de la válvula en V.....	103
Figura 88 Aproximación al Sistema de 1er Orden de la Apertura de la Válvula de Control	104

Figura 89 Sistema en Lazo Abierto de la Altura y Apertura de la Válvula de Control.....	104
Figura 90 Planta Discretizada mediante el método ZOH	106
Figura 91 Aproximación de los Parámetros de 1er Orden de Ziegler Nichols.....	107
Figura 92 Comparación entre Planta Real Y la Aproximada por Ziegler Nichols	107
Figura 93 Respuesta del Sistema a los diferentes Sistemas PID Clásico y Discreto por Ziegler Nichols	114
Figura 94 Respuesta Temporal en los Sistemas PID Clásico y Discreto en Ziegler Nichols	114
Figura 95 Acción de Control a la Válvula de Control en el PID Clásico y Discreto.....	115
Figura 96 Error Relativo de la Altura del PID Clásico y Discreto	115
Figura 97 Respuesta Temporal ante la Aplicación de un 25% de Perturbación del valor del SP.....	116
Figura 98 Acción de Control a la Válvula de Control ante la Perturbación de 25% SP ..	116
Figura 99 Error Relativo de la Altura ante la Aplicación de la Perturbación	117
Figura 100 Respuesta Temporal ante la Aplicación de un 25% de Perturbación del valor de la Salida y	117
Figura 101 Acción de Control a la Válvula de Control ante la Perturbación a 25% de y	118
Figura 102 Error Relativo de la Altura ante la Aplicación de la Perturbación	118
Figura 103 Respuesta del Sistema a los diferentes Sistemas PID Clásico y Discreto por el Ajuste de Parámetros de CHR	120
Figura 104 Respuesta Temporal en los Sistemas PID Clásico y Discreto en CHR	120

Figura 105 <i>Acción de Control a la Válvula de Control en el PID Clásico y Discreto en CHR</i>	121
Figura 106 <i>Error Relativo de la Altura del PID Clásico y Discreto de CHR</i>	121
Figura 107 <i>Respuesta Temporal ante la Aplicación de un 25% de Perturbación del valor del SP</i>	122
Figura 108 <i>Acción de Control a la Válvula de Control ante la Perturbación de 25% SP</i>	122
Figura 109 <i>Error Relativo de la Altura ante la Aplicación de la Perturbación</i>	122
Figura 110 <i>Respuesta Temporal ante la Aplicación de un 25% de Perturbación del valor de la Salida y</i>	123
Figura 111 <i>Acción de Control a la Válvula de Control ante la Perturbación a 25% de y</i>	123
Figura 112 <i>Error Relativo de la Altura ante la Aplicación de la Perturbación</i>	124
Figura 113 <i>Respuesta Temporal ante una Señal Pulso del Controlador Ziegler Nichols</i>	125
Figura 114 <i>Acción de Control a la Válvula de Control ante la Señal Pulso</i>	126
Figura 115 <i>Error Relativo de la Altura ante la Señal Pulso</i>	126
Figura 116 <i>Respuesta Temporal ante una Señal Pulso del Controlador CHR</i>	127
Figura 117 <i>Acción de Control a la Válvula de Control ante la Señal Pulso de CHR</i>	127
Figura 118 <i>Error Relativo de la Altura ante la Señal Pulso</i>	127
Figura 119 <i>Respuesta Temporal ante Variación en el SP y Altura Inicial 3cm por Ziegler Nichols</i>	128
Figura 120 <i>Acción de Control a la Válvula de Control ante Condición Inicial</i>	128

Figura 121 <i>Error Relativo de la Altura ante Condición Inicial</i>	129
Figura 122 <i>Respuesta Temporal ante Variación en el SP y Altura Inicial 3cm por CHR</i>	129
Figura 123 <i>Acción de Control a la Válvula de Control ante Condición Inicial en CHR</i> ...	130
Figura 124 <i>Error Relativo de la Altura ante Condición Inicial</i>	130

Introducción

Los avances tecnológicos, desde las primeras mecánicas hasta los modernos sistemas dirigidos por cerebros digitales, como los PLC, han revolucionado la forma en que se diseñan, operan y mantienen las plantas industriales. Estas tecnologías permiten una gestión más eficiente, precisa y adaptable de los recursos, garantizando estándares de calidad más altos y reduciendo el impacto ambiental.

Hoy en día, nos encontramos en la era de las industrias automáticas o revolución 4.0, donde la supervisión y el control de procesos son llevados a cabo por sistemas inteligentes y autónomos. Por lo que, la tesis se enfoca en el análisis y diseño de un control PID no interactivo, para la automatización de sistemas de tanques de Nivel de Agua a partir del procesamiento de las señales analógicas y digitales, precisando en los términos como Variables de Proceso (PV, Process Variable), límites máximos (URV, Upper Range Value), mínimos (LRV, Lower Range Value) y el Rango de las señales de instrumentación. La implementación de un actuador controlado por señal analógica y digital, en el primer caso escalando las señales de apertura y cierre de válvula de control analógica y un control ON-OFF para una bomba periférica de alimentación para la seguridad en el proceso de llenado.

La aplicación de los protocolos de comunicación Modbus RTU y Modbus TCP/IP en la transmisión y recepción de señales, junto con el diseño electrónico para integrar una placa de simulación Arduino Due, utilizando el MAX RS-485 (Maxim Integrated, Recommended Standard) y el puerto serial del PLC Industrial TM221CE16R de Schneider, que constituye un aspecto relevante en esta tesis. El diseño de ingeniería se enfoca en la adquisición de datos mediante el NI DAQ USB 6211 (National Instruments Data Acquisition) utilizando el software de LabVIEW, donde se almacenarán los datos de los sensores de nivel y de flujo generadas ante cambios en la planta de nivel, La investigación tiene como estructura 4 capítulos, en donde se desarrolla la metodología a aplicar al sistema de control

En el Capítulo I, se expone la problemática actual del desarrollo industrial del control de procesos y se aborda la metodología para el desarrollo de la investigación. Se presentan

los antecedentes que son las bases y contribuyen al desarrollo de la investigación. Además, se plantean las hipótesis que serán validadas con los resultados obtenidos de las simulaciones. Se elabora la matriz de operacionalización de las variables dependiente e independiente para cumplir con los objetivos propuestos.

En el Capítulo II, se fundamentan las bases en el marco teórico y conceptual para un entendimiento detallado de los sistemas de control y la automatización industrial.

En el Capítulo III, se inicia con el desarrollo de la tesis con los detalles de los diseños del mecánico, diseño eléctrico basado en la diferenciación de los sistemas de Fuerza y Control, los diagramas de tuberías o P&ID (Piping and Instrumentation Diagram), el diseño del sistema de control y de Adquisición de Datos, la comunicación industrial Modbus RTU, diseño electrónico de placas PCB de conversión de señal TTL a señal Modbus RTU, y la conversora analógica de 0-5V a 0-10V. Además, se aplica las técnicas de sintonización industrial basada en Ziegler Nichols y el ajuste de los parámetros para un mínimo sobreimpulso de Chien, Hrones y Reswick (CHR) y el diseño del controlador PID no interactivo basado en la discretización trapezoidal.

En el Capítulo IV, se presentan los resultados gráficos de la implementación de los algoritmos de control PID no interactivos por los controladores Industriales propuestas por Ziegler Nichols y CHR, analizando los parámetros de sobreimpulso, tiempo de pico y tiempo de establecimiento, y el grado de robustez variando los valores de la referencia o Set Point (SP) y aplicando perturbaciones con valor inicial en la salida de la planta se procesa al análisis y discusión de los resultados mediante los parámetros indicados en favor del control PID no interactivo.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones para los trabajos a futuro, la bibliografía utilizada y los anexos que muestran el desarrollo de la tesis.

Capítulo I.

1. Generalidades

1.1 Antecedentes de la Investigación

Aishvarya Pratap Singh, (2015) Multi-Tank Level Control using Internal Model Control and Internal Model Cascade Control. Este proyecto trata sobre el estudio, del diseño y aplicación de IMC (Internal Model Control) y estrategias IMCC ((Internal Model Cascade Control) para un sistema de una entrada sin restricciones y una salida. Ambas estrategias han sido estudiadas aplicándolas a sistema de control tanque de nivel variable. La aplicación de ambos se realizan estrategias sobre el modelo del sistema y las respuestas escalonadas del sistema modelado. Se analizan diferentes condiciones de operación para deducir varias conclusiones. Basado en varios parámetros de performance de una regla de ajuste para el mejor parámetro óptimo de diseño. También consiste en la comparación de varias estrategias de control como PID y PID en cascada, las dos estrategias anteriores con diferentes configuraciones de tanque. Una mejora es también se agregó a IMC para mejorar el rechazo de perturbaciones.

Ribeiro A., H Ribeiro, A. H. dos S., Coelho, B. F., Araújo Filho, E. M., Soares, A. C. M., Moura, J. P., Rêgo, P. H. M., & Fonseca Neto, J. V. D. (2016). *PID Controller Embedded in Industrial PLC Applied to Level Control in Tanks*, tiene como objetivo desarrollar e implementar un control PID de nivel para un sistema de dos tanques utilizando un controlador PI aplicado a un PLC industrial, con el fin de mantener los niveles en su punto máximo a fin de evitar el sobrellenado o vaciado, la metodología aplicada se basó en el modelamiento matemático de la planta como un sistema de segundo orden. Se diseñó el controlador PI usando el Software Simulink de Matlab. Los resultados del control PI logró una respuesta rápida con sobreimpulso menor al 10% y esfuerzo de control pequeño, concluyendo que el control PI diseñado fue eficaz y cumple con las condiciones de diseño

establecidas y demuestra que es una solución viable para automatización industrial en plantas de proceso.

Ikhlef, A., Kihel, M., Boukhezzar, B., Mansouri, N., & Hobar, F. (2016). *Online PID Control of Tank Level System*. Plantea el desarrollo de un control de nivel remoto de un tanque a través de una red local o internet el cual permitirá realizar experimentos reales de control PID a distancia. La metodología utilizada implementa el NI USB 6008 y LabVIEW, el cual implementa el método de sintonización PID basados en Ziegler-Nichols tanto en lazo abierto como cerrado, este sistema se valida con éxito en la sintonización del Controlador PID en tiempo real. Las respuestas mostraron una adecuada regulación de nivel de tanque, permitiendo la interacción completa con el usuario. En tanto concluyen con el desarrollo efectivo del control PID, accesible y presenta una solución para superar las limitaciones logísticas en prácticas de laboratorio.

Haoqiang Ji, (2013). *PLC Programming for a Water Level Control System: Design and System Implementation*. En la industria, el problema del control del nivel del agua es un problema típico de control de procesos, y ha sido ampliamente estudiado en la literatura. Este informe se centra en el diseño e implementación de un sistema de control de nivel de agua basado en PLC. En este proyecto, se plantean dos objetivos principales: (1) el diseño mecánico general del sistema y (2) el diseño e implementación del sistema basado en PLC. En la parte de diseño mecánico, se realiza un análisis de elementos para el tanque de agua para verificar el área que tiene alta riesgo de fugas. Además, se realiza una simulación de flujo en el tanque de agua para analizar el efecto de la presión transitoria en los sensores. Por otro lado, el tanque de agua se modela en Simulink, y los resultados de la simulación demostraron que el controlador PID regula el nivel del agua a la posición deseada. Finalmente, el diagrama de escalera del PLC está programado, y los resultados experimentales han verificado la efectividad del diseño,

A. Parra, (2007). "Diseño e Implementación de Controladores PID Industriales". Este artículo desarrolla un procedimiento de diseño de un MIMO PID (Multi-Entrada-Multi-Salida Proporcional–Integral– Derivado) para controlar el nivel y temperatura en una planta

de tanque de agua. Tal planta se describe por ecuaciones diferenciales no lineales, lo que podría complicar los aspectos analíticos de modelado y diseño de controladores. Sin embargo, se aplicó la linealización para obtener una descripción lineal PID MIMO, que actúa sobre el tanque de agua planta. Los resultados experimentales demuestran que el diseño el controlador es capaz de estabilizar el nivel y la temperatura del tanque simultáneamente. El software de control fue escrito en código LabVIEW.

R. Aquize, (2011). "Implementación de un Sistema de Control No Lineal Backstepping Multivariable para la Planta Piloto Tanque con Agua". Este artículo desarrolla un procedimiento para el diseño e implementación en tiempo real de un sistema de control no lineal backstepping para controlar simultáneamente el nivel y la temperatura en el proceso tanque con agua. El sistema de control diseñado combina el modelo dinámico no lineal de Lagrange del proceso con un controlador backstepping multivariable. Los estudios de simulación y experimentación realizados demostraron el buen rendimiento de este controlador, el cual se comparó con el rendimiento de un controlador con modos deslizantes.

R Rodriguez, V Paredes, G Noa and L Trucios, (2019). Grey box identification and adaptive control in a water level system. Estudia la aplicación del Control Adaptativo para estimar perturbaciones externas en un modelo de sistema de nivel de agua, aprovechando una identificación de caja gris no lineal construida que permite explotar su dinámica. Las perturbaciones externas estarán especialmente relacionadas con la válvula. manipulaciones considerando información de detección limitada utilizando solo sensores de altura del agua. Nuestra metodología es doble: (1) Usar un modelo de caja gris para identificar la planta bajo una operación punto y, (2) usando control adaptativo para reaccionar contra cambios en el sistema o perturbaciones en la válvula y todavía conducir a un controlador convergente y asintóticamente estable.

1.2 Identificación y Descripción del problema de investigación

En la actualidad, los problemas ambientales están cada vez más evidentes, afectando el agua, el aire y la capa de ozono. La contaminación está causando cambios climáticos significativos.

El agua es un recurso esencial para el desarrollo de las ciudades emergente o en desarrollo. La contaminación del agua y la falta de tratamiento de las aguas residuales generan un gran volumen de aguas contaminadas, con consecuencias en enfermedades como el cólera, la tuberculosis y gastroenteritis que dejaron al Perú, en el año 1991, pérdidas humanas y secuelas graves en los afectados en alrededor de 800.000, en la Figura 1 observamos la alerta que ocasionó el brote del cólera y como plantean la potabilización del agua a partir de la epidemia generada en el país, en lo económico para el año 1993 perdidas cerca de medio millón de dólares debido a las afectaciones del sector turismo, la pesca, y las exportaciones (Petrera y Montoya, 1992).

Figura 1

Problemas en la salud derivados de la contaminación del agua



Nota: Fuente El Perú en los tiempos del cólera. La república. 2020. (<https://larepublica.pe/sociedad/2020/03/16/epidemias-y-enfermedades-el-peru-en-los-tiempos-del-colera>)

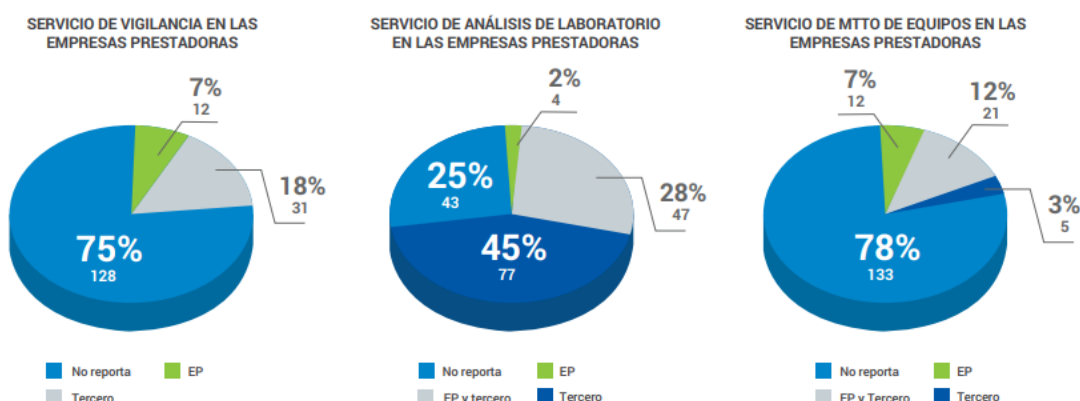
Las PTAR desempeñan un papel fundamentalmente la reducir los niveles de contaminación del agua mediante procesos de tratamiento. Estos incluyen métodos físicos, químicos y biológicos para eliminar los contaminantes presentes. Es crucial que las PTAR

estén diseñadas y operadas de manera eficiente para garantizar que el agua cumpla con los estándares de calidad requeridos antes de ser devueltos al medio ambiente o reutilizada. Además del tratamiento de aguas residuales, es esencial promover prácticas de conservación del agua y la implementación de tecnologías limpias en las industrias para abordar de manera integral los desafíos ambientales relacionados con el agua. Por ello, las PTAR son clave para proteger nuestros recursos hídricos y promover un desarrollo urbano sostenible.

Según el informe de junio de 2022 de la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (Sunass) titulado “Diagnostico de las plantas de tratamiento de aguas residuales en el ámbito de las empresas prestadoras” hace referencia a las diferentes PTAR encargadas del tratamiento de aguas para disminuir la contaminación y así poder analizar en qué condiciones se encuentran estas PTAR. Según los resultados de este informe en el capítulo 09 denominado “Principales resultados y conclusiones” encuentra que solo el 27% de las PTAR operativas cuentan con sensores o medidores, para la operación correcta en estas plantas. Además, señala que 69 de las 171 PTAR operativas no cuentan con personal de operación y solo se realizan mantenimientos eventuales, la falta de personal capacitado y equipamiento para la adecuada operación llegando a diferenciarse, la falta de seguridad en los procesos de las PTAR. Por lo que así mismo se plantea la Sunass en el capítulo 10 “Propuestas de mejora, Propuestas respecto a la mejora de la infraestructura”, el punto 4 donde menciona la fomentación de sistemas cooperativos entre universidades locales y PTAR donde abordan los trabajos de investigación referente a tesis para el mejoramiento de las plantas, centrando esta investigación en los puntos 3 y 4 que incluyen la operación de plantas piloto y el acompañamiento, el monitoreo de programas de optimización de las PTAR.

Figura 2

Problemas en los Servicios de las Empresas Prestadoras



Nota: Reportes remitidos por las empresas prestadoras el año 2021. Sunass.

Como se detalla en la Figura 2, los problemas en los Servicios de las EP, no se realiza mantenimiento de equipos. En cuanto a los problemas de medición y operación etiqueta al primer grupo con las siguientes características mostradas en la Figura 3, referidas a caudal y corrosión.

Figura 3

Problemas en la Operación de las PTAR

EMPRESA PRESTADORA	PTAR FUNCIONANDO	REFERIDOS A MEDICIÓN DE CAUDAL		CORROSIÓN		LAGUNAS				UBICACIÓN DE LA PLANTA			
		FALTA DE VERETEDEROS	FALTA DE TABIQUES	PARTES METÁLICAS	ESTRUCTURAS DE CONCRETO	DIQUES O TALUDES EROSIONADOS CON GRIETAS	GEOMEMBRANA ROTA	COLMATADA CON LODOS	TALUDES CON MALEZA	ESPEJO DE AGUA CON VEGETACIÓN Y NATA	EXISTENCIA DE CASA O INVASIONES DE TERRENOS ALREDEDOR	PRESENCIA DE VIVIENDA A MENOS DE 500 M	DESMONTES DE BASURA EN ALREDORES

Nota: Reportes remitidos por las empresas prestadoras el año 2021. Sunass.

Por esta razón, se plantea la implementación de un sistema de control aplicado a los tanques de nivel que están como piloto del proceso de las PTAR y así generar un sistema automático basado en un control PID no interactivo y la aplicación de control de procesos referentes al nivel y caudal que son parte fundamental de las PTAR que tratan el

agua del territorio peruano. Con un diseño basado en el control de procesos para obtener un sistema operativo seguro y automático.

El modelado lineal mediante el NI DAQ USB 6211, para la adquisición de datos ante las perturbaciones de la planta para la aplicación del control PID no interactivo en nivel de un tanque. También se diseñarán los requerimientos de instrumentación necesarios para la correcta sintonización del control PID no interactivo, así como el análisis del nivel de automatización y la seguridad operacional de esta implementación.

1.3 Formulación del Problema

1.3.1 Problema Principal

¿De qué manera el diseño y la implementación de un controlador PID no interactivo mejorará la automatización en los sistemas de tanques de nivel de agua?

1.3.2 Problemas Específicos

- Problema específico 1: ¿Como influye la instrucción PID utilizada en un algoritmo de velocidad de la ecuación PID no interactivo?
- Problema específico 2: ¿Como afecta el uso de un algoritmo PID tradicional utilizado en los PLC respecto de un algoritmo de forma posicional que funciona directamente sobre el error?
- Problema específico 3: ¿Cómo influye el nivel de automatización en el desarrollo de los procesos en sistemas de tanques de nivel de agua?
- Problema específico 4: ¿De qué manera el nivel integrado de seguridad (SIL) mejorará la seguridad operacional en los sistemas de tanques de nivel de agua?

1.4 Justificación e Importancia

La aplicación de los sistemas de control en la industria emplea desde un control ON-OFF, para sistemas de arranques de motores, bombas, robots y actuadores utilizados en los diferentes procesos que lleva a la realización de tareas programadas en un PLC, hasta la aplicación de sistemas de control basados en la aplicación de algoritmos de control complejos que se encargan de ajustar los parámetros medidos por los sensores aplicados

a tanques de nivel, calderas industriales para ajustar la temperatura y presión, en base a las referencias ajustar el proceso a un sistema de alta performance de control.

Referente a lo descrito en el párrafo anterior, la investigación se justifica en el modelamiento de los sistemas de nivel de tanque, mediante la aplicación de algoritmos de control digitales o discretos, para la aplicación del PID no interactivo, puesto que los PLC en base al grado de interactividad con el usuario se realizan modelamientos de control basado en el Ensayo y Error, sin embargo, la aplicación de un modelamiento discreto realizar el Algoritmo de control PID en forma de velocidad en donde se relaciona la salida $y(k)$ y la entrada $u(k)$, los cuales están discretizadas por un tiempo de muestreo T_s .

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

El objetivo general de las tesis es diseñar un controlador PID no interactivo aplicado a tanques de nivel de agua para mejorar los procesos los sistemas de tanques de nivel de agua.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Objetivo Específico 1: Analizar la influencia de la instrucción PID utilizada en un algoritmo de velocidad de la ecuación PID no interactivo.
- Objetivo Específico 2: Desarrollo del algoritmo de forma posicional trabaja directamente sobre el error. Aunque esto es aceptable para aplicaciones simples, el algoritmo de forma de velocidad es mucho más fácil de aplicar para aplicaciones más avanzadas.
- Objetivo Específico 3: Diseñar el nivel de automatización mediante software especializados que permita optimizar el desarrollo en los sistemas de tanques de nivel de agua.
- Objetivo Específico 4: Diseñar el Nivel integrado de Seguridad (SIL) para la seguridad operacional de los sistemas de tanques de nivel de agua.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis General

Un adecuado diseño de un controlador PID no interactivo aplicado a un sistema tanque de nivel de agua mejorará la automatización en sistemas de tanques de nivel de agua.

1.6.2 Hipótesis Específicas

- Hipótesis específica 1: Un adecuado análisis de la influencia de la instrucción PID utilizada en un algoritmo de velocidad de la ecuación PID no interactivo ayudara a mejorar el control.
- Hipótesis específica 2: Un correcto desarrollo de los algoritmos de forma posicional de forma de velocidad permitirá una mejor performance del sistema de control.
- Hipótesis específica 3: El nivel de automatización mejorará la eficiencia en el desarrollo de los sistemas de tanques de nivel de agua.
- Hipótesis específica 4: El nivel integrado de seguridad (SIL) mejorará la seguridad operacional de los sistemas de tanques de nivel de agua.

1.7 Variables y Operacionalización de Variables

Con el objetivo de demostrar y verificar la hipótesis formulada, se procede a implementar el siguiente proceso metodológico, el cual consiste en una descomposición deductiva de las variables que integran el problema de la investigación, avanzando desde un nivel general a un nivel específico.

1.7.1 Operacionalización de las Variables

A continuación, se detalla la operacionalización de las Variables en la Tabla 1, en donde se desglosan los diferentes componentes a desarrollar en la investigación, permitiendo detallar las características específicas y las relaciones entre variables, facilitando el enfoque y análisis de la investigación.

Tabla 1

Operacionalización de las Variables

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de Medición	Unidad de Medición
Variable Independiente: Control PID no interactivo	Las acciones de control PID, no generan dependencias entre sí, cada término actúa de manera independiente sobre el Error.	El control PID no interactivo es una herramienta clave para la automatización de tanques de nivel de agua, pues ajusta los parámetros con alta precisión para garantizar la eficiencia estabilidad y autonomía	Obtención de la ley de control PID no interactiva	Componentes del sistema de control	Cuantitativa	-
			Medida de la acción de control.	Relación entre Ley de Control y el Error	Razón	Unidades
Variable Dependiente: Automatización en Sistema de Tanque de Agua.	Conjunto de operaciones que emplea sensores, actuadores y PLC, para la realización de actividades de manera autónoma, mejorando el uso de recurso y desbordamiento.	La instrumentación industrial basados en los niveles de automatización, integrando sensores de medición precisa para la aplicación eficiente de las señales en el algoritmo de Control garantizando una alta performance de los sistemas-	Automatización	Nivel de Automatización	Ordinal	Unidades
			Seguridad en los procesos	Nivel Integrado de Seguridad	Ordinal	Ordinal

Nota: Elaboración propia.

1.8 Metodología de la Investigación

1.8.1 Unidad de Análisis

La unidad de análisis se basa en la implementación de un sistema de control de nivel de agua para la simulación de los procesos industriales llevados a cabo en plantas de tratamiento de agua, para la implementación de un sistema de control del proceso y el Control PID no interactivo diseñado a partir del muestreo de la planta realizadas mediante el NI DAQ USB 6211 y el Software LabVIEW.

Para la obtención de los parámetros de la Planta del sistema de control se realizará en base a la relación de la salida $y(kT)$ y entrada $u(kT)$, que representarán las condiciones de cambio de la planta guiándonos de la Sintonización Industrial frecuentemente usado Ziegler- Nichols, captar las señales ante el escalón unitario.

1.8.2 Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación

“El enfoque cuantitativo usa la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin de establecer pautas de comportamiento y probar teorías.” (Hernández, 2014)

La presente investigación es de tipo aplicada pues busca resolver un problema general aplicado en la automatización industrial y tiene un enfoque cuantitativo pues la adquisición de datos, el control de la variable del proceso que es el nivel de agua, a través de un control PID no interactivo, permitiendo la mejora en la automatización de los sistemas de tanques de nivel de agua.

Según Hernández (2014), el nivel o alcance descriptivo se define como el estudio que busca especificar las propiedades y característica de cualquier fenómeno que se analice. Describiendo las tendencias del fenómeno a investigar, con la realización de mediciones o recogiendo información de las variables a las que se estudian. Entonces el alcance de la investigación es descriptivo porque busca a través de la recolección de datos, la descripción de la influencia de la aplicación del control PID no interactivo en la aplicación en los tanques de nivel de agua para mejorar la automatización industrial.

1.8.3 Diseño de Investigación

Un experimento mantiene un control donde se manipulan una variable independiente (causa) para analizar las consecuencias de la manipulación realizada sobre una o más variables dependientes (efectos). (Hernández , 2014).

El diseño de investigación es experimental pues a partir del diseño del control PID no interactivo aplicado a tanques de nivel de agua se realizarán ajustes en los parámetros del controlador PID, el diseño de un algoritmo de control con alta performance para la mejora en los niveles de automatización del proceso.

1.8.4 Fuente de Información

Las fuentes de información para el desarrollo de la investigación incluyen la recopilación de investigaciones científicas, referentes a las diferentes aplicaciones de los controles PID no interactivos y el proceso llevado a cabo en los tanques de nivel de agua, el diseño del controlador PID basado en el algoritmo en forma de velocidad que influye directamente sobre el error, la adquisición de datos de los diferentes equipos usados en la implementación del sistema de tanque de nivel de agua.

La aplicación de software de simulación como Matlab, LabVIEW y el EcoStruxure para la validación de la performance del controlador.

1.8.5 Población y Muestra

La población de la investigación se centrará en los diferentes algoritmos basados en los métodos de sintonización para la aproximación de la planta $P(s)$ y los parámetros de utilizados con los diferentes Algoritmos PID y la aplicación de perturbaciones.

Como parte de la muestra se implementará un sistema de tanque de nivel de agua, en donde la sintonización se llevará a cabo mediante Ziegler Nichols y el Control PID no interactivo en base a los detalles indicados en el desarrollo de la tesis como el algoritmo en forma de Velocidad basados en el Error y desglosados por la simulación del control.

1.8.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Para la técnica de recolección de datos se realizará mediante el Software LabVIEW, que es interactivo y de fácil uso para la implementación del sistema mediante el NI DAQ

USB 6211, se obtendrán los parámetros de medición de los sensores, actuador y poder captar las señales en forma digital considerando el tiempo de muestreo (T), el tiempo de la simulación necesarios para la aproximación eficiente de la Planta.

Los instrumentos para la recolección de datos serán un sensor de nivel de agua industrial, un sensor de flujo tipo turbina, un Arduino Due, que funcionará como un Indicador de señal del sensor tipo turbina, y la señal del actuador que devuelve los cambios en la posición angular la válvula en forma de voltaje (0-10V), estas señales serán procesadas y monitoreadas en el Software LabVIEW para luego ser utilizadas para la aproximación de la Planta en el Software de Matlab y Simulink.

1.8.7 *Análisis y Procesamiento de Datos*

El análisis de los datos se observará en el cambio del Error a partir de la aplicación del algoritmo de control PID no interactivo, el cómo influye la aplicación directa de los parámetros del Controlador sobre la variable controlada y la validación de un correcto diseño del algoritmo en forma de velocidad.

El procesamiento de los datos se basará en la captación de las señales analógicas y digitales brindadas por el sensor industrial y sensor de flujo respectivamente, realizando el condicionamiento de señal tanto para el NI DAQ USB 6211, el PLC y el Arduino Due.

El procesamiento de los datos se obtendrá mediante el muestreo del NI DAQ USB 6211, las señales que reciba el PLC serán tanto la señal analógica y mediante comunicación Industrial Modbus RTU, las señales digitales que emite el sensor de flujo, procesadas por el Arduino Due y llevadas al PLC por la comunicación industrial.

Capítulo II.

2.1 Bases Teóricas

Las bases teóricas sobre los sistemas de tanques de nivel de agua y automatización se fundamentan en el entendimiento profundo de dos áreas complementarias: el proceso en el tratamiento de agua y la aplicación de sistemas automáticos. Este enfoque permite explorar cómo la automatización mejora la eficiencia operativa, la calidad del agua tratada y la sostenibilidad ambiental en los sistemas de tanques de nivel de agua.

Al integrar estos dos campos, esta tesis busca ofrecer nuevas perspectivas y soluciones innovadoras para optimizar la gestión de los recursos hídricos.

2.1.1 Procesos Industriales

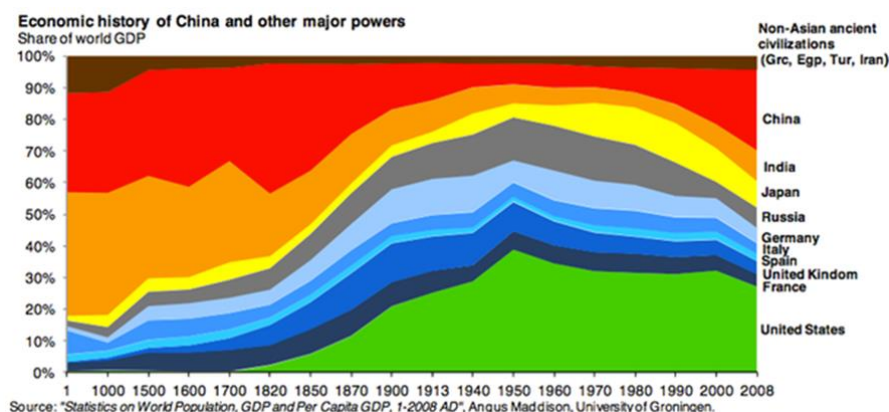
Durante la Segunda Revolución industrial, que tuvo como lugar a entre los siglos XVIII y XIX, se introdujeron las industrias y el uso de máquinas eléctricas. Esta era también marcó la implementación de diversos procesos que permitirían transformar los recursos para la fabricación de máquinas, insumos necesarios para el desarrollo poblacional. Estas industrias se clasificaron de acuerdo con su posición dentro de la cadena de producción como primaria, donde transforman los recursos naturales ya sea animal, vegetal o mineral para uso o consumo del hombre, el secundario como las de transformación de productos provenientes de la industria primaria y transformarlos en otros productos y la terciaria como las que utilizan los insumos y a través de procesos las convierten en productos a utilizar o consumir de manera específica. (O. Leidinger, 1997)

En la actualidad, con el notable progreso tecnológico que ha impulsado el crecimiento en las industrias a nivel internacional, según Derek Thompson en el 2012 muestra la evolución del desarrollo económico y poblacional entre el primer milenio observándose en la Figura 4, resulta fundamental tener una comprensión clara del concepto de proceso industrial. La Real Academia de la Lengua Española define los procesos como una serie de etapas sucesivas de un fenómeno natural o de una actividad artificial, mientras que la industria se refiere a un conjunto de actividades materiales

llevadas a cabo para obtener, transformar o transportar uno o varios productos naturales.
(RAE, 2024)

Figura 4

Evolución del Poder Económico y el cambio en la Era Industrial



Nota:.. Adaptado de The Economic History of the Last 2,000 Years in 1 Little Graph.

Entonces podemos referirnos a procesos industriales como un conjunto de etapas para transformar por medios mecánicos, eléctricos, físicos o químicos para transformar los recursos naturales en un producto final, clasificando a la industria de acuerdo con su régimen de operación donde se separan en dos grupos, ya sea por los procesos industriales desarrollados de manera continua o discontinuas también llamadas, la primera como un proceso continuo para la elaboración de un bien final, mientras que el discontinuo o cargas, por sus siglas en ingles "Batch", son procesos secuenciales por etapas que finalizan con un bien final. (O. Leidinger, 1997)

2.1.2 Plantas de Tratamiento de Agua: Una visión General

El desarrollo industrial tiene consecuencias como las ambientales, sociales y económicas, con impactos positivos y negativos en la población donde se desarrollan estas industrias. Esto se refleja en la migración poblacional hacia las ciudades donde se desarrollan estas industrias.

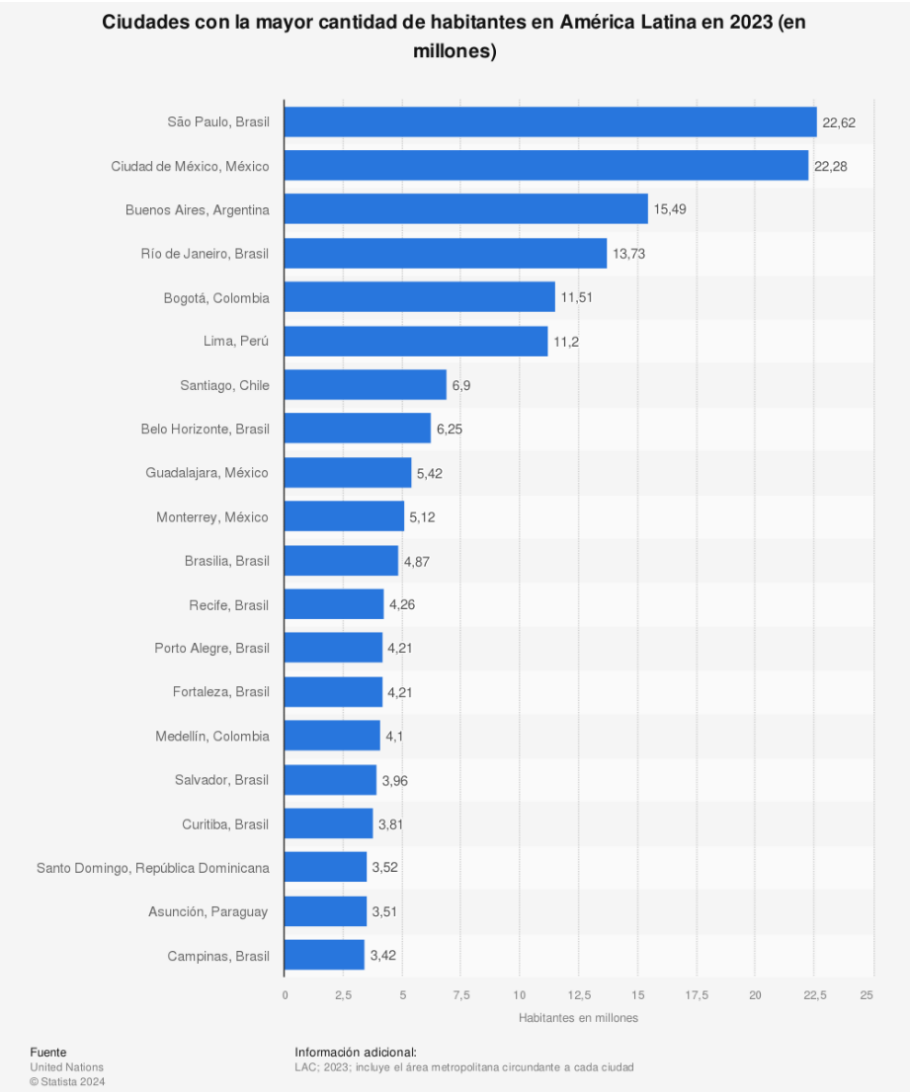
Según las estadísticas de la plataforma global Statista de 2023 (Figura 5), la ciudad de Lima es el sexto país más poblado de Latinoamérica, generando una gran cantidad de aguas residuales, que son aguas modificadas por la acción de las actividades humanas y

con una baja calidad que requieren un tratamiento previo para ser reusados ya sea por sistemas alcantarillados al mar o sean tratadas para consumo humano.

Estas aguas están clasificadas como aguas residuales industriales, domésticas y municipales que son enviadas a distintas PTAR que a través de las Empresas Prestadoras de Servicio de Saneamiento (EPS Saneamiento), son infraestructuras equipadas para realizar un conjunto de procesos destinadas a captar el agua residual de los ríos, lagos, alcantarillado para darle tratamiento y poder reducir los niveles máximos permisibles (LMP) de los residuos, así como la grasa, el lodo y el Ph. (Oefa, 2014)

Figura 5

Lima la Sexta Ciudad con Mayor Cantidad de Habitantes



Nota: De Ciudades con la mayor cantidad de habitantes en América Latina en 2023. Statista.

El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), en el año 2014 realiza un análisis a la generación y tratamiento de aguas residuales de las EPS Saneamiento a nivel Nacional con estadísticas tomadas de la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS) entre los años 2012 y 2013, encontrando que el país genera alrededor de 2 217 946 m³ de aguas residuales por día en los cuales solo el 32% es tratada en las PTAR, en tanto cada habitante del Perú genera alrededor de 142L/ *día*, sin embargo, el departamento de Lima generaba 1 202 286 m³ por día, siendo solo un aproximado del 20% estaban tratando las EPS Saneamiento, generando cada habitante alrededor de 145L/*día*. Estimando una generación de aguas residuales para el año 2024 de alrededor de 5 millones de m³ por día.

Según los datos estadísticos de la Figura 6 del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) publicados en el 2023, la generación de aguas residuales para el año 2022 es de una cifra aproximada de 587 065 m³ diarios, llegando a confirmar la predicción por parte de la OEFA en cuanto a la generación de las aguas residuales, también en cuanto a las regiones de análisis Lima ahora representa solo el 20% del total de aguas residuales del Perú. (INEI,2023)

Figura 6

Descargas de aguas residuales domésticas sin tratamiento, según departamento

Departamento	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Total	346 029 577	234 418 233	243 087 012	267 519 412	270 049 280	248 095 619	211 343 633
Amazonas	3 695 193	4 153 054	4 332 274	4 650 460	4 768 068	4 978 987	5 494 197
Áncash	16 264 590	15 173 521	16 390 841	16 654 123	16 176 868	15 934 662	15 695 887
Apurímac	3 831 353	4 235 956	4 449 259	4 625 252	4 583 912	4 639 037	4 748 203
Arequipa	36 766 861	3 126 464	3 335 065	3 272 505	3 492 426	3 731 604	3 979 294
Ayacucho	110 993	202 053	-	10 606	43 415	136 116	302 521
Cajamarca	7 621 997	7 504 667	7 714 778	8 261 136	8 103 861	7 775 138	8 678 563
Cusco	7 640 346	9 767 191	7 342 430	9 005 343	8 959 149	5 705 048	5 566 959
Huancavelica	2 195 772	2 267 556	2 252 490	2 341 298	2 306 545	2 332 435	2 331 115
Huánuco	10 181 638	10 293 541	10 724 665	11 859 623	11 280 068	11 683 331	12 078 987
Ica	6 343 158	5 694 794	6 238 131	8 430 922	8 268 130	4 559 387	4 311 481
Junín	28 407 427	29 533 345	29 428 215	29 416 952	29 411 490	30 914 574	30 232 943
La Libertad	...	12 323 885	11 836 937	12 258 801	13 130 816	13 266 108	14 272 964
Lambayeque	13 825 332	263 962	461 193	372 204	333 571	1 450 678	1 450 882
Lima	146 851 652	69 834 095	75 927 981	88 484 252	90 207 673	77 152 680	43 027 068
Loreto	10 926 389	10 562 500	10 390 062	12 687 928	13 113 606	13 157 585	14 027 622
Madre de Dios	1 617 093	1 757 965	1 974 087	2 099 715	2 052 867	1 955 281	2 234 850
Moquegua	419 623	150 128	396 082	288 799	630 414	944 411	377 931
Pasco	1 215 262	1 263 531	1 219 562	1 392 663	1 215 919	1 231 858	1 505 186
Piura	13 053 220	10 561 269	12 261 887	15 016 165	15 376 651	13 987 281	10 778 068
Puno	7 179 415	6 297 863	6 540 805	6 971 550	6 787 373	3 884 237	1 260 035
San Martín	9 810 508	10 252 174	10 532 988	10 669 562	11 112 267	11 256 154	11 474 795
Tacna	4 093 734	4 878 084	5 482 920	5 091 173	5 059 181	3 109 965	3 361 273
Tumbes	4 241 358	3 923 571	3 686 002	3 646 967	4 563 313	4 858 718	4 622 789
Ucayali	9 736 663	10 397 064	10 168 358	10 011 411	9 071 698	9 450 343	9 530 021

Nota: De Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), datos tomados de la SUNASS

2.1.3 Importancia del Tratamiento de Agua

Las plantas de tratamiento de agua residual tienen un impacto ambiental en los lugares donde encuentran operando, por lo qué, estas PTAR, son importantes para recuperar ecosistemas naturales que fueron afectadas por la contaminación de las aguas, la reducción de enfermedades producidas como la cólera mencionada en páginas anteriores.

Una comparación importante en mención es la recuperación de 1.7km de Litoral costero entre las playas Las Casca das de Barranco y la playa Conchan (Lurín). (Proinversion,2023)

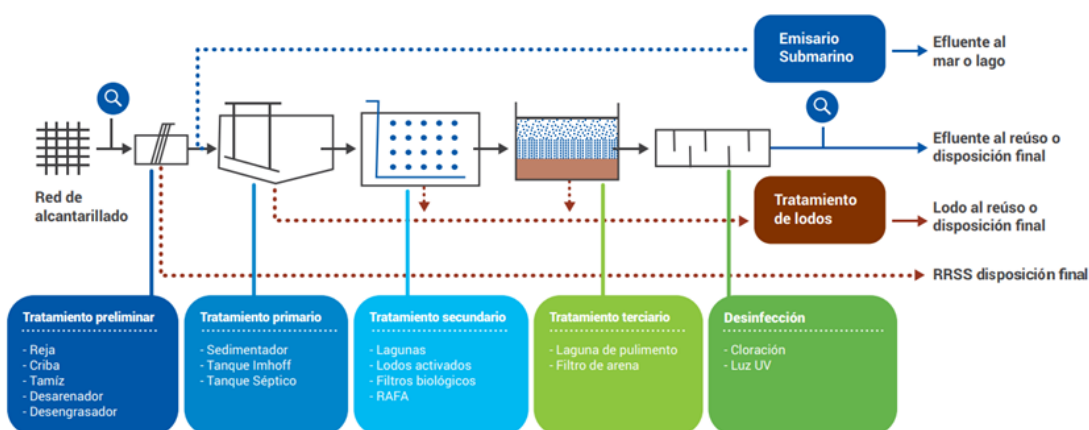
2.1.4 Procesos en las Plantas de Tratamiento de Agua

Las PTAR son instalaciones diseñadas para el tratamiento y limpieza del agua que ha sido utilizada en las diferentes actividades del ser humano y que contiene contaminantes después de los procesos llevados a cabo en el desarrollo de la ciudadanía.

Cabe resaltar que los procesos se desarrollan en la Línea de Agua de una PTAR, que es la composición de todas las unidades o etapas por donde es tratada desde la llegada a la instalación, pasando por los distintos procesos hasta su vertido final al cuerpo receptor. (sunass,2023).

Figura 7

Procesos en una Planta de Tratamiento de Agua



Nota: Diagnóstico de las PTAR en el ámbito de las empresas prestadoras. Sunass 2022.

Basados en la Figura 7, todo el proceso llevado a cabo en las PTAR, se ubican tanques de almacenamiento de Agua, en donde se verifican los niveles de agua depositados en cada una de las etapas, este sistema será replicado en un sistema de tanques de nivel de agua.

2.1.5 Sistema de Tanque de Nivel de Agua

Basado en un sistema de tanque de nivel de agua como lo mostrado en la Figura 8, se desarrollará la implementación de un sistema de tanques en cascada, abordado analíticamente para el control de procesos, en donde se regulan los niveles de manera automática, mediante sensores y un sistema de control automático. Este enfoque permite

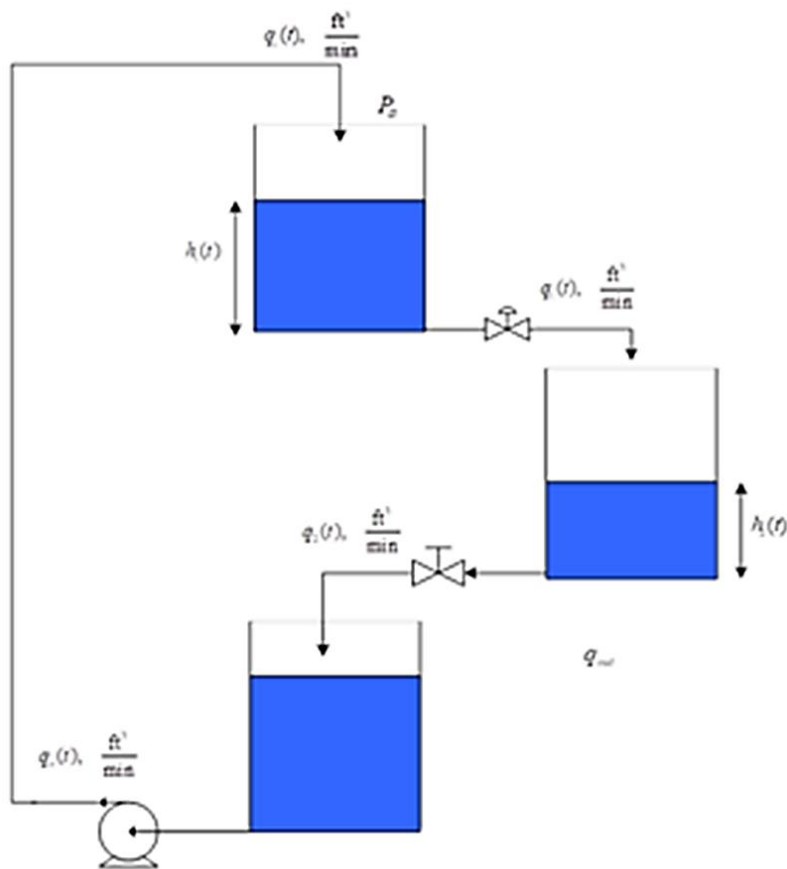
analizar la interacción entre los tanques y la respuesta del sistema ante variaciones de caudal a la entrada y salida, garantizando la estabilidad y eficiencia de la operación.

La investigación propone el control, supervisión y monitoreo del sistema de tanques de agua como el mostrado en la Figura 8, a partir de la implementación de un autómata programable, específicamente el PLC Schneider Electric TM221CE16R, el cual actúa como el dispositivo maestro en la comunicación mediante el protocolo de comunicación Modbus RTU y procesamiento de datos de los sensores de flujo YF 201 y nivel ultrasónicos HC-SR04 que emiten señales en forma de pulsos por medio del Efecto Hall o la Emisión y Recepción de pulsos ultrasónicos que permiten la medición del nivel y flujo por medio del Arduino Due el esclavo que realiza las solicitudes comandadas por el maestro.

Para la medición de las variables de nivel y flujo del sistema, que, el Arduino Due se presenta como una alternativa ingenieril de propuesta innovadora como complemento en el control de procesos llevada a cabo por el PLC M221 de Schneider, como transductor de la señal de las lecturas emitidas por los sensores los transmite al PLC bajo el protocolo RS-485.

Figura 8

Modelo del Sistema de Tanques de Nivel



El sistema mostrado en la Figura 8 representa un sistema de tanques en cascada, donde el flujo del líquido se regula entre los 3 niveles de almacenamiento. Se aplican diferentes estrategias de control en cada tanque para garantizar el funcionamiento automático y estable del sistema.

- **Control ON-OFF en el Tanque Superior (TK-002)**

El Tanque 002, recibe el caudal de entrada $q_i(t)$ y mantiene su nivel mediante un control ON-OFF. Este tipo de control es adecuado cuando se requiere mantener un nivel dentro de un rango en específico sin una regulación continua. Su funcionamiento es el siguiente:

1. Cuando el nivel $h_1(t)$ desciende por debajo de un umbral mínimo, la bomba se enciende para permitir el flujo del líquido del Tanque 001 hacia el tanque superior.
2. Cuando el nivel alcanza un umbral máximo, la bomba a la entrada se cierra.

Este esquema de control es simple y permite una interacción entre los sensores, el actuador o bomba y el PLC que regula el sistema mediante un control de Encendido y Apagado de las salidas digitales tipo Reley, este control se fundamenta en un tipo de control a lazo abierto en donde el sistema solo permite accionar la bomba dependiendo de las características del Sistema de control ON-OFF.

- **Control Aplicado al Tanque de Nivel Tk-003.**

El tanque de nivel 003, regulará el sistema mediante el control PID no interactivo a desarrollar en la investigación, de modo que la apertura de la válvula influye en la variación del nivel $h_2(t)$.

- **Sistema de alimentación en el Tanque Inferior.**

El tanque 001, está implementado de modo que el fluido almacenado sea impulsado por la bomba y es el responsable de alimentar el sistema mediante la bomba que regula el caudal $q_a(t)$.

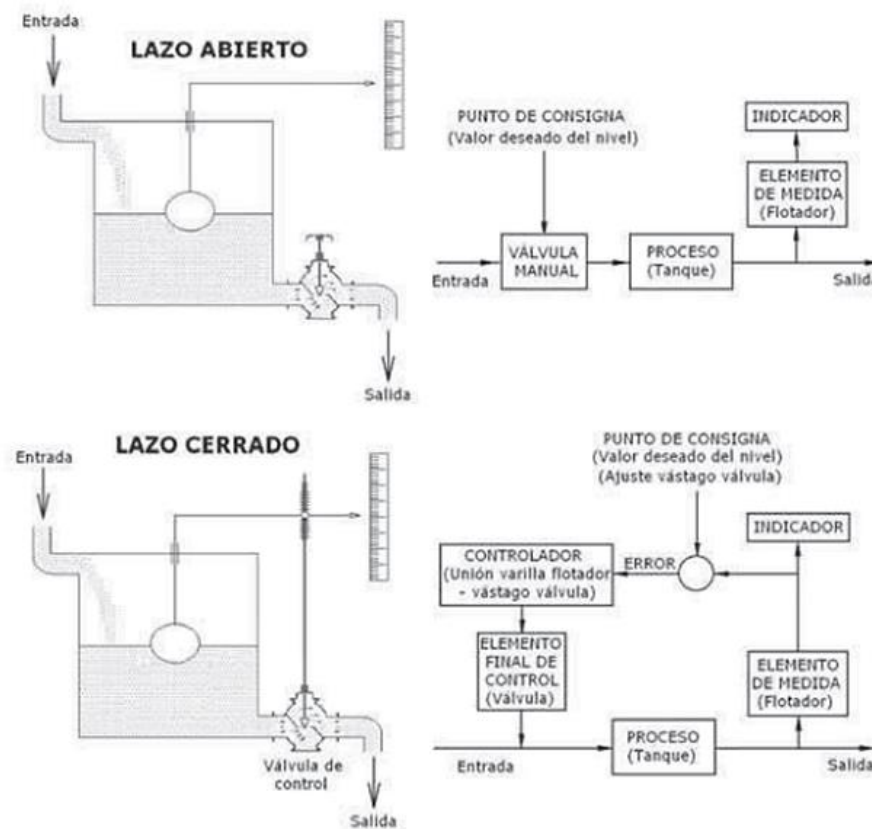
La bomba dependiendo del nivel del tanque de almacenamiento impulsa el fluido hacia el tanque superior, el cual está aplicado el sistema de control ON-OFF.

2.1.6 Sistemas de Control

El desarrollo en la industria 4.0, en el cual la implementación de procesos automáticos, el uso de sistemas de control en el que interactúan elementos interrelacionados entre sí para el control del sistema autónomo como los equipos mecánicos, eléctricos, electrónicos, etc. Un sistema es controlado cuando a partir de señales de entrada se obtiene una respuesta o salida en el cual se tengan señales controladas sean de manera analógica o digital como se muestra en la Figura 9. (R. Hernandez, 2010)

Figura 9

Características de los Sistema de Control



Nota: Instrumentación Industrial. Antonio Creus Solé. 2011

En los sistemas de control se tienen elementos básicos para una implementación optima el cual son:

- El sensor o elemento primario.
- El transmisor, conocido también como elemento secundario.
- El controlador, que es el encargado de realizar el análisis y acción de los sistemas de control.
- El elemento final de control, el cual realizan la acción para el control de la variable del proceso.

La relación de estos elementos permite mediante las operaciones de Medición (M), la decisión (D) y la acción (A) controlar todos los sistemas de control, desde procesos sencillos o control ON/OFF a sistemas dinámicos complejos en el que interactúan estos

elementos para lograr el control óptimo de la variable de control. (C. Smith, A. Corripio,1991)

Tabla 2

Comparación en la Aplicación de Control en los Procesos Industriales

Descrrioción	Control	Sin Control
Sistema Monitoreado	X	-
Sistema Seguro	X	-
Calidad de Producción	X	-
Peligros o Accidentes	-	X
Costos mínimos de producción	X	-
Eficiencia	X	-

Nota: adaptado de Control Automático de Procesos Teoria y Practica. C. Smith, A. Corripio,1991

Algunos de los motivos de implementar el control de procesos a nivel industrial, se debe a que la automatización permite proporcionar un sistema seguro, de calidad y eficiente en tanto se evitan costos de mano de obra y también la seguridad del personal quienes participan en la producción de estos procesos industriales.

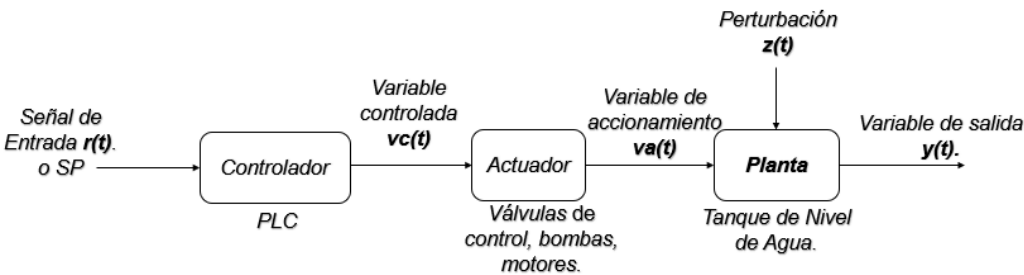
- Lazos de Control**

En los diferentes procesos industriales se identifican los sistemas de control a lazo abierto o cerrado en los cuales tienen un grado de automatización donde se controla la variable del proceso.

Por ejemplo, un sistema de nivel a lazo abierto o lazo cerrado tienen diferencias notorias en cuanto al grado de ajuste y control de la variable del proceso (PV).

Figura 10

Sistema de Control a Lazo Abierto



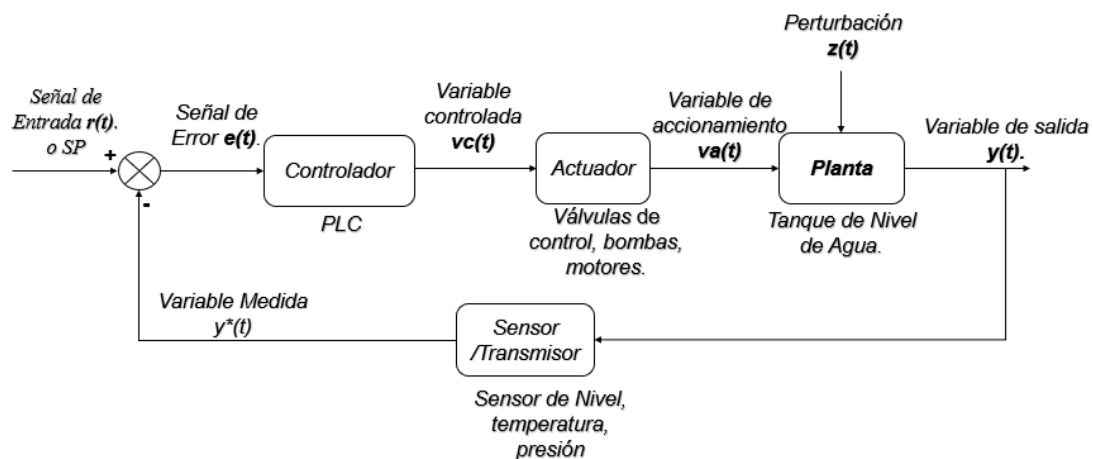
Nota: adaptado de Control Automático de Procesos Teoria y Practica. C. Smith, A. Corripio,1991.

En la Figura 10, se muestra un sistema de control a lazo abierto caracterizado por la ausencia de retroalimentación o “feedback” de la señal de salida, en donde cualquier perturbación que afecten al sistema impactaran directamente en la salida, lo que lo hace altamente sensible.

Sin embargo, en el lazo cerrado de la Figura 11 incluye la medición de la salida por medio de un sensor o transmisor, que capta la señal de la variable de salida y las compara con el valor que se desea obtener o el Set Point, haciendo así un sistema referenciado en donde se controla a través de las variaciones del Error, estas desviaciones son procesadas por el controlador del sistema, que ejecuta algoritmos de control para poder accionar el actuador y estabilizar los procesos en los procesos o Planta de control.

Figura 11

Sistema de Control a Lazo Cerrado



Nota: adaptado de Control Automático de Procesos Teoría y Práctica. C. Smith, A. Corripio, 1991.

- **Sistema de Eventos Discretos**

Según algunos investigadores, se considera el año 1804, cuando Jacquard inventó la máquina de telar. con tarjetas perforadas, fue el "comienzo" del control de sistemas secuenciales que son una clase de Sistemas de Eventos Discreto (DES, Discrete-Event System). El álgebra booleana, que es una de las bases matemáticas del control DES, fue propuesta por Boole en 1854. Si la planta y la interfaz de un sistema de control híbrido se ven como un solo componente, este componente se comporta como un sistema de eventos discretos. Es interesante analizar un sistema de control híbrido de esta manera porque

permite modelarlo como dos sistemas interactivos de eventos discretos que se analizan más fácilmente que el sistema en su forma original, el cual se describe en la Figura 12.

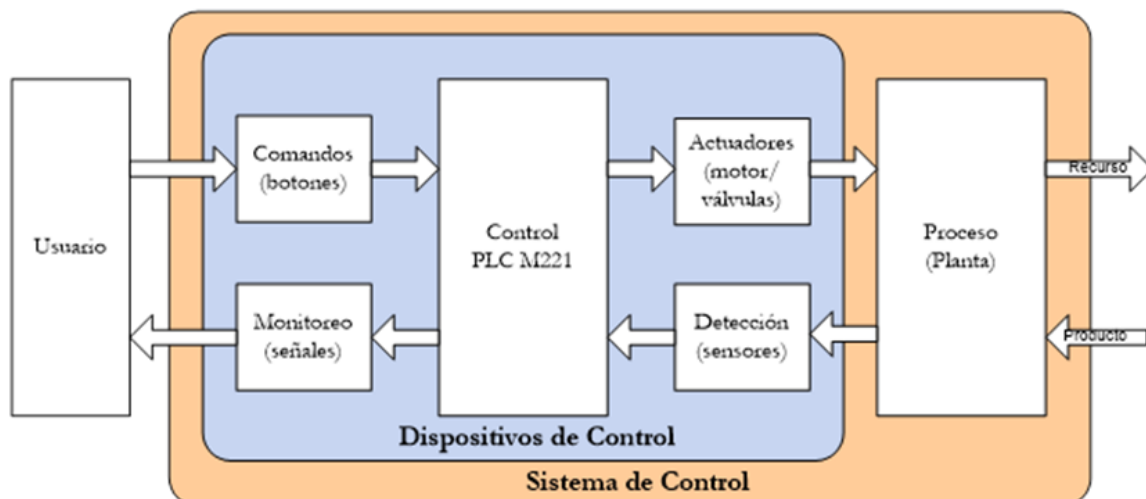
El objeto de control DES, en el caso de los sistemas productivos, es generalmente un sistema compuesto por varios elementos que se relacionan de manera compleja entre sí. Para modelarlo, se considera que cada uno de los elementos que componen el objeto de control son independientes entre sí y que cada uno tiene sus propios estados, que evolucionan en dos formas:

- Dependiendo solo de la entrada presente.
- Dependiendo de las entradas y los estados pasados.

Ambos una forma y los otros tienen evoluciones (transiciones) de estados que dependen de un evento, la señal de entrada. Además, considerando que cada elemento del sistema es independiente, la evolución de los estados de cada componente se da asincrónicamente y en paralelo.

Figura 12

Concepción del Sistema de Control Industrial



Nota: Adaptado de PID Controller Embedded in Industrial PLC Applied to Level Control in Tanks 2016

La Tabla 3 muestra todos los eventos que ocurren en el proceso de operación del tanque. La primera columna muestra todas las etapas del proceso, la segunda columna muestra los eventos discretos de la planta, y finalmente en la tercera columna hay las acciones tomadas durante la operación del proceso.

Tabla 3*Sistema de Eventos Discretos y Acciones*

Etapas	Eventos	Acciones
1	Tanque 1	Abre válvula 1
2	Llene el tanque 1	Enciende motor
3	Deposito lleno	Activar dispositivo
4	Llene tanque 2	Abra válvula 2
5	Deposito lleno	Abre válvula 3
6	Depósito lleno con válvula 1 y 2 cerrada	Apague motor

Nota: Elaboración Propia.

- **Concepción del Sistema de Control**

La teoría de control se ocupa del comportamiento de los sistemas dinámicos, donde la salida deseada de un sistema es llamada señal de referencia. Cuando una o más variables de salida necesitan seguir una determinada referencia con el tiempo, el controlador maneja las entradas del sistema para obtener el efecto deseado en las salidas del sistema.

El PLC M221 de Schneider se utiliza para aplicaciones que involucran el control de existencias discretas en las industrias de procesos de fabricación. La disponibilidad del PLC M221 y sus características tales como dispositivos, máquinas y operaciones de proceso mediante la implementación funciones específicas como lógica de control, secuenciación, seguimiento de tiempo, control de malla, funciones avanzadas instrucciones e interfaces gráficas de usuario mejoradas (GUI) en la programación de estos controladores, creó las premisas para la implementación de algoritmos de control complejos. Continuando con una metodología de los sistemas de control, en el presente trabajo de investigación emplearemos un diseño del controlador mediante el software MATLAB/SIMULINK.

- **Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)**

El controlador PID combina las ventajas del controlador Proporcional-Integral (PI) y del controlador Proporcional-Derivativo (PD). La acción integral es directamente ligada a la precisión del sistema, siendo responsable de asegurar el error de estado estacionario nulo.

Mientras que la acción derivativa hace posible que los efectos desestabilizadores sean contrarrestados por la acción derivativa que tiende a aumentar la estabilidad relativa del sistema.

La función de transferencia del PID controlador viene definido según:

$$G_{PID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{s p T_d}{s + p} \right) = K_c \frac{\left(s^2 + \frac{1 + T_d T_i}{T_i} s + \frac{p + T_i p}{T_i} \right)}{s(s + p)} \quad (1)$$

Las ganancias de los controladores PID se ajustan para obtener el mejor rendimiento operativo del proceso de las plantas que utilizan esta tecnología. Tales ganancias se ajustan de acuerdo con el proceso en consulta.

Ganancia proporcional Kc: proporciona una acción de control de amplitud proporcional a la amplitud de la señal de entrada, la señal de error en este caso.

Tiempo de integración Ti: es el tiempo requerido para que la acción integral duplique al error de estado estacionario con respecto a una señal de referencia de valor constante de modo que a través de una baja frecuencia tenga el efecto de reducir el error y mitigue la acción de control.

Tiempo derivativo Td: es equivalente a una anticipación de la acción de control, considerando la tendencia de variación del error. Mejora la respuesta transitoria a través de una alta frecuencia. compensador. El término derivado utiliza la tasa de cambio de la señal de error para introducir un elemento de predicción. en la acción de control.

El software EcoStruxure™ Controlador lógico - Modicon M221 se aplica en plantas reales mediante controladores PID embebidos en un PLC utilizando instrumentación industrial. En general, los PLC tienen aplicación en la automatización de procesos discretos (Control ON-OFF) y en la automatización de procesos continuos (control de lazo). La instrucción PID generalmente se coloca en una línea siempre verdadera. Cuando la línea es falsa, la salida permanece en su último valor. Durante la programación, se deben ingresar las direcciones del Bloque de Control y Proceso, las Variables después de colocar la instrucción PID en una línea:

Bloque de Control: Posee un archivo que almacena los datos necesarios para operar la instrucción. La longitud del bloque de control archivo se fija en 23 palabras. La dirección del bloque de control debe ingresarse como una dirección de archivo de tipo entero.

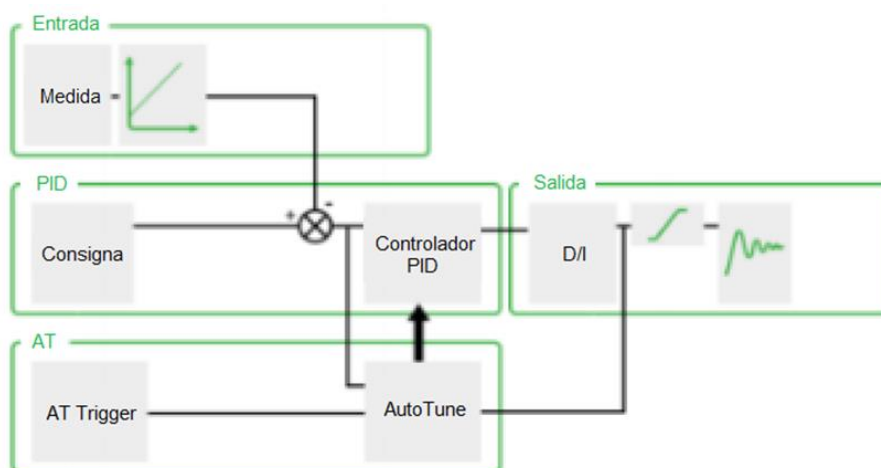
Variable de proceso (PV): Es la dirección del elemento que almacena el valor de la entrada del proceso. Esta dirección puede ser la dirección de palabra de la entrada analógica donde se almacena el valor de la entrada A/D. Este valor también puede ser un número valor entero cuando se quiere trabajar con el valor de entrada de escala en el rango de 0 a 16383.

Variable de Control (CV): Elemento que almacena la salida de la instrucción PID. Este es normalmente un valor entero, por lo que el PID en el rango de salida se puede escalar al rango analógico específico requerido en la aplicación.

La Figura 13 ilustra la instrucción PID con direcciones reales de la planta en estudio y sus parámetros integrados en el PLC.

Figura 13

Instrucción del Control PID del PLC TM221CE16R de Schneider



Nota: EcoStruxure™ Controlador lógico - Modicon M221

Normalmente los PLC industriales traen consigo la instrucción PID dentro del lenguaje de programación que ofrecen. Estas instrucciones utilizan un algoritmo de forma de velocidad de la ecuación PID. Esencialmente, esto significa que el loop funciona en el

cambio de error para cambiar la salida. Los algoritmos PID tradicionales utilizados en los PLC han utilizado algoritmos de forma posicional

- Un algoritmo de forma posicional trabaja directamente sobre el error. Aunque esto es aceptable para aplicaciones simples.
- El algoritmo de forma de velocidad es mucho más fácil de aplicar para aplicaciones más avanzadas tales como ganancias adaptativas.

Tanto la forma posicional o forma de velocidad en el algoritmo PID funcionan de manera idéntica en respuesta a un cambio en error. De hecho, una forma de la ecuación puede derivarse fácilmente de la otra.

El algoritmo PID posicional se representa matemáticamente según:

$$CV = K_p E + \sum K_i E \Delta t + K_d \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (2)$$

El algoritmo PID de forma de velocidad se representa matemáticamente según:

$$CV_k = CV_{k-1} + K_p \Delta E + K_i E_k \Delta t + K_d \frac{E_k - 2E_{k-1} + E_{k-2}}{\Delta t} \quad (3)$$

CV = variable de control

E = error

Δt = variación de tiempo

Kp = ganancia proporcional

Ki = ganancia integral

Kd = ganancia derivada.

Las dos diferencias principales entre las formas del algoritmo PID son que el término proporcional actúa sobre el cambio de error (ΔE) en forma de velocidad y el error (E) en forma posicional. Mientras que la acumulación del término integral está contenida en la salida anterior (CV_{k-1}) en forma de velocidad y en la suma del término integral en la forma posicional. La instrucción PID también admite dos algoritmos de forma de velocidad diferentes: independiente ganancias y ganancias dependientes. Se pueden convertir las

ganancias utilizadas entre los algoritmos independientes y dependientes de la instrucción PID usando las siguientes ecuaciones:

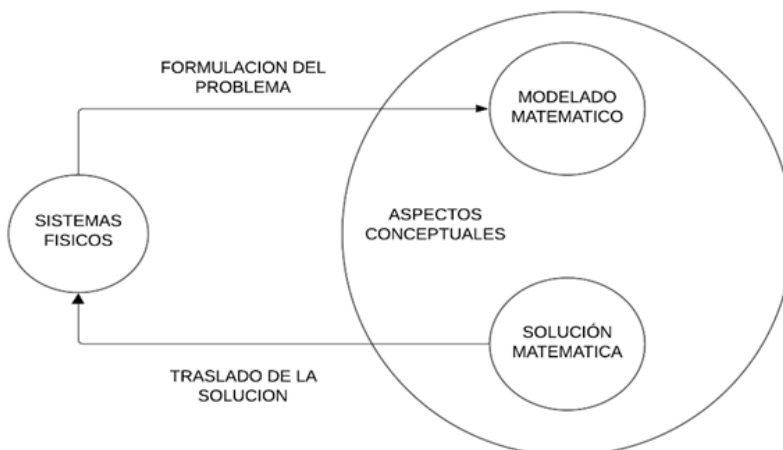
$$K_p = K_c \quad K_i = \frac{K_c}{T_i} \quad K_d = K_c T_d \quad (4)$$

2.1.7 Discretización de los sistemas de Control

Un gran desafío en los sistemas físicos o procesos es lograr un control de alta precisión o rendimiento mediante una operación de lazo cerrado o retroalimentación. Esto se complica debido a la aproximación por modelado matemático de los sistemas físicos, ya que los modelos son no lineales y no siempre reflejan con exactitud el comportamiento real del sistema, lo que puede afectar la performance del algoritmo de control. (C. Phillips, H. Nagle, A. Chakraborty, 2015)

Figura 14

Solución de Modelos Discretos de los Sistemas Físicos



Nota: Adaptado de Digital Control System Analysis and Design. C. Phillips, H. Nagle, A. Chakraborty, 2015.

En la Figura 14 se detalla el diagrama de solución del modelado discreto que permite referenciar los sistemas físicos y como plantear las propuestas de solución.

El análisis de un sistema de control digital implica un proceso en el que las señales de entrada y salida se relacionan a través de un lazo cerrado o retroalimentación, donde las señales son procesadas de manera discreta. Esto facilita la implementación de algoritmos de control utilizando un controlador o un microcontrolador digital. Estos sistemas permiten ajustar las entradas de manera precisa basándose en la respuesta del sistema, logrando una operación más eficiente y flexible.

Tabla 4*Características del Control Discreto*

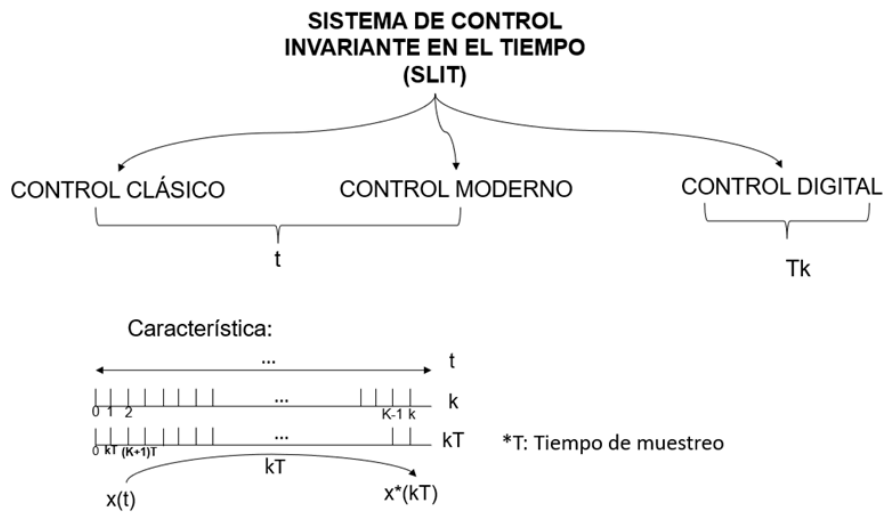
Características	Descripción
Precisión	Permite una gran precisión al procesar la entrada y salida de forma discreta, y realiza ajustes de alta performance mediante algoritmos de control, sea el más conocido el PID.
Flexibilidad	Son altamente flexibles, ya que pueden adaptarse a diferentes tipos de procesos y cambios de condiciones del sistema, esto se debe a que permite la reprogramación y la implementación de algoritmos complejos.
Velocidad	El procesamiento de las señales de los sistemas discretos se basa en las capacidades de los controladores y dependen de la frecuencia de muestreo y capacidad para la realización de cálculo del sistema.
Conocimiento del Proceso	Un control digital requiere de un profundo entendimiento del proceso o sistema a controlar, el modelado preciso del proceso o planta es esencial para aplicar los algoritmos de control adecuados.
Tecnología	EL control digital se basa en la implementación de los controladores, sensores y actuadores digitales, lo que permite soluciones de automatización y la integración con sistemas informáticos. Las mejoras tecnológicas continuas en procesamiento de señales, comunicación de los componentes electrónicos impulsan la automatización de los procesos industriales.

Nota: Adaptado de Digital Control System Analysis and Design. C. Phillips, H. Nagle, A. Chakraborty, 2015.

Cabe considerar que las técnicas de control en el análisis clásico y modernos se implementaron en modelos de sistemas lineales invariantes en el tiempo (SLIT), las cuales serán discretizadas, el cual se detalla en la Figura 15.

Figura 15

Control en los Sistemas Invariantes en el Tiempo



Se realizará el análisis y diseño del sistema físico del tanque de nivel de agua, cuyos componentes principales para el sistema serán:

La Planta: Sistema Físico o proceso a ser controlado. (Nivel de agua en el TK-003)

Sensor: Es aquel componente que se encarga de medir la respuesta de la planta ante los cambios de la planta y esta se compara con la respuesta deseada generando el error. (Sensor Industrial)

Actuador: Componente que se encarga de regular o ajustar los cambios en la planta. (Valvula)

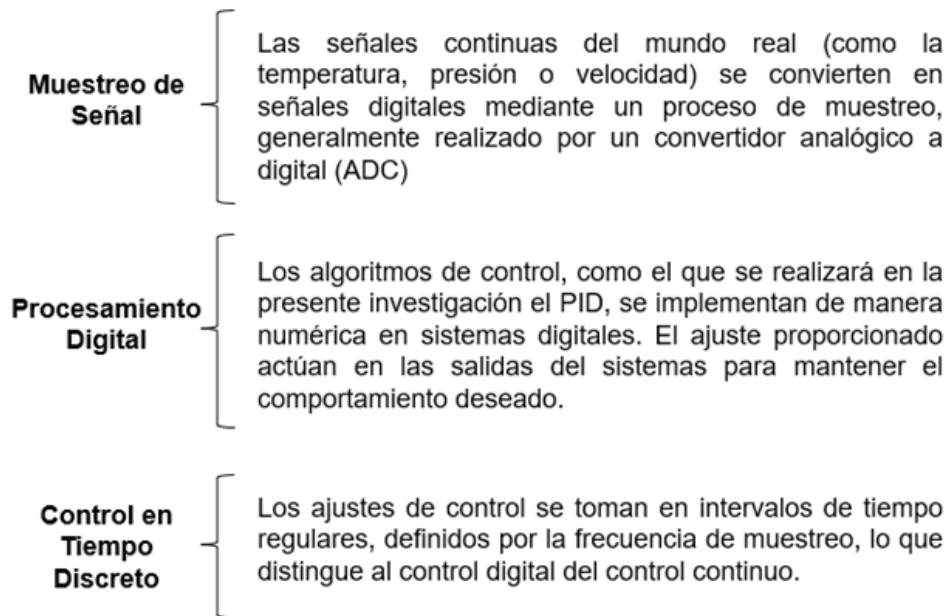
Controlador: Es aquel que procesará la señal del error para ajustar la entrada de la planta y minimizar la señal llevándola a la estabilidad del sistema. (PLC Schneider M221)

La correcta selección de los sensores para la medición de la señal de retroalimentación, el actuador adecuado para operar la planta ante los cambios y las perturbaciones, por ende, desarrollar los modelos matemáticos que representen el sistema. Con base a los datos recolectados y modelos, se diseña un controlador que en base a análisis y simulaciones la performance correcta.

La clave para el control digital de alta performance es el muestreo de señales, el procesamiento digital, el control en tiempo discreto, referida en la Figura 16. (Charles L. Phillips, H. Troy Nagle, Aranya Chakraborty, 2015)

Figura 16

Claves para la implementación del Control Digital

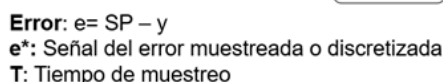


Nota: Adaptado de Digital Control System Analysis and Design. C. Phillips, H. Nagle, A. Chakraborty, 2015.

Para la alta performance del sistema de control digital, se requerirán un sistema de adquisición de datos que relacione tanto las señales de entrada $r(t)$ y la salida $y(t)$, realizando la implementación y simulación en el Labview, utilizando del NI DAQ USB 6211.

En la Figura 17 se realiza la idea del Muestreo para la adquisición de datos del Sistema de Tanque de Nivel de Agua.

Sistema de Adquisición de Datos y Control Discreto



Los conocimientos necesarios entre los sistemas entre tiempo continuo y discreto se describen en la Figura 18 para la correcta implementación de la Planta y la elección de la mejor muestra de la señal, para ello, es necesario recurrir a las herramientas del sistema en el Tiempo Discreto para un correcto modelamiento matemático del sistema.

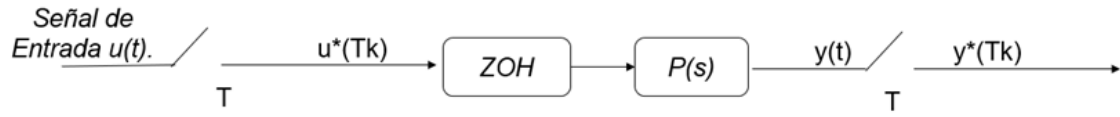
Comparación del Tiempo Continuo y Discreto



Para el sistema de Muestreo se desarrollará mediante la Implementación del sistema a Lazo Abierto de la Planta para lo cual se detallará en la Figura 19.

Figura 19

Sistema de Adquisición de Datos para la Planta



Nota: Adaptado de Digital Control System Analysis and Design. C. Phillips, H. Nagle, A. Chakraborty, 2015.

$$Y(z) = Z \left[\frac{1 - e^{-Ts}}{s} P(s) \right] U(z) \quad (5)$$

$$Y(z) = Z \left[\frac{P(s)}{s} \right] U(z) - Z \left[\frac{-e^{-Ts}}{s} P(s) \right] U(z) \quad (6)$$

$$Y(z) = Z \left[\frac{P(s)}{s} \right] U(z) - z^{-1} Z \left[\frac{P(s)}{s} \right] U(z) \quad (7)$$

$$Y(z) = (1 - z^{-1}) Z \left[\frac{P(s)}{s} \right] U(z) \quad (8)$$

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = (1 - z^{-1}) Z \left[\frac{P(s)}{s} \right] U(z) \quad (9)$$

$$H(z) = (1 - z^{-1}) Z \left[\frac{P(s)}{s} \right] U(z) \quad (10)$$

Según la ecuación característica $H(z)$, referida en la Figura 20, depende de la correcta estimación de la planta $P(s)$, y se aproximará mediante el algoritmo de modelamiento de un sistema de Primer Orden detallada en la Figura 20 aproximando a $\frac{dy(t)}{dt} \approx \frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta t}$, el cual se denomina aproximación de diferencia Backward (hacia atrás), en donde la derivada en el tiempo $t = n\Delta t$ es:

$$\frac{dy(t)}{dt} \approx \frac{y(n) - y(n-1)}{\Delta t} \quad (11)$$

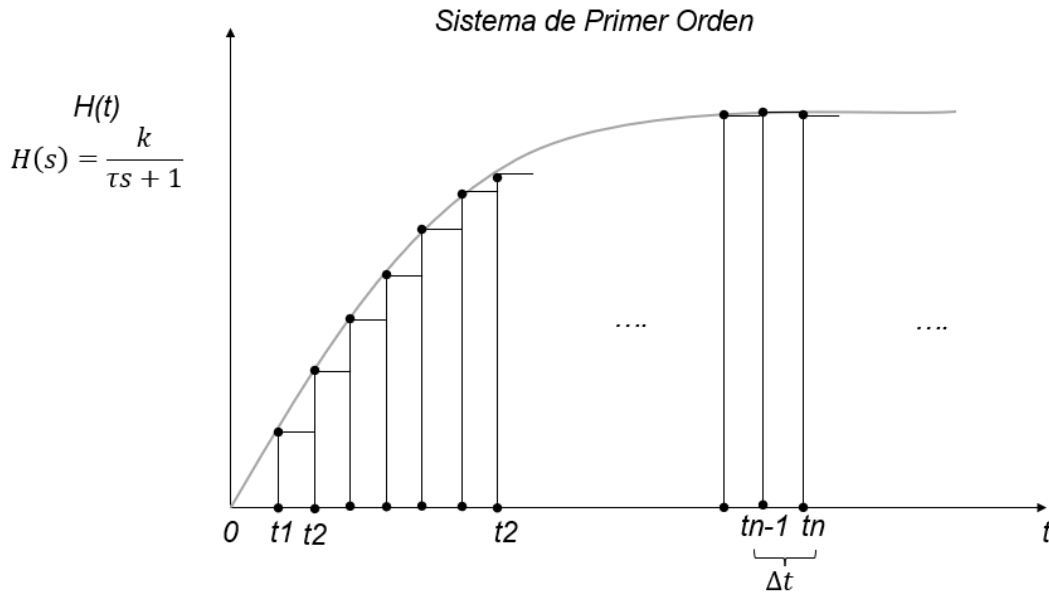
Donde Δt es el intervalo de muestreo establecido para la correcta adquisición de datos del sistema, y es el valor de $y(t)$ en $t = n\Delta t$ e $y(n-1)$ denota el valor previo en el instante muestreo anterior $t = (n-1)\Delta t$. Sustituyendo (2) en (1) y evaluando la función $f(x, y)$ y el valor anterior de y e x (es decir, y_{n-1} y x_{n-1}) resulta:

$$y(n) = y(n-1) + \Delta t \cdot f(x(n-1), y(n-1)) \quad (12)$$

$$f(x(n-1), y(n-1)) = \frac{y(n) - y(n-1)}{\Delta t} \quad (13)$$

Figura 20

Aproximación Backward de una Planta de 1er Orden



2.1.8 Control PID no interactivo

En referencia a la Figura 17, en donde se muestra el Algoritmo de Control D(z), que es la Función que el PLC realizará para mantener el Proceso de acuerdo con las condiciones de exactitud, disminución del error y la performance del sistema correctos.

Por lo que, se detalla el sistema D(z) como una aproximación en diferencias del modelo del sistema continuo a un sistema discreto.

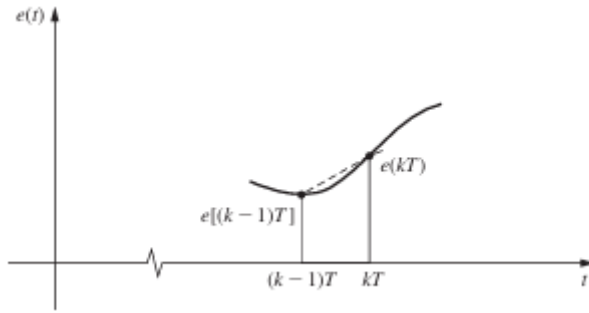
$$G_{PID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + sT_d + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (14)$$

Se tiene del controlador, mostrado en la ecuación 14 y se realizará la aproximación Backward para la estimación referida al algoritmo PID en forma de velocidad en donde el error E(s) dependerá de los errores anteriores, para la actualización de los errores presentes:

Se utilizará el método trapezoidal en el cual realiza la aproximación de los términos derivativos e integradores en función del error y el tiempo.

Figura 21

Aproximación Trapezoidal del Error en el Sistema Discreto



Nota: Adaptado de Digital Control System Analysis and Design. C. Phillips, H. Nagle, A. Chakraborty, 2015.

Como se muestran en las Figura 21, el error se aproxima según el método trapezoidal basado en el BackWard, en el que muestra el T como el tiempo de muestreo, para diferenciar ese valor de las demás en la F.T del controlador se etiqueta como Ts.

$$e_d(t) = \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (15)$$

$$e_i(t) = \frac{T_s(e_{(k-1)} + e_{(k)})}{2} \quad (16)$$

Entonces de la ecuación 14 de Laplace se tiene:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + sT_d + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (17)$$

De la ecuación en continua en t:

$$u(t) = K_c \cdot e(t) + \frac{K_c}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) dt + K_c \cdot T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (18)$$

En forma discreta de acuerdo con la aproximación trapezoidal:

Para un instante k:

$$u(k) = K_c \left[e(k) + \frac{T_s}{T_i} \left(\frac{e(k) + e(k-1)}{2} \right) + \frac{T_d}{T_s} (e(k) - e(k-1)) \right] \quad (19)$$

Para un instante k - 1:

$$u(k-1) = K_c \left[e(k-1) + \frac{T_s}{T_i} \left(\frac{e(k-1) + e(k-2)}{2} \right) + \frac{T_d}{T_s} (e(k-1) - e(k-2)) \right] \quad (20)$$

Se realiza la diferencia entre $u(k) - u(k-1)$:

$$u(k) - u(k - 1) = K_c \left[\left(1 + \frac{T_s}{2T_i} + \frac{T_d}{T_s} \right) e(k) - \left(1 - \frac{T_s}{2T_i} + \frac{2T_d}{T_s} \right) e(k - 1) + \frac{T_d}{T_s} e(k - 2) \right] \quad (21)$$

$$u(k) = u(k - 1) + q_0 \cdot e(k) + q_1 \cdot e(k - 1) + q_2 \cdot e(k - 2) \quad (22)$$

La ecuación en diferencias en Z:

$$C(Z) = \frac{U(Z)}{E(Z)} = \frac{q_0 + q_1 \cdot z^{-1} + q_2 \cdot z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (23)$$

Resultando así el control PID en forma de velocidades en donde se actúa directamente sobre el Error en forma paralela, siendo así la facilidad de implementación en los diferentes Procesos industriales y PLC.

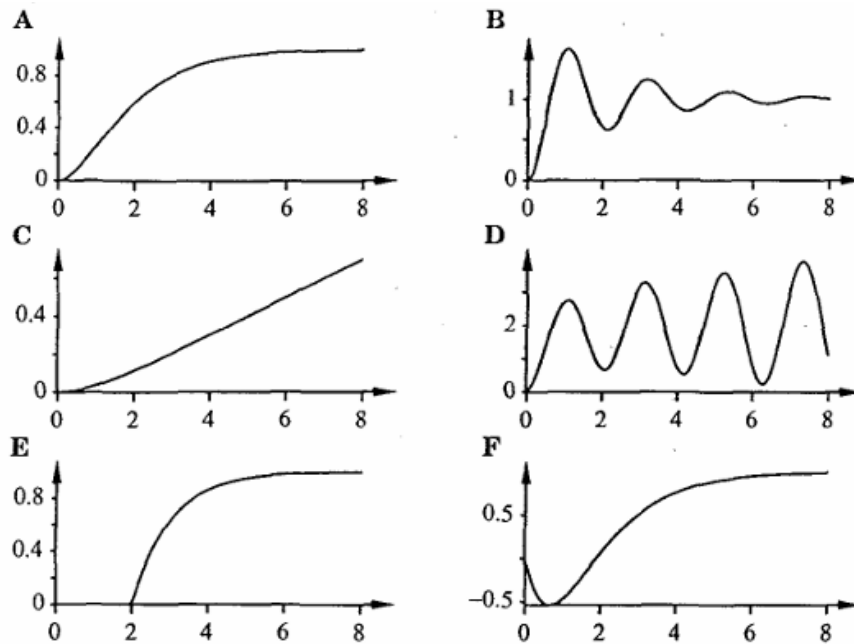
2.1.9 Método de Sintonización de Ziegler Nichols

La aplicación de la Sintonización de Ziegler-Nichols se basa en analizar la respuesta del sistema a un escalón $u(t)$, el cual permite caracterizar la dinámica lineal de la planta. Como se muestra en la Figura 22, la respuesta del sistema puede presentar diferentes comportamientos dependiendo de su naturaleza.

En un entorno experimental, es fundamental asegurar la correcta adquisición y procesamiento de las señales, ya que, la calidad del muestreo influye directamente en la precisión de la aproximación de la planta. Una adecuada selección de los parámetros del sistema de muestreo permitirá estimar los valores del tiempo de retardo (L) y la constante de tiempo (T) los cuales son claves para la determinación de las constantes del controlador PID dada la Tabla de Ziegler Nichols. (K. Astrom, H. Hagglund, 1995)

Figura 22

Comportamiento de los Sistemas Físicos



Nota: Adaptado de PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. K. Amstrom, T. Hagglund, 1995.

El modelo de aproximación para la planta generada del sistema de tanques de nivel de agua será el basado en el Modelo de Tres Parámetros de un modelo lineal de orden uno el cual se detalla a continuación:

$$G(s) = \frac{K}{1 + sT} e^{(-sL)} \quad (24)$$

Donde:

K : Ganancia estática del sistema

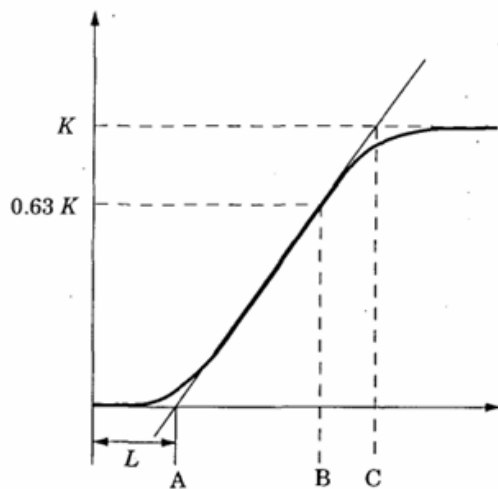
T : Constante de tiempo

L : Tiempo de retardo

La determinación de los parámetros se determinará gráficamente debido a las características de la respuesta a la entrada $u(t)$, según K. Astrom, H. Hagglund, en donde el retardo L es el perteneciente a la recta tangente del punto de inflexión máxima en la curva de la planta, el T puede ser aproximado como se muestra en la Figura 23, a partir de la intersección de la recta tangente y el valor final o ganancia estática K también se presenta otro método el cual se mide a partir de la respuesta en estado estacionario el cual representa el 63% de la ganancia estática del sistema.

Figura 23

Parametrización del Método de Sintonización Ziegler Nichols



Nota: Adaptado de PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. K. Amstrom, T. Hagglund, 1995.

El constante de tiempo generada podría tomarse en función a la distancia AB o a la distancia AC, dependerá de la dinámica del sistema la elección del T.

En cuanto a las ganancias para el diseño del controlador está especificado en la Tabla 5, en donde se muestra la relación entre las constantes de tiempo y retardo del sistema aproximado de primer orden.

Tabla 5

Parámetros del Controlador del 1er Método de Ziegler Nichols

Tipo de Controlador	K	Ti	Td
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \cdot \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \cdot \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Nota: Adaptado de PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. K. Amstrom, T. Hagglund, 1995.

- **Ajuste de Respuesta con Mínimo Sobreimpulso**

El método propuesto por Chien, Hrones y Reswick (CHR), basado en la característica propuesta por Ziegler Nichols considerando el T y L como base para el ajuste de los parámetros establecidos en la Tabla 5, el cual busca mejorar las características de control propuesta por Ziegler Nichols, el cual minimiza el tiempo de establecimiento y el sobreimpulso.

En la investigación se plantea el ajuste de los parámetros del controlador Kp, Ki y Kd para reducir el sobreimpulso u overshoot en el control de la planta de nivel, según el método CHR, el ajuste del controlador PID permite la elección ante la respuesta de un punto de referencia o ante la aplicación de una perturbación.

Tabla 6

Parámetros de Control a partir del Punto de Referencia de CHR

Overshoot		Con Mínimo Overshoot	
Controlador	K	Ti	Td
P	$0.3 \cdot \frac{T}{L}$		
PI	$0.35 \cdot \frac{T}{L}$	$1.2T$	
PID	$0.6 \cdot \frac{T}{L}$	T	$0.5L$

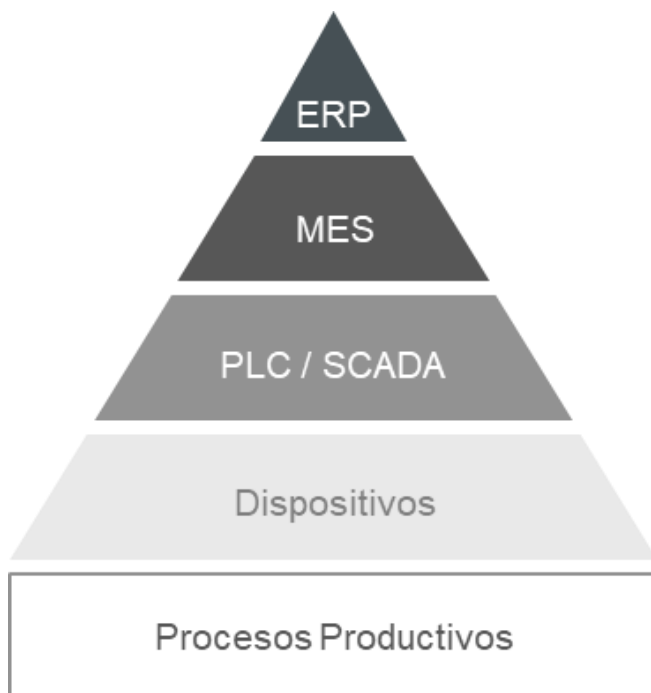
Nota: Adaptado de PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. K. Amstrom, T. Hagglund, 1995.

2.1.10 Automatización Industrial

La automatización se basa en un sistema autónomo donde la intervención humana es mínima. Esto se logra con la aplicación de sensores, actuadores que se conectan a un cerebro conocido como controlador lógico programable (PLC). Estos equipos logran interactuar mediante las señales análogas o digitales generadas tanto por los sensores o transductores y los actuadores, sin embargo, al comunicar un PLC y pantallas HMI o Indicadores independientes estos se conectan a través de redes industriales y protocolos de comunicación, lo que permite optimizar el proceso y mejorar los niveles de automatización, según la ISA – 95 (International SOciety of Automation) y lo detallado en la Figura 24, va desde el Nivel 0, procesos productivos, Nivel 1, detección del proceso de producción que entra como la recopilación de datos y la manipulación de los procesos físicos, el Nivel 2, establecen los controles para el monitoreo y supervisión de los procesos, y así pasar por los niveles de Gestión de Operaciones (MES), y la planificación empresarial y logística.

Figura 24

Nivel de Automatización Industrial



Nota: MES: pasado, Presente y mucho futuro. ISA. Sección Española. 2021

La automatización de procesos industriales depende de factores claves como el conocimiento integral del proceso, representado mediante diagramas de tuberías o P&ID (*Piping and Instrumentation Diagrams*), la selección adecuada de sensores para la medición de variables, y el uso de normas como la ISA 5.1, 5.2, 5.3, que definen los estándares para la identificación, diagrama de lógica de procesos y etiquetado de la instrumentación del proceso. Estas normas son fundamentales para asegurar la correcta integración de los dispositivos de control y monitoreo. Además, es necesario contar con los datos técnicos del fabricante, para realizar la instalación y acondicionamiento de señales entre equipos, todo ello gestionado mediante sistemas de instrumentación que permiten un control eficiente y seguro.

- Norma ISA S5.1: Estándar para la Identificación de Instrumentos y Diseño de sistemas de instrumentación
- Norma ISA S5.2: Diagramas de Lógica Binaria para operaciones de procesos.
- Norma ISA S5.3: Símbolos gráficos para el control distribuido y sistemas lógicos computarizados.

- ISA S5.4: Diagramas de Lazo de Instrumentación.

La investigación centra el diseño de automatización en el diseño del diagrama de tuberías DTI o P&ID, para la conexión de los instrumentos de medición, de control, de monitoreo y la identificación completa del sistema implementado para la simulación.

- **Los sensores en la Industria.**

En la industria, los sensores desempeñan un papel fundamental en la automatización, el control de procesos y la mejora de la eficiencia operativa. Existen múltiples tipos de sensores que se utilizan para medir diferentes parámetros, tales como temperatura, presión, flujo, nivel, posición y más. Sin embargo, para la presente tesis se centrará especialmente en los sensores de nivel y de flujo, que son aplicaciones relacionadas con líquidos en tanques y/o tuberías.

Existen equipos que miden el nivel a partir de una medición indirecta como el de la presión hidrostática, tales como, el medidor manométrico, el medidor tipo burbujeo, medidor de presión diferencial de diafragma.

A partir de las características eléctricas del líquido se tienen los sensores resistivo, conductivo, medidor capacitivo, medidor ultrasónico, medidor láser, etc. (A. Creus, 2011)

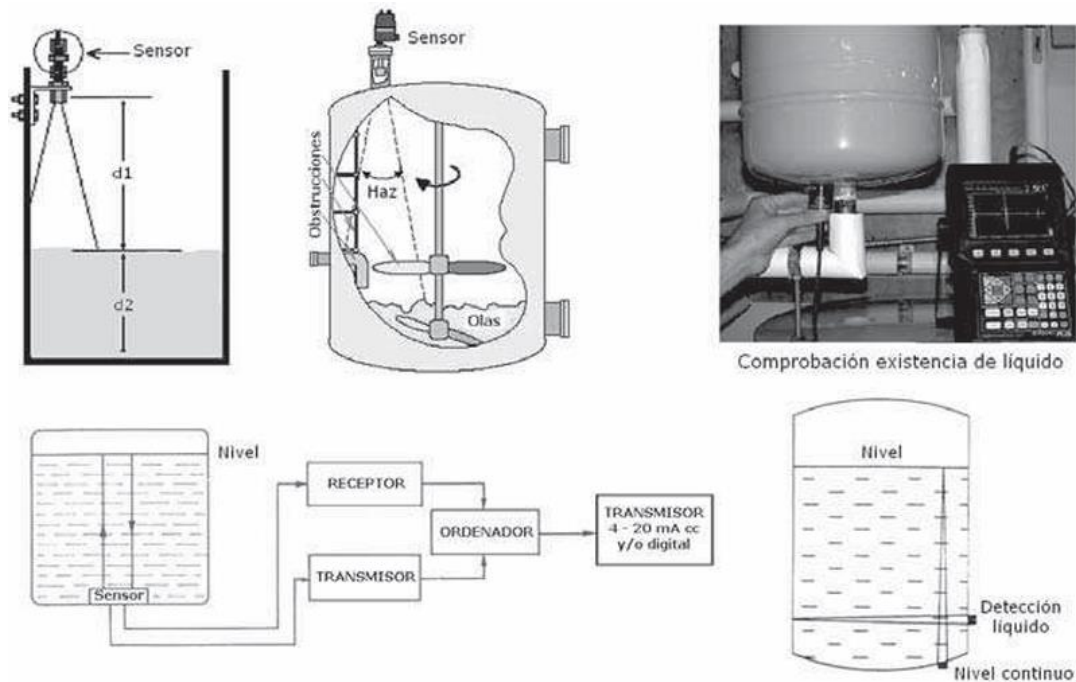
- **Medidor de Nivel Ultrasónico**

Este tipo de sensor emite impulsos ultrasónicos al líquido reflectante, siendo tiempo medido entre la salida del impulso y su retorno en forma de eco, la medición del nivel del tanque que almacena dicho líquido, se muestra la aplicación del sensor en la Figura 25.

Las aplicaciones comunes de este tipo de sensores es la ubicación en la parte superior de los tanques y dirigir el impulso ultrasónico a la superficie del líquido para la generación del eco y este retorne al receptor.

Figura 25

Sensores Industriales de Nivel de Líquido



Nota: De Instrumentación Industrial. Antonio Creus Solé. 2011

La ecuación del nivel del líquido viene dada por:

$$h = \frac{v \times t}{2} \quad (25)$$

En donde:

h = nivel del líquido

v = velocidad del sonido en el líquido

t = tiempo entre emisión del impulso ultrasónico y el retorno.

Las consideraciones a tener en cuenta para la elección de este tipo de sensor se diseñan en base a los siguientes factores:

Según Antonio Creus Solé, la velocidad del sonido en el líquido depende de la temperatura a la que se encuentra el ambiente de captación de señal, en un aproximado de 0 a 70°C de temperatura del espacio de medición da lugar a errores de hasta un 12% de la medida de nivel que a escalas son errores que difieren de la medida real, la presencia de espuma en la superficie del líquido que absorbe el sonido, la turbulencia extrema en el seno del líquido y las condiciones mecánicas del tanque como la curvatura, paredes.

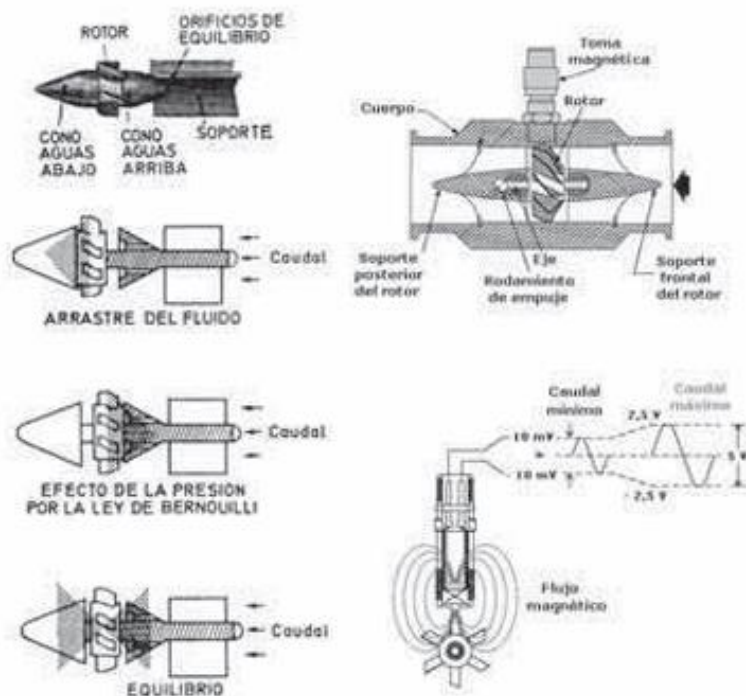
En cuanto a los detalles de la medición del flujo del fluido en la implementación se analizará el comportamiento con un sensor tipo turbina que servirá para monitorear los cambios en los niveles de líquido.

- **Medidor Tipo Turbina**

En el ámbito industrial, el flujo del fluido se mide mediante un rotor que gira a una velocidad proporcional al caudal. Este sistema opera utilizando el principio de inducción magnética o el efecto Hall. En estas turbinas se incorporan un imán en una o todas las aspas, y al girar, generan pulsos eléctricos, mostrado en la Figura 26.

Figura 26

Sensores de Flujo Tipo Turbina



Nota: De Instrumentación Industrial. Antonio Creus Solé. 2011.

La frecuencia de estos pulsos está relacionada con la velocidad de la turbina, lo que permite determinar el caudal del fluido, donde el uso de la constante lineal K se aproxima considerando la curva de la Figura 27.

$$f = k * Q \quad (26)$$

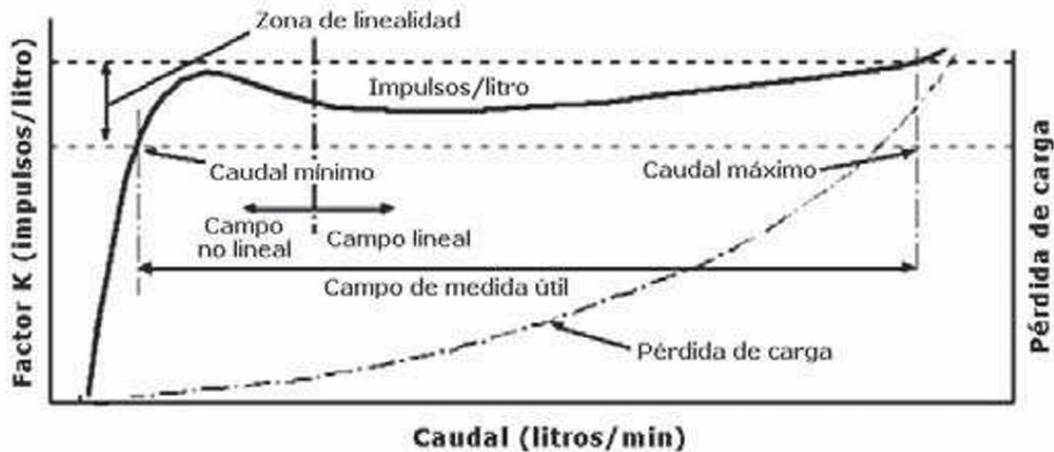
f : Frecuencia de pulsos del sensor (Hz)

k : Constante lineal

Q : Caudal del líquido (L/min)

Figura 27

Factor K para la Conversión de Impulsos a Litros



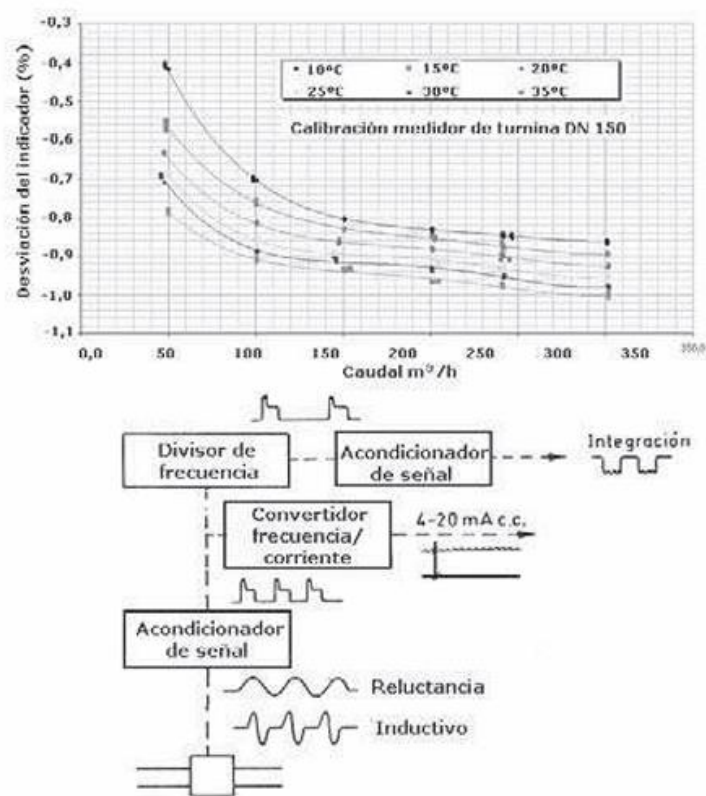
Nota: De Instrumentación Industrial. Antonio Creus Solé. 2011.

Las aplicaciones referentes a los sensores tipo turbina llevan consigo una amplia exactitud y repetibilidad, sin embargo, las condiciones a las cuales debe de implementarse este tipo de sensor son una baja viscosidad del líquido, al estar en contacto con el fluido se requieren de otros elementos para el cuidado del rotor o turbina, sufren de desgaste.

Este tipo de sensores requieren la implementación de un acondicionamiento de señal, conversores de señal, ya que los pulsos obtenidos no son compatibles con las entradas de los PLC, el procesamiento de la señal se realiza con un conversor de frecuencia a voltaje o corriente, que permita acondicionar y procesar la señal como lo mostrado en la Figura 28.

Figura 28

Acondicionamiento y Procesamiento de la Señal del Sensor Tipo Turbina



Nota: De Instrumentación Industrial. Antonio Creus Solé. 2011.

Para el desarrollo de la tesis, se emplearán diversos sensores para la adquisición de datos en tiempo real, garantizando precisión y confiabilidad en la medición de las variables clave del sistema como lo es el flujo y nivel. La selección de estos sensores se ha basado en las características técnicas detalladas previamente, compatibilidad con el sistema de control de nivel y monitoreo del flujo y la adecuación de los requerimientos del proyecto.

Entre estos dispositivos empleados se encuentra el sensor ultrasónico industrial de Allen-Bradley 873M-D18AV800-D4, aplicado para la captación del nivel del tanque TK-003, el tanque designado para la aplicación del control PID no interactivo, debido a la alta precisión para la detección del nivel del líquido con un sistema de filtro de señal que permite el monitoreo de una señal estable del nivel. Asimismo, se integra el sensor de Flujo YF-201, diseñado para medir el caudal de líquidos por medio del Efecto Hall. Finalmente, se incorpora el sensor ultrasónico HC-SR04, ampliamente utilizado en aplicaciones

electrónicas y robóticas para medición de las distancias debido a la emisión y recepción de los impulsos ultrasónicos.

- **Sensor Industrial Ultrasónico de Allen-Bradley 873M-D18AV800-D4**

El sensor 873M-D18AV800-D4, de la Figura 29,, tiene un funcionamiento basado en la emisión y recepción de las ondas sonoras descrito en el Medidor de tipo ultrasónico, lo que caracteriza al sensor es la emisión de señal analógica normalizada de 0 a 10V, utilizado para la detección del nivel, detección de objetos y con un Rango de medición entre 70mm a 800mm, protección IP67, led indicador de nivel o detección de objetos. (Allen-Bradley, 2013)

Figura 29

Sensor de Nivel Ultrasónico de Allen-Bradley



Nota: De 873M General Purpose Ultrasonic Sensor. Allen-Bradley 2013.

En la Figura 30, se presenta una representación de la instalación y respuesta del sensado de un control de nivel de un tanque para el TK-003, esta implementación será fundamental pues el sensor brindará los cambios presentados en la Planta $P(s)$, por lo que, se tiene en cuenta el diagrama de instalación y la captación del sensor mediante la curva de respuesta para el sistema propuesto.

En la Tabla 7, se especifican las características técnicas del sensor como alimentación, señal, rango, histéresis, señal discreta y señal analógica, la temperatura de operación y el tipo de conexión que consta de 4 cables de color marrón (BN, Brown), blanco (WH, White), negro (BK, black) y azul (BU, Blue).

Cable marrón (BN, Brown): Cable de Alimentación 10-30V DC.

Cable blanco (WH, White): Cable de configuración remota.

Cable negro (BK, black): Cable de salida Analógica 0-10V.

Cable azul (BU, Blue): Cable común o de referencia del sistema eléctrico 0V DC.

Figura 30

Características del Sensor de Nivel Industrial para una Medida de 30cm

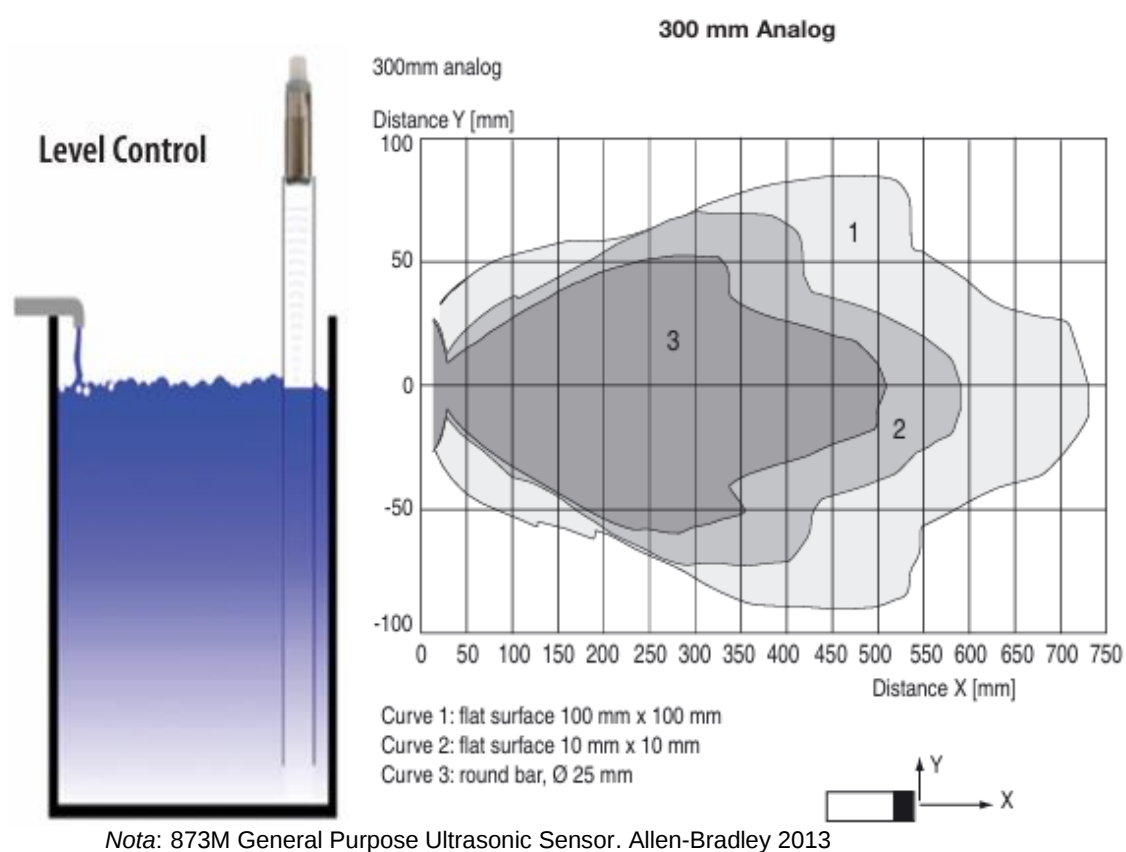


Tabla 7

Características Técnicas del Sensor de Nivel Industrial

Especificaciones Técnicas	Descripción
Voltaje de Alimentación	10-30V DC
Voltaje Analógico de salida	0-10V DC
Rango de Medida	70 a 800mm
Histéresis	1%
Protección	IP67
Temperatura de Operación	-25°C a 70°C
Variación con la Temperatura	+/- 1.5% de la escala total

Nota: Adaptado de 873M General Purpose Ultrasonic Sensor. Allen-Bradley 2013.

- **Modulo Ultrasónico HC-SR04**

El módulo HC-SR04 tiene la capacidad de realizar la captación de los fenómenos físicos e incorpora el funcionamiento de los sensores tipo ultrasónicos, con la emisión y recepción de ondas sonoras, sin embargo, la señal de este sensor se encuentra en función de pulsos emitidos por el pin de disparo (TRIG, Trigger) y el receptado por el eco (ECHO), este módulo posee 4 pines de conexión mostrados en la Figura 31. (Naylamp Mechatronics, s.f.).

Figura 31

Sensor Ultrasónico HC-SR04

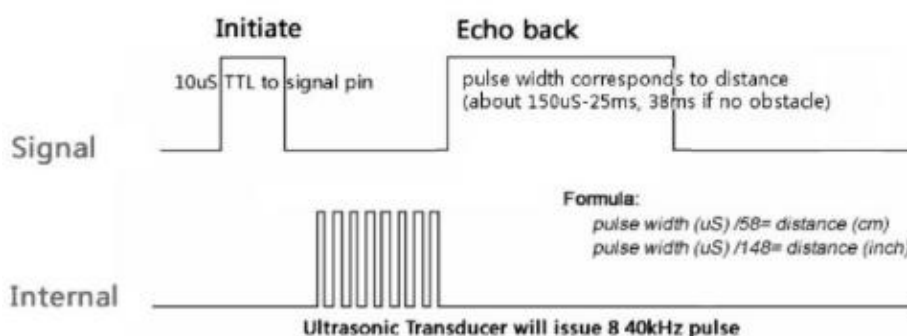


Nota: De Sensor Ultrasonido HC-SR04. Naylamp Mechatronics.

En la Figura 32 se detalla el funcionamiento consta de la emisión de pulsos por parte del microcontrolador, específicamente para la aplicación de la investigación es el Arduino Due, que habilita las señales mediante la salida de un pin digital emitiendo 8 pulsos de 40KHz de frecuencia al TRIG con un tiempo de 10us, las ondas ultrasónicas viajan en el aire y rebotan al encontrar el objeto, el sonido de retorno es detectado por el receptor del sensor, al llegar la señal al ECHO este cambia su estado a un nivel alto o activo por un tiempo equivalente al viaje del tren de pulsos generado por el TRIG, llegando a este tiempo debido a la ecuación 25, llevando la captación del nivel del tanque TK 002, las características del sensor se describen en la Tabla 8. (Qbprofe, 2021)

Figura 32

Características de la Señal de Pulsos del Sensor Ultrasónico



Nota: User's Manual. Cytron Technologies. (<https://web.eece.maine.edu/~zhu/book/lab/HC-SR04%20User%20Manual.pdf>)

Tabla 8

Características Sensor Ultrasónico HC-SR04

Especificaciones Técnicas	Descripción
Voltaje de Alimentación	5V DC
Corriente de Operación	15mA
Rango de Medición	2 a 450cm
Presición	+/-3mm
Ángulo de Apertura	15°
Frecuencia de Ultrasonido	150KHz

Nota: Adaptado de Naylamp Mechatronics.

- **Sensor de Flujo YF-201**

El caudalímetro utilizado para el monitoreo de los flujos que se desplazan por las diferentes tuberías del sistema de tanque de nivel de agua, el sensor de flujo YF-201, sirve para la medición del caudal de agua en tuberías de ½", emplea el mismo sistema de medición que los medidores tipo turbina detallados previamente, este sensor basa su sistema de funcionamiento en el Efecto Hall, que mediante la rotación de la turbina, que trae consigo un imán, el sensor de flujo YF-201 generan pulsos que son conducidos al microcontrolador, para el monitoreo del flujo del sistema se realizará el acondicionamiento de la señal en forma de pulsos generada por el Efecto Hall.

El funcionamiento consiste en la generación de pulsos debido al caudal del fluido que ingresa al sensor y gira la turbina, un imán que se une a la turbina activa el sensor de

efecto Hall, que emite los pulsos hacia el microcontrolador, las especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 9.

El sensor consta con 3 cables como lo adjuntado en la Figura 33, el cable amarillo es la señal en pulsos que genera el sensor, el cable rojo de alimentación y el cable negro el común o GND. (Naylamp Mechatronics, s.f.)

Figura 33

Sensor de Flujo YF-201



Nota: Datasheet del Sensor de Flujo YF-201.

Tabla 9

Características del Sensor de Flujo YF-201

Especificaciones Técnicas	Descripción
Voltaje de Operación	5-18V DC
Consumo de Corriente a 5V	15mA
Salida	Onda Cuadrada
Rango de Flujo	1-30L/min
Pulsos por Litro	450
Factor de Conversión	7.5
Temperatura de Funcionamiento	-25°C a 80°C
Presión de Trabajo Máx.	1.75 Mpa

Nota: Adaptado de Sensor de flujo de agua 1/2" YF-S201. Naylamp Mechatronics.

- **Actuadores en la Industria.**

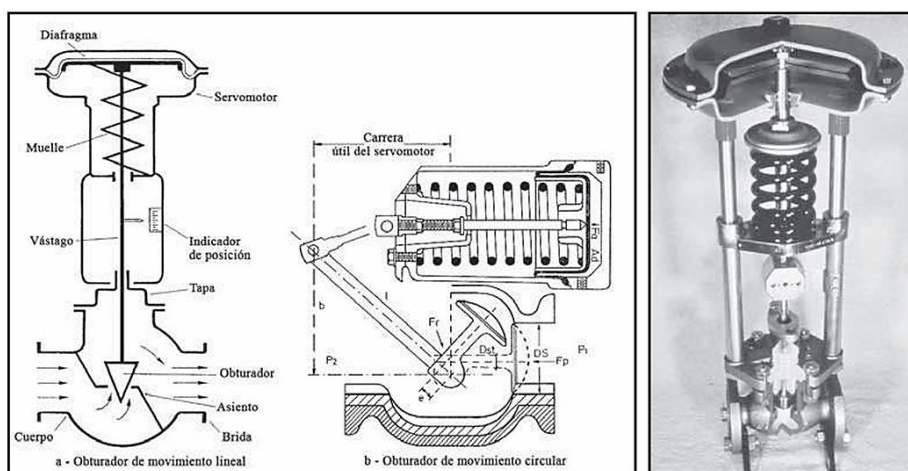
Los actuadores o elementos finales de control son esenciales en el ajuste de la variable de control, ya que permiten modificar el estado de la planta a partir de los distintos sistemas de control. En el desarrollo de esta tesis, se implementará una válvula eléctrica TFFV4-306 tipo bola, la cual ajustará el flujo del líquido para regular el nivel en el tanque, donde se aplicará un algoritmo de control PID no interactivo. Asimismo, se utilizará una

bomba periférica Pedrollo PKM60, cuyo funcionamiento estará comandado por las variaciones en el nivel del fluido dentro del tanque de almacenamiento.

A nivel industrial existen diferentes actuadores tipo válvula y una de las típicas es la aplicación de un servomotor y la válvula quien aplica un movimiento lineal o circular, en la Figura 34 se detallan las partes generalizadas de este tipo de actuador.

Figura 34

Sistema Interno de las Válvulas de Control



Nota: Instrumentación Industrial. Antonio Creus Solé. 2011.

- **Bomba Periférica Pedrollo PKM 60**

La bomba de la Figura 35, se implementa para el inicio del proceso del sistema de nivel de tanques, se dispuso la elevación del tanque de almacenamiento TK-001 hacia el tanque superior TK-002 mediante la bomba periférica Pedrollo PKM 60, el cual proporciona el impulso necesario para elevar el líquido del TK-001 hacia el TK-002. (Pedrollo the spring of life, s.f.)

En el mercado existe comúnmente 3 tipos de bombas de agua: bombas centrifugas, periféricas y bombas jet. La bomba periférica se caracteriza por incluir el sistema impulsor que consta de un disco dentado por el cual el fluido o agua es impulsada a la parte superior por la boquilla superior.

Figura 35

Bomba PKM 60 de Pedrollo



Nota: fuente Electrobombas con rodete periférico. Pedrollo The spring of life.

Figura 36

Placa de Identificación de la Bomba PKM 60



Las características de la bomba se detallan en la Tabla 10, refiriendo como la más importante para el proyecto la potencia, la altura máxima de impulsión, el caudal y la frecuencia de trabajo de la bomba como se muestra en la placa de identificación de la Figura 36, la aplicación también se debe a la confiabilidad y el uso simplificado que permitirá el control ON-OFF mediante el PLC TM221CE16R de Schneider.

Tabla 10

Especificaciones Técnicas de la Bomba PKM 60

Característica	Descripción
Marca	Pedrollo
Modelo	PKM60®
Protección	IP X4
Hmax	40m
Qmàx	40L/min (2.4m³/h)

Tensiòn de Trabajo (V ~)	220V ~60Hz
Potencia	0.37 KW/ 0.5 HP
Corriente (A)	2.6A
Capacitancia	10 uF ~ 60Hz

Nota: adaptado de Electrobombas con rodete periférico. Pedrollo The spring of life.

Para la instalación de la bomba PKM60, se recomienda un fluido limpio, como agua sin impurezas, evitando el contacto con partículas abrasivas o sustancias químicamente agresivas, que puedan dañar el impulsor. Esto previene el desgaste prematuro y el deterioro de la dentadura del impulsor, garantizando un funcionamiento óptimo y una mayor vida útil del equipo.

Las condiciones de presión y temperatura del líquido para la aplicación son indicadas en la hoja técnica, mediante el cual especifica lo siguiente:

- ✓ Temperatura del líquido de -10°C hasta los +60°C.
- ✓ Temperatura ambiente hasta 50°C
- ✓ Una presión máxima en el cuerpo de la bomba PKM 60 6 bar.
- ✓ Protección IP (Ingress Protection) IPX4, que indica el grado de protección según la norma IEC 60529, la protección de grado 4 ante salpicaduras de agua, de uso en ambientes donde esté expuesto a humedad, sin embargo, no es sumergible ni soporta chorro de agua a presión, mientras que el X indica que no está especificado el grado de protección contra sólidos.

Teniendo en cuenta las especificaciones técnicas de la bomba Pedrollo PKM 60, el diseño del sistema eléctrico para la implementación se diseñará en base a un diagrama de conexión eléctrica de la Figura 37 en donde se representa los equipos necesarios para el control de la bomba mediante la aplicación de un sistema de Fuerza o Potencia y el Diagrama de Mando o de Control.

1. Diagrama de Fuerza o Potencia

Se describe el uso de los siguientes equipos.

Interruptor Termomagnético (ITC): Se utiliza para la protección ante picos elevados a en un periodo corto de tiempo (cortocircuito) o una sobrecarga en el sistema eléctrico.

Contactador de Fuerza (KM): Este equipo es el que va a relacionar el sistema de Control con el sistema de Potencia, pues debido a la excitación de la bobina del contactor permitirá el flujo de la corriente hacia el siguiente equipo.

Relé Térmico (RT): Para la protección del motor ante sobrecarga o sobrecalentamiento, su uso corresponde a la desconexión del motor ante la sobrecarga.

2. Diagrama de Mando o Control

Pulsador de Emergencia (PE): Ante una falla en el sistema de control permite accionar el botón con la finalidad de disminuir los riesgos aguas abajo del sistema de potencia.

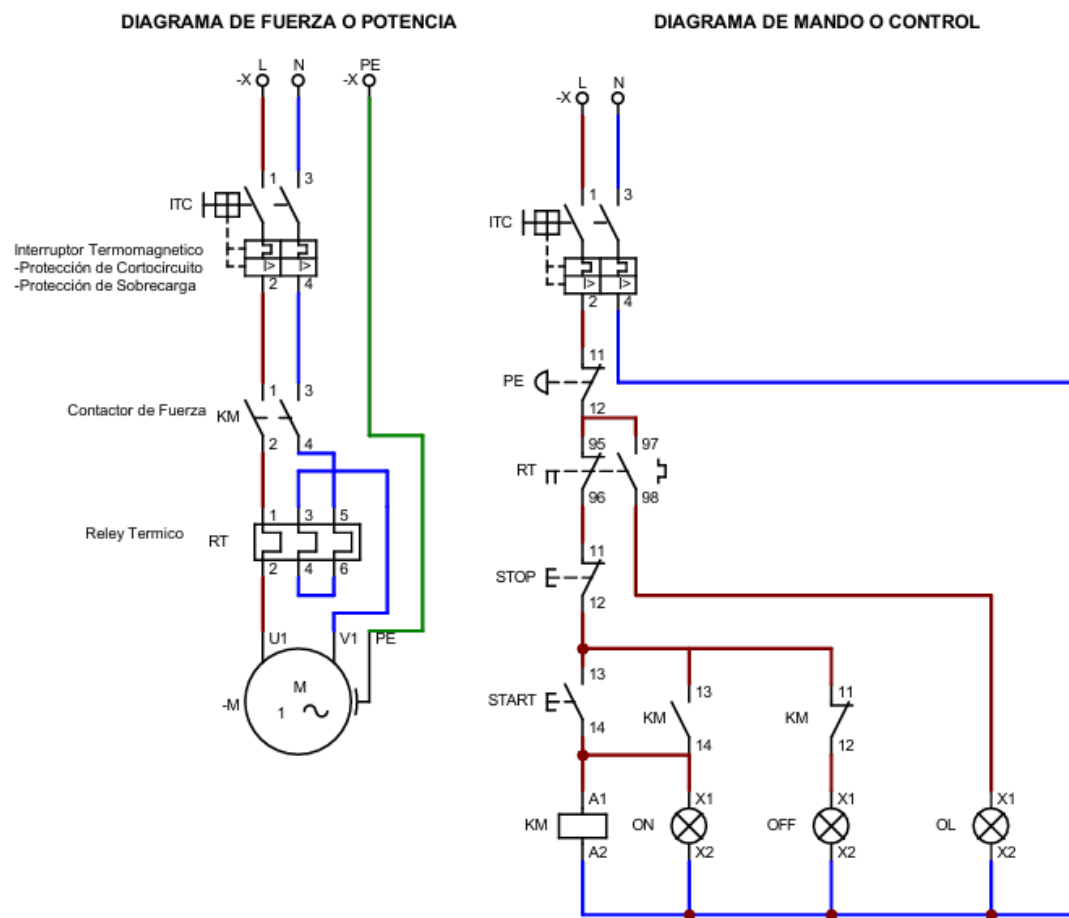
STOP/STAR: Son los pulsadores utilizados para el control de apagado y encendido, como se puede apreciar el tipo de configuración usual en estos sistemas es el STOP como pulsador normalmente cerrado (NC) y el botón START como pulsador normalmente abierto.

Bobina (KM); Esta es la bobina perteneciente al ITC del sistema de fuerza, mediante el cual el sistema de control aplicado permite la activación mediante el botón START y la desactivación por medio del botón STOP.

Indicadores (ON, OFF, OL): los indicadores nos permitirán observar el funcionamiento del sistema, generalmente están referenciadas en un sistema ON o puesta en marcha como el led verde, Off o paro como rojo y una luz OL amarilla para indicar advertencias o espera.

Figura 37

Diagrama de Fuera y de Control o de Mando



- **Válvula Eléctrica de Ajuste Automático TFFV4-306**

El diseño del control PID no interactivo aplicado al tanque TK-003, se instaló la válvula proporcional de 2 vías TFFV4-306 (Figura 38), que consta de un actuador rotativo y una válvula de bola, este controlador presenta características proporcionales del sistema de control con el ángulo de apertura de la válvula.

Figura 38

Válvula de Control TFV4-306



Nota: De Válvula proporcional de latón de 2 vías, moduladora CA/CC 24 V 0-10 V con actuador de 6 Nm. (<http://www.china-electricvalves.com/product/255-en.html>)

Las especificaciones técnicas de la válvula eléctrica están detalladas en la Tabla 11, en donde el sistema de control interno de la válvula permite el control y monitoreo del ángulo de apertura o cierre de la válvula tipo bola, cuenta con un sistema de giro que permite la elección del sentido de apertura o cierre de la válvula el cual se habilita mediante el selector CW (Clockwise, sentido horario de giro) y CCW (Counterclockwise, sentido antihorario de giro).

Tabla 11

Características de la Válvula de Control TFV4-306

Especificaciones Técnicas	Descripción
Fuente de Alimentación	AC/DC 24V±10%
Señal de Control	0-10V(0-20mA), 2-10V (4-20mA)
Dirección de Giro	CW o CCW
Potencia	6VA
Tiempo de apertura o cierre	50-120s
Tiempo de Vida	70000 arranques y paradas antes de fallas
Angulo de Apertura	90°
Torque Máximo	6N.m
Indicador de Posición	Sí
Clase de Protección IP	IP54
Temperatura Ambiental	-5°C a 60°C
Temperatura del Líquido	2°C a 90°C

Nota: Adaptado de Válvula proporcional de latón de 2 vías, moduladora CA/CC 24 V 0-10 V con actuador de 6 Nm.

En la presente tesis se abordó el detalle técnico de los datos brindados en las especificaciones técnicas y detalles del cuerpo de la válvula visto en la Figura 39, para ello se realizaron los siguientes diagramas para el entendimiento de los diferentes colores de los cables de conexión de la válvula TFV4-306.

Figura 39

Etiqueta de Identificación de las Señales de Control



Encontramos una distribución de 6 cables de diferente color, según la Figura 40, según los requerimientos para el sistema de control PID no interactivo diseñado para controlar el nivel del líquido del tanque TK-0003 y el monitoreo de las variables del proceso que constituyen parte fundamental del sistema de tanque de nivel de agua, a continuación, se detallan la distribución de cables:

Cable negro (BK, Black): Es el cable del común o de referencia del sistema electrónico o el GND (Ground, que significa tierra), esta señal es diferente a la Puesta a tierra física que se utiliza para liberar corrientes provenientes de las sobrecargas o cargas estáticas en equipos eléctricos.

Cable marrón (BN, Brown): Es el cable de la fuente de alimentación de la válvula eléctrica TFV4-306. (AC/DC 24V).

Cable rojo (RD, Red): El cable indica una salida tipo continua de 24VDC, en donde al conectarse con el cable negro, este funciona como un Relé permitiendo el flujo de corriente y realizando el control ON-OFF, podría ser aplicado para un sistema de protección ante flujos al grado de apertura o cierre que permitan el paso de los 24VDC.

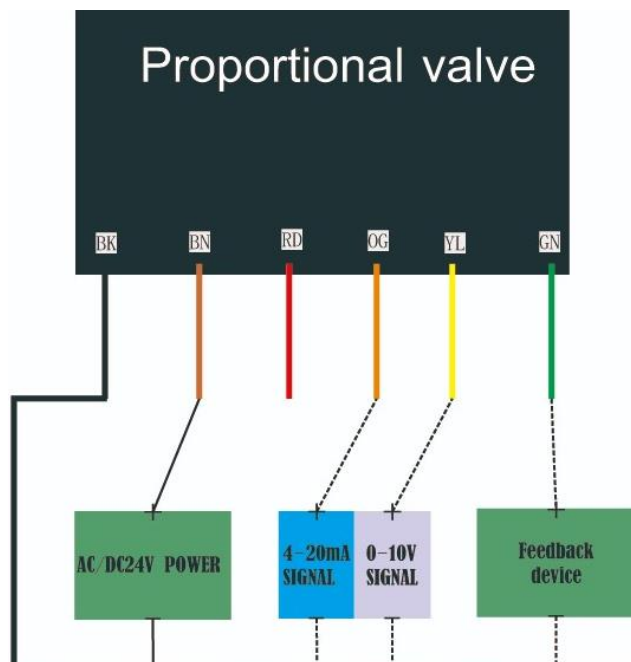
Cable naranja (OG, Orange): Este cable permitirá el control proporcional de la válvula TFFV4-306, mediante la variación de la corriente de control de 4 a 20mA.

Cable amarillo (YL, Yellow): Este cable permitirá el control proporcional de la válvula TFFV4-306, mediante la variación de control de 0 a 10V o de 2 a 10V.

Cable verde (GN, Green): Las señales que nos brinda este controlador permite la implementación del cable verde que sirve como cable de referencia o feedback, para llevar a un sistema de monitoreo permitiendo observar la posición de la válvula mediante este cable.

Figura 40

Identificación de Colores de los Cables de Control



Nota: De Válvula proporcional de latón de 2 vías, moduladora CA/CC 24 V 0-10 V con actuador de 6 Nm.

<http://www.china-electricvalves.com/product/255-en.html>

- **Controladores Lógico-Programables. (PLC)**

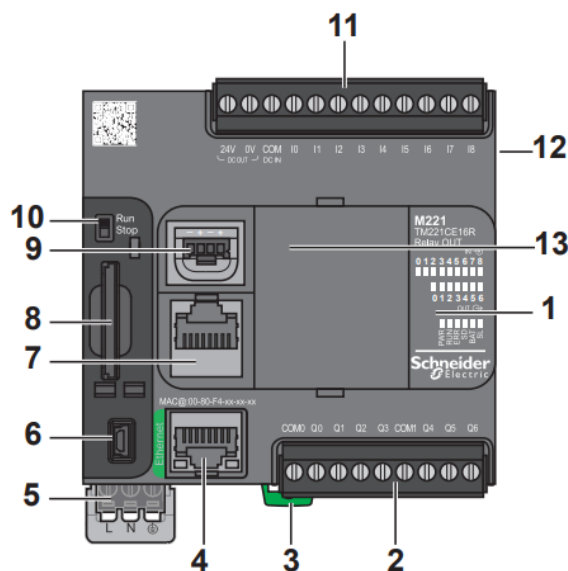
Los autómatas programables en los procesos industriales se han diversificado, la implementación del hardware con estandarizado con la capacidad de conexión directa de las señales de campo (niveles de tensión, corriente, transductores y actuadores), programables por el usuario.

Un PLC es un equipo electrónico diseñado para controlar en tiempo real y en medio industrial diferentes procesos, captando las señales que ingresan al PLC como entradas y a las señales de control emitidas por el PLC como salidas, siendo estas señales analógicas o digitales.

Dependiendo del fabricante relacionado a los PLC industriales y al proceso llevado a cabo se requerirán especificaciones técnicas en el PLC tales como el Tipo de entradas y salidas, la comunicación Industrial, las señales digitales, analógicas, nivel de procesamiento de las funciones y características propias del software de programación y la Interfaz Hombre Máquina del PLC, detallado en la Figura 41.

Figura 41

Característica del PLC TM221CE16R



Nota: De Schneider Electric. TM221C..R/ TM221CE..R

A continuación, se etiquetan algunos puertos característicos presentes en los PLCs industriales.

1. Leds de Estados
 2. Bloque de terminales de tornillo extraíble
 3. Clips-on para Riel DIN
 4. Puerto Ethernet
 5. Puerto de Alimentación (L N)
 6. Puerto de Programación USB
 7. Puerto serial
 8. Ranura para tarjeta SD
 9. Puerto analógico
 10. Botón Run/Stop
 11. Input
 12. I/O módulo de conexión para expansión
- **PLC CONTROLADOR M221 16 E/S TM221CE16R**

El autómata programable de Schneider Electric mostrado en la Figura 42, PLC M221, presenta el equipo como un equipo compacto de mínima instalación y solución versátil para la automatización de procesos industriales, ofreciendo un rendimiento excepcional y una amplia gama de funciones para satisfacer las necesidades de control y monitoreo en diversos sectores industriales. (Schneider Electric, s.f.)

Una de las ventajas del PLC M221 es su facilidad de uso y el entorno de programación intuitivo, que permite que los usuarios con el Software EcoStruxure Machine Expert-Basic y el diseño de programas de control de manera eficiente usando el lenguaje de programación industrial Ladder LD(Ladder Diagram) y el Lenguaje de instrucciones (IL, Instruction List), el lenguaje de pasos y transiciones o el diagrama de estados Grafcet (SFC, Sequential Function Chart) no se encuentra en el software, sin embargo, mediante el lenguaje Ladder permite programar en forma de contactos y bobinas la activación y desactivación de salidas y la captación de las entradas..

Las características se detallan en la Tabla 12, donde proporciona 9 entradas discretas (I0, I1, I2, ..., I8), 7 salidas de relé normalmente abiertas (Q0, Q1, ..., Q6), 2 entradas analógicas con 10 bits de resolución.

Cabe resaltar que los puertos RJ45 de Ethernet y el puerto Serial aislado están específicamente dedicados para el protocolo de comunicación Modbus TCP/IP y Modbus RTU respectivamente, en tanto la velocidad del protocolo de comunicación mediante el RS485 de 1,2 a 115,2 Kbit/s (por defecto 115,2 Kbit/s) para una longitud de bus de 15m, para la investigación se realizó el Enlace serie sin aislar que conecta a dispositivos Modbus RTU con la característica de maestro/ esclavo, el cual se configura como maestro al PLC M221 y al Arduino Due como el esclavo que enviará los datos de los sensores de Flujo y de nivel ultrasónicos.

Figura 42

PLC Industrial Compacto TM221CE16R



Nota: De PLC industrial M221 c/ Ethernet 16 ES de tipo relé - 9 entradas digitales - 7 salidas relé (<https://www.se.com/pe/es/product/TM221CE16R/plc-industrial-m221-c-ethernet-16-es-de-tipo-rel%C3%A9-9-entradas-digitales-7-salidas-rel%C3%A9/>)

Tabla 12

Características del PLC Industrial TM221CE16R

Especificaciones Técnicas	Descripción
Tensión de Alimentación	100 a 240 V AC
Entradas Discretas	9 según la IEC 61131-2 tipo 1
Entradas Analógicas	2 de rango 0-10V

Salidas	7 de Tipo Relé
Tensión de la salida	5-125v DC / 5 – 250V CA
Corriente de la Salida	2A
Frecuencia de Red	50-60Hz
Tensión de Entrada	24V DC
Resolución de Entrada Analógica	10bits
Valor del LSB	10mV
Tipo de Conexión Integrada	Ethernet con conector RJ45 Enlace en serie sin aislar con conector RJ45 e interfaz RS485/RS232
Velocidad de Transmisión	115,2 kbit/s para long bus de 15 m -para RS485
Grado de Protección IP	20

Nota: Adaptado de PLC industrial M221 c/ Ethernet 16 ES de tipo relé - 9 entradas digitales - 7 salidas relé.

- **El Microcontrolador Arduino Due**

El Arduino Due de la Figura 43 brinda soluciones flexibles y de bajo costo para la implementación de los sistemas de control y monitoreo en entornos industriales, optimizando las interacciones entre dispositivos y facilita el desarrollo de soluciones personalizadas.

Este microcontrolador da un paso adicional a las versiones de las placas de Arduino debido a la implementación de un núcleo ARM de 32 bits basado en la CPU Atmel SAM3X8E Cortex-M3. Entre sus principales características detalladas en la Tabla 13, es la habilitación de 54 entradas y salidas digitales, (12 en forma de PWM, 12 entradas analógicas y pines de comunicación).

El Arduino Due tiene un voltaje de operación de 3.3V, que permiten el procesamiento de las señales digitales de los pines de E/S, las cuales serán aplicadas en el diseño eléctrico y electrónico para el cuidado adecuado del sistema de adquisición de datos de los sensores HC-SR04 y el sensor de Flujo Yf-201, debido a la emisión de las señales en forma de pulsos.

Figura 43

Microcontrolador Arduino Due Atmel SAM3X8E Cortex-M3



Nota: De Arduino Due (https://store.arduino.cc/products/arduino-due?srltid=AfmBOopAPa59daZ-XPIKnXN5oS2CZcCfH2v_70rSay2nCxa4E_PPrawM)

Tabla 13

Características del Arduino Due

Especificaciones Técnicas	Descripción
Microcontrolador	AT91SAM3X8E
Voltaje de Alimentación	7-12V
Entradas/salidas Digitales	54 (12 en forma de PWM)
Entradas Analógicas	12
Salidas Analógicas	2 (DAC)
Reloj	84 MHz
Memoria Flash	512 KB
SRAM	96 KB

Nota: Adaptado de Arduino Due.

- **NI DAQ USB 6008 Y 6211**

Las tarjetas de Adquisición de datos diseñadas por National Instruments, basadas en un sistema de monitoreo entre las señales captadas por los sensores, y la computadora que permite la visualización y generación de datos de un sistema de monitoreo, se presentan las diferencias entre los dispositivos en la Figura 44 y 45.

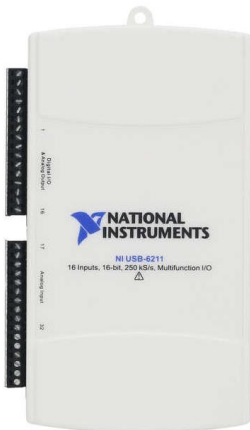
Las dos tarjetas utilizan el el Software de programación de LabVIEW, por medio del driver NI-DAQmx que permiten el acondicionamiento de señales digitales y analógicas.

Este dispositivo permite la comunicación entre la computadora y el NI DAQ USB, y la facilidad de aplicación en los sistemas de monitoreo y generación de datos de los cambios en los fenómenos físicos y las señales de control para el accionamiento de dispositivos de control. (Software selección. S.f)

Entre las características de las tarjetas de adquisición de datos se encuentran en la Tabla 14, detallando la diferencia en el uso de los pines de Entrada y Salida Analógica, los tiempos de muestreo y el sistema de comunicación serial con el Arduino Due que procesa la señal de los sensores HC-SR04 y el sensor de flujo YF 201.

Figura 44

NI DAQ USB 6211



Nota: De USB-6211 multifunción USB. Alibaba (<https://spanish.alibaba.com/product-detail/USB-6211-OEM-DAQ-USB-779676-1600537958180.html>)

Figura 45

NI DAQ USB 6008



Nota: De USB-6008 (<https://www.ni.com/es-cr/support/model.usb-6008.html?srsId=AfmBOoxy1KvkbzPWTXTkPg92PIYVMo0IJVVFraoOwFvhhVTbiiiJs50>)

Tabla 14*Comparación de Características entre NI DAQ 6008 y 6211*

Especificaciones Técnicas	NI DAQ 6008	NI DAQ 6211
Alimentación	USB	USB
Entradas/ Salidas Digitales	12 (PO, <0,..., 7>; P1, <0,...,3>)	4 In. (PO, <0,..., 3>) y 4 Out (P1,<0,...,3>)
Entradas Analógicas	4 (AI 0, ..., AI 7) en forma de diferencias	8 (AI 0, ..., AI 15) en forma de diferencias
Resolución de Entrada	12 bits	16 bits
Frecuencia de Muestreo	10 kS/s*	250 kS/s
Rango de Entrada	0-10V	0-10V
Salida Analógica	2 (AO, A1)	2 (AO, A1)
Resolución de Salida	12 bits	16bits
Tasa Máxima de Actualización	150Hz	250 kS/s por canal
Rango de Salida	0-5V	+10V
Uso recomendado	Aplicaciones Básicas y de Investigación	Aplicaciones industriales y alta precisión

Nota: Adaptado de Adquisición de Datos (DAQ). Datasheet del USB 6008 y USB 6211.

- **Comunicación Industrial**

La comunicación industrial se refiere al intercambio de datos y señales entre los sistemas de control industrial como un controlador, sensor, PLC, indicadores, Interfaz Hombre Máquina (HMI) y otros dispositivos de la planta, así como el sistema de adquisición de datos. (J. Estrada, s.f.)

Esta comunicación es esencial para el monitoreo, control y automatización de los procesos industriales, los protocolos de comunicación comunes en el mercado son el protocolo Modbus, Profibus, Ethernet /IP, Profinet entre otros, a tener en consideración que para la comunicación se deben de establecer el protocolo ideal para distinto tipo de labor.

- **Tipos de Comunicación**

Comunicación Serial: Se caracterizan por una baja velocidad, ideal para entornos con interferencias eléctricas, en estas se encuentran Modbus RTU, Profibus DP, cuyo medio utilizado para la comunicación es el cableado RS-232 o RS-485.

Comunicación Ethernet: La comunicación se realiza a altas velocidades, utilizado para la comunicación entre los dispositivos industriales en tiempo real, utiliza los protocolos como Modbus TCP/IP, Ethernet/IP y Profinet, su medio de transmisión es el cable de Ethernet con las categorías (5e o 6e) que ofrecen una mayor inmunidad al ruido y capacidad de manejar grandes volúmenes de datos.

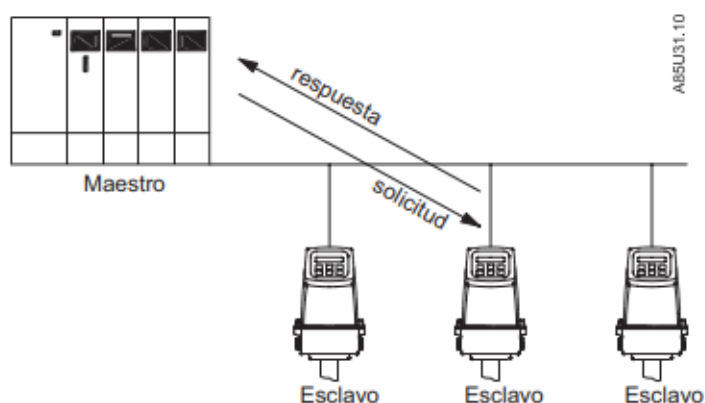
En la presente tesis se abordará específicamente el Protocolo de comunicación Modbus RTU y TCP/IP, debido a su fiabilidad, simplicidad y compatibilidad con diferentes equipos, por lo que, en se propone en la implementación del protocolo de comunicación en el sistema de tanques de nivel de agua.

El protocolo Modbus RTU se relaciona en la arquitectura un mono maestro/esclavo o cliente/servidor, tiene la capacidad de realizar la conexión de los equipos de campo, como sensores, actuadores y los controladores, este protocolo se sitúa en los niveles 1,2 y 7 del Modelo OSI.

Cada dispositivo en una comunicación Modbus RTU tiene una dirección única, esto quiere decir que el único maestro inicia los comandos o solicita las instrucciones de recepción o envío de datos a los esclavos, detallado en la Figura 46

Figura 46

Configuración Maestro Esclavo del Modbus RTU



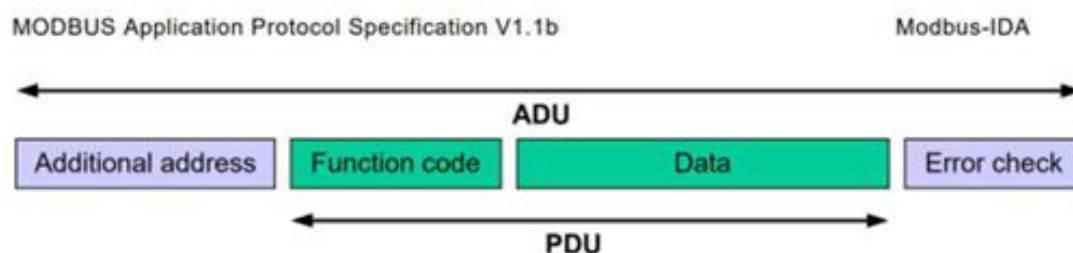
Nota: De Módulos de comunicación Modbus RTU RS 485. Sitrans F. Siemens. 2021

Esta comunicación se consta en el envío de datos denominada como la Unidad de Datos de Aplicación ADU (Application Data Unit) que consta de la codificación de las direcciones, código de función, el dato de envío y el error de envío, cabe señalar que este

error indicará si existe o no la comunicación entre los dispositivos. La unidad de datos del protocolo PDU (Protocol Data Unit) es la parte del mensaje que contiene la instrucción y los datos que se quiere enviar o recibir. (Figura 47)

Figura 47

Protocolo de Comunicación Codificado del Modbus RTU



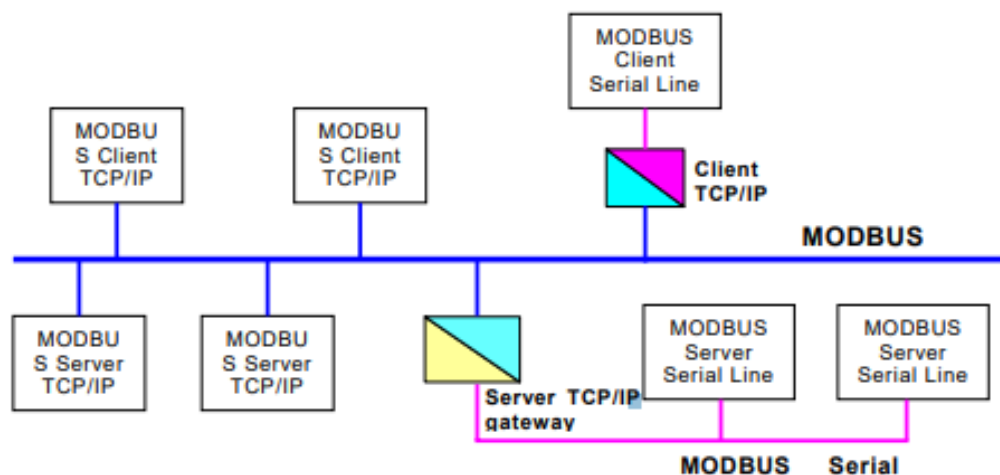
Nota: De Modbus Messaging On TCP/IP Implementation Guide V1.0b. Modbus Organization. 2006

En el Anexo C, se anotan las características de aplicación de los códigos Modbus RTU para la correcta comunicación entre dispositivos.

En el caso de la comunicación Modbus TCP/IP, la aplicación de este incluye una arquitectura de Cliente y Servidor.

Figura 48

Protocolo de Comunicación Modbus TCP/IP



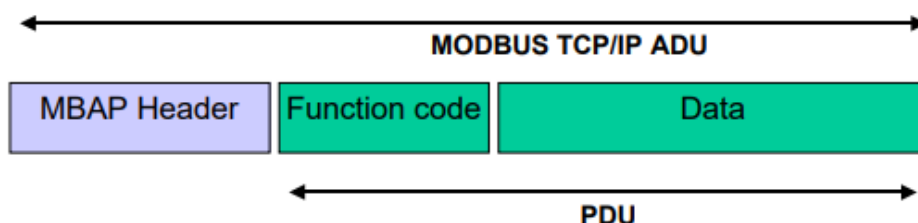
Nota: De Modbus Messaging On TCP/IP Implementation Guide V1.0b. Modbus Organization. 2006

El protocolo mostrado en la Figura 48, a comparación del Modbus RTU se basa en un sistema ADU simplificado, en donde codifica en un encabezado de la Aplicación del Protocolo Modbus (MBAP Header siglas en ingles), el código de la función y la data de

envió o recepción, en comparación al sistema anterior el sistema Modbus RTU cuenta con un sistema de Error de envío y el TCP/IP no.(Figura 49)

Figura 49

Codificación del Modbus TCP/IP



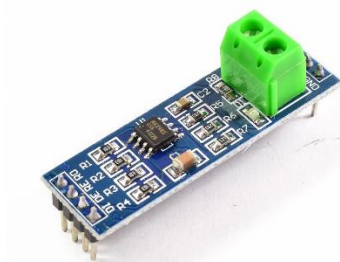
Nota: De Modbus Messaging On TCP/IP Implementation Guide V1.0b. Modbus Organization. 2006

- **Módulo convertidor TTL a RS 485**

Debido al condicionamiento de señal del Arduino due para captar y procesar las señales brindadas por los sensores de Flujo YF-201 y el sensor ultrasónico HC-SR04, el Arduino Due se configura como el Esclavo de la comunicación y el PLC TM221CE16R de Schneider el Maestro quien solicite información al Arduino Due.

Figura 50

Módulo convertidor TTL a RS 485



Nota: De Modulo Max485 Conversor RS485 a Serial TTL. (<https://naylampmechatronics.com/conversores-ttl/62-conversor-rs485-a-serial-ttl.html>)

El módulo Max485 de la Figura 50 conversor de la señal serial TTL al bus de transmisión de datos del protocolo de comunicación RS485, permite la comunicación entre el Microcontrolador Arduino con equipos industriales por medio del chip Maxim MAX485, con el protocolo RS485 se establecen 3 tipos de comunicación el simplex, half-duplex y full

dúplex, ideal para transmitir a altas velocidades sobre largas distancias (35Mbit/s hasta 10m y 100Kbit/s en 1.2km) en medio de canales ruidosos debido a la señal diferencial del protocolo del bus de transmisión. (Naylamp Mechatronics, s.f.)

Las especificaciones técnicas del módulo se detallan en la Tabla 15, diferenciando los voltajes de alimentación, el tipo de comunicación, la velocidad de transmisión y la distancia máxima de alcance.

Tabla 15

Características del Módulo Max RS485

Especificaciones Técnicas	Descripción
Voltaje de Alimentación	5V DC
Corriente de Operación	500 uA
Chip Conversor	MAX 485
Tipo de Comunicación	Half-Duplex
Velocidad Máxima	10Mbit/s (a 12m)
Distancia Máxima de alcance	1.2 km (a 100Kbit/s)
Topología de Red	Multipunto
Dispositivos conectados	32 (1 maestro+31 esclavos)

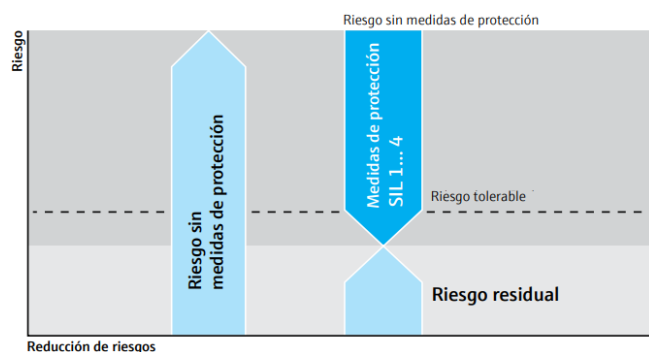
Nota: Adaptado de Modulo Max485 Conversor RS485 a Serial TTL.

2.1.11 Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS)

El riesgo en la industria es la combinación de la probabilidad de que ocurra un evento peligroso y las consecuencias que causa, llegando a afectar la seguridad de las personas, el medio ambiente y los equipos del proceso, para minimizar estos riesgos se implementan estrategias de diseño seguro, mantenimiento preventivo, automatización, capacitación y los Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS), cuyo objetivo principal es reducir los riesgos a niveles aceptables a través de controles de seguridad, basados en el enfoque de la reducción de Riesgo ALARP (As Low Reasonably Practicable), que significa tanto como sea razonablemente posible. (IEC 61511)

Figura 51

Identificación de Riesgos y Medidas de Protección

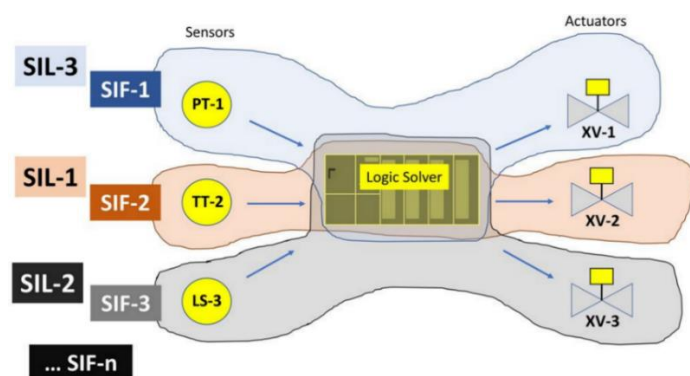


Nota: De Seguridad Funcional – SIL. Sistemas instrumentados de seguridad en la industria de procesos. Endress+Hauser.

El sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) es un conjunto de sensores, lógicas de control y elementos de acción diseñados para detectar y mitigar riesgos en los procesos industriales, como muestra la Figura 51 la Identificación de los riesgos es indispensable, compuesto por una o varias SIF; Funciones Instrumentadas de Seguridad, que ejecutan acciones específicas para prevenir los incidentes. La confiabilidad de una SIF se mide mediante el Nivel de Integridad de Seguridad, que clasifica la probabilidad de falla en demanda en niveles del SIL 1 al SIL 4, siendo el SIL 4 el más seguro, pero menos común en la industria de los procesos. El SIL se determina a partir del análisis de los riesgos y define los requisitos de diseño, mantenimiento y pruebas para asegurar la reducción del riesgo a niveles aceptables.

Figura 52

Nivel Instrumentado de Seguridad y el SIF



Nota: De Función Instrumentada de Seguridad. Seguridad Funcional. (<https://safetyandsis.com/es/funcion-instrumentada-de-seguridad/>)

Como se observa en la Figura 52, la Función Instrumentada de Seguridad, se encuentra en la capa de protección de los procesos, un SIS engloba diferentes funciones instrumentadas de seguridad SIF, a las cuales se les asigna un nivel de protección SIL (1, 2, 3 o 4), basándose en metodologías especificadas en la IEC 61508 o IEC 611511.

- **Nivel de Seguridad Integral SIL**

El SIL indica el nivel de reducción de riesgos que se debe de aplicar a la Función Instrumentada de Seguridad SIF, para reducir estos o que sean tolerables, según la IEC 61508/611511 definen los sistemas SIL con 4 niveles discretos basados en la Probabilidad de Falla en Demanda (PFD) para cada SIF, el cual tiene asociada a un factor de reducción de riesgo (RRF).

Dependiendo de la Operación se tendrán en cuenta los modos en baja y alta demanda, en el cual un sistema de seguridad no se necesita más de una vez al año, y es el más utilizado en las industrias, mientras que el segundo, hace referencia a la utilización constante de la Función de seguridad o por lo menos una vez cada hora, este modo es aplicable a los sistemas o máquinas que requieran vigilancia constante (industria de fabricación).

Tabla 16

Tabla del Nivel de Seguridad Integral

SIL	PDF	Factor de Reducción de Riesgo(1/PFD)	Disponibilidad de Seguridad(1-PFD)
4	$\geq 10^{-5} \text{ a } 10^{-4}$	$> 10000 \text{ a } \leq 100000$	$> 99.99 \text{ a } \leq 99.999$
3	$\geq 10^{-4} \text{ a } 10^{-3}$	$> 1000 \text{ a } \leq 10000$	$> 99.9 \text{ a } \leq 99.99$
2	$\geq 10^{-3} \text{ a } 10^{-2}$	$> 100 \text{ a } \leq 1000$	$> 99 \text{ a } \leq 99.9$
1	$\geq 10^{-2} \text{ a } 10^{-1}$	$> 10 \text{ a } \leq 100$	$> 9 \text{ a } \leq 99$

Nota: Adaptado de Seguridad Funcional – SIL. Sistemas instrumentados de seguridad en la industria de procesos. Endress+Hauser.

En tanto a las medidas de protección de acuerdo a la ISA-84/IEC 61511 proponen la implementación de capas de protección para asegurar que, en caso de fallas en los sistemas,, otras capas puedan intervenir para mitigar el riesgo, el cual incluyen desde el Sistema Básico de Control de Procesos (BPCS), alarmas, el sistema instrumentado de

seguridad, dentro de los cuales se encuentran, el sistema de parada de emergencia, la función instrumentada de prevención, el sistema de mitigación y las respuestas de emergencia de la planta y la comunidad (Figura 53).

Figura 53

Capas de Protección del Sistema Básico del Control de Procesos

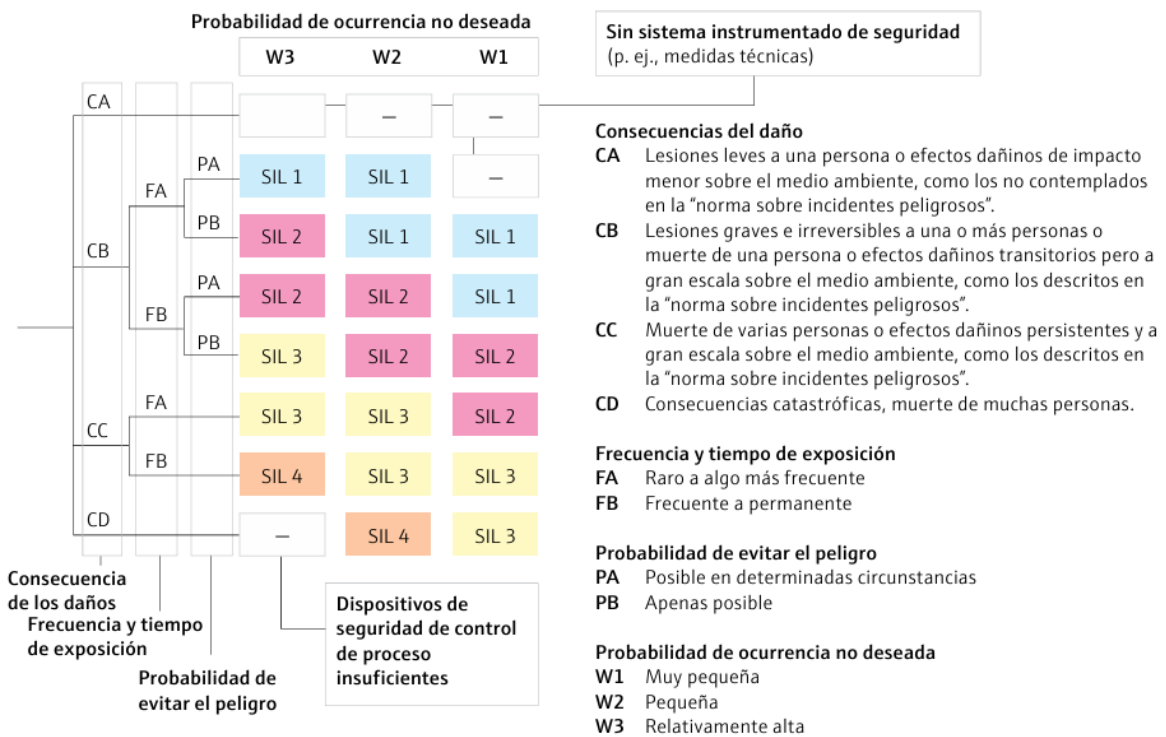


Nota: De Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS). Joan Garcín. 2007

Según la ISA/ IEC 61511-3 (2003), en de la determinación del Método de Nivel de Seguridad Integral del gráfico del Riesgo Calibrado proporciona el esquema General, en donde consideran las consecuencias del daño, frecuencia y tiempo de exposición y la probabilidad de evitar el peligro, basándose en el método de la Figura 54.

Figura 54

Método Gráfico del Nivel de Seguridad Integral



Nota: De Seguridad Funcional – SIL. Sistemas instrumentados de seguridad en la industria de procesos. Endress+Hauser.

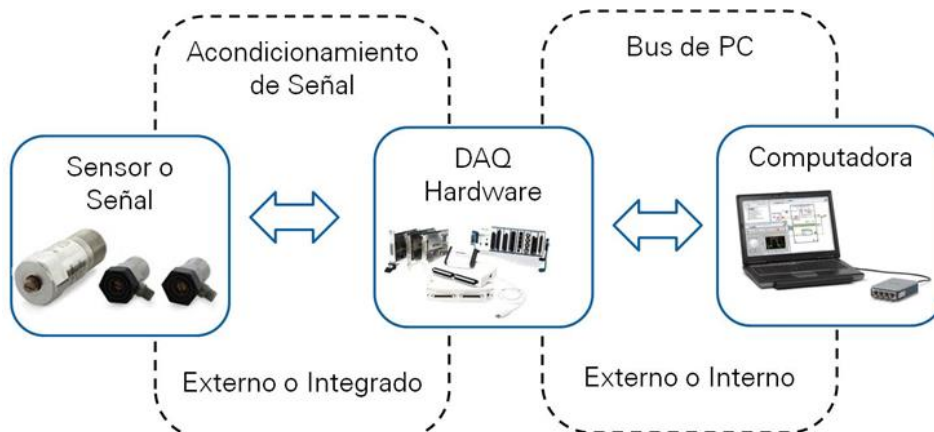
2.2 Marco Conceptual

- Sistema de adquisición de datos

Son procesos que sirven para medir fenómenos naturales a través de sensores y una tarjeta de adquisición de datos y hardware especializado en la adquisición de data y el uso de una computadora (PC) que a través de un software especializado pueda registrar los datos obtenidos por el sensor a través de un procesamiento de ellas, se presenta un esquema detallado en la Figura 55. (National Instruments)

Figura 55

Sistema de Adquisición de Datos



Nota: De National Instruments.

- **Muestreo de Señales**

Es el proceso de convertir una señal continua o analógica en el tiempo en una secuencia discreta mediante la toma de muestras a intervalos regulares. La frecuencia de muestreo debe cumplir con el Teorema de Nyquist para evitar el Aliasing en el cual la Frecuencia de Muestreo (F_s) debe ser mayor o igual al doble de la frecuencia máxima del sistema original ($f_s \geq 2f_{m\acute{a}x.}$)

- **Rango y Span**

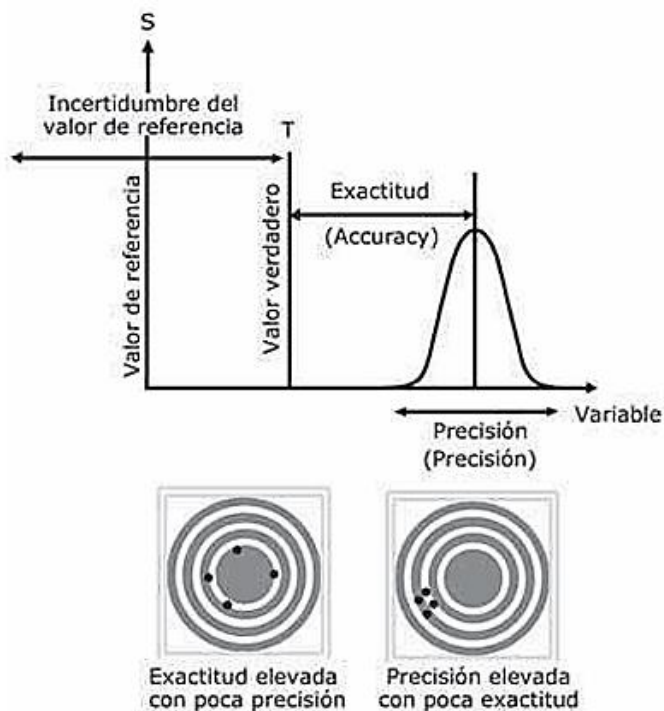
El rango es la región entre los límites máximos y mínimos que un sensor puede medir, detallando en esta la importancia de los valores mínimos (LRV) y el valor máximo (URV) y a la diferencia numérica entre estos dos valores se les denomina Span.

- **Exactitud y Precisión**

Una de las principales diferencias entre las definiciones de exactitud o Accuracy, mientras esta es la cualidad del instrumento de media a dar lecturas próximas al valor verdadero de la magnitud medida y la precisión es la cualidad por la que tiende a dar lecturas muy próximas más unas de las otras. (Figura 56)

Figura 56

Diferencia Entre Exactitud y Precisión



Nota: Instrumentación Industrial. Antonio Creus Solé. 2011.

- **Histéresis**

Es el fenómeno en el cual la salida de un sistema depende no solo de la entrada actual, sino también de entradas pasadas. Se presenta, en sensores regularmente para la medición de señales de activación y desactivación, siendo esta la diferencia al incrementar la señal de entrada de un valor mínimo a un valor máximo y, cuando se decrementa de un valor máximo a un mínimo valor sobre el mismo rango.

- **Set Point**

El punto de ajuste de control deseado para donde se controla la variable del proceso y se aplican los modelados para la correcta performance.

Capítulo III.

3. Desarrollo del trabajo de investigación

A continuación, se detallarán los criterios de diseño, requerimientos y configuraciones de hardware para la implementación de un prototipo del sistema de control en tanques de nivel de agua.

3.1 Diseño e Implementación del Sistema de Tanques

El diseño e implementación de un sistema de tanques en un entorno automático es un proceso fundamental para garantizar el control eficiente de variables como el nivel, caudal del fluido. Este sistema es ampliamente utilizado en industrias como la química, alimentaria, textil y de tratamiento de agua, donde la gestión precisa de los niveles almacenados y distribuidos es esencial para la operación segura.

En base al desarrollo del sistema de tanque de nivel de agua de la Figura 8, se ha desarrollado el plano de tuberías e instrumentación (P&ID), el cual define la interconexión de equipos, sensores, actuadores y el flujo del proceso para garantizar un control automático. La implementación de este sistema sigue un esquema estructurado que permite la supervisión y automatización de variables clave, como el nivel y el flujo del fluido dentro del tanque.

3.1.1 Diseño del Diagrama P&ID

Para el diseño del diagrama P&ID, los sensores de flujo y nivel tienen un papel fundamental en la adquisición de los datos del proceso, el sensor de flujo YF-201 se encarga de medir el caudal del fluido a través de señal de pulso o el Efecto Hall, mientras que el sensor ultrasónico HC-SR04, proporciona una medición continua del nivel dentro del tanque sin contacto directo con el líquido.

El sensor industrial 873-D18AV800-D4 será el encargado de enviar las señales al PLC TM221CE16R, quien centraliza la gestión del sistema, recibiendo señales de los sensores y ejecuta las acciones de control, la válvula de control de Nivel TFV4-306, el cual

ajustará el nivel del Tanque TK 003, de acuerdo con los valores establecidos en el control PID no interactivo.

Para la comunicación y supervisión del sistema, se han implementado los protocolos Modbus TCP/IP y RTU, permitiendo la integración del PLC con las plataformas de monitoreo y los dispositivos empleados en el sistema de nivel de tanques.

- **Lazo 100:**

En este lazo del proceso encontramos elementos de captación de los sensores de flujo (FE, Flow Element) de tipo turbina, al Indicador (FIC, Flow indicator Controler) Arduino Due que mide el flujo del fluido y con la capacidad para controlar dicha variable ajustando la válvula u otro actuador necesario.

- **Lazo 101:**

El lazo realiza el control de nivel por medio del PLC TM221CE16R (LIC, Level Indicator Controler), que capta las señales de los sensores (LE, Level Element) y aplica un control ON-OFF al tanque superior TK-002 y un control PID no interactivo sobre la válvula de control (LV, Level valve).

- **Comunicación Modbus RTU / RS 485**

El P&ID está diseñado para la comunicación Maestro/Esclavo del Protocolo de comunicación Modbus RTU entre el PLC y el Arduino Due, debido a que este enviará la señal procesada de pulsos de los sensores de Flujo YF 201, y la señal del Sensor HC-SR04 que son señales de fácil captación por medio del Arduino Due debido al uso de interrupciones.

El P&ID se ubica en el Anexo D, en donde se plasman los detalles e inclusión de accesorios mecánicos a implementar para el sistema de tanques de nivel de agua.

3.1.2 Diseño del Sistema Mecánico

El diseño mecánico del sistema de nivel de agua es tomado en referencia al sistema de tanque de Nivel en Cascada, identificando el siguiente sistema de la Figura 8, en el cual se destaca el tanque de nivel TK 003, siendo este tanque el principal para la implementación del algoritmo de control PID no interactivo.

Para la implementación del sistema de tanque de Nivel en Cascada se elabora a partir de los accesorios necesarios para el funcionamiento óptimo de la electrobomba y el impulso del fluido, evitando el fenómeno de cavitación producida en la bomba periférica debido a un incorrecto arranque inicial.

Se realiza el diseño del sistema, considerando las alturas y recorridos de las tuberías, identificando cada proceso como Tubería de Bombeo, Tubería Inferior, Tubería de Control y Tubería de Desfogue, uniones universales, válvulas de bola, válvula Check y otros accesorios.

Tabla 17

Descripción de los Elementos Mecánicos

Elemento	Cantidad
Codos 1/2"	2
Codos 1"	5
Unión T 1"	1
Unión universal 1/2"	3
Unión universal 1"	8
Válvula Bola 1/2"	2
Válvula Bola 1"	1
Válvula Check 1"	2
Caudalímetro	2 (plano) + 1 (add)
Electroválvula	1
Contratuerca macho 1/2"	2
Contratuerca ajustadora	2
Jebe contratuerca	2
Tapón de tubería de cebado	1

Nota: adaptado de normas APA 7ma edición.

Tabla 18

Tuberías según Flujo de Agua

Tuberías	Pulgadas
Tubería Bombeo	1
Tubería Inferior	1
Tubería control	1/2
Tubería Desfogue	1/2

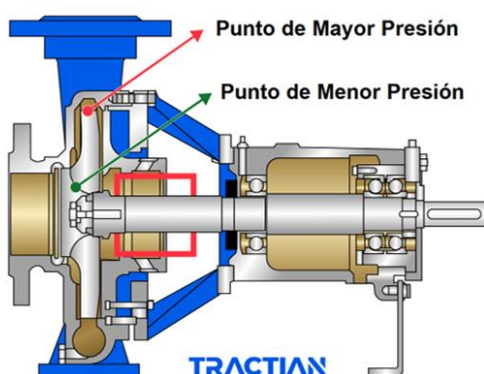
Nota: adaptado de normas APA 7ma edición.

- **Exposición de motivos**

Para el arranque inicial de la bomba periférica, se diseña el sistema para la protección, mantenimiento y funcionalidad, a fin de evitar el fenómeno de cavitación en el sistema impulsor, producida por la ausencia de fluido y el movimiento rotacional del impulsor generando el cambio de temperatura y la presión interna, produciendo burbujas de vapor o gas teniendo como consecuencia el sobre esfuerzo del impulsor de la electrobomba, como lo mostrado en la Figura 57.

Figura 57

Zona de Cavitación en el Impulsor

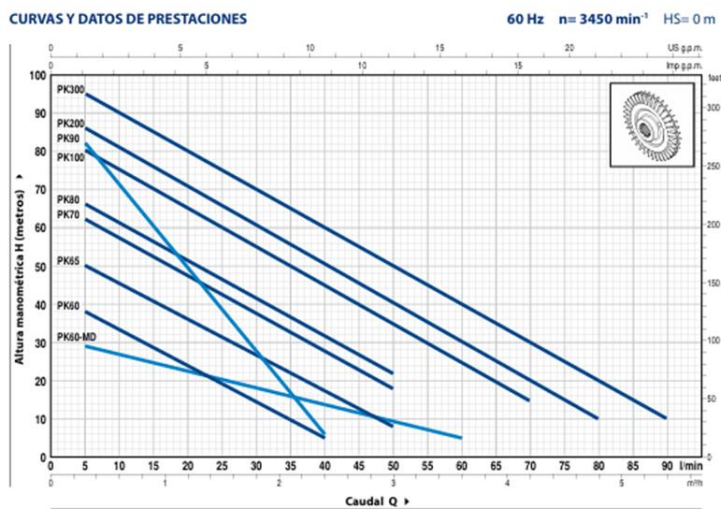


Nota: De ¿Qué es la cavitación y sus efectos?. Tractian. 2022 (<https://tractian.com/es/blog/que-es-la-cavitacion-industrial>)

Teniendo en cuenta las características de la placa de la bomba periférica y el diseño e implementación con una altura de succión despreciable $H_s=0$, Se tiene la siguiente curva característica de la Bomba en la Figura 58.

Figura 58

Curva Característica de Caudal Q vs Hmán de la Bomba PKM 60



Nota: De Electrobombas con rodete periférico. Pedrollo The spring of life.

Considerando la pendiente negativa de la curva de la altura manométrica (Hman) Vs Caudal (Q), se tiene una dependencia inversa entre el caudal y la altura considerando un caudal que varía entre los [5, 40] L/min y la Hman entre los [40, 5]m, y la Figura 59 como referencia.

Figura 59

Equivalencia Relacional de Q vs Altura (H) de la Bomba PKM 60

MODELO		POTENCIA (P ₂)			Q	m³/h															
Monofásica	Trifásica	kW	HP	▲		l/min	0	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90	
PKm 60®	PK 60®	0.37	0.50	IE2	H metros	40	38	33.5	29	24	19.5	15	10	5							
PKm 60®-MD	PK 60®-MD	0.37	0.50			30	29	26.5	24.5	22.5	20.5	18	16	13.5	9.5	5					
PKm 65	PK 65	0.50	0.70			55	50	45.5	40.5	36	31	27	22	17	8						
PKm 70	PK 70	0.60	0.85	65		62	57	52	47	42	37	32	27	18							
PKm 80	PK 80	0.75	1	70		66	61	56	51	46	41	36.5	31	22							
PKm 90	PK 90	0.75	1	90		82	71	60	49	38	27	17	5								
PKm 100	PK 100	1.1	1.5	85		80	75	70	65	60	55	50	45	35	25	15					
PKm 200	PK 200	1.5	2	90		86	81	76	71	65.5	60	55	50	40	30	20	10				
–	PK 300	2.2	3	100		95	90	85	80	75	70	65	60	50	40	30	20	10			

Q = Caudal H = Altura manométrica total HS = Altura de aspiración Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO9906 Grado 3B.

Nota: De Electrobombas con rodete periférico. Pedrollo The spring of life.

Para el sistema de alimentación de la electrobomba periférica dependerá de la presión del líquido almacenado en el tanque TK-001, se tiene la referencia de Caudal Q, en la tubería de bombeo de ½”.

Medidas del tanque de alimentación: 0.4m x 0.34m x 0.453m

Tubería de entrada a la bomba: $D_e = 21.336 \text{ mm}$, $D_i = 15.799 \text{ mm}$ (Toda la tubería se mantiene con una sección constante desde el desfogue del repositorio hasta la entrada a la bomba).

- **Selección de los componentes mecánicos**

Para la implementación del sistema mecánico de tanques, se realizó la elección de los accesorios para la protección del sistema y evitar los problemas mencionados en la Exposición de Motivos.

Válvula check: Son válvulas de bloqueo automático diseñados para direccionar el fluido en un solo sentido, previniendo los contraflujos por diferencias de presión o drenado de tuberías en cuanto se realice el mantenimiento de las líneas de las tuberías. (Grupo Hidráulica, 2023)

Válvula de paso: Es un elemento mecánico que permite controlar el flujo parcialmente o total del fluido, el cual nos permite regular el flujo de líquido y gases que pasan por este elemento, en el caso del diseño a implementar de las tuberías se consideró como elemento para evitar acumulación de fluido entre la válvula check y la bomba.

Unión universal: Este elemento nos permitirá conectar los diferentes elementos hidráulicos, y permitirá realizar cambios en caso de mantenimiento o deterioro de elementos que tienen contacto directo con el fluido, este elemento se consideró para cada elemento eléctrico y mecánico, que favorecerá el mantenimiento del sistema completo, sin la necesidad de cambiar todo el sistema de tuberías para reemplazar un componente.

Los elementos utilizados fueron diseñados con los diámetros correspondientes a los indicados en la Tabla 17.

3.1.3 Diseño del Sistema Eléctrico

El diseño del sistema eléctrico se fundamenta en la distinción de los circuitos de fuerza y control por parte del PLC M221 de Schneider. Estos sistemas de fuerza y control se presentan los Anexos E y F.

Como parte del detalle de los Diagramas de Fuerza y de Control del sistema se realizó la configuración de alimentación del Arduino Due, las entradas y salidas del PLC M221 con alimentación de 24VDC, que son necesarios para la activación de las bobinas de salida y entradas de activación manual como son los pulsadores, la configuración del Relé DPDP (Doble polo doble tiro) de activación de 24VDC que a través de su bobina permitirá el paso de la Linea y fase para la activación de la bobina KM del contactor que presenta un voltaje de Activación de 220VAC.

En aplicación del diseño del sistema eléctrico se realizó el tablero QG, para el conexionado de la alimentación del sensor analógico Allen-Bradley 873M-D18AV800-D4, los sensores de flujo YF-201, el sensor ultrasónico HC-SR04 y el sistema de comunicación Modbus RTU mediante el MAX RS485.

Figura 60

Ubicación de los Equipos Eléctricos y Shield de Comunicación Modbus RS-485



Nota: Elaboración Propia.

El mayor consumo de los equipos dispuestos en la Figura 60, la conexión a la bomba, se tendrá un mayor consumo de corriente, para ello, se tiene la siguiente Figura 61:

Figura 61

Consumo de Potencia Eléctrica de la Bomba PKM 60

CONSUMO EN AMPERIOS

MODELO	TENSION		
	220 V	110 V	127 V
Monofásica			
PKm 60*	2.6 A	5.5 A	5.3 A
PKm 60*-MD	3.2 A	6.5 A	6.0 A
PKm 65	5.8 A	11.6 A	10.0 A
PKm 70	5.2 A	10.8 A	10.0 A
PKm 80	6.5 A	13.0 A	12.0 A
PKm 90	6.0 A	12.0 A	11.0 A
PKm 100	9.0 A	18.0 A	16.5 A
PKm 200	12.0 A	24.0 A	22.3 A

Nota: De Electrobombas con rodete periférico. Pedrollo The spring of life.

Para la bomba la corriente de consumo a 220V es de 2.6A, cabe señalar los consumos adicionales de los equipos, aumentarán la capacidad de consumo total del circuito implementado, por lo tanto, la elección del cable se realizará de acuerdo con la Figura 62:

Figura 62

Medida del Calibre del Cable de Conexión

Amperaje que soportan los cables de cobre					
Nivel de temperatura:	60°C	75°C	90°C	60°C	
Tipo de aislante:	TW	RHW, THW, THWN	THHN, XHHW-2, THWN-2	SPT	
Medida / calibre del cable	Amperaje soportado			Medida / calibre del cable	Amperaje soportado
14 AWG	15 A	15 A	15 A	20 AWG	2 A
12 AWG	20 A	20 A	20 A	18 AWG	10 A
10 AWG	30 A	30 A	30 A	16 AWG	13 A
8 AWG	40 A	50 A	55 A	14 AWG	18 A
6 AWG	55 A	65 A	75 A	12 AWG	25 A
4 AWG	70 A	85 A	95 A		
3 AWG	85 A	100 A	115 A		
2 AWG	95 A	115 A	130 A		
1 AWG	110 A	130 A	145 A		
1/0 AWG	125 A	150 A	170 A		
2/0 AWG	145 A	175 A	195 A		
3/0 AWG	165 A	200 A	225 A		
4/0 AWG	195 A	230 A	260 A		

Nota: De ¿Qué tipos de cables eléctricos existen? Masvoltaje. (<https://masvoltaje.com/blog/analisis-de-productos/tipos-de-cables-electricos-que-existen>)

Según la lista de requerimientos del Anexo G, los equipos para el sistema de control se utilizará la conexión con cables apantallados.

3.1.4 Implementación del Sistema de Tanques

Finalizada la etapa del diseño los diseños mecánicos, eléctricos y de instrumentación especificados previamente, se realizó la implementación de la planta piloto del sistema de tanques de nivel de agua con los tanques de Alimentación TK-001, Tanque superior TK-002 y el tanque TK-003, el conexionado en el tablero de control QG, implementados en el riel Din, para el sistema de fuerza y control con el PLC M221 Schneider, Arduino Due, la bomba periférica PKM60 de Pedrollo y los sensores de nivel y flujo. En el Laboratorio de Investigación en Inteligencia Artificial, Automatización, Robótica y Control (LIIAARC), de la Facultad de Ingeniería Mecánica, se implementó el sistema completo como se muestra en la Figura 63, por lo que, con este sistema se simulará el control de procesos y automatización.

Figura 63

Implementación del Sistema de Tanques de Nivel de Agua



Nota: Elaboración Propia.

3.2 Adquisición de los Parámetros de la Planta

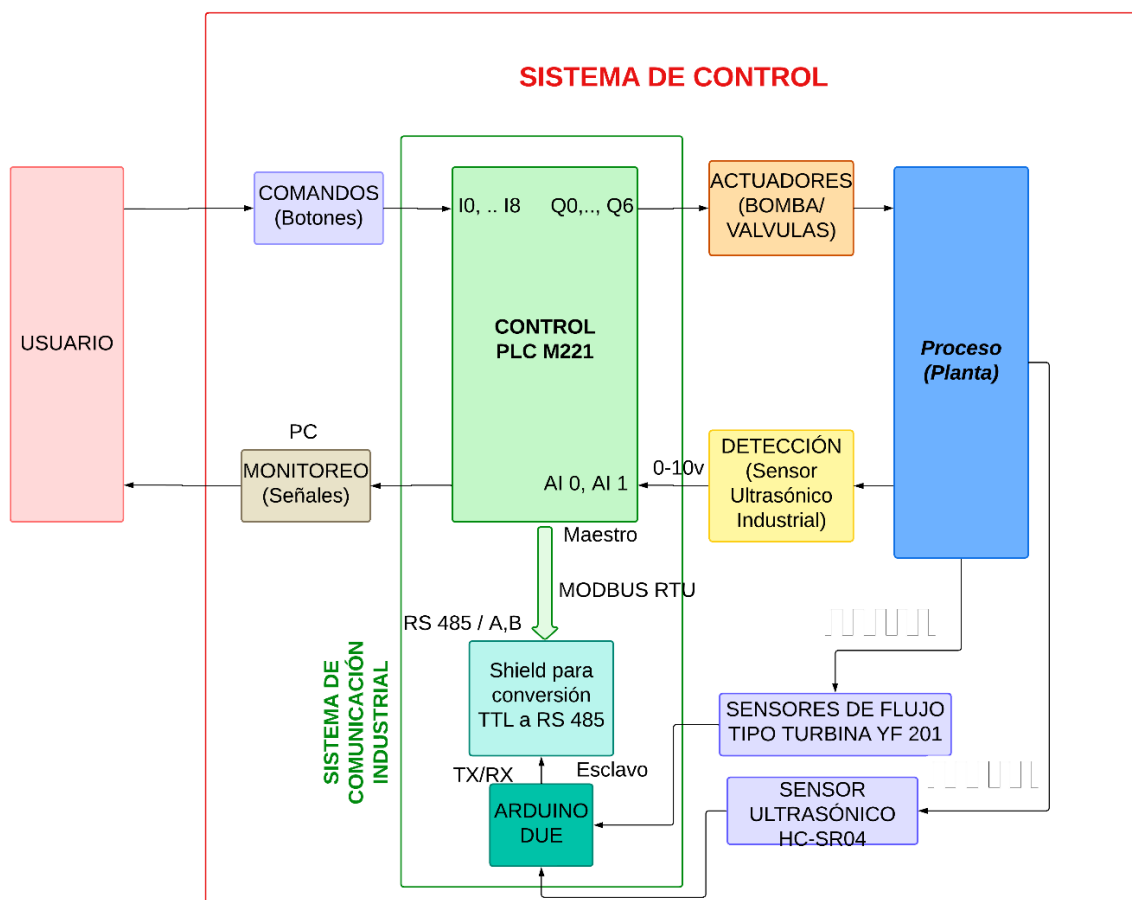
La identificación de los parámetros de la planta es un aspecto fundamental para el desarrollo y validación del sistema de control. Para el desarrollo del sistema de Adquisición de los parámetros de la Planta se realizarán los procedimientos para una correcta adquisición de datos de la planta del sistema de tanques de nivel de agua. Se detallará el sistema de control de procesos del sistema de tanques de nivel de agua.

3.2.1 Diseño del Sistema de Control

Como lo especificado en el diagrama P&ID del sistema de tanques de nivel de agua, se muestran las líneas de Flujo para el control y monitoreo del sistema de tanques, el control de procesos se realizará según la Figura 64.

Figura 64

Sistema de Control y Monitoreo del Sistema de Tanques



Nota: Elaboración Propia.

- **Componentes del Sistema de Control**

PLC M221 (Schneider Electric): Funciona como el Maestro del Modbus RTU, es el encargado de la toma de decisiones y ejecución de algoritmos de control sobre la planta, a través de los comandos de solicitud al Arduino DUE ordena emitir en forma de datos los valores de los sensores de flujo y ultrasónico para el procesamiento de la señal que captan en forma de pulsos.

Arduino DUE: Actúa como el Esclavo del Modbus RTU, es el que recibe las órdenes del PLC M221 para emitir los datos solicitados por el controlador industrial, el Arduino adquiere los datos de los sensores de nivel y de flujo al PLC.

Comunicación Modbus RTU sobre RS-485: Se utiliza la comunicación entre el PLC M221 y el Arduino DUE para la transmisión de datos de los sensores de flujo y nivel, por lo tanto, se realizará la implementación de un módulo convertidor TTL a RS 485 para traducir las señales en forma de pulsos, que son procesadas por el Arduino Due y enviadas mediante el protocolo RS 485 al PLC M221.

Sensores y actuadores: Los sensores ultrasónicos 873M-D18AV800-D4 y HC-SR04 miden el nivel de agua en los tanques, el sensor de flujo YF 201 es el encargado de monitorear el caudal del sistema de tuberías, y la aplicación del sistema de control por el PLC serán aplicadas a la bomba periférica de Pedrollo PKM60 y a la válvula TFV4-306.

3.2.2 *Diseño Electrónico de Placa de Circuito Impreso para Adquisición de Datos*

Del detalle del diseño del sistema de control para el sistema de tanques de nivel de agua se basa en el control por parte del PLC M221 de Schneider y el Arduino DUE comunicados por medio del protocolo de comunicación Modbus RTU/ RS 485 mediante la aplicación de un shield de conversión de señal serial TTL a RS 485 utilizando el módulo Max 485.

En la Figura 65, se muestra el sistema de conexionado de los sensores de Flujo YF-201, el sensor ultrasónico HC-SR04 y el módulo MAX 485 para la comunicación serial TTL a Modbus RTU/ RS 485 conectados mediante el puerto hembra RJ 45.

Las pruebas de comunicación se realizaron mediante el Software de programación y configuración del PLC M221 EcoStruxure Machine-Expert Basic con la asignación de la codificación del mensaje del protocolo RS 485.

El diseño de la PCB se realizó en el software Altium Designer, para la elaboración de la placa compacta que permita manejar la lectura de los sensores y poder transmitir las señales en forma de datos del Arduino DUE al PLC M221. En la Figura 66 se presenta el diseño esquemático de la Placa PCB, el cual consiste en una placa Shield para Arduino DUE.

Figura 65

Diagrama de Conexión para el Diseño de PCB – Integración de Sensores con Arduino Due Y PLC TM221CE16R vía RS-485

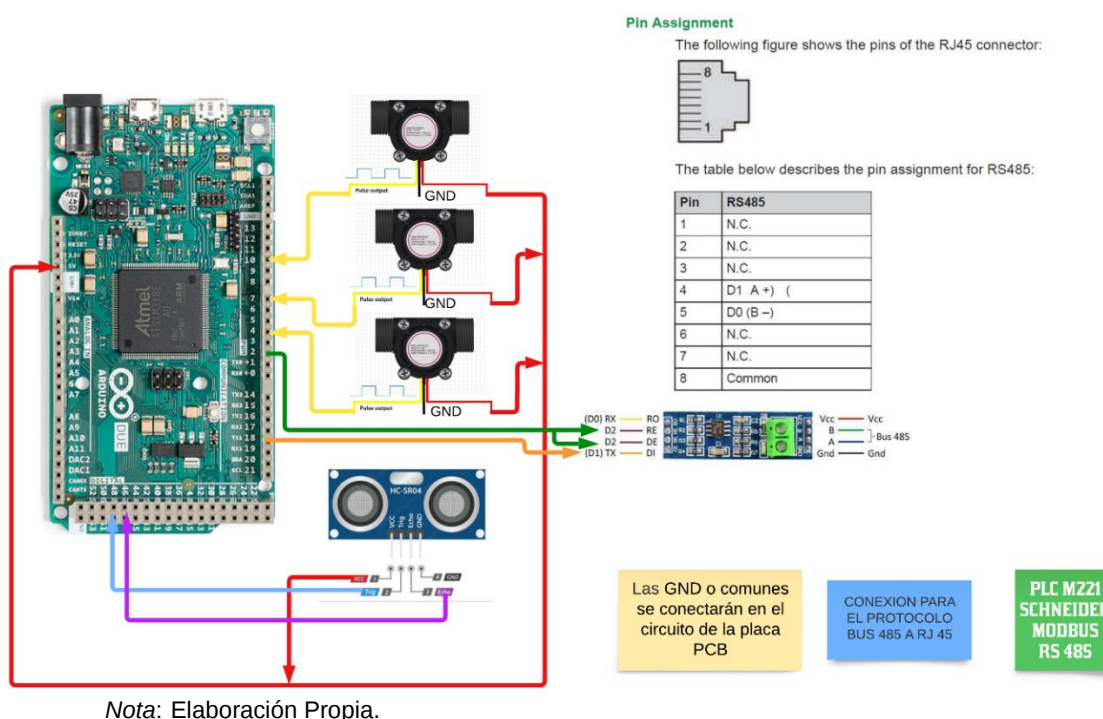
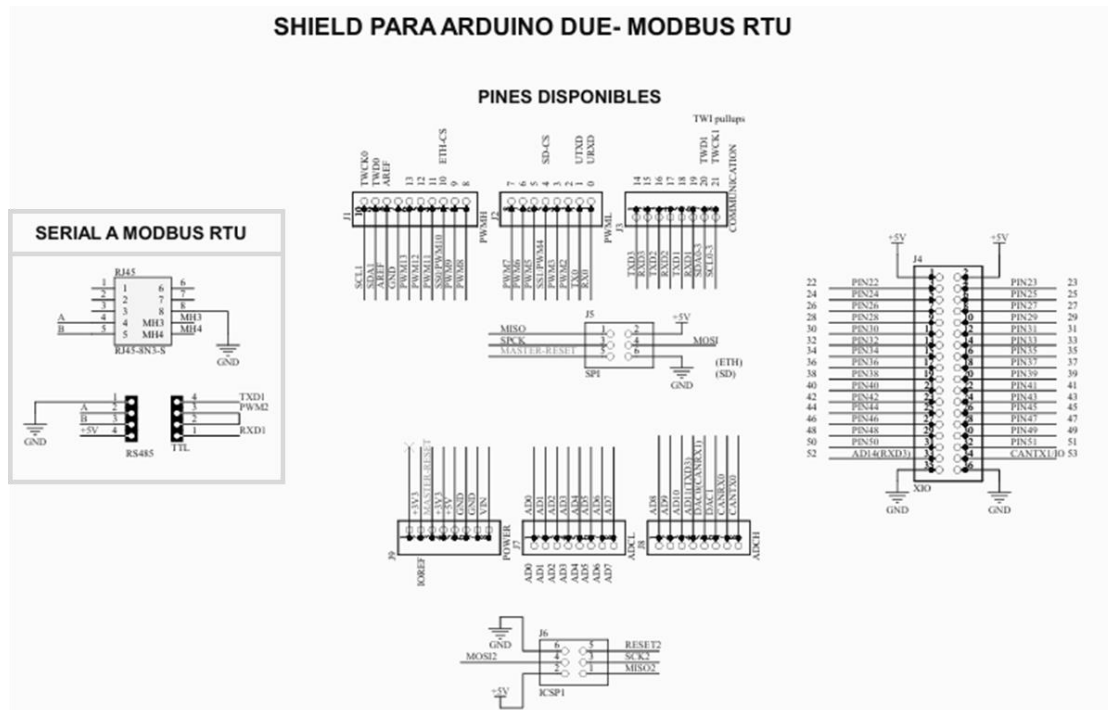


Figura 66

Shield para Arduino Due – para Comunicación Modbus RS-485



Nota: Elaboración Propia.

La implementación de la PCB constará de la inclusión del MAX 485 y el RJ 45, para el montaje en el tablero de control QG y las respectivas pruebas de control, concluida la fase del diseño del sistema electrónico de la PCB convertidor de señal TTL a RS 485, como se muestra en la Figura 67.

Figura 67

Implementación y Comunicación del PLC TM221CE16R y Arduino Due



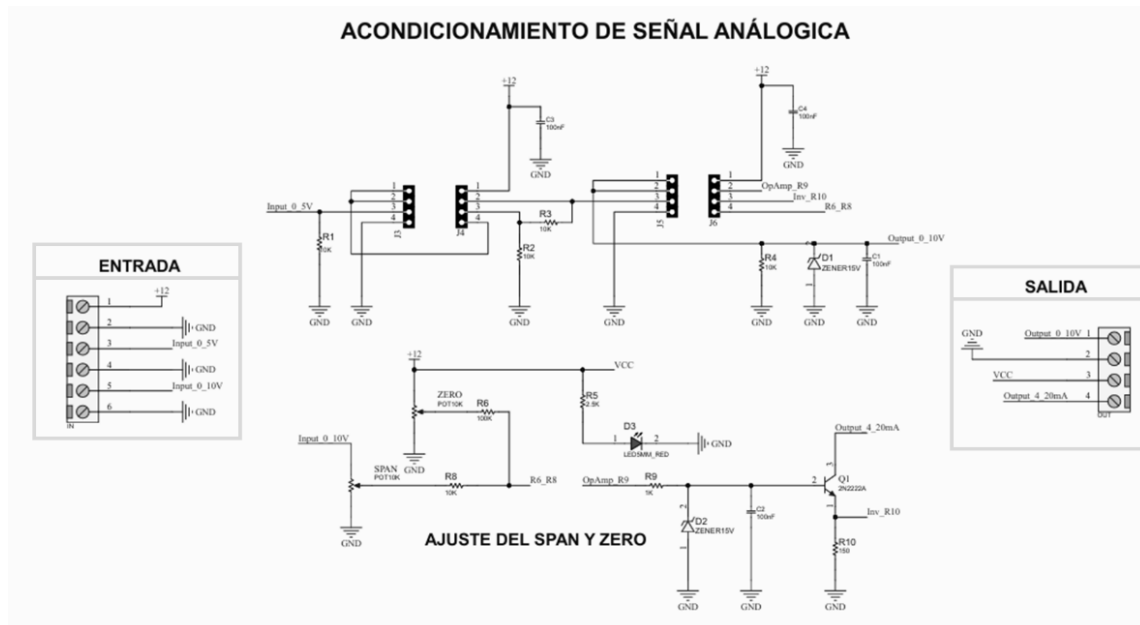
Nota: Elaboración Propia.

- **Diseño de Placa Conversora de 0-5V a 0-10V mediante el LM358**

Para la adquisición de datos de los cambios en la válvula TFV4-306 se realizará mediante el NI DAQ USB 6008, con las características detalladas en la Tabla 14, sin embargo, como lo especificado para el sistema de adquisición de datos el NI DAQ 6008 presenta salida analógica de 0-5V, y la válvula tiene el voltaje de control de 0-10V, para ello se realizó el diseño del circuito de conversión de señal analógica mediante el LM358, se detalla el diseño en la Figura 68.

Figura 68

Diseño de Placa PCB para Acondicionamiento de Señal Analógica



Nota: Elaboración Propia.

- **Sistema de Control en el PLC M221 Schneider en el Software EcoStruxure Machine Expert - Basic**

La implementación del sistema de control en el Software industrial proporcionado por Schneider Electric, se detallarán las características aplicadas al sistema de control:

En la Figura 69, se detallan la comunicación Modbus RTU y la configuración de las direcciones y configuración del Maestro y Esclavo, se etiquetan los Tags en el PLC las variables enviadas por el Arduino Due, cuyo código se especifica en el Anexo B,

En las Figura 70 y 71, se observa la conversión de los datos y el factor de escalamiento del sensor HC-SR04 y los sensores de flujo Yf-201, el cual se envió como un valor entero en el Arduino con un desplazamiento de 2 decimales, cuyo valor fue 100.

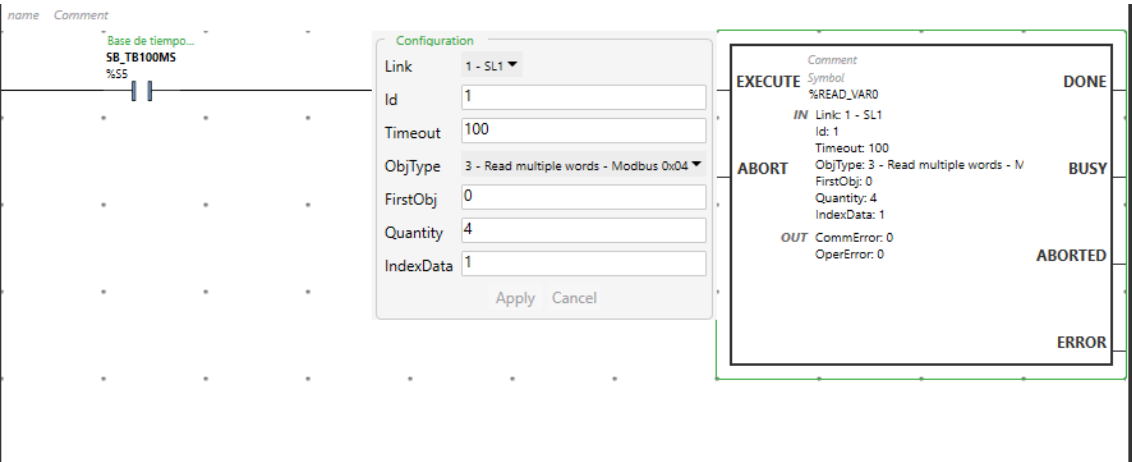
En las Figuras 72 y 73, se muestra el detalle del escalamiento del sensor industrial y el escalamiento según la forma $distancia = distancia\ inicial - (m \cdot voltaje + b)$, con valores de cálculo experimental de $m = -0.2164$ y $b = 221.182$ y la distancia inicial configurada a 52cm desde la medición de nivel muy baja hasta el nivel más alto, en donde se elabora la función interna para SCALE para facilitar la aplicación de un bloque de código simplificado.

En la Figura 74, se muestra las condiciones de funcionamiento para la activación de la bomba, basada en el control ON-OFF, de activación a un nivel muy bajo captada por el sensor ultrasónico HC-SR04, el cual indica un nivel bajo como ausencia de agua en el tanque y el PLC procede a encender la bomba mediante la salida digital asignada a esta, en este caso los rangos de activación y desactivación de la bomba fueron como nivel mínimo 5cm de líquido y 25cm de nivel máximo, a tener en cuenta que el sistema de adquisición de datos se encenderá a un nivel máximo de líquido en el tanque TK-002.

Configuración y direccionamiento del Mobdus RTU del PLC M221 como Maestro.

Figura 69:

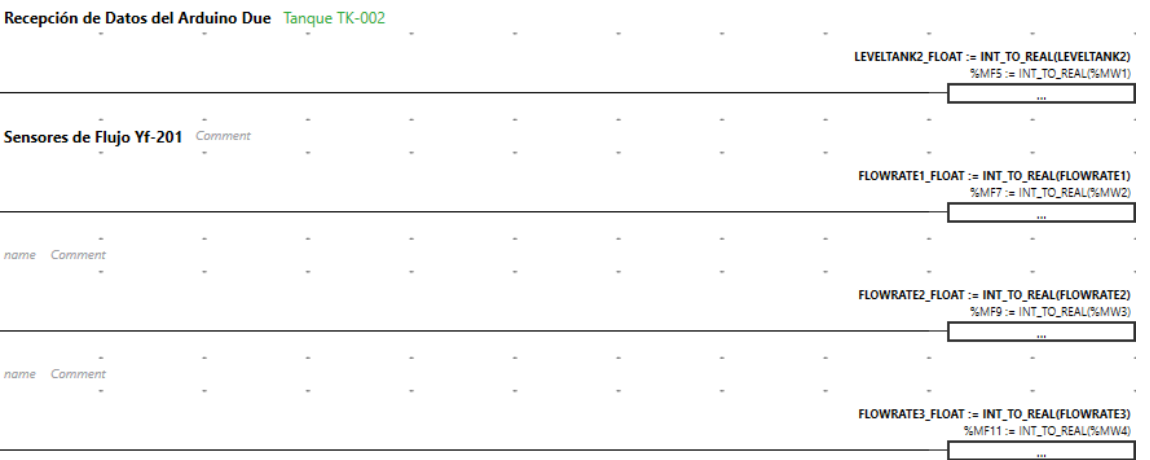
Configuración y direccionamiento del Mobdus RTU del PLC M221 como Maestro



Nota: Elaboración Propia.

Figura 70

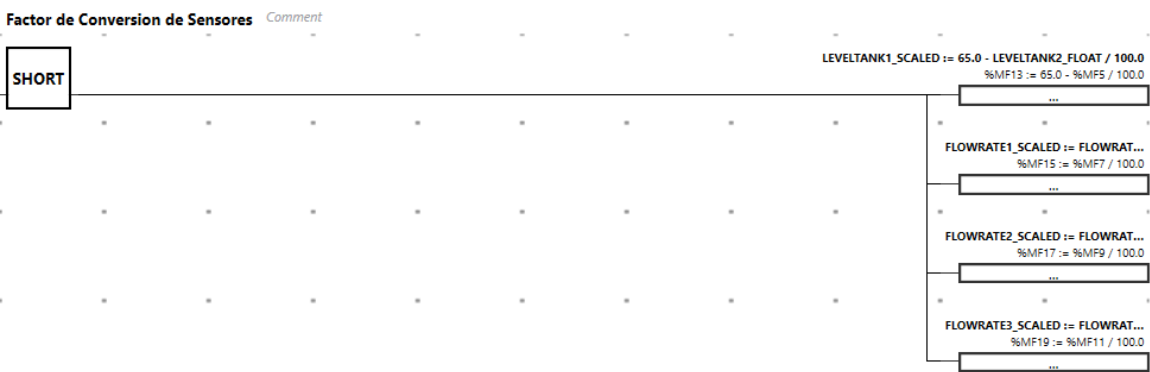
Envío de Datos de los Sensores del Esclavo (Arduino Due) al PLC M221



Nota: Elaboración Propia

Figura 71

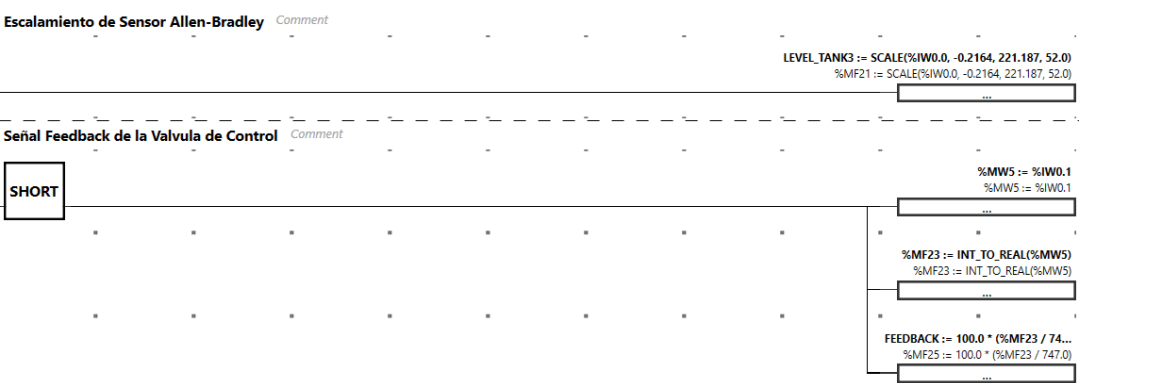
Factor de Conversión de Señal aplicado al Arduino Due



Nota: Elaboración Propia

Figura 72

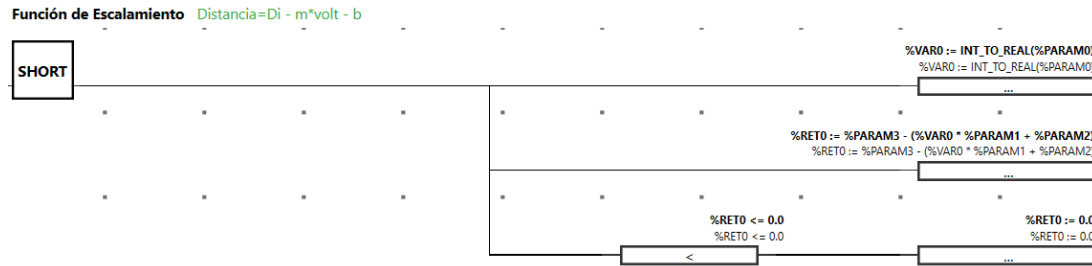
Escalamiento del Sensor industrial de Allen-Bradley y señal Feedback de la Válvula de control



Nota: Elaboración Propia

Figura 73

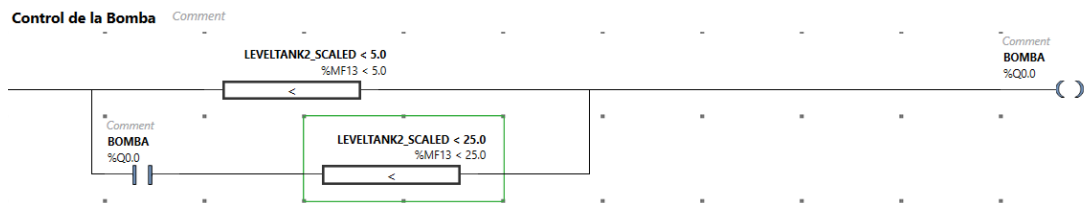
Función de escalamiento de la señal analógica a nivel del tanque TK-002



Nota: Elaboración Propia

Figura 74

Lógica de funcionamiento del control ON-OFF de la bomba



Nota: Elaboración Propia

3.2.3 Adquisición de Parámetros desde LabVIEW

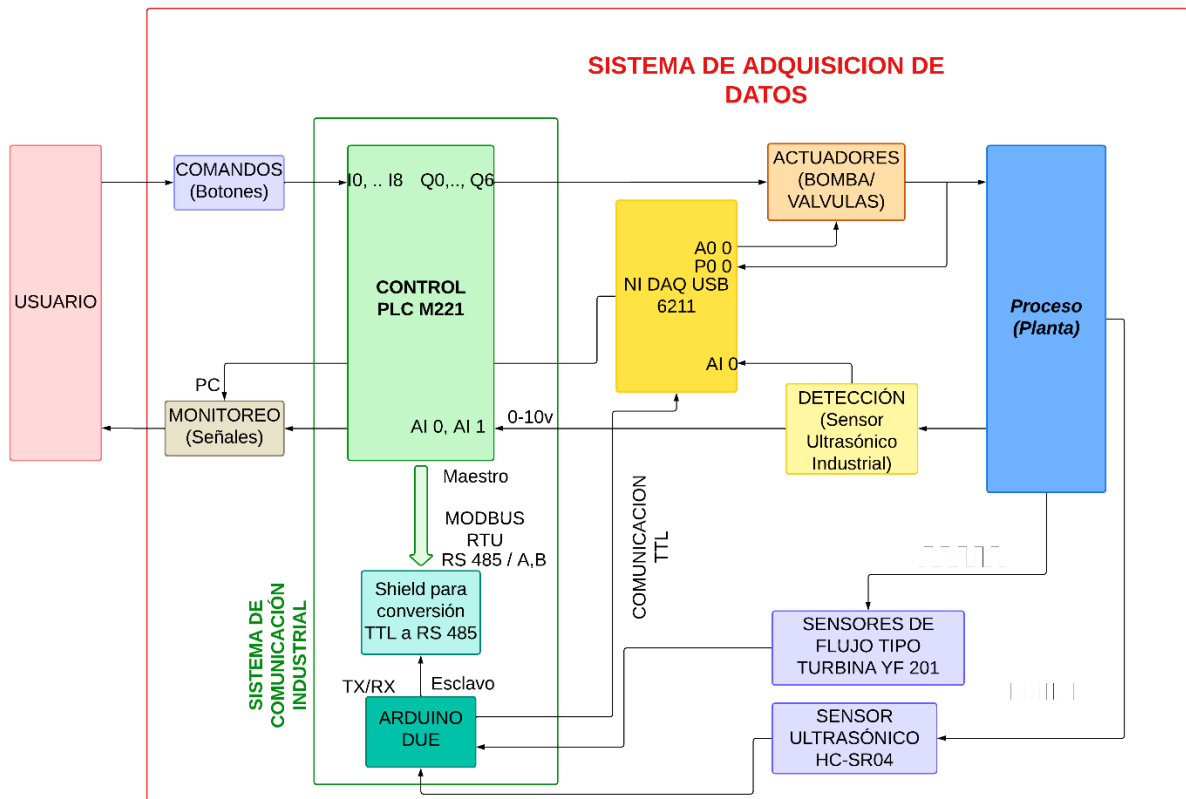
El sistema de adquisición de datos para la Parametrización de la Planta del sistema constará en dos etapas debido a los cambios en el nivel y el ajuste de la válvula de control TFFV4-306, por lo que, se tienen las siguientes consideraciones para el sistema de adquisición de datos:

El sistema tiene un tiempo de estabilización considerable, por lo que, el tiempo de muestreo considerado no incurrirá a los problemas de Aliasing mencionados anteriormente y para aprovechar las características de los NI DAQ 6008 y 6211 se realizará con un tiempo de muestreo $T_s = 0.1s$.

El sistema de adquisición de la Figura 75, indica el sistema implementado mediante el NI DAQ USB 6211, favoreciendo la flexibilidad, alta tasa de actualización y sobre todo un complemento necesario para el diseño del control PID no interactivo.

Figura 75

Diagrama del Sistema de Adquisición de Datos



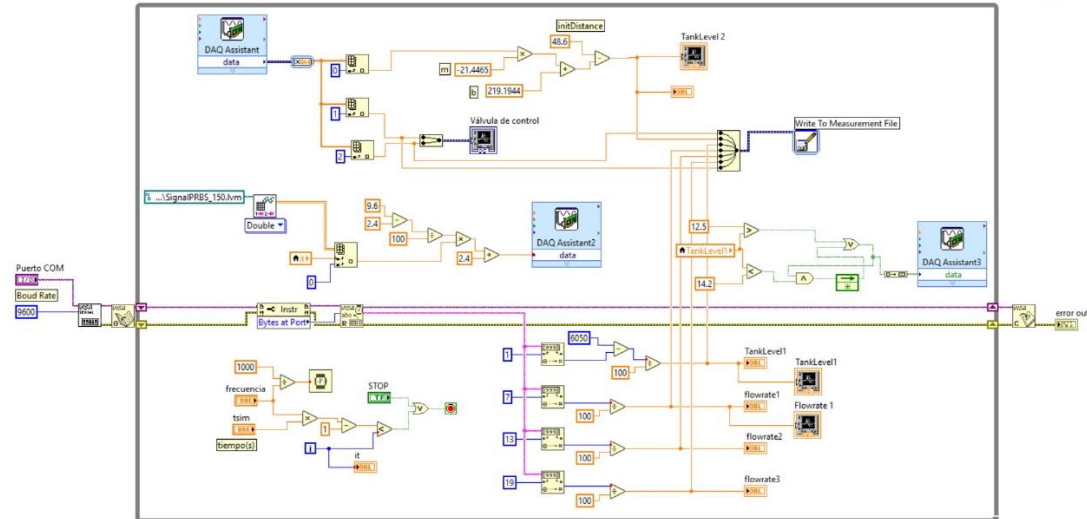
Nota: Elaboración Propia.

Consideraciones:

Se aplica una señal digital de 24V sobre la bobina de 24 VDC del Relé de la salida del PLC para la activación de la bomba PKM60, elevando el nivel del tanque superior TK-002 hasta el nivel referencial de un 80% de capacidad o 25cm , y este a través del sistema de tuberías llevará el flujo hacia la válvula de control y la planta del tanque TK-003, se muestra el detalle en la Figura 76 la adquisición de datos del sistema completo mediante el software de simulación LabVIEW, se muestra la comunicación serial del Arduino DUE y el NI DAQ USB 6211, y el detalle del escalamiento del sensor ultrasónico industrial para el NI DAQ USB 6211 considerando las características de resolución de la tarjeta, el envío de los datos de los flujos de los sensores YF-201, el sensor ultrasónico HC-SR04,

Figura 76

Sistema de Adquisición de Datos en LabVIEW y Comunicación entre DAQ USB 6211 y Arduino Due

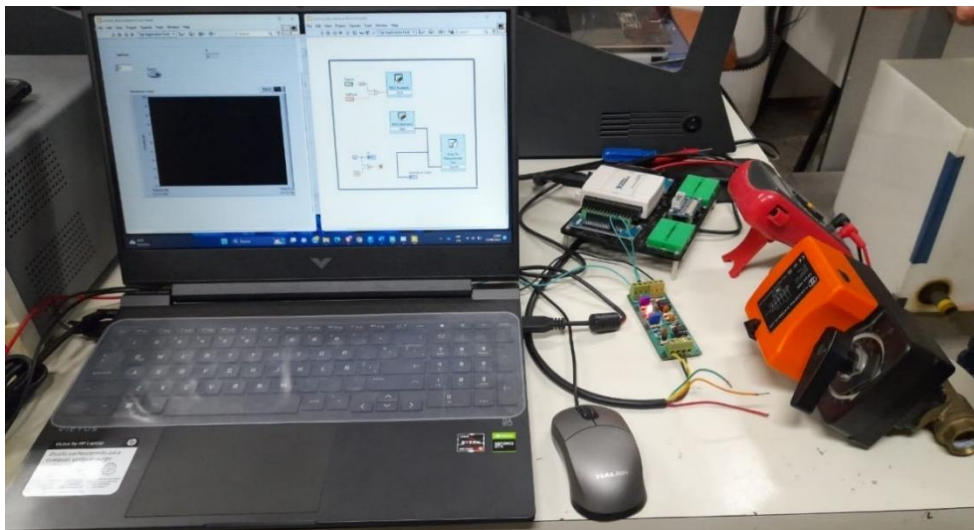


Nota: Elaboración Propia.

La válvula TFV4-306 se encuentra en estado de apertura pues la adquisición de datos para la generación de la F.T de la válvula de control se realizará mediante el NI DAQ 6008, de igual forma ante el cambio de la señal Escalón $u(t)$, como se muestra en la Figura 77, se aprecia el sistema de Adquisición de Datos con la PC para el monitoreo y la tarjeta diseñada como convertor de señal de 0-5V a 0-10V.

Figura 77

Implementación del Sistema de Adquisición de Datos DAQ USB 6008



Nota: Elaboración Propia.

3.2.4 Obtención del Sistema de Transferencia de la Planta

A partir del sistema de adquisición de datos del sistema de control utilizando el software LabVIEW, se realiza el procesamiento de los datos en el software de Matlab en donde se procesan las señales de control y monitoreo de los actuadores y sensores implementados en el sistema de tanques de nivel de agua.

- **Monitoreo de señales del sistema de Control**

El sistema de adquisición de datos se realizó en cuanto a la señal de activación de la bomba periférica y los cambios presentes en los flujos y niveles de los tanques TK-002 y el tanque TK-003 el cual es el sustento para la obtención del sistema de Transferencia para la aplicación del control PID no interactivo.

A continuación, se muestran las señales de los sensores implementados en el sistema de tanques de nivel:

En la Figura 78 se observa la activación mediante el impulso $u(t)$ asignada al actuador de la válvula de control TFV4-306.

En la Figura 79 se observa el cambio en el nivel de líquido captada por el sensor HC-SR04, procesada por el Arduino Due y enviada la señal por medio de comunicación serial TTL al NI DAQ USB 6211, el cual actúa en rangos desde el nivel inferior a nivel superior.

En la Figura 80 se observa el cambio en el flujo del sensor YF-201, el cual indica el flujo en volumen por litro enviada por la Bomba Pedrollo PKM 60 hacia el tanque TK 002 desde el tanque de alimentación.

En la Figura 81 se observa el cambio en el flujo del sensor YF-201, que fluye por el sistema de tuberías en donde se encuentra la válvula de control TFV4-306, observándose que el flujo disminuye cuando el tanque TK-002 disminuye el nivel de líquido en forma aproximada a una curva lineal.

En la Figura 82, se observa el sensor de flujo ubicado en la salida del tanque TK-003, el cual se considerará como el flujo de salida para la implementación de una perturbación en el sistema de control.

Figura 78

Señal Impulso de Amplitud 10V

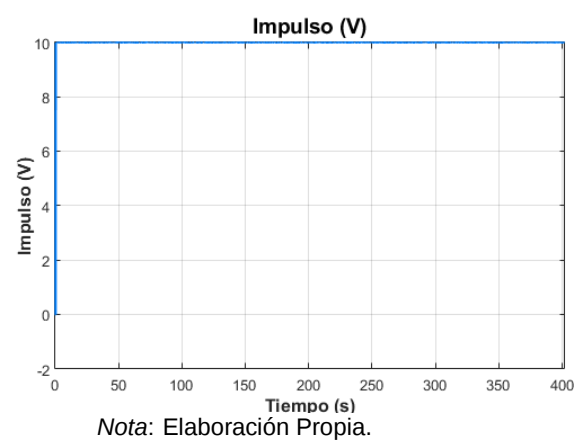


Figura 79

Nivel del Tanque Superior TK 002

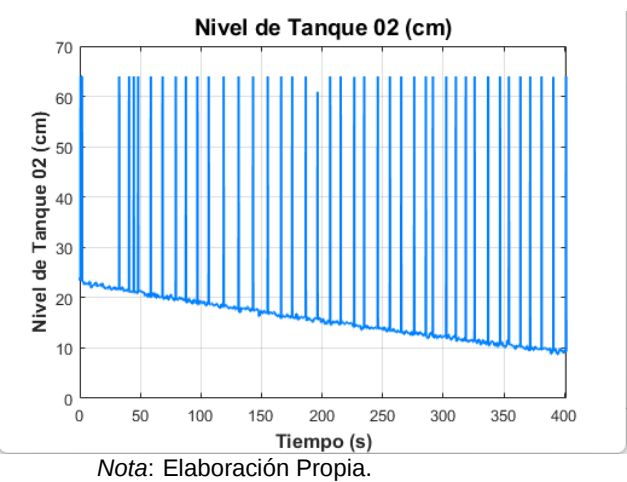


Figura 80

Flujo en la Tubería de Alimentación por la Bomba PKM 60

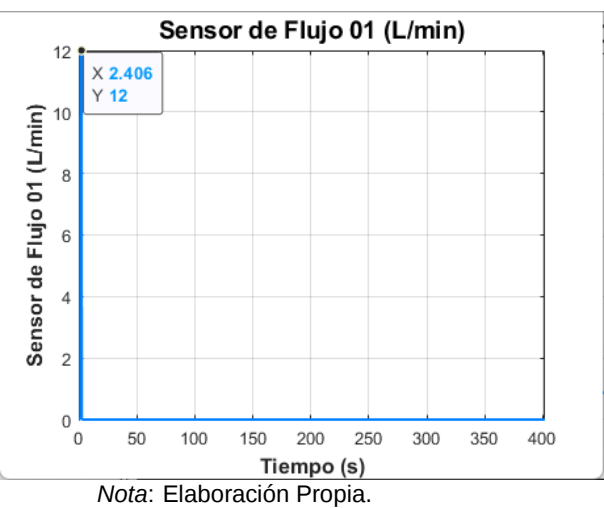
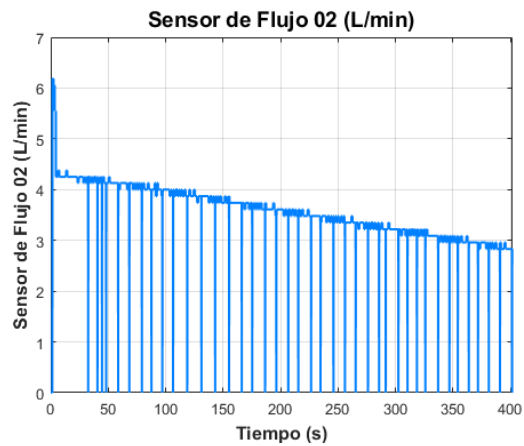


Figura 81

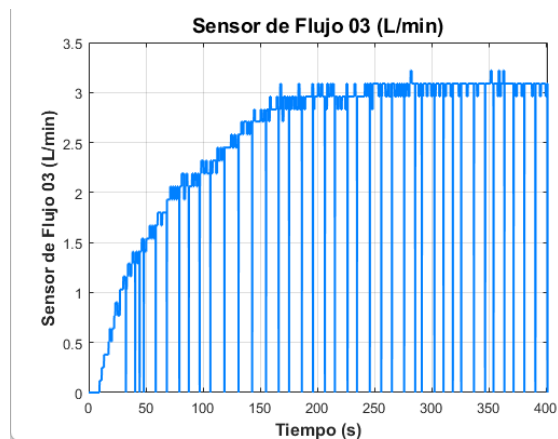
Sensor de Flujo de la Tuberia de Control



Nota: Elaboración Propia.

Figura 82

Flujo de la Tuberia de Desfogue del Tanque TK 003



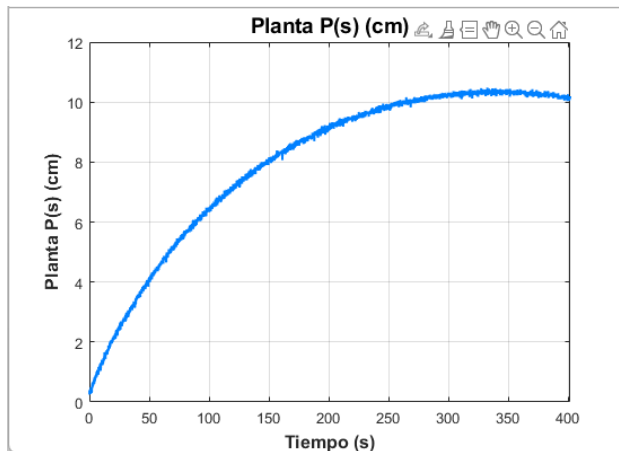
Nota: Elaboración Propia.

El cambio en la planta se visualiza en la Figura 83, este sistema será procesada en el software Matlab para la obtención de la Función de Transferencia de la Planta ($P(s)$), se puede apreciar un sistema aproximado al primer orden.

En forma similar considerando la respuesta de activación y ajuste de la válvula de control, la Figura 84, detalla el comportamiento lineal de la válvula TFV4-306.

Figura 83

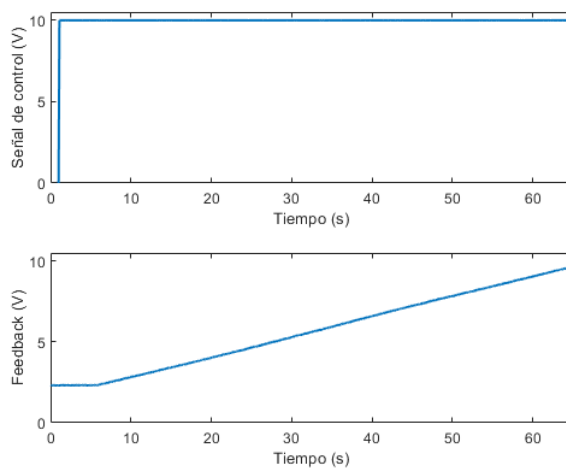
Señal del Sensor Industrial del Cambio de Nivel en cm



Nota: Elaboración Propia.

Figura 84

Señal de Control y Cambio en la Apertura de la Válvula de Control



Nota: Elaboración Propia.

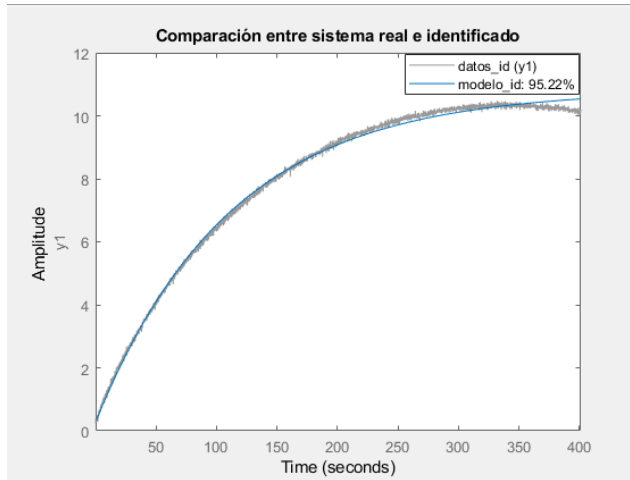
- **Obtención de las Funciones de Transferencia**

Como lo detallado en la Figura 85, el sistema de transferencia de la planta constará de la implementación de la Ganancia de la válvula de control y el cambio en el nivel de la Planta.

Para lo cual se detallan los resultados del procesamiento de los datos con un tiempo de muestreo de $T_s = 0.1s$, $t_{sim} = 400s$.

Figura 85

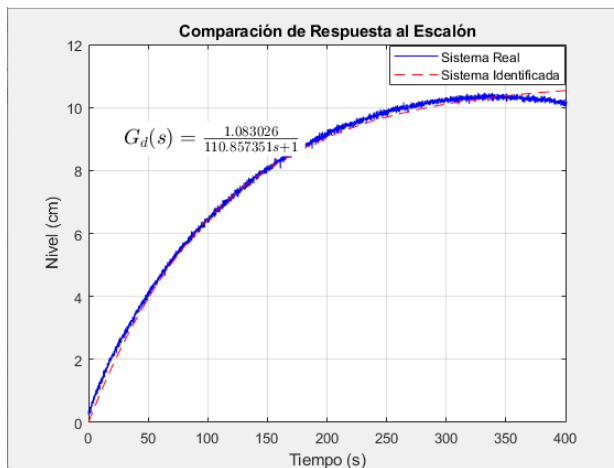
Modelo Aproximado de 1er Orden de la Planta de Nivel



Nota: Elaboración Propia.

Figura 86

Comparación del Sistema Identificado y el Sistema Real



Nota: Elaboración Propia.

La generación a la aproximación de una F.T., del sistema Identificado y el sistema real se presenta en la Figura 86, de primer orden genera la siguiente planta que tiene una reacción de sobre impulso de 0.08 unidades.

$$P(s) = \frac{1.08306}{110.8574s + 1} \quad (27)$$

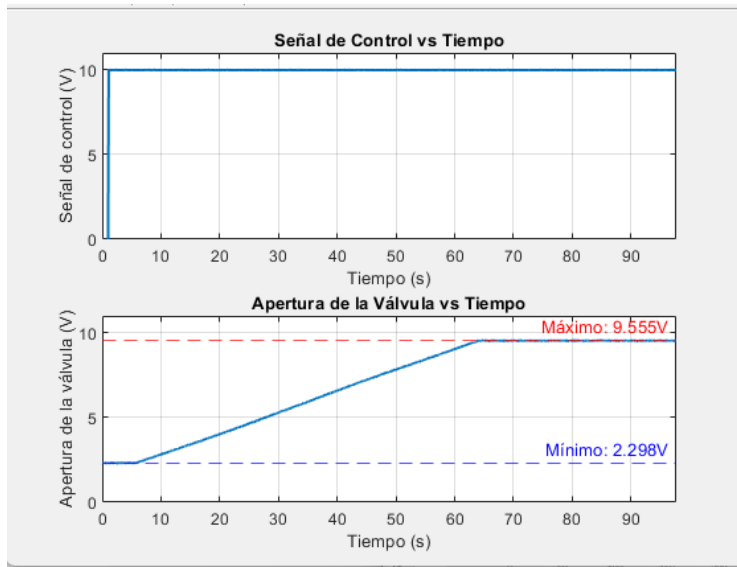
$$P(s) = \frac{0.009770}{s + 0.009021} \quad (28)$$

En la Figura 87, representa en el tiempo la respuesta de la válvula ante una señal de control u_c de 0-10V, el cual muestra una apertura con una dinámica lineal en relación

con el voltaje de control y el voltaje de la Apertura de la Válvula, en la investigación se realiza la aproximación a un sistema de primer orden con retardo de 6s, este sistema se diseña con la finalidad de capturar la dinámica de la válvula que tiene un tiempo de aproximadamente 65s en llegar a la señal de control.

Figura 87

Análisis de la Señal de Control y la Apertura de la válvula en V



Nota: Elaboración Propia.

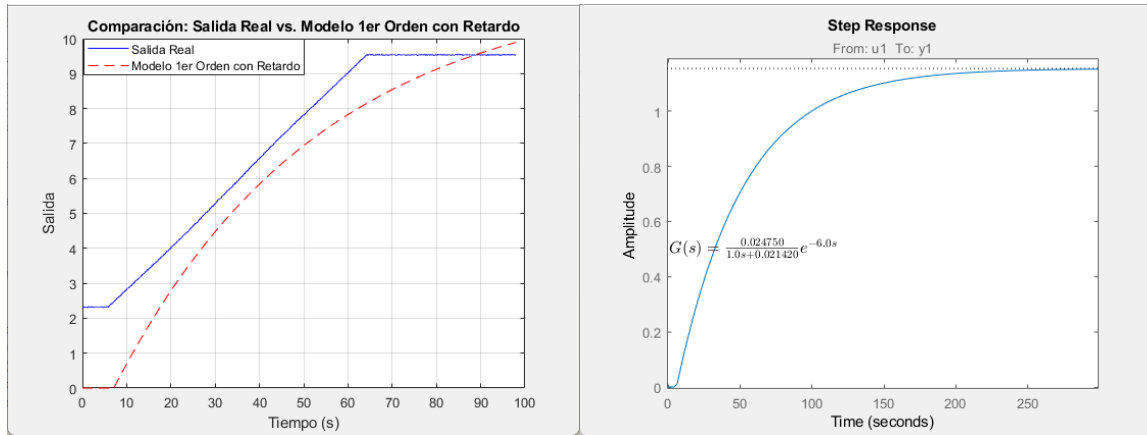
En la Figura 88, se observa la función de transferencia de la válvula con el retardo de 6s y $T_s = 0.1 s$.

$$G_v(s) = \frac{0.024750}{s + 0.021420} e^{-6s} \quad (29)$$

$$G_v(s) = \frac{1.155462}{46.685341s + 1} e^{-6s} \quad (30)$$

Figura 88

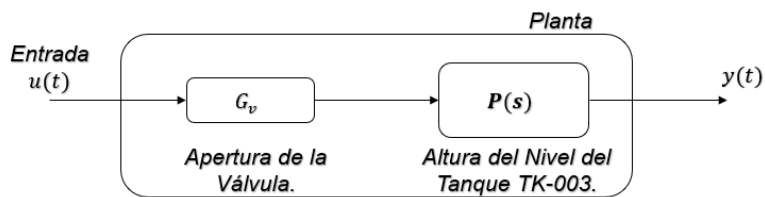
Aproximación al Sistema de 1er Orden de la Apertura de la Válvula de Control



Nota: Elaboración Propia.

Figura 89

Sistema en Lazo Abierto de la Altura y Apertura de la Válvula de Control



Nota: Elaboración Propia.

El sistema presentado en la Figura 89, representa la dinámica del tanque de nivel a lazo abierto, en donde:

Entrada $u(t)$: Es la señal de control, que ajusta la apertura de la válvula, esta señal se implementa de 0-10V a la válvula de control.

G_v : Representa la dinámica de la válvula de control, se caracteriza por presentar el retardo, y una aproximación a la ganancia detallada en la Figura 81, el sustento para la aproximación de la respuesta de la válvula hacia una función de orden uno, es la estabilidad del sistema y las características de tiempo de establecimiento para llegar al 100% de apertura, debido a que la señal de control influye en la posición de apertura no instantáneamente y logra la estabilización de acuerdo al voltaje aplicado y la apertura deseada.

$P_{(s)}$: Representa la dinámica del nivel del tanque TK-003, el cual se detalló en la ecuación de la F.T. 28.

$y(t)$: Es la altura del nivel en el tanque representado en cm.

Como se puede evidenciar el sistema consta de un tiempo muerto o un retardo de tiempo igual a $6s$, y dependiendo de este tiempo se realizará la sintonización por Ziegler Nichols, por lo que, se utilizará según Corripio la aproximación de la función exponencial a un sistema de primer orden propuesta por Padé el cual se detalla en la siguiente F.T, en donde θ es el tiempo muerto del sistema.

$$e^{-\theta s} \approx \frac{1 - \frac{1}{2} \cdot \theta s}{1 + \frac{1}{2} \cdot \theta s} \quad (31)$$

Dada las ecuaciones se procede a realizar la discretización de la planta con un $Ts = 0.1s$ y en la Figura 90 se presenta el detalle de la aproximación, el retardo basado en la ecuación de Padé, el cual resulta mediante el Retenedor de Orden Cero (ZOH) la siguiente ecuación:

$$G_T(Z) = \frac{b_0 \cdot Z^2 + b_1 \cdot Z + b_2}{a_0 \cdot Z^2 + a_1 \cdot Z + a_2} \quad (32)$$

Dando como resultado el valor de los coeficientes como:

$$b_0 = 0 \quad (33)$$

$$b_1 = 1.205 \cdot 10^{-6} \quad (34)$$

$$b_2 = 1.200 \cdot 10^{-6} \quad (35)$$

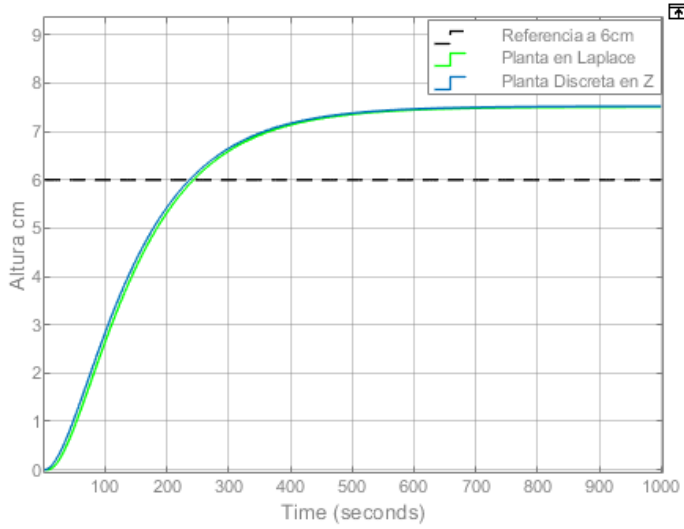
$$a_0 = 1 \quad (36)$$

$$a_1 = -1.9969 \quad (37)$$

$$a_2 = 0.9969 \quad (38)$$

Figura 90

Planta Discretizada mediante el método ZOH



Nota: Elaboración Propia.

3.3 Sintonización de Parámetros por Ziegler Nichols

Con la implementación del sistema se procede a la aproximación de la planta de primer orden especificada en el ítem 2.1.10, en el software de Matlab se realiza la estimación de los parámetros para la generación del controlador PID por Ziegler Nichols.

En la Figura 91 se muestra la metodología utilizada en el sistema ante la aplicación del escalón unitario, la aproximación de Padé para la correcta estimación incluyendo el tiempo muerto en el cálculo de los valores de la ganancia, la constante de tiempo y el retardo considerando el tiempo muerto de 6s, donde K se realizó mediante la ganancia estática de la planta, el retardo L como el punto de máxima pendiente en la recta tangente, de la forma $y = mx + b$; con esto en las intersecciones el $L = -b/m$, y la intersección con el valor de ganancia de la planta $T = (y: final - b)/m - L$.

$$G_p(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls} \quad (39)$$

Entonces la planta aproximada por Ziegler Nichols será con los valores siguientes:

$$K = 1.2513 \quad (40)$$

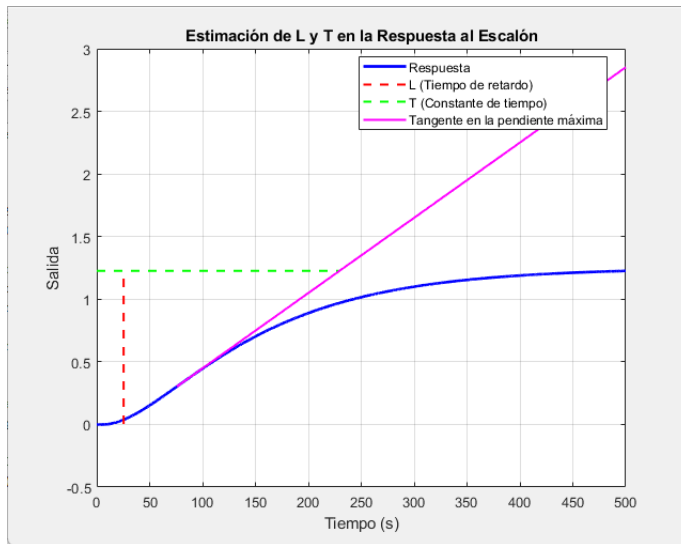
$$T = 204.06s \quad (41)$$

$$L = 25.32s \quad (42)$$

Con dichos parámetros se realiza el cálculo de los parámetros del controlador el cual se basa en la aplicación de la constante de tiempo y el retardo, se presenta la comparación en la Figura 92.

Figura 91

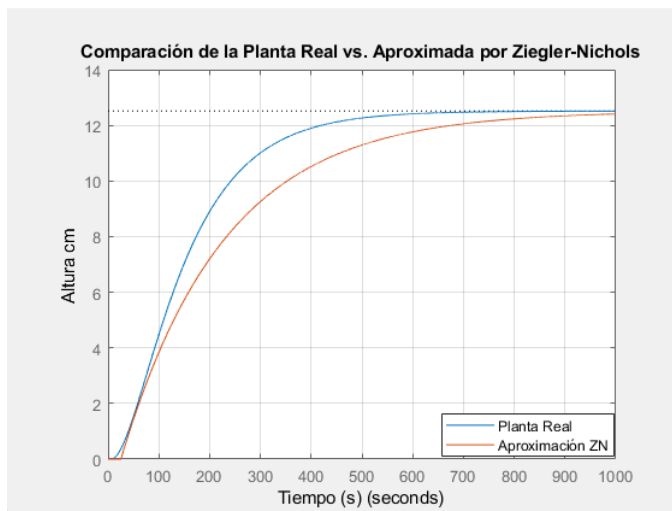
Aproximación de los Parámetros de 1er Orden de Ziegler Nichols



Nota: Elaboración Propia.

Figura 92

Comparación entre Planta Real Y la Aproximada por Ziegler Nichols



Nota: Elaboración Propia.

Para el análisis de la performance del controlador y la utilización del Software de simulación de Matlab, se obtienen las constantes proporcionales, derivativas e integrales que actúan directamente sobre el error. Simultáneamente se realiza la ejecución de la

función del Simulink en el cual permite generar un controlador asociado a las características de respuesta del sistema.

Se muestra en la Tabla 19, el cálculo de los parámetros del controlador PID de Ziegler y Nichols y el ajuste para el mínimo sobreimpulso de CHR para el sistema de referencia de 1er Orden de la aproximación mediante el Ziegler Nichols, el cual se analizará la respuesta en la planta real aproximada.

Tabla 19

Parámetros de los Controladores por Ziegler Nichols y CHR

Tipo de Controlador			
PID_Ziegler Nichols	$Kp = 9.6695$	$Ti = 50.6495$	$Td = 12.6624$
	$Kp = 9.6695$	$Ki = 0.1909$	$Kd = 122.4385$
PID_CHR	$Kp = 4.8355$	$Ti = 204.0600$	$Td = 12.6600$
	$Kp = 4.8355$	$Ki = 0.0237$	$Kd = 61.2180$

Nota: adaptado de normas APA 7ma edición.

$$G_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + s T_d \right) \quad (43)$$

Cabe resaltar que en función a las características de respuesta del sistema se realiza el diseño del controlador PID no interactivo.

$$G_{PIDZN}(s) = 9.6695 \cdot \left(1 + \frac{1}{50.6495s} + 12.6624s \right) \quad (44)$$

$$G_{PIDCHR}(s) = 4.8355 \cdot \left(1 + \frac{1}{204.0600s} + 12.6600s \right) \quad (45)$$

3.4 Diseño del Control PID no interactivo

Con los parámetros analizados según el método de respuesta escolar por Ziegler Nichols, y la aproximación de la planta a un sistema de primer orden con T y L, se realizan los calculos en Matlab de las constantes del sistema de ecuaciones para en diferencias planteada en la ecuación 21:

$$u(k) - u(k-1) = K_c \left[\left(1 + \frac{T_s}{2T_i} + \frac{T_d}{T_s} \right) e(k) - \left(1 - \frac{T_s}{2T_i} + \frac{2T_d}{T_s} \right) e(k-1) + \frac{T_d}{T_s} e(k-2) \right] \quad (46)$$

$$u(k) = u(k-1) + q_0 \cdot e(k) + q_1 \cdot e(k-1) + q_2 \cdot e(k-2) \quad (47)$$

De acuerdo con la propuesta del método de sintonización de Ziegler Nichols y la mejora del Overshoot de CHR, se analizará la respuesta del controlador en el Simulink en cuanto al análisis en el tiempo continuo, con ecuaciones de la placa, en tiempo discreto con la función de transferencia en Z y la ecuación en diferencias para las aplicaciones en los PLC, como propuesta de implementación en un sistema real.

Tabla 20

Parámetros de la Ecuación en Diferencias

Coeficientes	q_0	q_1	q_2
PID_Ziegler Nichols	$1.2340 \cdot 10^3$	$-2.4583 \cdot 10^3$	$1.2243 \cdot 10^3$
PID_CHR	$6.1702 \cdot 10^2$	$-1.2291 \cdot 10^3$	$6.1217 \cdot 10^2$

Nota: adaptado de normas APA 7ma edición.

3.5 Diseño del Nivel de Seguridad Integral (SIL)

En el sistema de almacenamiento de líquido específicamente el agua, si bien el sistema de control aplicado a los tanques se encarga de referenciar el sistema de flujos y niveles de los tanques superiores o TK002, TK003, sin embargo, un análisis fundamental se presenta en la elaboración del sistema de arranque de la bomba periférica, el cual evita la formación de la cavitación en el sistema de impulsos de la bomba, el funcionamiento fue supervisado en el arranque inicial considerando un nivel referencial del tanque TK001, en donde el nivel se mantiene alimentado, para efectos del diseño de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF), la automatización toma un rol importante para la seguridad aplicada en el TK001, el cual fue supervisada en el arranque inicial, por lo que, se plantea un SIL como un requerimiento adicional que mantenga el sistema seguro y funcional.

Para el siguiente sistema detallado en el Anexo H, se plantea un sistema de seguridad aplicado al tanque TK 001, el cual es fundamental para que todo el sistema tenga un flujo continuo del proceso.

En los sistemas de almacenamiento de agua, especialmente en instalaciones de tratamiento de agua, la gestión de los recursos hídricos donde se mueven flujos y niveles

a gran escala. En este contexto, el tanque TK001 presenta un riesgo significativo de sobrellenado y el nivel bajo extremo, lo que podría causar derrames que afecten la infraestructura, resulten en pérdidas de recursos e impacten negativamente en el medio ambiente. En escenarios extremos, estos incidentes podrían ocasionar lesiones graves o incluso fatales a las personas involucradas, en tanto, un nivel bajo extremo en el tanque podría provocar cavitación en la bomba, lo que generaría daños mecánicos, sobrecalentamiento del impulsor e interrupciones en el proceso. Esto no solo reduciría la eficiencia operativa del sistema, sino que también representaría un riesgo para la seguridad del personal y la continuidad de las operaciones.

Por ello, se diseña el SIL basado en la Figura 54, el cual detalla puntos específicos para determinar el nivel de seguridad. Estos puntos serán analizados considerando dos factores clave en el sistema de tanques de nivel: el sobrellenado del tanque de alimentación, que podría generar riesgos incidentes o accidentes debido al derrame de líquido, el nivel bajo extremo que podría causar cavitación en la bomba y fallas en la continuidad del proceso. Ambos factores serán evaluados en función de las consecuencias de cada evento, la frecuencia con la que podrían ocurrir, la probabilidad de evitar el peligro y la probabilidad de ocurrencia no deseada. Este análisis permitirá identificar como riesgos que afectan la funcionalidad del sistema de tanques y ayudar a definir el SIL necesario para garantizar su seguridad.

Riesgo identificado:

- **Sobrellenado del Tanque TK001:** Genera derrame de líquido, daño estructural, pérdida de recursos, contaminación ambiental, lesiones graves con una alta probabilidad de ocurrencia en sistemas sin redundancia en sensores o válvulas de corte automáticas.
- **Nivel bajo Extremo:** Genera en la bomba, daños mecánicos, sobrecalentamientos e interrupción del proceso, riesgo de fallos operativos, con posibles ocurrencias en sistemas sin protección contra cavitación o sensores redundantes.

Tabla 21*Análisis del Riesgo Identificado y Parámetros del Método Gráfico del SIL*

Parámetro	Sobrellenado del tanque TK001	Nivel Bajo Extremo
Consecuencias del Daño (CA, CB, CC, CD)	CB (lesiones Graves, daños ambientales y eléctricos)	CB (Daño a la bomba, cavitación, sobrecalentamiento, lesiones graves en caso de industrias.)
Frecuencia y Tiempo de Exposición (FA, FB)	FA (Raro a Algo más Frecuente): El llenado de tanques ocurre de manera regular dentro del proceso, por lo que la exposición al riesgo es constante, sin embargo, no es muy frecuente o permanente	FB (Frecuente a Permanente): La bomba opera de manera continua o intermitente, lo que implica que el riesgo de nivel bajo extremo está presente con frecuencia
Probabilidad de Evitar el Peligro (PA, PB)	PA (Posible en determinadas circunstancias): El sistema de control si bien, monitorea los tanques superiores, el tanque de alimentación no cuenta con un sistema de monitoreo, para la generación de alarmas, para evitar un sobrellenado, y también la reacción del operador que es lenta en comparación al desbordamiento.	PA (Posible en determinadas Circunstancias): Se puede evitar si hay un sistema de detección y respuestas rápidas, pero en ausencia de protección adicionales, el riesgo sigue presente.
Probabilidad de Ocurrencia No deseada (W1, W2, W3)	W1(Muy pequeña): El sobrellenado no es un evento frecuente, si el sistema de control falla de sensores o falta de respuesta humana, sigue existiendo la posibilidad e incluso llegar a un nivel de W2.	W2-W3 (Pequeña o Relativamente alta, según el histórico de fallas): En los sistemas sin protección, el riesgo es común.
Nivel de SIL recomendado	SIL 1 (Protección mínima): El riesgo evaluado gráficamente tiene consecuencias moderadas y no críticas.	SIL 2 (Protección moderada): Para asegurar y prevenir los daños significativos en el sistema y operación continua.
Medidas Recomendadas	Sensores de Nivel, válvulas de corte, alarmas de nivel alto con la especificación referida a sistemas de SIL 1.	Sensores de nivel, monitoreo de temperatura de la bomba, alarmas de nivel crítico de categoría SIL 2.

Nota: adaptado de normas APA 7ma edición.

Al realizar el análisis basada en la probabilidad de falla y el método de análisis gráfico representado en la Figura 54, se plantea la implementación de un sistema de seguridad para las condiciones de nivel bajo extremo y sobrellenado. Este sistema está conformado por dos sensores de nivel inferior y de nivel superior.

Tal como se detalla en el Anexo H, el diagrama P&ID, se presenta el diseño de los lazos de seguridad identificados como 102-105. Estos lazos cumplen funciones específicas para los casos descritos anteriormente. El sistema utiliza sensores tipo Switch para la detección de niveles muy bajos, bajos, altos y muy altos. Esta clasificación se encuentra detallada en las etiquetas (tags), como:

LSHH Y LSH (Level Switch High): Son los sensores responsables de ejecutar la Función Instrumentada de Seguridad (SIF) para el nivel alto o cercano al desbordamiento.

LSL y LSL (Level Switch Low): Son los sensores encargados de activar el SIF en condiciones de nivel bajo o muy bajo, con el objetivo de prevenir la formación de cavitación en la bomba. En el caso de emitir la señal de nivel muy bajo, se actuará sobre una señal al contactor de la bomba desconectando y evitar el sobrecalentamiento y daños al cableado eléctrico.

Estos lazos de control implementados basados en el SIL identificado en la Tabla 21. El sistema contará con un PLC certificado para SIL 2, que gestionará las funciones instrumentadas de seguridad, cubriendo desde el SIL 1 en caso de sobrellenado, hasta el SIL 2 ante condiciones de nivel bajo extremo.

Capítulo IV.

4. Resultados, contratación de hipótesis y discusión de resultados

En el presente capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de la implementación de distintas estrategias de control PID utilizando Simulink y Matlab. Se ha considerado el comportamiento dinámico de la planta de simulación con la influencia de tres tipos de controladores PID, el clásico, en base a la simulación de Simulink presentada en la ecuación 46, con el objetivo de evaluar su desempeño ante una perturbación a la entrada o salida.

El análisis se enfoca en criterios de desempeño temporal utilizados en ingeniería de control, tales como el sobreimpulso, el tiempo de pico y el tiempo de establecimiento, los cuales permiten evaluar la rapidez, estabilidad y robustez de cada controlador ante cambios no deseados en la variable del proceso.

4.1 Resultados

Respuesta de Control por el 1er Método de Ziegler Nichols

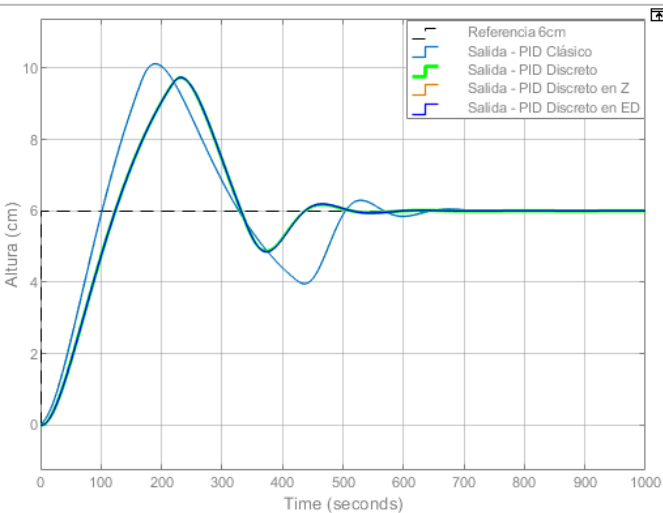
Se presentan resultados de la sintonización basada en el modelo de primer orden propuesta por Ziegler Nichols, se diseña el control PID no interactivo en base a la Tabla 19 y las simulaciones en Simulink, se toma como punto de referencia a un SP de 6cm, y la salida del controlador PID en base a la salida de control a un voltaje analógico proporcionado por el PLC de 0-10V, como saturación del sistema de control o la Variable de Accionamiento como apertura de la válvula.

Se presentan las Figuras 93 al 102, en el cual se detallan las respuestas de los lazos de control clásicos analizados en base a las características industriales propuesta en la ecuación 1 y el encontrado en la instrucción de la simulación del Simulink contando con

un filtro p el cual será desarrollado con el valor de $p = 1$, observando las características de detalladas en las Tabla 22 al 24. En el análisis de los resultados se basarán en las características temporales de sobreimpulso, tiempo de pico y tiempo de establecimiento.

Figura 93

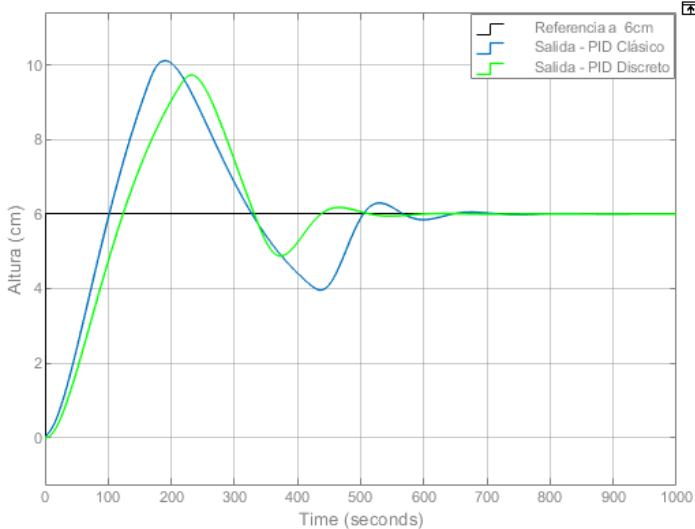
Respuesta del Sistema a los diferentes Sistemas PID Clásico y Discreto por Ziegler Nichols



Nota: Elaboración Propia.

Figura 94

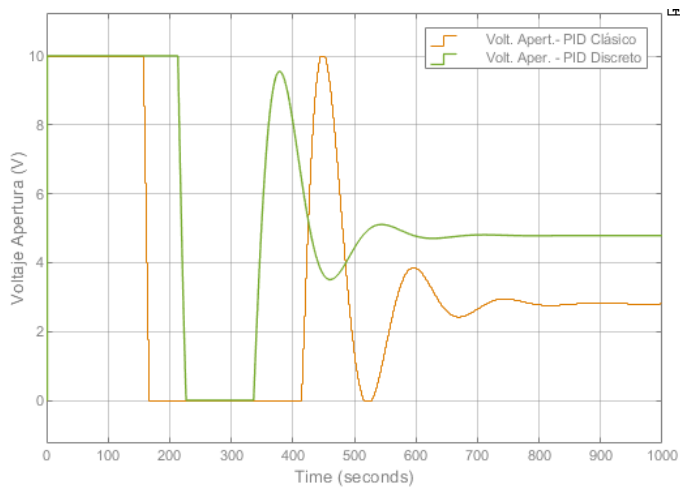
Respuesta Temporal en los Sistemas PID Clásico y Discreto en Ziegler Nichols



Nota: Elaboración Propia.

Figura 95

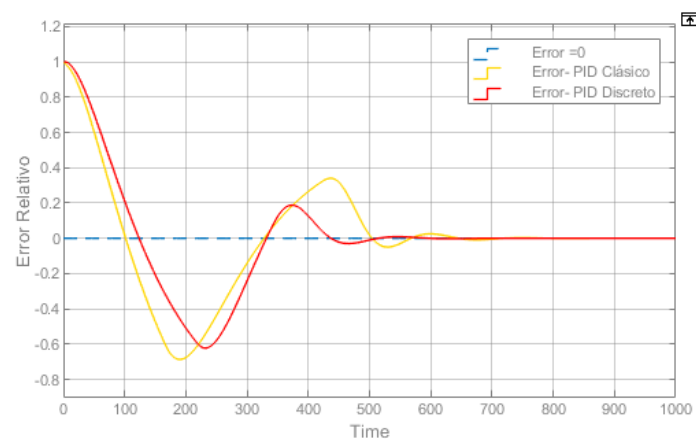
Acción de Control a la Válvula de Control en el PID Clásico y Discreto



Nota: Elaboración Propia.

Figura 96

Error Relativo de la Altura del PID Clásico y Discreto

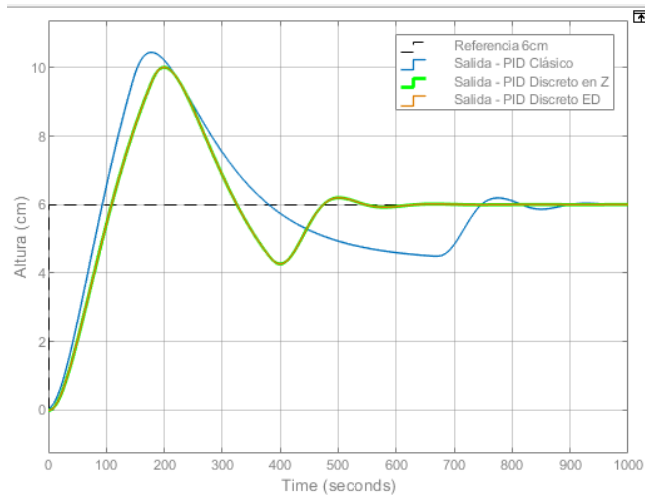


Nota: Elaboración Propia.

Se realizan las simulaciones presentadas en los Anexos O al R, observando la respuesta ante el cambio o perturbación a la entrada y salida con un 25% del valor de las referencias respectivas, para observar las características del control PID no interactivo y el PID clásico basado en la sintonización de Ziegler Nichols.

Figura 97

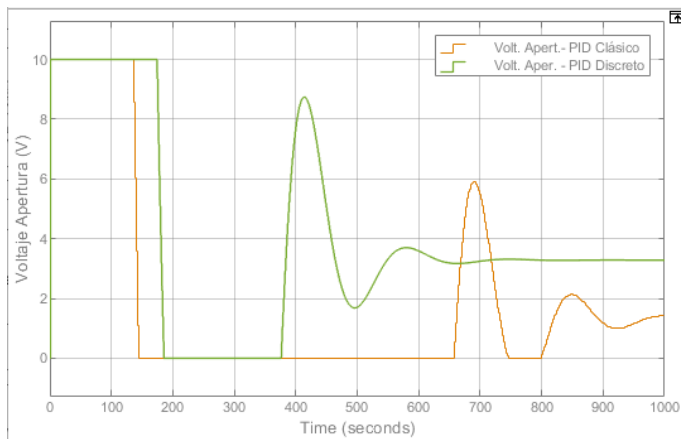
Respuesta Temporal ante la Aplicación de un 25% de Perturbación del valor del SP



Nota: Elaboración Propia.

Figura 98

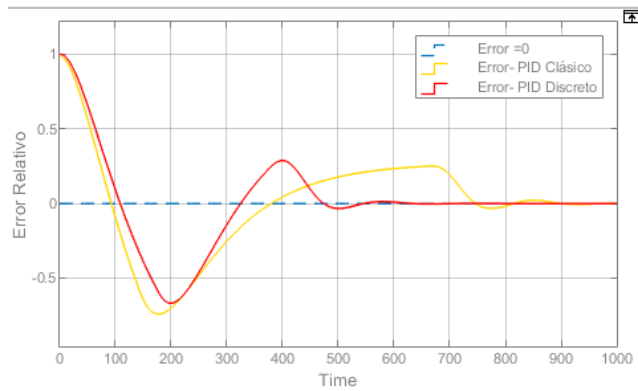
Acción de Control a la Válvula de Control ante la Perturbación de 25% SP



Nota: Elaboración Propia

Figura 99

Error Relativo de la Altura ante la Aplicación de la Perturbación

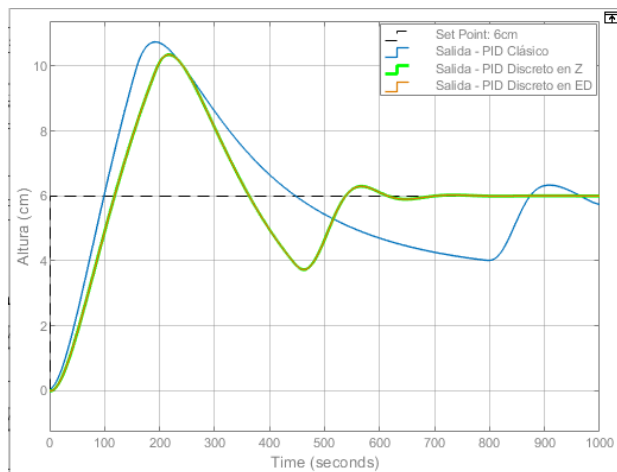


Nota: Elaboración Propia.

Figura 100

Respuesta Temporal ante la Aplicación de un 25% de Perturbación del valor de la Salida

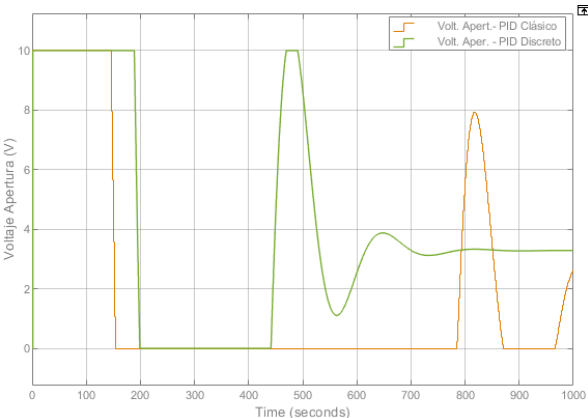
y



Nota: Elaboración Propia.

Figura 101

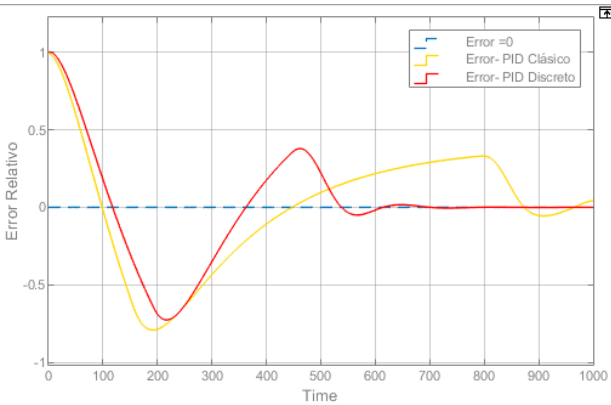
Acción de Control a la Válvula de Control ante la Perturbación a 25% de y



Nota: Elaboración Propia.

Figura 102

Error Relativo de la Altura ante la Aplicación de la Perturbación



Nota: Elaboración Propia.

Tabla 22

Características de la Respuesta Temporal del Controlador Ziegler Nichols Clásico y Discreto

Controlador	Sobreimpulso (%)	Tiempo de Pico	Tiempo de establecimiento
PID_Ziegler Nichols Clásico	68.67%	189.8s	674.6s
PID_Ziegler Nichols Discreto	56.2%	231.7s	630.0s

Nota: Elaboración Propia.

Tabla 23

Características de la Respuesta Temporal del Controlador Ziegler Nichols Clásico y Discreto con Perturbación de 25% del SP

Controlador	Sobreimpulso (%)	Tiempo de Pico	Tiempo de establecimiento
PID_Ziegler Nichols Clásico	74%	177.4s	927.6s
PID_Ziegler Nichols Discreto	66.83%	199.2s	664.5s

Nota: Elaboración Propia.

Tabla 24

Características de la Respuesta Temporal del Controlador Ziegler Nichols Clásico y Discreto con Perturbación de 25% de la Salida y

Controlador	Sobreimpulso (%)	Tiempo de Pico	Tiempo de establecimiento
PID_Ziegler Nichols Clásico	79%	191.8s	1089.2s
PID_Ziegler Nichols Discreto	72.5%	216.5s	733.4s

Nota: Elaboración Propia.

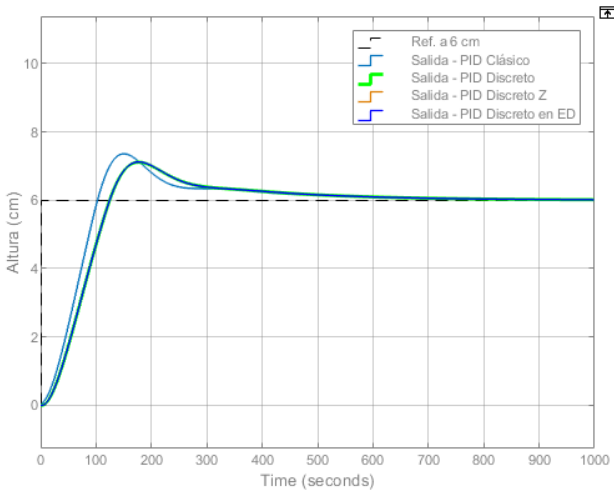
Cabe notar que el manejo del error ante las características abordadas en la implementación de algunas variaciones en la Planta afecta notoriamente en el algoritmo de control clásico industrial presentes en los controladores.

Respuesta con Mínimo Sobreimpulso por CHR

Se presentan las Figuras 103 al 112 de las respuestas para el ajuste de las constantes del controlador CHR para un Mínimo Sobreimpulso, ante las mismas características detalladas en el Ziegler y Nichols, el cual se detallan en las Tablas 25, 26, 27 del porcentaje de sobreimpulso, tiempo de pico y tiempo de establecimiento.

Figura 103

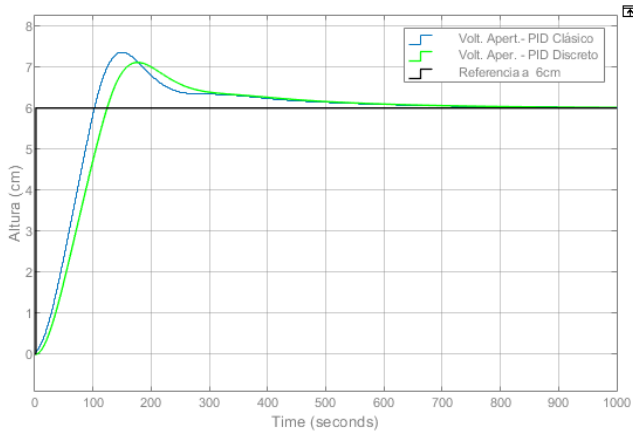
Respuesta del Sistema a los diferentes Sistemas PID Clásico y Discreto por el Ajuste de Parámetros de CHR



Nota: Elaboración Propia.

Figura 104

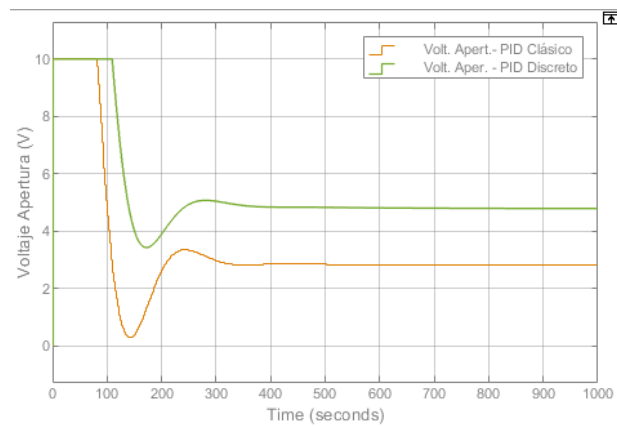
Respuesta Temporal en los Sistemas PID Clásico y Discreto en CHR



Nota: Elaboración Propia.

Figura 105

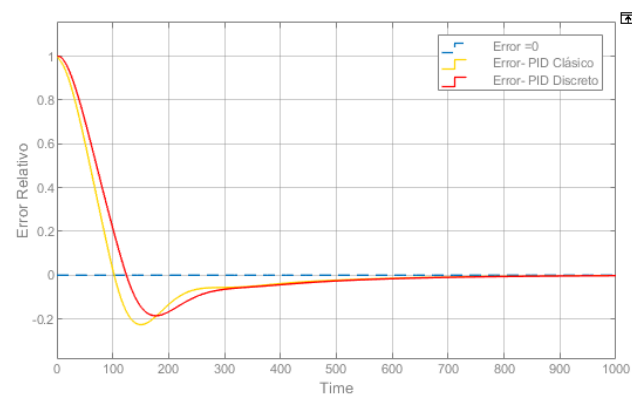
Acción de Control a la Válvula de Control en el PID Clásico y Discreto en CHR



Nota: Elaboración Propia.

Figura 106

Error Relativo de la Altura del PID Clásico y Discreto de CHR

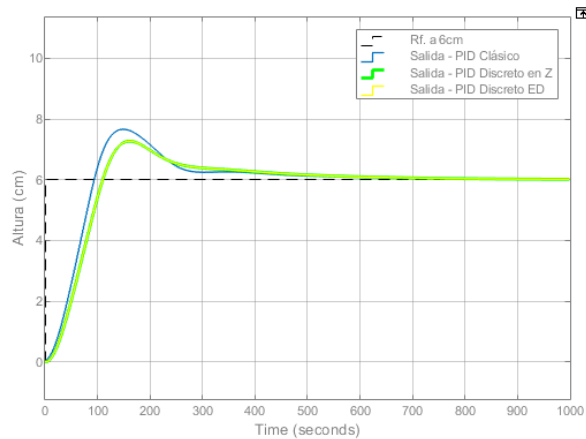


Nota: Elaboración Propia.

Se presentan los resultados basados en la inclusión de una perturbación a la entrada y en la salida de un 25% para observar la performance del controlador por el método de ajuste CHR.

Figura 107

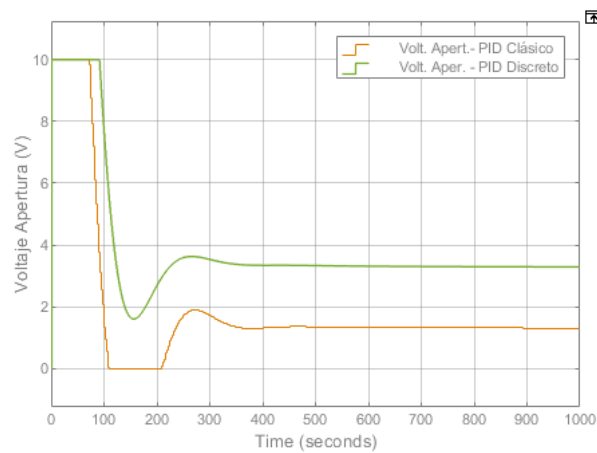
Respuesta Temporal ante la Aplicación de un 25% de Perturbación del valor del SP



Nota: Elaboración Propia.

Figura 108

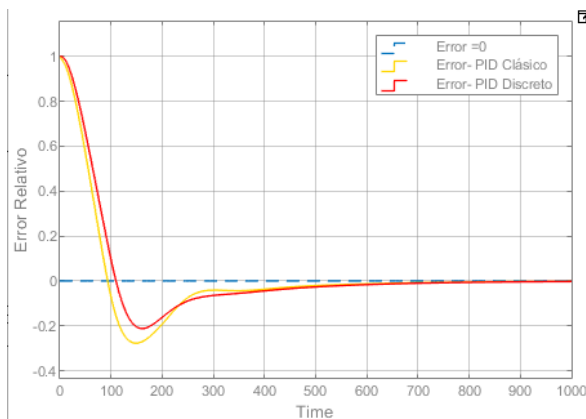
Acción de Control a la Válvula de Control ante la Perturbación de 25% SP



Nota: Elaboración Propia

Figura 109

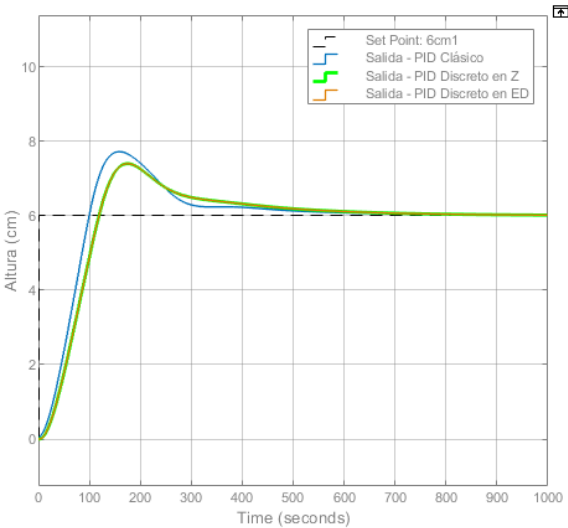
Error Relativo de la Altura ante la Aplicación de la Perturbación



Nota: Elaboración Propia.

Figura 110

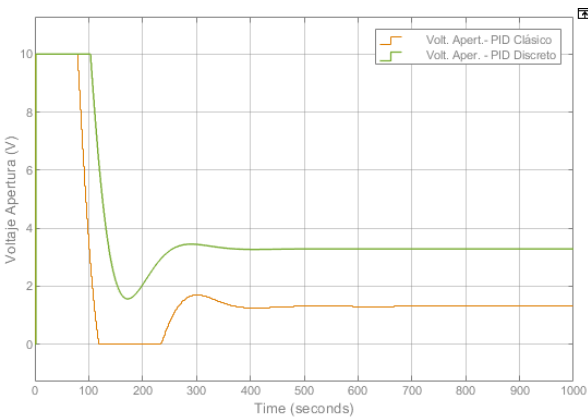
Respuesta Temporal ante la Aplicación de un 25% de Perturbación del valor de la Salida
y



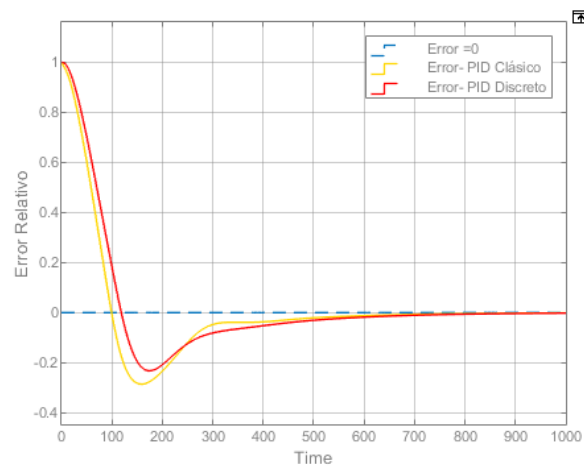
Nota: Elaboración Propia

Figura 111

Acción de Control a la Válvula de Control ante la Perturbación a 25% de y



Nota: Elaboración Propia.

Figura 112*Error Relativo de la Altura ante la Aplicación de la Perturbación**Nota: Elaboración Propia***Tabla 25***Características de la Respuesta Temporal del Controlador CHR Clásico y Discreto*

Controlador	Sobreimpulso (%)	Tiempo de Pico	Tiempo de establecimiento
PID_CHR Clásico	22.6%	149.7s	714.69s
PID_CHR Discreto	18.52%	176.4s	714.49s

*Nota: Elaboración Propia.***Tabla 26***Características de la Respuesta Temporal del Controlador CHR Clásico y Discreto con Perturbación de 25% del SP*

Controlador	Sobreimpulso (%)	Tiempo de Pico	Tiempo de establecimiento
PID_CHR Clásico	27%	148.5s	750s
PID_CHR Discreto	21.17%	160.7s	750s

*Nota: Elaboración Propia.***Tabla 27***Características de la Respuesta Temporal del Controlador Ziegler Nichols Clásico y Discreto con Perturbación de 25% de la Salida y*

Controlador	Sobreimpulso (%)	Tiempo de Pico	Tiempo de establecimiento
PID_CHR Clásico	28.62%	158.3s	750s

PID_CHR Discreto	23.25%	174.2s	750s
------------------	--------	--------	------

Nota: Elaboración Propia.

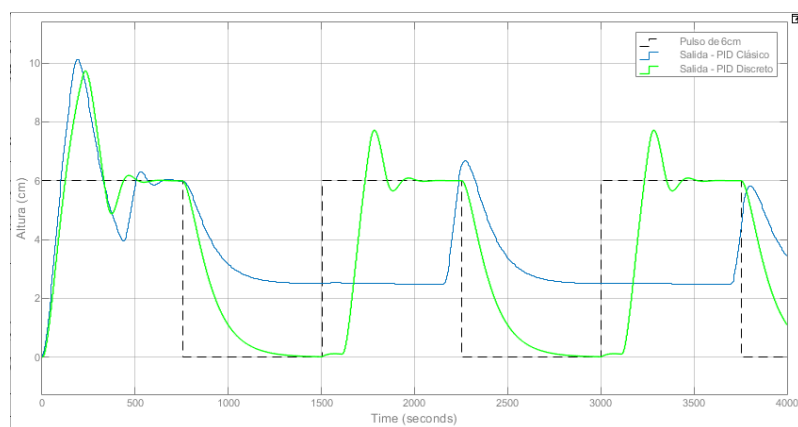
Se observa un controlador robusto con la cualidad que genera un error estacionario de 1.35%, sin embargo, este error se encuentra dentro de las características influenciadas en la respuesta de estado transitoria la cual será analizada en la discusión de resultados.

Para la validación del seguimiento del controlador PID no interactivo basado en la sintonización de Ziegler y Nichols y el ajuste de CHR, se realiza la simulación en base a un pulso cuadrado de amplitud 6cm para la visualización de la performance de los controladores diseñados, ante el llenado del tanque y vaciado del mismo.

Las Figuras 113 al 118, se muestra la performance del controlador y la mejora en cuanto al control, y el ajuste de los parámetros de control K_p, K_i, K_d son fundamentales para un buen desempeño.

Figura 113

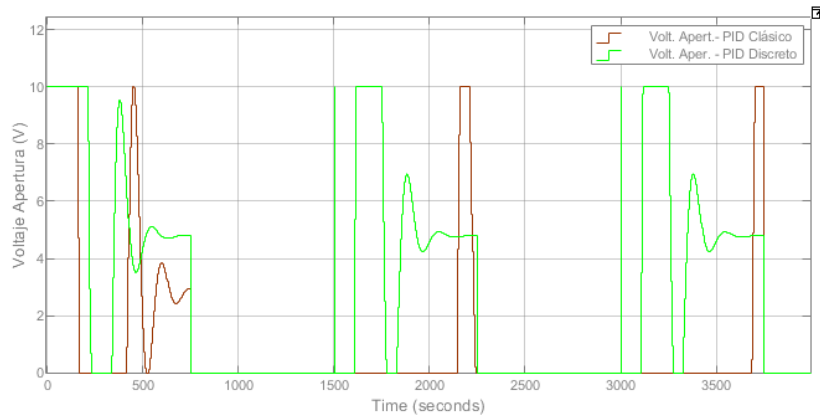
Respuesta Temporal ante una Señal Pulso del Controlador Ziegler Nichols



Nota: Elaboración Propia.

Figura 114

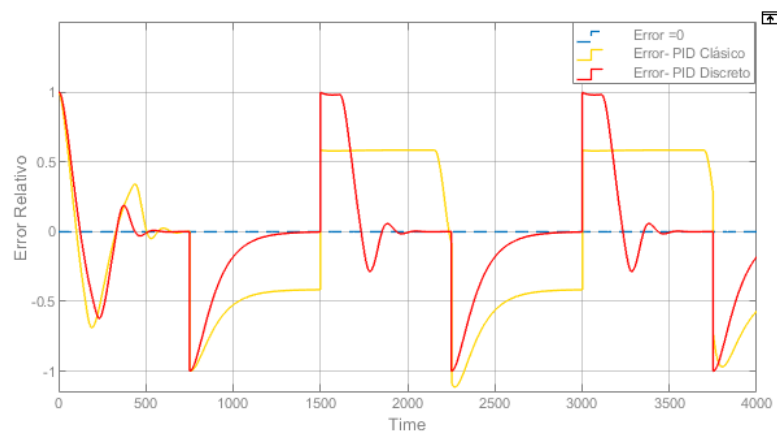
Acción de Control a la Válvula de Control ante la Señal Pulso



Nota: Elaboración Propia.

Figura 115

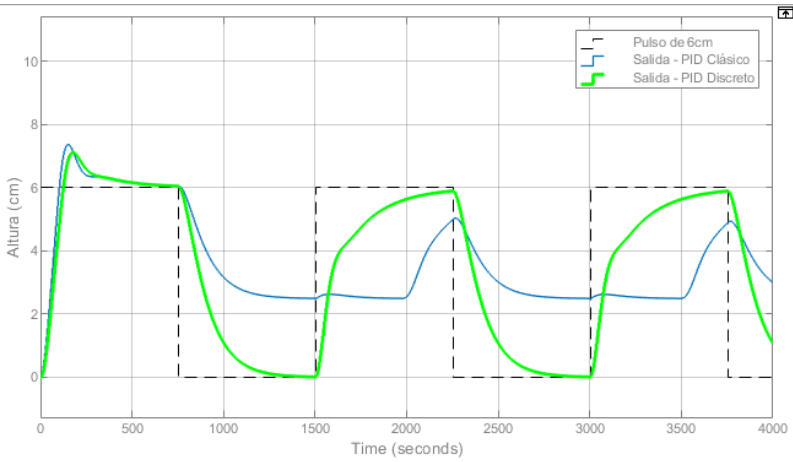
Error Relativo de la Altura ante la Señal Pulso



Nota: Elaboración Propia.

Figura 116

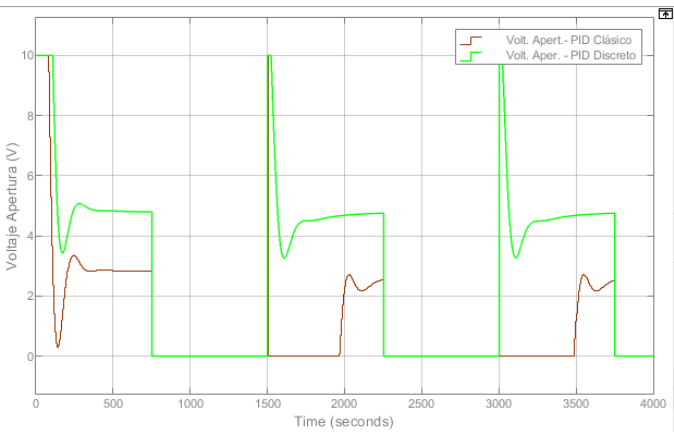
Respuesta Temporal ante una Señal Pulso del Controlador CHR



Nota: Elaboración Propia.

Figura 117

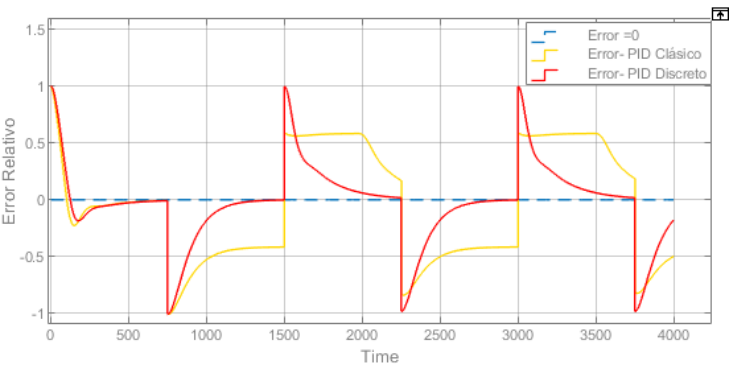
Acción de Control a la Válvula de Control ante la Señal Pulso de CHR



Nota: Elaboración Propia.

Figura 118

Error Relativo de la Altura ante la Señal Pulso



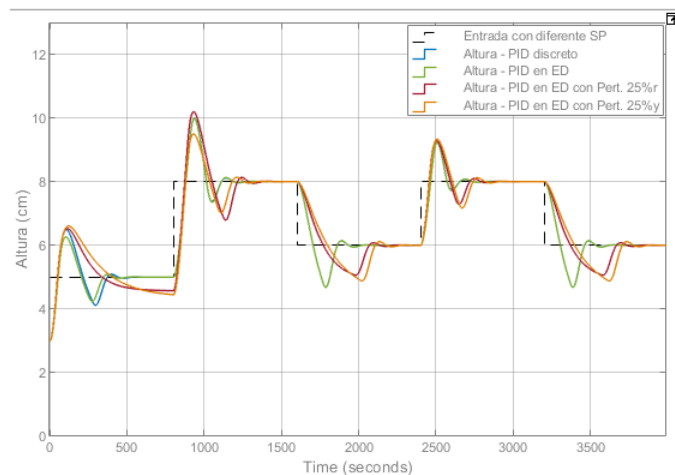
Nota: Elaboración Propia.

Se realiza la simulación detallada en el Anexo V y W, a partir de la variación del SP con un valor inicial de 5cm por 800s, luego se aumenta a 8cm hasta los 1600s, para luego disminuir el nivel hasta 6 hasta los 2400s y elevar a 8cm hasta el segundo 3200 y finalmente disminuir el valor a 6cm de referencia con la condición inicial en el nivel de $Y(0) = 3\text{cm}$, con un análisis de subida de nivel en forma escalar así comprobar la robustes del sistema para garantizar el control PID no interactivo.

En las Figuras 119 al 124, se observan los esfuerzos de control y manejo de errores al tener un valor inicial como parte de las casuísticas encontradas en la industria.

Figura 119

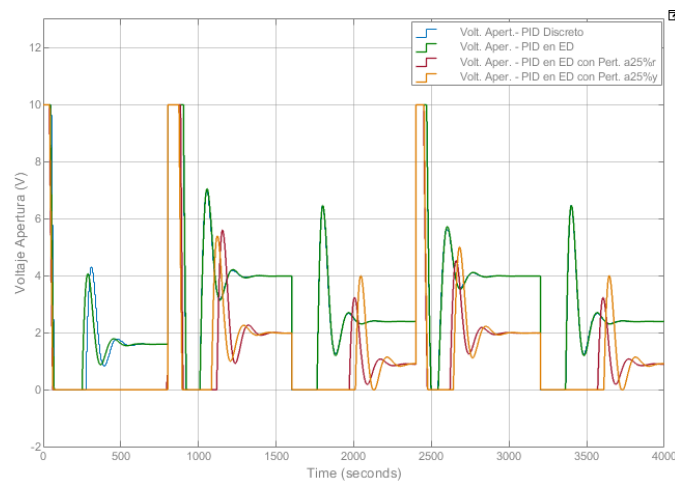
Respuesta Temporal ante Variación en el SP y Altura Inicial 3cm por Ziegler Nichols



Nota: Elaboración Propia.

Figura 120

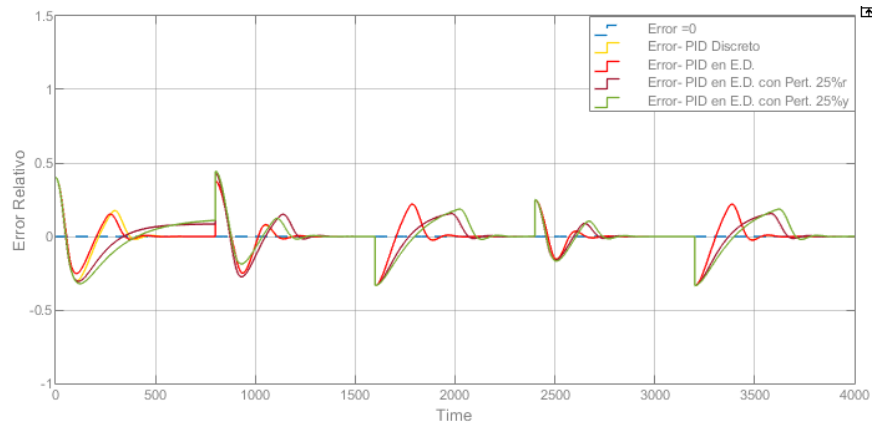
Acción de Control a la Válvula de Control ante Condición Inicial



Nota: Elaboración Propia.

Figura 121

Error Relativo de la Altura ante Condición Inicial

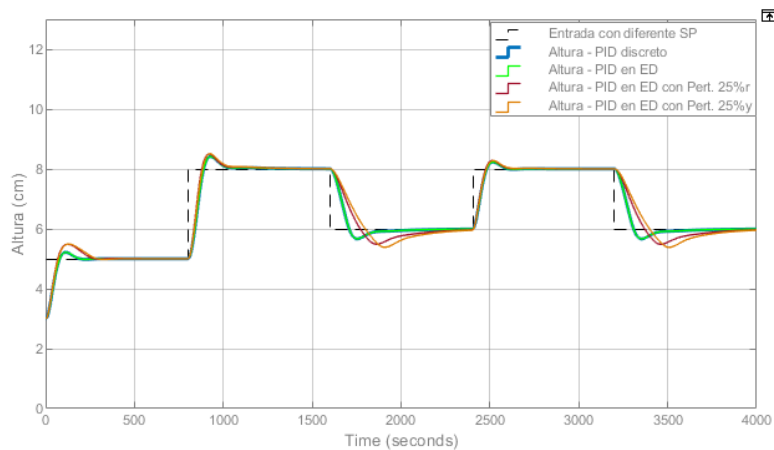


Nota: Elaboración Propia.

Con el mismo detalle utilizado para el cambio del SP aplicado al método de Ziegler Nichols, se aplican los cambios en la señal de entrada $r(t)$ y la condición inicial $Y(0) = 3\text{cm}$, se observa una mejora en el control del sobreimpulso propuesta por CHR.

Figura 122

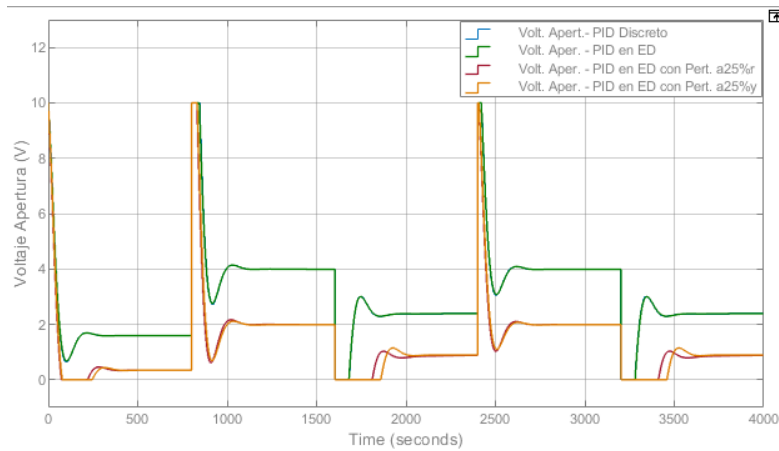
Respuesta Temporal ante Variación en el SP y Altura Inicial 3cm por CHR



Nota: Elaboración Propia.

Figura 123

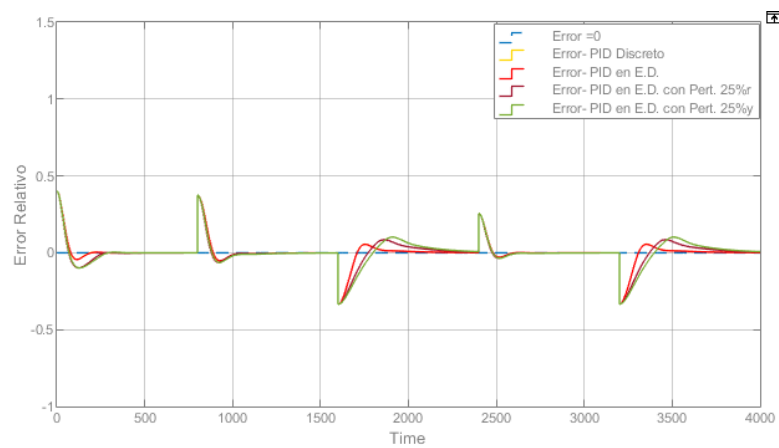
Acción de Control a la Válvula de Control ante Condición Inicial en CHR



Nota: Elaboración Propia.

Figura 124

Error Relativo de la Altura ante Condición Inicial



Nota: Elaboración Propia.

Los resultados del desempeño del controlador permiten observar el grado de robustez de ambos controladores que llegan al SP deseado, y se muestra el ajuste con mínimo sobreimpulso como un método que permite disminuir considerablemente los esfuerzos de control y de mayor robustez.

4.2 Contrastación de hipótesis

Contrastación de la hipótesis General

Hi: Un adecuado diseño de un controlador PID no interactivo aplicado a un sistema tanque de nivel de agua mejora la automatización en sistemas de tanques de nivel de agua.

Ho: Un adecuado diseño de un controlador PID no interactivo aplicado a un sistema tanque de nivel de agua no mejorara la automatización en sistemas de tanques de nivel de agua.

Decisión:

El diseño de un controlador PID no interactivo aplicado a un sistema de tanque de nivel de agua permitió mejorar significativamente la automatización del proceso. La implementación de los algoritmos del controlador PID en forma posicional y de velocidad utilizando la discretización trapezoidal, y se aplicó el primer método de Ziegler-Nichols para el cálculo de los parámetros del controlador. No obstante, para optimizar el desempeño del sistema, se utilizó el método de Chien, Hrones y Reswick (CHR), logrando la reducción del sobreimpulso, y aunque este genera un error en estado estacionario equivalente a un 1,35%, se encuentra dentro de los límites del porcentaje de Ess según Smith C. Corripio A., el cual en estos sistemas industriales se encuentra dentro de $\pm 3 \alpha \pm 5\%$ y una mayor estabilidad en el control de nivel.

Estas mejoras contribuyen a un control eficiente, estable y preciso, disminuyendo la intervención manual y aumentando la confiabilidad del sistema, confirmando así la Hi hipótesis general y se rechaza la Ho hipótesis nula..

Contrastación de hipótesis específicas:

Hi: Un adecuado análisis de la influencia de la instrucción PID utilizada en un algoritmo de velocidad de la ecuación PID no interactivo ayudara a mejorar el control

Ho: Un adecuado análisis de la influencia de la instrucción PID utilizada en un algoritmo de velocidad de la ecuación PID no interactivo no ayudara a mejorar el control

Decisión:

La implementación del controlador PID no interactivo utilizando los algoritmos en forma de velocidad y analizando la influencia en cada término del PID discretizado con aproximación trapezoidal. Con la aplicación de la sintonización de Ziegler-Nichols, observándose un control rápido con tiempo de estabilización menor, pero con sobreimpulso elevado. Para mejorar el desempeño, la implementación del método de minimo

sobreimpulso propuesta por CHR, logra reducir el sobreimpulso, se obtuvo un error estacionario dentro de los márgenes aceptables Según Smith y Corripio.

Los resultados simulados en el software Simulink mostraron mejoras significativas en el control de nivel de agua, evidenciando que un análisis y ajuste adecuado de los parámetros del controlador y algoritmos mejora sustancialmente el desempeño de control. Por lo tanto, se admite la hipótesis de la investigación.

Hi: Un correcto desarrollo de los algoritmos de forma posicional de forma de velocidad permitirá una mejor performance del sistema de control

Ho: Un correcto desarrollo de los algoritmos de forma posicional de forma de velocidad no permitirá una mejor performance del sistema de control

Decisión:

Se desarrollan los algoritmos PID no interactivos en forma posicional y de velocidad aplicando discretización trapezoidal. La implementación adecuada de los algoritmos permitió mejorar el desempeño del sistema, observándose mayor estabilidad y menor sensibilidad a perturbaciones en la forma de velocidades respecto a la posicional. Estas mejoras optimizan el control de nivel de agua, confirmando así un correcto desarrollo de los algoritmos impacta positivamente en la performance del sistema, confirmando así la Hi hipótesis específica y rechazando la Ho hipótesis nula.

Hi: El nivel de automatización mejorará la eficiencia en el desarrollo de los sistemas de tanques de nivel de agua.

Ho: El nivel de automatización no mejorará la eficiencia en el desarrollo de los sistemas de tanques de nivel de agua

Decisión:

El aumento del nivel de automatización en el control de los sistemas de tanques de nivel fue evaluado mediante la implementación del controlador PID no interactivo con algoritmos en forma posicional y de velocidad. La automatización del proceso permite una gestión más precisa del nivel de agua, reduciendo las fluctuaciones y manteniendo el sistema dentro de los límites deseados sin intervención manual constante. Al integrar el

control automático con un control optimizado, se alcanza una mayor eficiencia operativa, ya que el sistema respondió rápidamente a las perturbaciones y cambios en las condiciones de entrada, salida y a condiciones iniciales. Esto validó la hipótesis Hi de que un mayor nivel de automatización mejora la eficiencia en el desarrollo y operación de los sistemas de tanques de nivel de agua.

Hi: El nivel integrado de seguridad (SIL) mejorará la seguridad operacional de los sistemas de tanques de nivel de agua

Ho: El nivel integrado de seguridad (SIL) no mejorará la seguridad operacional de los sistemas de tanques de nivel de agua

Decisión:

Durante la adquisición de datos del sistema, se monitorearon los subsistemas definidos en el análisis del diseño del SIS, sin embargo, como parte de la automatización industrial es garantizar una la seguridad operativa, se analizaron las posibles fallas o riesgos durante el funcionamiento del sistema de tanques de agua. La aplicación de un SIL correcto permitirá que el sistema mejore la seguridad operacional del sistema pues se garantiza que los riesgos estén monitoreados y ante la posible falla el sistema cumpla con la función de mantener los equipos seguros, así como la seguridad de los operarios.

Así con la correcta implementación del SIS, se valida la seguridad operacional de los sistemas de tanques de nivel de agua pues se mantendrán en monitoreo por parte de un controlador dedicado de los riesgos presentes en estos sistemas. Confirmando la Hi hipótesis específica de la investigación.

4.3 Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos en las simulaciones del controlador PID no interactivo en velocidades aplicado al sistema de nivel de tanques mostró una mejora significativa en la estabilidad y precisión del proceso. Se observó la presencia de sobreimpulso en la aplicación de los controladores de Ziegler-Nichols y el ajuste de mínimo sobreimpulso de

CHR, debido a la respuesta de la dinámica lenta de la válvula entre los cambios altos del error.

Aunque el controlador cumplió con la función principal obtener el valor del SP deseado, la inercia del actuador provocó la generación de sobreimpulso antes de estabilizarse y según el método de ajuste de mínimo sobreimpulso se logró disminuir en gran porcentaje obteniéndose resultados similares en las respuestas de Altura, el esfuerzo de control o la variable de accionamiento y el error del sistema según Ribeiro, A. H. dos S., Coelho, B. F., Araújo Filho, E. M., Soares, A. C. M., Moura, J. P., Rêgo, P. H. M., & Fonseca Neto, J. V. D. (2016), donde el sistema de control aplicado es el PI y logra obtener un tiempo de estabilización considerable dadas las características de los tanques.

El análisis de las perturbaciones, así como la condición inicial de la salida, demuestra que, ante la presencia de un nivel inicial diferente de 0, el control clásico no logra una performance adecuada. Sin embargo, los resultados muestran que el algoritmo discretizado del control PID no interactivo, basado en el método trapezoidal y diseñado mediante ecuaciones en diferencias, permite un mejor dominio del error y una adaptación más efectiva frente a cambios en el SP del nivel de agua en el tanque. Esta mejora concuerda con lo expuesto por Phillips C., Nagle H., Chakraborty A. (2015), quienes destacan la relevancia del control digital en entornos industriales, especialmente en sistemas de dinámica lenta o perturbaciones constantes, como lo detallado en la Tabla 4.

Cabe resaltar que la implementación de la automatización redujo la necesidad de la intervención manual y mejora la eficiencia operativa del sistema. Estos resultados coinciden con lo planteado en Control Automático de Procesos Teoría y Práctica. C. Smith, A. Corripio (1991), los cuales detallan según la Tabla 2 la mejora en el control de los Procesos Industriales

Conclusiones

El diseño del controlador PID no interactivo basado en forma de velocidades, discretizado mediante el método trapezoidal, logra mejorar notoriamente el desempeño del sistema de control de nivel, en comparación del controlador clásico, el enfoque del control discreto genera una mayor estabilidad ante perturbaciones y menor error en estado estacionario. La aplicación inicial del método de sintonización de Ziegler-Nichols y su posterior optimización con el método de CRH permitieron un control más preciso y adaptativo a las perturbaciones y cambios en el SP así como ante la presencia de un nivel inicial en el sistema, lo que contribuye a una automatización eficiente, robusta y confiable del sistema de tanques de agua.

El análisis realizado demuestra que la implementación del controlador PID no interactivo en velocidades, tiene un impacto positivo en el desempeño del sistema de control. Al observar los resultados ante perturbaciones y un nivel inicial, la adaptación y tratamiento del error generado no son muy significativos en el PID no interactivo discretizado por el método trapezoidal, el cual permite una mejor respuesta dinámica, mayor precisión y seguimiento del valor de referencia y un tratamiento más efectivo del error.

En cuanto a la correcta aproximación de los algoritmos en forma posicional y en velocidades del controlador PID no interactivo, ofrece ventajas notables al reducir los esfuerzos de control y minimizar los errores generados del controlador y así mejorar la respuesta transitoria del sistema. La retroalimentación del controlador en forma de velocidades permite un ajuste con mayor desempeño que en forma de posiciones que solo tiene influencia en los errores controlador por los parámetros del controlador K_p , K_d y K_i .

El incremento en el nivel de automatización en los sistemas industriales representa un factor clave para mejorar la eficiencia en el desarrollo, operación y supervisión de las plantas industriales. En el desarrollo del trabajo de investigación se ha evidenciado que la incorporación de técnicas de control automático, como el uso del controlador PID en sus

distintas formas, y la aplicación de los algoritmos discretizados permite una respuesta rápida y precisa del sistema y reduce la intervención manual y en los tiempos de ajuste operativo. Por lo tanto, se concluye que una mayor automatización conlleva a una optimización de recursos, la reducción de errores humanos, el incremento de seguridad operativa y una mayor adaptabilidad a cambios en las condiciones del proceso y así se consolida a la automatización como una herramienta fundamental para el crecimiento, modernización y competitividad en el control de procesos industriales.

El análisis del diseño del Nivel Integrado de Seguridad representa una mejora en la seguridad operacional de las plantas especialmente en aquellos procesos en donde los riesgos asociados a fallas pueden derivar en consecuencias graves a personas o medio ambiente y activos. El uso de los sistemas instrumentados de seguridad validado por las normas de seguridad en la automatización permite alcanzar grados de confiabilidad medibles y verificables en los lazos de seguridad. Por lo que, según el diseño del SIL, significa que ante un mayor SIL se proyecte menor será la probabilidad de falla en demanda peligrosa, lo cual fortalece la capacidad del sistema para responder ante la presencia de los riesgos identificados en el diseño del SIL mejorando así la seguridad operacional y la confiabilidad global de la planta.

Recomendaciones

Se recomienda técnicas de control predictivos o de compensación de retardo que permitan un mejor control en los sistemas con actuadores que tengan una dinámica lenta de respuesta, y así disminuir considerablemente el esfuerzo de control y disminuir el sobreimpulso en los tanques cuyo actuador tenga dinámica lenta.

Mejorar el sistema de adquisición de datos así como la mejora en los tiempos de muestreo T_s , para verificar la influencia de este en la adaptación ante las perturbaciones y condiciones que alteren la respuesta del sistema, pues las consideraciones iniciales para la presente investigación se obtuvieron tiempos de estabilización considerables, es decir mantener niveles y flujos óptimos en el funcionamiento del sistema de tanques de nivel de agua.

Realizar las pruebas experimentales, para validar el comportamiento del PID no interactivo en velocidades, en los diferentes sistemas industriales debido a la aplicación del algoritmo del controlador PID no interactivo en velocidades que permite la programación de los controladores industriales a través del lenguaje de instrucciones.

Incluir estrategias de supervisión y de seguridad que permita integrar funciones de seguridad como un SIL básico que detecte fallas en sensores o actuadores o de comunicación.

Referencias bibliográficas

- AISHVARYA PRATAP SINGH (2015). *Multi-tank level control using internal model control and internal model cascade control*. Master of Technology in Electronics & Instrumentation Engineering, Rourkela, Odisha-796008.
- Allen-Bradley (2013). *873M General Purpose Ultrasonic Sensor*. Rockwell Automation, Inc. All Rights Reserved. Printed in USA.
- AQUIZE R. (2011). *Implementación de un Sistema de Control No Lineal Backstepping Multivariable para la Planta Piloto Tanque con Agua*. Tesis de Maestría.
- Arduino (s.f.) *Arduino Due*. Tomado de: https://store.arduino.cc/products/arduino-due?srltid=AfmBOopy851l8sX8MYkZoctH4o5_HT5MHeY_6cfCSWS_KZK_VSjR_F8jw
- Astrom K. Hagglund T. (1995). *PID Controllers Theory, Design, and Tuning*. Instrument Society of America.
- Creus A. (2011). *Instrumentación Industrial*. Octava Edición. Alfaomega Grupo Editor. México.
- Endress + Hauser (s.f.). *Seguridad Funcional- SIL. Sistemas instrumentados de seguridad en la industria de procesos*.
- Estrada R. (s.f.). *Protocolos de comunicaciones industriales*. Logicbus SA de CV. México.
- HAOQIANG JI (2013). *PLC Programming for A Water Level Control System: Design and System Implementation*. B.Sc., Beijing University of Civil Engineering and Architecture.
- Hernández R. (2010). *Introducción a los sistemas de control*. Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Pearson Educación de México.
- Hernández, R. (2014). *Metodología de la investigación. Los enfoques cuantitativos y cualitativos de la investigación científica*.

Ikhlef, A., Kihel, M., Boukhezzar, B., Mansouri, N., & Hobar, F. (2016). *Online PID Control of Tank Level System. Proceedings of the 2016 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*.

International Electrotechnical Commission. (2016). IEC 61511-3:2016 – *Functional safety: Safety instrumented systems for the process industry sector – Part 3: Guidance for the determination of the required safety integrity levels*.

KATSUHIKO OGATA, *Ingeniería de Control Moderna*. Pearson Educación, 5ta edición, 2010, pp 101-104, 568-571.

Leidinger O. (1997). *Procesos Industriales*. Fondo Editorial Pontificia Universidad Católica del Perú.

Masvoltaje (s.f.). *¿Qué tipos de cables electricos existen?*. Tomado de:

<https://masvoltaje.com/blog/analisis-de-productos/tipos-de-cables-electricos-que-existen>

Modbus Organization. (2006). *MODBUS MESSAGING ON TCP/IP IMPLEMENTATION GUIDE V1.0b*.

National Instruments (s.f.) *Dispositivo de E/S multifunción USB 6008*. Tomado de:

https://www.ni.com/es-cr/support/model.usb-6008.html?srsId=AfmBOor9Sx-ZTqSR9ENxdjMjAmJQKAzjx0ZQ5B0bXL4_Buhuu2Md3Usq

National Instruments (s.f.) *Dispositivo de E/S multifunción USB 6211*. Tomado de:

<https://www.ni.com/es-cr/support/model.usb-6211.html?srsId=AfmBOoquhycNLXihqV5XohicYDE0WpYWKND0o1SBh-X6H3sYVjrt4GoI>

Naylamp Mechatronics (s.f.). *Módulo MAX485 Conversor RS485 a Serial TTL*. Tomado de: <https://naylampmechatronics.com/conversores-ttl/62-conversor-rs485-a-serial-ttl.html>

Naylamp Mechatronics (s.f.). *Sensor de flujo de agua 1/2" YF-S20*. Tomado de: <https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/108-sensor-de-flujo-de-agua-12-yf-s201.html>

- Naylamp Mechatronics (s.f.). *Sensor Ultrasonido HC-SR04*. Tomado de:
<https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/10-sensor-ultrasonido-hc-sr04.html>
- OEFA (2014). *Fiscalización ambiental de aguas residuales*.
- Parra A. (2007). *Diseño e Implementación de Controladores PID Industriales*. Tesis de Maestría. 2007.
- Pedrollo (s.f.). *Electrobombas con rodete periférico*.
- Petrera, M., Montoya, M. A. (1992), *Impacto económico de la epidemia del cólera: Perú-1991*, Organización Panamericana de la Salud, Washington D.C.
- Phillips C., Nagle H., Chakraborty A. (2015). *Digital Control System Analysis and Design*. Cuarta Edición. Pearson Education Limited.
- Proinversión (2023). *PTAR La Chirita trata el 25% de aguas residuales que genera Lima Metropolitana*. Nota de Prensa- Proinversión.
- QBProfe. (2021). *Tutorial de Arduino con Sensor ultrasónico HC-SR04*. Tomado de:
https://www.qbprofe.com/automatizacion-instrumentacion-industrial/tutorial-de-arduino-con-sensor-ultrasonico-hc-sr04/#google_vignette
- R. RODRIGUEZ, V. PAREDES, G. NOA, L. TRUCIOS (2019). *Grey box identification and adaptive control in a water level system*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Paris-Francia.
- RAE (2025). Diccionario de la lengua española. Tomado de: <https://dle.rae.es/>
- Ribeiro, A. H. dos S., Coelho, B. F., Araújo Filho, E. M., Soares, A. C. M., Moura, J. P., Rêgo, P. H. M., & Fonseca Neto, J. V. D. (2016). *PID Controller Embedded in Industrial PLC Applied to Level Control in Tanks*. International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)
- Schneider Electric. (2025). *PLC industrial M221 c/ Ethernet 16 ES de tipo relé - 9 entradas digitales - 7 salidas relé*. Tomado de:
<https://www.se.com/pe/es/product/TM221CE16R/plc-industrial-m221-c-ethernet-16-es-de-tipo-rel%C3%A9-9-entradas-digitales-7-salidas-rel%C3%A9/>

- Siemens Sitrans F (2021). *Módulos de comunicación Modbus RTU RS 485*. Siemens AG
- Smith C. Corripio A. (1991). *Control Automático de Procesos Teoría y Practica*. Primera Edición. Versión autorizada de la obra publicada por John Wiley y Sons, Inc. de nombre *PRINCIPLES AND PRACTICE OF AUTOMATIC PROCESS CONTROL*.
- Sociedad Internacional de Automatización (2018). *Enterprise-control system integration – Part 1: Models and terminology*. ISA-95.
- Sociedad Internacional de Automatización (2018). Functional safety: Safety instrumented systems for the process industry sector – Part 1: Framework, definitions, system, hardware and software requirements. (IEC 61511)
- SUNASS (2022). *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el ámbito de las empresas prestadoras*.
- TF Fluid Control Systems CO., LTD (2014). *Válvula proporcional de latón de 2 vías, moduladora CA/CC 24 V 0-10 V con actuador de 6 Nm*. Tomado de: <http://www.china-electricvalves.com/product/255-en.html>
- Tractian (2025). *¿Qué es la cavitación industrial y cuáles son los efectos que provoca?*. Tomado de: <https://traction.com/es/blog/que-es-la-cavitacion-industrial>

ANEXOS

Anexo A: Matriz de consistencia	3
Anexo B: Tabla de configuración de Registros Modbus RTU	4
Anexo C: Código de configuración como Esclavo a Arduino Due y PLC.	5
Anexo D: Diagrama P&ID del sistema de control de nivel	8
Anexo E: Diseño del Plano Eléctrico de Potencia para el Tablero de control de nivel	9
Anexo F: Diseño del Plano Eléctrico de Control para el Tablero QG.	10
Anexo G: Lista de Requerimientos y Descripción de Instrumentación.	11
Anexo H: Diagrama P&ID SIL para el sistema de control de nivel	12
Anexo I: Código en Matlab para la visualización de la Adquisición de Datos por NI DAQ .6211.....	13
Anexo J: Código en Matlab para la Generación de la F.T. de la Planta.....	14
Anexo K: Código en Matlab para la Generación de la F.T. de la Válvula de Control.	17
Anexo L: Medida de la Histéresis de la válvula de Control en base a Voltaje de control Vs Voltaje de Retroalimentación o Apertura.	19
Anexo M: Código de Aproximación al Ziegler-Nichols con el sistema Real.	20
Anexo N: Código de Discretización y Cálculo de los parámetros del PID no interactivo por Ziegler-Nichols y CHR	21

Anexo O: Sistema de Control para el PID por ZN y CHR	24
Anexo P: Sistema de Control PID clásico industrial con implementación de perturbaciones del 25% en Ziegler Nichols	25
Anexo Q: Sistema de Control PID no interactivo con implementación de perturbaciones del 25% en Ziegler Nichols	26
Anexo R: Sistema de Control PID clásico industrial con implementación de perturbaciones del 25% en CHR.....	28
Anexo S: Sistema de Control PID no interactivo con implementación de perturbaciones del 25% en CHR.....	29
Anexo T: Simulación del Controlador PID no interactivo ante un cambio de llenado y vaciado del tanque a un nivel de referencia de 6cm por Ziegler-Nichols	31
Anexo U: Simulación del Controlador PID no interactivo ante un cambio de llenado y vaciado del tanque a un nivel de referencia de 6cm por CHR	32
Anexo V: Simulación del Controlador PID no interactivo ante una condición inicial $y(0)=3\text{cm}$ por Ziegler Nichols	33
Anexo W: Simulación del Controlador PID no interactivo ante una condición inicial $y(0)=3\text{cm}$ por CHR.....	34

Anexo A: Matriz de consistencia

TÍTULO: "DISEÑO DE UN CONTROLADOR PID NO INTERACTIVO PARA EL CONTROL DE SISTEMAS AUTÓNOMOS DE TANQUES DE NIVEL USANDO SINTONIZACIÓN BASADA EN AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL"

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES
Problema General: ¿De qué manera el diseño y la implementación de un controlador PID no interactivo mejorará la automatización en los sistemas de tanques de nivel de agua? Problema específico 1: ¿Como influye la instrucción PID utilizada en un algoritmo de velocidad de la ecuación PID no interactivo? Problema específico 2: ¿Como afecta el uso de un algoritmo PID tradicional utilizado en los PLC respecto de un algoritmo de forma posicional que funciona directamente sobre el error? Problema específico 3: ¿Cómo influye el nivel de automatización en el desarrollo de los procesos en sistemas de tanques de nivel de agua? Problema específico 4: ¿De qué manera el nivel integrado de seguridad (SIL) mejorará la seguridad operacional en los sistemas de tanques de nivel de agua?	Objetivo General: Diseñar un controlador PID no interactivo aplicado a tanques de nivel de agua para mejorar los procesos los sistemas de tanques de nivel de agua. Objetivo Específico 1: Analizar la influencia de la instrucción PID utilizada en un algoritmo de velocidad de la ecuación PID no interactivo. Objetivo Específico 2: Desarrollo del algoritmo de forma posicional trabaja directamente sobre el error. Aunque esto es aceptable para aplicaciones simples, el algoritmo de forma de velocidad es mucho más fácil de aplicar para aplicaciones más avanzadas. Objetivo Específico 3: Diseñar el nivel de automatización mediante software especializados que permita optimizar el desarrollo en los sistemas de tanques de nivel de agua. Objetivo Específico 4: Diseñar el Nivel integrado de Seguridad (SIL) para la seguridad operacional de los sistemas de tanques de nivel de agua.	Hipótesis general: Un adecuado diseño de un controlador PID no interactivo aplicado a un sistema tanque de nivel de agua mejorará la automatización en sistemas de tanques de nivel de agua. Hipótesis específica 1: Un adecuado análisis de la influencia de la instrucción PID utilizada en un algoritmo de velocidad de la ecuación PID no interactivo ayudara a mejorar el control. Hipótesis específica 2: Un correcto desarrollo de los algoritmos de forma posicional de forma de velocidad permitirá una mejor performance del sistema de control. Hipótesis específica 3: El nivel de automatización mejorará la eficiencia en el desarrollo de los sistemas de tanques de nivel de agua. Hipótesis específica 4: El nivel integrado de seguridad (SIL) mejorará la seguridad operacional de los sistemas de tanques de nivel de agua.	Variable Independiente El control PID no interactivo aplicado a sistemas de tanque de Nivel de Agua. Que permite regular el nivel de agua en los tanques así tener el control de grandes cantidades de masas de agua. Variable dependiente: Automatización en el Sistema de Tanque de Agua. Donde el proceso se lleve sin mucha participación humana.	Variable Independiente X.1. Cantidad de datos para procesar mediante el algoritmo de estimación paramétrica para obtención del modelo. X.2. Medida de la acción de control Variable Dependiente Y.1 Nivel de Automatización Y.2 Seguridad de procesos (SIL)

Anexo B: Tabla de configuración de Registros Modbus RTU

Decimal de código de función (Hex)	Descripción	Disponible para configuración	Longitud máxima (bits)
1 (1 hex)	Lectura de varios bits (bobinas)	Canal	128
2 (2 hex)	Lectura de varios bits (entradas binarias)	Canal	128
3 (3 hex)	Lectura de varias palabras (registros de mantenimiento)	Canal	125
4 (4 hex)	Lectura de varias palabras (registros de entrada)	Canal	125
5 (5 hex)	Escritura de un bit (bobina)	Canal Valor de inicialización (tipo de mensaje predeterminado para los valores de inicialización)	1
6 (6 hex)	Escritura de una palabra (registro)	Canal Valor de inicialización	1
15 (0F hex)	Escritura de varios bits (bobinas)	Canal Valor de inicialización	128
16 (10 hex)	Escritura de varias palabras (registros)	Canal Valor de inicialización	123
23 (17 hex)	Lectura/escritura de varias palabras (registros)	Canal (tipo de mensaje predeterminado para la configuración del canal)	125 (lectura) 121 (escritura)

Anexo C: Código de configuración como Esclavo a Arduino Due y PLC.

```
#include "SimpleModbusSlave_DUE.h"
// ***** Definiendo pines de lectura *****
#define pinSignal_FM1 4
#define pinSignal_FM2 7
#define pinSignal_FM3 10
#define Trigger 30
#define Echo 31

#define ID_SLAVE 1
#define RS485_TX_ENABLE_PIN 2

// ***** Declaración de variables *****
const float ConvFactor1=7.75, ConvFactor2=7.75, ConvFactor3=7.7475;
const int scalingFactor = 100;
uint8_t count=0;
unsigned long t1,t2,t3;
bool flag_modbus = false;

// ***** Registros del Esclavo *****
enum
{
    TANK_HEIGHT,
    FLOW_RATE1,
    FLOW_RATE_2,
    FLOW_RATE_3,
    HOLDING_REGS_SIZE // leave this one
};

unsigned int holdingRegs[HOLDING_REGS_SIZE]; //
// ***** Definición de clase flujómetro *****
class Flowmeter {
private:
    uint8_t pinSignal;
    volatile int numPulses;
    float conversionFactor;
    int frequency;

public:
    // Constructor
    Flowmeter(uint8_t _pinSignal, float _conversionFactor):
    pinSignal(_pinSignal), conversionFactor(_conversionFactor) {
        numPulses = 0;
        pinMode(pinSignal, INPUT);
    }
    void CounterPulses() {
        numPulses++;
    }
    int GetFrequency() {
```

```

        frequency = numPulses;
        return frequency;
    }
    void ResetNumPulses() {
        numPulses = 0;
    }
    float CalculateFlow() {
        return frequency / conversionFactor;
    }
};
// ***** Instanciando los flujómetros *****
Flowmeter FM1(pinSignal_FM1,ConvFactor1);
Flowmeter FM2(pinSignal_FM2,ConvFactor2);
Flowmeter FM3(pinSignal_FM3,ConvFactor3);
// ***** Funciones de interrupciones *****
void ISR1(){
    FM1.CounterPulses();
}
void ISR2(){
    FM2.CounterPulses();
}
void ISR3(){
    FM3.CounterPulses();
}

void setup(){
    Serial.begin(9600);
    // ***** Declaración de entradas y salidas *****
    pinMode(Triquer, OUTPUT);
    pinMode(Echo, INPUT);
    digitalWrite(Triquer, LOW);
    // ***** Declaración de pines de interrupción *****
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinSignal_FM1), ISR1, RISING);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinSignal_FM2), ISR2, RISING);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinSignal_FM3), ISR3, RISING);

    modbus_configure( &Serial1, 9600, 11, 2, 4, holdingRegs);

    modbus_update_comms(9600, ID_SLAVE);

    t1 = millis();
    t2 = millis();
    t3 = millis();
}
float d_temp;
void loop(){
    // ***** Lectura de Sensor Ultrasónico HC-SR04 *****
    if(millis()-t1>100){
        t1 = millis();

```

```

digitalWrite(Triple, HIGH);
delayMicroseconds(10);
digitalWrite(Triple, LOW);

float t = pulseIn(Echo, HIGH); // Ancho del pulso
d_temp += t/59.0;              // Conversión del tiempo a distancia en cm
count++;

if(count>=10){
    unsigned int d = d_temp*scalingFactor/10; //InicialDist - d_temp/20;
    holdingRegs[TANK_HEIGHT] = d;
    //Serial.println("Distancia: "+String(d)+" ->
"+String(holdingRegs[0])+" "+String(holdingRegs[1]));
    count = 0;
    d_temp = 0.0;
}
}
// ***** Lectura de Fluómetros YF-S201 *****
if(millis()-t2>1000){
    noInterrupts();

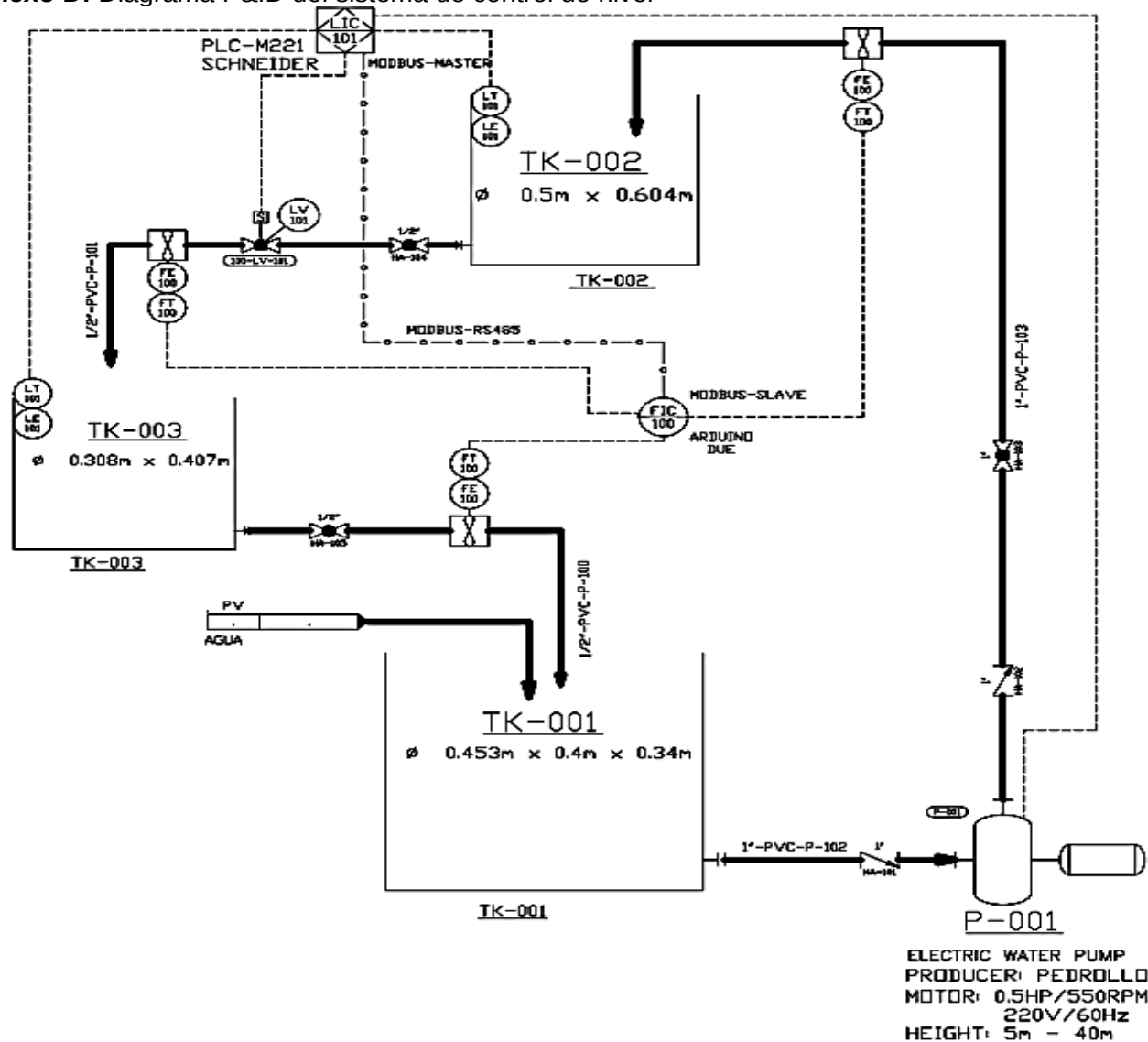
    float frequency1 = FM1.GetFrequency();
    float frequency2 = FM2.GetFrequency();
    float frequency3 = FM3.GetFrequency();
    // Cálculo del flujo
    unsigned int flowRate1 = FM1.CalculateFlow()*scalingFactor;
    unsigned int flowRate2= FM2.CalculateFlow()*scalingFactor;
    unsigned int flowRate3= FM3.CalculateFlow()*scalingFactor;

    holdingRegs[FLOW_RATE1] = flowRate1;
    holdingRegs[FLOW_RATE_2] = flowRate2;
    holdingRegs[FLOW_RATE_3] = flowRate3;

    FM1.ResetNumPulses();
    FM2.ResetNumPulses();
    FM3.ResetNumPulses();
    t2 = millis();
    interrupts();
}
if(!flag_modbus){
    flag_modbus = true;
    Serial1.flush();
}
modbus_update();
}

```

Anexo D: Diagrama P&ID del sistema de control de nivel



General Notes

LAZO 100
 El lazo realiza la captación de los sensores de flujo (FE) tipo turbina, al indicador o Arduino Due (FIC).

LAZO 101
 El lazo realiza el control de nivel por medio del PLC M221 Schneider (LIC). Captando las señales de los transmisores de voltaje por medio del sensor de nivel (LE) y aplicando control PID o avanzado sobre la válvula de control (LV).

LAZOS DE SEGURIDAD
 Los lazos de seguridad tanto del 102-105 son implementados como sistemas instrumentados de seguridad (SIS), y el nivel correspondiente a estos sistemas según la norma IEC61508/61511, SIL, y las funciones de los controladores que realizan un control instrumentado o sistemas SIF.

ELEMENTOS UTILIZADOS:

- Tanques:
 TK-001
 TK-002
 TK-003
- Válvulas check:
 HA-101
 HA-102
- Válvulas de Globo:
 HA-103
 HA-104
 HA-105

No.	Revision/Issue	Date

Drawing Name

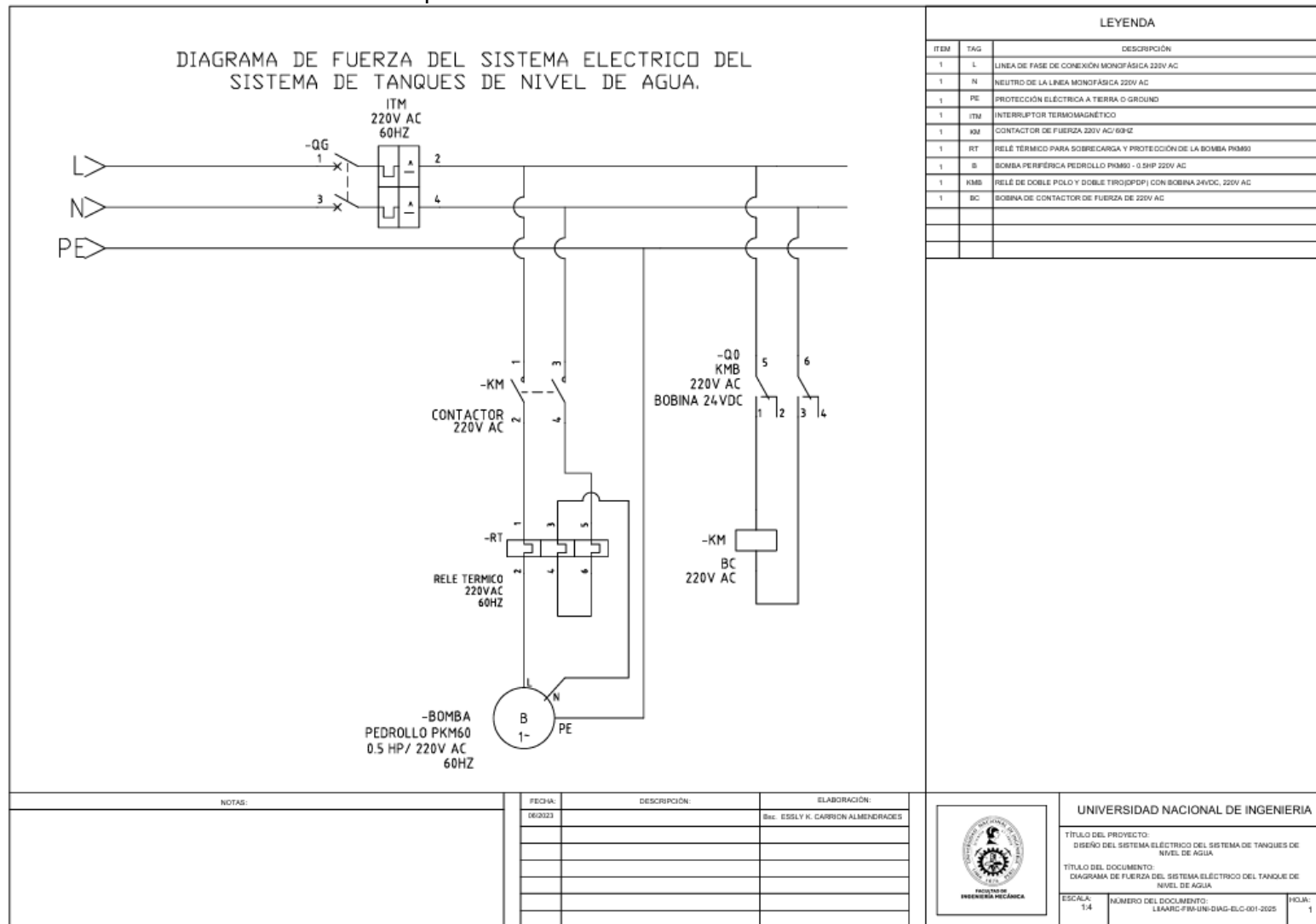
DTI_Control De Nivel

Project Name and Address

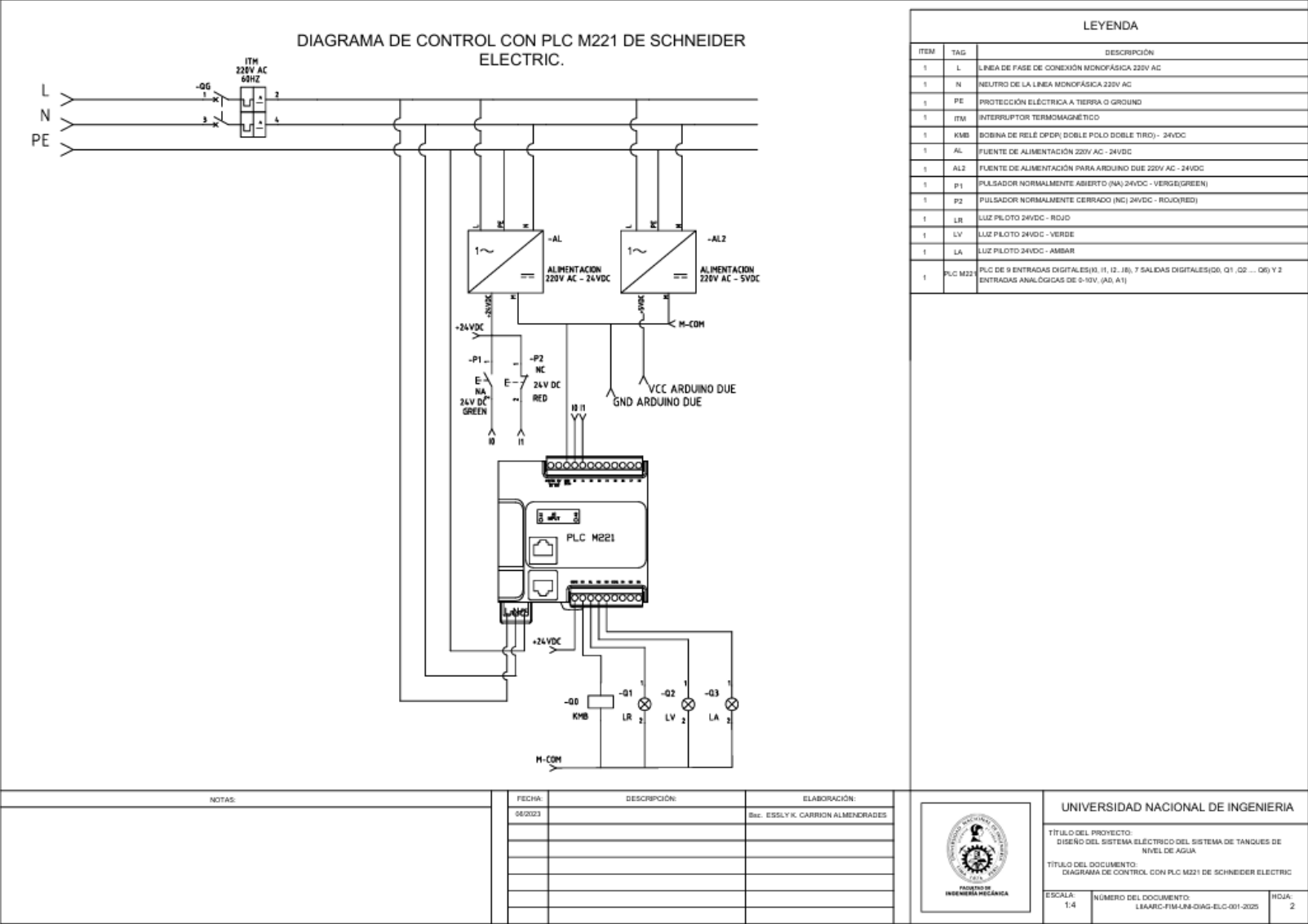
PLANTA DE CONTROL DE NIVEL USANDO
 PLC M221 SCHNEIDER

Area	Stamp
100	
Drawing Number	
01	
Author	
Essly Carrion	

Anexo E: Diseño del Plano Eléctrico de Potencia para el Tablero de control de nivel



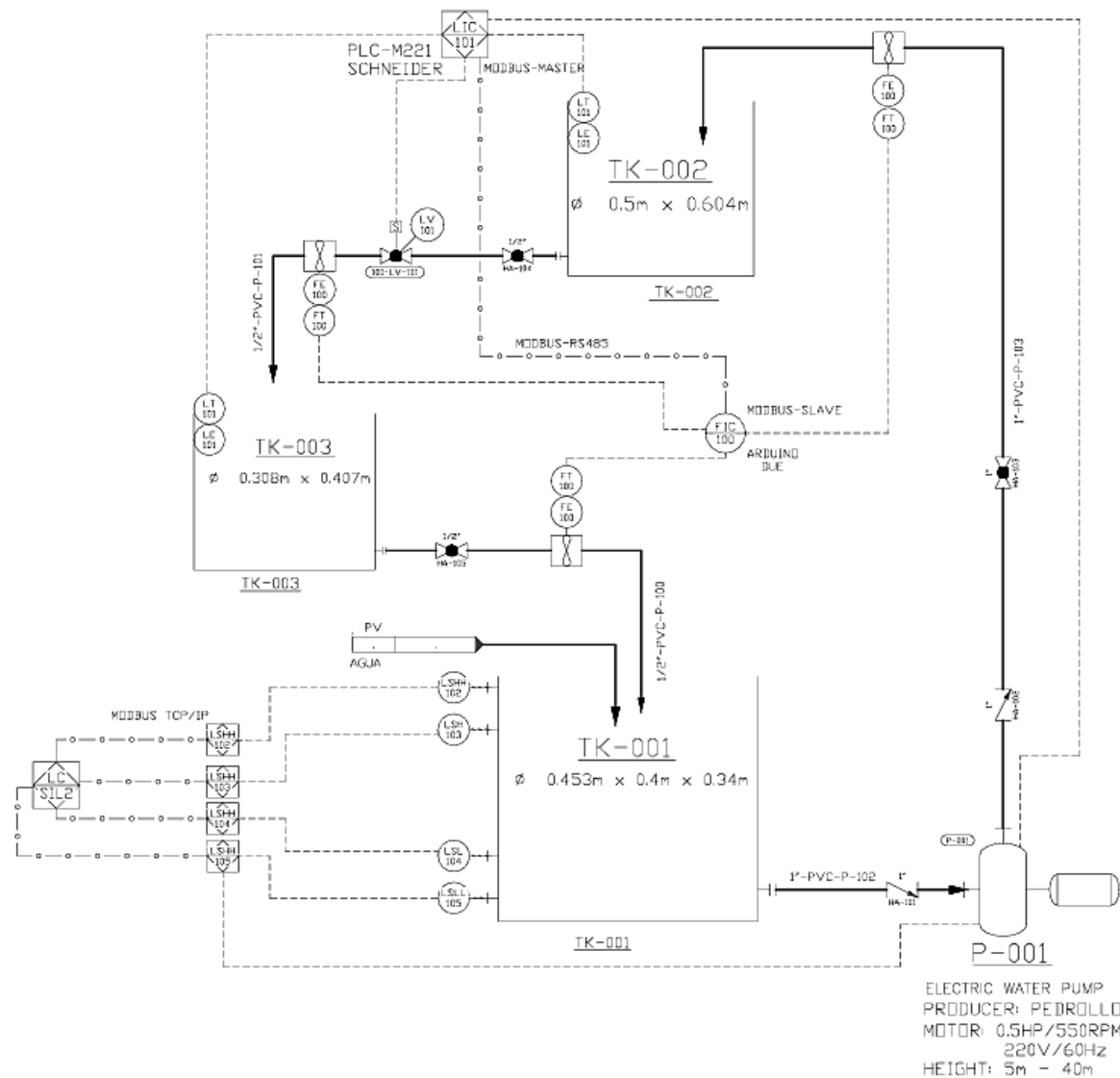
Anexo F: Diseño del Plano Eléctrico de Control para el Tablero QG.



Anexo G: Lista de Requerimientos y Descripción de Instrumentación.

LISTA DE REQUERIMIENTOS								
item	Nombre	Descripción	TAG	DI	DO	AI	AO	EXTERNO
001	LLAVE TERMOMAGNETICO	PROTECCIÓN A CORTOCIRCUITOS Y SOBRECARGAS	LL_TERM.					X
002	LLAVE DIFERENCIAL	PROTECCIÓN DE CORRIENTE ALTA A LAS PERSONAS	LL_DIF.					X
003	FUENTE DE ALIMENTACIÓN EXTERNA	TRANSFORMA EL VOLTAJE AC A DC PARA LA ALIMENTACIÓN AL PLC (24V)	FUENTE_24V					X
004	START	BOTON DE INICIO DEL PROCESO (NA)	START	X				
005	STOP	BOTON DE PARO DEL PROCESO (NC)	STOP	X				
006	BOTON DE EMERGENCIA	BOTON DE CIERRE DE ALIMENTACIÓN DEL PROCESO (NC)	EMERGENCIA					X
007	BOTON DE RESET	RESETEA EL SISTEMA (NA)	RESET	X				
008	SENSOR DE NIVEL DEL TK-002	SENSOR INDUSTRIAL DE NIVEL ULTRASONICO	S1			X		
009	SENSOR DE NIVEL DEL TK-003	SENSOR INDUSTRIAL DE NIVEL ULTRASONICO	S2			X		
010	SENSOR DE FLUJO PARA TK-001	SENSOR DE FLUJO TIPO ULTRASONICO O ELECTROMAGNETICO	S3			X		
011	SENSOR DE FLUJO PARA SALIDA DE TK-002	SENSOR DE FLUJO TIPO ORIFICIO	S4			X		
012	SENSOR DE FLUJO PARA SALIDA DE CONTROLADOR	SENSOR DE FLUJO TIPO ORIFICIO	S5			X		
013	SENSOR CAPACITIVO PARA TK-001	SENSOR INDICADOR DE NIVEL BAJO	S6	X				
014	SENSOR CAPACITIVO PARA TK-001	SENSOR INDICADOR DE NIVEL MEDIO BAJO	S7	X				
015	SENSOR CAPACITIVO PARA TK-001	SENSOR INDICADOR DE NIVEL MEDIO ALTO	S8	X				
016	SENSOR CAPACITIVO PARA TK-001	SENSOR DE NIVEL ALTO	S9	X				
017	SELECTOR	SELECCIÓN MANUAL A AUTOMATICO	SELEC.	X				
018	VALVULA DE CONTROL	VALVULA DE CONTROL DE NIVEL	VAL_CONTROL				X	
019	CONTACTOR DE MOTOR	CONTACTOR PARA CONTROL POR PLC	MOTOR		X			
020	RELE TERMICO	EN CASO DE FALLAS EN EL CALENTAMIENTO DEL CIRCUITO DEL MOTOR	RELEY_TERM.	X				
021	LED VERDE	INDICA EL PROCESO CONTINUO	LED_START		X			
022	LED ROJO	INDICA EL PARO DEL PROCESO	LED_STOP		X			
023	ALARMA DE EMERGENCIA	INDICA FALLAS EN EL SISTEMA AUDITIVO	ALARM.		X			
024	LED DE EMERGENCIA	INDICA FALLAS EN EL SISTEMA VISUAL	LED_EMER.		X			
025	INDICADORES DE TIEMPO	EL TIEMPO DEL PROCESO	TIEMPO			X		
	CABLE	18-16AWG						
				9	5	6	1	-
		% DE SPARE O REPUESTOS DISPONIBLES		20%				
		TOTAL		10.8	6	7.2	1.2	
		CAPACIDAD DEL PLC		11	6	8	1	
		TIPO DE PLC AC/DC/RLY						

Anexo H: Diagrama P&ID SIL para el sistema de control de nivel



General Notes		
LAZO 100: El lazo realiza la captación de los sensores de Flujo (FE) tipo turbina, al indicador o Arduino Due (FIC).		
LAZO 101: El lazo realiza el control de nivel por medio del PLC M221 Schneider (LIC). Captando las señales de los transmisores de voltaje por medio del sensor de nivel (LE) y aplicando control PID o avanzado sobre la válvula de control (LV).		
LAZOS DE SEGURIDAD: Los lazos de seguridad tanto del 102-105 son implementados como sistemas instrumentados de seguridad (SIS), y el nivel correspondiente a estos sistemas según la norma IEC61508/61511,SIL, y las funciones de los controladores que realizan un control instrumentado o sistemas SIF.		
ELEMENTOS UTILIZADOS: -Tanques: TK-001 TK-002 TK-003 -Válvulas check: HA-101 HA-102 -Válvulas de Globo: HA-103 HA-104 HA-105		
No.	Revision/Issue	Date
Drawing Name		
DTI_Control De Nivel		
Project Name and Address		
PLANTA DE CONTROL DE NIVEL USANDO PLC M221 SCHNEIDER		
Area	Stamp	
100		
Drawing Number		
01		
Author		
Essly Carrion		

Anexo I: Código en Matlab para la visualización de la Adquisición de Datos por NI DAQ
.6211

```
data = readmatrix('idStep5.lvm', 'FileType', 'text');
time = data(:, 1);
indicesVariables = [1, 3, 5, 7, 9, 11];

conversionFactors = [10, 1, 1, 1, 1, 1];
for i = 1:length(indicesVariables)
    varIdx = indicesVariables(i);
    variableData = data(:, varIdx + 1);
    switch varIdx
    case 1
        variableName = 'Impulso (V)';

    case 3
        variableName = 'Planta P(s) (cm)';
    case 5
        variableName = 'Nivel de Tanque 02 (cm)';
    case 7
        variableName = 'Sensor de Flujo 01 (L/min)';
        variableData = variableData*100;
    case 9
        variableName = 'Sensor de Flujo 02 (L/min)';
    case 11
        variableName = 'Sensor de Flujo 03 (L/min)';
    end
    figure('Color', 'w', 'Position', [100, 100, 800, 400]);
    plot(time, variableData, 'LineWidth', 1.5, 'Color', [0, 0.5, 1]);
    xlabel('Tiempo (s)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
    ylabel(variableName, 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
    title(variableName, 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold');
    grid on;
    xlim([min(time), max(time)]);
    ylim auto;
    box on;
end
```

Anexo J: Código en Matlab para la Generación de la F.T. de la Planta.

```
clc; clear; close all;

%% Cargar datos

data = readmatrix('idStep5.lvm', 'FileType', 'text');

% Asignación de variables

t = data(:, 1);    % Tiempo (s)
u = data(:, 2);    % Entrada (u)
y = data(:, 4);    % Salida (y)

% Homogeneizar longitudes por seguridad

N = min([length(t), length(u), length(y)]);
u = u(1:N);
y = y(1:N);

%% Tiempo de muestreo

Ts = 0.1;          % Tiempo de muestreo fijo (s)

tsim = Ts * (N - 1); % Tiempo total

t_sim = 0:Ts:tsim; % Vector de tiempo uniforme para simulaciones

%% Identificación del sistema

datos_id = iddata(y, u, Ts); % Crear objeto iddata

orden_modelo = 1; % Orden del modelo

modelo_id = tfest(datos_id, orden_modelo); % Estimar modelo de transferencia

% Modelo

disp('Modelo identificado:')
```

```

present(modelo_id)

%% Comparación entre datos reales y el modelo identificado
figure
compare(datos_id, modelo_id)
title('Comparación entre sistema real e identificado')

%% Modelo en formato TF
Gd = tf(modelo_id);      %

%% Simulación de la respuesta al escalón
figure
yd = 10 * step(Gd, t_sim);    % Respuesta simulada con escalón de magnitud 10
plot(t_sim, y, 'b', 'LineWidth', 0.1); hold on;
plot(t_sim, yd, 'r--', 'LineWidth', 0.5); hold off;
grid on;
axis([0 t_sim 0 12])
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Nivel (cm)')
legend('Sistema Real', 'Sistema Identificada')
title('Comparación de Respuesta al Escalón')

% Coeficientes de Gd
[num_c, den_c] = tfdata(Gd, 'v'); % Modelo continuo estimado

% FT continua (Gd(s))
%  $K / (\tau s + 1)$ 
K = num_c(2)/den_c(2);      % Ganancia

```

```
tau = den_c(1)/den_c(2); % Constante de tiempo
```

```
ft_str = sprintf('$G_d(s) = \frac{%.6f}{%.6f s + 1}$', K, tau);
```

```
% Ecuación en la figura en formato LaTeX
```

```
text(30, 9, ft_str, 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14, 'BackgroundColor', 'w')
```

Anexo K: Código en Matlab para la Generación de la F.T. de la Válvula de Control.

```
clc; clear all; close all;

opts = detectImportOptions('idvalvula2.lvm', 'FileType', 'text');
data = readtable('idvalvula2.lvm', opts);
data = table2array(data);

t = data(:,1);
y = data(:,2);
u = data(:,4);
t = t - t(1); % tiempo normalizado

% Re-muestreo
Fs = 1 / mean(diff(t)); % Frecuencia de muestreo
Ts = 1 / Fs; % Periodo
t_uniform = (t(1):Ts:t(end))'; % tiempo uniforme
y_uniform = interp1(t, y, t_uniform, 'linear');
u_uniform = interp1(t, u, t_uniform, 'linear');

% Identificación
data_id = iddata(y_uniform, u_uniform, Ts);

% Retardo
theta = 6; % Retardo fijo de 6 segundos

% Estimación de la función de transferencia de primer orden
np = 1;
nz = 0;
```

```

G_est = tfest(data_id, np, nz, 'IODelay', theta);

step(G_est);

% Simulación

y_model = lsim(G_est, u_uniform, t_uniform);

%%

Gs_text = sprintf('$G(s) = \frac{%.6f}{%.1f s + %.6f} e^{-%.1f s}$', 0.02475, 1,
0.02142, 6);

text(0.5, 0.5, Gs_text, 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 12);

% Graficas

figure;

plot(t, y, 'b', 'DisplayName', 'Salida Real');

hold on;

plot(t_uniform, y_model, 'r--', 'DisplayName', 'Modelo 1er Orden con Retardo');

xlabel('Tiempo (s)');

ylabel('Salida');

legend;

grid on;

title('Comparación: Salida Real vs. Modelo 1er Orden con Retardo');

%%

% Calculo de la RMSE

error = y_uniform - y_model;

RMSE = sqrt(mean(error.^2));

fprintf('Error cuadrático medio (RMSE): %.4f\n', RMSE);

% Función de transferencia con retardo

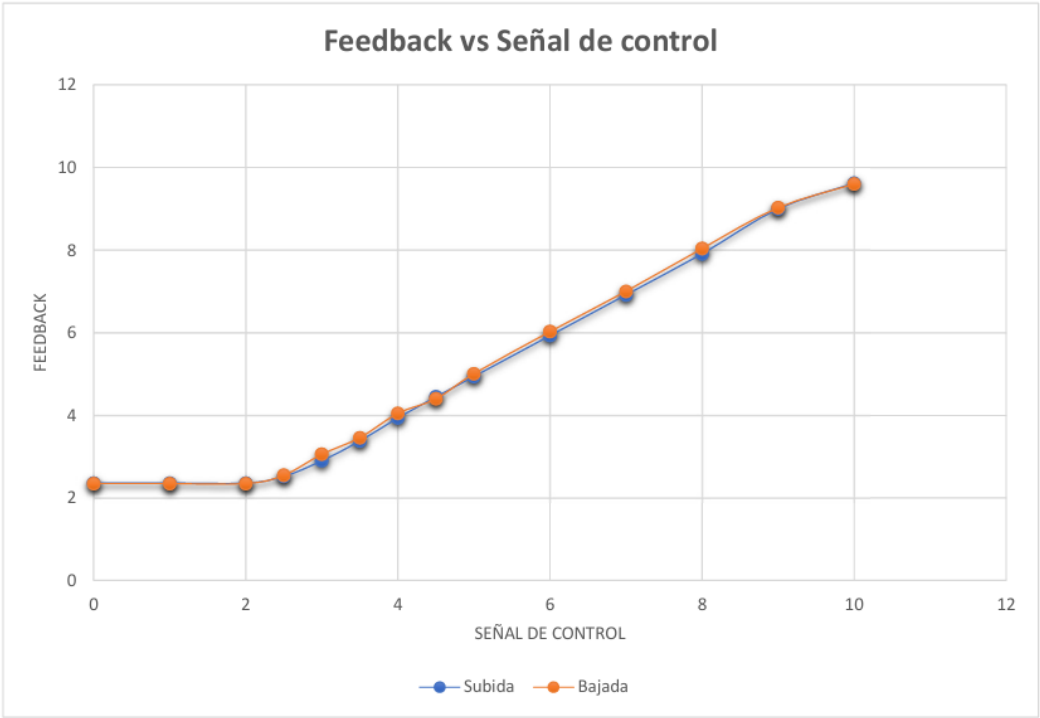
disp('Función de transferencia estimada con retardo:');

G_est

```

Anexo L: Medida de la Histéresis de la válvula de Control en base a Voltaje de control Vs Voltaje de Retroalimentación o Apertura.

Señal de control (V)	Feedback (V)		Apertura
	Subida	Bajada	Angulo Ref.
0	2.36	2.35	0
1	2.36	2.35	0
2	2.36	2.35	0
2.5	2.52	2.55	22.5
3	2.9	3.06	27
3.5	3.38	3.46	31.5
4	3.94	4.05	36
4.5	4.45	4.4	40.5
5	4.94	5.01	45
6	5.93	6.03	54
7	6.92	7	63
8	7.91	8.04	72
9	9	9.03	81
10	9.62	9.6	90



Anexo M: Código de Aproximación al Ziegler-Nichols con el sistema Real.

```
clc; clear; close all;

%% Definición de la planta real

s = tf('s');

Gv = tf([0.02475], [1 0.02142]); % Ganancia de la Valvula

Gd = tf([0 0.009770], [1 0.009021]); % Planta

Gp=Gv*Gd;

L_real = 6; % Retardo real de la planta

G_real = Gp * exp(-L_real * s); % Planta con retardo

%% Parámetros de Ziegler-Nichols

L_ZN = 25.32;

T_ZN = 204.06;

K = dcgain(G_real); % Ganancia del sistema

G_ZN = (K / (T_ZN * s + 1)) * exp(-L_ZN * s);

%% Comparación de respuestas

t = 0:0.1:1000;

figure;

hold on;

step(10*G_real, t);

step(10*G_ZN, t);

legend('Planta Real', 'Aproximación ZN');

xlabel('Tiempo (s)');

ylabel('Altura cm');

title('Comparación de la Planta Real vs. Aproximada por Ziegler-Nichols');

grid on;

hold off;
```

Anexo N: Código de Discretización y Cálculo de los parámetros del PID no interactivo por Ziegler-Nichols y CHR

```
clc; clear; close all;

% Definición de la planta
s = tf('s');
Gv = tf([0.02475], [1 0.02142]); % Ganancia
numGv=[0.02475];
denGv=[1 0.02142];
Gd = tf([0 0.009770], [1 0.009021 ]);
G1=Gv*Gd;

% Tiempo de muestreo
Ts = 0.1;

% Discretización de la planta (ZOH)
Gp_z = c2d(G1, Ts, 'zoh'); %

disp('Planta discretizada en Z (ZOH, sin retardo):');
Gp_z

% Coeficientes del sistema discreto
[num_z, den_z] = tfdata(Gp_z, 'v');

% Coeficientes (b0, b1, ..., a0, a1, ...)
disp('Coeficientes del numerador (b):');
for i = 1:length(num_z)
    eval(sprintf('b%d = %.8f;', i-1, num_z(i)));
```

```

    fprintf('b%d = %.8f\n', i-1, num_z(i));
end

disp('Coeficientes del denominador (a):');
for j = 1:length(den_z)
    eval(sprintf('a%d = %.8f;', j-1, den_z(j)));
    fprintf('a%d = %.8f\n', j-1, den_z(j));
end

% Ecuación en diferencias
fprintf('\nEcuación en diferencias (sin retardo, ZOH):\n');
fprintf('y(k) =');

for i = 1:length(num_z)
    fprintf(' b%d * u(k-%d)', i-1, i-1);
    if i < length(num_z), fprintf(' +'); end
end

for j = 2:length(den_z) % Empezamos en 2 porque a0 es y(k)
    fprintf(' - a%d * y(k-%d)', j-1, j-1);
end

fprintf('\n');

% ► Parámetros de la planta

L = 25.32; % Tiempo de retardo

T = 204.06; % Constante de tiempo

K = dcgain(G1); % Ganancia estática

```

% Parámetros PID (Ziegler-Nichols)

$$K_p = 1.2 * (T / L);$$

$$T_i = 2 * L;$$

$$T_d = 0.5 * L;$$

$$K_i = K_p / T_i;$$

$$K_d = K_p * T_d;$$

% Coeficientes del PID discreto

$$T_s = 0.1;$$

$$q_0 = K_p * (1 + T_s / (2 * T_i) + T_d / T_s);$$

$$q_1 = -K_p * (1 - T_s / (2 * T_i) + 2 * T_d / T_s);$$

$$q_2 = K_p * (T_d / T_s);$$

% ===== CHR (mínimo sobrepaso) =====

$$K_{p_CHR} = 0.6 * (T / (L));$$

$$T_{i_CHR} = T;$$

$$T_{d_CHR} = 0.5 * L;$$

$$K_{i_CHR} = K_{p_CHR} / T_{i_CHR};$$

$$K_{d_CHR} = K_{p_CHR} * T_{d_CHR};$$

$$C_CHR = \text{pid}(K_{p_CHR}, K_{i_CHR}, K_{d_CHR});$$

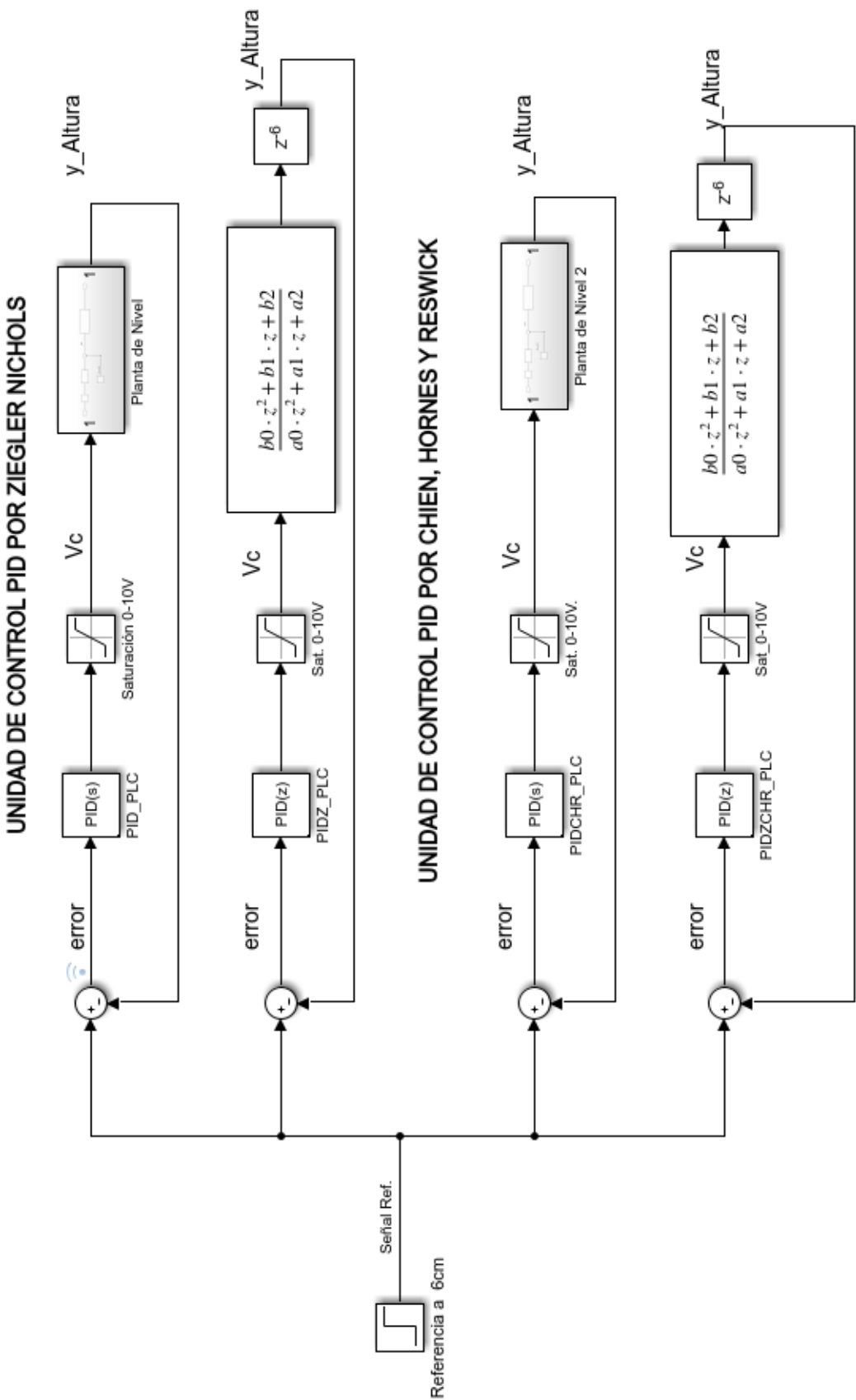
% Coeficientes del PID discreto

$$q_{0_CHR} = K_{p_CHR} * (1 + T_s / (2 * T_{i_CHR}) + T_{d_CHR} / T_s);$$

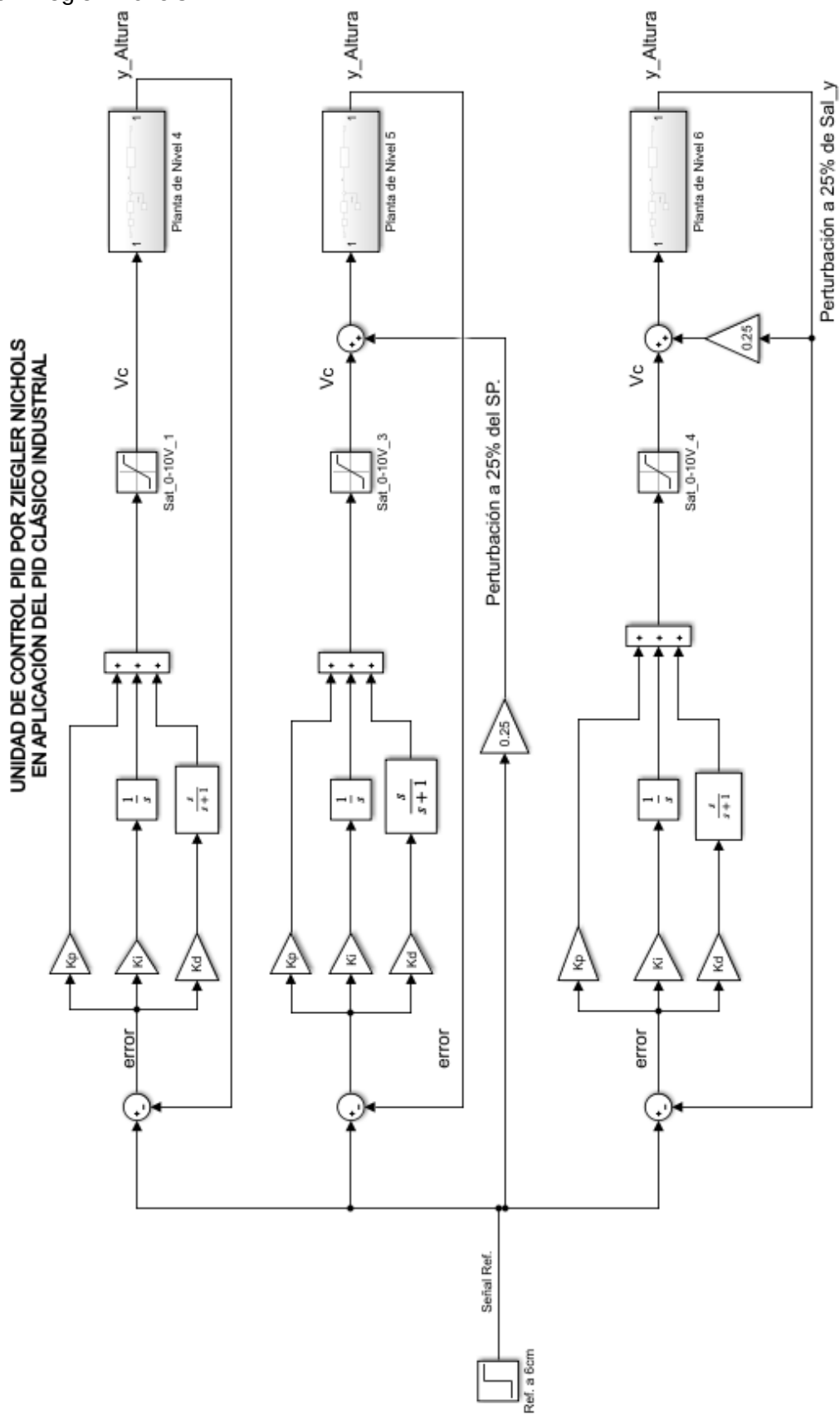
$$q_{1_CHR} = -K_{p_CHR} * (1 - T_s / (2 * T_{i_CHR}) + 2 * T_{d_CHR} / T_s);$$

$$q_{2_CHR} = K_{p_CHR} * (T_{d_CHR} / T_s);$$

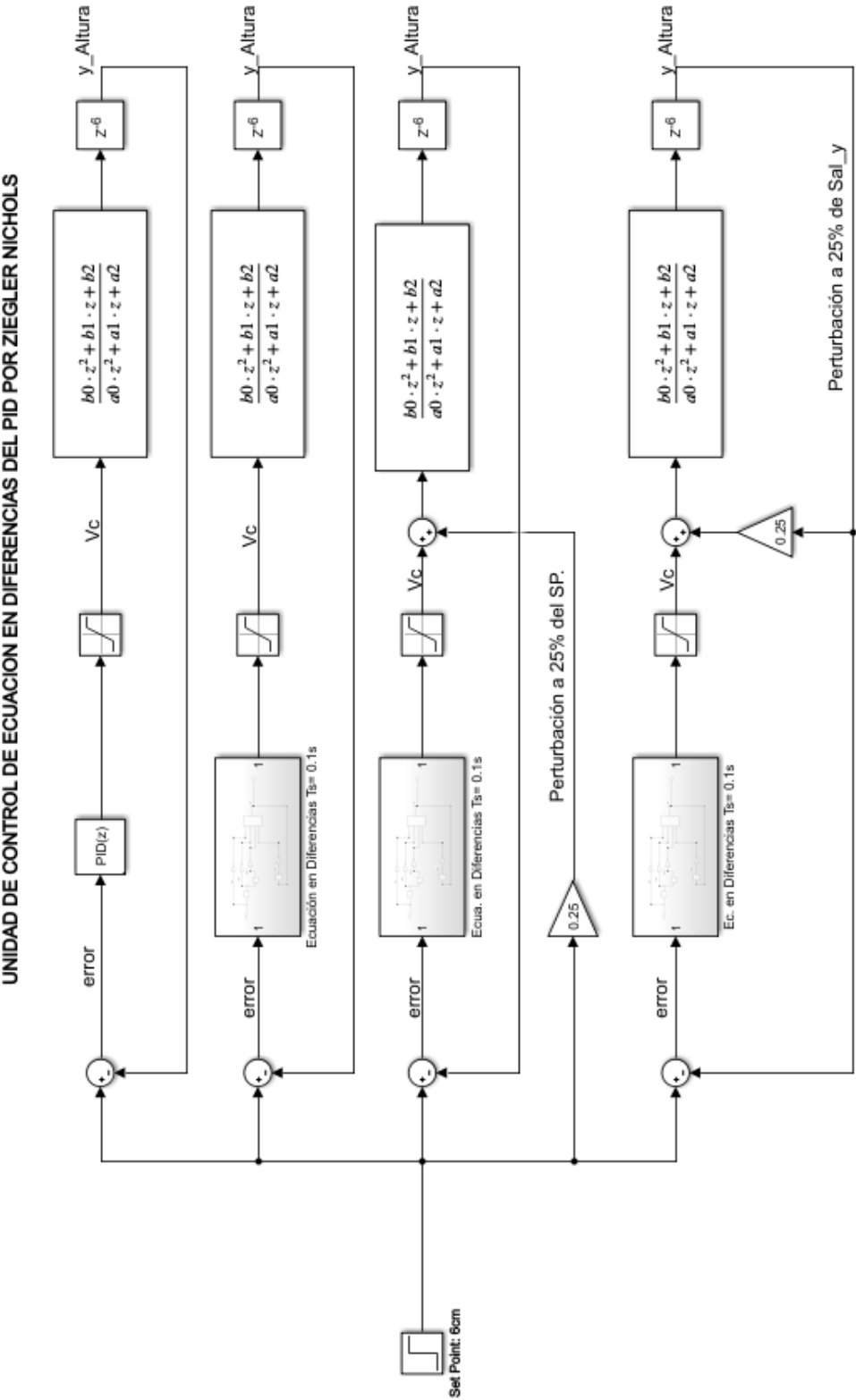
Anexo O: Sistema de Control para el PID por ZN y CHR



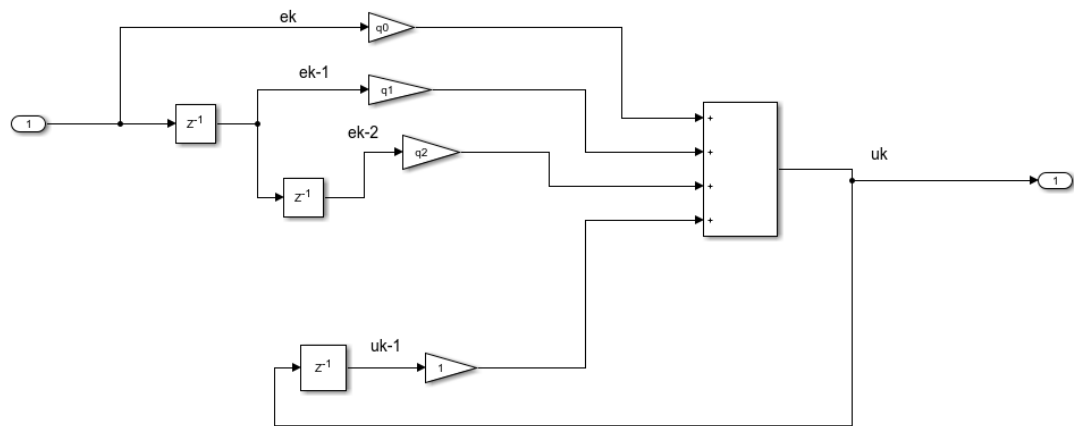
Anexo P: Sistema de Control PID clásico industrial con implementación de perturbaciones del 25% en Ziegler Nichols



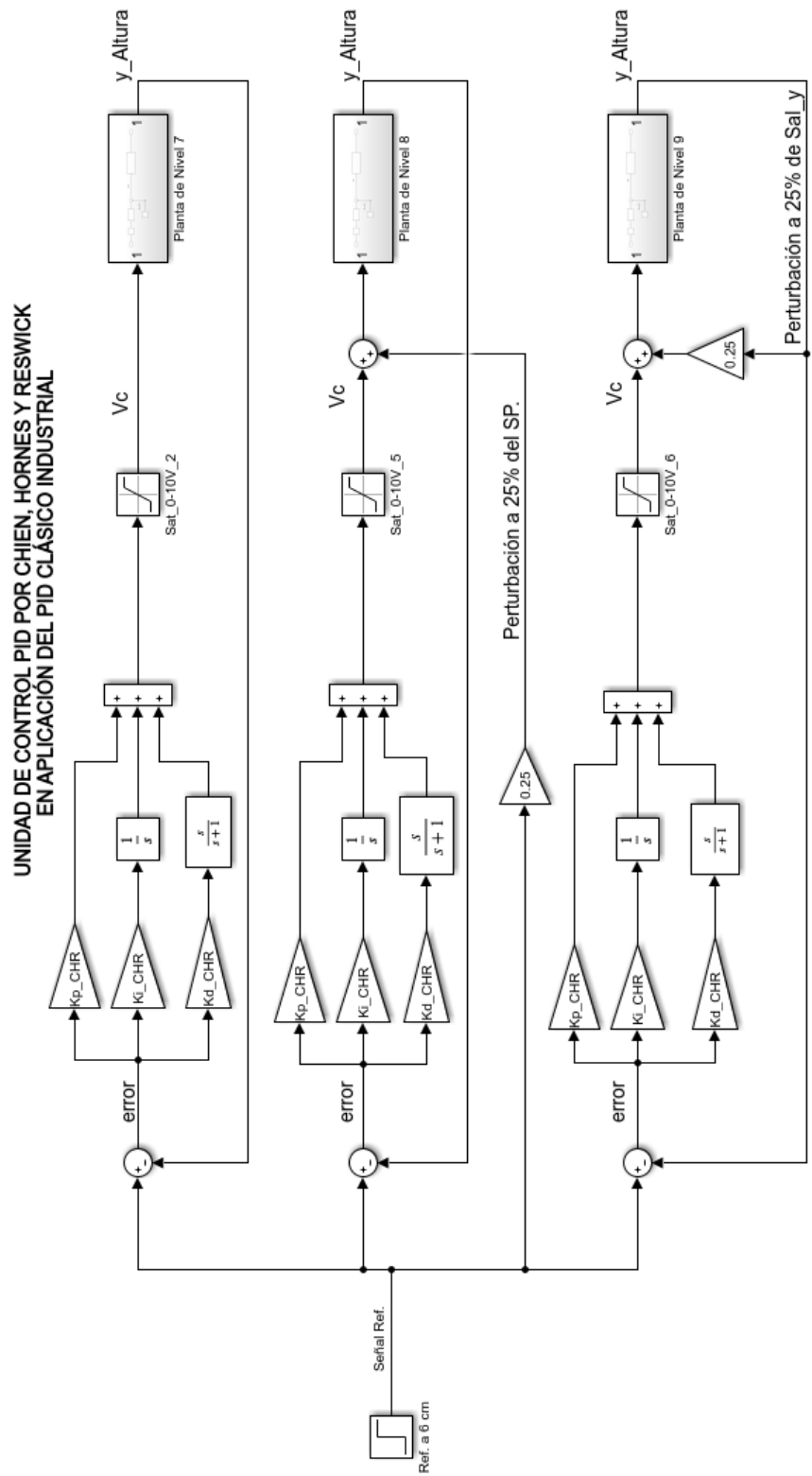
Anexo Q: Sistema de Control PID no interactivo con implementación de perturbaciones del 25% en Ziegler Nichols



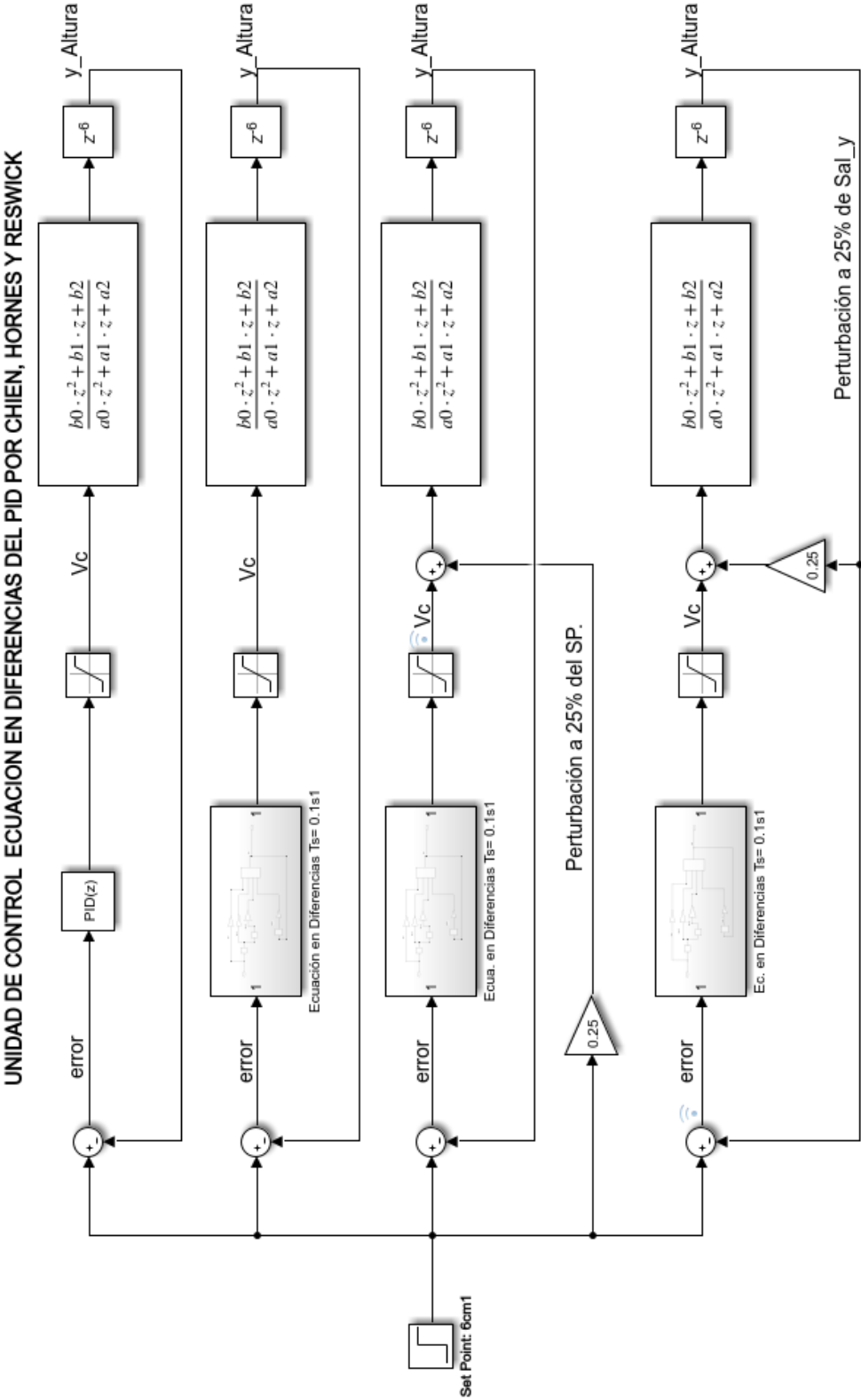
- Vista Interna de la Ecuación en Diferencias del Controlador PID no interactivo



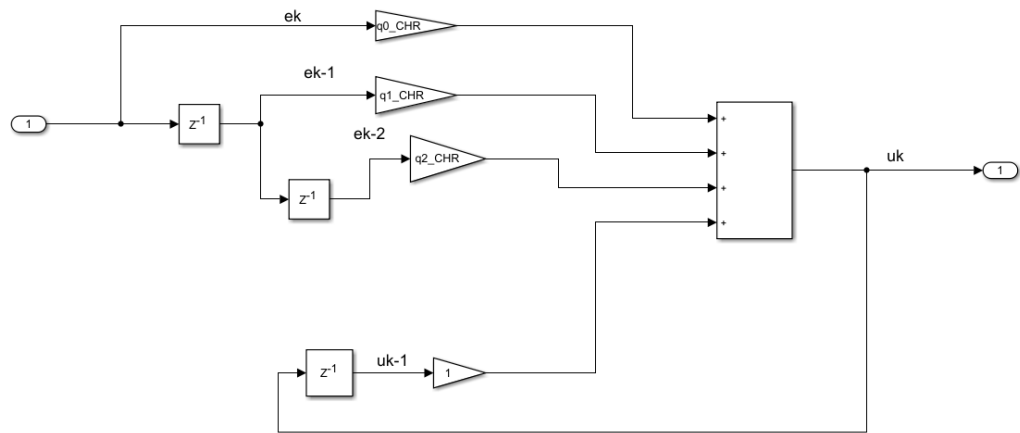
Anexo R: Sistema de Control PID clásico industrial con implementación de perturbaciones del 25% en CHR



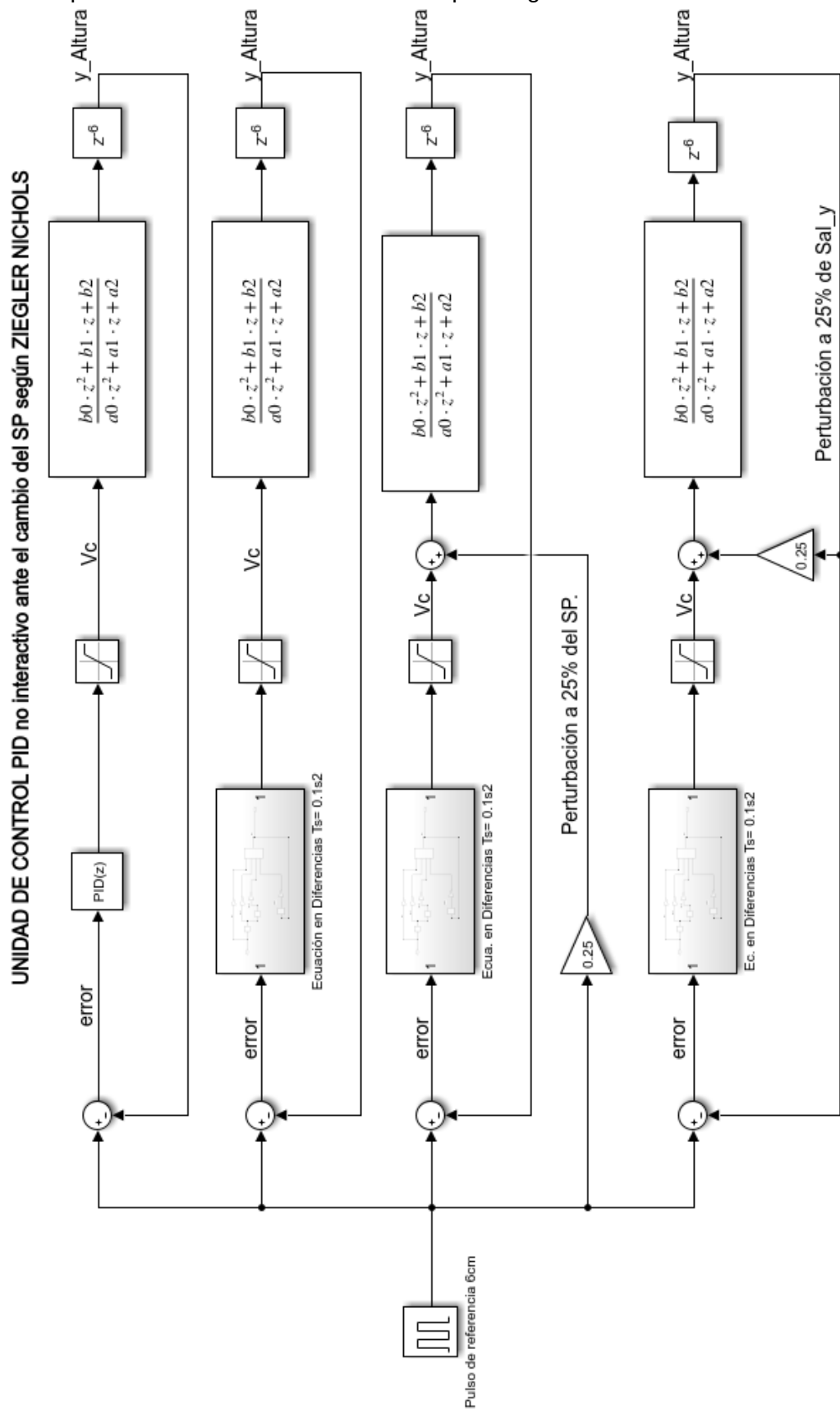
Anexo S: Sistema de Control PID no interactivo con implementación de perturbaciones del 25% en CHR



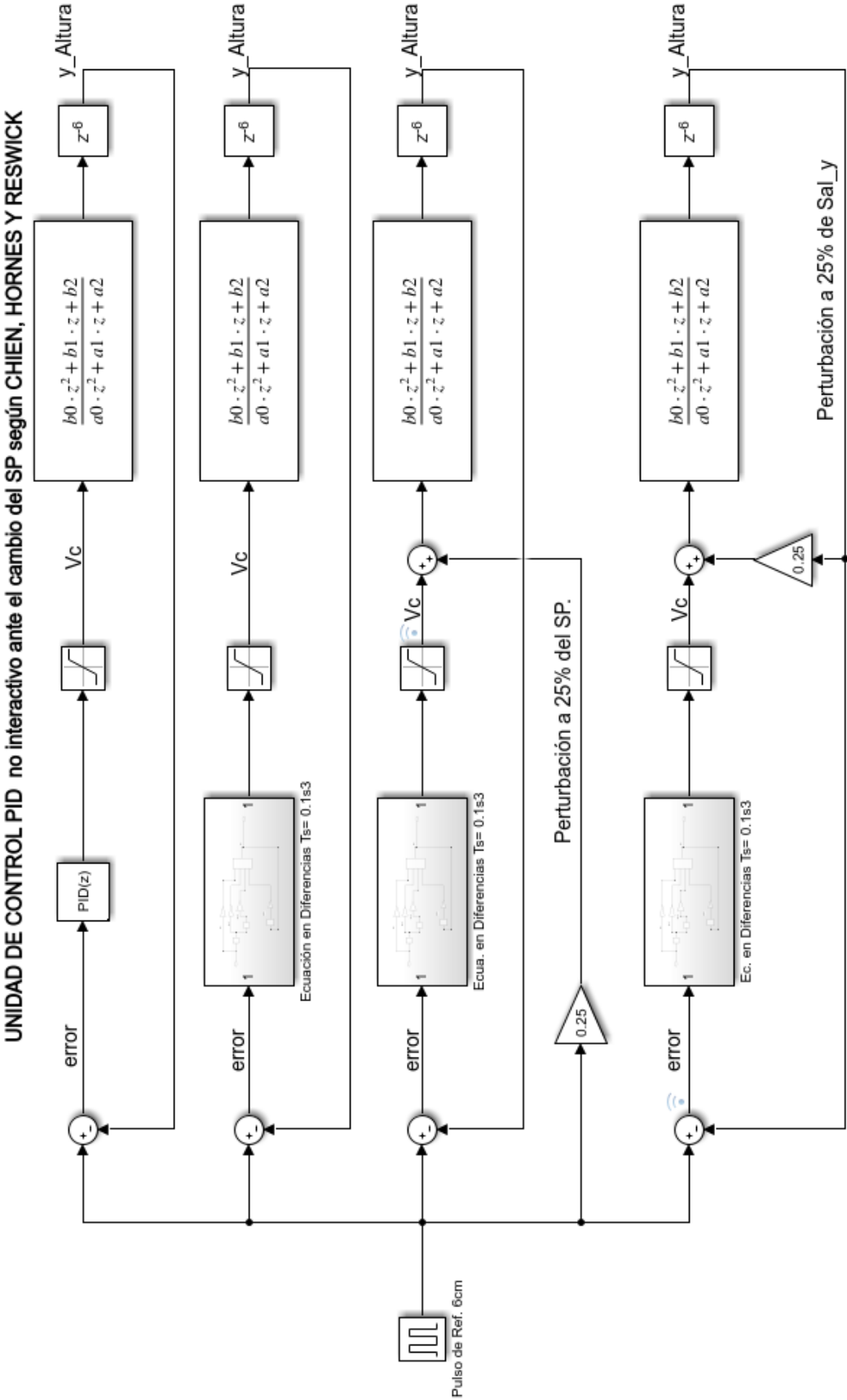
- Vista Interna de la Ecuación en Diferencias del Controlador PID no interactivo



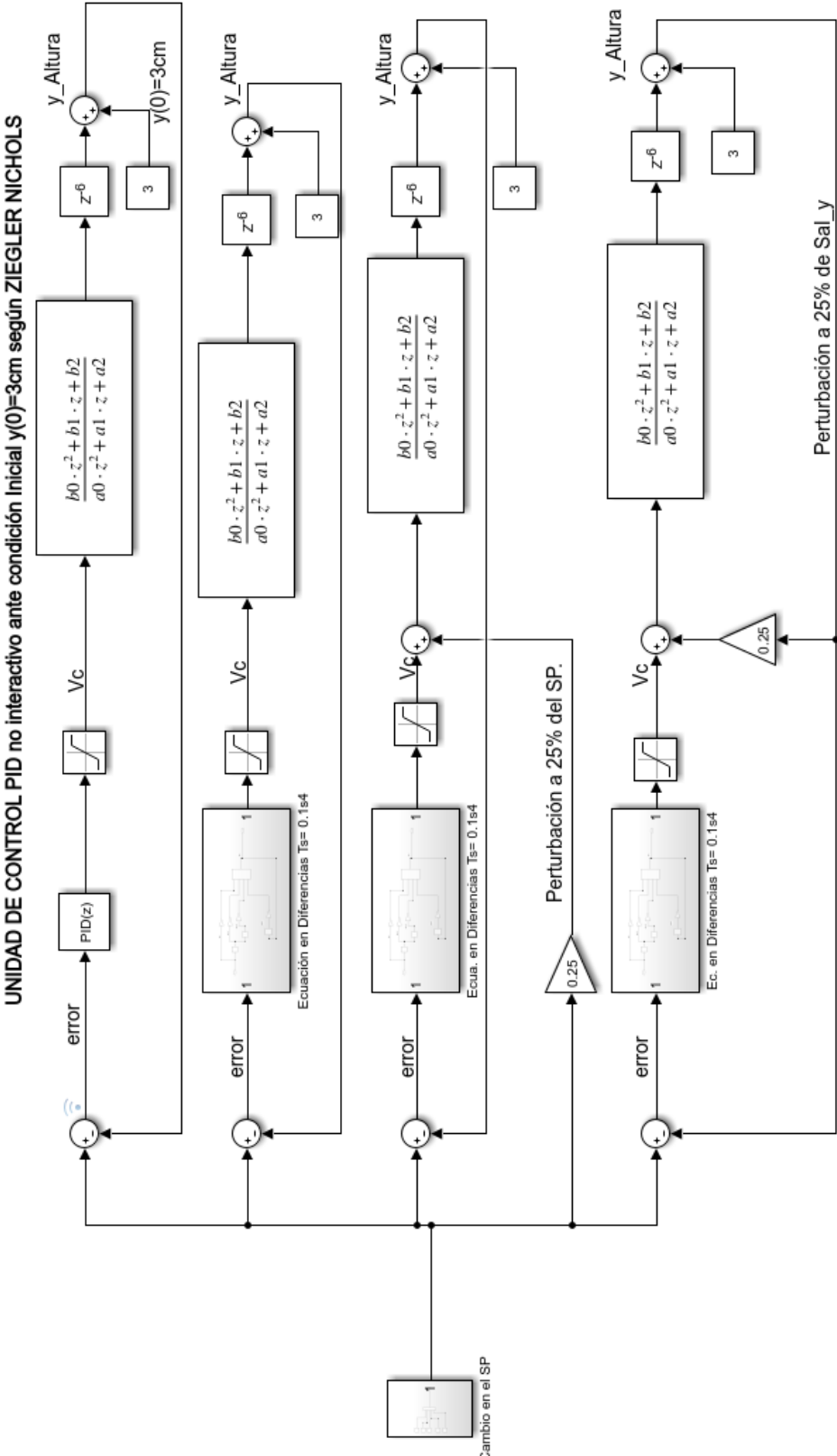
Anexo T: Simulación del Controlador PID no interactivo ante un cambio de llenado y vaciado del tanque a un nivel de referencia de 6cm por Ziegler-Nichols



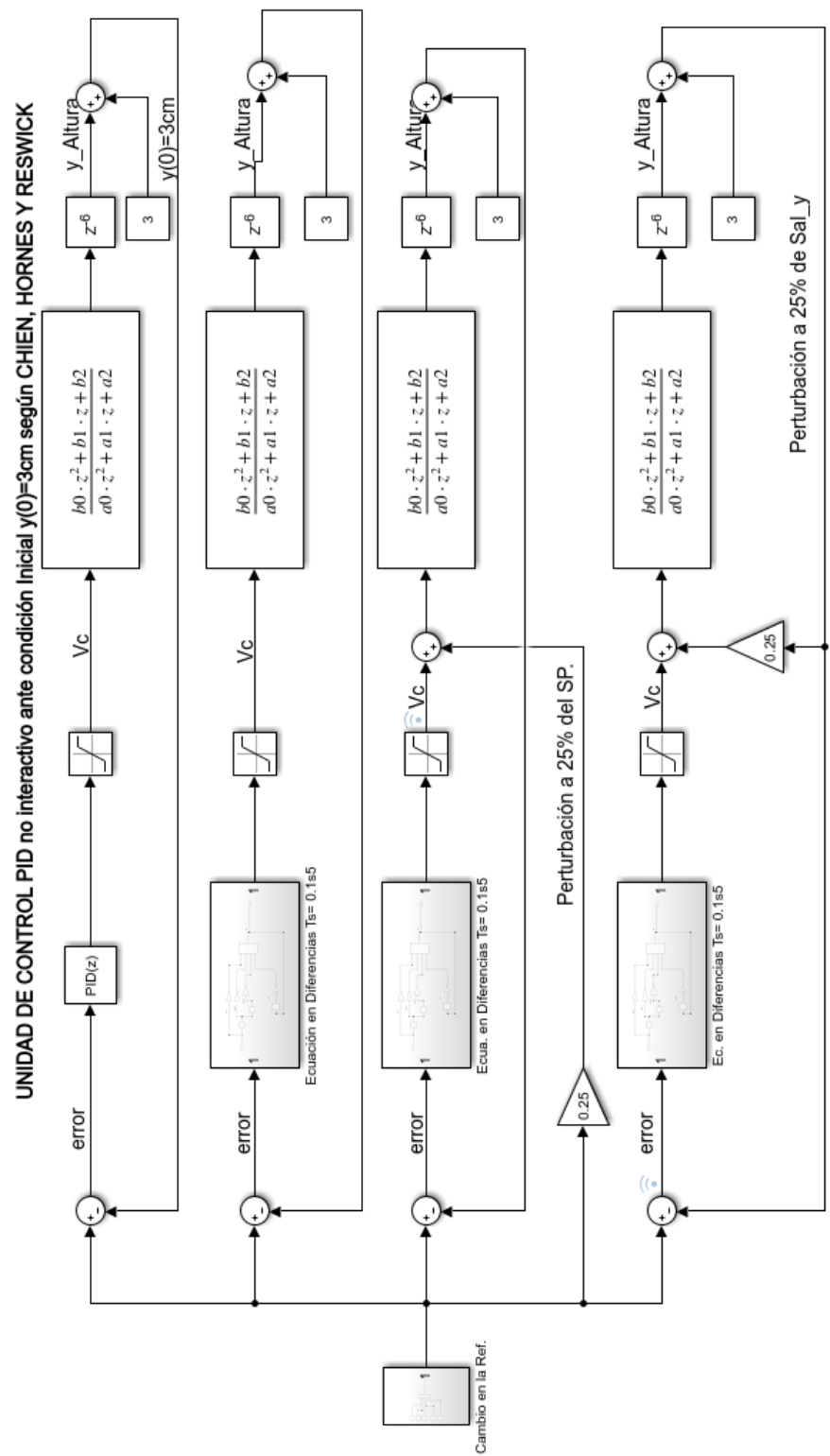
Anexo U: Simulación del Controlador PID no interactivo ante un cambio de llenado y vaciado del tanque a un nivel de referencia de 6cm por CHR



Anexo V: Simulación del Controlador PID no interactivo ante una condición inicial $y(0) = 3\text{cm}$ por Ziegler Nichols



Anexo W: Simulación del Controlador PID no interactivo ante una condición inicial $y(0) = 3\text{cm}$ por CHR



- Configuración del cambio del SP para el Control PID no interactivo con valor inicial del nivel.

