

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ESTUDIO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRÓNICO

Análisis comparativo en el tiempo de establecimiento de un control clásico PID
y un Control Difuso para el proceso de Control de Nivel

Línea de investigación: Robótica y automatización avanzada

Autores:

Avalos Blas, Alexis Faustino

Pereyra Minchán, Christian Anthony

Jurado evaluador:

Presidente: Linares Vertiz, Saul Noe

Secretario: Vargas Diaz, Luis Alberto

Vocal: León Cerna, Alejandro Martin

Asesor:

De La Cruz Rodríguez, Oscar Miguel

Código ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9207-8558>

Trujillo - Perú

2024

Fecha de sustentación: 2024/05/13

Análisis comparativo en el tiempo de establecimiento de un control clásico PID y un Control Difuso para el proceso de Control de Nivel

by Christian Pereyra Minchán

Submission date: 10-May-2024 10:11AM (UTC-0500)

Submission ID: 2304983153

File name: Informe_de_tesis_-_Avalos_Pereyra.pdf (3.31M)

Word count: 8246

Character count: 47581



Miguel de la Cruz
Ingeniero Electrónico
LIP 85598

Análisis comparativo en el tiempo de establecimiento de un control clásico PID y un Control Difuso para el proceso de Control de Nivel

ORIGINALITY REPORT

9%	8%	0%	5%
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	repositorio.upao.edu.pe Internet Source	6%
2	Submitted to Escuela Politecnica Nacional Student Paper	1%
3	Submitted to Corporación Universitaria Iberoamericana Student Paper	1%
4	Submitted to Universidad Privada Antenor Orrego Student Paper	1%
5	repositorio.urp.edu.pe Internet Source	1%

Exclude quotes On

Exclude bibliography On

Exclude matches < 1%


Rafael Alvarado de la Cruz Rodríguez
Ingeniero Electrónico
CIP 60544

Jurado de sustentación Oral

Linares Vertiz, Saul Noe
N° CIP 142213
Presidente



Vargas Diaz, Luis Alberto
N° CIP 104175
Secretario



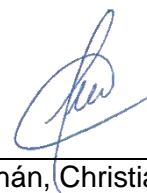
León Cerna, Alejandro Martin
N° CIP 177967
Vocal

Entregado el:

Aprobado por:



Avalos Blas, Alexis Faustino
DNI 74608178



Pereyra Minchán, Christian Anthony
DNI 75153269



De La Cruz Rodríguez, Oscar Miguel
Asesor de Tesis

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTONOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ESTUDIO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Análisis comparativo en el tiempo de establecimiento de un control clásico PID
y un Control Difuso para el proceso de Control de Nivel

Línea de investigación: Robótica y automatización avanzada

Autores:

Avalos Blas, Alexis Faustino
Pereyra Minchán, Christian Anthony

Jurado evaluador:

Presidente: Linares Vertiz, Saul Noe
Secretario: Vargas Diaz, Luis Alberto
Vocal: León Cerna, Alejandro Martin

Asesor:

De La Cruz Rodríguez, Oscar Miguel

Código ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9207-8558>

Trujillo - Perú

2024

Fecha de sustentación: 2024/05/13

DECLARACION DE ORIGINALIDAD

Yo, Oscar Miguel De La Cruz Rodríguez, docente del Programa de Estudio de Pregrado de la Universidad Privada Antenor Orrego, asesor de la tesis titulada “Análisis comparativo en el tiempo de establecimiento de un control clásico PID y un Control Difuso para el proceso de Control de Nivel”, de los autores Alexis Faustino Avalos Blas y Christian Anthony Pereyra Minchán.

El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud del 9%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software Turnitin el día 10 de mayo del 2024

He revisado con detalle dicho reporte de la tesis “Análisis comparativo en el tiempo de establecimiento de un control clásico PID y un Control Difuso para el proceso de Control de Nivel” y no se advierte indicios de plagio.

- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las normas establecidas por la Universidad.

Trujillo, 08 de abril del 2024



Avalos Blas, Alexis Faustino
DNI 74608178



Pereyra Minchán, Christian Anthony
DNI 75153269



DE LA CRUZ RODRÍGUEZ OSCAR MIGUEL
DNI: 40545044
ORCID: 0000-0001-9207-8558

DEDICATORIA

Gracias a Dios por permitirme estar acá y culminar esta etapa en mi vida profesional; esta tesis va dirigida a mis padres, Faustino M. Avalos Gonzales y Carmela D. Blas Loyola. A mi compañera de vida, Mercedes J. Romero Bancayán. A mi hija, Laia M. Avalos Romero. A mis hermanos, Alan M. Avalos Blas y Rubí M. Avalos Blas, quienes siempre me apoyaron, acompañaron y confiaron en mí en todo este tiempo. Este trayecto no ha sido fácil, pero lo conseguí con mucho esfuerzo y dedicación. Gracias por estar presente no solo en esta etapa de mi vida, sino en todo momento dándome y ofreciéndome lo mejor, su tiempo y espacio, buscando lo mejor para mí, dándome consejos y haciendo mi vida mucho más feliz.

Alexis F. Avalos Blas.

Primeramente, a Dios, por guiarme en cada paso de este trayecto académico y darme la fuerza para perseverar. A mis padres, Raúl H. Pereyra Rodríguez y Mónica M. Minchán Vilca, por su gran dedicación, esfuerzo y sacrificio constante para brindarme una educación sólida. A mi hermana, Tamar K. Pereyra Minchán, por su gran amor y afecto. A mis abuelos, Guillermo A. Minchán Vargas y María Vilca Rafael, por inculcarme sus enseñanzas y consejos del día a día. A mis tías, Hormecinda R. G. y Luz María R. G. por las lecciones de vida y el cariño que siempre me han brindado. A mi pareja, Jhosie R. S. por su motivación constante y estar a mi lado en los momentos de incertidumbre y de cansancio. Esta tesis que no fue nada fácil es el resultado del sacrificio y amor que cada uno me brinda, quienes siempre fueron las personas perfectas para poder lograr alcanzar esta dichosa y muy merecida victoria en la vida. Gracias por ser los grandes pilares en mi vida. Los amo inmensamente.

Christian A. Pereyra Minchán

AGRADECIMIENTO

Con profunda estima y reconocimiento, extendemos nuestra más sincera gratitud, a todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica - UPAO, quienes compartieron con nosotros sus conocimientos para hacer posible una de nuestras metas en nuestra vida profesional. Especialmente al Mg. Ing. Oscar Miguel De La Cruz Rodríguez, por su paciencia, motivación y su valiosa guía y asesoramiento profesional; por haber inculcado en nosotros el sentido de indagación e investigación en todo el sentido de responsabilidad y rigor académico, sin los cuales no hubiéramos hecho posible este trabajo de investigación, para así obtener la titulación profesional. Gracias a todos por el apoyo que nos brindaron.

Alexis F. Avalos Blas.

Christian A. Pereyra Minchán.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es Medir el tiempo de establecimiento de los controladores PID y Difuso en un control de nivel.

En principio en el trabajo se describen los aspectos del diseño de investigación y justificación del estudio, para luego presentar las bases teóricas de los controladores PID y Difuso, que permita comprender la medición del tiempo de establecimiento y luego compararlos. Luego de presentar los materiales y procedimientos de la investigación se procede a configurar el proceso de llenado de tanque en Factory IO y se realiza en enlace con el controlador S7-1200 modelo CPU 1214C AC/DC/RLY a través del software de programación TIA Portal. A partir del análisis de la información obtenida se realiza la sintonización del controlador PID y Difuso en un control de nivel de tanque, y se toma el tiempo que tarda en estabilizarse la variable de proceso para diferentes niveles.

- Por último, se realizó un análisis estadístico para determinar cuál de los controladores tiene el mejor tiempo de establecimiento, donde se observa que el mejor tiempo de establecimiento se da con el controlador difuso.

Palabras Claves: controlador, control difuso, control PID

ABSTRACT

The objective of this work is to measure the establishment time of the PID and Diffuse controllers in a level control.

Initially, the work describes the aspects of the research design and justification of the study, and then presents the theoretical bases of the PID and Diffuse controllers, which allows understanding the measurement of the establishment time and then comparing them. After presenting the research materials and procedures, the tank filling process is configured in Factory IO and is carried out in conjunction with the S7-1200 controller model CPU 1214C AC/DC/RLY through the TIA Portal programming software. . From the analysis of the information obtained, the tuning of the PID and Diffuse controller is carried out in a tank level control, and the time it takes for the process variable to stabilize for different levels is taken.

- Finally, a statistical analysis was carried out to determine which of the controllers has the best establishment time, where it is observed that the best establishment time occurs with the fuzzy controller.

.

Keywords: controller, fuzzy control, PID control

PRESENTACIÓN

Señores miembros del Jurado:

De conformidad con lo estipulado en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Privada Antenor Orrego, ponemos a su disposición el informe de tesis titulado “Análisis comparativo en el tiempo de establecimiento de un control clásico PID y un Control Difuso para el proceso de Control de Nivel” para que sea revisado y evaluado y de ser aprobado pueda ser defendido oralmente para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico.

De antemano, nos excusamos de los errores involuntarios en que se hubiera incurrido en el desarrollo y redacción del misma, esperando del honorable jurado un justo dictamen.

Avalos Blas, Alexis Faustino
Pereyra Minchán, Christian Anthony

Tabla de contenidos

DEDICATORIA	6
AGRADECIMIENTO	8
RESUMEN.....	9
ABSTRACT	10
PRESENTACIÓN	11
Tabla de contenidos	12
I. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1. Problema de investigación	17
1.2. Objetivos.....	18
1.3. Justificación del estudio	18
II. MARCO DE REFERENCIA.....	19
2.1. Antecedentes del estudio.....	19
2.2. Marco teórico	20
2.3. Marco conceptual.....	28
2.4. Sistema de hipótesis.....	28
2.5. Variables e indicadores.....	28
III. METODOLOGÍA EMPLEADA	30
3.1. Tipo y nivel de investigación	30
3.2. Población y muestra de estudio	30
3.3. Diseño de investigación	30
3.4. Técnicas e instrumentos de la investigación	31
3.5. Procesamiento y análisis de la investigación	32
IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	64
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	78
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

Índice de figuras

Figura 1 Tanque con un nivel máximo de 300cm en Factory IO	33
Figura 2 Configuración del bloque que realizará el control del tanque	33
Figura 3 Configuración del driver de comunicación en Factory IO	34
Figura 4 Configuración del enlace del PLC con Factory IO	35
Figura 5 Habilitación de la comunicación PUT/GET en el PLC	35
Figura 6 Descarga del programa al PLC desde el árbol del proyecto.....	36
Figura 7 Activación de la simulación del proceso en Factory IO	36
Figura 8 selección del controlador para el proceso	37
Figura 9 Controlador Siemens modelo CPU 1214C AC/DC/RLY	38
Figura 10 Bloque de interrupción cíclica	38
Figura 11 Herramientas de Tecnología en TIA Portal	39
Figura 12 Asignación de variables en TIA Portal.....	39
Figura 13 Configuración de entradas y salidas al controlador PID	40
Figura 14 Selección del panel HMI en TIA PORTAL.....	40
Figura 15 Comunicación entre el PLC y HMI	41
Figura 16 Configuración de las curvas en el panel HMI	41
Figura 17 configuración de la variable de proceso en HMI.....	42
Figura 18 Conexión entre el Ordenador y el controlador.....	43
Figura 19 Configuración de la variable longitud en TIA Portal.....	43
Figura 20 Configuración de la escala de valor real en TIA Portal.....	43
Figura 21 Configuración del monitoreo del valor real en TIA Portal.....	44
Figura 22 Configuración de los parámetros PID en TIA Portal	45
Figura 23 Configuración del setpoint en el panel HMI.....	45
Figura 24 sintonía inicial del controlador en Factory IO y TIA Portal	46
Figura 25 Respuesta del PID con setpoint 200 Perturbacion 40%	46
Figura 26 parámetros del PID con setpoint 200 Perturbacion 40%	47

Figura 27 Tiempo de establecimiento 75s de 200cm a 50cm.....	47
Figura 28 Tiempo de establecimiento 22.5s de 0cm a 50cm.....	48
Figura 29 Tiempo de establecimiento 22.5s de 50cm a 100cm.....	48
Figura 30 Tiempo de establecimiento 22.5s de 100cm a 150cm.....	49
Figura 31 Tiempo de establecimiento 25s de 150cm a 200cm.....	49
Figura 32 Tiempo de establecimiento 25s de 200cm a 250cm.....	50
Figura 33 Tiempo de establecimiento 20s de 250cm a 300cm.....	50
Figura 34 Tiempo de establecimiento 27s de 300cm a 250cm.....	51
Figura 35 Tiempo de establecimiento 27s de 250cm a 200cm.....	51
Figura 36 Tiempo de establecimiento 27s de 200cm a 150cm.....	52
Figura 37 Tiempo de establecimiento 36s de 150cm a 100cm.....	52
Figura 38 Tiempo de establecimiento 44s de 100cm a 50cm.....	53
Figura 39 Tiempo de establecimiento 66s de 50cm a 0cm.....	53
Figura 40 diagrama de flujo del controlador Difuso	54
Figura 41 variables utilizadas en la implementación del controlador difuso.....	56
Figura 42 Bloques de normalización y escalamiento.....	56
Figura 43 implementación del controlador difuso en SCL	57
Figura 44 Configuración de variables del HMI	58
Figura 45 Configuración del HMI	58
Figura 46 Tiempo de establecimiento 22.5s de 0cm a 50cm.....	58
Figura 47 Tiempo de establecimiento 22.5s de 50cm a 100cm.....	59
Figura 48 Tiempo de establecimiento 22.5s de 100cm a 150cm.....	59
Figura 49 Tiempo de establecimiento 22.5s de 150cm a 200cm.....	60
Figura 50 Tiempo de establecimiento 22.5s de 200cm a 250cm.....	60
Figura 51 Tiempo de establecimiento 17.5s de 250cm a 300cm.....	61
Figura 52 Tiempo de establecimiento 24s de 300cm a 250cm.....	61
Figura 53 Tiempo de establecimiento 24s de 250cm a 200cm.....	62

Figura 54 Tiempo de establecimiento 25s de 200cm a 150cm.....	62
Figura 55 Tiempo de establecimiento 26s de 150cm a 100cm.....	63
Figura 56 Tiempo de establecimiento 32.5s de 100cm a 50cm.....	63
Figura 57 Tiempo de establecimiento 62.5 s de 50cm a 0cm.....	64
Figura 58 Tiempo de establecimiento 75s de 200cm a 50cm.....	64
Figura 59 Tiempo de establecimiento 22.5s de 0cm a 50cm.....	65
Figura 60 Tiempo de establecimiento 22.5s de 50cm a 100cm.....	66
Figura 61 Tiempo de establecimiento 22.5s de 100cm a 150cm.....	66
Figura 62 Tiempo de establecimiento 25s de 150cm a 200cm.....	67
Figura 63 Tiempo de establecimiento 25s de 200cm a 250cm.....	67
Figura 64 Tiempo de establecimiento 20s de 250cm a 300cm.....	68
Figura 65 Tiempo de establecimiento 27s de 300cm a 250cm.....	68
Figura 66 Tiempo de establecimiento 27s de 250cm a 200cm.....	69
Figura 67 Tiempo de establecimiento 27s de 200cm a 150cm.....	69
Figura 68 Tiempo de establecimiento 36s de 150cm a 100cm.....	70
Figura 69 Tiempo de establecimiento 44s de 100cm a 50cm.....	70
Figura 70 Tiempo de establecimiento 66s de 50cm a 0cm.....	71
Figura 71 Tiempo de establecimiento 22.5s de 0cm a 50cm.....	71
Figura 72 Tiempo de establecimiento 22.5s de 50cm a 100cm.....	72
Figura 73 Tiempo de establecimiento 22.5s de 100cm a 150cm.....	72
Figura 74 Tiempo de establecimiento 22.5s de 150cm a 200cm.....	73
Figura 75 Tiempo de establecimiento 22.5s de 200cm a 250cm.....	73
Figura 76 Tiempo de establecimiento 17.5s de 250cm a 300cm.....	74
Figura 77 Tiempo de establecimiento 24s de 300cm a 250cm.....	74
Figura 78 Tiempo de establecimiento 24s de 250cm a 200cm.....	75
Figura 79 Tiempo de establecimiento 25s de 200cm a 150cm.....	75
Figura 80 Tiempo de establecimiento 26s de 150cm a 100cm.....	76

Figura 81 Tiempo de establecimiento 32.5s de 100cm a 50cm.....	77
Figura 82 Tiempo de establecimiento 62.5 s de 50cm a 0cm.....	77
Figura 83 sintonía inicial del controlador en Factory IO y TIA Portal	78
Figura 84 diagrama de flujo del controlador Difuso	79

Índice de tablas

Tabla 1 Operacionalización de la variable independiente	29
Tabla 2 Operacionalización de la variable dependiente	29

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Problema de investigación

Según (Ogata, 2011), en el contexto específico del control de nivel de tanque, la función de transferencia puede depender de varios parámetros como el área transversal del tanque, el coeficiente de flujo de salida, y otros factores que influyen en la dinámica del sistema.

El control de nivel implica la gestión y mantenimiento de los niveles de un fluido en un sistema, ya sea líquido o gas. Los problemas en este proceso pueden tener diversas causas, como la sintonización incorrecta de los controladores, tiempos muertos, fallas mecánicas, variabilidad en las condiciones del proceso, problemas de diseño del sistema, interferencias externas y falta de redundancia. Las soluciones incluyen ajustar la sintonización, utilizar estrategias de control anticipado, realizar mantenimiento preventivo, implementar control adaptativo, reevaluar el diseño del sistema e introducir redundancia. En el caso de controladores PID, problemas como sintonización incorrecta, overshoot, tiempo muerto, integral windup, cambios en las características del proceso y no linealidades pueden surgir. Sin embargo, estos desafíos pueden abordarse mediante una sintonización cuidadosa, técnicas avanzadas de control y la consideración de otras estrategias de control según las características específicas del sistema y los requisitos del proceso.

En todo proceso de control el objetivo principal es de minimizar el error y disminuir el tiempo de establecimiento de la variable de proceso, a fin de optimizar el desempeño del controlador de nivel.

De acuerdo a lo anterior se presentan varios problemas con respecto al controlador PID, debido a que no se conoce el modelo matemático y además este es un sistema no lineal. Los controladores difusos están basados en experiencia del operario y por lo tanto no requieren el modelo matemático de la planta logrando de esta manera realizar un control más eficaz.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Medir el tiempo de establecimiento de los controladores PID y Difuso en un control de nivel.

1.2.2. Objetivos específicos

- ✓ Realizar la aplicación y sintonización del controlador PID
- ✓ Realizar el diseño y la aplicación del controlador Difuso
- ✓ Comparar los tiempos de establecimiento del controlador PID y Difuso

1.3. Justificación del estudio

En lo tecnológico, permitirá enviar datos confiables a la nube con tecnologías de bajo costo a través de los controladores lógicos programables.

II. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Antecedentes del estudio

(Guarnizo, 2021) en su tesis “Metodología para la implementación de controlador difuso tipo Takagi-Sugeno en PLC s7-300”, desarrollado en el Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín. El objetivo general es implementar controladores basados en lógica difusa en un PLC S7-300 empleando el lenguaje de programación SCL. Se presenta el diseño de la función difusa, declaración de variables, diseño de la evaluación de las funciones de pertenencia y reglas del sistema difuso. A partir de este esquema se pueden implementar modelos difusos más complejos, como adaptativos o autosintonizados. Se muestra un ejemplo de aplicación para un sistema de tiempo discreto simulado en el PLC, empleando un controlador difuso PI.

(Castañeda, 2019) en su tesis “Implementación de un controlador difuso en PLC”, desarrollado en la Universidad Tecnológica de Pereira. El objetivo general es Implementar un controlador difuso en un controlador lógico programable utilizando al menos un lenguaje de programación normalizado según el estándar IEC 61131. La lógica difusa aplicada en problemas de automatización y control es una herramienta muy potente para el diseño de controladores ya que su simple modelamiento permite correctas ejecuciones sobre sistemas no lineales en los cuales es difícil calcular el modelo matemático del sistema. Esto es una gran ventaja ya que no se necesita tener amplio conocimiento en estrategias convencionales de control.

(Zabala & Bailón, 2019) en su tesis “Diseño e implementación de un sistema de control difuso para llenado de tanque por medio de un PLC S7-1500 y comunicación con Labview”. El objetivo general es DISEÑAR e implementar un controlador difuso para el llenado de un tanque por medio de un controlador lógico programable plc s7-1500 y comunicación con labview. Se basa en la implementación de un sistema de control difuso para control de llenado de tanque por medio de un PLC S7-1500 y comunicación con LabVIEW. Es decir, mediante comunicación Profinet se comunicará el PLC S7-1500 de nuestro módulo didáctico con el PLC S7-1200 que controla la planta de llenado de tanques. Se utilizó el software OPC Server el cual servirá para llevar todas las variables que lea el módulo didáctico a un programa hecho en LabVIEW, y cuyo diseño SCADA se visualizará en la pantalla HMI del módulo didáctico.

2.2. Marco teórico

Control PID

El control PID (Proporcional, Integral, Derivativo) es un método ampliamente utilizado en el control de sistemas dinámicos. La idea básica detrás del control PID es ajustar tres componentes para controlar el error entre la salida deseada y la salida real de un sistema:

Proporcional (P): El término proporcional produce una salida proporcional al error actual. Aumentar este término puede aumentar la respuesta rápida del sistema, pero también puede causar oscilaciones excesivas y error en estado estacionario.

Integral (I): El término integral considera la acumulación de errores pasados y produce una salida proporcional al tiempo integral del error. Este

término se utiliza para eliminar el error en estado estacionario, pero puede causar oscilaciones si se ajusta incorrectamente.

Derivativo (D): El término derivativo considera la tasa de cambio del error y produce una salida proporcional a la derivada del error. Este término se utiliza para mejorar la estabilidad y la respuesta transitoria del sistema, pero puede introducir ruido en la señal de control si se ajusta incorrectamente.

La acción combinada de estos tres términos permite controlar la respuesta de un sistema dinámico de manera efectiva. El control PID es ampliamente utilizado en una variedad de aplicaciones industriales y de control, debido a su simplicidad y capacidad para controlar una amplia gama de sistemas.

El ajuste de los parámetros del control PID (K_p , K_i , K_d) es un proceso importante y a menudo se realiza utilizando métodos empíricos o algoritmos de ajuste automático como el método de Ziegler-Nichols. Un control PID bien ajustado puede mejorar la estabilidad, la precisión y la respuesta transitoria de un sistema, lo que lo hace una herramienta poderosa en el campo de la automatización y el control de procesos.

Control Difuso

El control difuso, también conocido como lógica difusa, es una técnica de control que se basa en la lógica difusa para modelar y controlar sistemas complejos y no lineales. A diferencia de los métodos de control convencionales que utilizan modelos matemáticos precisos, el control difuso utiliza reglas lingüísticas y conocimiento experto para describir el comportamiento del sistema.

En el control difuso, las variables de entrada y salida del sistema se representan mediante conjuntos difusos, que son conjuntos en los que cada elemento tiene un grado de pertenencia entre 0 y 1. Estos conjuntos difusos se definen mediante funciones de membresía, que describen la relación entre el valor de la variable y su grado de pertenencia al conjunto.

Las reglas de control difuso se basan en el principio de que las decisiones humanas se pueden expresar de manera imprecisa y subjetiva. Estas reglas relacionan las variables de entrada con las variables de salida utilizando conectivos lógicos como "y" y "o", y se expresan en forma de "si-entonces". Por ejemplo, una regla podría ser: "Si la temperatura es alta y la humedad es baja, entonces aumentar la velocidad del ventilador".

Una vez que se han definido las reglas de control difuso, se utiliza un proceso de inferencia difusa para determinar la salida del sistema en función de las reglas y las variables de entrada. Este proceso combina las reglas de control difuso para obtener una salida precisa y controlada.

El control difuso se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, como sistemas de control de climatización, control de velocidad de motores, control de robots, entre otros. Su principal ventaja radica en su capacidad para

modelar sistemas complejos y no lineales de manera intuitiva y eficaz, incluso cuando el conocimiento sobre el sistema es incompleto o impreciso.

Función de transferencia de llenado de tanque

La función de transferencia es un concepto fundamental en el análisis y diseño de sistemas de control. En el contexto de la ingeniería de control, la función de transferencia describe la relación entre la transformada de Laplace de la salida de un sistema y la transformada de Laplace de la entrada, bajo la suposición de condiciones iniciales nulas. Se denota comúnmente como $G(s)$ y se expresa como:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

Donde:

Y(s) es la transformada de Laplace de la salida del sistema.

U(s) es la transformada de Laplace de la entrada al sistema.

s es la variable compleja de Laplace.

La función de transferencia es una representación matemática útil que simplifica el análisis y diseño de sistemas de control, ya que permite estudiar el comportamiento del sistema en el dominio de la frecuencia en lugar del dominio del tiempo. También proporciona información sobre la estabilidad y la respuesta transitoria de un sistema.

En el análisis de sistemas de control, la función de transferencia se utiliza para determinar la estabilidad del sistema, la respuesta en frecuencia, la respuesta transitoria y otras propiedades importantes. En el diseño de sistemas de control, la función de transferencia se utiliza para diseñar controladores que cumplan con ciertas especificaciones de desempeño, como la estabilidad, la precisión y la rapidez de respuesta.

La función de transferencia es un concepto fundamental en la teoría de control y es ampliamente utilizada en la práctica para el análisis y diseño de sistemas de control en una variedad de aplicaciones industriales y de ingeniería.

Transformada de Laplace

La transformada de Laplace es una herramienta matemática utilizada en el análisis de sistemas lineales e invariantes en el tiempo, especialmente en el campo de la ingeniería de control. Esta transformada convierte una función de una variable (generalmente una función de tiempo) en una función de una variable compleja s , que es útil para analizar el comportamiento de sistemas dinámicos.

La transformada de Laplace de una función $f(t)$ se denota comúnmente como $F(s)$ y se define como:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

Donde:

s es una variable compleja de la forma $s=\sigma+j\omega$, donde σ y ω son partes real e imaginaria, respectivamente.

t es la variable de tiempo.

La función $f(t)$ representa la función en el dominio del tiempo.

La transformada de Laplace es especialmente útil porque transforma ecuaciones diferenciales lineales en ecuaciones algebraicas simples, lo que facilita su resolución. Esto es importante en el análisis y diseño de sistemas de control, ya que muchas veces las ecuaciones que describen el comportamiento de estos sistemas son ecuaciones diferenciales.

La transformada de Laplace también tiene propiedades útiles, como la linealidad, la transformada de la derivada de una función y la transformada de la integral de una función, que facilitan su aplicación en el análisis de sistemas dinámicos.

En resumen, la transformada de Laplace es una herramienta fundamental en el análisis de sistemas dinámicos, especialmente en el campo de la ingeniería de control, ya que permite analizar el comportamiento de estos sistemas en el dominio de la frecuencia compleja, lo que facilita el análisis y diseño de sistemas de control.

Sistema realimentado

Un sistema realimentado, también conocido como sistema de control realimentado, es un tipo de sistema en el que la salida del sistema se retroalimenta (o realimenta) y se compara con la entrada de referencia. La diferencia entre la salida realimentada y la entrada de referencia, conocida como error, se utiliza para ajustar y controlar el sistema.

El propósito de la realimentación en un sistema de control es reducir el error y mejorar la precisión, estabilidad y respuesta del sistema. La realimentación negativa es la forma más común de realimentación en la que la salida realimentada se resta de la entrada de referencia. Esto tiene el efecto de reducir cualquier discrepancia entre la salida y la referencia, manteniendo así el sistema en un estado deseado.

Un ejemplo común de un sistema realimentado es un sistema de control de temperatura en un horno. La temperatura real se mide y se compara con la temperatura deseada (referencia). Si hay una diferencia, se ajusta la

entrada de energía al horno para reducir la discrepancia y mantener la temperatura deseada.

La realimentación también se utiliza en sistemas de control para mantener la estabilidad. Por ejemplo, en un sistema de control de velocidad de un motor, la realimentación se utiliza para ajustar la entrada de potencia al motor y mantener una velocidad constante, incluso cuando hay cambios en la carga o en otras condiciones.

En resumen, un sistema realimentado es un sistema en el que la salida se compara con la entrada de referencia y se utiliza esta diferencia para ajustar y controlar el sistema. La realimentación es fundamental en el diseño de sistemas de control, ya que permite mejorar la precisión, estabilidad y respuesta de los sistemas controlados.

Factory IO

Factory I/O es un software de simulación de sistemas de automatización industrial que permite a los usuarios crear entornos virtuales de fábrica para probar y depurar programas de control en un entorno seguro y sin riesgos. Está diseñado para integrarse con diferentes entornos de desarrollo de PLC (Controladores Lógicos Programables) y permite simular una amplia variedad de dispositivos industriales, como sensores, actuadores, transportadores, robots, entre otros.

Factory I/O proporciona una interfaz gráfica intuitiva que permite a los usuarios crear escenarios de fábrica personalizados mediante la selección y disposición de los dispositivos industriales disponibles en su biblioteca. Los usuarios pueden luego conectar estos dispositivos y configurar su

comportamiento, como el movimiento de un transportador, el encendido de una lámpara, la detección de un objeto por un sensor, etc.

Una vez que se ha creado el entorno de fábrica virtual, los usuarios pueden programar y probar sus programas de control utilizando un PLC simulado o real, dependiendo de la configuración. Factory I/O proporciona una interfaz de comunicación que permite al PLC interactuar con el entorno virtual, de modo que los usuarios pueden verificar el comportamiento de su programa de control y realizar ajustes si es necesario.

Factory I/O es una herramienta útil para estudiantes, ingenieros y profesionales de la automatización industrial, ya que les permite experimentar con diferentes configuraciones y escenarios de fábrica de manera segura y sin riesgos. También es una herramienta valiosa para la formación, ya que permite a los estudiantes y aprendices familiarizarse con los conceptos y prácticas de la automatización industrial en un entorno virtual realista.

TIA PORTAL

TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) es un entorno de ingeniería de Siemens que integra diferentes herramientas de programación, configuración y diagnóstico para sistemas de automatización industrial. TIA Portal está diseñado para ser utilizado con los controladores SIMATIC de Siemens, como los PLCs (Controladores Lógicos Programables), HMI (Interfaces Hombre-Máquina), y otros dispositivos de la familia SIMATIC.

TIA Portal proporciona un entorno de desarrollo unificado que permite a los usuarios configurar, programar, simular y diagnosticar sistemas de control en una sola plataforma.

2.3. Marco conceptual

Step 7: Es la herramienta de programación principal para programar los PLCs SIMATIC. Step 7 ofrece diferentes lenguajes de programación como LAD (Diagrama de Contactos), FBD (Diagrama de Bloques de Funciones) y STL (Lenguaje de Lista de Instrucciones), entre otros.

WinCC: Es la herramienta de desarrollo de HMI (Interfaces Hombre-Máquina) que permite crear interfaces gráficas para controlar y monitorear los sistemas automatizados.

PLCSIM: Es un simulador de PLC integrado en TIA Portal que permite probar y depurar programas de control sin necesidad de hardware físico.

Safety: TIA Portal también ofrece herramientas para la programación de funciones de seguridad como la parada de emergencia y la supervisión de seguridad.

Diagnóstico: TIA Portal incluye herramientas de diagnóstico avanzadas que permiten monitorear y analizar el estado del sistema en tiempo real, facilitando la identificación y resolución de problemas.

2.4. Sistema de hipótesis

Mediante la aplicación de un controlador PID y un controlador Difuso para controlar el nivel, se tendrá el menor tiempo de establecimiento.

2.5. Variables e indicadores

VARIABLES. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 1 Operacionalización de la variable independiente

Variable Independiente	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
Controlador	Es un dispositivo o sistema que regula o maneja el comportamiento de otro dispositivo, sistema o proceso	Tipo de controlador	Parámetros del controlador PID Variables lingüísticas del Control Difuso	Reporte de diseño

Tabla 2 Operacionalización de la variable dependiente

Variable dependiente	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
Tiempo de establecimiento	Es una medida que se utiliza para evaluar la rapidez con la que la respuesta de un sistema alcanza y se mantiene dentro de ciertos límites aceptables después de una perturbación o cambio en la entrada.	Tiempo	Tiempo de retardo Tiempo de sobreimpulso Tiempo de acentamiento	Reporte de diseño

III. METODOLOGÍA EMPLEADA

3.1. Tipo y nivel de investigación

El tipo de investigación es aplicada y el nivel de investigación es Explicativa.

3.2. Población y muestra de estudio

3.2.1. Población

Es definida por Hernández y Mendoza (2018) como el conjunto de individuos, acciones, procesos u otras características que permiten representarlo en un conjunto que las cuales las asocian a una unidad de estudio. La población de estudio será los controladores clásicos y avanzados.

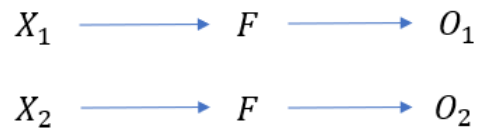
3.2.2. Muestra

La muestra de estudio será el controlador clásico PID y el controlador Difuso.

3.3. Diseño de investigación

La medición es de enfoque cuantitativo, por lo que Azuero (2019), indica que la medición numérica obtenida se procesa en un análisis estadístico e inferencial para validar las hipótesis de estudio.

El diseño de contrastación es no experimental, que según Hernández y Mendoza (2018) indica que este tipo de investigación de corte transversal se fundamenta en la medición de la variable en un tiempo establecido.



Leyenda:

X₁: Controlador PID

X₂: Controlador Difuso

F: Función de transferencia de Nivel de tanque

O₁: Tiempo de establecimiento debido al controlador PID

O₂: Tiempo de establecimiento debido al controlador Difuso

3.4. Técnicas e instrumentos de la investigación

Descripción de las técnicas e instrumentos

Para el estudio se requerirá de técnicas que permitan la recolección de la información, las técnicas que se utilizarán se definen de la siguiente manera:

Observación: Se utiliza para recopilar información y datos de manera confiable ya que interactúa con los sentidos para un registro sistemático, permitiendo validar las respuestas (Azüero, 2019). Como resultado, el enfoque se utilizará para recopilar información sobre los tiempos que tarda la variable en estabilizarse tanto para el controlador PID, como para el controlador Difuso.

Análisis documental: Según Azüero (2019), indica que es una investigación en medios digitales, artículos o libros sobre la actividad investigadora planificada; en este sentido, la presente investigación recogerá información sobre los tiempos de establecimiento para el proceso de control de nivel, utilizando un control PID y difuso.

Asimismo, para la recolección de la información necesaria para la presente investigación, a continuación, se detallan los instrumentos de recolección de datos:

Reporte de simulación: Según Hernández y Mendoza (2018) indican que las guías de observación se emplean para recopilar información sobre la investigación en cuestión, por lo que este proyecto utilizará formatos de registro para determinar los tiempos que tarda la variable en estabilizarse tanto para el controlador PID, como para el controlador Difuso.

3.5. Procesamiento y análisis de la investigación

A continuación, se precisa los procedimientos a realizar en la investigación a fin de cumplir con los objetivos trazados.

Configuración del proceso de llenado de tanque en Factory IO

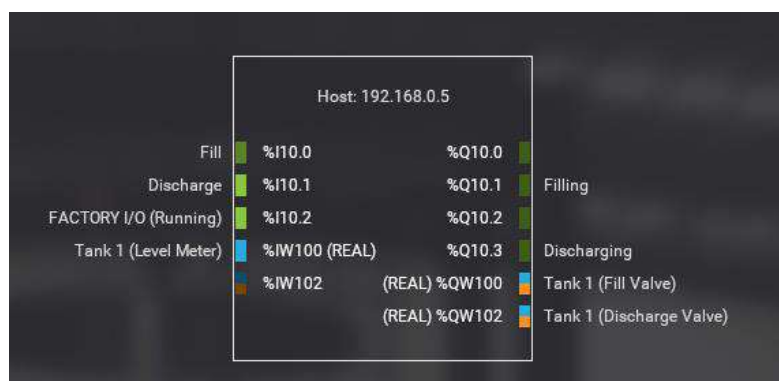
En la figura 1 se muestra un tanque con un nivel máximo de 300cm el cual está conformado por dos válvulas, la válvula superior es usada para el llenado del tanque y la inferior es utilizada para la descarga, además se tiene un sensor de nivel analógico en la parte superior del tanque.

Figura 1 Tanque con un nivel máximo de 300cm en Factory IO



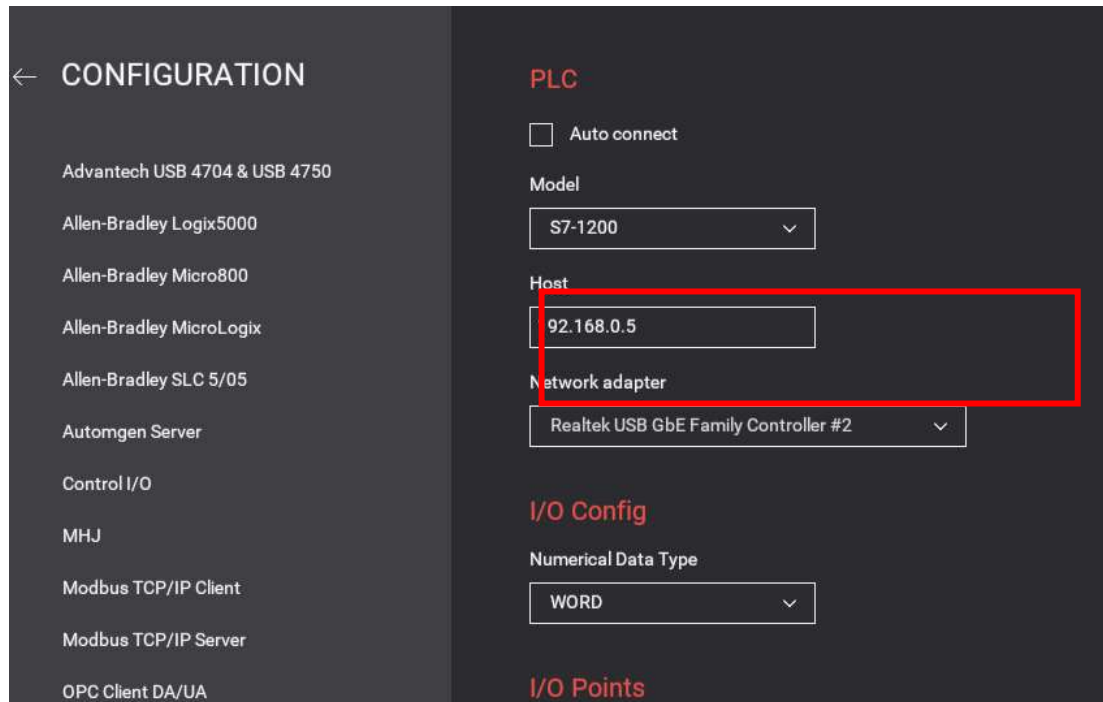
En la figura 2 se muestra la configuración del PLC S7-1200 de Siemens que realizara el control del tanque. La dirección ethernet que posee el controlador es 192.168.0.5. el sensor de nivel está asociado a la dirección física IW100, la válvula de llenado se controla mediante la dirección QW100 y la válvula de descarga es controlada utilizando la dirección QW102.

Figura 2 Configuración del bloque que realizará el control del tanque



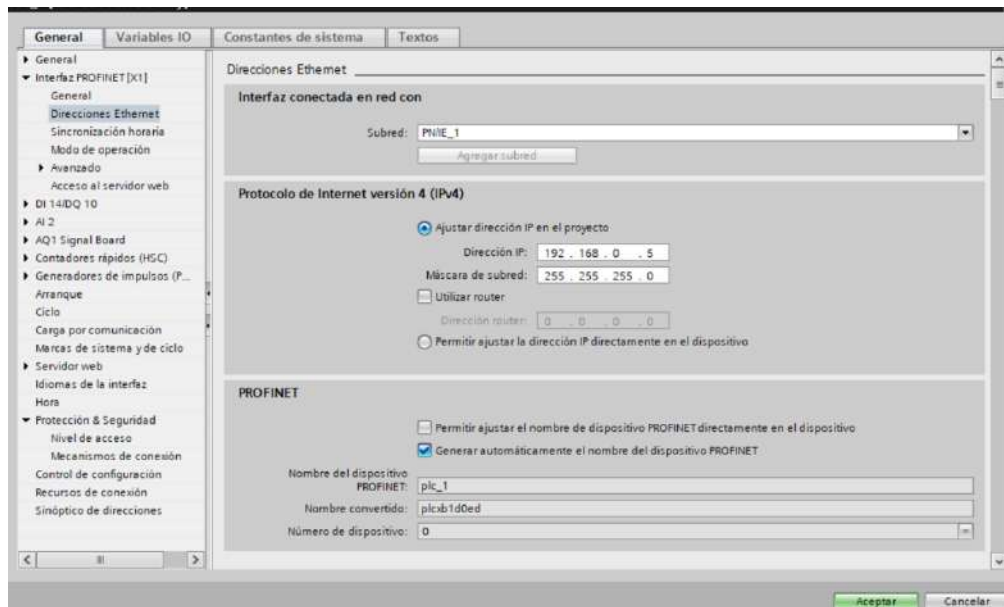
En Factory IO se selecciona el driver de comunicación de la PC con el PLC esto se muestra en la siguiente figura 3.

Figura 3 Configuración del driver de comunicación en Factory IO



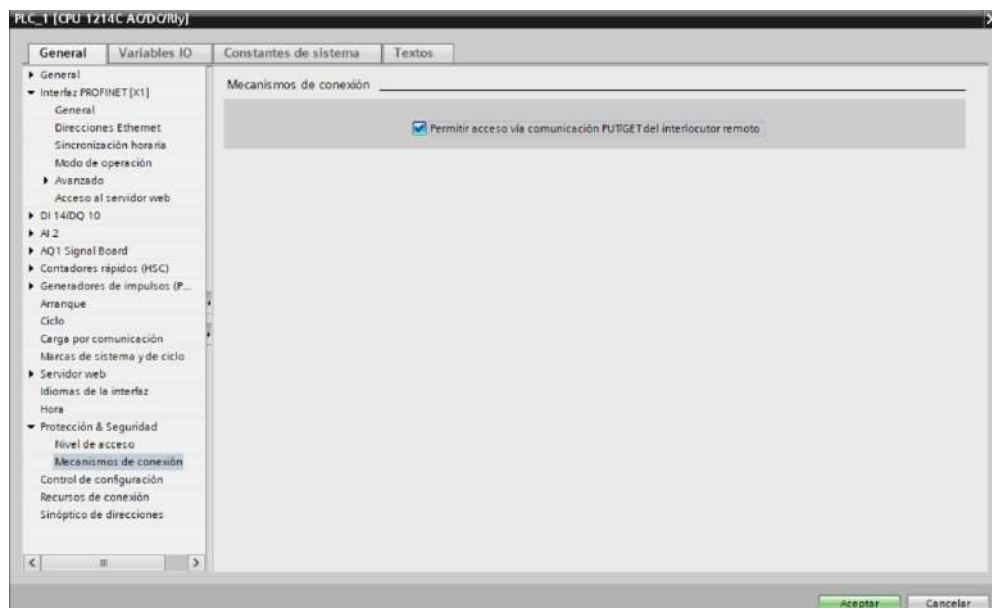
Para realizar el enlace con el PLC se debe de programar en el controlador la misma dirección ethernet que la que se utilizó en Factory IO, en nuestro caso es 192.168.0.5. esto se muestra en la figura 4.

Figura 4 Configuración del enlace del PLC con Factory IO



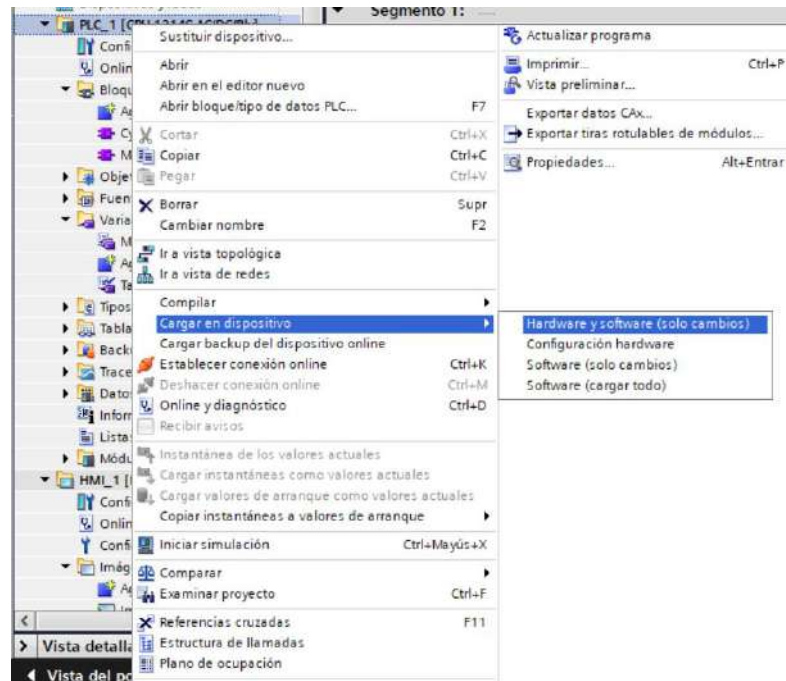
Se habilita en el PLC la comunicación PUT/GET esto permitirá que el PLC se comunique con Factory IO, esto se muestra en la figura 5.

Figura 5 Habilitación de la comunicación PUT/GET en el PLC



Para comunicación del PLC con Factory IO se descarga el programa al PLC desde el árbol del proyecto como se muestra en la figura 6.

Figura 6 Descarga del programa al PLC desde el árbol del proyecto



Y en Factory IO se activa la simulación del proceso tal como se muestra en la figura 7.

Figura 7 Activación de la simulación del proceso en Factory IO



Se realiza la aplicación y sintonización del controlador PID en un control de nivel de tanque, y se toma el tiempo que tarda en estabilizarse la variable de proceso para diferentes niveles.

Se selecciona el controlador para el proceso en nuestro caso será el S7 – 1200 CPU 1214AC/DC/RLY. Esto se muestra en la siguiente figura.

Figura 8 selección del controlador para el proceso

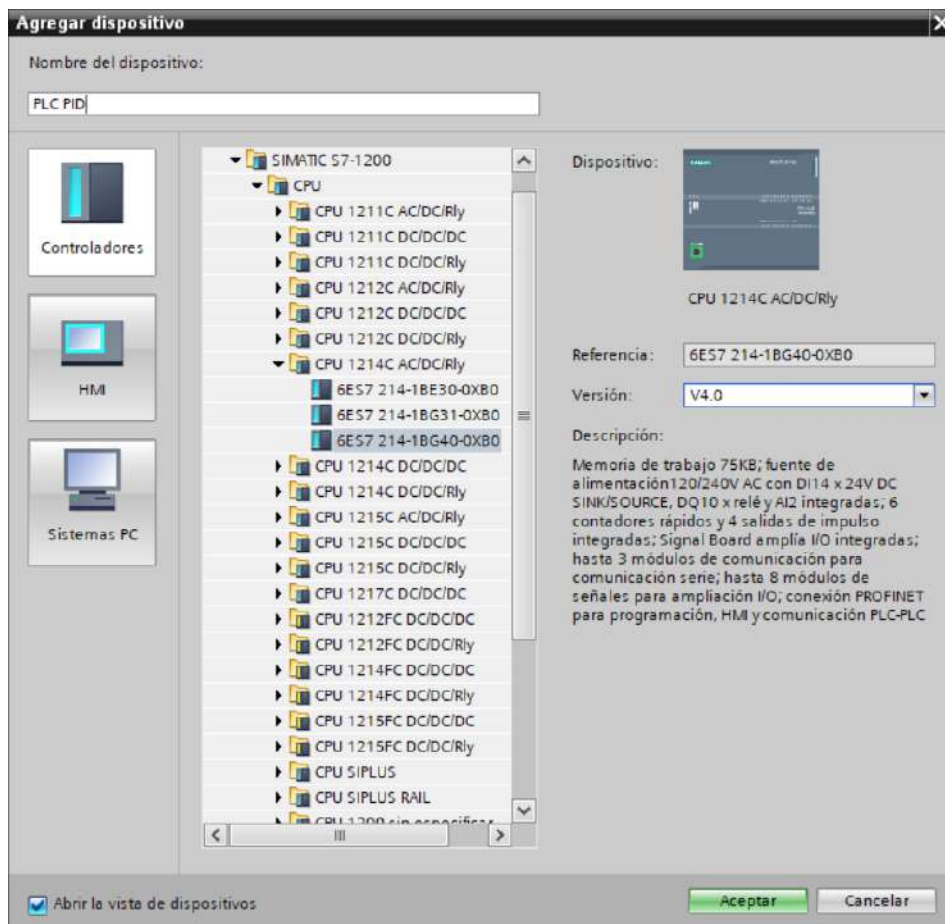
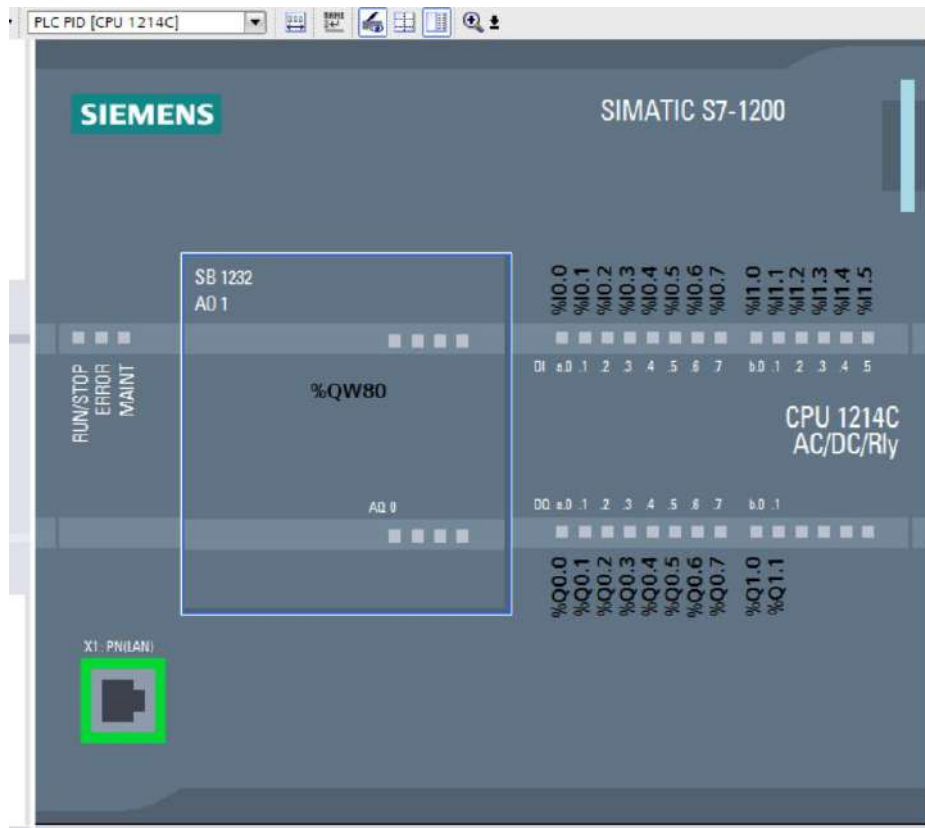


Figura 9 Controlador Siemens modelo CPU 1214C AC/DC/RLY



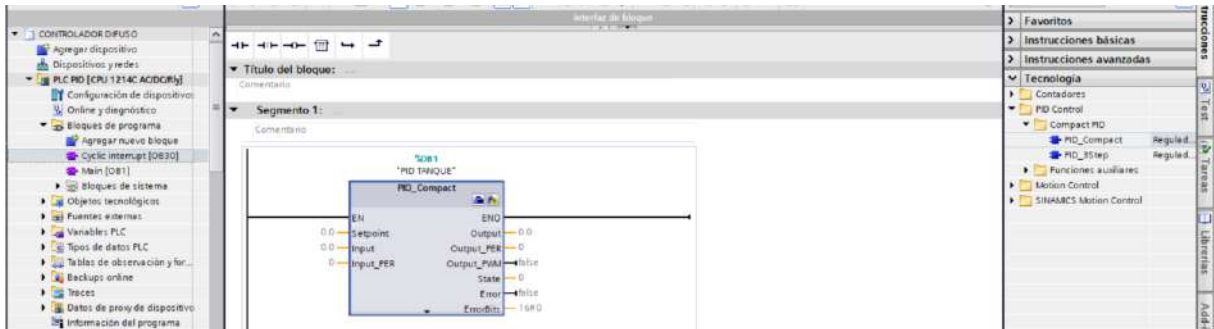
La programación del controlador se realiza en un bloque de interrupción cíclica con periodo de 10ms esto se muestra en la siguiente figura.

Figura 10 Bloque de interrupción cíclica



Se solicita en las herramientas de Tecnología un controlador PID compacto para realizar el control. esto se muestra en la figura.

Figura 11 Herramientas de Tecnología en TIA Portal



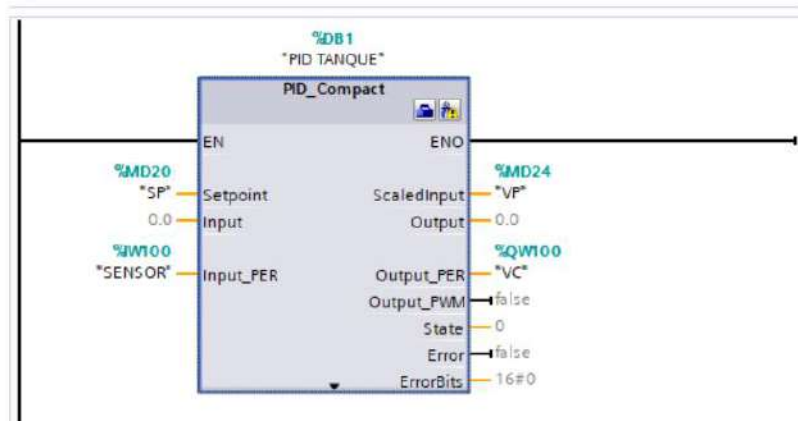
Se configura la variable de Setpoint (SP), Variable de proceso (VP) la válvula de carga (VC), Válvula de descarga (VD), la perturbación, esto se evidencia en la figura 12, donde se muestra el tipo de datos utilizado así como la dirección de cada una de ellas.

Figura 12 Asignación de variables en TIA Portal

Variables PLC									
	Nombre		Tipo de datos	Dirección	Rema...	Acces...	Escrib...	Visibl...	Comentario
1	VC	...	Int	%QW100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	VALVULA DE CARGA
2	VD	...	Int	%QW102	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	VALVULA DE DESCARGA
3	SENSOR	...	Int	%IW100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	SP	...	Real	%MD20	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	SETPOINT
5	VP	...	Real	%MD24	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	VARIABLE DE PROCESO
6	AUXD	...	Real	%MD28	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	AUX1	...	Real	%MD32	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
8	PERTURBACION	...	Real	%MD36	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	PORCENTAJE DE PERTURBACION

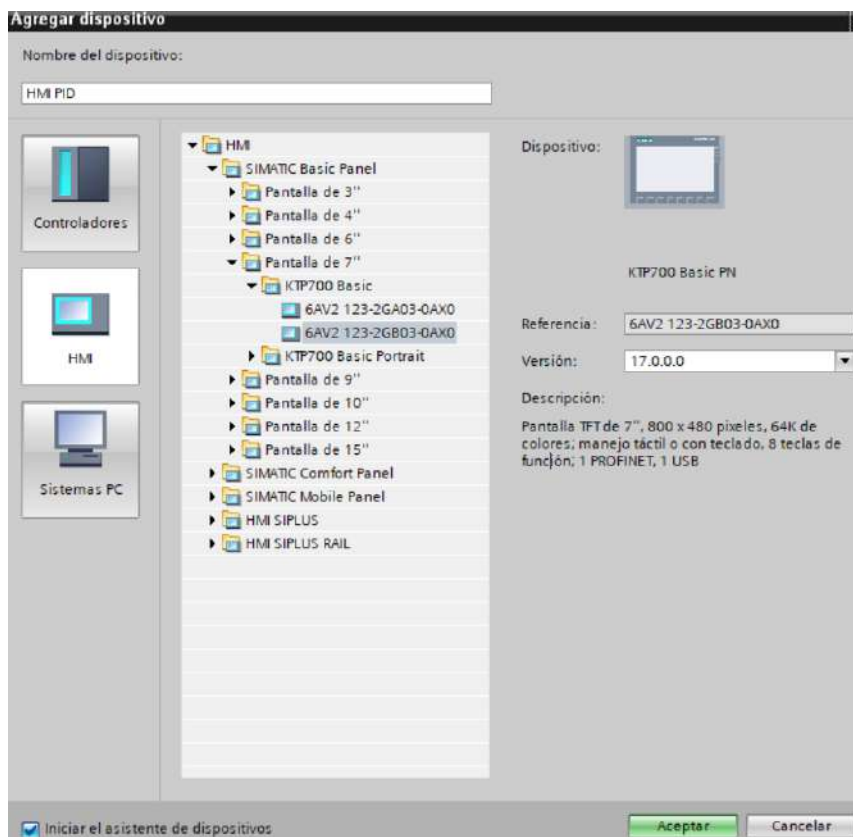
Se asignan las entradas y salidas al controlador PID como se muestra en la siguiente figura.

Figura 13 Configuración de entradas y salidas al controlador PID



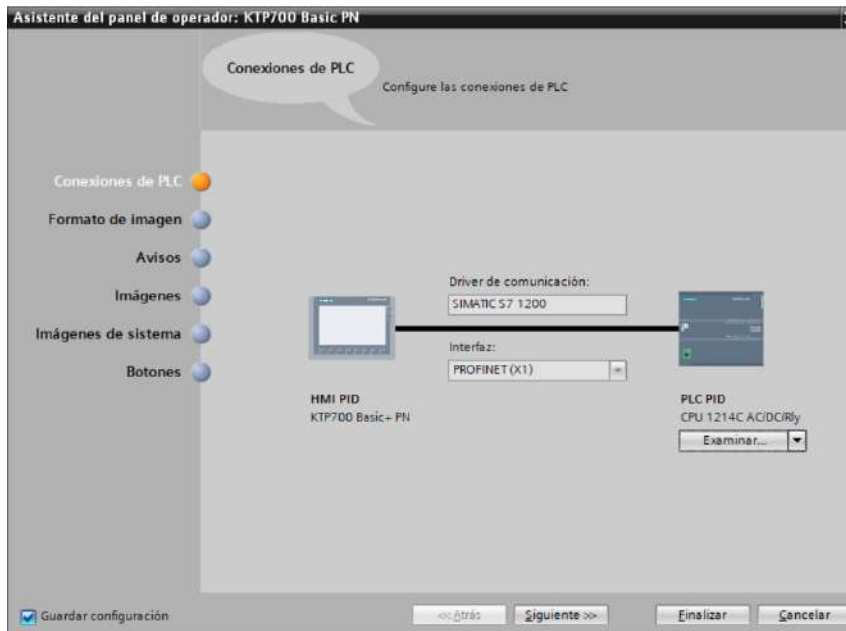
Para la visualización del proceso usaremos una pantalla HMI de 7 pulgadas como se muestra en la siguiente figura.

Figura 14 Selección del panel HMI en TIA PORTAL



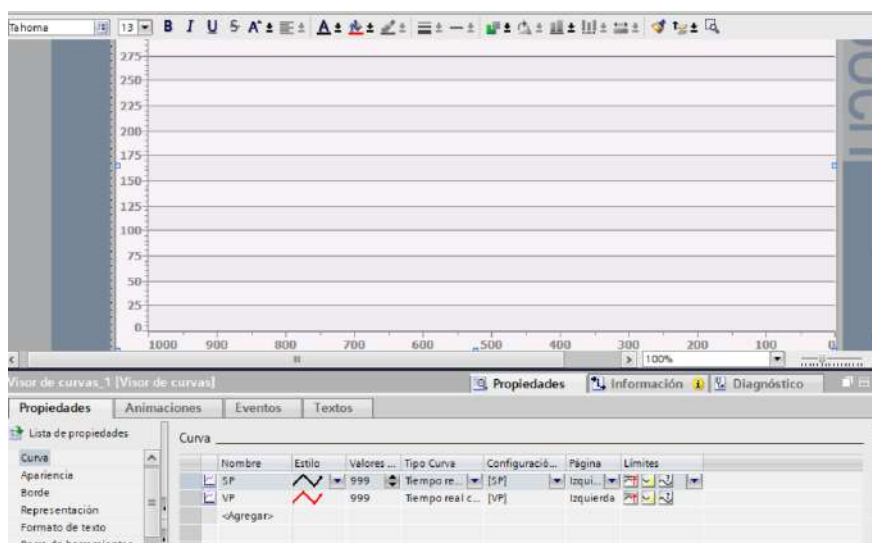
Se realiza la comunicación con el controlador como se muestra en la figura 15.

Figura 15 Comunicación entre el PLC y HMI



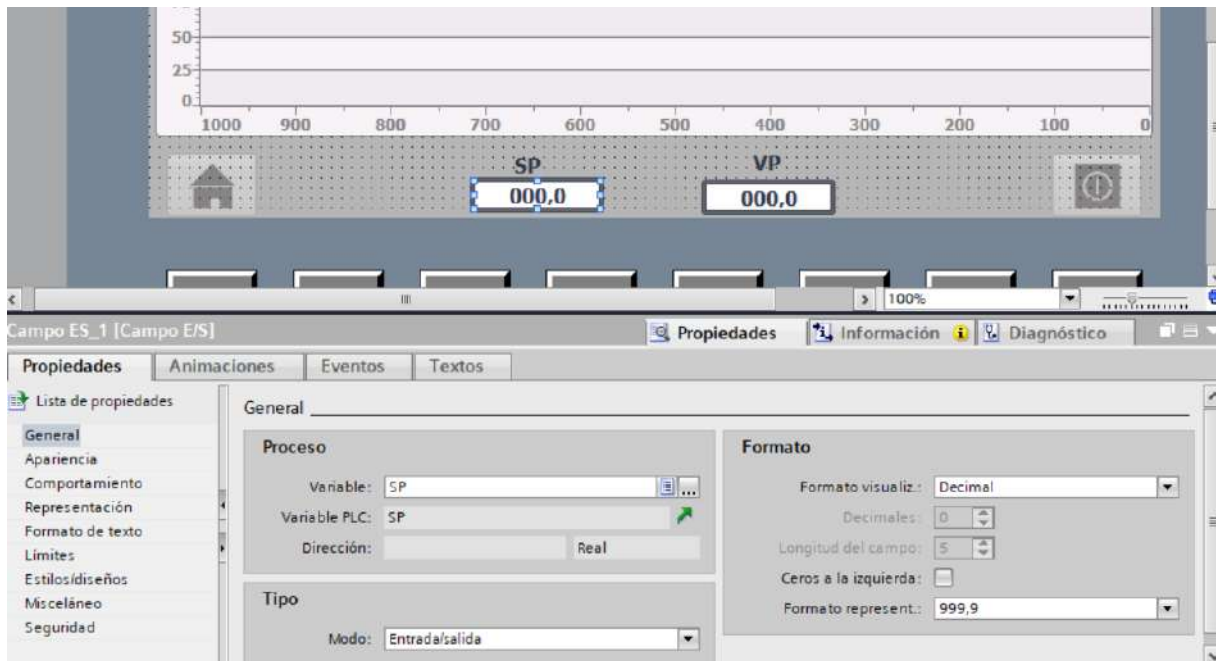
Se configura las curvas a visualizar en el panel HMI como se muestra en la figura 16.

Figura 16 Configuración de las curvas en el panel HMI



Para el ingreso del SP y la visualización del valor de la variable de proceso se utilizó una caja de entrada y salida esto se muestra en la figura 17.

Figura 17 configuración de la variable de proceso en HMI



Se descarga el programa al PLC y se realiza la comunicación con Factory IO. Realizamos la sintonía del controlador con la planta realizada en Factory IO como se muestra en la figura 18.

Figura 18 Conexión entre el Ordenador y el controlador

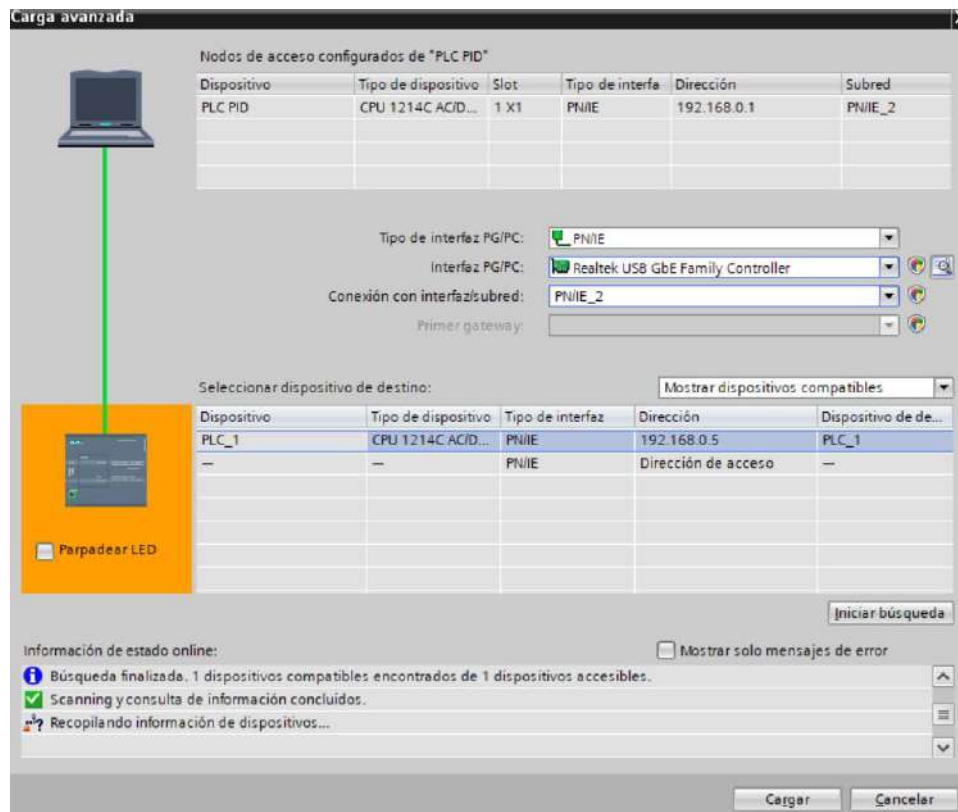


Figura 19 Configuración de la variable longitud en TIA Portal

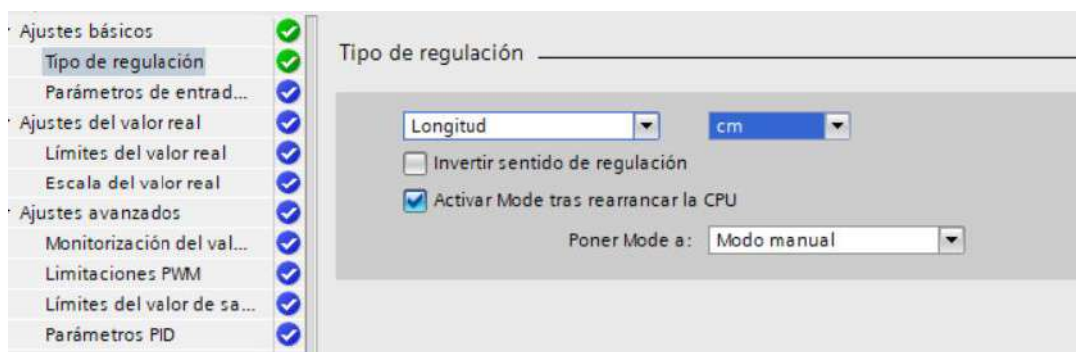
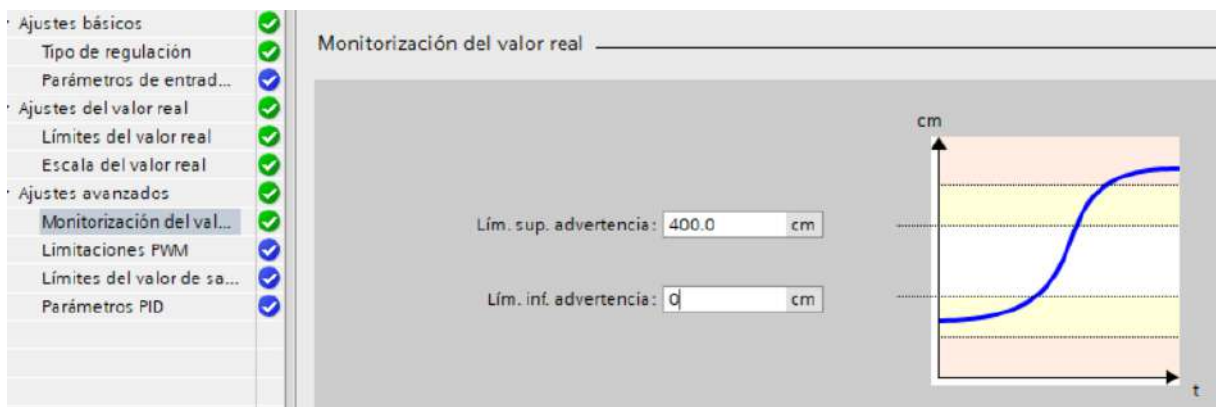


Figura 20 Configuración de la escala de valor real en TIA Portal

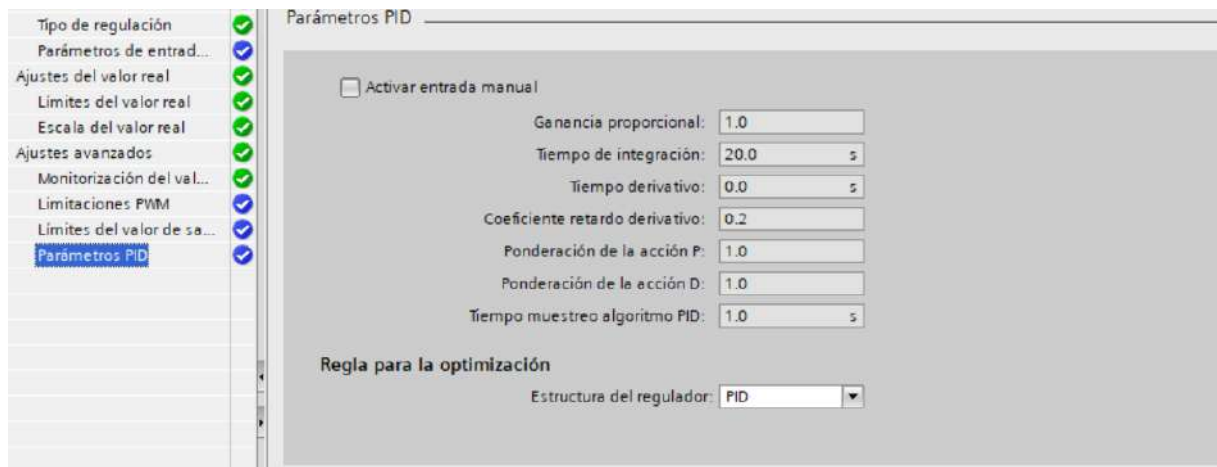


Figura 21 Configuración del monitoreo del valor real en TIA Portal



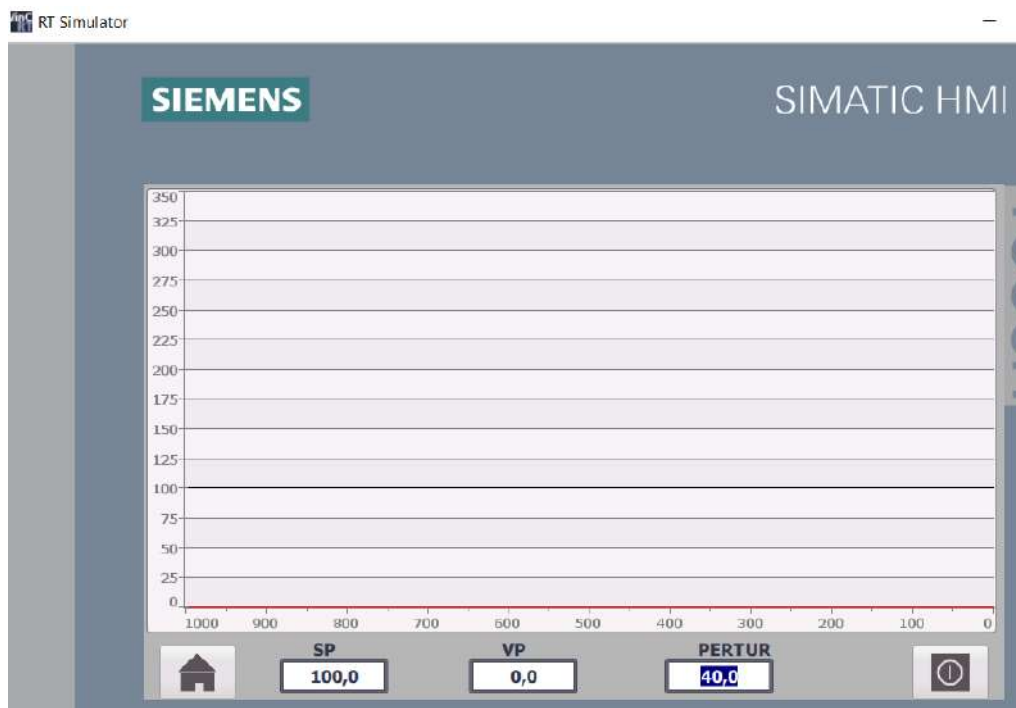
En la siguiente figura se muestra los valores iniciales del controlador PID.

Figura 22 Configuración de los parámetros PID en TIA Portal



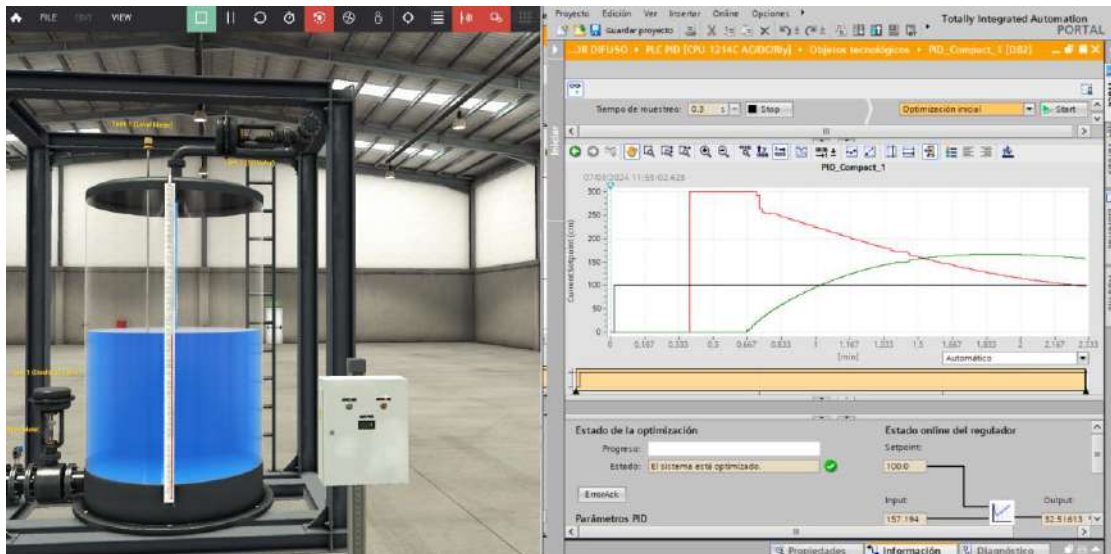
Se coloca un Setpoint de 100 y una perturbación 40% para la sintonía esto se observa en la figura 23.

Figura 23 Configuración del setpoint en el panel HMI



En la gráfica siguiente se muestra la sintonía inicial del controlador

Figura 24 sintonía inicial del controlador en Factory IO y TIA Portal



Toma de datos:

Resultado PID setpoint 200 perturbacion 40%

Figura 25 Respuesta del PID con setpoint 200 Perturbacion 40%

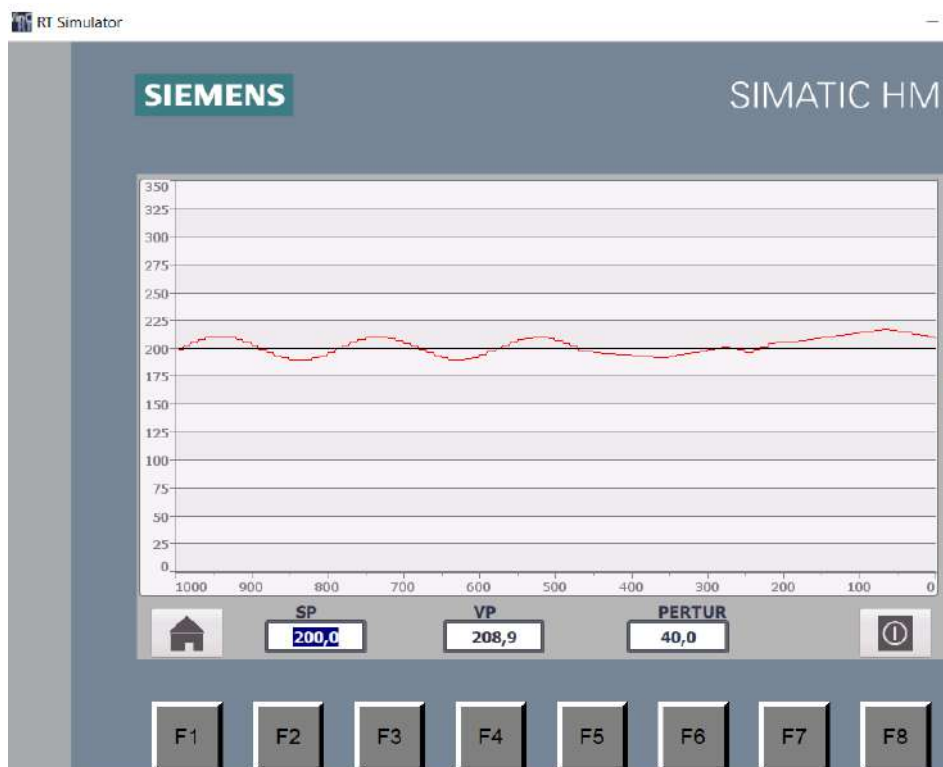


Figura 26 parámetros del PID con setpoint 200 Perturbacion 40%

Activar entrada manual

Ganancia proporcional: 2.112505

Tiempo de integración: 2.454464E-1 s

Tiempo derivativo: 5.12012E-2 s

Coficiente retardo derivativo: 0.1

Ponderación de la acción P: 1.0

Ponderación de la acción D: 0.0

Tiempo muestreo algoritmo PID: 9.9988E-3 s

Regla para la optimización

Estructura del regulador: PID

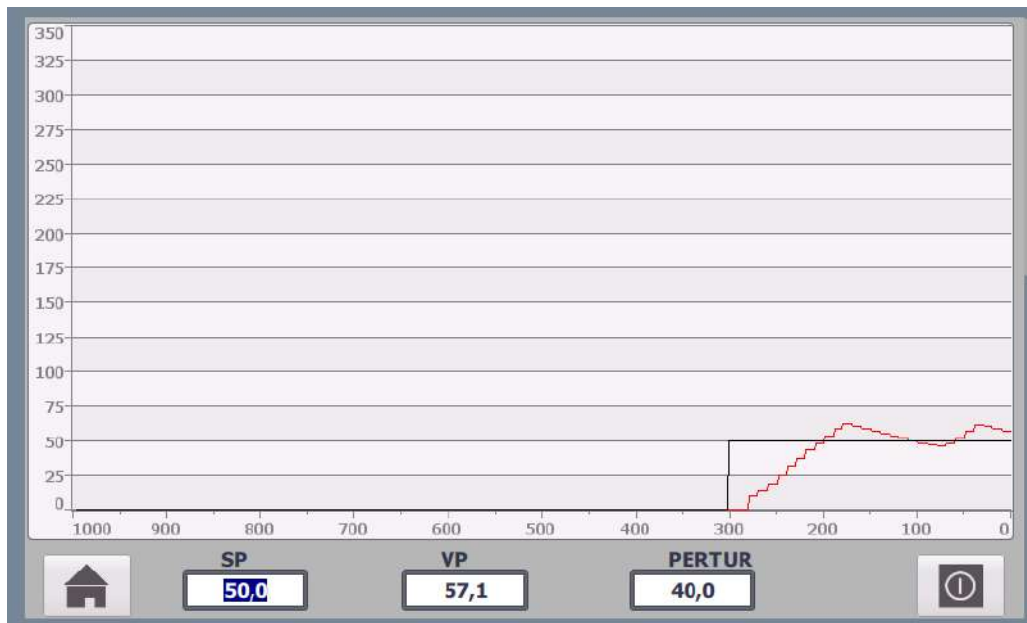
Tiempo de establecimiento 750 (100ms)=75s de 200cm a 50cm

Figura 27 Tiempo de establecimiento 75s de 200cm a 50cm



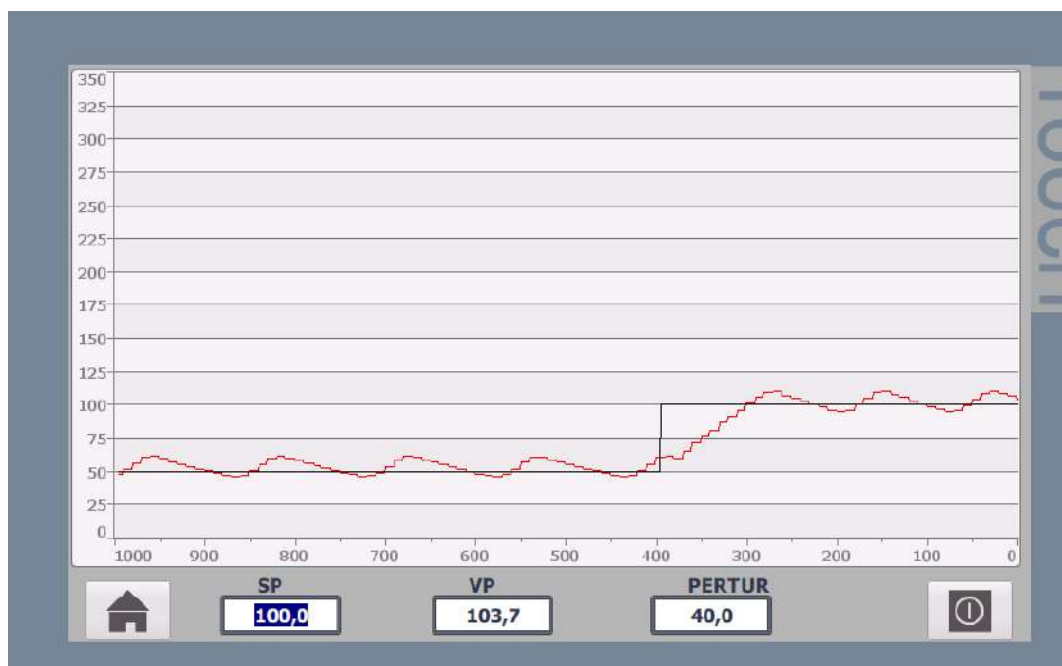
Tiempo de establecimiento $225(100\text{ms}) = 22.5\text{s}$ de 0cm a 50cm

Figura 28 Tiempo de establecimiento 22.5s de 0cm a 50cm



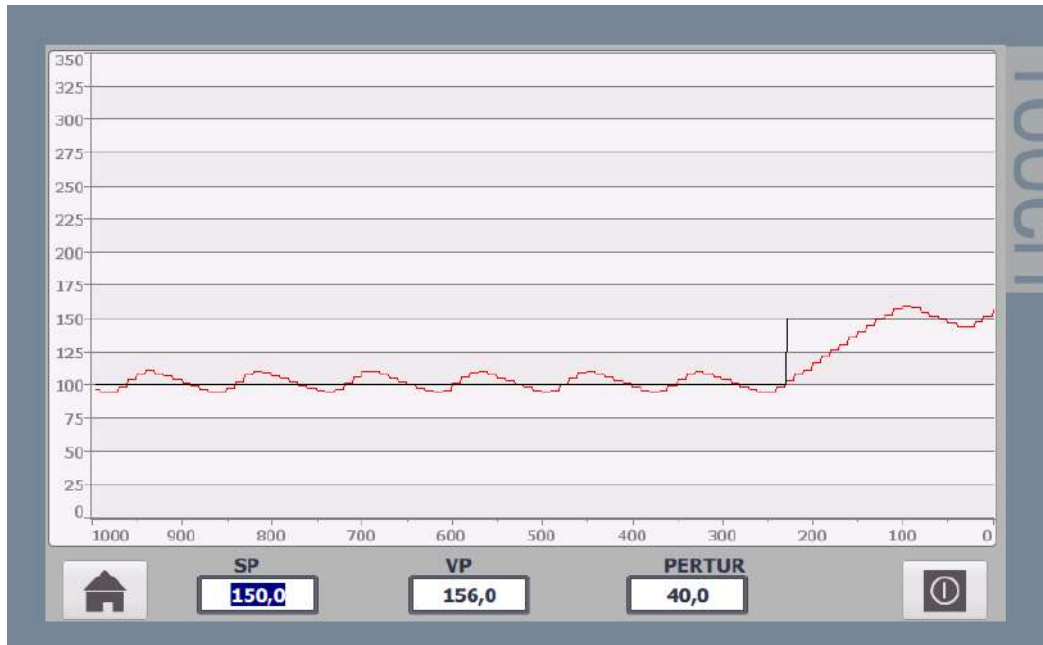
Tiempo de establecimiento $225(100\text{ms}) = 22.5\text{s}$ de 50cm a 100cm

Figura 29 Tiempo de establecimiento 22.5s de 50cm a 100cm



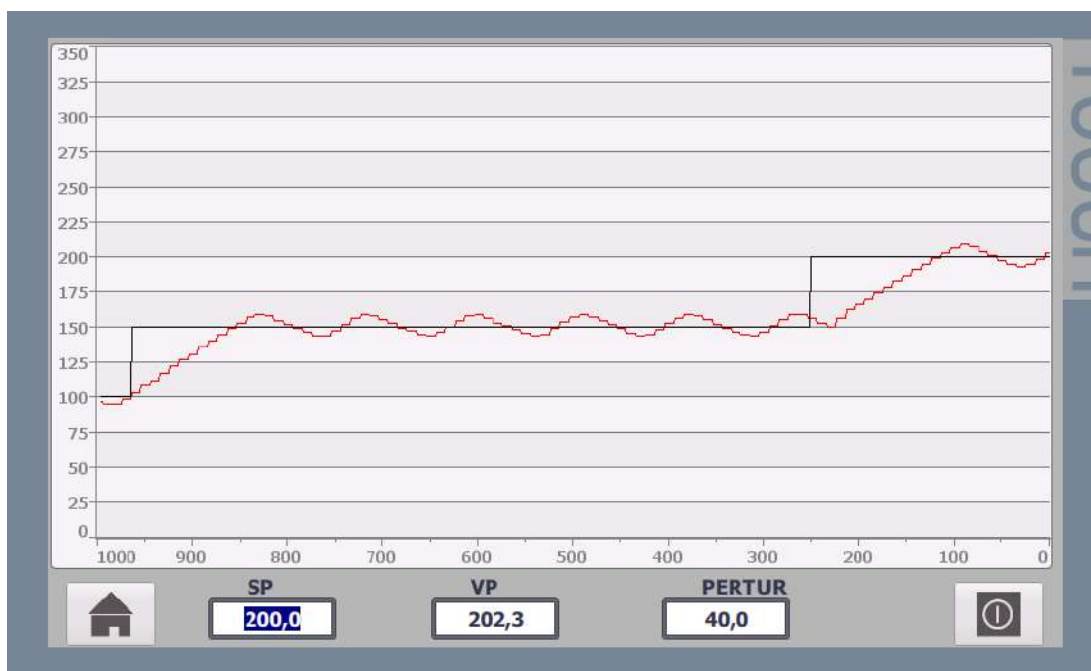
Tiempo de establecimiento $225(100\text{ms})=22.5\text{s}$ de 100cm a 150cm

Figura 30 Tiempo de establecimiento 22.5s de 100cm a 150cm



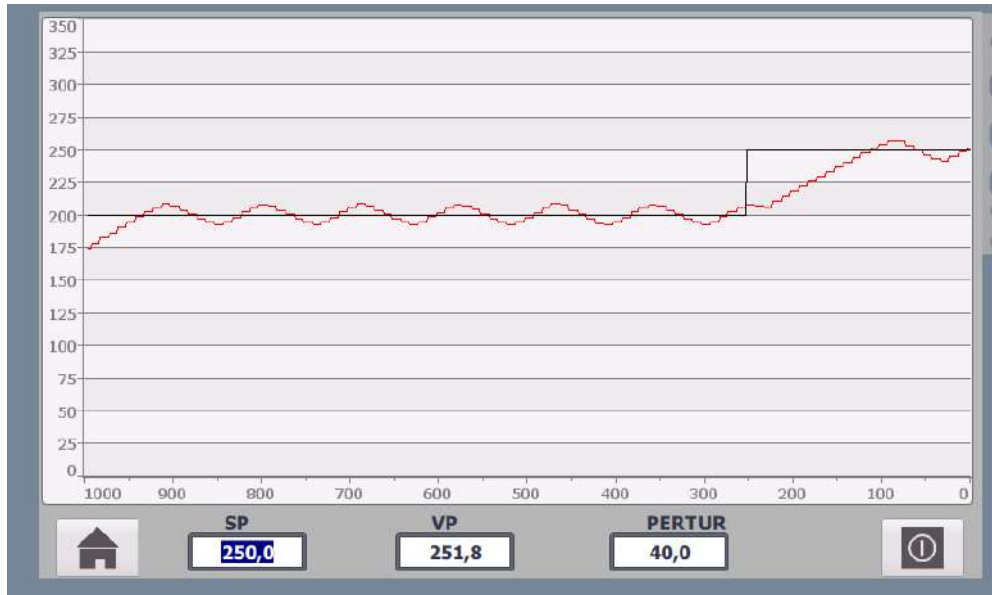
Tiempo de establecimiento $250(100\text{ms})=25\text{s}$ de 150cm a 200cm

Figura 31 Tiempo de establecimiento 25s de 150cm a 200cm



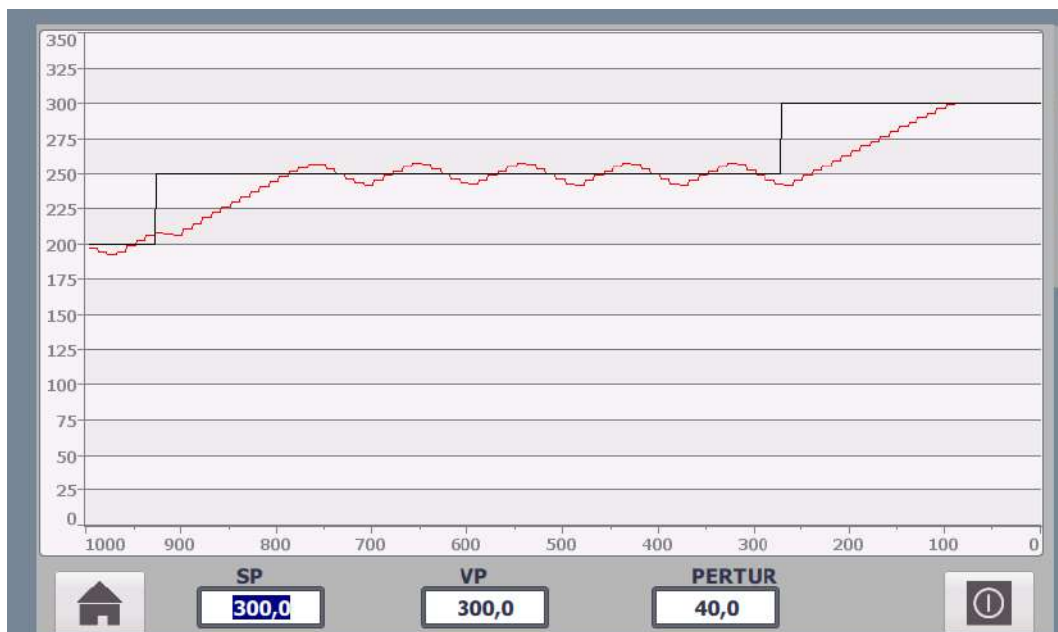
Tiempo de establecimiento $250(100\text{ms})=25\text{s}$ de 200cm a 250cm

Figura 32 Tiempo de **establecimiento** 25s de 200cm a 250cm



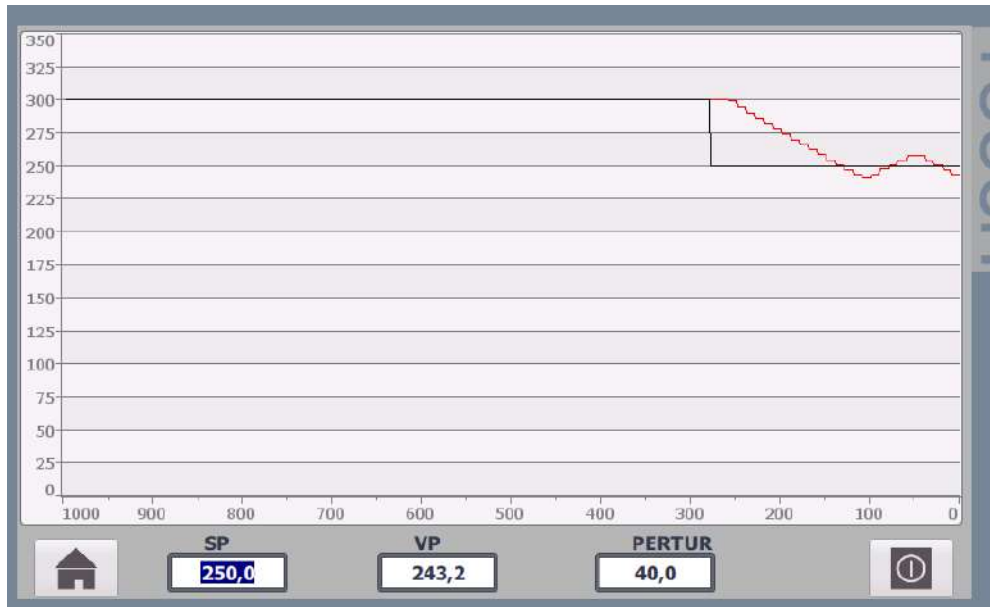
Tiempo de establecimiento $200(100\text{ms})=20\text{s}$ de 250cm a 300cm , este resultado es debido a que el sistema se satura.

Figura 33 Tiempo de establecimiento 20s de 250cm a 300cm



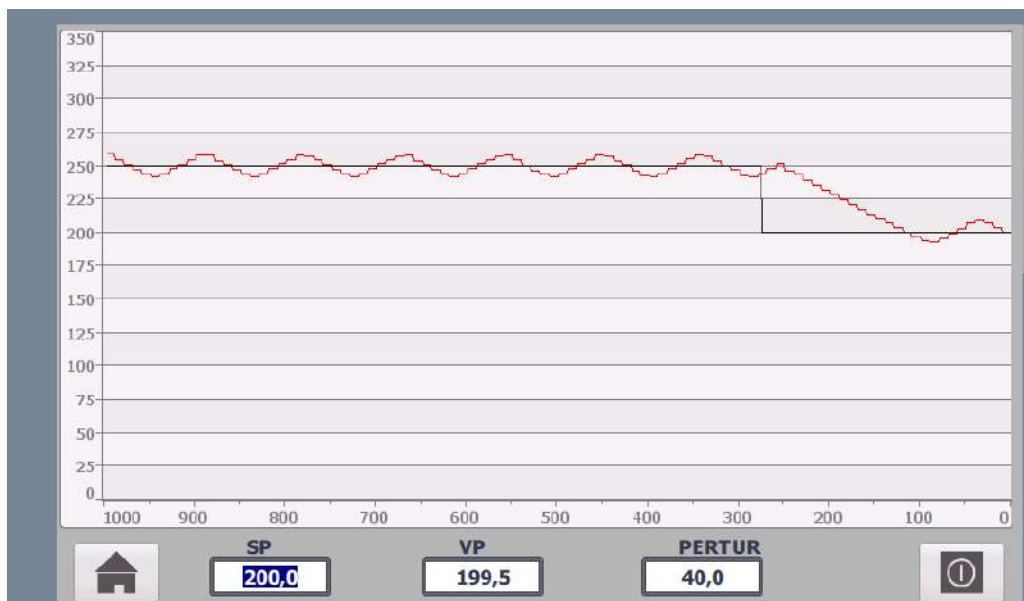
Tiempo de establecimiento $270(100\text{ms})=27\text{s}$ de 300cm a 250cm.

Figura 34 Tiempo de establecimiento 27s de 300cm a 250cm



Tiempo de establecimiento $270(100\text{ms})=27\text{s}$ de 250cm a 200cm

Figura 35 Tiempo de establecimiento 27s de 250cm a 200cm



Tiempo de establecimiento $270(100\text{ms})=27\text{s}$ de 200cm a 150cm

Figura 36 Tiempo de establecimiento 27s de 200cm a 150cm



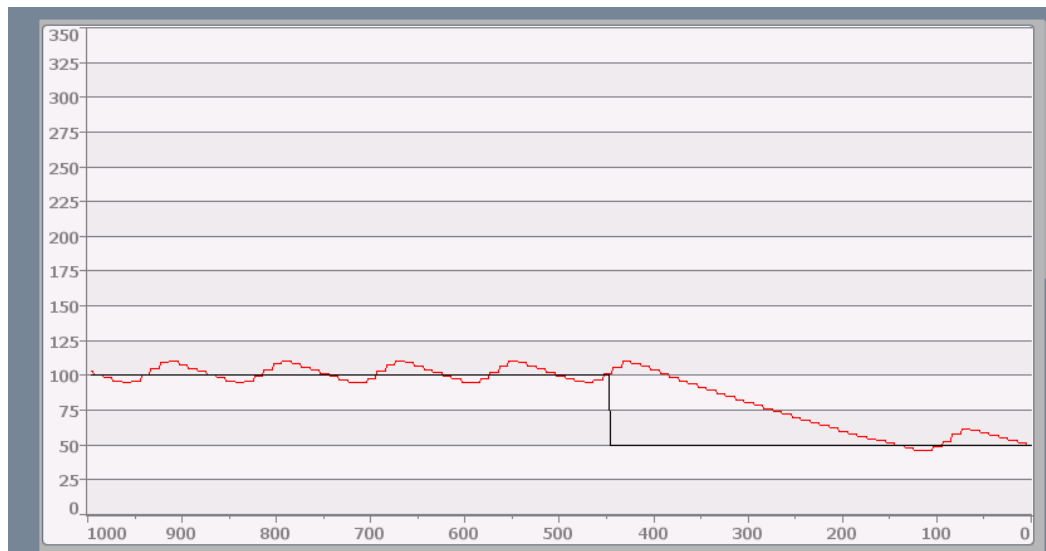
Tiempo de establecimiento $360(100\text{ms})=36\text{s}$ de 150cm a 100cm

Figura 37 Tiempo de establecimiento 36s de 150cm a 100cm



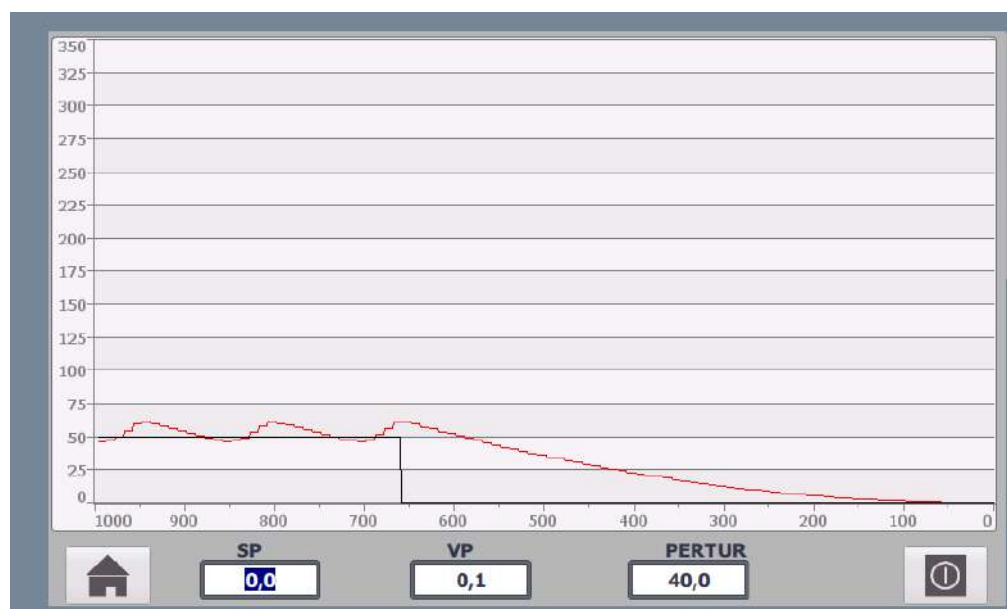
Tiempo de establecimiento $440(100\text{ms})=44\text{s}$ de 100cm a 50cm

Figura 38 Tiempo de establecimiento 44s de 100cm a 50cm



Tiempo de establecimiento $660(100\text{ms})=66\text{s}$ de 50cm a 0cm

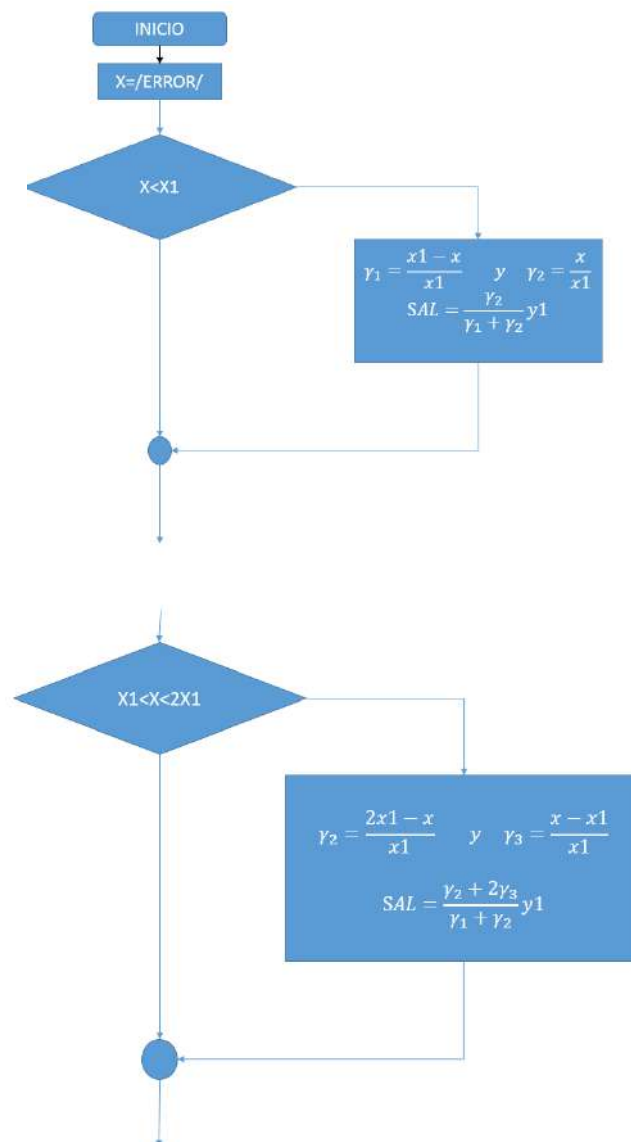
Figura 39 Tiempo de establecimiento 66s de 50cm a 0cm

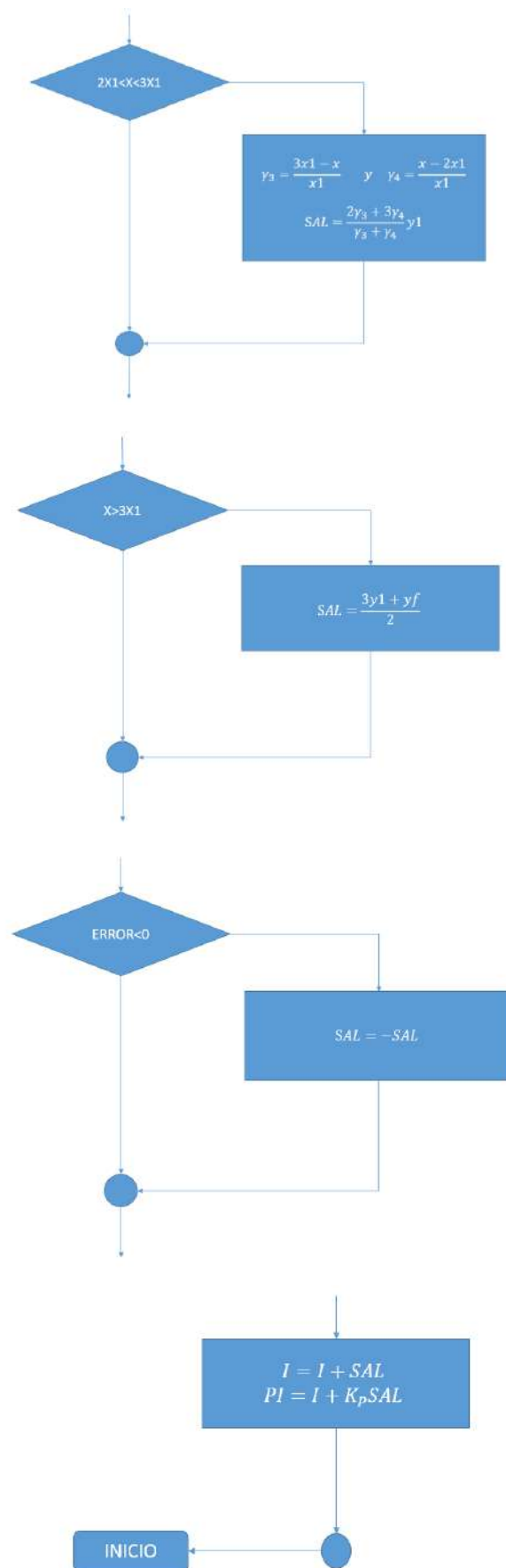


Se realiza el diseño del controlador Difuso en un control de nivel de tanque, y se toma el tiempo que tarda en estabilizarse la variable de proceso para diferentes niveles.

Se realiza el diseño de un controlador difuso de 7 zonas como se muestra en el siguiente diagrama de flujo.

Figura 40 diagrama de flujo del controlador Difuso





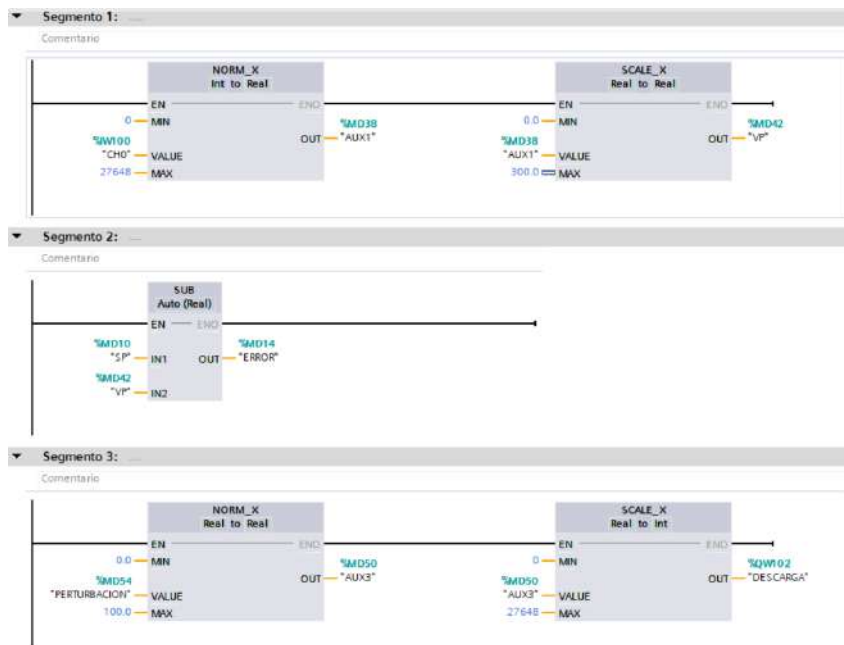
En la siguiente figura se muestran las variables utilizadas en la implementación del controlador difuso.

Figura 41 variables utilizadas en la implementación del controlador difuso

Variables PLC								
Nombre	Tabla de variables	Tipo de datos	Dirección	Rema...	Acces...	Escrib...	Visibl...	Comentario
CHO	Tabla de variables e...	Int	%IW100		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Sensor SEGUN FACTORY
SALIDADIFUZA	Tabla de variables e...	Int	%QW100		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Valvula de carga SEGUN FACTORY
SP	Tabla de variables e...	Real	%MD10		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Set Point de 0 a 300cm
ERROR	Tabla de variabl...	Real	%MD14		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Error del proceso
X1	Tabla de variables e...	Real	%MD18		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	NIVEL MINIMO DE ERROR DE 0 A 300
Y1	Tabla de variables e...	Real	%MD22		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	NIVEL MINIMO DE SALIDA Voltios: MENOR A 10
I	Tabla de variables e...	Real	%MD26		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Acumulado integral
KP	Tabla de variables e...	Real	%MD30		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Ganancia proporcional
PI	Tabla de variables e...	Real	%MD34		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	accion Proporcional Integral
AUX1	Tabla de variables e...	Real	%MD38		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
VP	Tabla de variables e...	Real	%MD42		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Variable de proceso
AUX2	Tabla de variables e...	Real	%MD46		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
DESCARGA	Tabla de variables e...	Int	%QW102		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Valvula de descarga
AUX3	Tabla de variables e...	Real	%MD50		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
PERTURBACION	Tabla de variables e...	Real	%MD54		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Porcentaje de perturbacion
<Agregar>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

El programa de conversión a unidades de ingeniería se desarrolló en el bloque principal esto se muestra en la siguiente figura.

Figura 42 Bloques de normalización y escalamiento



La implementación del controlador difuso se realizó en un bloque de interrupción cíclica en lenguaje de programación SCL, con un tiempo de muestreo de 10ms esto se muestra en la siguiente figura.

Figura 43 implementación del controlador difuso en SCL

```

1  "ERROR" := "SP" - "VP";
2  #ERRORABSOLUTO := ABS("ERROR");
3  IF #ERRORABSOLUTO < "X1" THEN
4      #G1 := ("X1" - #ERRORABSOLUTO) / "X1";
5      #G2 := #ERRORABSOLUTO / "X1";
6      #SALIDA := #G2 * "Y1" / (#G1 + #G2);
7  END_IF;
8  IF #ERRORABSOLUTO > "X1" AND #ERRORABSOLUTO < 2 * "X1" THEN
9      #G1 := (2 * "X1" - #ERRORABSOLUTO) / "X1";
10     #G2 := (#ERRORABSOLUTO - "X1") / "X1";
11     #SALIDA := (#G1 + 2 * #G2) * "Y1" / (#G1 + #G2);
12 END_IF;
13 IF #ERRORABSOLUTO > 2 * "X1" AND #ERRORABSOLUTO < 3 * "X1" THEN
14     #G1 := (3 * "X1" - #ERRORABSOLUTO) / "X1";
15     #G2 := (#ERRORABSOLUTO - 2 * "X1") / "X1";
16     #SALIDA := (2 * #G1 + 3 * #G2) * "Y1" / (#G1 + #G2);
17 END_IF;
18 IF #ERRORABSOLUTO > 3 * "X1" THEN
19     #SALIDA := 9 * "Y1" / 2;
20 END_IF;
21 IF "ERROR" < 0 THEN
22     #SALIDA := - #SALIDA;
23 END_IF;
24 "AUX2" := "I";
25 "I" := "I" + #SALIDA;
26 "PI" := "I" + "KP" * "ERROR";
27 IF "PI" > 10 THEN
28     "PI" := 10;
29     "I" := "AUX2";
30 END_IF;
31 IF "PI" < 0 THEN
32     "I" := "AUX2";
33     "PI" := 0;
34 END_IF;
35 "SALIDADIFUZA" := "PI" * 2764.8;
36

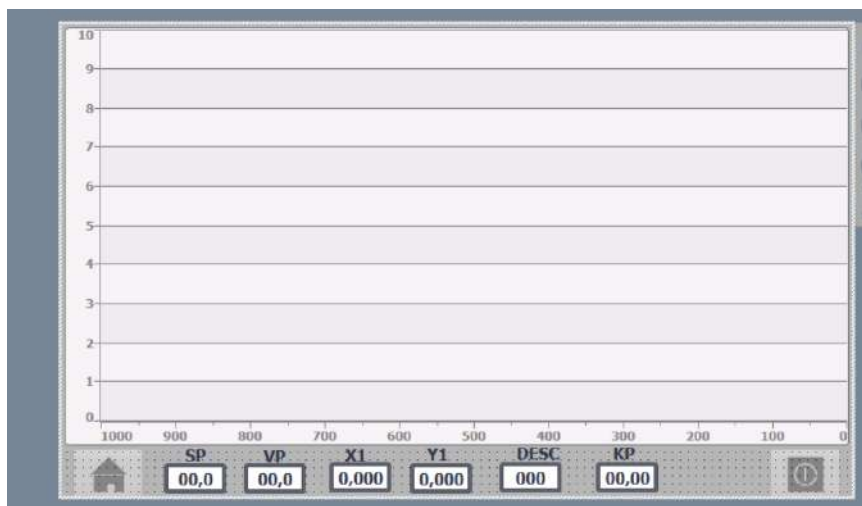
```

Para el ingreso del Setpoint , los límites de cada zona de las variables de entrada y salida así como el valor de la perturbación y visualización de la variable de proceso se utilizó un panel HMI KTP 700 con interface Profinet, esto se muestra en la siguiente figura.

Figura 44 Configuración de variables del HMI

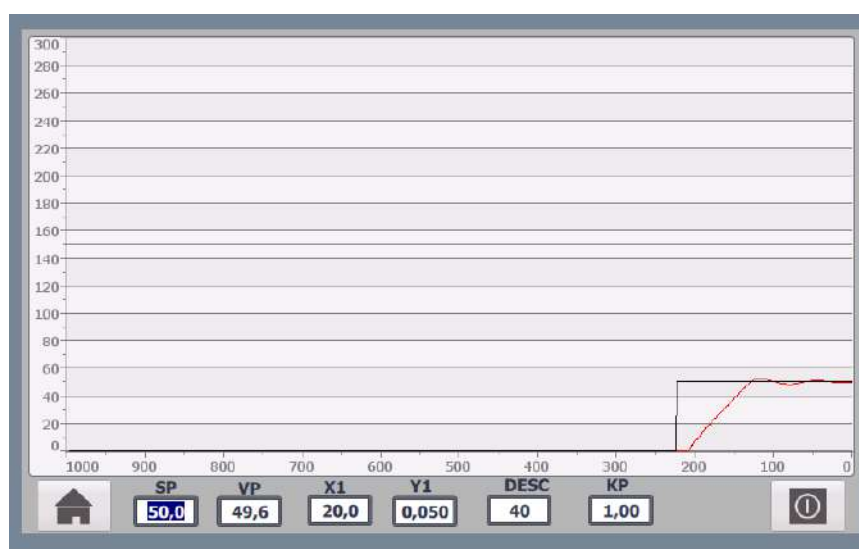
Nombre	Tabla	Tipo de	Conexión	Nombre d.	Variable PLC	Ciclo de adquisi.	Comentario de origen	Comentar
VP	Tabla	Real	HMI_Conexión_1	PLC_1	VP	1 s	Señal de proporcional	
PERTURBACION	Tabla	Real	HMI_Conexión_1	PLC_1	PERTURBACION	100 ms	Porcentaje de perturbacion	
SP	Tabla	Real	HMI_Conexión_1	PLC_1	SP	100 ms	Set Point de 0 a 300cm	
VP	Tabla	Real	HMI_Conexión_1	PLC_1	VP	100 ms	Variable de proceso	
X1	Tabla	Real	HMI_Conexión_1	PLC_1	X1	100 ms	NIVEL MINIMO DE ERROR DE 0 A 300	
Y1	Tabla	Real	HMI_Conexión_1	PLC_1	Y1	100 ms	NIVEL MINIMO DE SALIDA Volúnc. MENORA 10.	

Figura 45 Configuración del HMI



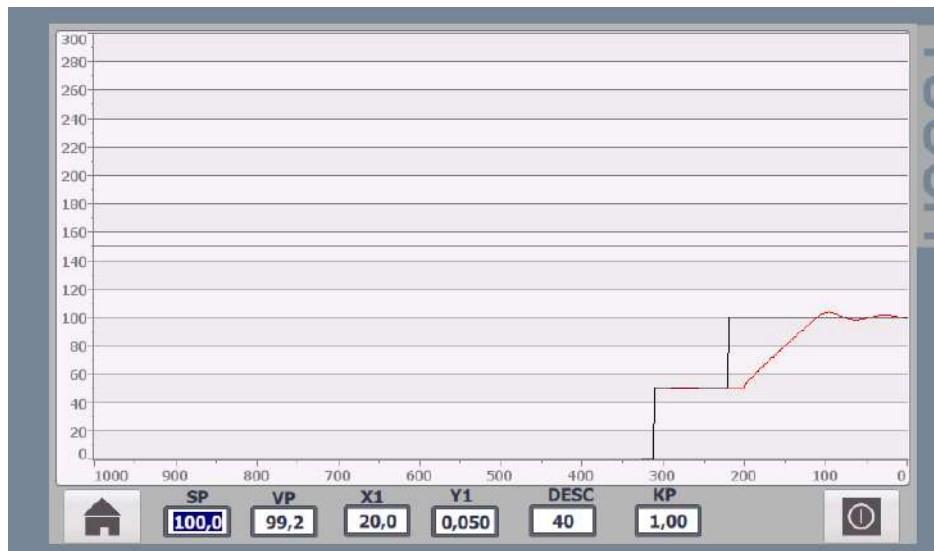
Tiempo de establecimiento $225(100\text{ms})=22.5\text{s}$ de 0cm a 50cm

Figura 46 Tiempo de establecimiento 22.5s de 0cm a 50cm



Tiempo de establecimiento $225(100\text{ms})=22.5\text{segundos}$ de 50cm a 100cm

Figura 47 Tiempo de establecimiento 22.5s de 50cm a 100cm



Tiempo de establecimiento $225(100\text{ms})=22.5\text{s}$ de 100cm a 150cm

Figura 48 Tiempo de establecimiento 22.5s de 100cm a 150cm



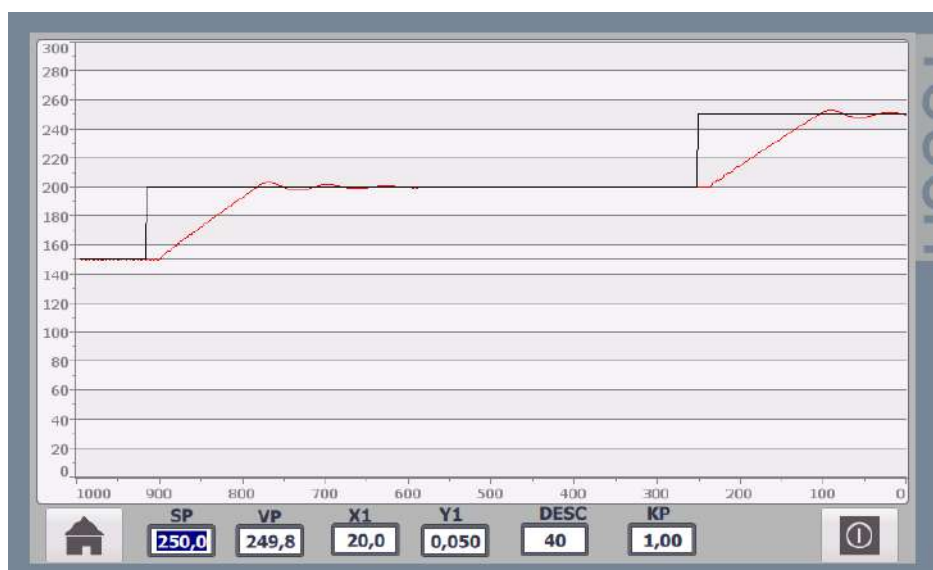
Tiempo de establecimiento $225(100\text{ms})=22.5\text{s}$ de 150cm a 200cm

Figura 49 Tiempo de establecimiento 22.5s de 150cm a 200cm



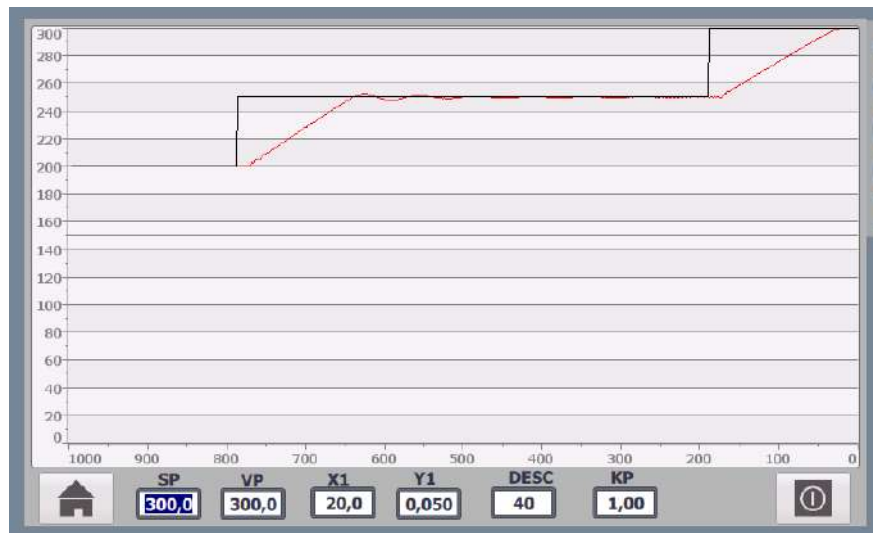
Tiempo de establecimiento $22.50(100\text{ms})=22.5\text{s}$ de 200cm a 250cm

Figura 50 Tiempo de establecimiento 22.5s de 200cm a 250cm



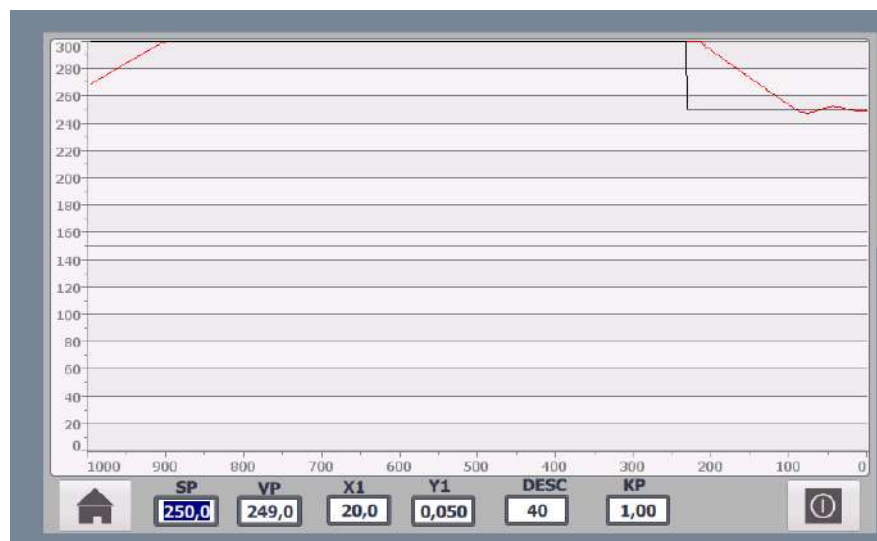
Tiempo de establecimiento $175(100\text{ms})=17.5\text{s}$ de 250cm a 300cm , este resultado es debido a que el sistema se satura.

Figura 51 Tiempo de establecimiento 17.5s de 250cm a 300cm



Tiempo de establecimiento $240(100\text{ms})=24\text{s}$ de 300cm a 250cm

Figura 52 Tiempo de establecimiento 24s de 300cm a 250cm



Tiempo de establecimiento $240(100\text{ms})=24\text{s}$ de 250cm a 200cm

Figura 53 Tiempo de establecimiento 24s de 250cm a 200cm



Tiempo de establecimiento $250(100\text{ms})=25\text{s}$ de 200cm a 150cm

Figura 54 Tiempo de establecimiento 25s de 200cm a 150cm



Tiempo de establecimiento $260(100\text{ms})=26\text{s}$ de 150cm a 100cm

Figura 55 Tiempo de establecimiento 26s de 150cm a 100cm



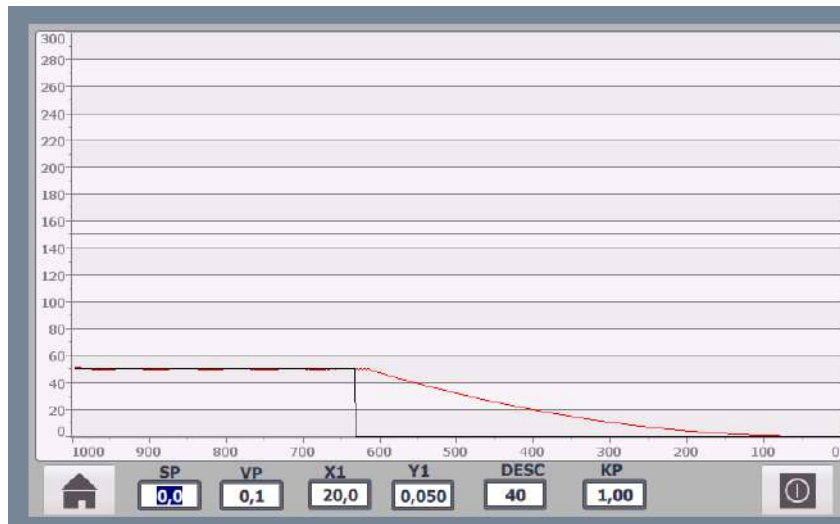
Tiempo de establecimiento $325(100\text{ms})=32.5\text{s}$ de 100cm a 50cm

Figura 56 Tiempo de establecimiento 32.5s de 100cm a 50cm



Tiempo de establecimiento $625(100\text{ms})=62.5$ s de 50cm a 0cm , este resultado se debe a que no se tiene control en la descarga (solo depende de la gravedad)

Figura 57 Tiempo de establecimiento 62.5 s de 50cm a 0cm



IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Respuesta del sistema utilizando la sintonización del controlador PID

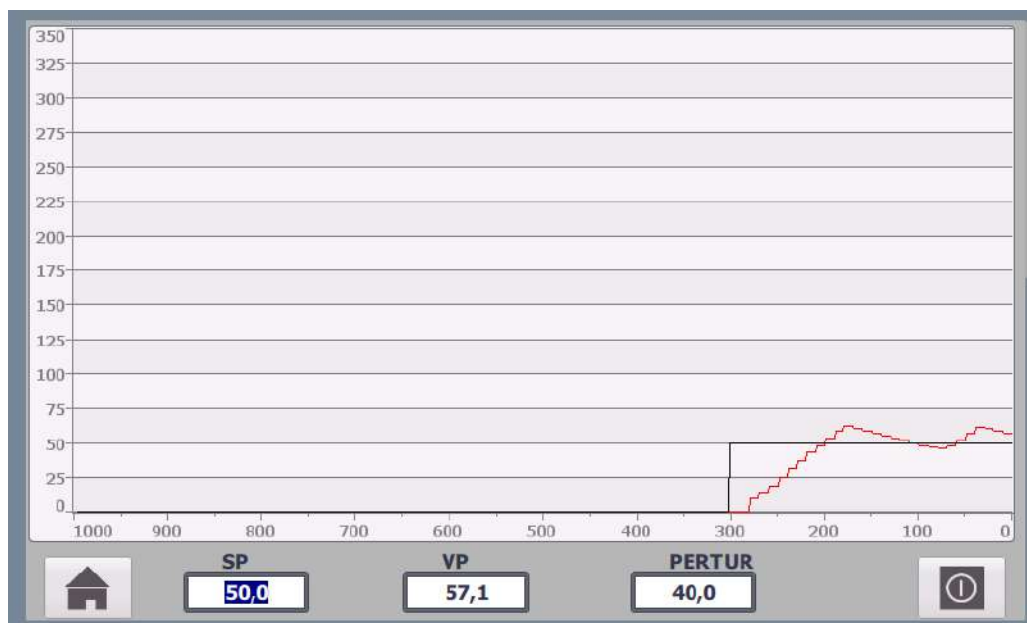
Tiempo de establecimiento $750(100\text{ms})=75\text{s}$ de 200cm a 50cm

Figura 58 Tiempo de establecimiento 75s de 200cm a 50cm



Tiempo de establecimiento $225(100\text{ms}) = 22.5\text{s}$ de 0cm a 50cm

Figura 59 Tiempo de establecimiento 22.5s de 0cm a 50cm



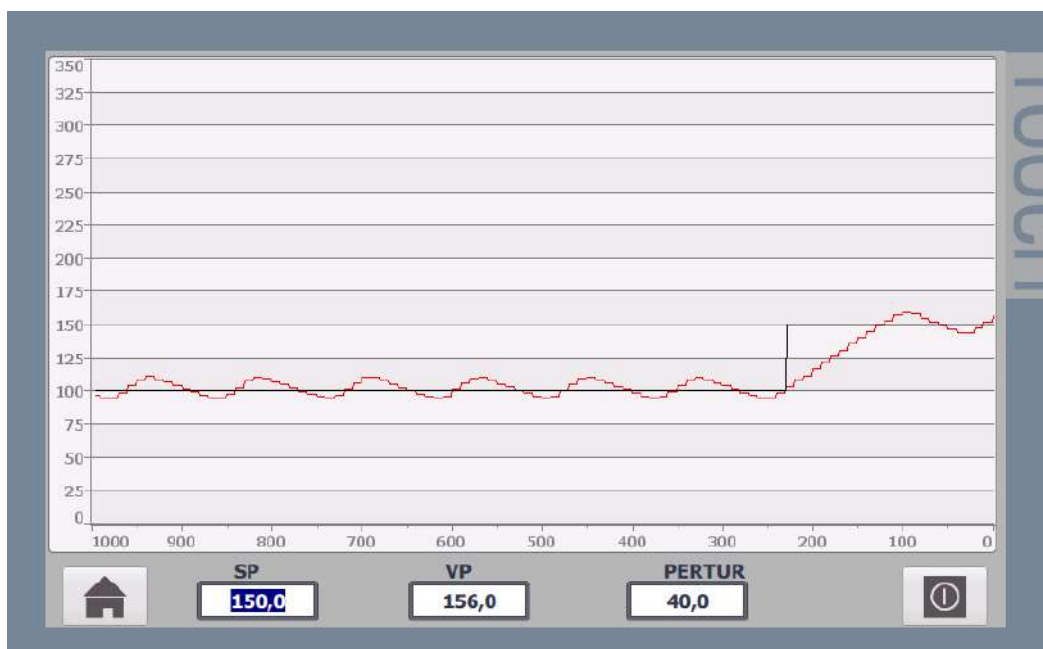
Tiempo de establecimiento $225(100\text{ms}) = 22.5\text{s}$ de 50cm a 100cm

Figura 60 Tiempo de establecimiento 22.5s de 50cm a 100cm



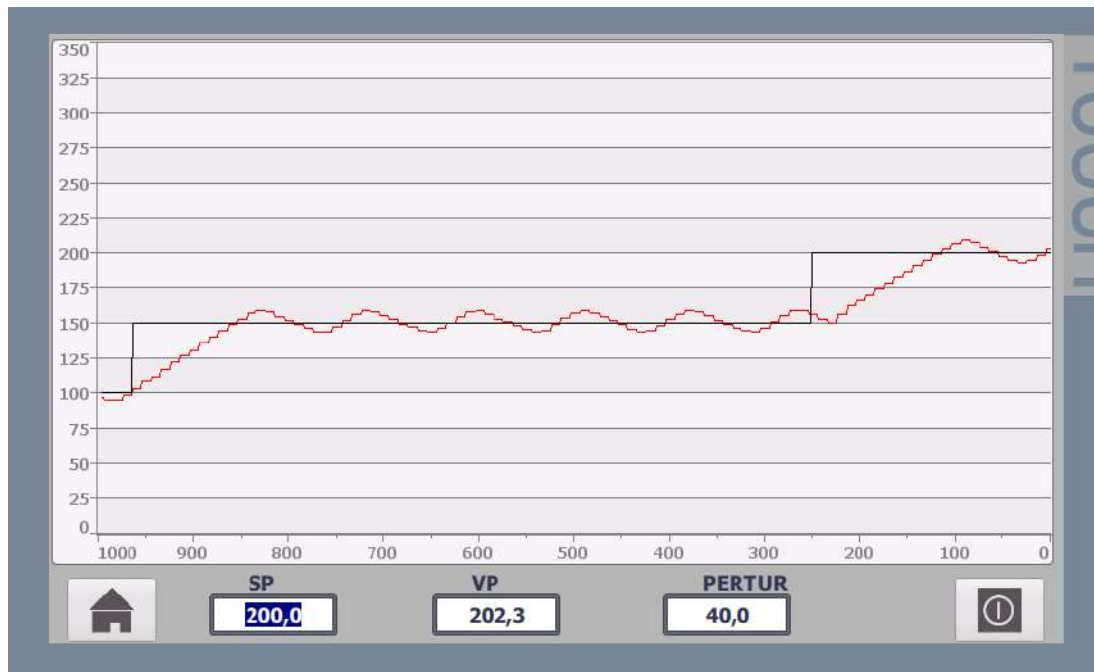
Tiempo de establecimiento $225(100\text{ms})=22.5\text{s}$ de 100cm a 150cm

Figura 61 Tiempo de establecimiento 22.5s de 100cm a 150cm



Tiempo de establecimiento $250(100\text{ms})=25\text{s}$ de 150cm a 200cm

Figura 62 Tiempo de establecimiento 25s de 150cm a 200cm



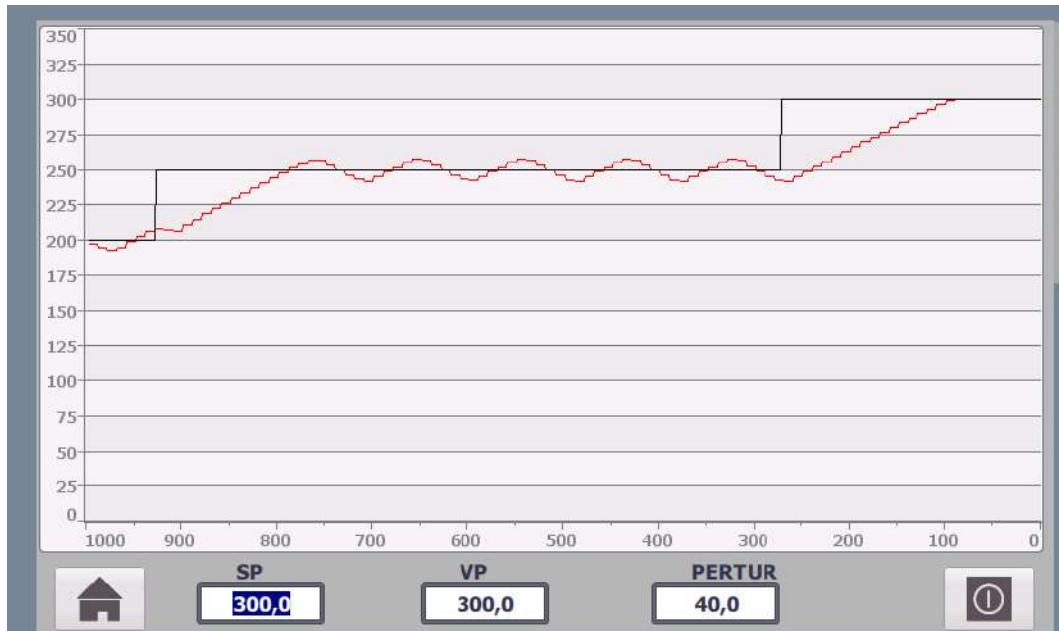
Tiempo de establecimiento $250(100\text{ms})=25\text{s}$ de 200cm a 250cm

Figura 63 Tiempo de establecimiento 25s de 200cm a 250cm



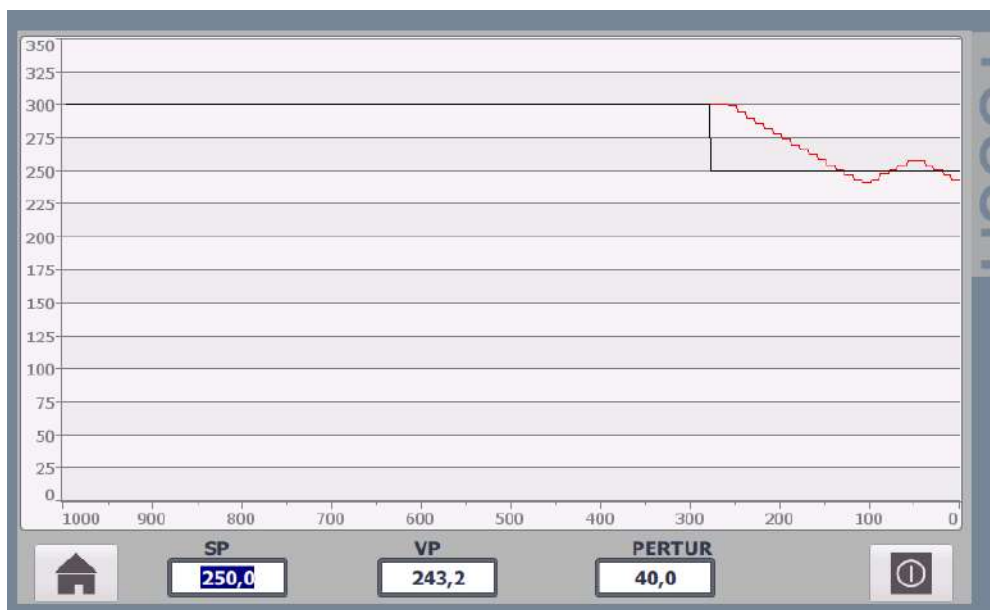
Tiempo de establecimiento $200(100\text{ms})=20\text{s}$ de 250cm a 300cm , este resultado es debido a que el sistema se satura.

Figura 64 Tiempo de establecimiento 20s de 250cm a 300cm



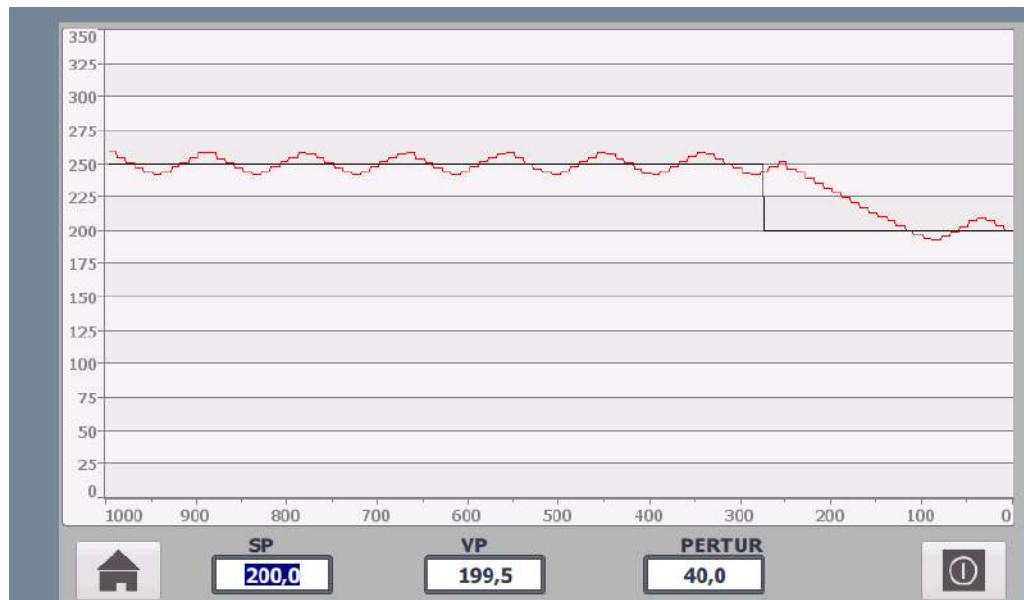
Tiempo de establecimiento $270(100\text{ms})=27\text{s}$ de 300cm a 250cm.

Figura 65 Tiempo de establecimiento 27s de 300cm a 250cm



Tiempo de establecimiento $270(100\text{ms})=27\text{s}$ de 250cm a 200cm

Figura 66 Tiempo de establecimiento 27s de 250cm a 200cm



Tiempo de establecimiento $270(100\text{ms}) =27\text{s}$ de 200cm a 150cm

Figura 67 Tiempo de establecimiento 27s de 200cm a 150cm



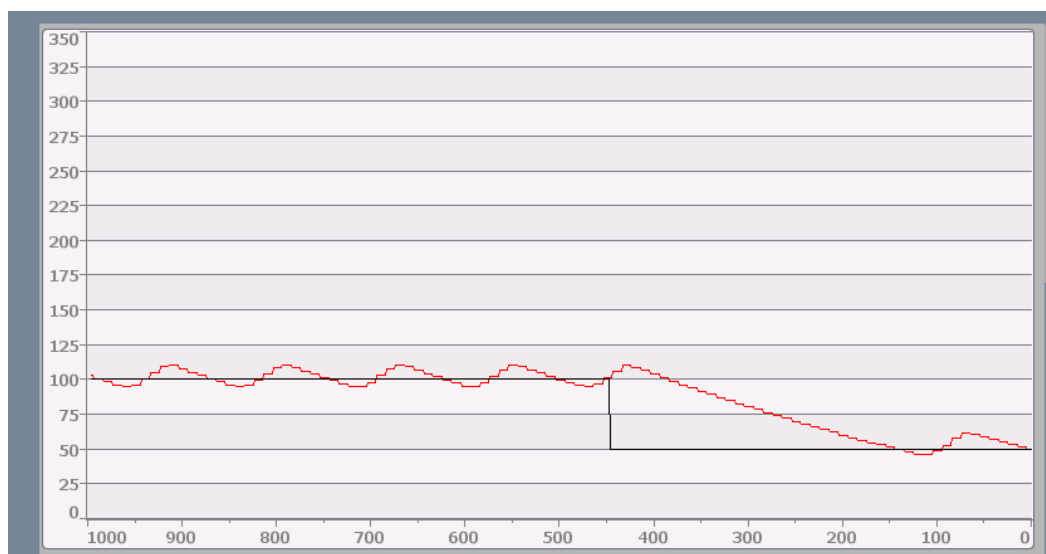
Tiempo de establecimiento $360(100\text{ms})=36\text{s}$ de 150cm a 100cm

Figura 68 Tiempo de establecimiento 36s de 150cm a 100cm



Tiempo de establecimiento $440(100\text{ms})=44\text{s}$ de 100cm a 50cm

Figura 69 Tiempo de establecimiento 44s de 100cm a 50cm



Tiempo de establecimiento $660(100\text{ms})=66\text{s}$ de 50cm a 0cm

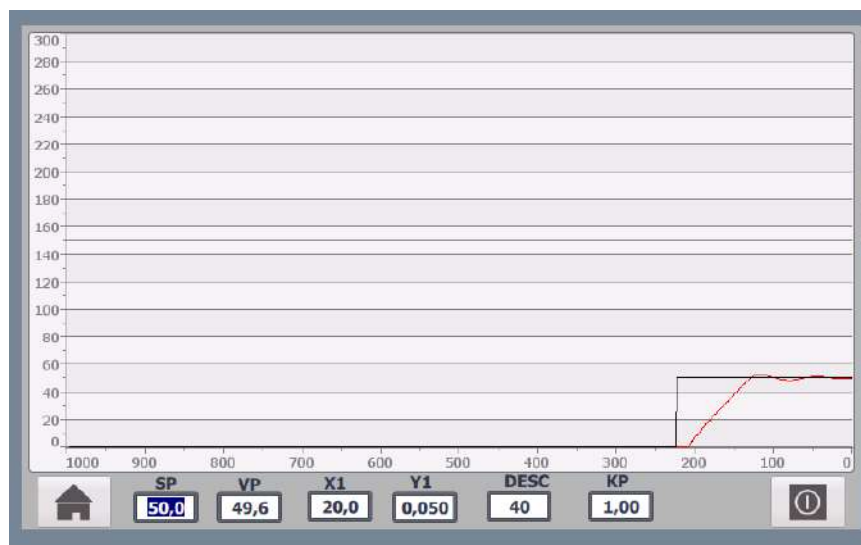
Figura 70 Tiempo de establecimiento 66s de 50cm a 0cm



Respuesta del sistema utilizando la sintonización del controlador Difuso

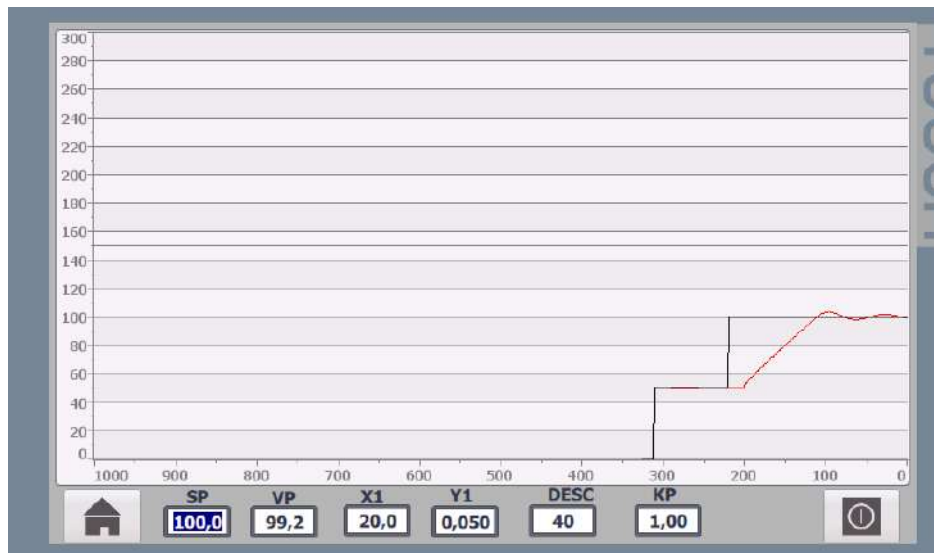
Tiempo de establecimiento $225(100\text{ms}) = 22.5\text{s}$ de 0cm a 50cm

Figura 71 Tiempo de establecimiento 22.5s de 0cm a 50cm



Tiempo de establecimiento $225(100\text{ms})=22.5\text{segundos}$ de 50cm a 100cm

Figura 72 Tiempo de establecimiento 22.5s de 50cm a 100cm



Tiempo de establecimiento $225(100\text{ms})=22.5\text{s}$ de 100cm a 150cm

Figura 73 Tiempo de establecimiento 22.5s de 100cm a 150cm



Tiempo de establecimiento $225(100\text{ms})=22.5\text{s}$ de 150cm a 200cm

Figura 74 Tiempo de establecimiento 22.5s de 150cm a 200cm



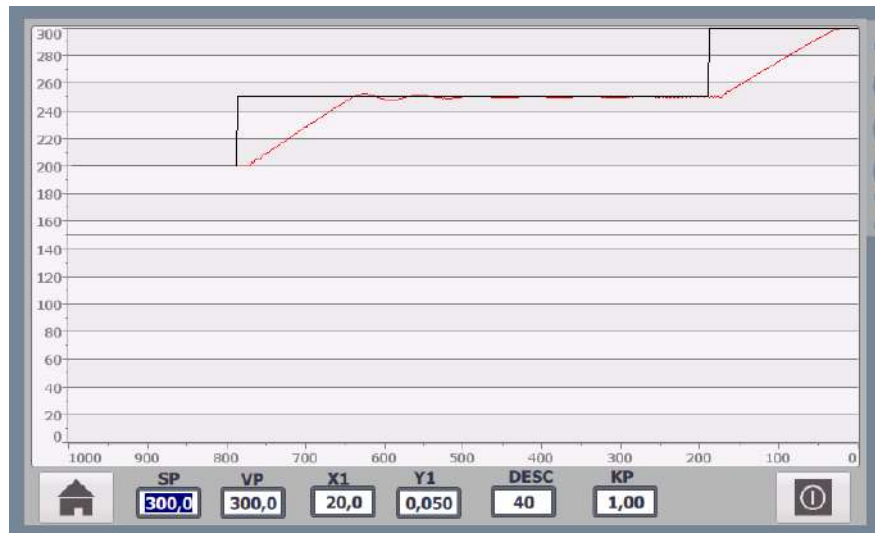
Tiempo de establecimiento $22.50(100\text{ms})=22.5\text{s}$ de 200cm a 250cm

Figura 75 Tiempo de establecimiento 22.5s de 200cm a 250cm



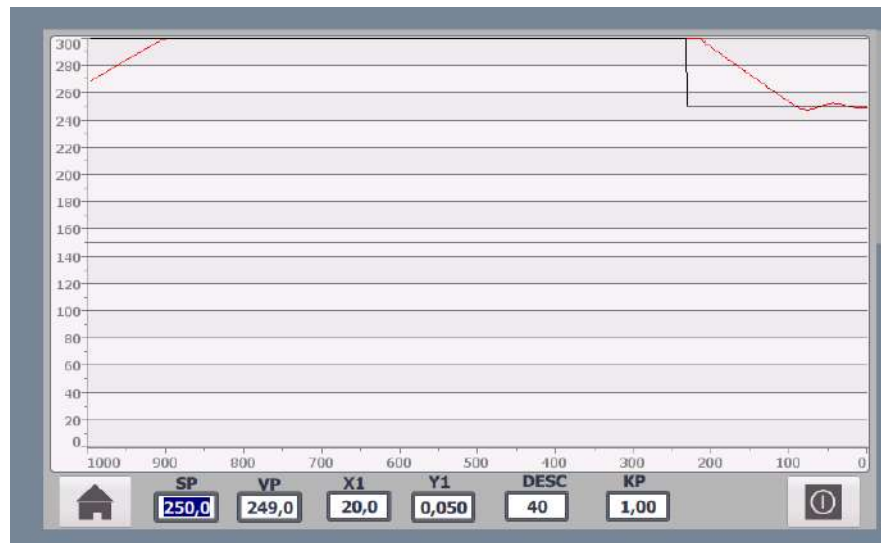
Tiempo de establecimiento $175(100\text{ms})=17.5\text{s}$ de 250cm a 300cm , este resultado es debido a que el sistema se satura.

Figura 76 Tiempo de establecimiento 17.5s de 250cm a 300cm



Tiempo de establecimiento $240(100\text{ms})=24\text{s}$ de 300cm a 250cm

Figura 77 Tiempo de establecimiento 24s de 300cm a 250cm



Tiempo de establecimiento $240(100\text{ms})=24\text{s}$ de 250cm a 200cm

Figura 78 Tiempo de establecimiento 24s de 250cm a 200cm



Tiempo de establecimiento $250(100\text{ms})=25\text{s}$ de 200cm a 150cm

Figura 79 Tiempo de establecimiento 25s de 200cm a 150cm



Tiempo de establecimiento $260(100\text{ms})=26\text{s}$ de 150cm a 100cm

Figura 80 Tiempo de establecimiento 26s de 150cm a 100cm



Tiempo de establecimiento $325(100\text{ms})=32.5\text{s}$ de 100cm a 50cm

Figura 81 Tiempo de establecimiento 32.5s de 100cm a 50cm



Tiempo de establecimiento $625(100\text{ms})=62.5$ s de 50cm a 0cm , este resultado se debe a que no se tiene control en la descarga (solo depende de la gravedad)

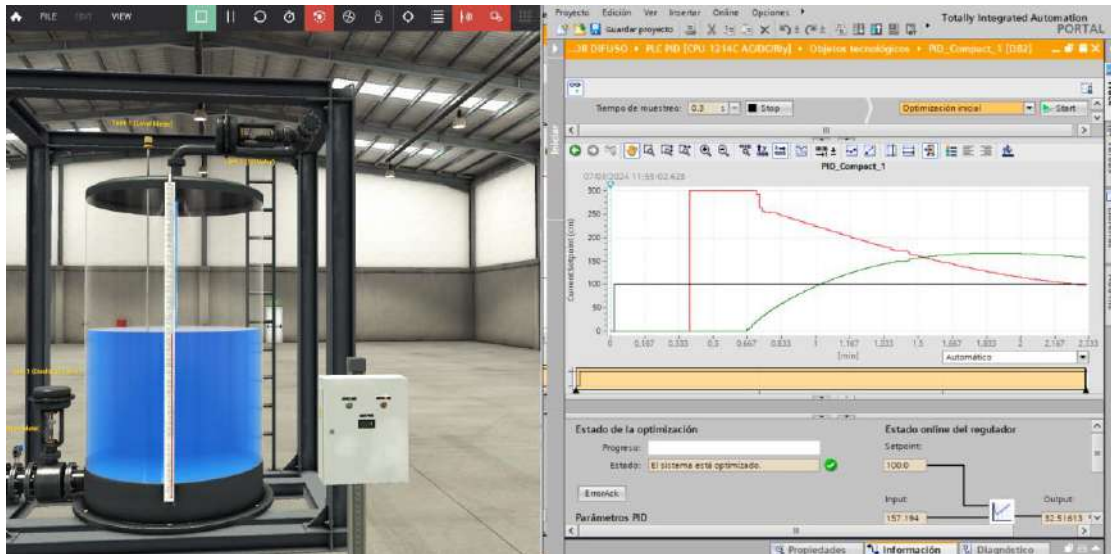
Figura 82 Tiempo de establecimiento 62.5 s de 50cm a 0cm



V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

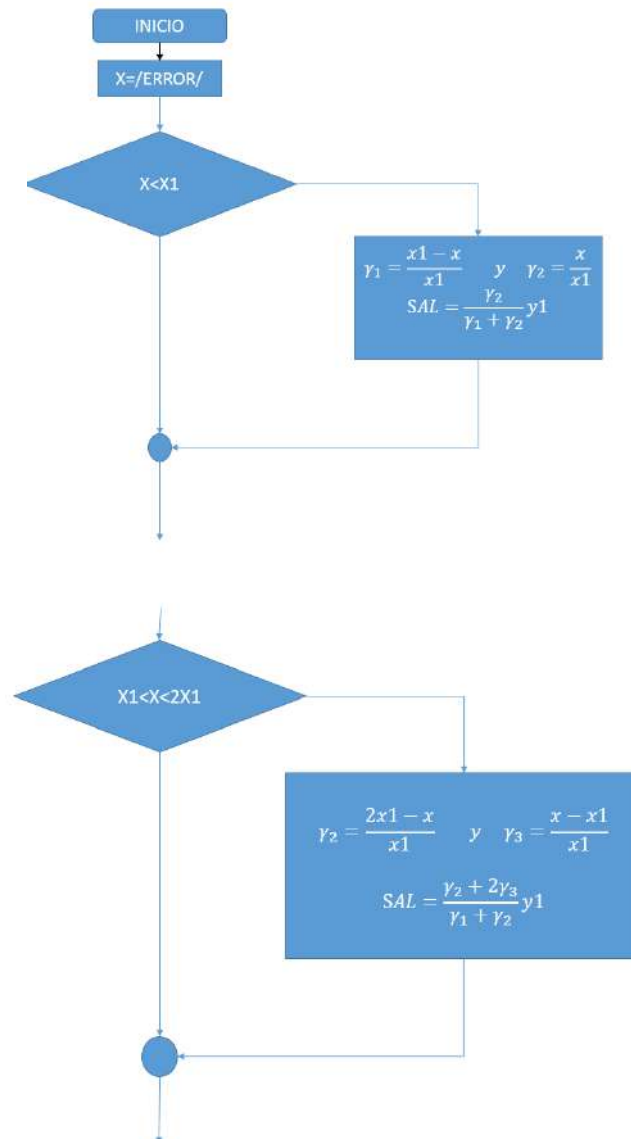
La aplicación y sintonización del controlador PID, se realizó en Factory IO y TIA Portal, con un setpoint 200 perturbacion 40%. Como se muestra en la figura 83.

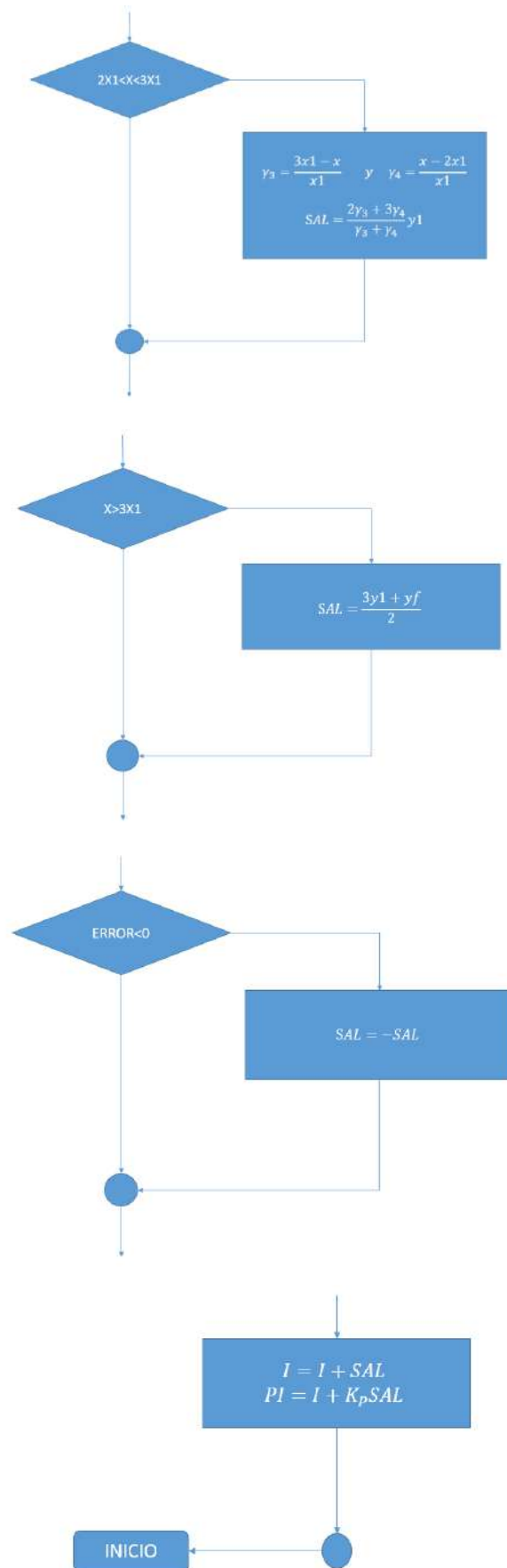
Figura 83 sintonía inicial del controlador en Factory IO y TIA Portal



Para el diseño del controlador Difuso, se utilizó un controlador Difuso de 7 zonas como se muestra en el siguiente diagrama de flujo.

Figura 84 diagrama de flujo del controlador Difuso





Para determinar cuál de los controladores tiene el mejor tiempo de establecimiento, se realizó el análisis estadístico.

PID	DIFUSO	L(cm)
22.5	22.5	0-50
22.5	22.5	50-100
22.5	22.5	100-150
25	22.5	150-200
25	22.5	200-250
20	17.5	250-300
27	24	300-250
27	24	250-200
27	25	200-150
36	26	150-100
44	32.5	100-50
66	62.5	50-0

\bar{x}	3.375
SD	3.67500773
%	0.1
t _{critico}	1.35621733
t	3.18131112
p	0.00395097

Como el $t > t_{\text{crítico}}$ los datos son diferentes, por lo tanto, existe una diferencia entre ellos, el controlador DIFUSO es más rápido que el controlador PID.

CONCLUSIONES

- Se realizó la sintonización del controlador PID para un control de nivel con un setpoint 200 perturbacion 40%, utilizando Factory IO y TIA Portal v17 implementado en un PLC S7-1200 AC/DC/RLY.
- Se realizó el diseño y sintonización del controlador difuso en 7 zonas.
- Se realizó la comparación los tiempos de establecimiento del controlador PID y Difuso, utilizando el método estadístico donde se observa que el mejor tiempo de establecimiento se da en un controlador difuso.
- Se realizó la sintonización del controlador PID para un control de nivel con un setpoint 200 perturbacion 40%, y para el controlador difuso se realizó en 7 zonas

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar el estudio del control, a través de otras variables del proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benjamin C. Kuo. (7ma edición). (1996). Sistemas de Control Automático. Prentice Hall Hispanoamericana S.A.
- Cristina, A. (2008). Estructuración de sistemas de control de eventos discretos en un plc aplicado a procesos híbridos. Instituto tecnológico y de estudios superiores de monterrey. Recuperado 20 de diciembre de 2019
- Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A. (1998). Feedback control of dynamic systems (3rd ed.) Addison-Wesley
- Katsuhiko Ogata. (2da edición). (1996). Sistemas de control en tiempo discreto Prentice Hall Hispanoamericana S.A.
- Katsuhiko Ogata. (5ta edición). (2010). Ingeniería de control moderna. Pearson Educación S.A.
- Karl, J. (2009). Control PID Avanzado. Editorial Pearson Educación S.A.
- Kuo. B,(1996). Sistemas de control Automático 7ma ed. Prentice-Hall
- Marín. A, López. J,Navas.A. (2016). Sintonización de un controlador PID implementado en un PLC haciendo uso de inteligencia de enjambres, Universidad Autónoma de occidente, Cali, Colombia.
- Ross, T. J. (2010). Fuzzy logic with engineering applications (3rd ed.). Wiley.
- Vargas, J. (2016). Diseño e implementación de un algoritmo de controlador PID para plataformas basadas en microcontroladores PIC. Universidad Privada Antenor Orrego – Trujillo – Perú, Recuperado 20 de diciembre de 2019.