

Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL, SISTEMAS E INFORMÁTICA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN CONTROLADOR PID DISCRETO
EN CONTROLADORES LOGICOS PROGRAMABLES
PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR:

Marisol Martina Gonzales Baldeón

ASESOR:

Ms. Ing. Oscar Miguel De La Cruz Rodríguez

CIP: 85598

HUACHO – PERÚ

2021

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN CONTROLADOR PID DISCRETO EN CONTROLADORES LOGICOS PROGRAMABLES

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%

INDICE DE SIMILITUD

17%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

7%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

| | | |
|---|---|----|
| 1 | repositorio.upao.edu.pe Fuente de Internet | 5% |
| 2 | repositorio.unjfsc.edu.pe Fuente de Internet | 4% |
| 3 | Submitted to Universidad Nacional Jose Faustino Sanchez Carrion Trabajo del estudiante | 2% |
| 4 | repositorio.cuc.edu.co Fuente de Internet | 1% |
| 5 | doaj.org Fuente de Internet | 1% |
| 6 | repositorio.uancv.edu.pe Fuente de Internet | 1% |
| 7 | Melvin Joel Morales Fuentes, Leda Mercedes Gale Torre, Raúl Edgardo Fernández Hernández. "Clasificación de Suelos de la Zona Noreste y Noroeste de San Pedro Sula", | 1% |

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN
CONTROLADOR PID DISCRETO EN
CONTROLADORES LOGICOS PROGRAMABLES**

MIEMBROS DEL JURADO Y ASESOR



PRESIDENTE
Ing. Juan Carlos de los Santos Garcia



**DELVIS BÉDER
MORALES ESCOBAR**
INGENIERO ELECTRÓNICO
Reg. CIP Nº 107505

SECRETARIO
Ing. Delvis Beder Morales Escobar



VOCAL
Ing. Ulises Robert Martínez Chafalote



Ms. Oscar Miguel De La Cruz Rodríguez
Ingeniero Electrónico
CIP 85598


ASESOR
Ms. Ing. Oscar M. De La Cruz Rodríguez

ASESOR Y TESISTA



Ms. Oscar Miguel De La Cruz Rodríguez
Ingeniero Electrónico
CIP 85598

ASESOR
Ms. Ing. Oscar M. De La Cruz Rodríguez



Firma

TESISTA
Bach. Marisol Martina Gonzales Baldeón

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación va dedicado a papá a mi esposo y mis dos hijos, Morgana y Jethro, esperando ser un paso más para nuestro futuro en metas y sueños

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi papá, esposo, profesores y hermanas por sus conocimientos, paciencia y dedicación que me han llevado a culminar mi trabajo de investigación que finaliza mi etapa universitaria.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|------|
| CARÁTULA..... | i |
| TÍTULO | ii |
| ASESOR Y MIEMBRO DEL JURADO..... | iii |
| DEDICATORIA | v |
| AGRADECIMIENTO | vi |
| ÍNDICE DE CONTENIDO | ix |
| ÍNDICE DE TABLAS | ix |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | x |
| RESUMEN | xiii |
| ABSTRACT..... | xiv |
| INTRODUCCIÓN | xv |
| CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 1 |
| 1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA | 1 |
| 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA | 2 |
| 1.2.1. PROBLEMA GENERAL | 2 |
| 1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS | 2 |
| 1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN | 2 |
| 1.3.1. OBJETIVO GENERAL | 2 |
| 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 3 |
| 1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN | 3 |
| 1.5. DELIMITACIONES DEL ESTUDIO..... | 3 |
| 1.6. VIABILIDAD DEL ESTUDIO | 3 |
| CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO | 4 |
| 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN..... | 4 |
| 2.2. BASES TEÓRICAS | 6 |
| 2.2.1. TRANSFORMADA Z | 6 |
| 2.2.2. TRANSFORMADA Z INVERSA | 7 |
| 2.2.3. MODELO DE CONTROLADOR PID CONTINUO | 8 |
| 2.3. DEFINICIONES CONCEPTUALES..... | 11 |
| 2.3.1. SISTEMAS DE CONTROL | 11 |
| 2.4. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS | 12 |

| | |
|--|----|
| 2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL..... | 12 |
| 2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS | 12 |
| 2.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES E INDICADORES | 12 |
| CAPÍTULO III: METODOLOGÍA | 14 |
| 3.1. DISEÑO METODOLÓGICO..... | 14 |
| 3.1.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN..... | 14 |
| 3.1.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN | 14 |
| 3.1.3. DISEÑO:..... | 14 |
| 3.1.4. ENFOQUE: | 14 |
| 3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA..... | 14 |
| 3.2.1. POBLACIÓN. CONTROLADOR SIEMENS..... | 14 |
| 3.2.2. MUESTRA. MODELO CPU S7-1200 | 14 |
| 3.3. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS | 15 |
| 3.3.1. TÉCNICAS A EMPLEAR | 15 |
| 3.3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS | 15 |
| 3.4. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN..... | 38 |
| 3.4.1. PID DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE | 38 |
| 3.4.2. PID DISCRETO | 39 |
| 3.4.3. SINTONÍA ANALÍTICA DEL PID. | 40 |
| CAPÍTULO IV: RESULTADOS | 43 |
| CAPÍTULO V: DISCUSIÓN | 46 |
| 5.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 46 |
| CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 49 |
| 6.1. CONCLUSIONES | 49 |
| 6.2. RECOMENDACIONES..... | 49 |
| CAPÍTULO VII: REFERENCIAS | 50 |
| 7.1. FUENTES BIBLIOGRÁFICAS..... | 50 |
| ANEXOS | 51 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| TABLA 1: VARIABLE 1 | 12 |
| TABLA 2: VARIABLE 2 | 13 |
| TABLA 3: CARACTERÍSTICAS DEL CONTROLADOR | 16 |
| TABLA 4: KP, KI Y KD CALCULADOS PARA EL PRIMER CIRCUITO | 21 |
| TABLA 5: PARÁMETROS OBTENIDOS DE LA SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR DEL SEGUNDO CIRCUITO | 22 |
| TABLA 6: KP, KI Y KD CALCULADOS PARA EL SEGUNDO CIRCUITO | 22 |
| TABLA 7: PARÁMETROS OBTENIDOS DE LA SINTONÍA DEL CONTROLADOR PARA EL TERCER CIRCUITO | 24 |
| TABLA 8: KP, KI Y KD CALCULADOS PARA EL TERCER CIRCUITO | 24 |
| TABLA 9: VALORES DEL CONTROLADOR VS EL PID DISCRETO RESPECTO AL PRIMER CIRCUITO | 28 |
| TABLA 10: VALORES DEL CONTROLADOR VS EL PID DISCRETO RESPECTO AL SEGUNDO CIRCUITO | 30 |
| TABLA 11: VALORES DEL CONTROLADOR VS EL PID DISCRETO RESPECTO AL TERCER CIRCUITO | 31 |
| TABLA 12: VALORES PARA UN TS=0.01 Y UN POLO EN 5.5 | 33 |
| TABLA 13: VALORES PARA UN TS=0.01 Y UN POLO EN 3.5 | 35 |
| TABLA 14: VALORES PARA UN TS=0.01 Y UN POLO EN 0.5 | 36 |
| TABLA 15: PARÁMETROS DEL CONTROLADOR PID DEL PLC | 38 |
| TABLA 16: PARÁMETROS DEL CONTROLADOR PID DISCRETO | 39 |
| TABLA 17: PARÁMETROS DEL CONTROLADOR PID CON SINTONÍA ANALÍTICA | 40 |
| TABLA 18: TIEMPO DE RESPUESTA CON LOS TRES CIRCUITOS | 45 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1: TRANSFORMADA DE LAPLACE, FUNCIÓN DEL TIEMPO Y TRANSFORMADA Z..... | 7 |
| FIGURA 2: DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN PID | 9 |
| FIGURA 3: CONTROLADOR SIMATIC S7-1200 | 15 |
| FIGURA 4: SELECCIÓN DEL CPU 1214 AC/DC/RLY | 16 |
| FIGURA 5: VARIABLES A UTILIZAR EN LA PROGRAMACIÓN DEL PID..... | 17 |
| FIGURA 6: CONFIGURACIÓN DEL PID | 17 |
| FIGURA 7: ELECCIÓN DE LA TENSIÓN COMO TIPO DE REGULACIÓN | 17 |
| FIGURA 8: AJUSTE DE ENTRADA Y SALIDA DEL CONTROLADOR | 18 |
| FIGURA 9: AJUSTES DEL VALOR REAL EN EL CONTROLADOR..... | 18 |
| FIGURA 10: AJUSTE DE LA ESCALA DEL VALOR REAL EN EL CONTROLADOR..... | 19 |
| FIGURA 11: SELECCIÓN DEL HMI KTP600 BASIC..... | 19 |
| FIGURA 12: CONFIGURACIÓN DEL HMI KTP600 BASIC..... | 19 |
| FIGURA 13: PRIMER CIRCUITO PARA SINTONIZAR AL PID | 20 |
| FIGURA 14: AJUSTE DE LOS PARÁMETROS PID DEL CONTROLADOR | 20 |
| FIGURA 15: RESPUESTA DEL CONTROLADOR CON RESPECTO AL PRIMER CIRCUITO | 21 |
| FIGURA 16: SEGUNDO CIRCUITO PARA SINTONIZAR AL PID | 22 |
| FIGURA 17: RESPUESTA DEL CONTROLADOR CON RESPECTO AL SEGUNDO CIRCUITO | 23 |
| FIGURA 18: TERCER CIRCUITO PARA SINTONIZAR AL PID | 23 |
| FIGURA 19: RESPUESTA DEL CONTROLADOR CON RESPECTO AL TERCER CIRCUITO | 24 |
| FIGURA 20: VARIABLES DEL PLC PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PID | 26 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 21: CONFIGURACIÓN DEL BLOQUE PRINCIPAL EN DIAGRAMA LADDER | 26 |
| FIGURA 22: PROGRAMACIÓN EN SCL | 27 |
| FIGURA 23: ASIGNACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN EL PANEL HMI | 27 |
| FIGURA 24: DISEÑO DEL PRIMER CIRCUITO | 28 |
| FIGURA 25: RESPUESTA DE LA SINTONÍA DEL CONTROLADOR DEL PRIMER CIRCUITO | 29 |
| FIGURA 26: DISEÑO DEL SEGUNDO CIRCUITO | 29 |
| FIGURA 27: RESPUESTA DE LA SINTONÍA DEL CONTROLADOR DEL SEGUNDO CIRCUITO..... | 30 |
| FIGURA 28: DISEÑO DEL TERCER CIRCUITO..... | 31 |
| FIGURA 29: RESPUESTA DE LA SINTONÍA DEL CONTROLADOR DEL TERCER CIRCUITO | 32 |
| FIGURA 30: PRIMER CIRCUITO RC PARA LA SINTONÍA ANALÍTICA | 33 |
| FIGURA 31: RESPUESTA DE LA SINTONÍA ANALÍTICA DEL PRIMER CIRCUITO | 34 |
| FIGURA 32: SEGUNDO CIRCUITO RC PARA LA SINTONÍA ANALÍTICA..... | 34 |
| FIGURA 33: RESPUESTA DE LA SINTONÍA ANALÍTICA DEL SEGUNDO CIRCUITO | 35 |
| FIGURA 34: TERCER CIRCUITO RC PARA LA SINTONÍA ANALÍTICA..... | 36 |
| FIGURA 35: RESPUESTA DE LA SINTONÍA ANALÍTICA DEL TERCER CIRCUITO | 37 |
| FIGURA 36: GRÁFICA DEL PID DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE..... | 38 |
| FIGURA 37: GRÁFICA DEL PID DISCRETO VS DATOS DEL CONTROLADOR | 39 |
| FIGURA 38: GRÁFICA DEL PID DISCRETO VS LA SINTONIZACIÓN ANALÍTICA | 40 |
| FIGURA 39: COMPARACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS K_P Y K_D | 41 |
| FIGURA 40: COMPARACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS K_P K_D Y T_{SKI} | 41 |
| FIGURA 41: COMPARACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS K_{DA} Y K_{DB} | 42 |
| FIGURA 42: COMPARACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DEL PID DISCRETO | 42 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 43: CONFIGURACIÓN DE LOS BLOQUES PARA EL PID | 44 |
| FIGURA 44: CÓDIGO EN SCL DEL PID DISCRETO..... | 44 |
| FIGURA 45: COMPARACIÓN ENTRE LOS TIEMPOS DE RESPUESTA DE CADA CIRCUITO..... | 45 |
| FIGURA 46: COMPARACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS $KPA+KDA$ Y $KPB+KDB$ | 47 |
| FIGURA 47: COMPARACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS $KPA+2KDA-TSKIA$ Y $KPB+2KDB-TSKIB$ | 47 |
| FIGURA 48: COMPARACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS KDA Y KDB | 48 |

RESUMEN

La investigación se centra en realizar el **“DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN CONTROLADOR PID DISCRETO EN CONTROLADORES LOGICOS PROGRAMABLES”**.

La discretización del controlador PID se realizó gracias a la aplicación de la transformada Z, la introducción del bloque de muestreo y el tiempo de retención de orden cero.

El diseño del controlador fue probado en tres plantas de primer orden y su implementación fue realizada en el software de simulación TIA Portal mediante el lenguaje SCL, con un muestreo de 10 ms y un bloque de interrupción cíclica.

El diseño es pre experimental y la investigación es de tipo aplicada.

Por último, los tiempos de respuesta se aproximan del controlador PID del Controlador Lógico Programable y el propuesto. El error fue de aproximadamente 9%.

Palabras Claves: PID, discreto, tiempo de respuesta.

ABSTRACT

The research is focused on carrying out the "DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A DISCREET PID CONTROLLER IN PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLERS".

The discretization of the PID controller was carried out thanks to the application of the Z transform, the introduction of the sampling block and the order zero retention time.

The controller design was tested in three first-order plants and its implementation was carried out in the TIA Portal simulation software using the SCL language, with a 10 ms sampling and a cyclical interrupt block.

The design is pre-experimental and the research is applied.

Lastly, the response times approximate the PID controller of the Programmable Logic Controller and the proposed one. The error was approximately 9%.

Keywords: PID, discreet, response time.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación titulado “**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN CONTROLADOR PID DISCRETO EN CONTROLADORES LOGICOS PROGRAMABLES**” es desarrollado para obtener el Título de Ingeniero Electrónico y constituye un documento original resultado de la investigación realizada por su autor.

La presente investigación tiene como objetivo aportar como conocimiento a los estudiantes de Ingeniería y al público en el área de control y automatización, lo que se busca es aumentar los lazos de control en los Controladores Lógicos Programables cuando se terminen, a través de la implementación de un PID discreto, con la finalidad de evitar comprar un módulo de expansión, que permita un lazo de control a través del bloque PID. En este sentido la presente investigación es realizada con la finalidad de conocer el tiempo de respuesta a través de la implementación de los controladores PID del PLC.

El objetivo en general es diseñar e implementar un controlador PID discreto para aumentar los lazos de control en los controladores lógicos programables.

Para el desarrollo de la presente investigación se requiere comprender de manera clara el lenguaje de programación SCL.

Finalmente, se eligió la Transformada Z como herramienta matemática para conseguir la discretización del controlador PID.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

Para Ogata (2003), el reto actual exigido por los sistemas industriales y recogido por la sociedad académico-científica la condiciona a la búsqueda obligada de actualizaciones en todas las especialidades insertos en el ámbito de la automatización. De esta manera, las instituciones de educación superior se han visto impulsadas a contar con laboratorios multidisciplinarios que ayuden a los alumnos en su desarrollo y posterior especialización en las diversas áreas de la ingeniería.

Asimismo, los dispositivos usados en la industria permiten controlar variables críticas de un proceso de automatización industrial. El primer aspecto importante de los sistemas de control automático es el de proporcionar un punto de referencia (fijo o programable) o también un rango de valores (igualmente fijo o programable), apropiados y en relación al punto de referencia antes descrito, con la finalidad de conseguir la máxima eficiencia en determinado proceso industrial, de esta forma alcanzar el máximo posible en la producción y minimizar costos; todo es gracias a que los lazos de control proporcionan un mejor aprovechamiento de las materias primas así como una reducción del uso de la energía en los procesos productivos.

Según Ogata (2003), el empleo del sistema de control PID tradicional clásico en procesos industriales es tan general, que por sí solo, evidencia la predilección de su uso cuando se trata de algoritmos simples de control.

Las más recientes gamas de controladores lógicos programables incorporan estructuras PID pensados para su empleo específico en la industria. Dentro de las firmas que más destacan en este ámbito se encuentran Siemens, Allen Bradley, ABB y Schneider, cuyos controladores lógicos programables ya llevan incorporados los bloques PID. Siemens, dentro su oferta de controladores lógicos de la serie S7, destaca el PLC 1200 modelo 1214C AC/DC/RLY, incluye bloques de control PID que posibilitan el control de hasta 16 lazos de control. En el caso que el sistema necesitara un añadido decimoséptimo lazo de control, se tendría que adicionar otro módulo de control con su

respectivo control PID, pero esta gama al no incorporar dichos módulos de control, condiciona a la compra de otro PLC e instalarlo en Red. Esta operación elevaría los costos, así como también el diseño y estrategia de control del proceso.

Marín (2016), describe sucintamente lo complejo y hasta extremadamente difícil que puede llegar a ser la elaboración de diseño y su posterior puesta en marcha de los bloques de control PID, e incluso el mismo controlador demanda una gran cantidad de recursos de procesamiento para su operatividad, por lo cual lo hace plausible de convertirse en poco funcional.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo el diseño e implementación de un controlador PID discreto, permitirá aumentar los lazos de control en un controlador lógico programable?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo el sistema de muestreo y tiempo de retención de orden cero permitirá discretizar el controlador PID?
- ¿Cómo el software TIA Portal permitirá determinar la cantidad de bloques?
- ¿Cómo la implementación del PID del controlador lógico programable permitirá determinar el tiempo de respuesta?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

- Diseñar e implementar un PID discreto para aumentar los lazos de control en un controlador lógico programable.

1.3.2. Objetivos específicos

- Discretizar el controlador PID a través del muestreo y tiempo de retención de orden cero.
- Determinar la cantidad de bloques a través del software TIA Portal.
- Determinar el tiempo de respuesta a través de la implementación del PID en el Controlador Lógico Programable.

1.4. Justificación de la investigación

- El presente trabajo permitirá elaborar una propuesta de solución a la implementación de un PID en los Controladores Lógicos Programables.
- Proveer un mayor número de lazos de control en previsión de una mayor demanda de los mismos en el caso de utilizar todos los PID que esta plataforma de siemens tiene inmersa.
- Diseño de sistemas de control de un PID utilizando el Controlador Lógico Programable de recurso limitado.

1.5. Delimitaciones del estudio

Se delimita a implementar un controlador discreto que posibilite aumentar los lazos de control cuando se terminen los PID del controlador.

1.6. Viabilidad del estudio

Es viable puesto que, para su implementación se cuenta con los recursos humanos, técnicos y económicos.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

(Duque, López, & Felipe, 2016). Investigación titulada “Sintonización de un controlador PID implementado en un PLC haciendo uso de inteligencia de Enjambres”. Artículo presentada por la Universidad Autónoma de Occidente.

En la investigación se muestra la implementación del controlador del fabricante Allen Bradley de un algoritmo de inteligencia de enjambres cuya función es determinar el modelo matemático de un sistema o proceso; con el modelo del sistema encontrado, se calculan los parámetros de un controlador PID que garantizan un comportamiento deseado del sistema. El algoritmo usado para encontrar el modelo matemático es una técnica de computación evolutiva conocida como optimización por enjambre de partículas. Para probar el funcionamiento del algoritmo implementado en el PLC, se realizaron simulaciones de sistemas dinámicos en el software Matlab, desde este software se estableció comunicación con el PLC. El PLC recibe la salida del sistema y, con esta información, encuentra un modelo del mismo, con el modelo encontrado sintoniza un controlador PID para, de esta manera, calcular la acción de control que enviará al sistema simulado en Matlab. Como estándar de comunicación industrial entre el PLC y Matlab se usó el OPC (OLE for Process Control). Lo anterior permitió vislumbrar la posibilidad de implementar el algoritmo propuesto en un ambiente industrial.

(Vargas, 2016) Investigación titulada “Diseño e Implementación de un algoritmo de controlador PID para plataformas basadas en microcontroladores PIC”. Tesis de pregrado presentada por la Universidad Privada Antenor Orrego.

En la investigación se logró diseñar e implementar un algoritmo de controlador PID para plataformas basadas en microcontrolador, este trabajo se realizó con el microcontrolador PIC16F88, pero el algoritmo se puede implementar en cualquier dispositivo programable, debido que el resultado del controlador PID a implementarse está basado en una ecuación en diferencias implementable en cualquier software con librería de operaciones matemáticas básicas. La simulación del controlador PID se desarrolló en el software Proteus. Según los resultados de las comparaciones del controlador Simulado en la herramienta Simulink de Matlab y los de las simulaciones, las respuestas se asemejan mucho de acuerdo a los errores porcentuales obtenidos para las 8 pruebas. La implementación del controlador PID en la plataforma basada en el PIC 16f88, se realizó de manera que los errores porcentuales obtenidos, con respecto al tiempo de muestreo y el sobre pico, de las respuestas de los controladores en la herramienta Simulink de Matlab son menores al 5% y comparándolas con las respuestas de los controladores simulados en Proteus se asemejan.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Transformada Z

La transformada Z es la herramienta de mayor uso para la síntesis y el análisis de sistemas de control del tipo de tiempo discreto. En los sistemas discretos, la transformada Z muestra similitudes con la transformada de Laplace, favoreciendo su análisis en tiempo continuo para el caso específico del controlador PID.

En efecto, en sistemas en tiempo discreto, la transformada Z es un método eficiente. Como ejemplo de la funcionalidad de esta herramienta se analizará a continuación el uso de la transformada Z en una función en el tiempo o de una serie numérica.

En cuanto a una función del tiempo $x(t)$, se considerara solo los valores seleccionados de $x(t)$, es decir: $x(0)$, $x(T)$, $x(2T)$,..., considerando como periodo de muestreo: T. Se asume t como positivo. Entonces la transformada Z de una función en el tiempo $x(t)$ o también de la secuencia de valores $x(kT)$ (se establece que k asume valores enteros positivos y de cero, siendo T el periodo de muestreo), es definida con la siguiente expresión matemática:

$$X(z) = Z[x(t)] = Z[x(kT)] = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT)z^{-k} \quad \text{ec. (10)}$$

La transformada Z unilateral (ec.10), por lo general y con respecto a los trabajos de ingeniería, tendrá una solución conveniente y hasta idónea, en forma cerrada en su región de convergencia, es decir, dentro de ciertos límites.

En el caso en el que $X(z)$, una serie infinita de términos en z^{-1} , converge fuera del círculo $|z| = R$, (donde R se entiende como el radio de convergencia absoluta), se observa que no hace falta precisar cuáles son los valores de z para los cuales converge $X(z)$. Podemos ver entonces como resultado de la ecuación 10, lo siguiente:

$$X(z) = x(0) + x(T)z^{-1} + x(2T)z^{-2} + \dots + x(kT)z^{-k} + \dots \quad \text{ec. (11)}$$

| Transformada de Laplace | Función del tiempo $f(t)$ | Transformada z |
|--|--|---|
| 1 | Impulso unitario $\delta(t)$ | 1 |
| $\frac{1}{s}$ | Escalón unitario $u_t(t)$ | $\frac{z}{z-1}$ |
| $\frac{1}{1-e^{-Ts}}$ | $\delta_T(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t-nT)$ | $\frac{z}{z-1}$ |
| $\frac{1}{s^2}$ | t | $\frac{Tz}{(z-1)^2}$ |
| $\frac{1}{s^3}$ | $\frac{t^2}{2}$ | $\frac{T^2z(z+1)}{2(z-1)^3}$ |
| $\frac{1}{s^{n+1}}$ | $\frac{t^n}{n!}$ | $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{(-1)^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial \alpha^n} \left[\frac{z}{z-e^{-\alpha T}} \right]$ |
| $\frac{1}{s+\alpha}$ | $e^{-\alpha t}$ | $\frac{z}{z-e^{-\alpha T}}$ |
| $\frac{1}{(s+\alpha)^2}$ | $te^{-\alpha t}$ | $\frac{Tze^{-\alpha T}}{(z-e^{-\alpha T})^2}$ |
| $\frac{\alpha}{s(s+\alpha)}$ | $1 - e^{-\alpha t}$ | $\frac{(1-e^{-\alpha T})z}{(z-1)(z-e^{-\alpha T})}$ |
| $\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$ | $\text{sen } \omega t$ | $\frac{z \text{sen } \omega T}{z^2 - 2z \cos \omega T + 1}$ |
| $\frac{\omega}{(s+\alpha)^2+\omega^2}$ | $e^{-\alpha t} \text{sen } \omega t$ | $\frac{ze^{-\alpha T} \text{sen } \omega T}{z^2 - 2ze^{-\alpha T} \cos \omega T + e^{-2\alpha T}}$ |
| $\frac{s}{s^2+\omega^2}$ | $\text{cos } \omega t$ | $\frac{z(z - \text{cos } \omega T)}{z^2 - 2z \cos \omega T + 1}$ |
| $\frac{s+\alpha}{(s+\alpha)^2+\omega^2}$ | $e^{-\alpha t} \text{cos } \omega t$ | $\frac{z^2 - ze^{-\alpha T} \text{cos } \omega T}{z^2 - 2ze^{-\alpha T} \text{cos } \omega T + e^{-2\alpha T}}$ |

2.2.2. Transformada Z inversa

Quizá de las más valiosas utilidades que presenta la Transformada Z, podemos distinguir el óptimo análisis que esta realiza dentro de los sistemas lineales de tipo discreto. Dentro de este contexto, es usual que sea indispensable la búsqueda de las transformaciones Z de las sucesiones y luego su adecuación en forma de estos mismos guarismos, para conseguir la transformada Z inversa.

Es sin embargo necesario aclarar que, aunque se pueden emplear tanto métodos formales o informales para calcular la transformada inversa, es imprescindible acotar la región de convergencia.

Se define la anotación siguiente como referencia a la transformada Z inversa: Z^{-1} . Por otro lado, cuando se requiera definir la transformada Z inversa de una función cualquiera $X[Z]$, se asignará la notación $X[k]$ como referencia a la secuencia que se obtiene como resultado.

Para obtener la transformada Z inversa encontramos los siguientes métodos:

- ✓ Expansión en fracciones parciales.
- ✓ División Directa.
- ✓ Integral de inversión.
- ✓ Computacional.

2.2.3. Modelo de controlador PID continuo

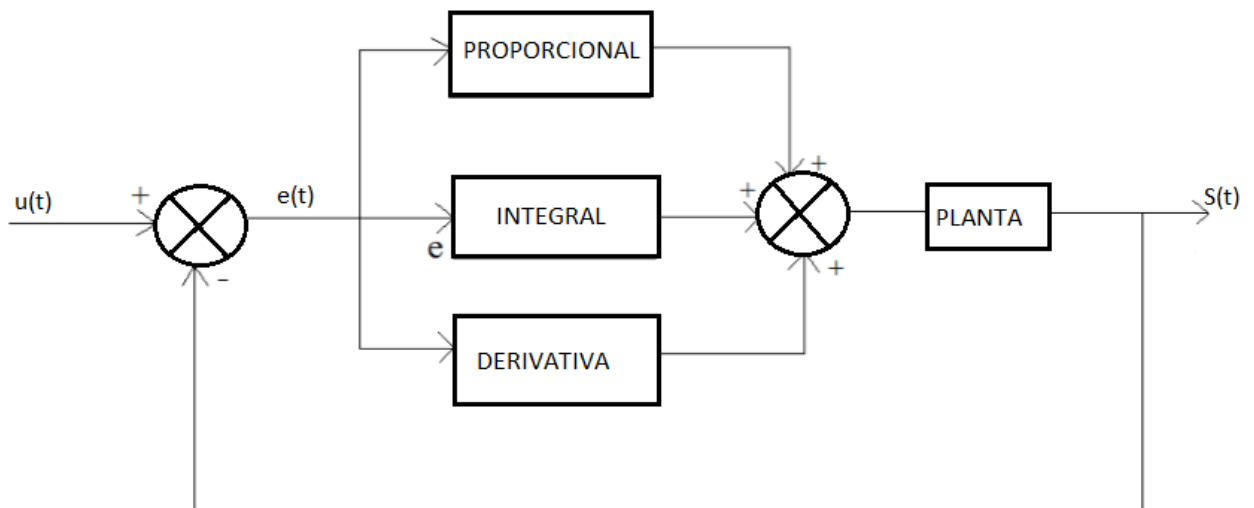
El PID suministra una señal al proceso, que es una combinación proporcional, integral y derivada de la señal de actuación, expresándose en el tiempo de la siguiente manera:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + \frac{de(t)}{dt} \right) \quad \text{ec. (1)}$$

Donde:

u = señal
e = error

Por tanto, la señal de control es el resultado de adicionar tres términos (observar figura 2). El término P o Proporcional (que es obviamente, directamente proporcional al error), el término I o Integral (que es proporcional a la integral del error), y el término D o Derivativo (que es proporcional a la derivada del error).



Acción proporcional

Cuando consideramos tan solo una acción proporcional, la expresión matemática que describe la ley de control es la siguiente:

$$u(t) = K_p e(t) \quad \text{ec. (2)}$$

Esta ecuación representa la relación existente entre la señal de error y la salida del controlador. Aplicando la transformada de Laplace, esta misma relación se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad \text{ec. (3)}$$

La constante K_p , que es la misma de la ec (2) y la ec (3), se denomina ganancia proporcional.

Resumiendo, el controlador Proporcional es un amplificador que tiene ganancia ajustable, independientemente de cuál sea la aplicación real o la potencia asociada a la operación.

Acción integral

Cuando la razón de cambio del valor de la salida del controlador $u(t)$ respecto del tiempo en un control integral resulta proporcional a la señal de error $e(t)$.

Expresado matemáticamente como,

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad ec. (4)$$

O también

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad ec. (5)$$

Se observa que el valor de K_i es una constante graduable. Aplicando la función de transferencia a este controlador integral se obtiene:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad ec. (6)$$

Acción derivativa

En una acción derivativa lo primordial es conseguir mayor estabilidad en lazo cerrado. En estas circunstancias y respecto a las características dinámicas del proceso mismo, se asume que el mecanismo de inestabilidad tomara un tiempo determinado antes de pueda ser detectado un cambio en la variable de salida del proceso.

Este evento provoca como consecuencia que el sistema de control tarde en corregir un error en la actuación de un controlador proporcional.

$$u(t) = K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad ec. (7)$$

Para obtener la función de transferencia respectiva, se aplica la Transformada de Laplace a la ecuación 7:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_d s \quad ec. (8)$$

Una vez finalizado el desarrollo en detalle de las actuaciones de control proporcional, integral y derivativo, podemos obtener la función de transferencia del PID:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K \left(1 + \frac{1}{sT_i} + T_d s \right) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad ec. (9)$$

2.3. Definiciones conceptuales

2.3.1. Sistemas de control

(Valdivia, 2012), delinea el concepto teórico de un sistema de control, como sigue: “Está conformado por un conjunto de componentes capaces de regular su propio comportamiento o la de otro sistema, con el fin de lograr un funcionamiento previamente establecido”. Roman circunscribe también su operatividad cuando determina que este depende de la adquisición de información mediante elementos sensores como pueden ser, de nivel, flujo, presión, etc.). Finalmente concluye como consecuencia directa de estas mediciones, que el sistema control ordena ejecutar la acción necesaria que permita conseguir el resultado deseado.

(Dorf, 2005), considera dentro de un sistema de control a los siguientes elementos principales:

- **Planta:** Se considera cualquier elemento físico a ser controlado.
- **Proceso:** Operación o desarrollo natural y continuo marcado por cambios controlados que conducirán al resultado deseado.
- **Entrada:** Es la estimulación u orden dirigida a un sistema de control.
- **Salida:** Reacción real obtenida del sistema.
- **Perturbación:** Identificado también como señal de error. Por lo general su acción tiene un efecto negativo o substractivo al valor obtenido en la salida del sistema. Por esta razón, siempre se busca disminuir o controlar esta señal.
- **Variable controlada:** Esta señal es la que se busca determinar o si no es posible, mantenerla bajo control. Suele ser también, la misma salida del sistema.
- **Variable manipulada:** Variable que es susceptible a cambios y modificaciones para lograr el resultado que se espera de la variable controlada.

2.4. Formulación de la hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

¿El diseño e implementación de un controlador PID discreto permitirá incrementar el número de lazos de control en un controlador lógico programable?

2.4.2. Hipótesis Específicas

El sistema de muestreo y tiempo de retención de orden cero determina la discretización del controlador PID.

El software TIA Portal determina la cantidad de bloques del controlador.

La implementación del PID del Controlador Lógico Programable determina el tiempo de respuesta.

2.5. Operacionalización de variables e indicadores

Tabla 1

Variable Independiente

| VARIABLE | DEFINICION CONCEPTUAL | INDICADORES | TÉCNICA | INSTRUMENTO |
|---------------------------------------|---|---|--------------------------------|---|
| Diseño de un controlador PID Discreto | Mecanismo de control simultáneo por realimentación ampliamente usado en sistemas de control industrial. | Grado de la ecuación. Número de retardos en el tiempo. | Observación Observación | Reporte de diseño. Reporte de diseño |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2

Variable Dependiente

| VARIABLE | DEFINICION CONCEPTUAL | INDICADORES | TÉCNICA | INSTRUMENTO |
|------------------|--|----------------------------|----------------|--------------------|
| Lazos de control | Control en lazo cerrado de una variable. | Número de lazos de control | Observación | Reporte simulación |
| | | Orden del proceso | Observación | Reporte simulación |

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Diseño Metodológico

3.1.1. Tipo de investigación

Aplicada: A partir de conocimientos establecidos se dará solución a un problema planteado

3.1.2. Nivel de investigación

Aplicativo: Tiene como finalidad solucionar un problema.

3.1.3. Diseño:

Pre experimental: Se analiza una sola variable y el grado de control es mínimo.



O₁: Planta de primer orden.

X: El controlador PID discreto

O₂: Tiempo de respuesta

3.1.4. Enfoque:

Cuantitativo: Se recogen y analizan los datos sobre las variables.

3.2. Población y Muestra

3.2.1. Población. Controlador SIEMENS

3.2.2. Muestra. S7-1200 CPU 1214 AC/DC/RLY

3.3. Técnicas de recolección de datos

3.3.1. Técnicas a emplear

➤ Simulación:

Permite recrear situaciones o establecer la factibilidad de un experimento.

➤ Observación:

Consiste en apreciar fenómenos o hechos con la finalidad de obtener información para la investigación.

3.3.2. Descripción de los instrumentos

Controlador Lógico Programable: Se utilizará un controlador de marca SIEMENS modelo S7-1200. Como se aprecia en la figura 3, se eligió este modelo debido a que se realizan procesos simples. En la tabla 3 se registra las características del controlador.



Figura 1: Controlador SIMATIC S7-1200
Fuente: <https://w5.siemens.com>

Tabla 3

Características del controlador

| Características CPU | Datos |
|------------------------|----------------|
| CPU | 1200-CPU121 4 |
| | AC/DC/RLY |
| Memoria de Programa | 75 KB |
| Temperatura de trabajo | -20°C a + 60°C |
| Tipo de alimentación | AC |
| Grado de protección | IP20 |
| Número de lazos PID | 16 |
| Auto sintonía para PID | Si |

Fuente: <https://w5.siemens.com>

Sintonización, programación y configuración del PID del PLC

En la figura 4, se realiza la selección del controlador SIMATIC S7-1200.

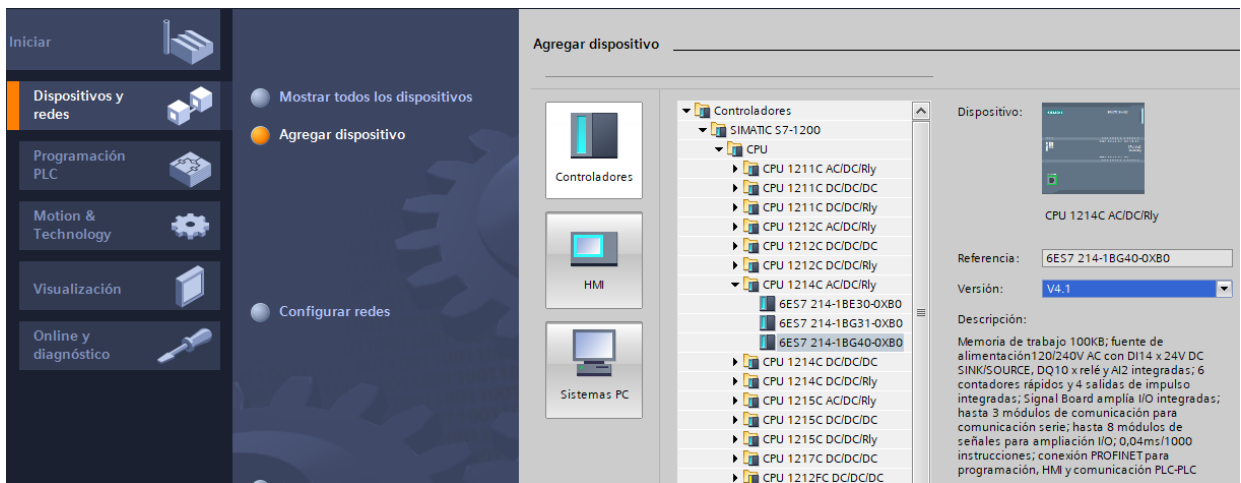


Figura 2: Selección del CPU 1214 AC/DC/RLY

Fuente: Elaboración propia

En la figura 5, se asigna el nombre de las variables utilizadas en la programación del PID.

| Variables PLC | | | | | | | | |
|---------------|--------|------------------------|---------------|-----------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | Nombre | Tabla de variables | Tipo de datos | Dirección | Rema... | Acces... | Escrib... | Visibl... |
| 1 | SALIDA | Tabla de variables e.. | Int | %QW80 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 2 | VP | Tabla de variables e.. | Int | %IW64 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 3 | SP | Tabla de variabl... | Real | %MD10 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |

Figura 3: Variables a utilizar en la programación del PID
Fuente: Elaboración propia

La figura 6, muestra el bloque de interrupción cíclica para un muestreo de 10 ms

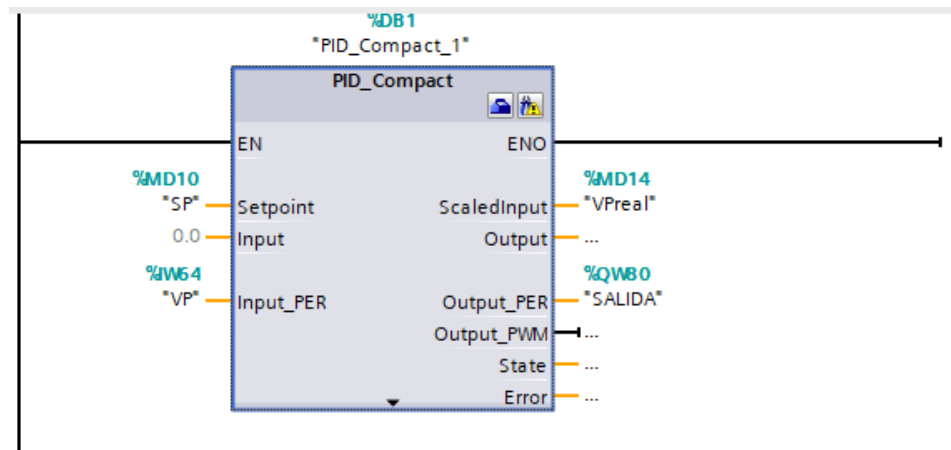


Figura 4: Configuración del PID
Fuente: Elaboración propia

La figura 7, muestra el tipo de regulación. La selección es por tensión, esto debido a que la planta es un circuito RC.

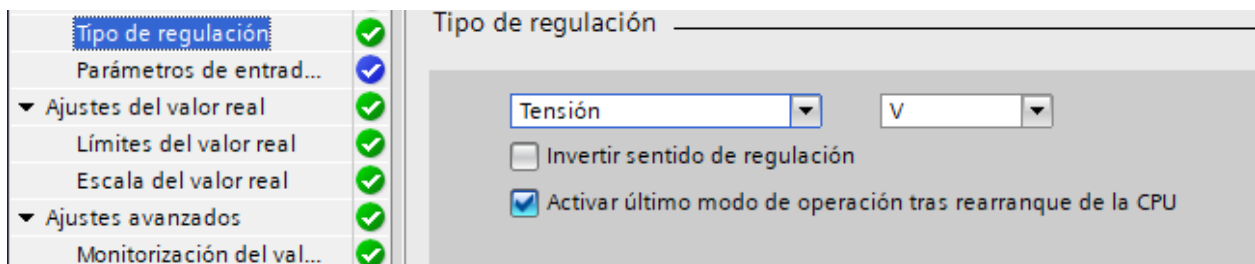


Figura 5: Elección de la tensión como tipo de regulación
Elaboración propia

La figura 8, muestra la configuración del controlador a través de los periféricos.

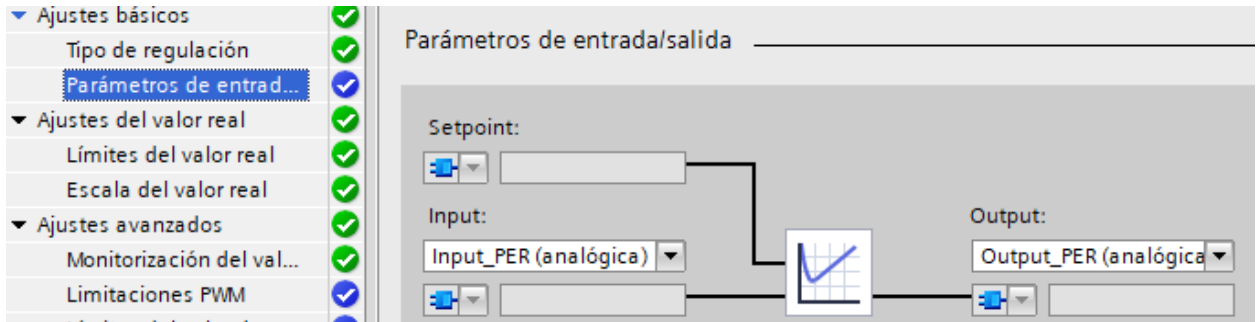


Figura 6: Ajuste de entrada y salida del Controlador
Fuente: Elaboración propia

En la figura 9, muestra los niveles de regulación en la salida que serán de 0 a 10 V.

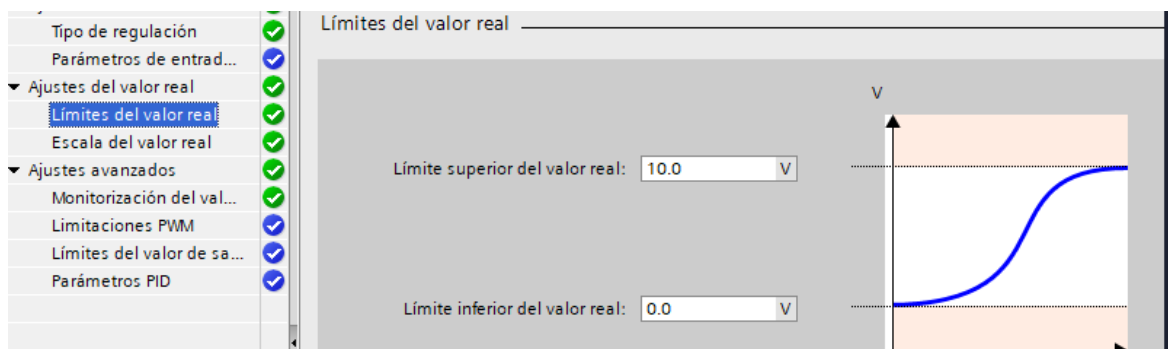
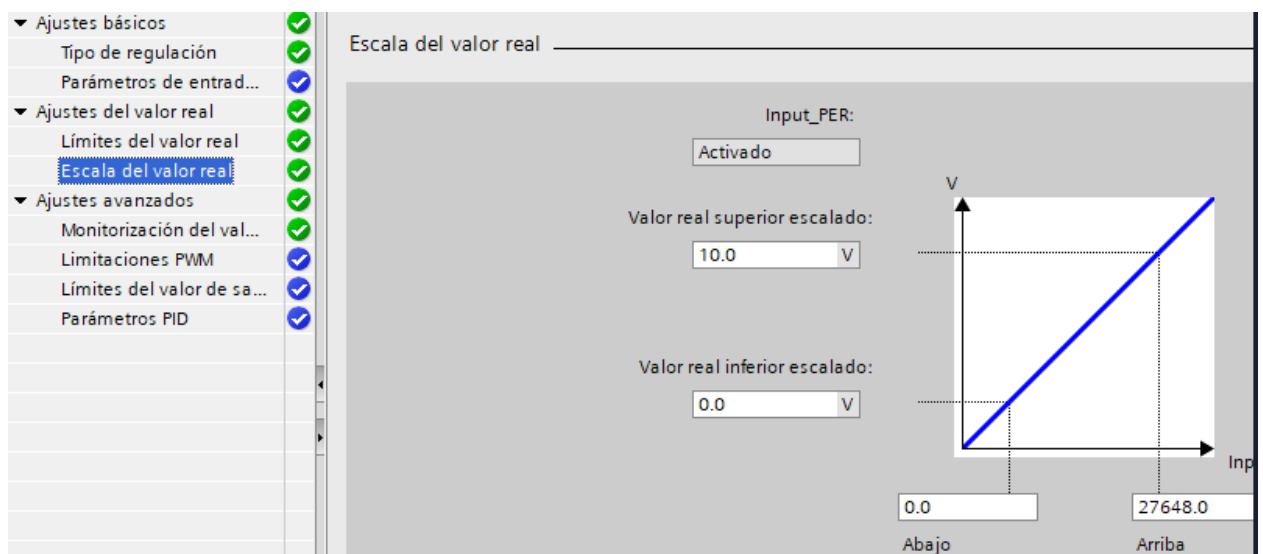


Figura 7: Ajustes del valor real en el controlador
Fuente: Elaboración propia

La figura 10 muestra la entrada periférica de la escala de valor real del controlador.



La figura 11 muestra la selección del modelo de HMI

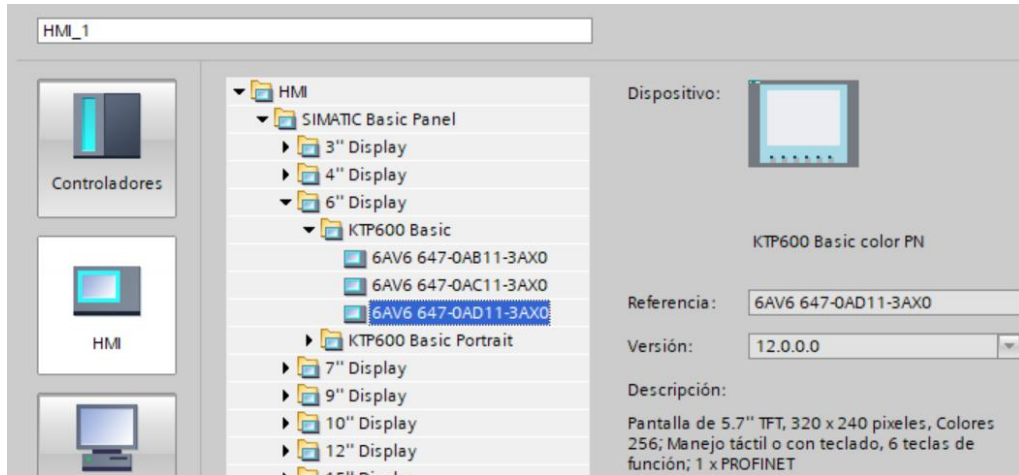


Figura 8: Ajuste de la escala del valor real en el controlador

Figura 9: Selección del HMI KTP600 Basic

Fuente: Elaboración propia

La figura 12 muestra la configuración del panel HMI

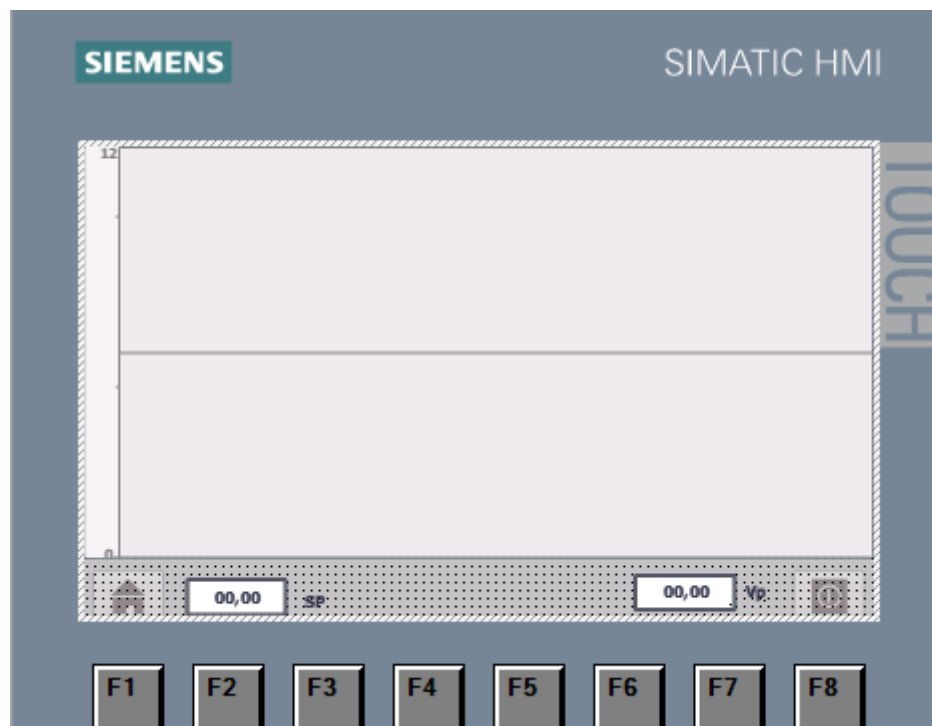


Figura 10: Configuración del HMI KTP600 Basic

Fuente: Elaboración propia

Sintonía del PID

La figura 13 muestra el primer circuito para lograr la sintonía del controlador PID.

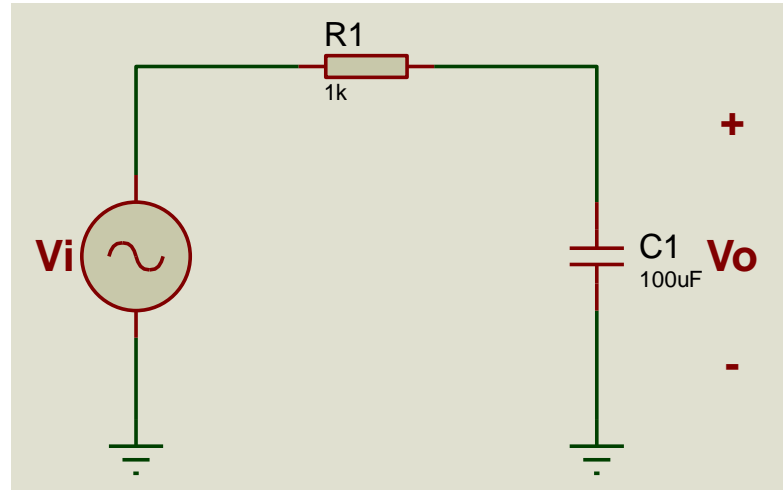


Figura 11: Primer circuito para sintonizar al PID
Fuente: Elaboración propia

Tenemos como resultado:

$$Vo(s) = Vi(s) \frac{\frac{1}{sC}}{R + \frac{1}{sC}} = Vi(s) \frac{1}{RSC + 1}$$

$$\frac{Vo(s)}{Vi(s)} = \frac{\frac{1}{RC}}{s + \frac{1}{RC}} = \frac{10}{s + 10}$$

La figura 14, muestra el ajuste de los parámetros PID para determinar el Kp, Ki y Kd.

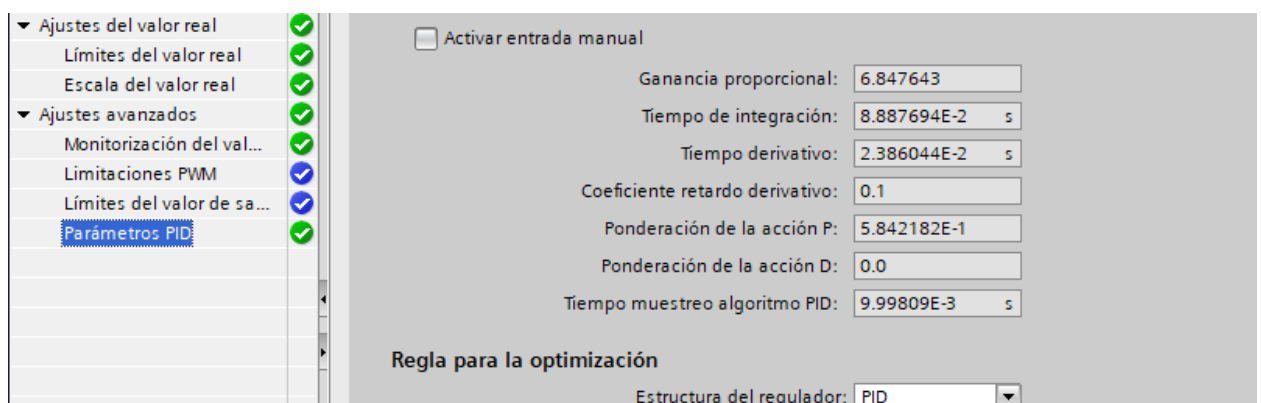


Figura 12: Ajuste de los parámetros PID del controlador
Fuente: Elaboración propia

El siguiente procedimiento es determinar el K_p , K_i y K_d .

$$K_p = (\text{Ganancia proporcional}) (\text{ponderacion de la accion } P)$$

$$K_i = \frac{(\text{Ganancia proporcional})}{(\text{Tiempo de Integracion})}$$

$$K_d = (\text{Ganancia proporcional}) (\text{Tiempo derivativo})$$

Tabla 4

K_p , K_i y K_d calculados para el primer circuito

| K_p | K_i | K_d |
|-------|--------|-------|
| 3.875 | 79.935 | 0.147 |

Fuente: Elaboración propia

La figura 15 muestra la respuesta del controlador con los valores obtenidos del primer circuito

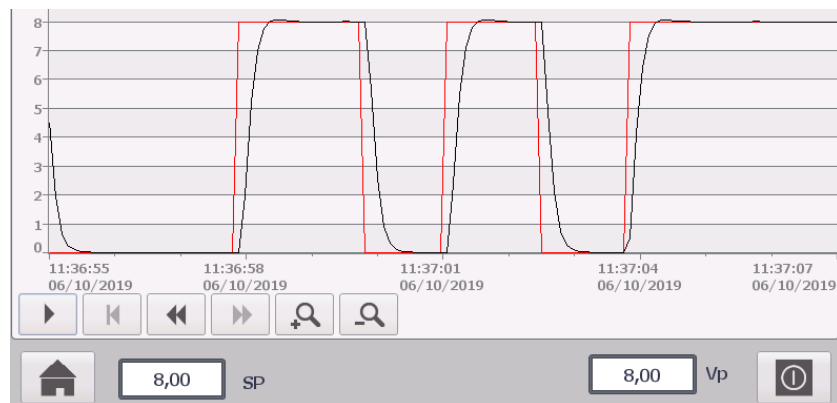


Figura 13: Respuesta del controlador con respecto al primer circuito
Fuente: Elaboración propia

Tiempo de respuesta respecto al primer circuito: 1s.

La figura 16 muestra el segundo circuito para lograr la sintonía del controlador PID.

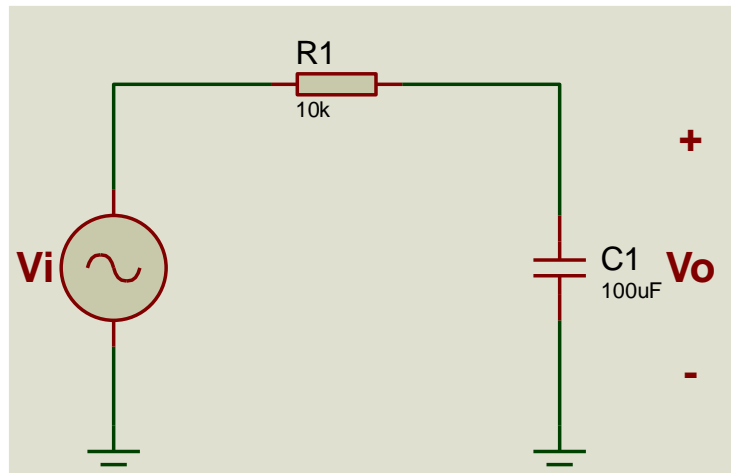


Figura 14: Segundo circuito para sintonizar al PID
Fuente: Elaboración propia

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{\frac{1}{RC}}{s + \frac{1}{RC}} = \frac{1}{s + 1}$$

Tabla 5

Parámetros obtenidos de la sintonización del controlador del segundo circuito

| | |
|--------------------|---------|
| Ganancia = | 111.637 |
| Ponderación = | 0.259 |
| Tiempo Integral= | 0.150 |
| Tiempo derivativo= | 0.038 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6

Kp, Ki Y Kd calculados para el segundo circuito

| Kp | Ki | Kd |
|--------|---------|-------|
| 28.934 | 741.195 | 4.250 |

Fuente: Elaboración propia

La figura 17 muestra la respuesta del controlador con los valores obtenidos del segundo circuito.

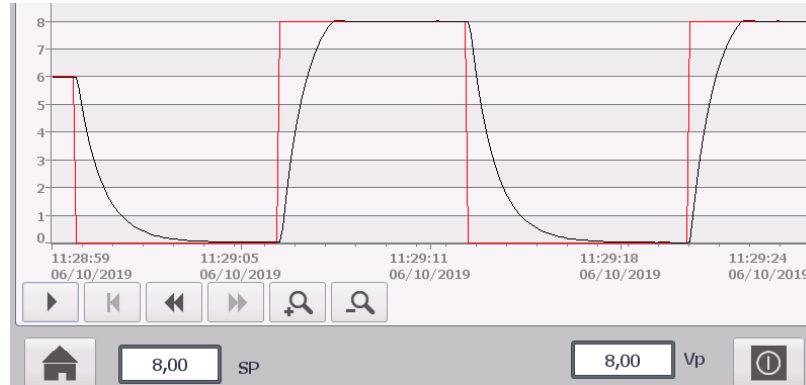


Figura 15: Respuesta del controlador con respecto al segundo circuito

Fuente: Elaboración propia

Tiempo de respuesta respecto al segundo circuito: 2s.

La figura 18 muestra el tercer circuito para lograr la sintonía del controlador PID.

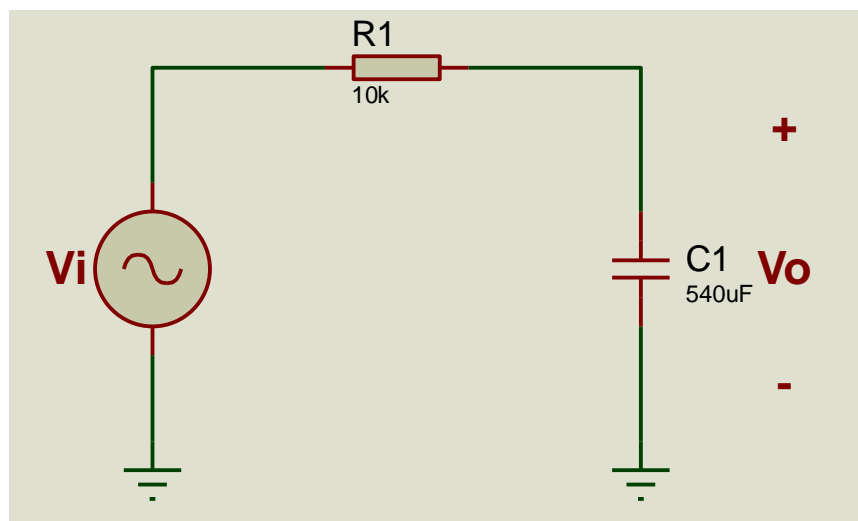


Figura 16: Tercer circuito para sintonizar al PID

Fuente: Elaboración propia

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{\frac{1}{RC}}{s + \frac{1}{RC}} = \frac{0.185}{s + 0.185}$$

Tabla 7

Parámetros obtenidos de la Sintonía del Controlador para el tercer circuito

| | |
|---------------------------|---------|
| Ganancia Proporcional= | 728.378 |
| Ponderación Proporcional= | 0.254 |
| Tiempo Integral= | 0.160 |
| Tiempo derivativo= | 0.041 |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 8

Kp, Ki y Kd calculados para el tercer circuito

| Kp | Ki | Kd |
|---------|----------|--------|
| 185.185 | 4544.524 | 29.595 |

Fuente: Elaboración propia

La figura 19 muestra la respuesta del controlador con los valores obtenidos del tercer circuito.

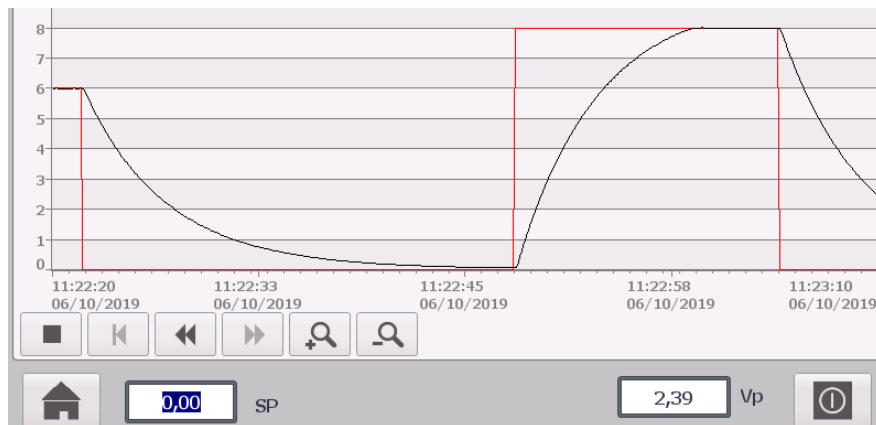


Figura 17: Respuesta del controlador con respecto al tercer circuito

Fuente: Elaboración propia

Tiempo de respuesta respecto al tercer circuito: 11s.

Diseño del controlador PID discreto

Para un elemento discreto, se tiene:

$$H_0(S) = \frac{1 - e^{-ST_s}}{S}$$

De esta manera, la discretización del controlador PID será:

$$\frac{PID(S)}{Error(S)} = \left(\frac{1 - e^{-ST_s}}{S} \right) \left(kp + \frac{ki}{S} + Skd \right)$$

$$\frac{PID(Z)}{Error(Z)} = (1 - z^{-1})Z \left\{ \frac{kp + \frac{ki}{S} + Skd}{S} \right\}$$

$$\frac{PID(Z)}{Error(Z)} = (1 - z^{-1})Z \left\{ \frac{kp}{S} + \frac{ki}{S^2} + kd \right\}$$

$$\frac{PID(Z)}{Error(Z)} = \frac{kp(1 - z^{-1}) + z^{-1}ki T_s Z + kd(1 - z^{-1})^2}{(1 - z^{-1})}$$

$$PID(Z)(1 - z^{-1}) = Error(Z)[kp(1 - z^{-1}) + z^{-1}ki T_s Z + kd(1 - z^{-1})^2]$$

$$PID(k) = PID(k - 1) + Error(k)[kp + kd] - Error(k - 1)[kp + 2kd - ki T_s] \\ + Error(k - 2)kd$$

La figura 20, muestra la asignación variables en TIA Portal.

| Variables PLC | | | | | | | | | |
|---------------|-------------|---------------|---------------|-----------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| | Nombre | Variables | Tipo de datos | Dirección | Rema... | Acces... | Escrib... | Visibl... | |
| 1 | AUX 1 | variables e.. | Real | %MD10 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 2 | AUX 2 | variables e.. | Real | %MD14 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 3 | SP | variables e.. | Real | %MD18 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 4 | VP | variables e.. | Real | %MD22 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 5 | PID(K) | variables e.. | Real | %MD26 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 6 | PID(K-1) | variables e.. | Real | %MD30 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 7 | PID(K-2) | variables e.. | Real | %MD34 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 8 | ERROR(K) | variables e.. | Real | %MD38 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 9 | ERROR(K-1) | variables e.. | Real | %MD42 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 10 | ERROR(K-2) | variables e.. | Real | %MD46 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 11 | KP+KD | variables e.. | Real | %MD50 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 12 | KP+2KD-TsKI | variables e.. | Real | %MD54 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 13 | KD | variables e.. | Real | %MD58 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 14 | ENTRADA | variables e.. | Int | %IW64 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 15 | SALIDA | variables e.. | Int | %QW80 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |

Figura 18: Variables del PLC para la implementación del PID
Fuente: Elaboración propia

La programación se realizó en dos bloques (principal y de interrupción cíclica con un muestreo de 10 ms).

La figura 22 representa la implementación del bloque principal.

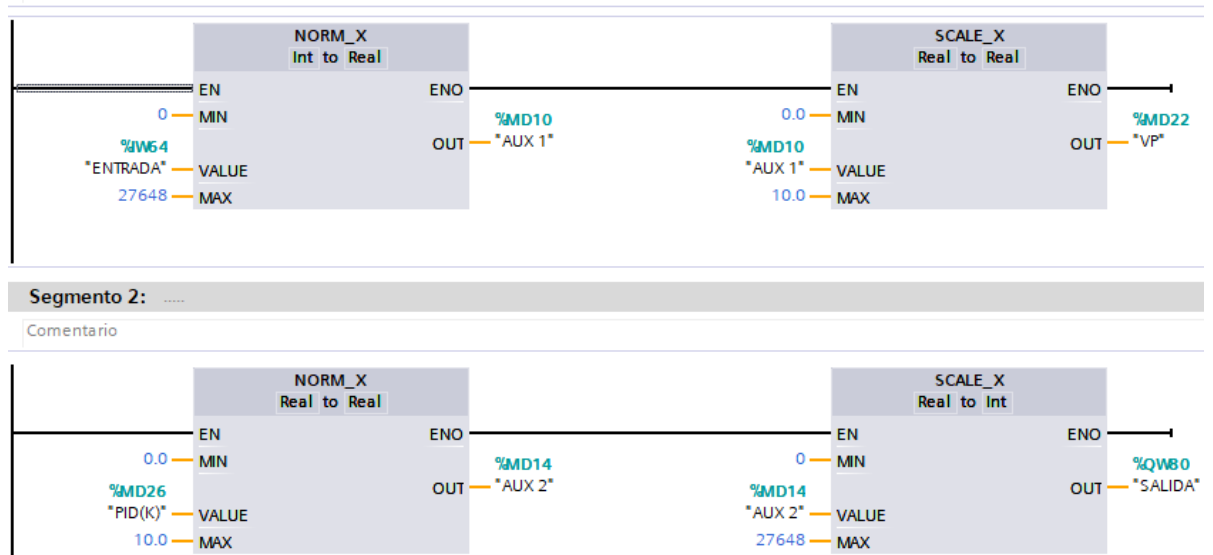


Figura 19: Configuración del bloque principal en diagrama LADDER
Fuente: Elaboración propia

El PID discreto se desarrolla en el bloque de interrupción cíclica, para que la variable PID (K) no se desborde, las condicionales deben estar en el siguiente margen:

$$0 \leq PID(K) \leq 10$$

```

PID DISCRETO ▶ PLC_1 [CPU 1214C AC/DC/Rly] ▶ Bloques de programa ▶ Cyclic interrupt [OB30]
Interfaz de bloque
IF... CASE... FOR... WHILE... (*..*) REGION
1 "ERROR(K-2)" := "ERROR(K-1)";
2 "ERROR(K-1)" := "ERROR(K)";
3 "ERROR(K)" := "SP" - "VP";
4 "PID(K-1)" := "PID(K)";
5 "PID(K)" := "PID(K-1)" + "KP+KD" * "ERROR(K)" - "KP+2KD-TsKI" * "ERROR(K-1)" + "KD" * "ERROR(K-2)";
6 IF "PID(K)">10 THEN
7 // Statement section IF
8 "PID(K)" := 10 ;
9 END_IF;
10 IF "PID(K)"<0 THEN
11 // Statement section IF
12 "PID(K)" := 0;
13 END_IF;

```

Figura 20: Programación en SCL
Fuente: Elaboración propia

En la figura 23, se realiza la configuración del Set Point y los parámetros del controlador PID discreto.

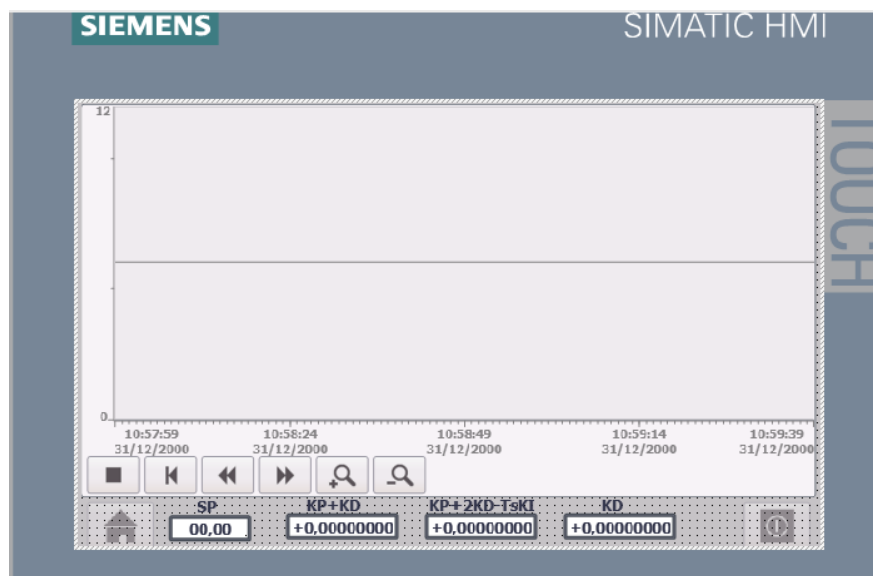


Figura 21: Asignación de los parámetros en el panel HMI
Fuente: Elaboración propia

Diseño e Implementación del primer circuito.

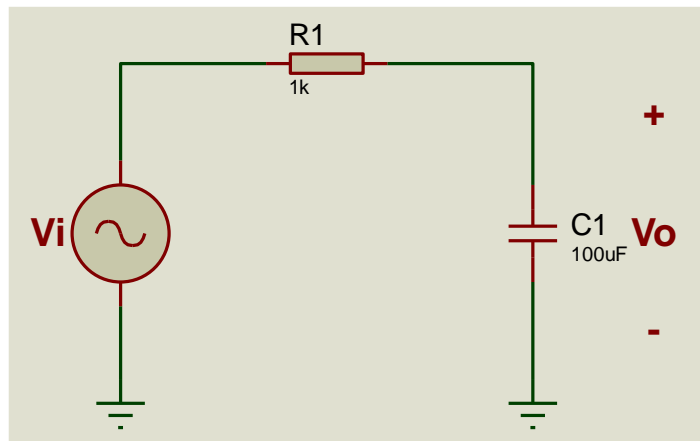


Figura 22: Diseño del primer circuito
Fuente: Elaboración propia

$$\frac{Vo(s)}{Vi(s)} = \frac{10}{s + 10}$$

En la tabla 9, se puede apreciar que los valores para el PID discreto, son obtenidos a partir de los datos del PID del PLC.

Tabla 9

Valores del PID del controlador vs el PID discreto respecto al primer circuito

| PID DEL PLC | PID DISCRETO |
|-------------|-------------------|
| Kp=3.875 | Ts=0.01 |
| Ki=79.934 | kp+kd=4.023 |
| Kd=0.147 | kp+2kd-Tski=3.371 |
| | kd =0.147 |

Fuente: Elaboración propia

Con los datos de la tabla 9, se obtiene la siguiente gráfica como resultado del PID.

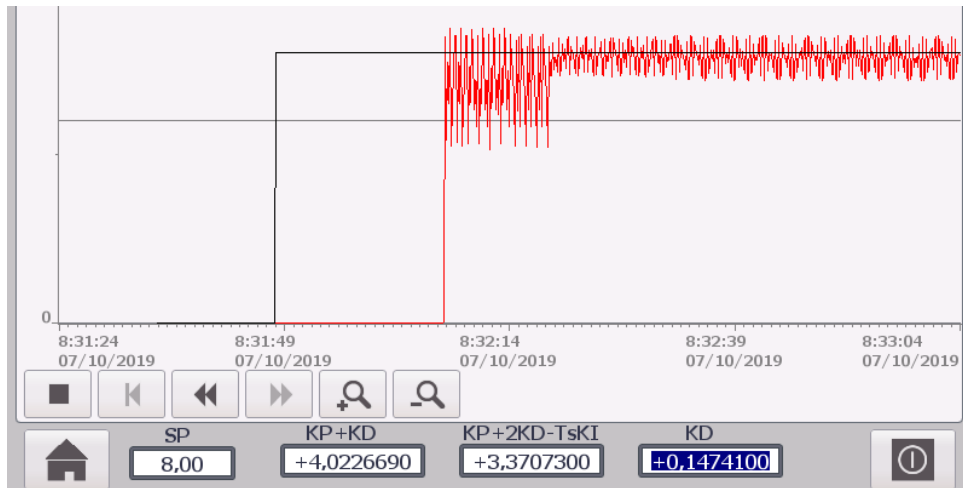


Figura 23: Respuesta de la sintonía del controlador del primer circuito
Fuente: Elaboración propia

En la figura 25, se aprecia que el controlador PID discreto no se comporta como el PID del PLC

Diseño e Implementación del segundo circuito.

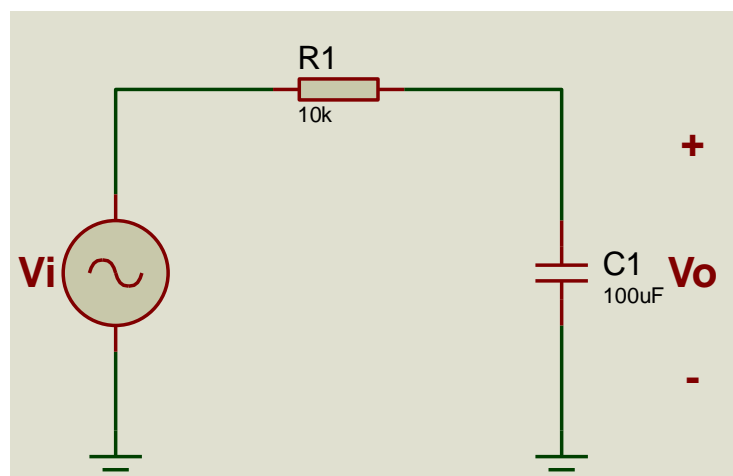


Figura 24: Diseño del segundo circuito
Fuente: Elaboración propia

$$\frac{Vo(s)}{Vi(s)} = \frac{1}{S + 1}$$

Usando los valores obtenidos del PID del PLC se tiene los datos para el PID discreto.

En la tabla 10, se puede apreciar que los valores para el PID discreto, son obtenidos a partir de los datos del PID del PLC.

Tabla 10

Valores del PID del controlador vs el PID discreto respecto al segundo circuito

| PID DEL PLC | PID DISCRETO |
|---------------|---------------------------|
| $K_p=28.934$ | $T_s=0.01$ |
| $K_i=741.195$ | $k_p+k_d=33.184$ |
| $K_d=4.250$ | $k_p+2k_d-T_s k_i=30.022$ |
| | $k_d =4.250$ |

Fuente: Elaboración propia

Con los datos de la tabla 10, se obtiene la siguiente gráfica como resultado del PID.

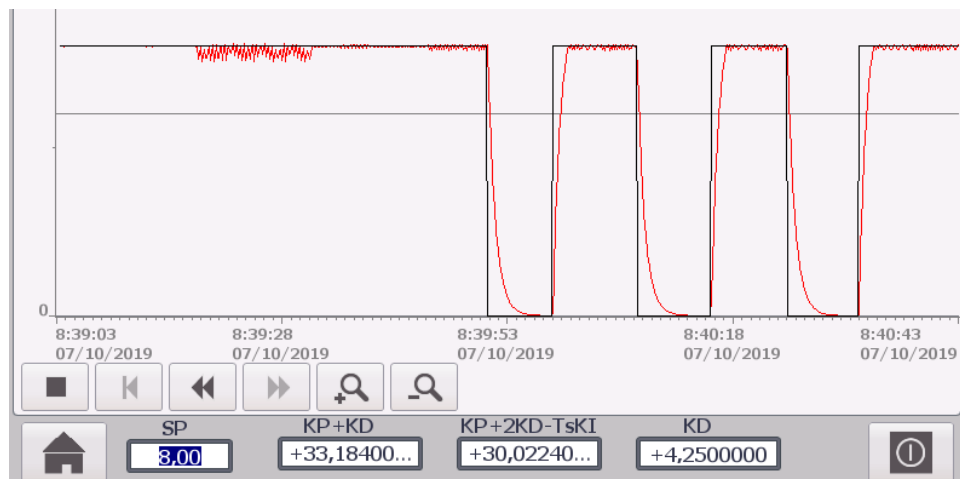


Figura 25: Respuesta de la sintonía del controlador del segundo circuito

Fuente: Elaboración propia

En la figura 27, se puede observar un tiempo de respuesta de 2 s.

Implementación del tercer circuito

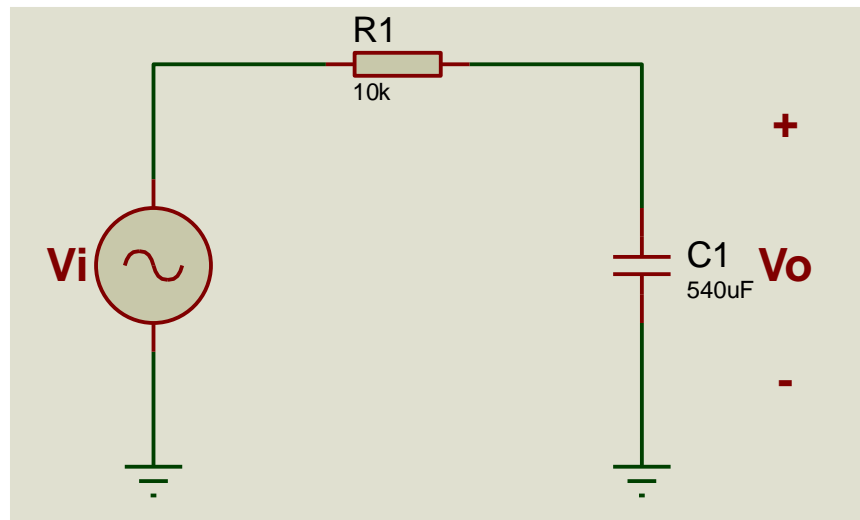


Figura 26: Diseño del tercer circuito
Fuente: Elaboración propia

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{0.185}{s + 0.185}$$

En la tabla 11, se puede apreciar que los valores para el PID discreto, son obtenidos a partir de los datos del PID del PLC.

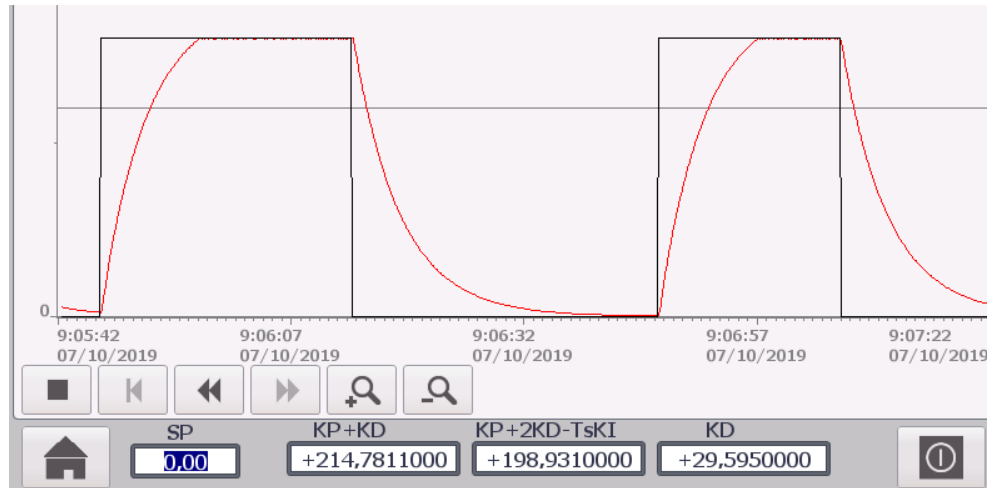
Tabla 11

Valores del PID del controlador vs el PID discreto respecto al tercer circuito

| PID DEL PLC | PID DISCRETO |
|-------------|----------------------|
| Kp=185.188 | Ts=0.01 |
| Ki=4544.52 | kp+kd=214.781 |
| Kd=29.595 | kp+2kd-Ts ki=198.931 |
| | kd =29.595 |

Fuente: Elaboración propia

Con los datos de la tabla 10, se obtiene la siguiente gráfica como resultado del PID.



*Figura 27: Respuesta de la sintonía del controlador del tercer circuito
Fuente: Elaboración propia*

En la figura 29, se puede observar un tiempo de respuesta de 12 s.

Sintonía Analítica

Para una planta de primer orden.

$$1 + \left(kp + \frac{ki}{s} \right) \left(\frac{b}{s+a} \right) = 0 \Rightarrow s(s+a) + b(kps + ki) = 0$$

$$s^2 + as + kpbs + bki = 0 \Rightarrow s^2 + s(a + bkp) + bki = 0$$

$$s = -\left(\frac{a + bkp}{2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{a + bkp}{2} \right)^2 - bki}$$

$$\frac{a + bkp}{2} > nb \Rightarrow kp > \frac{2nb - a}{b}$$

$$ki > \left(\frac{a + bkp}{2} \right)^2 \frac{1}{b}$$

$$T_s < \frac{2}{10(a + b k_p)}$$

$$\frac{PID(s)}{ERROR(s)} = k_p + \frac{k_i}{s} \Leftrightarrow \frac{PID(z)}{ERROR(z)} = (1 - z^{-1}) Z \left\{ \frac{k_p}{s} + \frac{k_i}{s^2} \right\}$$

$$\frac{PID(z)}{ERROR(z)} = (1 - z^{-1}) \left[\frac{k_p}{1 - z^{-1}} + \frac{k_i T_s z^{-1}}{(1 - z^{-1})^2} \right] = \frac{(1 - z^{-1}) k_p + k_i T_s z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$

$$\frac{PID(z)}{ERROR(z)} = \frac{k_p - z^{-1}(k_p - k_i T_s)}{1 - z^{-1}}$$

$$PID(k) = PID(k-1) + k_p ERROR(k) - (k_p - k_i T_s) ERROR(k-1)$$

Sintonía Analítica del primer circuito

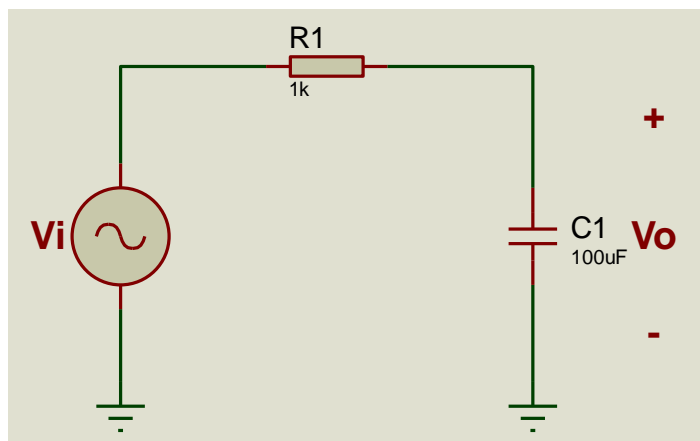


Figura 28: Primer circuito RC para la sintonía analítica
Fuente: Elaboración propia

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{10}{s + 10}$$

$$a = b = 10$$

para un polo en 5.5 se tiene que $k_p = 0.1$ y $k_i > 3.025$ por lo tanto $k_i = 3.03$

Tabla 12

Valores para un $T_s=0.01$ y un polo en 5.5

| DATOS DEL PID |
|---------------------|
| $k_p=0.1$ |
| $k_p-k_i T_s=0.069$ |

Fuente: Elaboración propia

En la figura 31, se puede observar la respuesta de la sintonía analítica del controlador con los datos obtenidos de la tabla 12.

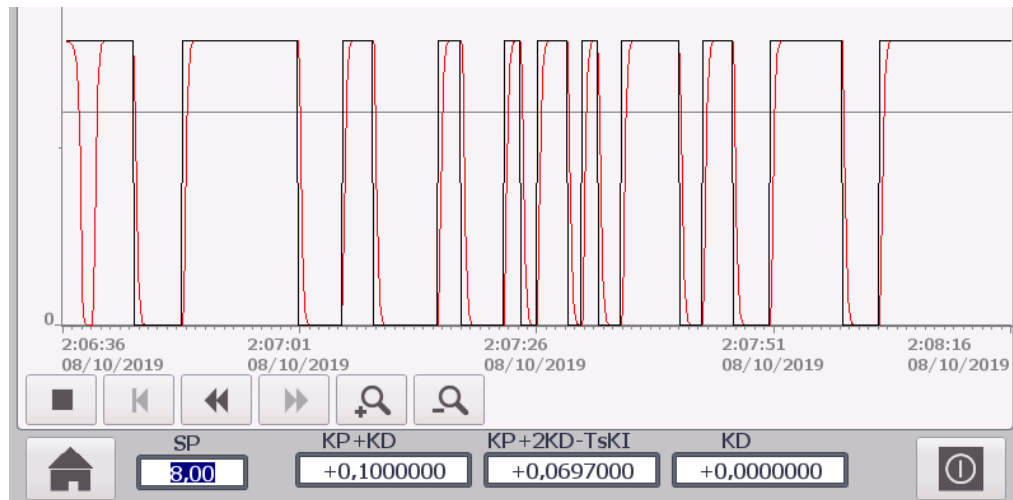


Figura 29: Respuesta de la sintonía analítica del primer circuito
Fuente: Elaboración propia

En la figura 31, se puede observar un tiempo de respuesta de 1s.

Sintonía Analítica del segundo circuito

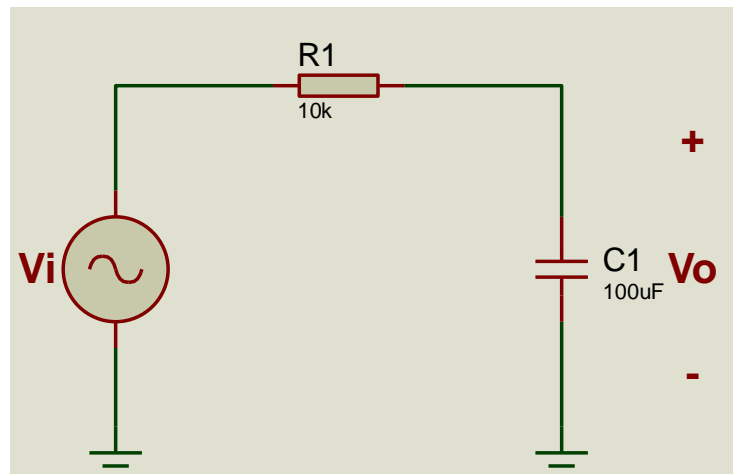


Figura 30: Segundo circuito RC para la sintonía analítica
Fuente: Elaboración propia

$$\frac{Vo(s)}{Vi(s)} = \frac{1}{s + 1}$$

$$a = b = 1$$

para un polo en 3.5 se tiene que $k_p = 2$ y $k_i > 2.25$ por lo tanto $k_i = 2.3$

Tabla 13

Valores para un $T_s=0.01$ y un polo en 3.5

| DATOS DEL PID |
|--------------------|
| $k_p=6$ |
| $k_p-k_iT_s=5.877$ |

Fuente: Elaboración propia

En la figura 33, se puede observar la respuesta de la sintonía analítica del controlador con los datos obtenidos de la tabla 13.

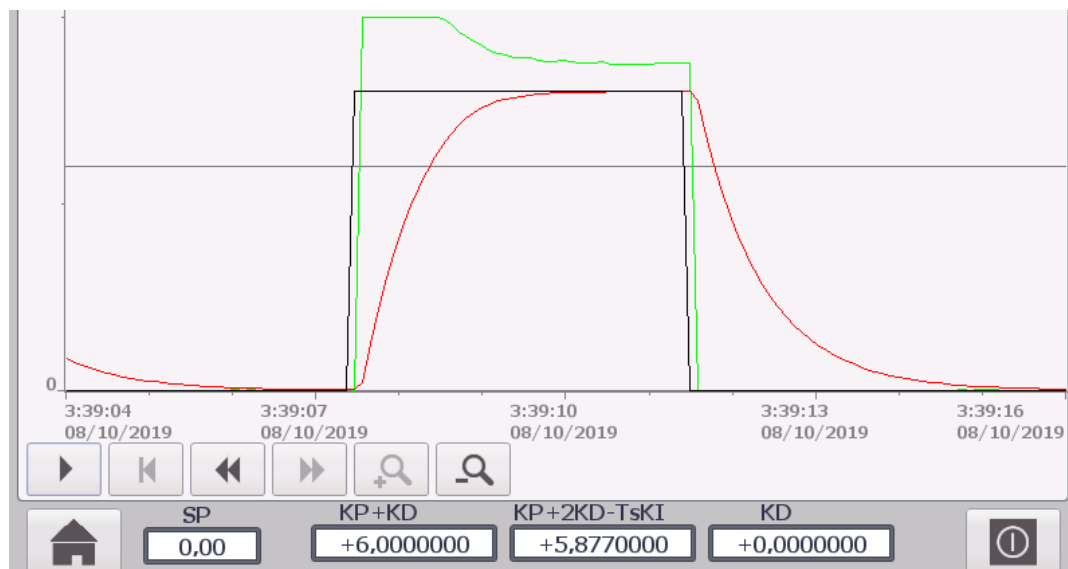


Figura 31: Respuesta de la sintonía analítica del segundo circuito

Fuente: Elaboración propia

En la figura 33, se puede observar un tiempo de respuesta de 2 s.

Sintonía Analítica del tercer circuito

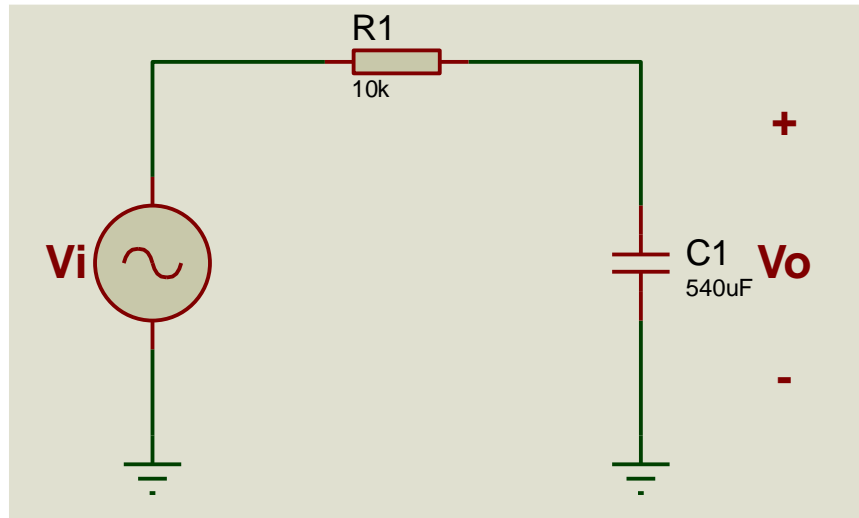


Figura 32: Tercer circuito RC para la sintonía analítica
Fuente: Elaboración propia

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{0.185}{s + 0.185}$$

$$a = b = 0.185$$

para un polo en 0.50875 se tiene que $k_p = 4.5$ y $k_i > 1.39$ por lo tanto $k_i = 1.4$

Tabla 14

Valores para un $T_s=0.01$ y un polo en 0.5

| DATOS DEL PID |
|--------------------|
| $k_p=4.5$ |
| $k_p-k_iT_s=4.486$ |

Fuente: Elaboración propia

En la figura 35, se puede observar la respuesta de la sintonía analítica del controlador con los datos obtenidos de la tabla 14.

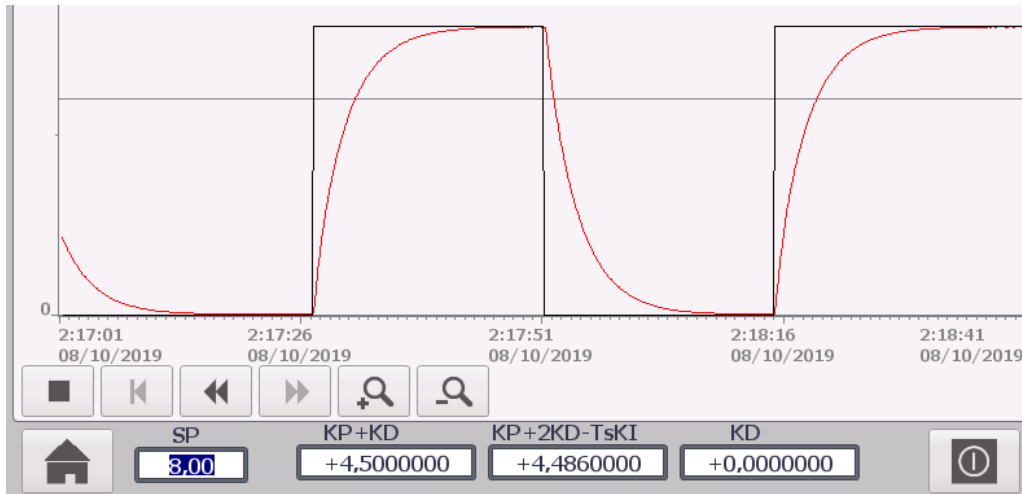


Figura 33: Respuesta de la sintonía analítica del tercer circuito

Fuente: Elaboración propia

En la figura 35, se puede observar un tiempo de respuesta de 11 s.

3.4. Técnicas para el procesamiento de la información

3.4.1. PID del Controlador Lógico Programable

La tabla 15 muestra los parámetros K_p , K_i , K_d y T_{resp} . del PID del controlador lógico programable.

Tabla 15
Parámetros del controlador PID del PLC

| k_p | k_i | k_d | T_{resp} |
|---------|----------|--------|------------|
| 3.875 | 79.935 | 0.147 | 1 |
| 28.934 | 741.195 | 4.250 | 2 |
| 185.186 | 4544.525 | 29.595 | 11 |

Fuente: Elaboración propia

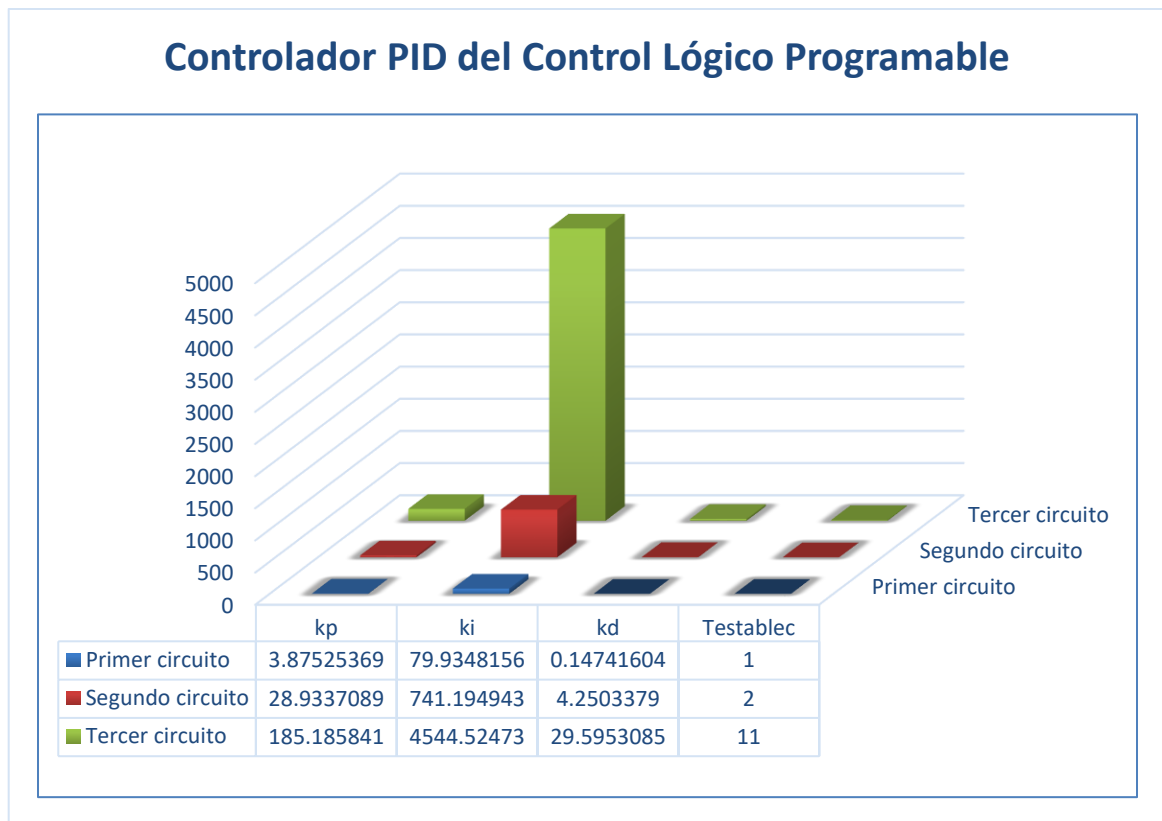


Figura 34: Gráfica del PID del controlador lógico programable
Fuente: Elaboración propia

3.4.2. PID discreto

La tabla 16 muestra los valores de los parámetros KPA+KDA, kpa+2kda-Tskia , kda y Tresp. del PID discreto.

Tabla 16
Parámetros del controlador PID discreto

| KPA+KDA | kpa+2kda-Tskia | kda | Tresp |
|---------|----------------|--------|-------|
| 4.023 | 3.371 | 0.147 | 0 |
| 33.184 | 30.022 | 4.250 | 2 |
| 214.781 | 198.931 | 29.595 | 12 |

Fuente: Elaboración Propia

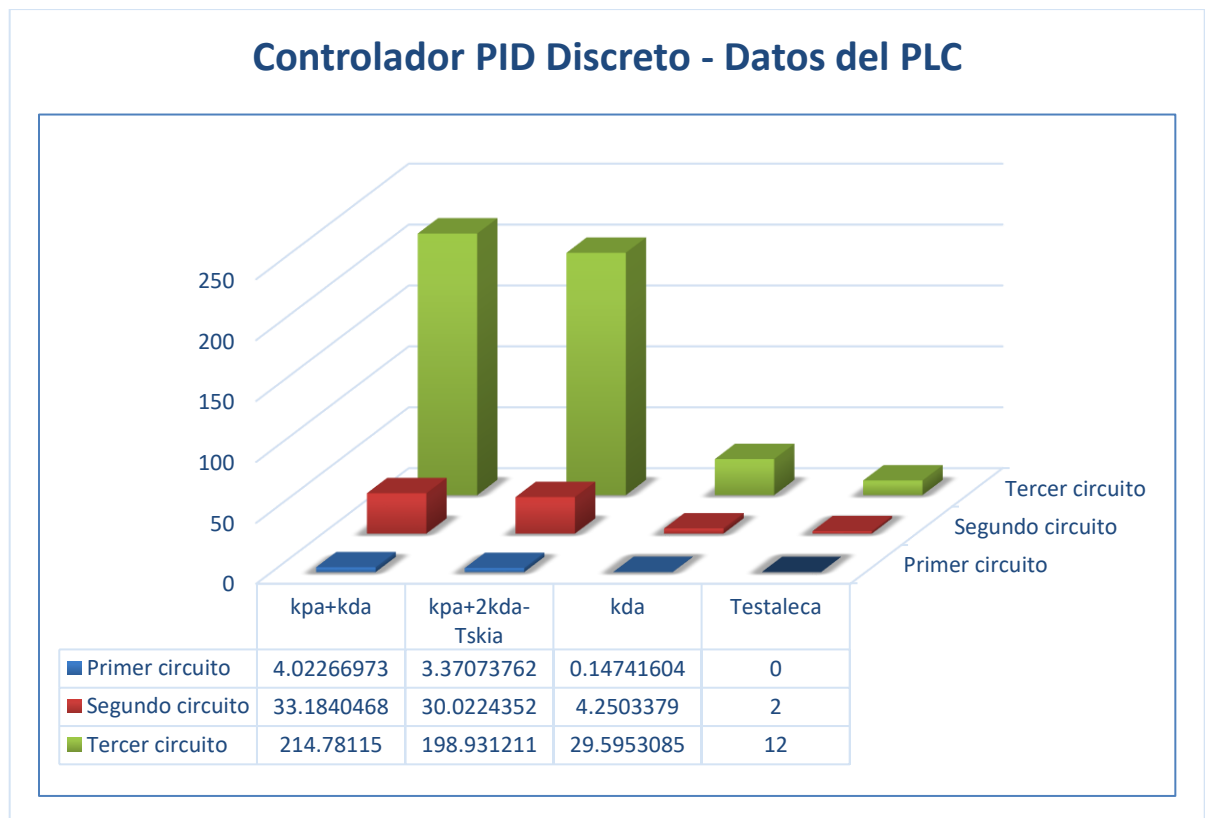


Figura 35: Gráfica del PID discreto vs datos del controlador
Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Sintonía analítica del PID.

La tabla 17 muestra los parámetros $k_{pb}+k_{db}$, $k_{pb}+2k_{db}-T_{skib}$, k_{db} y T_{resp} . de la sintonía analítica del PID.

Tabla 17

Parámetros del controlador PID con sintonía analítica

| | $k_{pb}+k_{db}$ | $k_{pb}+2k_{db}-T_{skib}$ | k_{db} | T_{resp} |
|--|-----------------|---------------------------|----------|------------|
| | 0.1 | 0.0697 | 0 | 1 |
| | 5.877 | 1.977 | 0 | 2 |
| | 4.5 | 4.486 | 0 | 11 |

Fuente: Elaboración propia

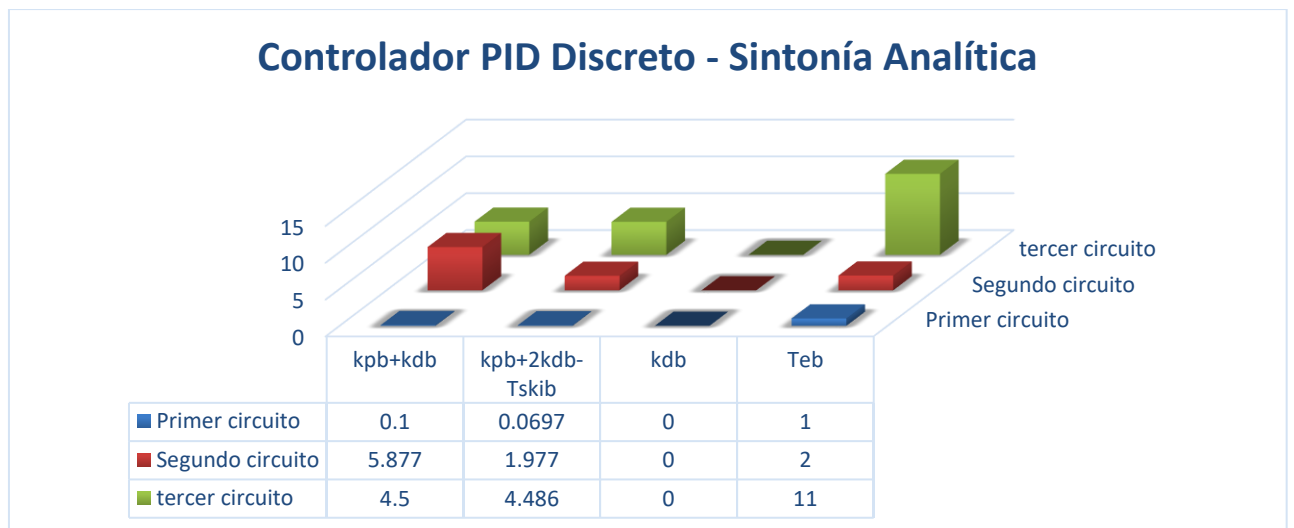


Figura 36: Gráfica del PID discreto vs la sintonización analítica

Fuente: Elaboración propia

La figura 39, muestra los resultados de los parámetros k_p y k_d del PID

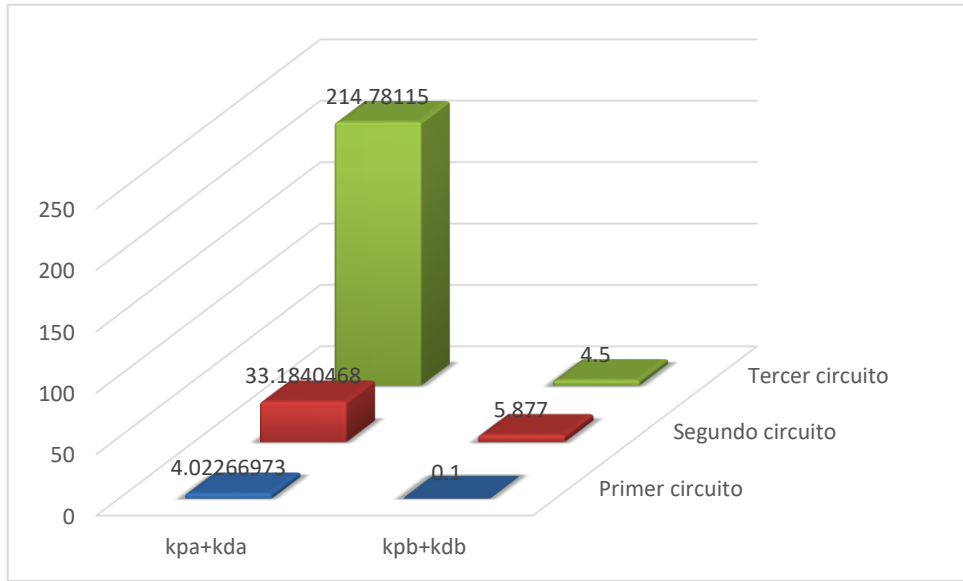


Figura 37: Comparación entre los parámetros k_p y k_d
 Fuente: Elaboración propia

La figura 40, muestra los resultados de los parámetros K_p k_d y T_{ski} del PID.

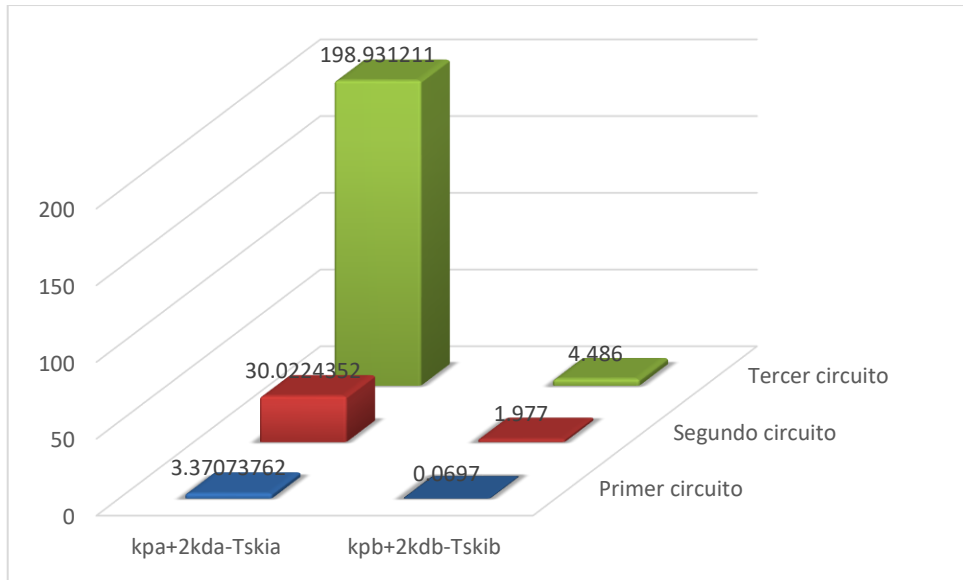


Figura 38: Comparación entre los parámetros K_p k_d y T_{ski}
 Fuente: Elaboración propia

La figura 41, muestra los resultados de los parámetros K_{da} y K_{db} del PID

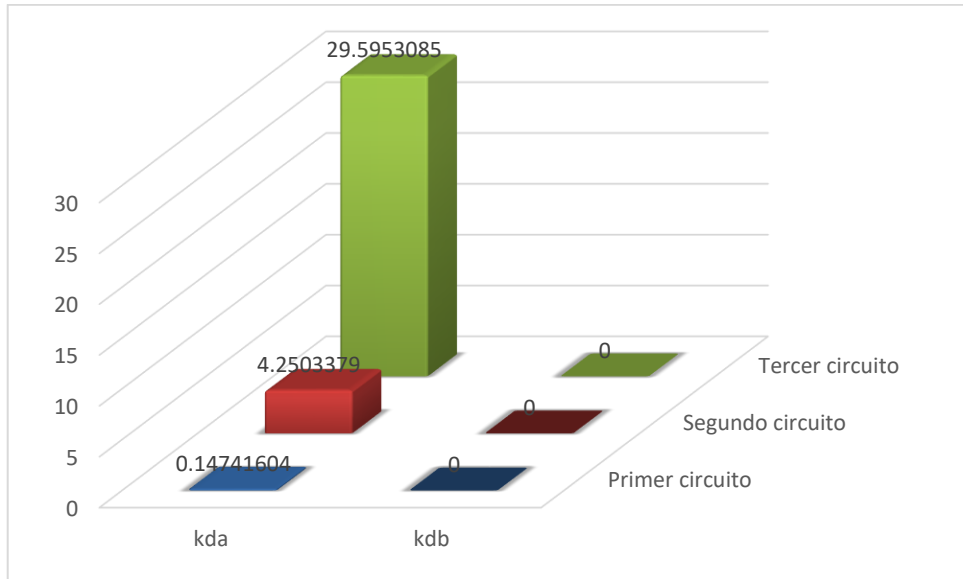


Figura 39: Comparación entre los parámetros Kda y Kdb
Fuente: Elaboración propia

La figura 42, muestra los resultados de la mejora en el cálculo de parámetros para el PID discreto.

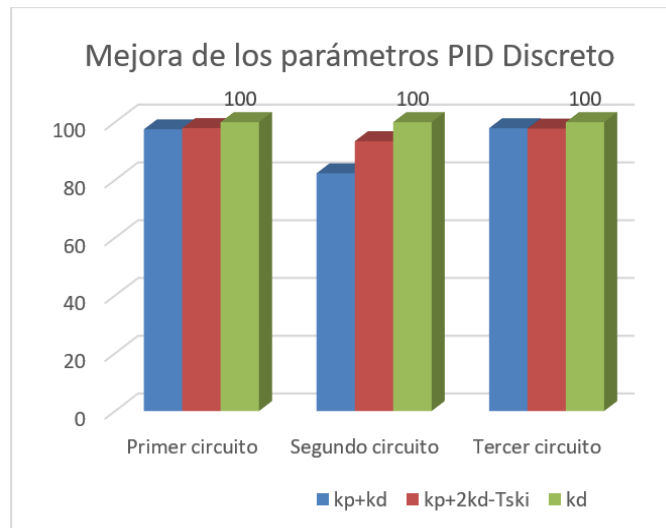


Figura 40: Comparación entre los parámetros del PID discreto
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1. Análisis de resultados

Desarrollo de la discretización del PID analógico

$$\frac{PID(S)}{Error(S)} = \left(\frac{1 - e^{-ST_s}}{S} \right) \left(kp + \frac{ki}{S} + Skd \right)$$

$$\frac{PID(Z)}{Error(Z)} = (1 - z^{-1})Z \left\{ \frac{kp + \frac{ki}{S} + Skd}{S} \right\}$$

$$\frac{PID(Z)}{Error(Z)} = (1 - z^{-1})Z \left\{ \frac{kp}{S} + \frac{ki}{S^2} + kd \right\}$$

$$\frac{PID(Z)}{Error(Z)} = \frac{kp(1 - z^{-1}) + z^{-1}ki T_s Z + kd(1 - z^{-1})^2}{(1 - z^{-1})}$$

$$PID(Z)(1 - z^{-1}) = Error(Z)[kp(1 - z^{-1}) + z^{-1}ki T_s Z + kd(1 - z^{-1})^2]$$

$$PID(k) = PID(k - 1) + Error(k)[kp + kd] - Error(k - 1)[kp + 2kd - ki T_s] \\ + Error(k - 2)kd$$

4.2. Contrastación de hipótesis

La figura 43, muestra los cuatro bloques considerados para el diseño del PID.

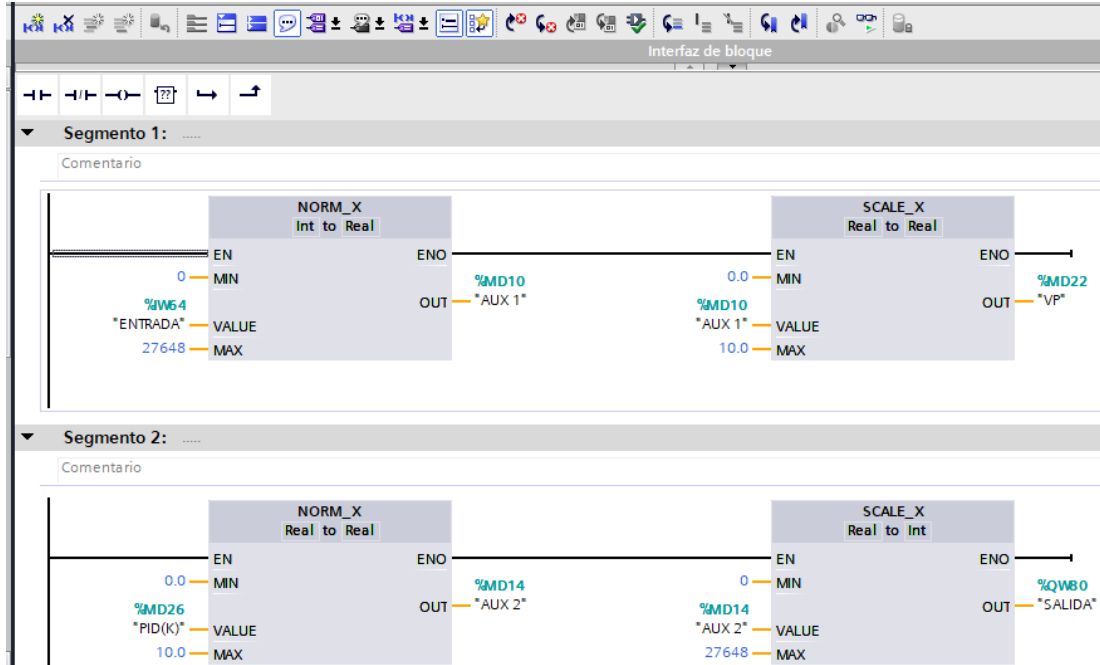


Figura 41: Configuración de los bloques para el PID
Fuente: Elaboración propia

En la figura 44, se puede apreciar la programación del PID discreto. Para ello se utilizó un bloque de interrupción cíclica con trece líneas de sentencia.

```

Interfaz de bloque
IF... CASE... FOR... WHILE... (*...*) REGION
OF... TO DO... DO...

1 "ERROR(K-2)" := "ERROR(K-1)";
2 "ERROR(K-1)" := "ERROR(K)";
3 "ERROR(K)" := "SP" - "VP";
4 "PID(K-1)" := "PID(K)";
5 "PID(K)" := "PID(K-1)" + "KP+KD" * "ERROR(K)" - "KP+2KD-TsKI" * "ERROR(K-1)" + "KD" * "ERROR(K-2)";
6 IF "PID(K)">10 THEN
7     // Statement section IF
8     "PID(K)" := 10;
9 END_IF;
10 IF "PID(K)"<0 THEN
11     // Statement section IF
12     "PID(K)" := 0;
13 END_IF;

```

Figura 42: Código en SCL del PID Discreto
Fuente: Elaboración propia

La tabla 18, muestra los tiempos de respuesta con los tres métodos propuestos en el desarrollo de la tesis.

Tabla 18
Tiempo de respuesta con los tres circuitos.

| <i>Planta</i> | <i>PID del PLC</i> | <i>Sintonía del controlador</i> | <i>Sintonía analítica</i> |
|------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------|
| Primer circuito | 1 | 1 | 1 |
| Segundo circuito | 1.8 | 2 | 2 |
| Tercer circuito | 11 | 12 | 11 |

Fuente: Elaboración propia

La figura 45, muestra los resultados de forma gráfica de los tiempos de respuesta para los tres circuitos.

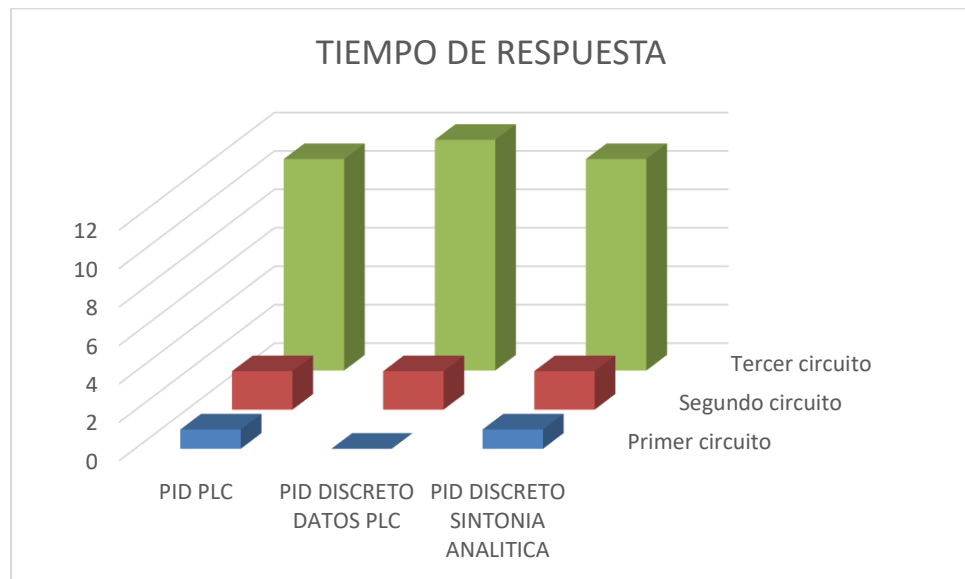
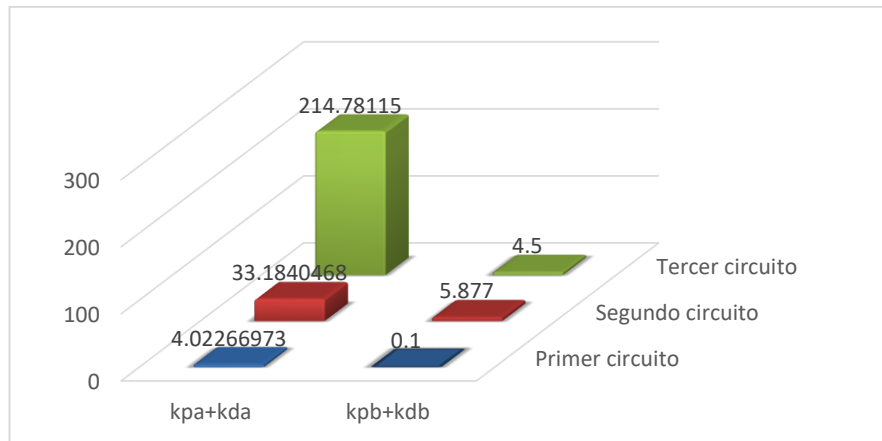


Figura 43: Comparación entre los tiempos de respuesta de cada circuito
Fuente: Elaboración propia

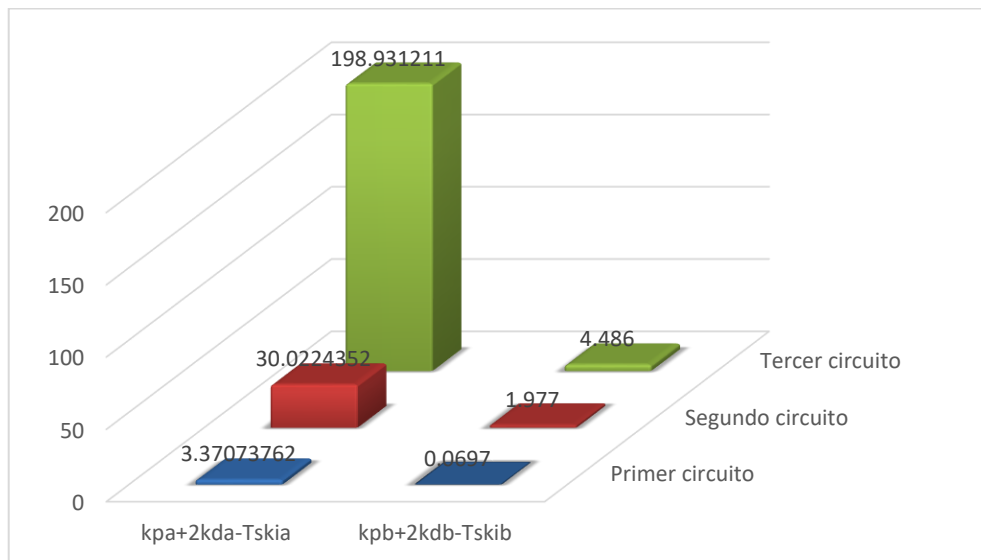
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

5.1. Discusión de resultados

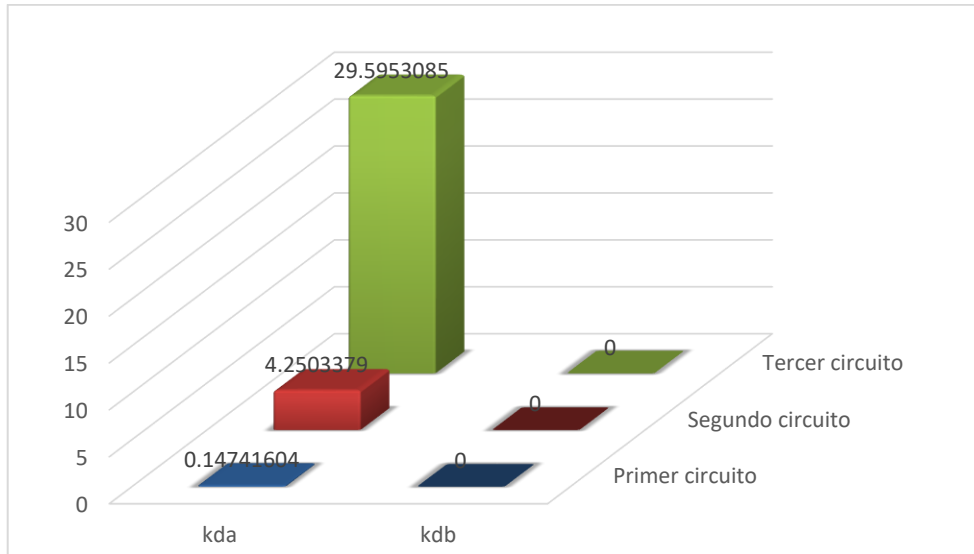
- El diseño del PID discreto se llevó a cabo a partir de la discretización del PID analógico. Para realizar el diseño, se debió tener en cuenta que todos los sistemas digitales tienen inherente asociado a ellos un sistema de muestreo y tiempo de retención de orden cero.
- La implementación del controlador PID en el autómata programable se tomó en un bloque de interrupción ya que el algoritmo propuesto requiere que este repita en forma cíclica debido al parámetro $[kp + 2kd - ki T_s]$
- La programación se realizó a través del lenguaje de programación de alto nivel SCL como se puede apreciar en la figura 41, con el uso de este lenguaje estructurado de Siemens es complicado su implementación para la gran parte de programadores comparado con el lenguaje Ladder.
- Los parámetros del controlador PID discreto, variaron radicalmente, debido a que en el primer caso se tomó la sintonía dada por el autómata programable utilizando el Auto Tuning que tiene el Software de simulación TIA Portal, además los parámetros de sintonía difieren en gran cantidad, debido a que el modelo de controlador PID usado para discretizar es diferente al usado por el autómata programable.



*Figura 44: Comparación entre los parámetros $Kpa+Kda$ y $Kpb+Kdb$
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 45: Comparación entre los parámetros $Kpa+2kda-Tskia$ y $Kpb+2kdb-Tskib$
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 46: Comparación entre los parámetros K_{da} y K_{db}
Fuente: Elaboración propia*

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Con la aplicación de la transformada Z y la introducción del bloque de muestreo y retención de orden cero se realizó la discretización del controlador PID. Esto permitió reescribir el controlador a través de ecuaciones en diferencias, se puede evidenciar en el capítulo tres.

Para el diseño y la implementación del PID discreto, se realizaron pruebas en tres circuitos de primer orden y fueron implementados en la plataforma de Siemens TIA Portal, usando un bloque de interrupción cíclica con un muestreo de 10ms, se puede evidenciar en el capítulo cuatro.

Los tiempos de respuesta de obtenidos por el PID del autómatas programable y el propuesto fueron casi iguales con errores aproximados al 9%, se puede evidenciar en el capítulo cuatro.

6.2. Recomendaciones

Usar el método de enjambres para el estudio de un controlador inteligente.

Realizar pruebas de tiempo de respuesta para diferentes tipos de controladores.

CAPÍTULO VII: REFERENCIAS

7.1. Fuentes bibliográficas

- Alvarez, J. (2017). *Automatización mediante Controlador Lógico Programable del reactor Batch de tanque agitado del proceso de fabricación de jabón como alternativa de mejora en la dosificación de insumos utilizados*. Lima.
- Astrom, K., & Hagglund, T. (2009). *Control PID Avanzado*. Madrid: Pearson Educación S.A.
- Del Val, J. (2016). Industria 4.0: la transformación digital de la industria. *CONFERENCIA DE DIRECTORES Y DECANOS*, 1-10.
- Dorf, R. (2005). *Sistema de control moderno*. Madrid: Pearson Educación S.A.
- Duque, A., López, J., & Felipe, A. (2016). Sintonización de un controlador PID implementado en un PLC haciendo uso de inteligencia de enjambres. *Prospect*. Vol. 15, 35-41.
doi:<https://doi.org/10.15665/rp.v15i1.679>
- Hing, M., Sánchez, A., & Remesal, A. (2018). Propuesta de automatización para el pasteurizador de la fábrica de cervezas Hatuey de Santiago de Cuba. *RTQ*, 518-529.
- Kuo, B. (1996). *Sistemas de control automático*. Mexico: Prentice Hall.
- Valdivia, C. (2012). *Sistemas de control continuos y discretos*. Madrid: Paraninfo S.A.
- Vargas, J. (2016). *Diseño e Implementación de un algoritmo de controlador PID para plataformas basadas en microcontroladores PIC*. Trujillo.

ANEXOS

Anexo 1: Especificaciones técnicas del controlador

| SIMATIC S7-1200 | | | | |
|--|---|------------------------------|---|------------------------------------|
| Selección SIMATIC S7-1200 FW4.2 | | | | |
| Para obtener un listado completo de equipos y accesorios de sistemas S7-1200 puede usar el "TIA Selection Tool": www.siemens.com/tia-selection-tool . | | | | |
| Características CPU | CPU 1212C | CPU 1214C | CPU 1215C | CPU 1217C |
| Alimentación: | 3 tipos: DC/DC/DC, AC/DC/RLY, DC/DC/RLY (Alimentación/Entradas/Salidas) | | | DC/DC/DC |
| Características únicas: | Reloj de tiempo real integrado, libre de mantenimiento, no requiere baterías | | | |
| Rango temp. Trabajo | -20°C a + 60°C | | | |
| Velocidad de ejecución: | | | | |
| - Operación Booleana | 0.085 us/ instrucción | | | |
| - Operación "Move word" | 1,7 us/ instrucción | | | |
| Memoria de trabajo (Interna) | 50 KB | 75 KB | 100 KB | 125 KB |
| Memoria de carga (Interna) | 1 MB | 4 MB | 4 MB | 4 MB |
| Memoria remanente (interna) | 10 KB | 10 KB | 10 KB | 10 KB |
| E/S Digitales Integradas | 8 Entradas/6 Salidas | 14 Entradas/10 Salidas | 14 Entradas/10 Salidas | |
| E/S Análogas Integradas | 2 Entradas (0-10vdc) | | 2 Entradas (0-10vdc) / 2 salidas (0 - 20mA) | |
| Cartucho de señales | 1 Máx. | | | |
| Módulos de señales | 2 Máx. | 8 Máx. | 8 Máx. | 8 Máx. |
| Máx. E/S - Digitales | 82 | 284 | 284 | 284 |
| Máx. E/S - Análogas | 19 | 67 | 69 | 69 |
| Contadores rápidos: | 5 total (6 con SB) | 6 total | 6 total | 6 total |
| - Fase simple | 3@100 kHz y 1@30 kHz (ó 2@30kHz con SB) | 3@100 kHz y 3@30 kHz | 3@100 kHz y 3@30 kHz | 1@1MHz, 3@100 kHz y 3@30 kHz |
| - Fase doble cuadratura | 3@80kHz y 1@20kHz (ó 2@20kHz con SB) | 3@80kHz y 3@20kHz | 3@80kHz y 3@20kHz | 1@1MHz, 3@80kHz y 1@20kHz |
| Salidas de pulsos | 4 @ 100 kHz (únicamente Salidas DC) | | | 4@1MHz |
| Interrupciones cíclicas | 4 en total con resolución 1ms | | | |
| Interrupciones por flancos | 8 ascend. y 8 descend | 12 ascend. y 12 descend. | 12 ascend. y 12 descend. | 12 ascend. y 12 descend. |
| Lazos PID | 16 | | | |
| Puertos de comunicación | 5 máx (por medio de módulos) | 5 máx (por medio de módulos) | 6 máx (por medio de módulos) | 6 máx (por medio de módulos) |
| Módulos de comunicación | 3 módulos máximo por configuración | | | |
| Puerto Industrial ETHERNET Integrado | 1 | 1 | 2 | 2 |
| - Protocolos: | Industrial Ethernet estándar - TCP/IP - ISO on TCP - UDP - Modbus TCP/IP - S7 como servidor | | | |
| Puerto serial Industrial | Serial RS232, RS485, ASi, PROFIBUS DP, DNP3 por medio de módulo de comunicación. | | | |
| - Protocolos: | USS - Modbus RTU maestro/esclavo, ASCII, ASi, PROFIBUS maestro, PROFIBUS esclavo, DNP3 y Free port. | | | |

Anexo 2: Especificaciones técnicas del módulo HMI

SIEMENS

Product data sheet

6AV6647-0AD11-3AX0



SIMATIC HMI KTP600 BASIC COLOR PN,
BASIC PANEL, KEY AND TOUCH OPERATION,
6" TFT DISPLAY, 256 COLORS,
PROFINET INTERFACE,
CONFIGURATION FROM WINCC FLEXIBLE 2008 SP2
COMPACT/ WINCC BASIC V10.5/ STEP7 BASIC V10.5,
CONTAINS OPEN SOURCE SW WHICH IS PROVIDED
FREE OF CHARGE FOR DETAILS SEE CD

| | |
|------------------------------|-------------------------|
| Display | |
| Design of display | TFT |
| Screen diagonal | 5.7 in |
| Display width | 115.2 mm |
| Display height | 86.4 mm |
| Number of colors | 256 |
| Resolution (pixels) | |
| horizontal image resolution | 320 |
| vertical image resolution | 240 |
| Backlighting | |
| MTBF backlighting (at 25 °C) | 50000 h |
| Backlight dimmable | No |
| Control elements | |
| Keyboard fonts | |
| Number of function keys | 6 |
| Keys with LED | No |
| System keys | No |
| Numeric/alphabetical input | |
| Numeric keyboard | Yes ; Onscreen keyboard |

| | |
|---------------------------------------|-------------------------|
| alphanumeric keyboard | Yes ; Onscreen keyboard |
| Touch operation | |
| Design as touch screen | Yes |
| Installation type/mounting | |
| Mounting in portrait format possible | Yes |
| Mounting in landscape format possible | Yes |
| Supply voltage | |
| Type of supply voltage | DC |
| Rated value (DC) | 24 V |
| permissible range, lower limit (DC) | 19.2 V |
| permissible range, upper limit (DC) | 28.8 V |
| Input current | |
| Current consumption (rated value) | 0.35 A |
| Inrush current A ² s | 0.5 A ² s |
| Power | |
| Power consumption, typ. | 9 W |
| Processor | |
| Processor type | |
| X86 | No |
| ARM | Yes ; RISC 32-bit |
| Memory | |
| Flash | Yes |
| RAM | Yes |
| usable memory for user data | 1 Mbyte |
| Type of output | |
| Acoustics | |
| Buzzer | Yes |
| Speaker | No |
| Time of day | |
| Clock | |
| Hardware clock (real-time clock) | No |
| Software clock | Yes |
| battery-backed | No |
| synchronizable | Yes |
| Interfaces | |
| Number of RS 485 interfaces | 0 |
| Number of USB interfaces | 0 |
| Number of SD card slots | 0 |

Anexo 3: Matriz de Consistencia

| DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR PID DISCRETO EN CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES | PROBLEMA | OBJETIVO | HIPÓTESIS | VARIABLES Y DIMENSIONES | METODOLOGÍA |
|---|---|--|---|---|--|
| | <p>PROBLEMA GENERAL ¿Cómo el diseño e implementación de un controlador PID discreto, permitirá aumentar los lazos de control en un controlador lógico programable?</p> <p>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</p> <p>¿Cómo el sistema de muestreo y tiempo de retención de orden cero permitirá discretizar el controlador PID?</p> <p>¿Cómo el software TIA Portal permitirá determinar la cantidad de bloques?</p> <p>¿Cómo la implementación del PID del controlador lógico programable permitirá determinar el tiempo de respuesta?</p> | <p>OBJETIVO GENERAL Diseñar e implementar un PID discreto para aumentar los lazos de control en un controlador lógico programable.</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <p>Discretizar el controlador PID a través del muestreo y tiempo de retención de orden cero.</p> <p>Determinar la cantidad de bloques a través del software TIA Portal.</p> <p>Determinar el tiempo de respuesta a través de la implementación del controlador PID del Controlador Lógico Programable.</p> | <p>HIPÓTESIS GENERAL El diseño e implementación de un controlador PID discreto permitirá incrementar el número de lazos de control en un controlador lógico programable.</p> <p>HIPOTESIS ESPECÍFICAS</p> <p>El sistema de muestreo y tiempo de retención de orden cero determina la discretización del controlador PID.</p> <p>El software TIA Portal determina la cantidad de bloques del controlador</p> <p>La implementación del PID del Controlador Lógico Programable determina el tiempo de respuesta.</p> | <p>VARIABLE 1 Implementación de un controlador PID Discreto</p> <p>Grado de la ecuación.</p> <p>Número de retardos en el tiempo.</p> <p>VARIABLE 2 Lazos de control</p> <p>Número de lazos de control.</p> <p>Orden del proceso</p> | <p>Población: Controlador SIEMENS</p> <p>Muestra: Modelo CPU S7-1200</p> <p>Tipo de investigación: Experimental.</p> <p>Nivel de investigación: Aplicada</p> <p>Instrumento:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reporte de diseño. • Reporte de simulación. |