

**UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PID DISCRETO PARA  
AUMENTAR LOS LAZOS DE CONTROL EN CONTROLADORES LÓGICOS  
PROGRAMABLES”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
ELECTRÓNICO**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES**

**AUTORES:** Br. Becerra Terán, Víctor Fernando

Br. Loyola Cisneros, José Luis

**ASESOR:** Ms. Ing. Oscar Miguel De La Cruz Rodríguez

**TRUJILLO - PERÚ**

**2019**

**Fecha de sustentación 2019/12/13**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PID DISCRETO  
PARA AUMENTAR LOS LAZOS DE CONTROL EN CONTROLADORES LÓGICOS  
PROGRAMABLES**

Elaborado Por:

---

Br. Víctor Fernando Becerra Terán

---

Br. José Luis Loyola Cisneros

Aprobado por:

---

Ing. Luis Alberto Vargas Díaz

PRESIDENTE

CIP N° 104175

---

Ing. Saúl Noé Linares Vértiz

SECRETARIO

CIP N° 142213

---

Ing. Jorge Luis Alva Alarcón

VOCAL

CIP N° 214251

---

Ing. Oscar Miguel De La Cruz Rodríguez

ASESOR

CIP N° 85598

## **DEDICATORIA**

Gracias a Dios por permitirme culminar una nueva etapa de mi vida; por lo tanto, esta tesis está dirigido hacia mis padres, Elías Becerra y Carmen Terán; mi hermana, Jenny Karim y mi tía, Aurelia Terán que me apoyaron, acompañaron y confiaron en mí en todo este tiempo; este trayecto no ha sido fácil, pero lo conseguí con mucho esfuerzo y esmero.

Gracias por estar presente no solo en esta etapa de mi vida, sino en todo momento ofreciéndome lo mejor y buscando lo mejor para mí.

Esta tesis también está dirigida para mis dos abuelas que ya no se encuentran presente María Zaragoza Gómez Sánchez y María del Carmen Leiva Castañeda, que siempre quisieron lo mejor para mí; también va dirigida a mis verdaderos amigos y primos, gracias por todo.

Gracias por esos ánimos que en todo momento me brindaron y no me dejaron caer; ahora si puedo decir lo logre.

**Becerra Terán, Víctor Fernando**

**A Dios:**

Porque me enseñó humildad con cada caída y meta lograda; mostrándome que sin él realmente no somos nada.

Gracias Dios, por la fortaleza y la guía constante durante el desarrollo y culminación de la tesis.

**A Rocío, mi Madre:**

Porque siempre fue la voz de mi conciencia. Esa que me guía y reprende con paciencia.

Y gracias a ella pude dar lo mejor de mí en cada meta propuesta.

**A Víctor, mi Padre:**

Quien a través de su ejemplo, siempre me mostró que todo se puede lograr, con esfuerzo, fe y perseverancia.

**A Felícita, mi abuela que de Dios goza:**

Que siempre creyó en mí, y daría lo que fuera porque hoy estuvieras aquí, compartiendo uno de mis logros profesionales como tanto anhelaste.

**A Kelly, mi hermana:**

Pues ella estuvo conmigo en mis buenos y malos ratos.

Y con solo esa sonrisa tierna siempre me motivaba a seguir adelante con firmeza.

**Loyola Cisneros, José Luis**

## **AGRADECIMIENTO**

Con mucha gratitud, a todos los docentes ingenieros de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica UPAO, que compartieron con nosotros sus conocimientos para hacer posible una de nuestras metas en nuestra vida profesional, especialmente al Ms. 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 responsabilidad y rigor académico, sin los cuales no hubiéramos hecho posible este trabajo de investigación, para así obtener la titulación profesional.

Muchas gracias a todos por el apoyo que nos brindaron.

**Los autores**

## RESUMEN

La investigación se centra en realizar el **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PID DISCRETO PARA AUMENTAR LOS LAZOS DE CONTROL EN CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES”**.

Esta investigación intenta incrementar el número de lazos de control cuando se agoten en los Controladores Lógicos Programables a través de la implementación de un PID discreto.

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

La implementación del controlador discreto se realizó en la plataforma de Siemens TIA Portal V15 mediante el lenguaje de programación SCL, usando un bloque de interrupción cíclica con tiempo de muestreo de 10ms y fue probada en tres circuitos de primer orden y uno de segundo orden.

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

Por último, Los tiempos de establecimiento obtenidos por los controladores PID del PLC y el propuesto fueron casi iguales con errores menores al 10%.

**Palabras Claves:** Algoritmo PID, discretización, tiempo de establecimiento.

## ABSTRACT

The research is focused on carrying out the "**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A DISCRETE PID ALGORITHM TO INCREASE THE CONTROL LINKS IN PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLERS**".

This investigation attempts to increase the number of control loops when they are exhausted in the Programmable Logic Controllers through the implementation of a discrete PID.

The discretization of the PID controller was made thanks to the introduction of the zero-order sampling and retention block and the use of Z transform.

For the implementation of the discrete controller, it was performed on the Siemens Tia Portal V15 platform using the SCL programming language, using a cyclic interruption block with 10ms sampling time and was tested on 3 circuits of order 1 and one of second order.

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

Finally, the establishment times obtained by the PLC PID controllers and those proposed were almost equal with errors less than 10%.

**Keywords:** PID algorithm, discretization, establishment time.

## PRESENTACIÓN

Señores miembros del Jurado:

De conformidad y en cumplimiento de los requisitos estipulados en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Privada Antenor Orrego y el Reglamento Interno de la Carrera Profesional de Ingeniería Electrónica para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electrónico, se pone a vuestra disposición el presente trabajo de tesis titulado: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PID DISCRETO PARA AUMENTAR LOS LAZOS DE CONTROL EN CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES”**

Este trabajo, es el resultado de la aplicación de los conocimientos adquiridos en la formación profesional en la Universidad, excusando anticipadamente de los posibles errores involuntarios cometidos en su desarrollo.

Trujillo, Diciembre de 2019

Br. Becerra Terán, Víctor Fernando

Br. Loyola Cisneros, José Luis



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CARÁTULA .....</b>	<b>i</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>v</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vii</b>
<b>PRESENTACIÓN .....</b>	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS.....</b>	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>xi</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1.PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....</b>	<b>3</b>
<b>II. MARCO DE REFERENCIA .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2.MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3.MARCO CONCEPTUAL .....</b>	<b>11</b>
<b>2.4.HIPÓTESIS .....</b>	<b>13</b>
<b>2.5.VARIABLES E INDICADORES .....</b>	<b>13</b>
<b>III.METODOLOGÍA EMPLEADA .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1.TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2.POBLACIÓN Y MUESTRA DE ESTUDIO .....</b>	<b>15</b>
<b>3.3.DISEÑO DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>15</b>
<b>3.4.TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>15</b>
<b>3.5.PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS .....</b>	<b>52</b>
<b>IV.PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>57</b>
<b>V.DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>62</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>65</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>66</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>68</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1: OPERACIONALIZACIÓN DE LA VARIABLE INDEPENDIENTE .....</b>	<b>14</b>
<b>Tabla 2: OPERACIONALIZACIÓN DE LA VARIABLE DEPENDIENTE.....</b>	<b>14</b>
<b>Tabla 3: PARÁMETROS DE LA AUTOSINTONÍA DEL CONTROLADOR PID DE LA PRIMERA PLANTA .....</b>	<b>22</b>
<b>Tabla 4: PARÁMETROS DE LA AUTOSINTONÍA DEL CONTROLADOR PID DE LA SEGUNDA PLANTA .....</b>	<b>23</b>
<b>Tabla 5: PARÁMETROS DE LA AUTOSINTONÍA DEL CONTROLADOR PID DE LA TERCERA PLANTA .....</b>	<b>25</b>
<b>Tabla 6: PARÁMETROS DE LA AUTOSINTONÍA DEL CONTROLADOR PID DE LA CUARTA PLANTA .....</b>	<b>27</b>
<b>Tabla 7: DATOS DEL PID DEL PLC – PID DISCRETO DEL PRIMER CIRCUITO .....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 8: DATOS DEL PID DEL PLC – PID DISCRETO DEL SEGUNDO CIRCUITO .....</b>	<b>36</b>
<b>Tabla 9: DATOS DEL PID DEL PLC – PID DISCRETO DEL TERCER CIRCUITO .....</b>	<b>38</b>
<b>Tabla 10: DATOS DEL PID DEL PLC – PID DISCRETO DEL CUARTO CIRCUITO .....</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 11: DATOS DEL CONTROLADOR PARA UN POLO EN 5.5 .....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 12: DATOS DEL CONTROLADOR PARA UN POLO EN 3.5 .....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 13: DATOS DEL CONTROLADOR PARA UN POLO EN 0.50875.....</b>	<b>47</b>
<b>Tabla 14: PARÁMETROS DEL CONTROLADOR PID DISCRETO.....</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 15: DATOS DEL CONTROLADOR PID DEL PLC Y TIEMPO DE ESTABLECIMIENTO.....</b>	<b>52</b>
<b>Tabla 16: DATOS DEL CONTROLADOR DISCRETO CON LOS DATOS DE AUTOSINTONÍA DEL PLC .....</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 17: DATOS DEL CONTROLADOR DISCRETO CON SINTONÍA ANALÍTICA.....</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 18: TIEMPO DE ESTABLECIMIENTO CON EL PID DEL PLC.....</b>	<b>59</b>
<b>Tabla 19: PARÁMETROS DE SINTONÍA DEL PLC .....</b>	<b>59</b>
<b>Tabla 20: PARÁMETROS DE SINTONÍA ANALÍTICA .....</b>	<b>60</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1: DIAGRAMA DE BLOQUES CONTROLADOR PID .....</b>	<b>6</b>
<b>FIGURA 2: TRANSFORMADA Z.....</b>	<b>10</b>
<b>FIGURA 3: SELECCIÓN DEL CONTROLADOR EN EL SOFTWARE TIA PORTAL .....</b>	<b>16</b>
<b>FIGURA 4: DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES EN EL CONTROLADOR .....</b>	<b>16</b>
<b>FIGURA 5: SELECCIÓN DEL BLOQUE PID EN TIA PORTAL .....</b>	<b>17</b>
<b>FIGURA 6: CONFIGURACIÓN DEL TIPO DE REGULACIÓN EN TIA PORTAL.....</b>	<b>17</b>
<b>FIGURA 7: CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE I/O EN TIA PORTAL.....</b>	<b>18</b>
<b>FIGURA 8: CONFIGURACIÓN DE LOS LÍMITES DE VALOR REAL EN TIA PORTAL .....</b>	<b>18</b>
<b>FIGURA 9: CONFIGURACIÓN DE LA ESCALA DE VALOR REAL EN TIA PORTAL.....</b>	<b>19</b>
<b>FIGURA 10: SELECCIÓN DEL PANEL HMI EN TIA PORTAL .....</b>	<b>19</b>
<b>FIGURA 11: CONFIGURACIÓN DEL PANEL HMI EN TIA PORTAL.....</b>	<b>20</b>
<b>FIGURA 12: PRIMERA PLANTA PARA LA AUTOSINTONÍA DEL CONTROLADOR PID .....</b>	<b>20</b>
<b>FIGURA 13: AUTOSINTONIA PARA DETERMINAR PARÁMETROS PID EN TIA PORTAL .....</b>	<b>21</b>
<b>FIGURA 14: RESPUESTA A UN ESCALÓN DE AMPLITUD 8V PARA LA PRIMERA PLANTA .....</b>	<b>22</b>
<b>FIGURA 15: SEGUNDA PLANTA PARA LA AUTOSINTONÍA DEL CONTROLADOR PID.....</b>	<b>23</b>
<b>FIGURA 16: RESPUESTA A UN ESCALÓN DE AMPLITUD 8V PARA LA SEGUNDA PLANTA.....</b>	<b>24</b>
<b>FIGURA 17: TERCERA PLANTA PARA LA AUTOSINTONÍA DEL CONTROLADOR PID.....</b>	<b>25</b>
<b>FIGURA 18: RESPUESTA A UN ESCALÓN DE AMPLITUD 8V PARA LA TERCERA PLANTA.....</b>	<b>26</b>
<b>FIGURA 19: CUARTA PLANTA PARA LA AUTOSINTONÍA DEL CONTROLADOR PID .....</b>	<b>26</b>
<b>FIGURA 20: RESPUESTA A UN ESCALÓN DE AMPLITUD 8V PARA LA CUARTA PLANTA .....</b>	<b>28</b>
<b>FIGURA 21: DEFINICIÓN DE VARIABLES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DISCRETO.....</b>	<b>30</b>
<b>FIGURA 22: IMPLEMENTACIÓN DEL BLOQUE PRINCIPAL Y BLOQUE DE INTERRUPCIÓN CÍCLICA EN TIA PORTAL .....</b>	<b>32</b>
<b>FIGURA 23: PROGRAMACIÓN DEL CONTROLADOR PID DISCRETO EN SCL .....</b>	<b>33</b>
<b>FIGURA 24: CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL CONTROLADOR EN HMI.....</b>	<b>33</b>
<b>FIGURA 25: PRIMER CIRCUITO PARA EL DISEÑO DEL CONTROLADOR DISCRETO .....</b>	<b>34</b>
<b>FIGURA 26: RESPUESTA DEL CONTROLADOR DISCRETO CON LOS DATOS DE LA TABLA 7 ..</b>	<b>35</b>
<b>FIGURA 27: SEGUNDO CIRCUITO PARA EL DISEÑO DEL CONTROLADOR DISCRETO .....</b>	<b>36</b>
<b>FIGURA 28: RESPUESTA DEL CONTROLADOR DISCRETO CON LOS DATOS DE LA TABLA 8 ..</b>	<b>37</b>
<b>FIGURA 29: TERCER CIRCUITO PARA EL DISEÑO DEL CONTROLADOR DISCRETO .....</b>	<b>38</b>
<b>FIGURA 30: RESPUESTA DEL CONTROLADOR DISCRETO CON LOS DATOS DE LA TABLA 9 ..</b>	<b>39</b>
<b>FIGURA 31: CUARTO CIRCUITO PARA EL DISEÑO DEL CONTROLADOR DISCRETO .....</b>	<b>40</b>
<b>FIGURA 32: RESPUESTA DEL CONTROLADOR DISCRETO CON LOS DATOS DE LA TABLA 10</b>	<b>41</b>

<b>FIGURA 33: PRIMERA PLANTA PARA EL CONTROLADOR CON LOS VALORES DE SINTONÍA ANALÍTICA .....</b>	<b>43</b>
<b>FIGURA 34: RESPUESTA A UN ESCALÓN DE AMPLITUD 8V CON LOS DATOS OBTENIDOS DE LA TABLA 11 .....</b>	<b>44</b>
<b>FIGURA 35: SEGUNDA PLANTA PARA EL CONTROLADOR CON LOS VALORES DE SINTONÍA ANALÍTICA .....</b>	<b>45</b>
<b>FIGURA 36: RESPUESTA A UN ESCALÓN DE AMPLITUD 8V CON LOS DATOS OBTENIDOS DE LA TABLA 12 .....</b>	<b>46</b>
<b>FIGURA 37: TERCERA PLANTA PARA EL CONTROLADOR CON LOS VALORES DE SINTONÍA ANALÍTICA .....</b>	<b>47</b>
<b>FIGURA 38: RESPUESTA AL ESCALÓN DE AMPLITUD 8V CON LOS DATOS OBTENIDOS DE LA TABLA 13 .....</b>	<b>48</b>
<b>FIGURA 39: CUARTA PLANTA PARA EL CONTROLADOR CON LOS VALORES DE SINTONÍA ANALÍTICA .....</b>	<b>49</b>
<b>FIGURA 40: RESPUESTA A UN ESCALÓN DE AMPLITUD 8V CON LOS PARÁMETROS DEL CONTROLADOR PID DISCRETO .....</b>	<b>51</b>
<b>FIGURA 41: GRÁFICA DEL CONTROLADOR PID DEL PLC .....</b>	<b>52</b>
<b>FIGURA 42: GRÁFICA DEL CONTROLADOR DISCRETO .....</b>	<b>53</b>
<b>FIGURA 43: GRÁFICA DEL CONTROLADOR DISCRETO CON SINTONÍA ANALÍTICA.....</b>	<b>54</b>
<b>FIGURA 44: COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS KPA+KDA VS KPB+KDB .....</b>	<b>55</b>
<b>FIGURA 45: COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS KPA+2KDA-TSKIA VS KPB+2KDB-TSKIB</b>	<b>55</b>
<b>FIGURA 46: COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS KDA VS KDB.....</b>	<b>56</b>
<b>FIGURA 47: MEJORA DE LOS PARÁMETROS DEL PID DISCRETO .....</b>	<b>56</b>
<b>FIGURA 48: CONFIGURACIÓN DE LOS BLOQUES DEL CONTROLADOR PID .....</b>	<b>58</b>
<b>FIGURA 49: PROGRAMACIÓN DEL CONTROLADOR PID DISCRETO EN LENGUAJE SLC.....</b>	<b>58</b>
<b>FIGURA 50: COMPARACIÓN DE LOS TIEMPOS DE ESTABLECIMIENTO.....</b>	<b>61</b>
<b>FIGURA 51: IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR PID MEDIANTE EL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN SCL .....</b>	<b>62</b>
<b>FIGURA 52: PARÁMETROS KPA+KDA VS KPB+KDB .....</b>	<b>63</b>
<b>FIGURA 53: PARÁMETROS KPA+2KDA-TSKIA VS KPB+2KDB-TSKIB .....</b>	<b>64</b>
<b>FIGURA 54: PARÁMETROS KDA VS KDB.....</b>	<b>64</b>

## **I. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Problema de investigación**

#### **a. Descripción de la realidad problemática**

“Los sistemas industriales modernos han obligado a la comunidad científica y académica a encontrar actualizaciones para todas las disciplinas dentro del campo de la automatización” (Ogata, 2003, p.255). Este hecho ha motivado a las universidades a disponer de laboratorios polivalentes que puedan ayudar a los estudiantes a desarrollarse y capacitarse en los diferentes campos de la ingeniería.

Paralelamente los sistemas de control automático, son dispositivos utilizados en la industria, que permiten el control de variables críticas de un proceso industrial. Estos sistemas permiten que las variables controladas permanezcan en un punto de referencia, o en cierto rango aceptable respecto a este punto, esto con el fin que los procesos industriales sean eficientes, con lo que se logra maximizar la producción, además de minimizar costos ya que los lazos de control permiten una optimización de las materias primas y la minimización de la energía utilizada en producción.

“El uso de sistemas de control como el PID tradicional clásico, es tal que aproximadamente el 95% de los lazos de control que existen en las aplicaciones industriales son de este tipo, lo que muestra la preferencia del usuario en el uso de algoritmos simples de control” (Ogata, 2003, p. 380).

Los controladores lógicos programables en las gamas más recientes cuentan con bloques PID para su uso en procesos industriales, algunas de las marcas más populares son Siemens, Rockwell y Schneider y sus controladores lógicos programables cuentan con estos bloques. La marca Siemens en su controlador S7-1200 cuenta en su sub gama 1214-AC/DC/RLY con 6

bloques PID para poder controlar 6 Lazos de control, si el proceso requeriría un lazo de control adicional se tendría que adquirir un módulo adicional que permita un lazo de control con un bloque PID, pero esta gama no cuenta en su haber con estos módulos, por lo que se optaría por adquirir otro PLC y colocarlos en RED. Esto conlleva a elevar los costos y cambiar la estrategia de control del proceso.

“La implementación de bloques PID en estos controladores es una tarea muy compleja y poco funcional ya que se requiere de muchos recursos de procesamiento por parte del controlador” (A. Marín, 2016, p.75)

En el trabajo realizado por Marín y López, usaron un OPC como interface entre Matlab y un controlador para poder realizar la implementación del controlador PID.

### **b. Descripción del problema**

El problema está determinado por la falta de bloques PID discreto, para incrementar el número de lazos de control cuando se agoten en los Controladores Lógicos Programables.

### **c. Formulación del problema**

¿Cómo implementar un controlador PID discreto en un Controlador Lógico Programable?

## **1.2. Objetivos de la investigación**

### **a. Objetivo general**

Diseñar e implementar un algoritmo PID en un Controlador Lógico Programable.

### **b. Objetivos específicos**

- Discretizar el controlador PID.
- Calcular la cantidad de bloques necesarios para su implementación.

- Determinar el tiempo de establecimiento del PID discreto.

### **1.3. Justificación del estudio**

Permitirá a los investigadores proponer una solución a la implementación de controladores PID en los controladores industriales PLC.

Aumentar los lazos de control cuando se agoten los controladores PID que esta plataforma tiene embebida.

Generar tecnología de control en el ámbito local.

Desarrollo de controladores de lazo cerrado PID en controladores industriales de escasos recursos.

## II. MARCO DE REFERENCIA

### 2.1. Antecedentes del estudio

**Título:** “PLATAFORMAS PARA INTEGRACIÓN DE CONOCIMIENTOS RELACIONADOS CON AJUSTE DE CONTROLADORES PID PARA PROCESOS INDUSTRIALES”

**Autor:** Manuel J. López

**Institución:** ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA, Cádiz, España.

**Fecha de publicación:** 2009

**Resumen:**

**Aporte al trabajo:** En este artículo se presenta una metodología de trabajo para la adquisición y profundización en los conocimientos necesarios para comprender los conceptos y poder llevar a la práctica aplicaciones en el ámbito de la Regulación Automática de Procesos Industriales

**Título:** “SINTONIZACIÓN DE UN CONTROLADOR PID IMPLEMENTADO EN UN PLC HACIENDO USO DE INTELIGENCIA DE ENJAMBRES”

**Autor:** Arturo Duque Marín

**Institución:** UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE, CALI, COLOMBIA

**Fecha de publicación:** 2016

**Resumen:**

**Aporte al trabajo:** Muestra la implementación en un PLC Allen Bradley de una técnica 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.

**Título:** “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE CONTROLADOR PID PARA PLATAFORMAS BASADAS EN MICROCONTROLADORES PIC”

**Autor:** Jhofrann Vargas Quiroz.

**Institución:** UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO, TRUJILLO, PERÚ

**Fecha de publicación:** 2016

**Resumen:**

**Aporte al trabajo:** En nuestro medio, desde ya hace algunos años, se viene desarrollando investigaciones acerca de los controladores más usados a nivel industrial, los controladores PID, de los cuales se tiene información de su funcionamiento además que se tiene información de algunas de sus modificaciones que se han hecho a lo largo de los años para que estos sean cada vez más adecuados para el control de procesos.

## 2.2. Marco Teórico

### a) Modelo de controlador PID continuo

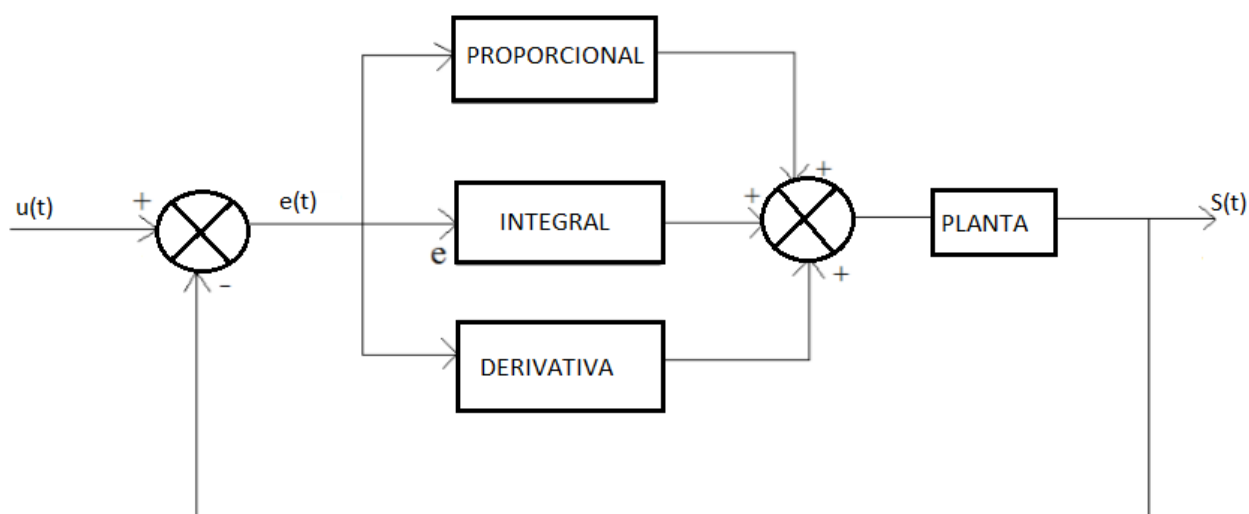
El controlador PID aplica una señal al proceso que es una combinación proporcional, integral y derivada de la señal de actuación, el cual se expresa en el tiempo en la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + \frac{de(t)}{dt} \right) \quad ec. 2.1$$

Donde:

u = señal de control  
e = error de control

La señal de control es así la suma de 3 términos (ver figura 1): el término proporcional (que es proporcional al error), el término integral (que es proporcional a la integral del error), y el término Derivativa (que es proporcional a la derivada del error).



*Figura 1: Diagrama de Bloques Controlador PID*  
Fuente: Elaboración propia

### **Acción proporcional**

En el caso de la acción proporcional pura, la ley de control está dada por la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_P e(t) \quad \text{ec. 2.2}$$

La cual es una relación entre la salida del controlador y la señal de error, y que en cantidades transformadas por el método de Laplace,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \quad \text{ec. 2.3}$$

Donde  $K_P$  se considera la ganancia proporcional.

Cualquiera que sea el mecanismo real y la forma de la potencia de operación, el controlador proporcional es, en esencia, un amplificador con ganancia ajustable.

### **Acción integral**

En un control integral, el valor de la salida del controlador  $u(t)$  se cambia a una razón proporcional a la señal de error  $e(t)$ .

Es decir,

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad \text{ec. 2.4}$$

O bien

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad \text{ec. 2.5}$$

Donde  $K_i$  es una constante ajustable. La función de transferencia del controlador integral es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad \text{ec. 2.6}$$

### **Acción derivativa**

El objetivo de la acción derivativa es mejorar la estabilidad en lazo cerrado, el mecanismo de inestabilidad se puede describir intuitivamente como sigue, a causa de la dinámica del proceso, llevará algún tiempo antes de que un cambio en la variable sea detectable en la salida del proceso. Así el sistema de control tardará en corregir un error.

$$u(t) = K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{ec. 2.7}$$

Aplicación la transformada de Laplace a la ecuación 2.7 obtenemos la función de transferencia:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_d s \quad \text{ec. 2.8}$$

Habiendo realizado una presentación detallada de las acciones de control proporcional, integral y derivativa, como resultado se obtiene la función de transferencia del controlador PID:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K \left( 1 + \frac{1}{sT_i} + T_d s \right) = K_P + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad \text{ec. 2.9}$$

## **b) Transformada Z**

La herramienta utilizada mayormente para el análisis y síntesis de sistemas de control en tiempo discreto es la transformada Z. El papel de la transformada Z en sistemas discretos es muy similar a la transformada de Laplace, la cual se utiliza para describir el controlador PID en tiempo continuo.

El método de la transformada Z es un método operacional muy poderoso cuando se trabaja con sistemas en tiempo discreto. A continuación se definirá la transformada Z de una función del tiempo o de una secuencia de números.

- Al considerar la transformada Z de una función del tiempo  $x(t)$ , solo se toman en cuenta los valores muestreados de  $x(t)$ , esto es,  $x(0)$ ,  $x(T)$ ,  $x(2T)$ ,..., donde  $T$  es el periodo de muestreo. La transformada Z de una función del tiempo  $x(t)$ , donde  $t$  es positivo, o de la secuencia de valores  $x(kT)$ , donde  $k$  adopta valores de cero o de enteros positivos y  $T$  es el periodo de muestreo, se define mediante la siguiente ecuación:

$$X(z) = Z[x(t)] = Z[x(kT)] = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT)z^{-k} \quad \text{ec. 2.10}$$

Para la mayoría de aplicaciones en ingeniería, la transformada Z unilateral (ec.2.10) tendrá una solución apropiada en forma cerrada en su región de convergencia. Observe que cuando  $X(z)$ , una serie infinita en  $z^{-1}$ , converge fuera del círculo  $|z| = R$ , donde R se conoce como radio de convergencia absoluta. Al utilizar el método de la transformada Z para resolver problemas en tiempo discreto no es necesario especificar los valores de z para los cuales  $X(z)$  converge. Por lo tanto se observa que la ecuación 2.10 da como resultado:

$$X(z) = x(0) + x(T)z^{-1} + x(2T)z^{-2} + \dots + x(kT)z^{-k} + \dots \quad \text{ec. 2.11}$$

La ecuación 2.11 implica que la transformada z de cualquier función en tiempo continuo  $x(t)$ , puede escribirse mediante inspección, en la forma de una serie. La  $z^{-k}$  en esta serie indica la posición en el tiempo en la que se presenta la amplitud  $x(kT)$ . De manera contraria, si  $X(z)$  está dada en la forma de una serie como la que se indicó, la transformada z inversa se puede obtener por inspección como una secuencia de la función  $x(kT)$  que corresponde a los valores de  $x(t)$  en los valores de tiempo respectivos.

Si la transformada está dada como el cociente de dos polinomios en Z, entonces la transformada Z inversa se puede obtener mediante varios métodos diferentes, tales como el método de la división directa, el método computacional, el método de expansión de fracciones parciales y el método de la integral de inversión.

A continuación se muestra algunas propiedades fundamentales de la transformada de la Laplace y transformada Z, que nos servirá para el análisis y síntesis de los sistemas de control en tiempo continuo y discreto (ver figura 2).

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

Figura 2: Transformada Z

Fuente: Sistemas de Control Automático – Benjamin Kuo

## Transformada Z inversa

Una de las principales aplicaciones de la transformada Z es en el análisis de sistemas lineales discretos. Frecuentemente este análisis involucra el encontrar transformadas Z de las sucesiones, y luego de alguna manipulación de las expresiones algebraicas, calcular la transformada Z inversa. Existen varias maneras, formales e informales, de calcular la transformada inversa dada una expresión algebraica y su región de convergencia.

La notación para la transformada Z inversa será  $Z^{-1}$ . La transformada Z inversa de  $X[Z]$  da como resultado la correspondiente secuencia  $X[k]$ .

Existen cuatro métodos para obtener la transformada Z inversa:

- ✓ Método de la división directa.
- ✓ Método computacional.
- ✓ Método de expansión en fracciones parciales.
- ✓ Método de la integral de inversión.

### **2.3. Marco conceptual**

#### **Lenguaje SCL**

SCL (Structured Control Language) es un lenguaje de programación de alto nivel orientado a Pascal que posibilita una programación estructurada. El lenguaje se corresponde con el lenguaje de programación ST "Structured Text" definido en la norma DIN EN-61131-3 (IEC 61131-3). Además de los elementos de lenguaje de alto nivel, SCL también contiene elementos de lenguaje característicos del PLC, como, p. ej., entradas, salidas, temporizadores, marcas, llamadas de bloque, etc. Es compatible con el sistema de bloques de STEP 7 y, por lo tanto, además de esquema de contactos (KOP) y diagrama de funciones (FUP), también permite programar bloques conforme a las normas. Es decir, SCL completa y amplía el software de programación STEP 7 con sus lenguajes de programación KOP y FUP.

## Sistemas de control

Para dar una descripción teórica de un sistema de control Román, G. (2012): menciona lo siguiente, “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”. Basa su funcionamiento de acuerdo a mediciones que realiza en el sistema (utiliza, por ejemplo, sensores de nivel, flujómetros, manómetros, etc.). De acuerdo a los resultados de esta medición, el sistema de control decide la acción a realizar para obtener el resultado deseado.

Para Román, G. (2012, p.98) los principales elementos de un sistema de control son los siguientes:

- **Entrada o estímulo:** Es la excitación o el mando aplicado a un sistema de control.
- **Salida:** Respuesta real que se obtiene del sistema.
- **Planta:** Es cualquier objeto físico a controlar.
- **Proceso:** Consiste en la operación o desarrollo natural y continuo marcado por cambios controlados que conducirán al resultado deseado.
- **Perturbación:** Conocido también como error. Es la señal que generalmente afecta negativamente el valor de salida del sistema. Es la señal que se trata de reducir o controlar.
- **Variable controlada:** Es, como su nombre lo indica, la variable que se mide o controla; normalmente es la salida del sistema.
- **Variable manipulada:** Es la variable que se modifica para obtener el resultado deseado en la variable controlada.



## **2.4. Hipótesis**

La discretización de un controlador PID permite su implementación en Controladores Lógicos Programables.

## **2.5. Variables e indicadores**

### **Variable independiente:**

Implementación de un controlador PID discreto.

### **Variable dependiente:**

Tiempo de establecimiento

## Operacionalización de variables

Tabla 1

*Operacionalización de la Variable Independiente*

VARIABLE	DEFINICION CONCEPTUAL	INDICADORES	TIPO	TÉCNICA	INSTRUMENTO
Implementación de un controlador PID Discreto	Transformación del espacio continuo al espacio discreto.	Grado de la ecuación.  Número de retardos en el tiempo.	----  ----	-----  -----	Reporte de Diseño.  Reporte de Diseño

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2

*Operacionalización de la Variable Dependiente*

VARIABLE	DEFINICION CONCEPTUAL	INDICADORES	TIPO	TÉCNICA	INSTRUMENTO
Tiempo de establecimiento	Control realimentado de una variable.	T del sistema  Polo dominante	-----  -----	-----  -----	Reporte Simulación  Reporte simulación

Fuente: Elaboración propia

### III. METODOLOGÍA EMPLEADA

#### 3.1. Tipo y nivel de investigación

##### **Tipo de investigación**

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

##### **Nivel de investigación**

Explicativo

#### 3.2. Población y muestra de estudio

##### **Población**

PLC S7-1200

##### **Muestra**

PLC 1214C AC/DC/RLY

#### 3.3. Diseño de investigación



**O<sub>1</sub>:** Planta de primer y segundo orden.

**X:** El controlador PID discreto

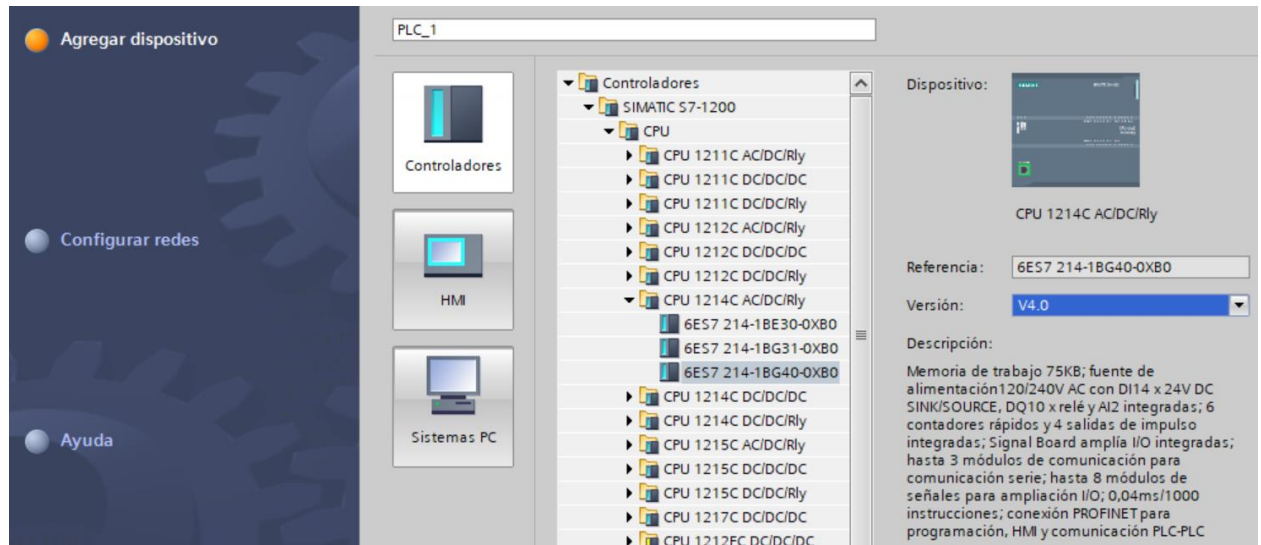
**O<sub>2</sub>:** Tiempo de establecimiento

#### 3.4. Técnicas e instrumentos de investigación

Selección del CPU para la sintonía del controlador S7-1200

La figura 3 muestra el tipo de controlador que va ser utilizado.

Para esta experimentación se cuenta con un CPU 1214 AC/DC/RLY, 6ES7 214-1BG40-0XB0



*Figura 3: Selección del Controlador en el software Tia Portal  
Fuente: Elaboración propia*

La figura 4 describe las variables que van a ser utilizadas en la programación del controlador

#### Definición de variables

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

*Figura 4: Descripción de las variables en el Controlador  
Fuente: Elaboración propia*

#### Programación del controlador

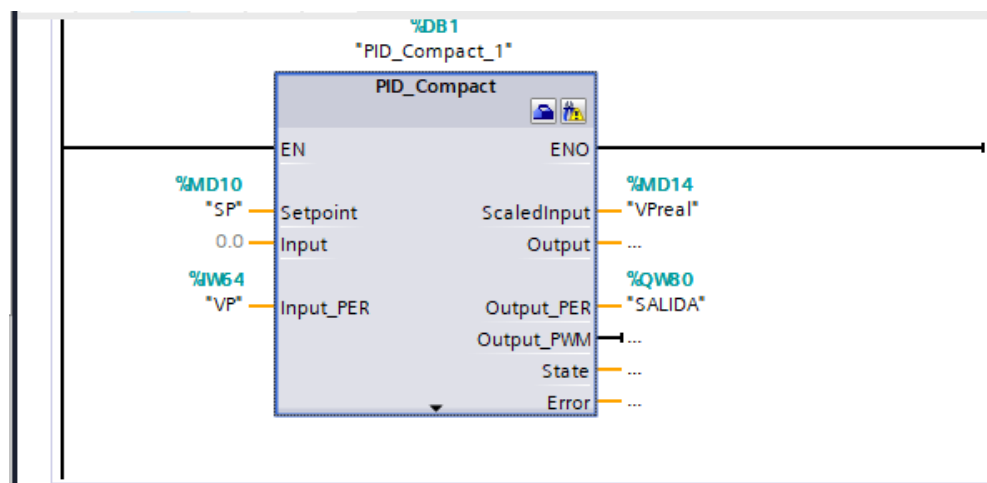
Se utilizó un bloque de interrupción cíclica con un tiempo de muestreo de 10ms.

El Set-Point se ingresa por medio de una variable.

La variable de proceso es captada por el canal 0 que tiene embebido el controlador y se encuentra en la dirección “IW64”.

La salida del controlador es aplicada a la salida analógica que se encuentra en el módulo Signal Board y que tiene la dirección “QW80”.

La figura 5 muestra la selección del bloque PID gracias a la ayuda del software TIA Portal.

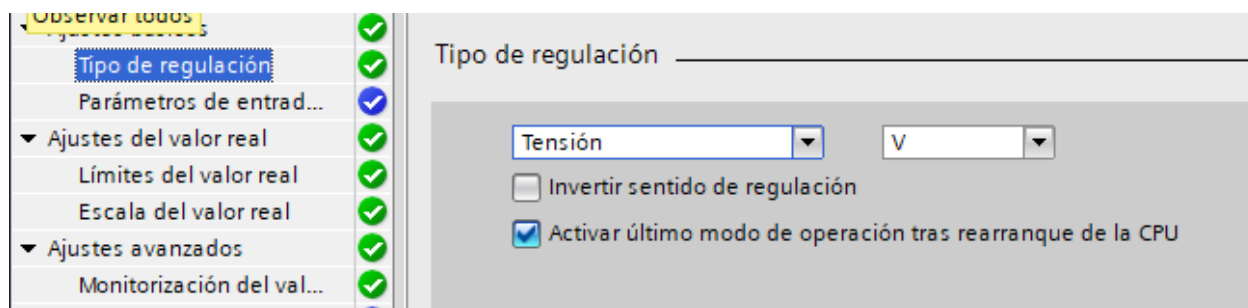


*Figura 5: Selección del Bloque PID en TIA Portal*  
Fuente: Elaboración propia

## Configuración del controlador

El tipo de regulación seleccionada es de tensión, ya que la planta se emulará mediante un circuito RC.

La figura 6 muestra la configuración del tipo de regulación en el software TIA Portal



*Figura 6: Configuración del tipo de regulación en TIA Portal*  
Fuente: Elaboración propia

La entrada y salida del controlador será a través de Periféricos

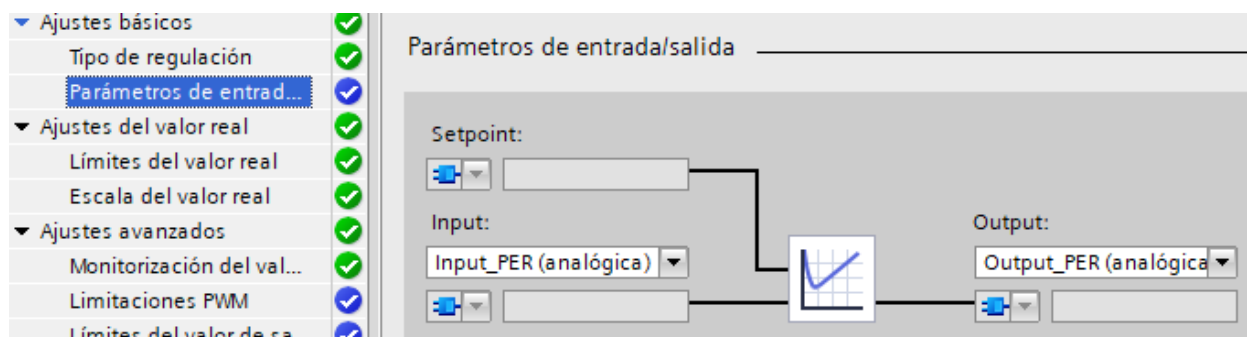


Figura 7: Configuración de los parámetros de I/O En TIA Portal  
Fuente: Elaboración propia

Los niveles de salida de regulación serán de 0 a 10 V

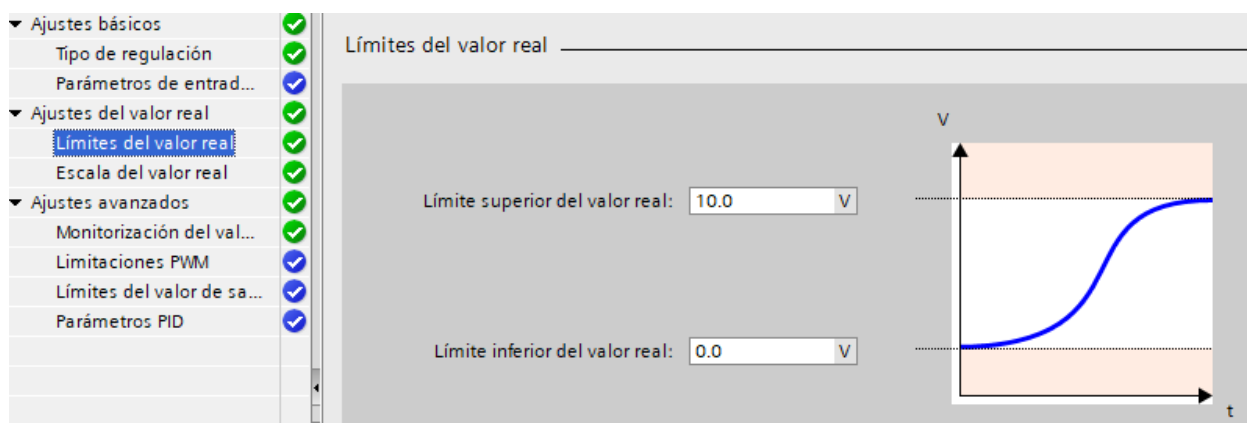


Figura 8: Configuración de los límites de valor real en TIA Portal  
Fuente: Elaboración propia

La entrada periférica será escalada como se muestra en la figura, para 10v se tendrá un valor de 27648

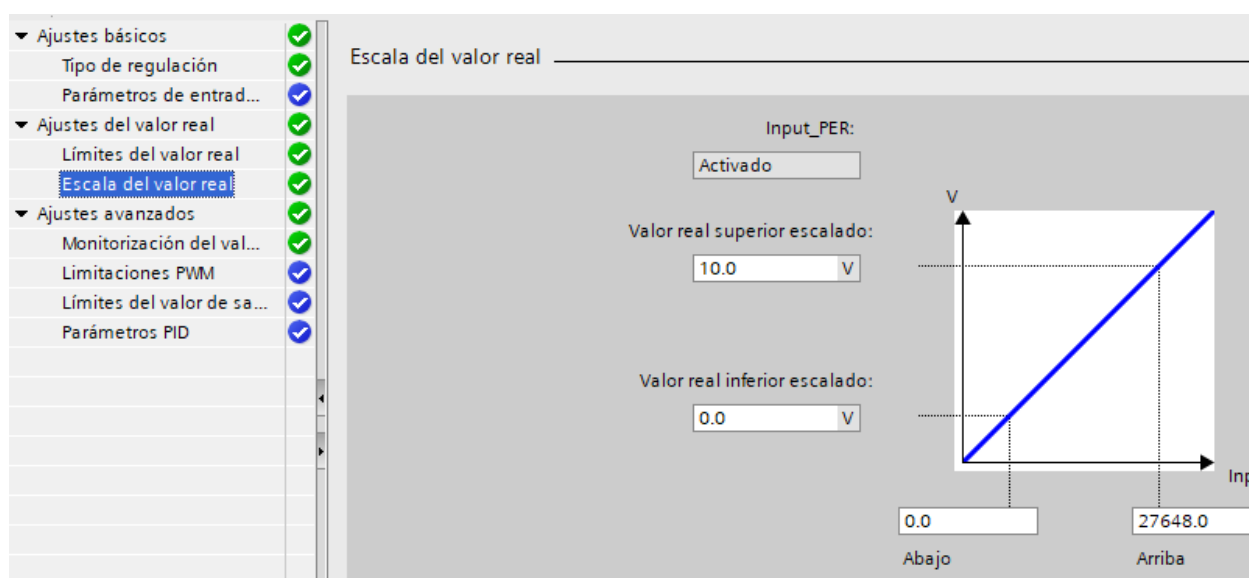


Figura 9: Configuración de la escala de valor real en TIA Portal  
Fuente: Elaboración propia

### Configuración del panel HMI para el ingreso del Set Point

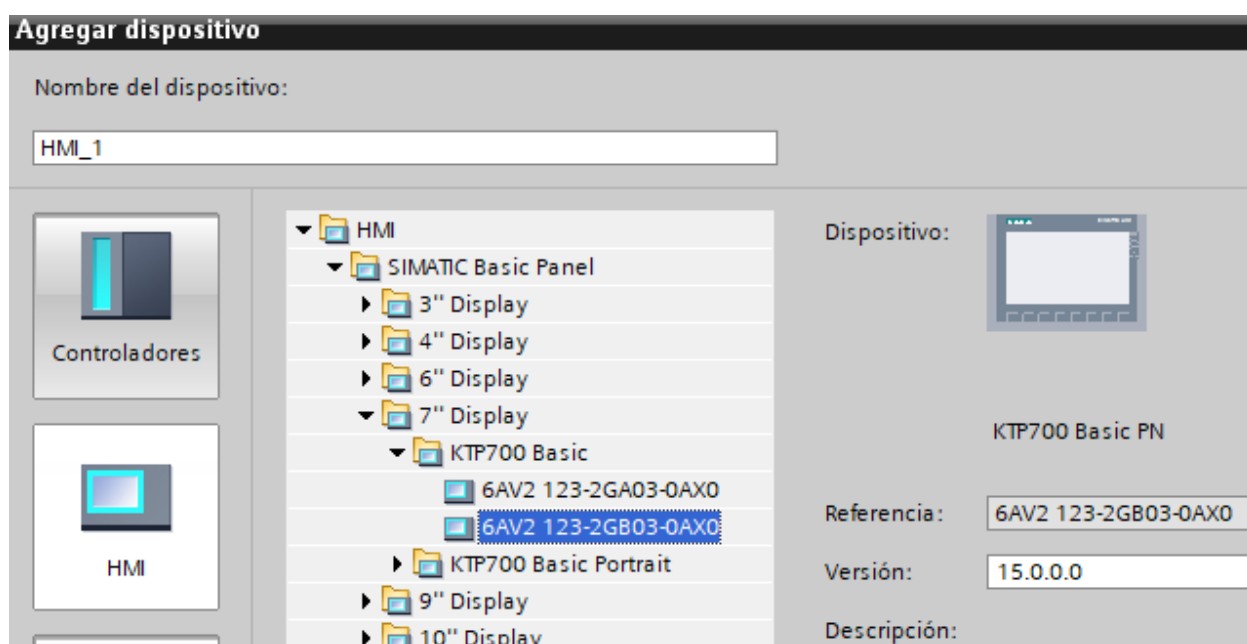
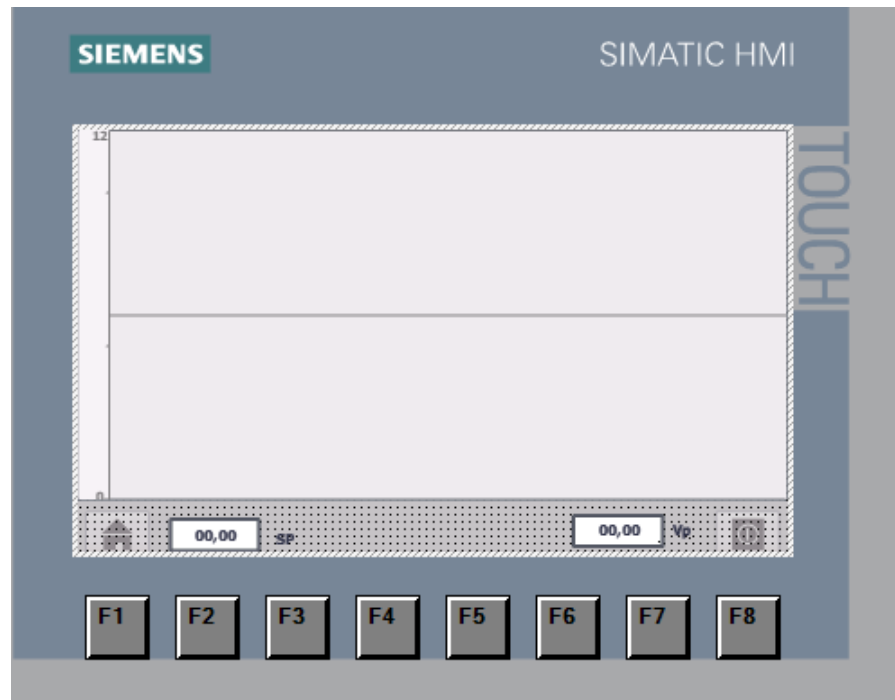
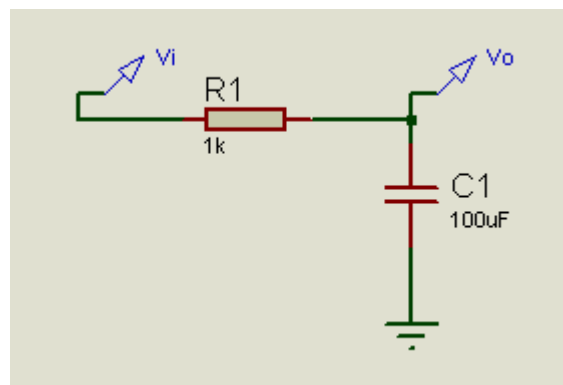


Figura 10: Selección del Panel HMI en TIA Portal  
Fuente: Elaboración propia



*Figura 11: Configuración del panel HMI en TIA Portal*  
*Fuente: Elaboración propia*

Circuito de prueba para la sintonía del controlador PID – Primera planta



*Figura 12: Primera planta para la autosintonía del controlador PID*  
*Fuente: Elaboración propia*



Calculando la función de Transferencia.

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

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

Se realiza la auto sintonía para determinar los parámetros Kp, Ki y Kd.

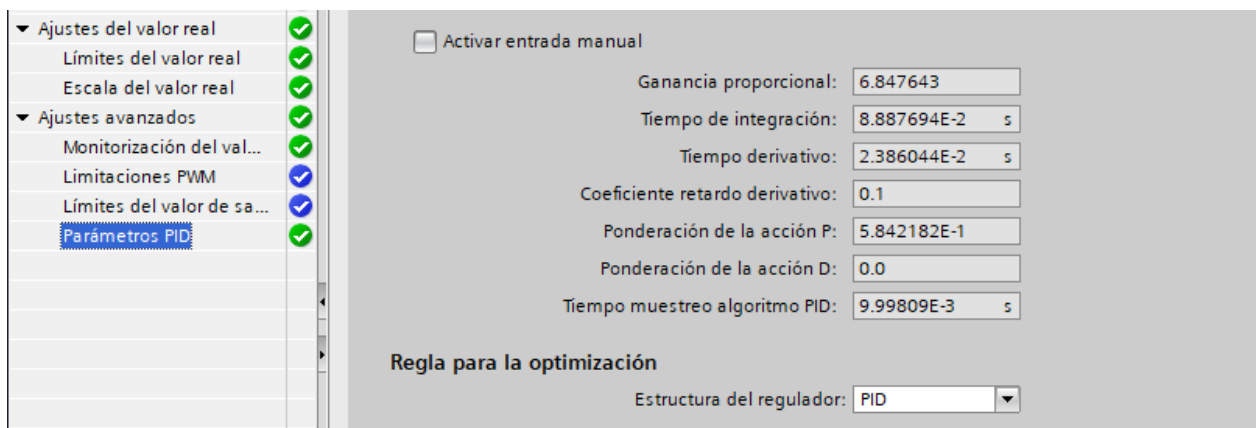


Figura 13: Autosintonía para determinar parámetros PID en TIA Portal  
Fuente: Elaboración propia

Con estos datos se determinan los valores de Kp, Ki y Kd.

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

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

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

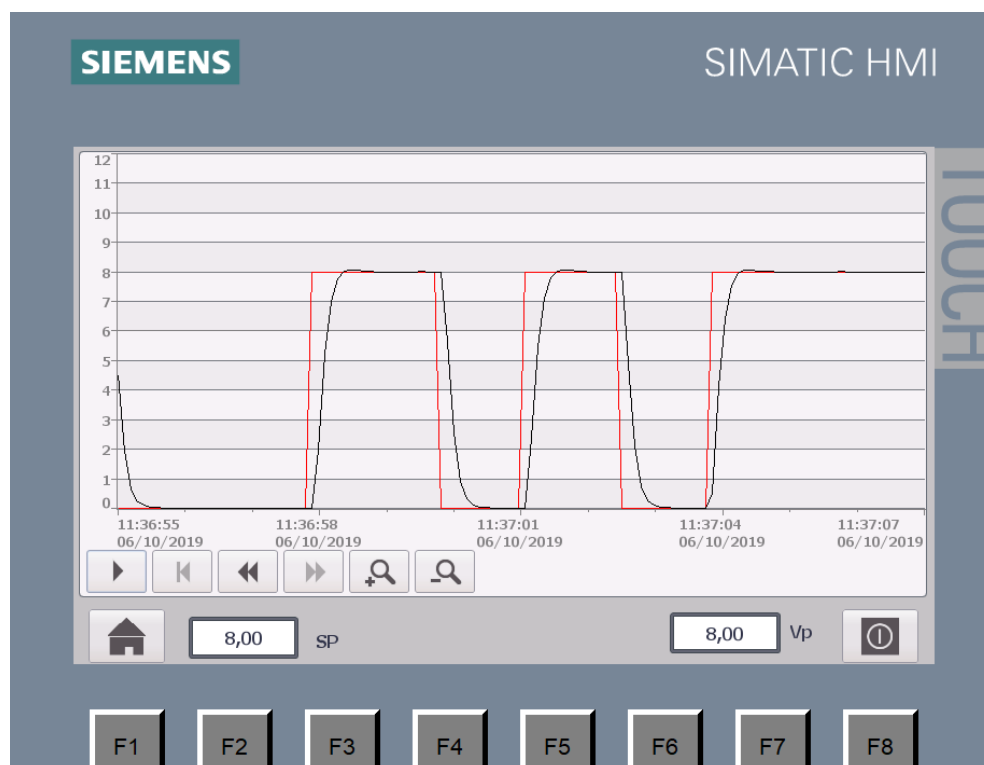
Tabla 3

*Parámetros de la autosintonía del controlador PID - Primera planta*

Ganancia Proporcional=	6.63323
Ponderación Proporcional=	0.5842182
Tiempo Integral=	0.08298299
Tiempo derivativo=	0.02222387
Kp=	3.87525369
Ki=	79.9348156
Kd=	0.14741604

Fuente: Elaboración Propia

Respuesta a un escalón de amplitud 8v



*Figura 14: Respuesta a un escalón de amplitud 8v para la primera planta*  
*Fuente: Elaboración propia*

Tiempo de establecimiento 1 segundo.

## Segundo Circuito de prueba - Segunda Planta

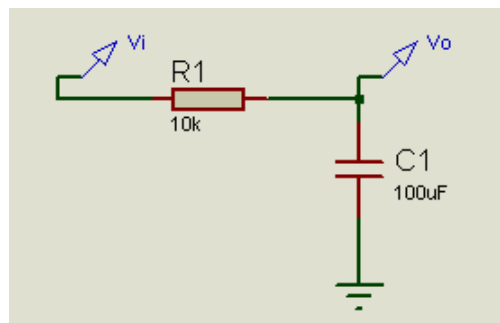


Figura 15: Segunda planta para la autosintonía del controlador PID  
Fuente: Elaboración Propia

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

La sintonía del controlador nos arroja los siguientes parámetros.

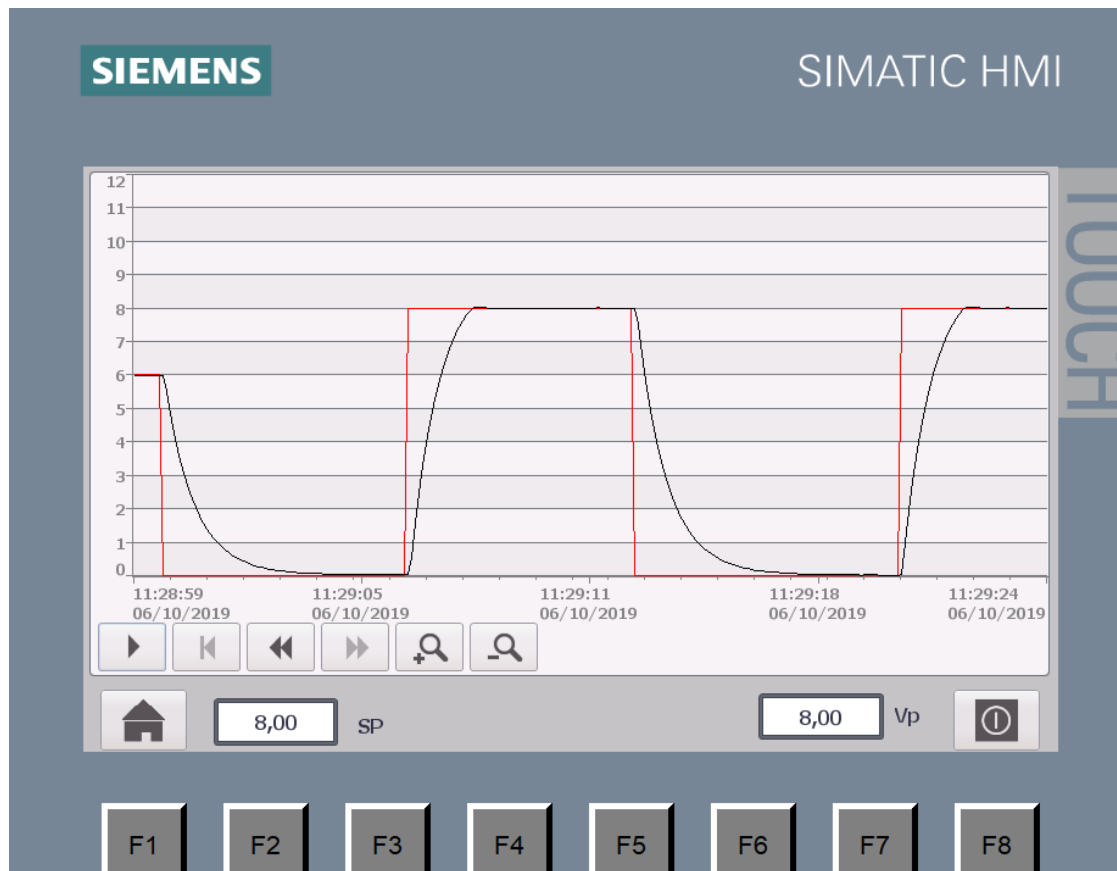
Tabla 4

Parámetros de la autosintonía del controlador PID - Segunda planta

Ganancia Proporcional=	111.6373
Ponderación Proporcional=	0.259176
Tiempo Integral=	0.150618
Tiempo derivativo=	3.81E-02
Kp=	28.9337089
Ki=	741.194943
Kd=	4.2503379

Fuente: Elaboración propia

Respuesta a un escalón de amplitud 8v



*Figura 16: Respuesta a un escalón de amplitud 8v para la segunda planta  
Fuente: Elaboración propia*

Tiempo de establecimiento 2 segundos

### Tercer circuito de prueba – Tercera Planta

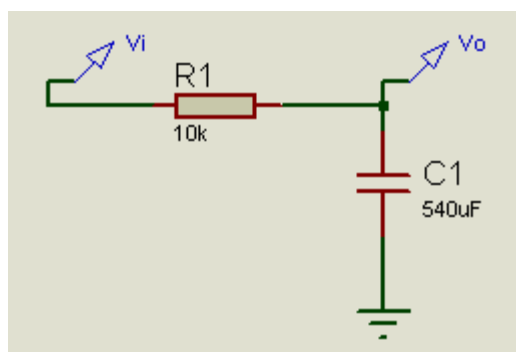


Figura 17: Tercera planta para la autosintonía del controlador PID  
Fuente: Elaboración propia

$$\frac{Vo(s)}{Vi(s)} = \frac{\frac{1}{RC}}{S + \frac{1}{RC}} = \frac{0.185}{S + 0.185}$$

La sintonía del controlador nos arroja los siguientes parámetros.

Tabla 5

Parámetros de la Auto sintonía del controlador PID - Tercera planta

Ganancia Proporcional=	728.3787
Ponderación	
Proporcional=	2.54E-01
Tiempo Integral=	1.60E-01
Tiempo derivativo=	4.06E-02
Kp=	185.185841
Ki=	4544.52473
Kd=	29.5953085

Fuente: Elaboración propia

Respuesta a un escalón de amplitud 8v

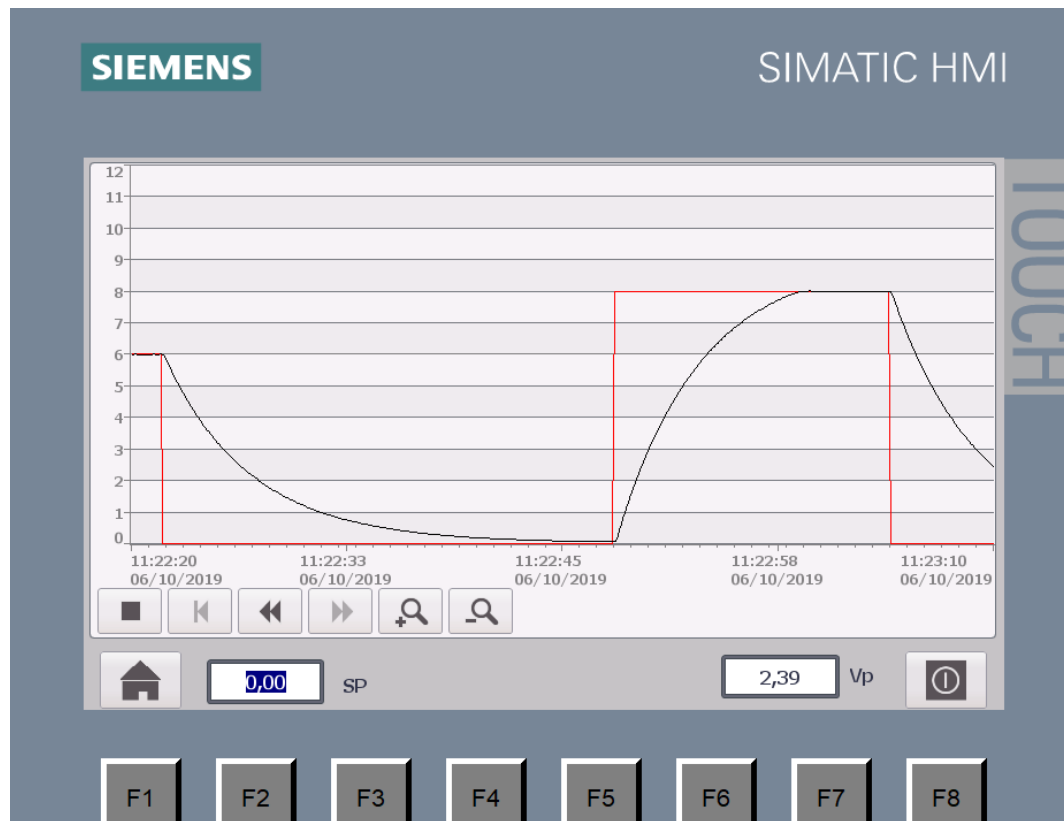


Figura 18: Respuesta a un escalón de amplitud 8v para la tercera planta  
Fuente: Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 11 segundos

Cuarto circuito de prueba – Cuarta Planta.

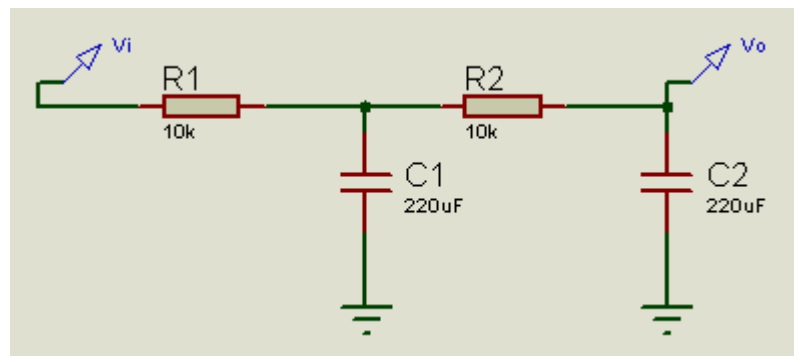


Figura 19: Cuarta planta para la autosintonía del controlador PID  
Fuente: Elaboración propia

$$\frac{Vo(s)}{Vi(s)} = \frac{\left(\frac{1}{RC}\right)^2}{s^2 + \frac{3s}{RC} + \left(\frac{1}{RC}\right)^2} = \frac{\left(\frac{1}{2.2}\right)^2}{s^2 + \frac{3s}{2.2} + \left(\frac{1}{2.2}\right)^2}$$

La sintonía del controlador nos arroja los siguientes parametros.

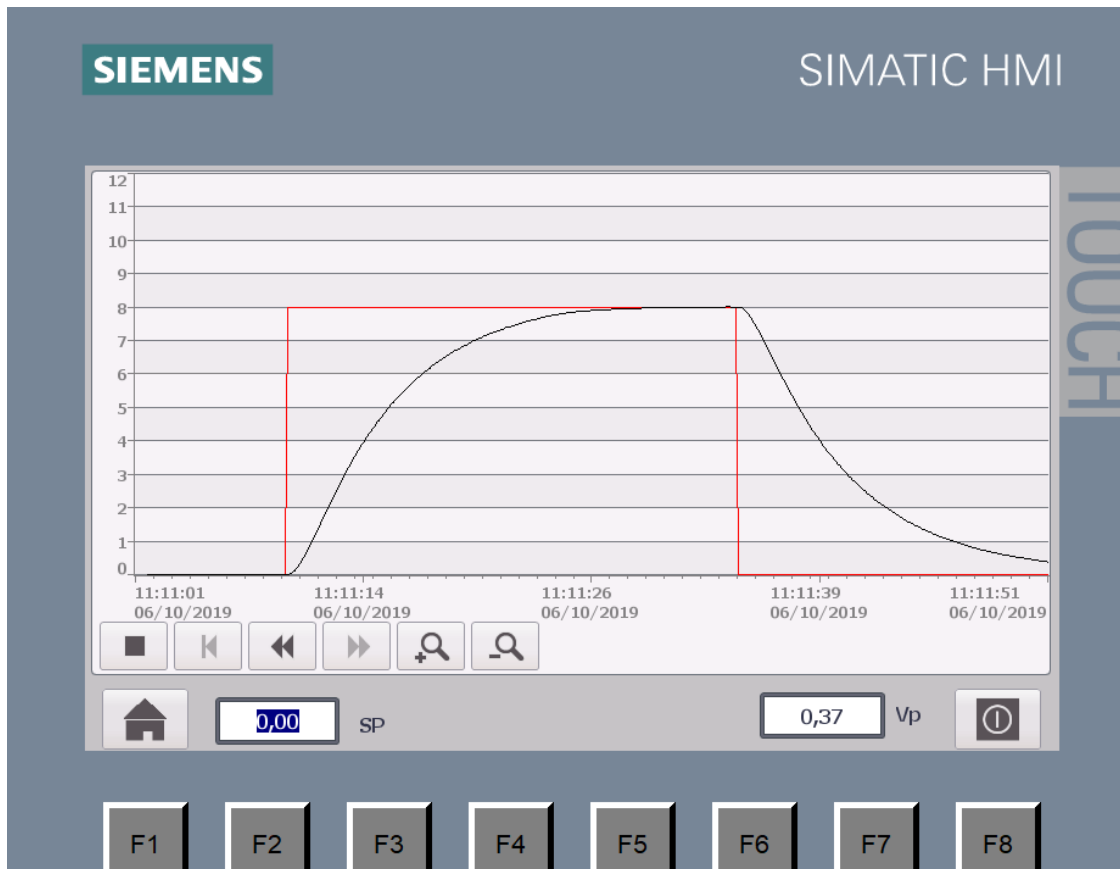
Tabla 6

*Parámetros de la autosintonía del controlador PID - Cuarta planta*

Ganancia Proporcional=	652.2029
Ponderacion Proporcional=	0.2522473
Tiempo Integral=	0.7680436
Tiempo derivativo=	0.1949615
Kp=	164.5164206
Ki=	849.1743177
Kd=	127.1544557

Fuente: Elaboración propia

Respuesta a un escalón de amplitud 8v



*Figura 20: Respuesta a un escalón de amplitud 8v para la cuarta planta  
Fuente: Elaboración propia*

Tiempo de establecimiento 20 segundos.

### **Diseño del controlador PID discreto**

Como se trata de un elemento discreto, en primer lugar, se debe de tener en cuenta que en cascada con el controlador PID debe de ir el bloque de muestreo y retención de orden cero.

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

De esta manera el controlador PID a discretizar será:



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

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

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

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

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

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

Para implementar este controlador en el PLC se tendrán en cuenta las siguientes variables.

PID DISCRETO ▶ PLC_1 [CPU 1214C AC/DC/Rly] ▶ Variables PLC								
Variables								
Variables PLC								
	Nombre	Tabla de variables	Tipo de datos	Dirección	Rema...	Acces...	Escrib.	
1	ENTRADA	Tabla de variabl...	Int	%IW64		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
2	SALIDA	Tabla de variables e..	Int	%QW80		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	AUX 1	Tabla de variables e..	Real	%MD10		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	AUX 2	Tabla de variables e..	Real	%MD14		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	SP	Tabla de variables e..	Real	%MD18		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	VP	Tabla de variables e..	Real	%MD22		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	PID(K)	Tabla de variables e..	Real	%MD26		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
8	PID(K-1)	Tabla de variables e..	Real	%MD30		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
9	PID(K-2)	Tabla de variables e..	Real	%MD34		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
10	ERROR(K)	Tabla de variables e..	Real	%MD38		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
11	ERROR(K-1)	Tabla de variables e..	Real	%MD42		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
12	ERROR(K-2)	Tabla de variables e..	Real	%MD46		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
13	KP+KD	Tabla de variables e..	Real	%MD50		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
14	KP+2KD-TsKI	Tabla de variables e..	Real	%MD54		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
15	KD	Tabla de variables e..	Real	%MD58		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
16	<Agregar>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Figura 21: Definición de variables para la implementación del controlador discreto

Fuente: Elaboración propia

Las variables AUX 1 y AUX 2 se usarán para escalar las variables de ENTRADA y SALIDA.

- La variable SP usada para ingresar el Set Point desde el HMI.
- La variable VP es la que se obtiene de la planta, esta es normalizada y escalada por Entrada.
- La variable PID(K) es el valor actual del controlador PID y es normalizado y escalado por SALIDA.
- Las variables PID(K-1) y PID(K-2) son los valores del controlador PID anterior y tras anterior.
- ERROR(K) es el valor actual del Error que es calculado como la diferencia de SP-VP.

- f) Las variables  $ERROR(K-1)$  y  $ERROR(K-2)$  son los valores del error anterior y tras anterior.
- g) La variable  $KP+KD$  es el coeficiente del error actual.
- h) La variable  $KP+2KD-TsKI$  es el coeficiente del error anterior.
- i) La variable  $KD$  es el coeficiente del error tras anterior.

La programación se realizó en 2 bloques, el primero es el bloque principal y el segundo es un bloque de interrupción cíclica con un tiempo de muestreo de 10 milisegundos.

En la figura siguiente se muestra la implementación en el bloque principal donde se escala la variable  $VP$  en función de la entrada  $IW64$  y luego se escala la Salida en función de la variable  $PID(K)$ .

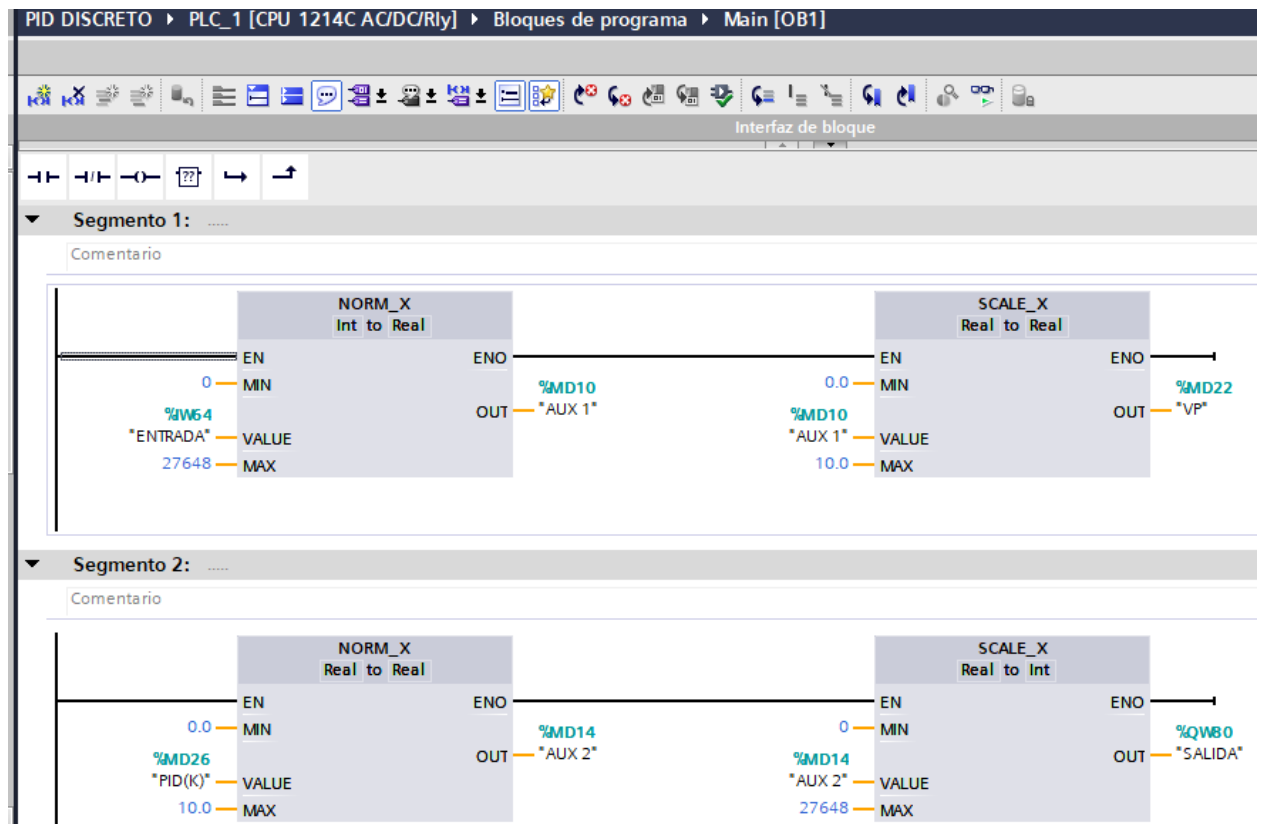


Figura 22: Implementación del bloque principal y bloque de interrupción cíclica en TIA Portal  
Fuente: Elaboración propia

En el bloque de interrupción cíclica se desarrolla el controlador PID discreto, las condicionales no permiten que la variable PID(K) no se desborde, esta estará acotada

entre:

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

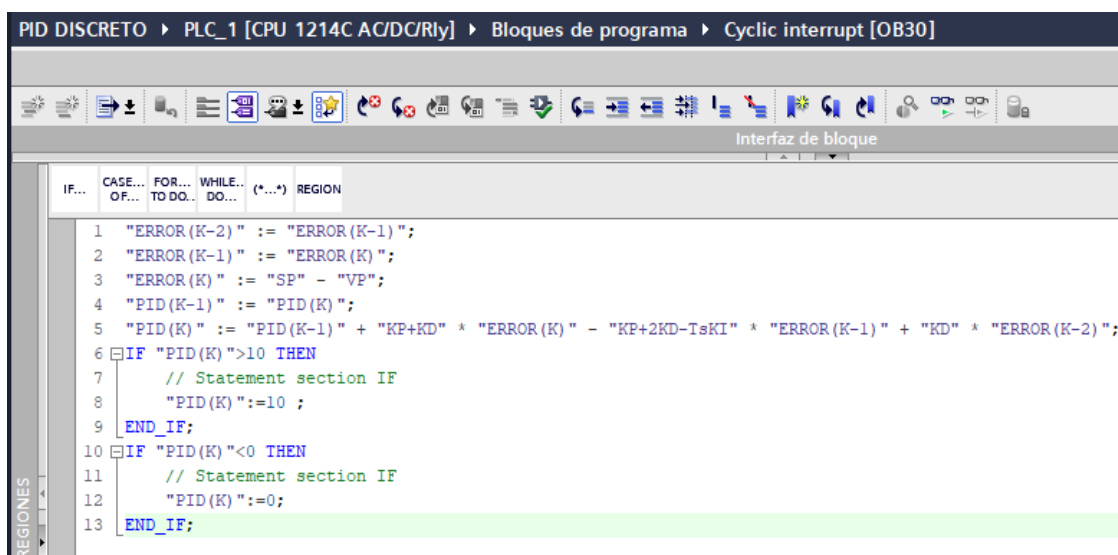


Figura 23: Programación del controlador PID discreto en SCL  
Fuente: Elaboración propia

La interface HMI permite ingresar el Set Point y los parámetros del controlador PID discreto, esto se puede observar en el siguiente gráfico.

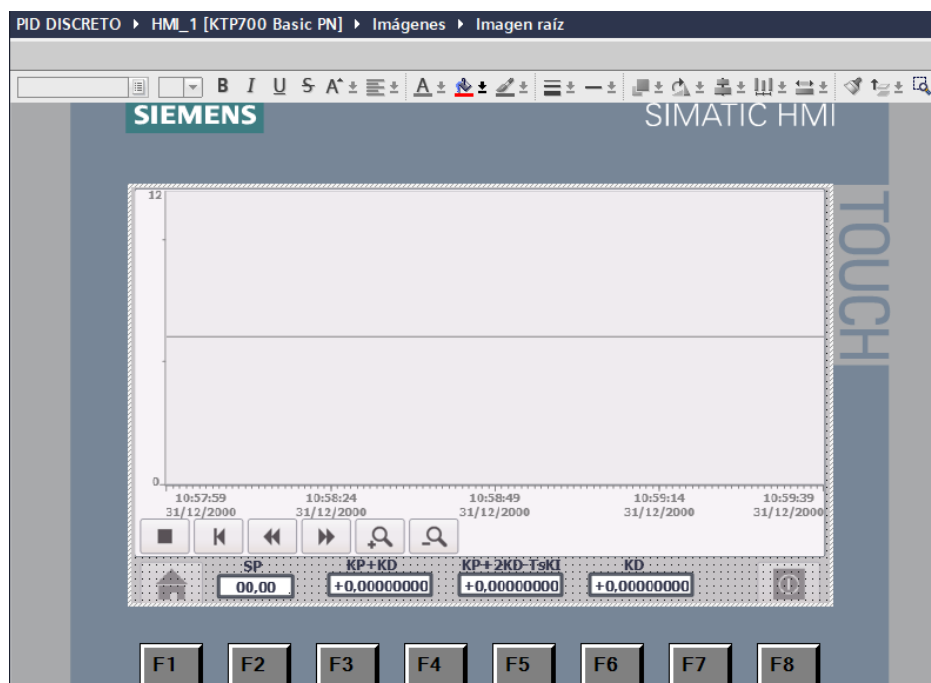


Figura 24: Configuración de los parámetros del controlador en HMI  
Fuente: Elaboración propia

Implementación del primer circuito.

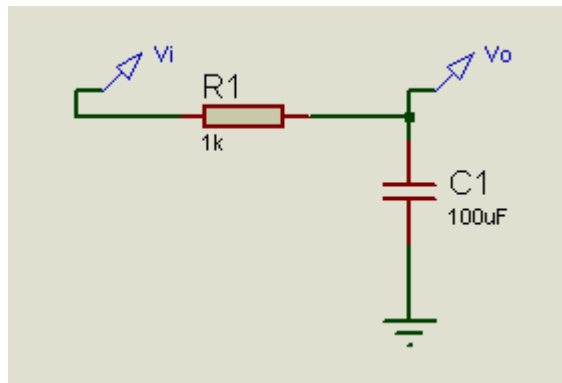


Figura 25: Primer circuito para el diseño del controlador discreto  
Fuente: Elaboración propia

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

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

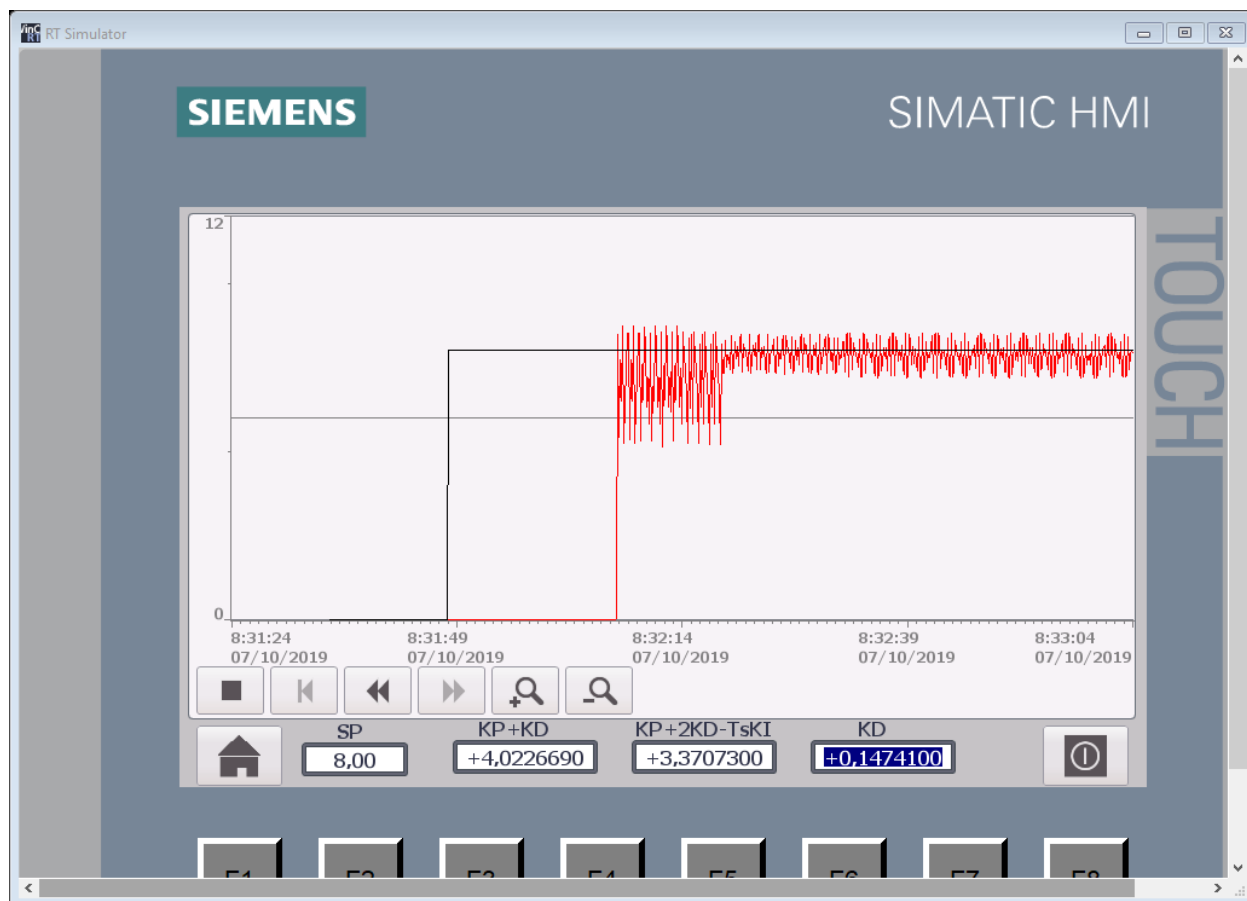
Tabla 7

Datos del PID del PLC – PID Discreto del primer circuito

DATOS PID PLC	
Kp=	3.87525369
Ki=	79.9348156
Kd=	0.14741604
DATOS PID DISCRETO	
Ts	0.01
kp+kd	4.02266973
kp+2kd-Ts ki	3.37073762
kd	0.14741604

Fuente: Elaboración propia

Se obtiene la siguiente gráfica.



*Figura 26: Respuesta del controlador discreto con los datos de la tabla 7*  
*Fuente: Elaboración propia*

Se puede observar que el controlador no se comporta como el controlador PID del PLC

Implementación del segundo circuito.

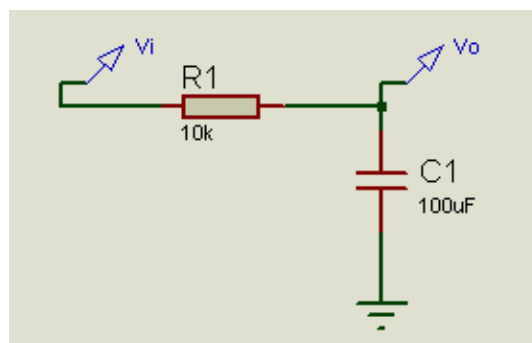


Figura 27: Segundo circuito para el diseño del controlador discreto

Fuente: Elaboración propia

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

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

Tabla 8

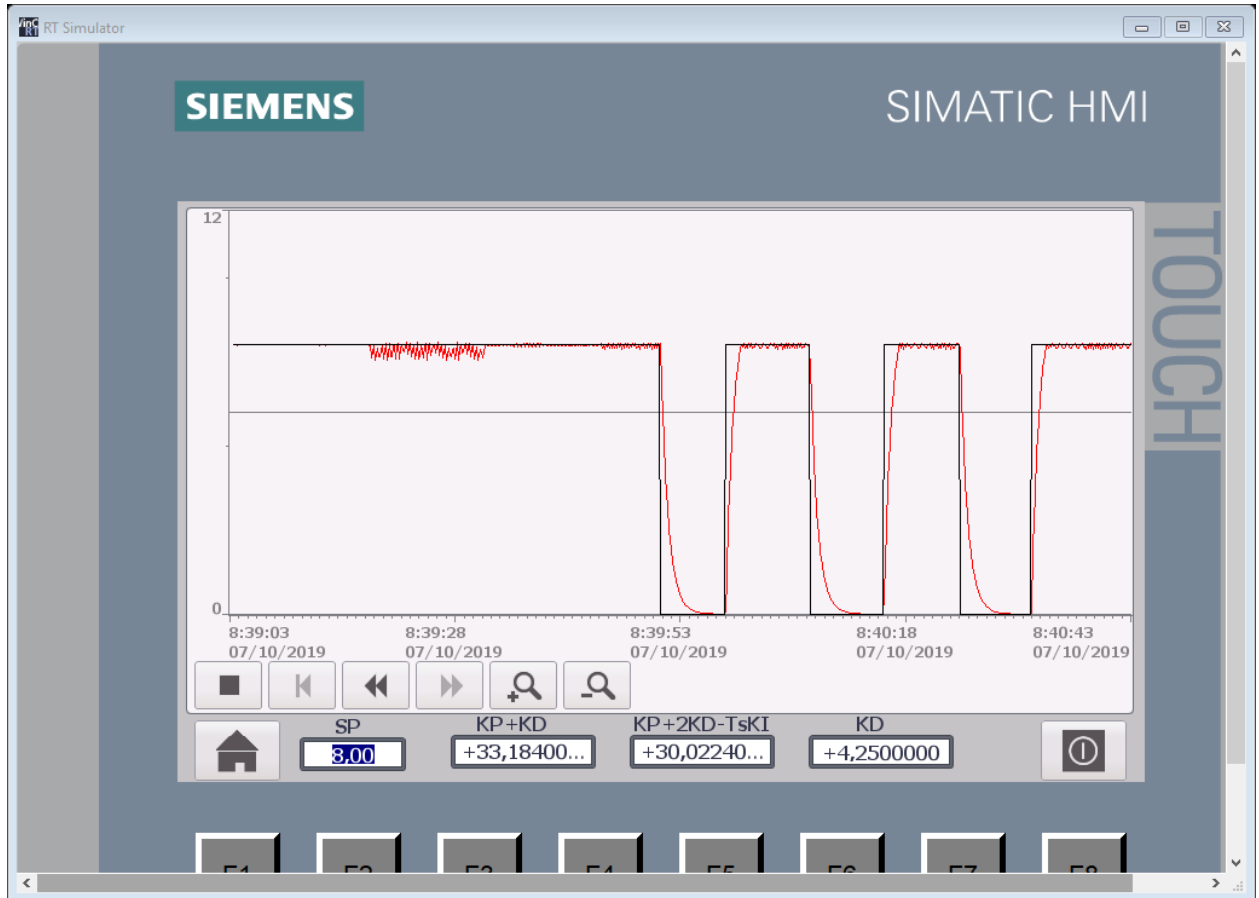
Datos del PID del PLC – PID Discreto del segundo circuito

DATOS PID PLC	
Kp=	28.9337089
Ki=	741.194943
Kd=	4.2503379
DATOS PID DISCRETO	
Ts	0.01
kp+kd	33.1840468
kp+2kd-Ts ki	30.0224352
kd	4.2503379

Fuente: Elaboración propia



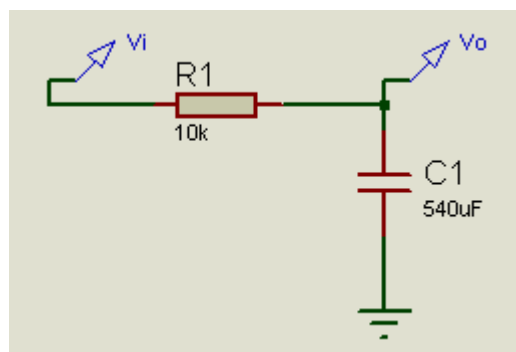
Se obtiene la siguiente gráfica.



*Figura 28: Respuesta del controlador discreto con los datos de la tabla 8  
Fuente: Elaboración propia*

Se tiene un tiempo de establecimiento de 2 segundos.

Implementación del tercer circuito de prueba.



*Figura 29: Tercer circuito para el diseño del controlador discreto*  
Fuente: Elaboración propia

$$\frac{Vo(s)}{Vi(s)} = \frac{0.185}{s + 0.185}$$

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

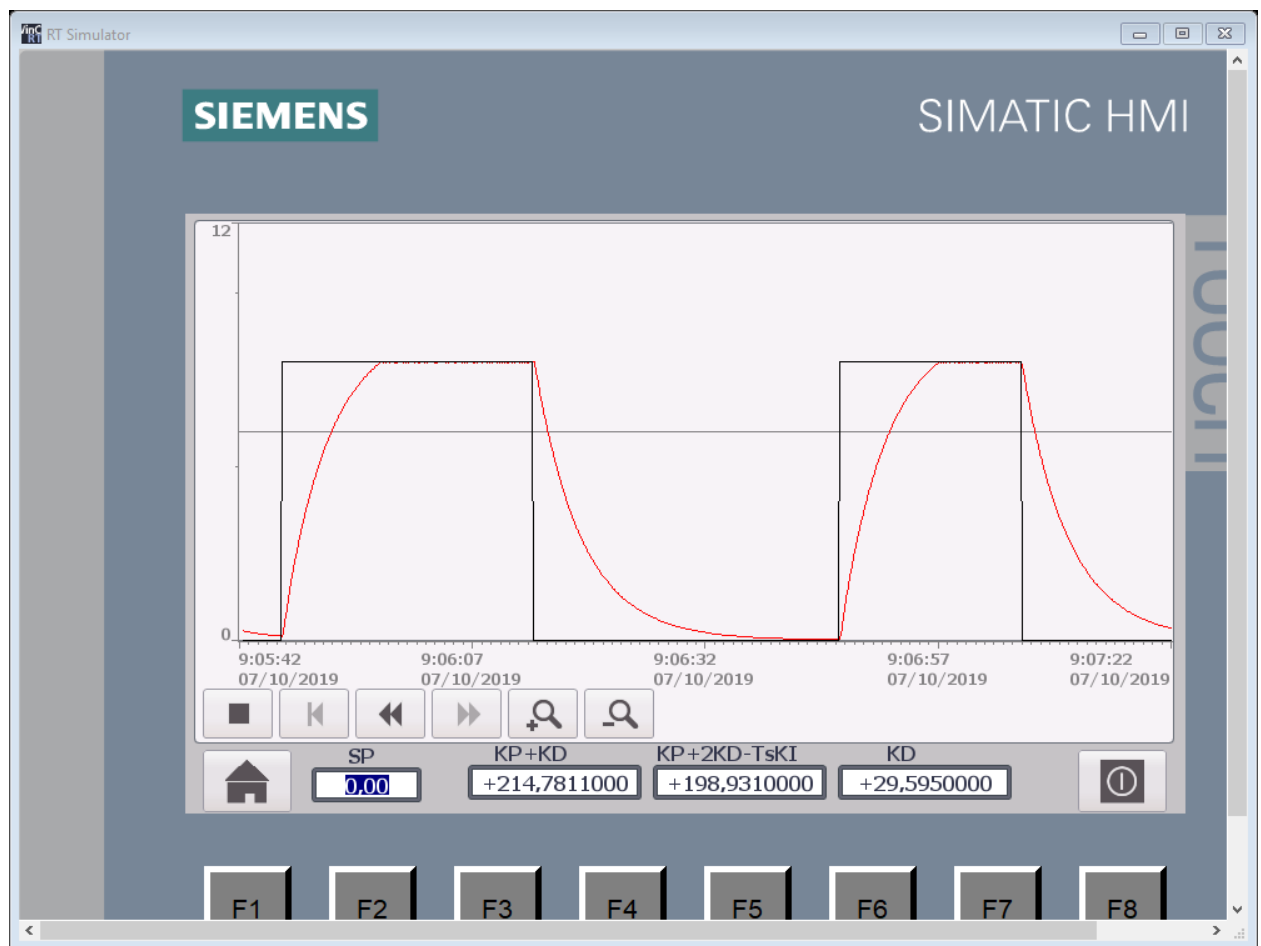
Tabla 9

*Datos del PID del PLC – PID discreto del tercer circuito*

DATOS PID PLC	
Kp=	185.185841
Ki=	4544.52473
Kd=	29.5953085
DATOS PID DISCRETO	
Ts=	0.01
kp+kd=	214.78115
kp+2kd-Ts ki=	198.931211
kd=	29.5953085

Fuente: Elaboración propia

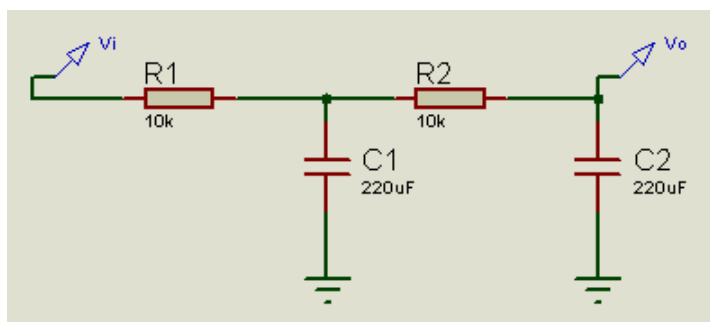
La respuesta del controlador es:



*Figura 30: Respuesta del controlador discreto con los datos de la tabla 9*  
*Fuente: Elaboración propia*

Tiempo de establecimiento 12 segundos.

Implementación del cuarto circuito de prueba.



*Figura 31: Cuarto circuito para el diseño del controlador discreto*  
*Fuente: Elaboración propia*

$$\frac{Vo(s)}{Vi(s)} = \frac{\left(\frac{1}{2.2}\right)^2}{s^2 + \frac{3s}{2.2} + \left(\frac{1}{2.2}\right)^2}$$

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

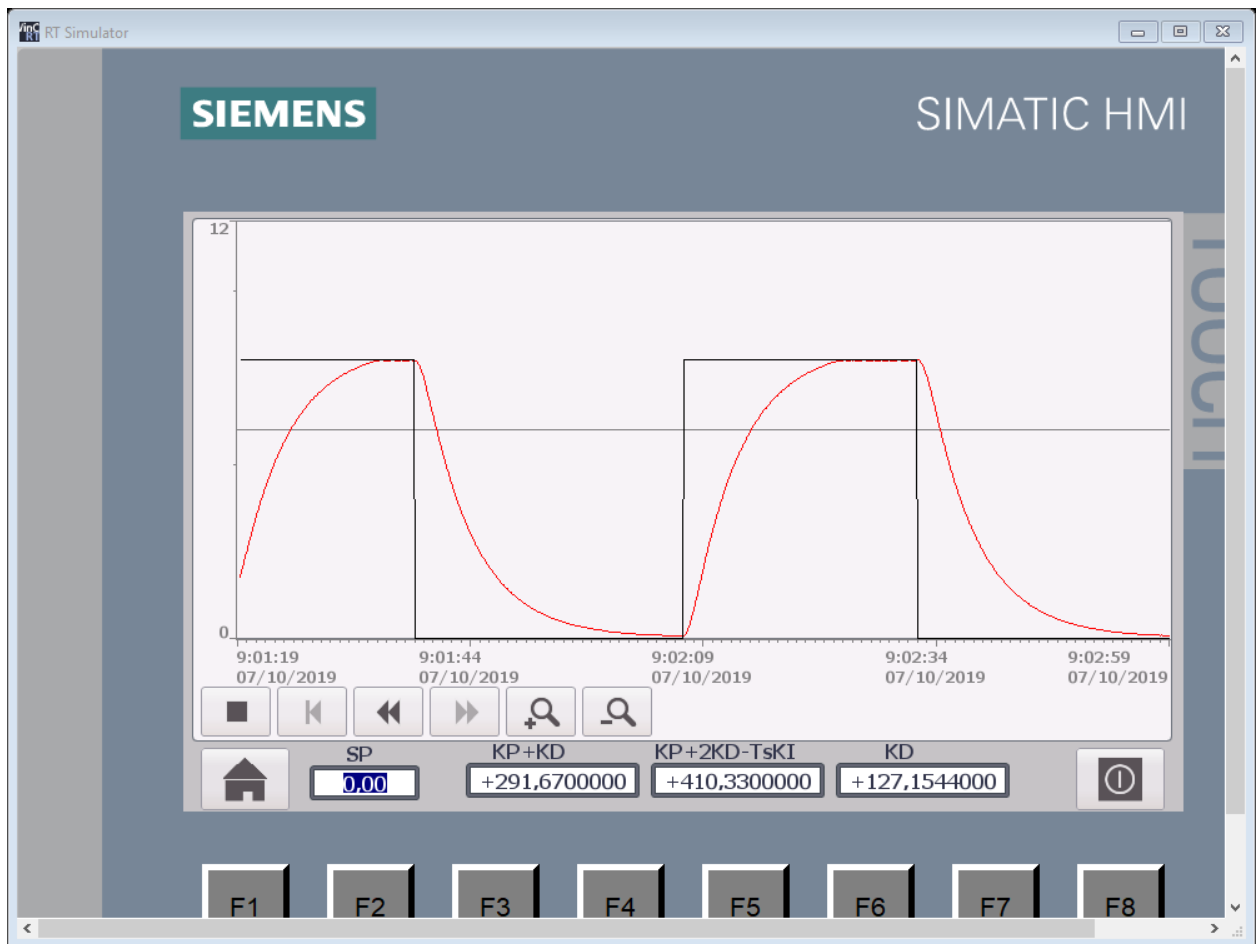
Tabla 10

*Datos del PID del PLC – PID discreto del cuarto circuito*

DATOS PID PLC	
Kp=	164.5164206
Ki=	849.1743177
Kd=	127.1544557
DATOS PID DISCRETO	
Ts=	0.01
kp+kd=	291.6708763
kp+2kd-Ts ki=	410.3335888
kd=	127.1544557

Fuente: Elaboración propia

La respuesta del controlador PID discreto es.



*Figura 32: Respuesta del controlador discreto con los datos de La tabla 10  
Fuente: Elaboración propia*

Tiempo de establecimiento 17 segundos.

Probaremos ahora con una sintonía analítica para un control PI aplicado a una planta de primer orden.

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

$$s^2 + as + kpb s + bki = 0 \Rightarrow s^2 + s(a + b kp) + bki = 0$$

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

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

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

$$Ts < \frac{2}{10(a + b kp)}$$

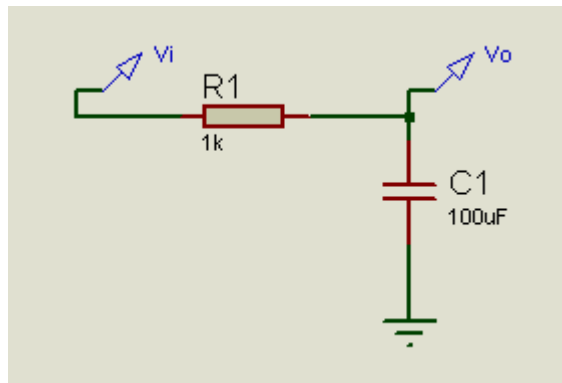
$$\frac{PID(s)}{ERROR(s)} = kp + \frac{ki}{s} \Leftrightarrow \frac{PID(z)}{ERROR(z)} = (1 - z^{-1})Z \left\{ \frac{kp}{s} + \frac{ki}{s^2} \right\}$$

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

$$\frac{PID(z)}{ERROR(z)} = \frac{kp - z^{-1}(kp - kiTs)}{1 - z^{-1}}$$

$$PID(k) = PID(k-1) + kp ERROR(k) - (kp - kiTs) ERROR(k-1)$$

Para el primer circuito



*Figura 33: Primera planta para el controlador con los valores de 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  $k_i = 3.03$

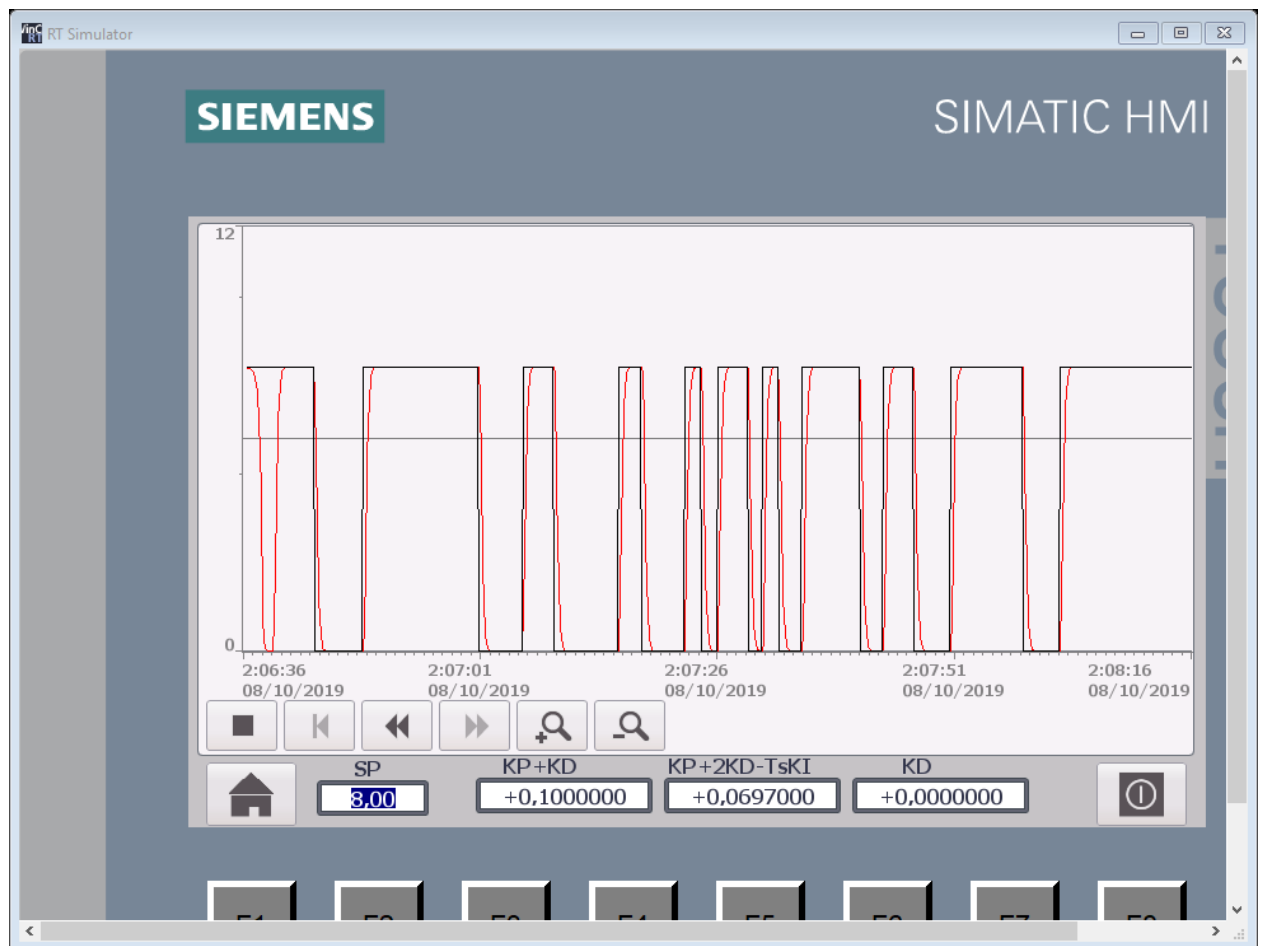
Tabla 11

*Datos del Controlador para un Polo En 5.5*

$T_s =$	0.01
$k_p - k_i T_s =$	0.069700
$k_p =$	0.1

Fuente: Elaboración Propia

Se tiene la siguiente gráfica.

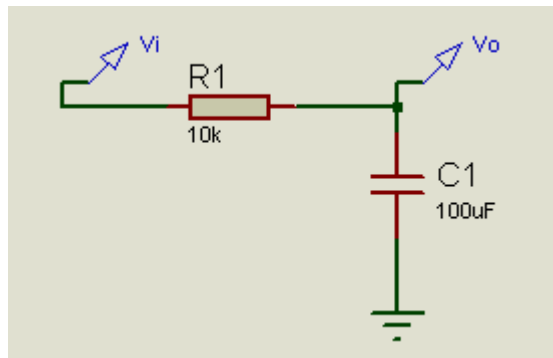


*Figura 34: Respuesta a un escalón de amplitud 8v con los datos obtenidos de la tabla 11  
Fuente: Elaboración propia*

Tiempo de establecimiento 1segundo



Para el segundo circuito.



*Figura 35: Segunda planta para el controlador con los valores de 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  $k_i = 2.3$

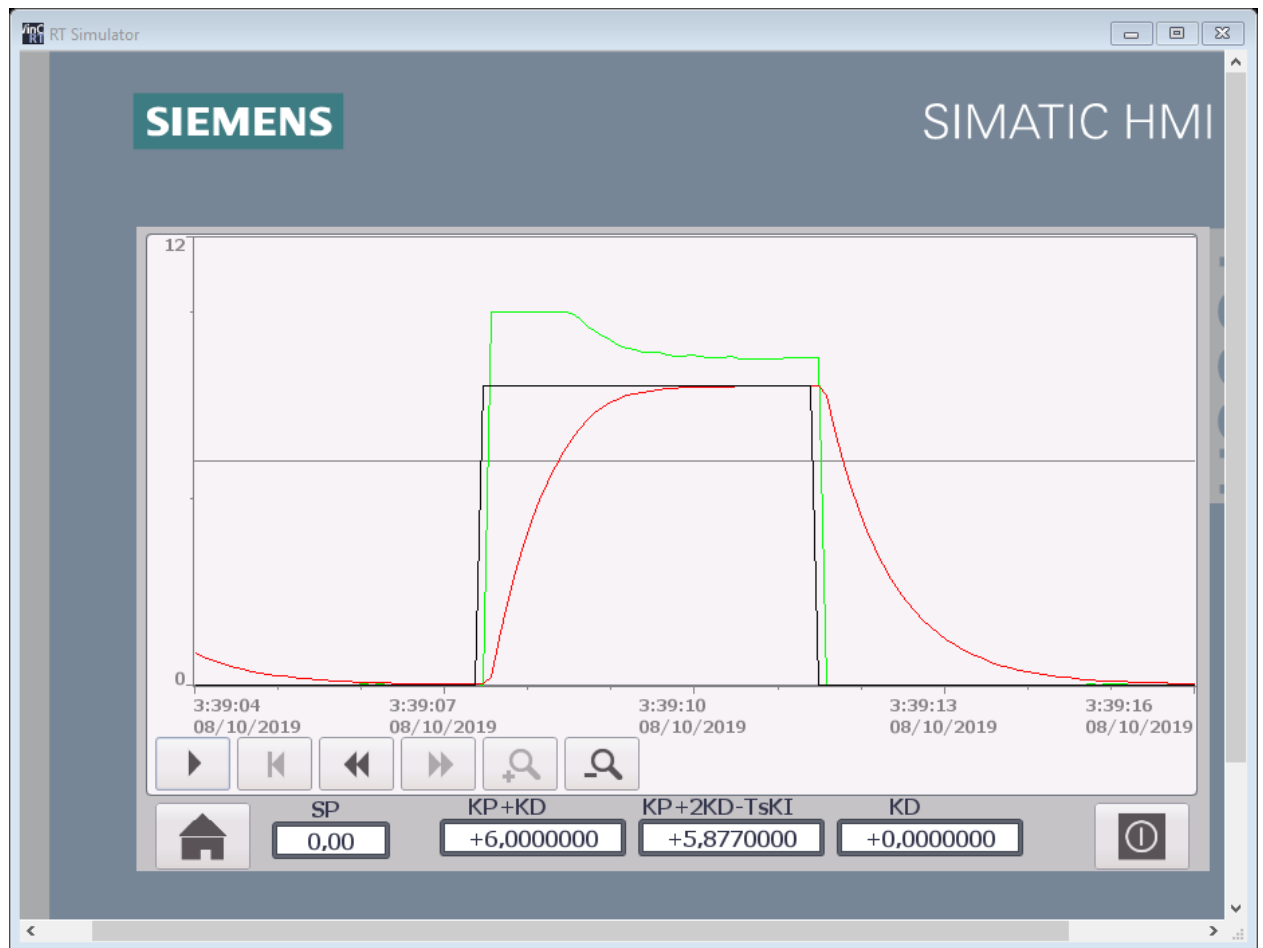
Tabla 12

*Datos del controlador para un polo en 3.5*

$T_s =$	0.01
$k_p - k_i T_s =$	5.877000
$k_p =$	6

Fuente: Elaboración propia

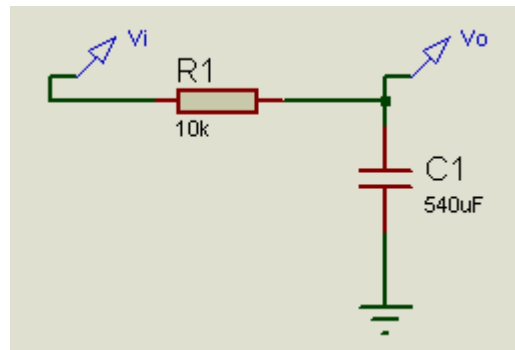
Se tiene la siguiente gráfica.



*Figura 36: Respuesta a un escalón de amplitud 8v con los datos obtenidos de la tabla 12*  
*Fuente: Elaboración propia*

Tiempo de establecimiento 2 segundos.

Para el tercer circuito.



*Figura 37: Tercera planta para el controlador con los valores de 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  $k_i = 1.4$

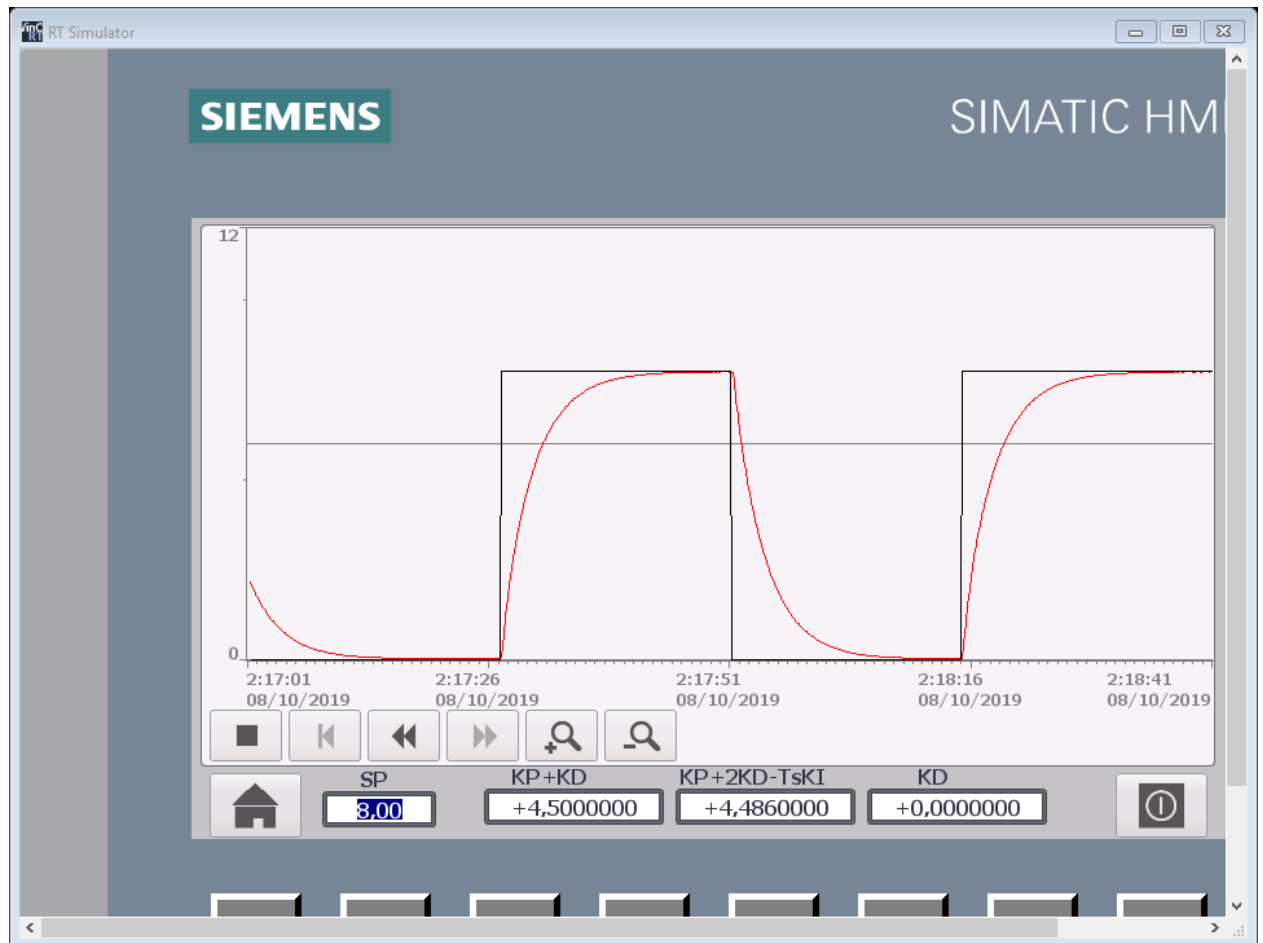
Tabla 13

*Datos del controlador para un polo en 0.50875*

$T_s =$	0.01
$k_p - k_i T_s =$	4.486000
$k_p =$	4.5

Fuente: Elaboración propia

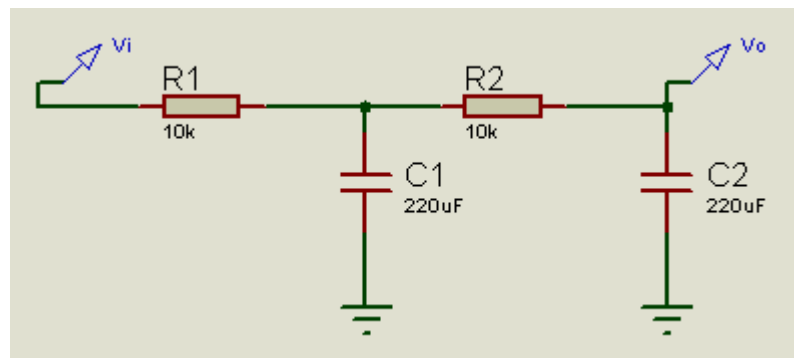
Se tiene la siguiente gráfica.



*Figura 38: Respuesta al escalón de amplitud 8v con los datos obtenidos de la tabla 13*  
*Fuente: Elaboración propia*

Tiempo de establecimiento 11 segundos

Para el cuarto circuito de prueba.



*Figura 39: Cuarta planta para el controlador con los valores de sintonía analítica  
Fuente: Elaboración propia*

$$\frac{Vo(s)}{Vi(s)} = \frac{\left(\frac{1}{2.2}\right)^2}{s^2 + \frac{3s}{2.2} + \left(\frac{1}{2.2}\right)^2}$$

Como se trata de un circuito de segundo orden se implementará con controlador PID.

$$\left(k_p + \frac{k_i}{s} + s k_d\right) \left(\frac{a}{(s^2 + bs + c)}\right) + 1 = 0 \quad \text{ECUACION CARACTERISTICA}$$

$$s(s^2 + bs + c) + s^2 k_d a + s k_p a + a k_i = s^3 + s^2 b + sc + s^2 k_d a + s k_p a + a k_i = 0$$

$$s^3 + s^2(b + k_d a) + s(c + k_p a) + a k_i = 0$$

$$s^3 + s^2(b + k_d a) + s(c + k_p a) + a k_i \left| \frac{(s + x)}{s^2 + s(b + k_d a - x) + (c + k_p a - x(b + k_d a - x))} \right\rangle$$

$$s^2(b + k_d a - x) + s(c + k_p a)$$

$$s^2(b + k_d a - x) + s x(b + k_d a - x)$$

$$s[c + k_p a - x(b + k_d a - x)] + a k_i$$

$$s[c + k_p a - x(b + k_d a - x)] + x[c + k_p a - x(b + k_d a - x)]$$

$$a k_i - x[c + k_p a - x(b + k_d a - x)]$$

$$a k_i - x[c + k_p a - x(b + k_d a - x)] = 0 \Rightarrow k_i = \frac{x[c + k_p a - x(b + k_d a - x)]}{a} \quad \dots (1)$$

$$s^2 + s(b + k_d a - x) + (c + k_p a - x(b + k_d a - x)) = 0$$

$$s = -\frac{(b + k_d a - x)}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{(b + k_d a - x)}{2}\right)^2 - (c + k_p a - x(b + k_d a - x))}$$

$$\frac{(b + k_d a - x)}{2} \geq x \Rightarrow k_d \geq \frac{3x - b}{a} \quad \dots (2)$$

$$(c + k_p a - x(b + k_d a - x)) \geq \left(\frac{(b + k_d a - x)}{2}\right)^2$$

$$k_p \geq \frac{\left(\frac{(b + k_d a - x)}{2}\right)^2 + x(b + k_d a - x) - c}{a} \quad \dots (3)$$

$$a = \left(\frac{1}{2.2}\right)^2, \quad b = \left(\frac{3}{2.2}\right), \quad c = \left(\frac{1}{2.2}\right)^2$$

Para tener un polo real en -1 y polos imaginarios en  $-1 \pm 0.063j$

entonces  $k_p = 13.7$ ,  $k_i = 4.94$  y  $k_d = 8$

Por lo tanto, los parámetros del controlador PID discreto serán.

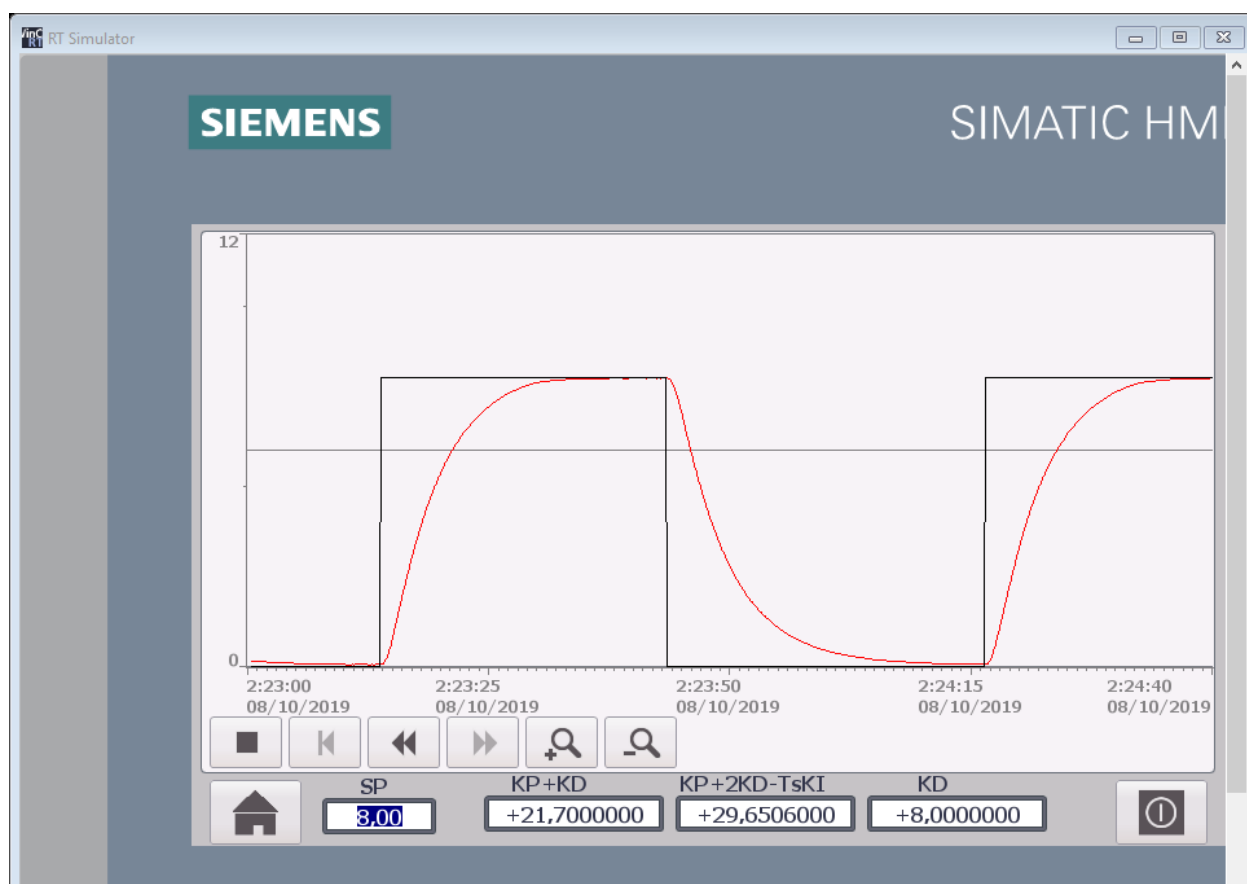
Tabla 14

*Parámetros del controlador PID discreto*

$T_s=$	0.01
$k_p+k_d=$	21.7
$2k_d+k_p-T_s k_i=$	29.6506
$k_d=$	8

Fuente: Elaboración propia

Se tiene la siguiente gráfica.



*Figura 40: Respuesta a un escalón de amplitud 8v con los parámetros del controlador PID discreto*

Fuente: Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 20 segundos.

### 3.5. Procesamiento y análisis de datos

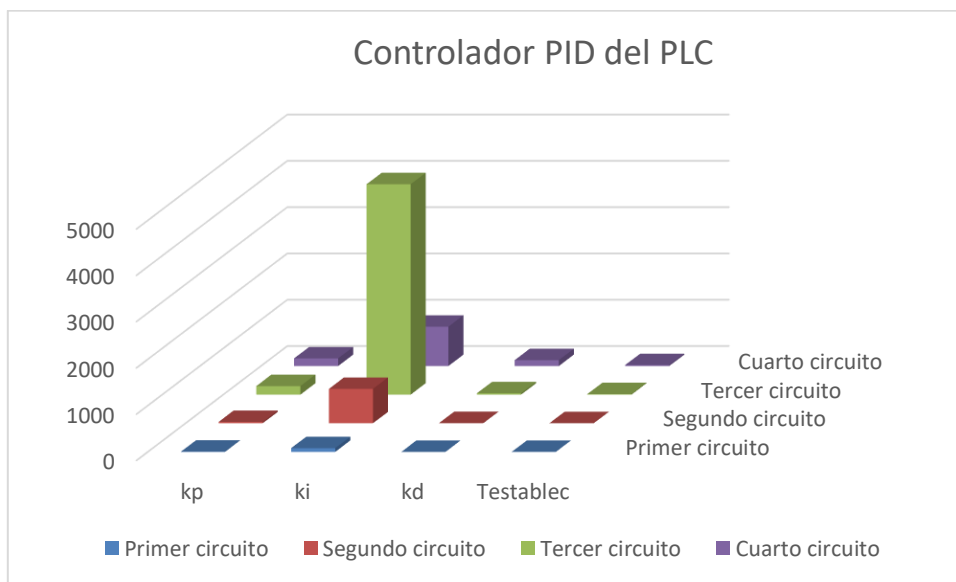
#### 3.5.1. Datos del controlador PID del PLC

Tabla 15

*Datos del controlador PID del PLC y tiempo de establecimiento*

$kp$	$ki$	$kd$	$T_{establec}$
3.87525369	79.9348156	0.14741604	1
28.9337089	741.194943	4.2503379	1.8
185.185841	4544.52473	29.5953085	11
164.516421	849.174318	127.154456	20

Fuente: Elaboración propia



*Figura 41: Gráfica del controlador PID del PLC*

Fuente: Elaboración propia



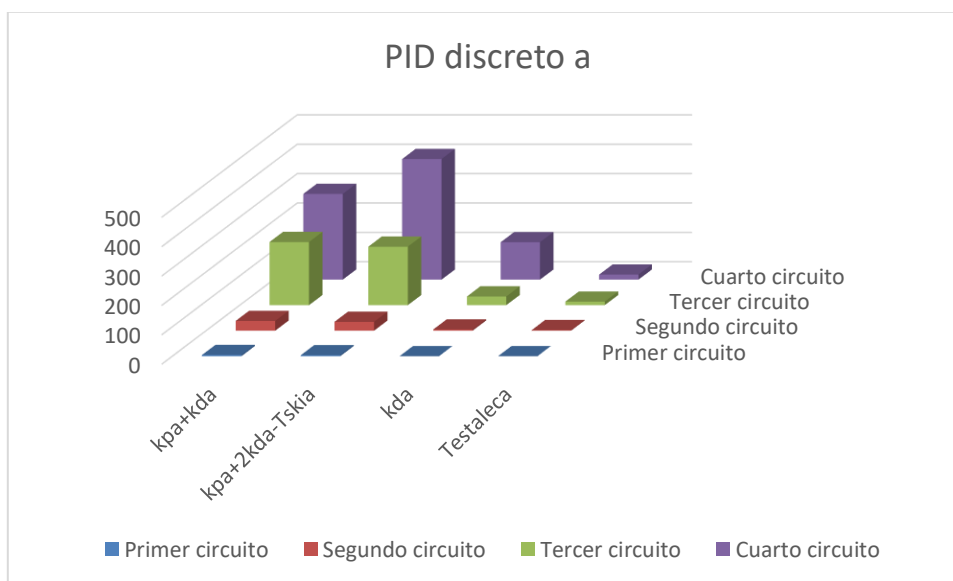
### 3.5.2. Datos del controlador discreto

Tabla 16

*Datos del controlador discreto con los datos de autosintonía del PLC*

kpa+kda	kpa+2kda-Tskia	kda	Testablec
4.02266973	3.37073762	0.14741604	1000000
33.1840468	30.0224352	4.2503379	2
214.78115	198.931211	29.5953085	12
291.670876	410.333589	127.154456	17

Fuente: Elaboración propia



*Figura 42: Gráfica del controlador discreto*  
Fuente: Elaboración propia

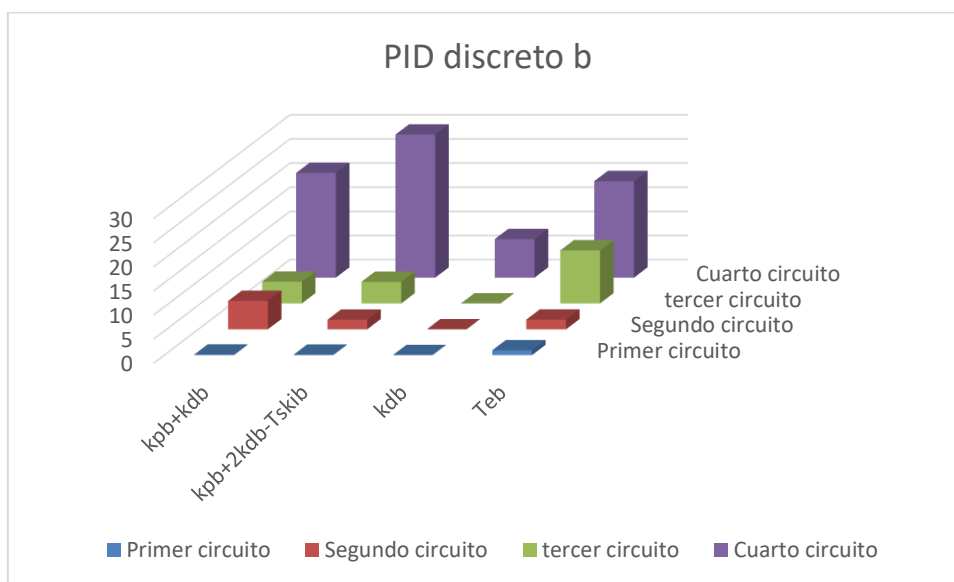
### 3.5.3. Datos del controlador discreto con sintonía analítica.

Tabla 17

*Datos del controlador discreto con sintonía analítica*

kpb+kdb	kpb+2kdb-Tskib	kdb	Teb
0.1	0.0697	0	1
5.877	1.977	0	2
4.5	4.486	0	11
21.7	29.6506	8	20

Fuente: Elaboración propia



*Figura 43: Gráfica del controlador discreto con sintonía analítica*  
Fuente: Elaboración propia

### 3.5.4. Comparación de los parámetros del controlador discreto

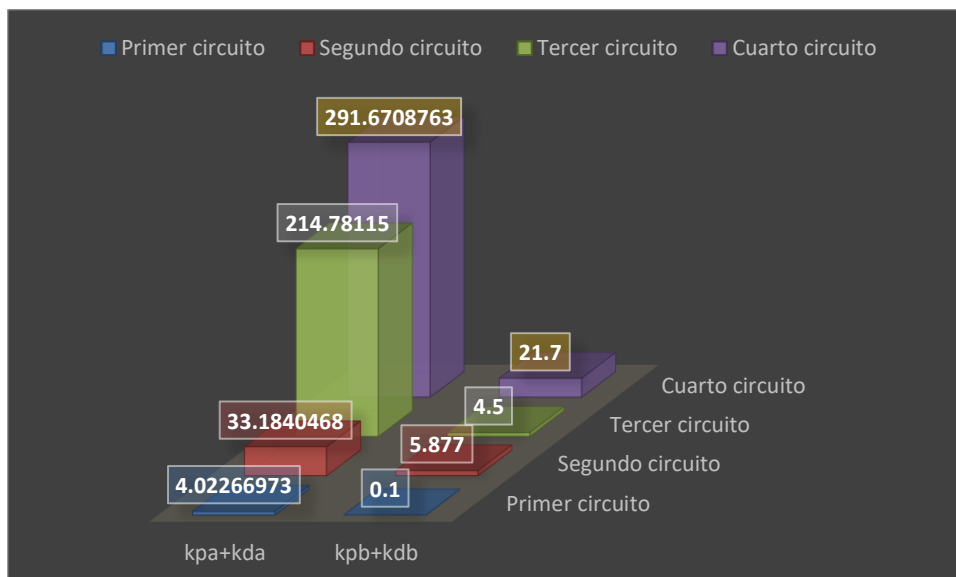


Figura 44: Comparación de los parámetros  $Kpa+Kda$  vs  $Kpb+Kdb$   
Fuente: Elaboración propia

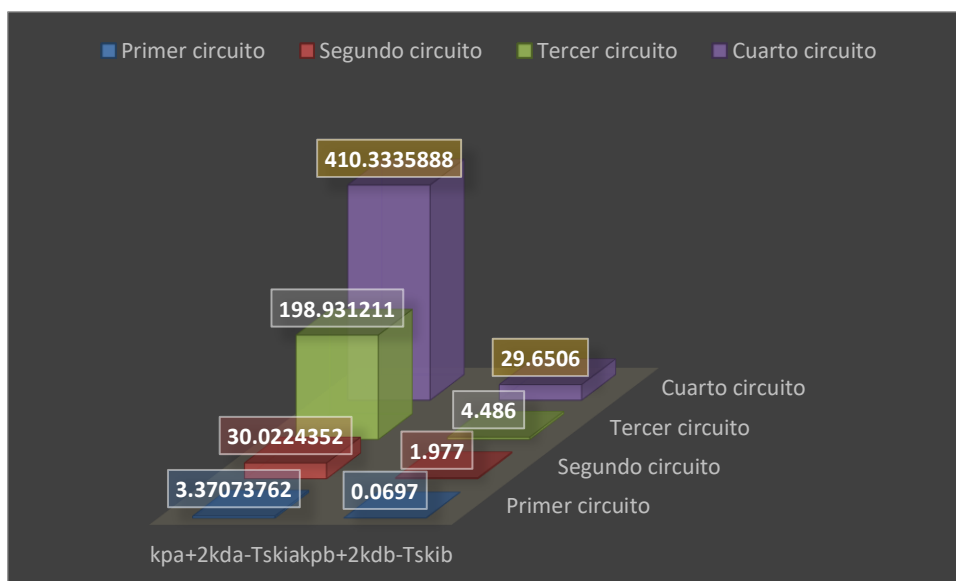
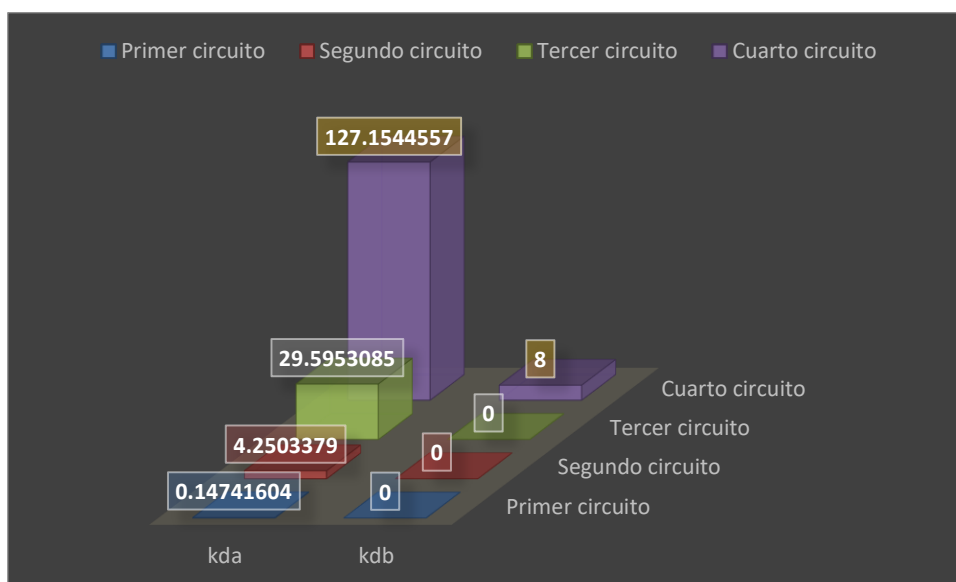
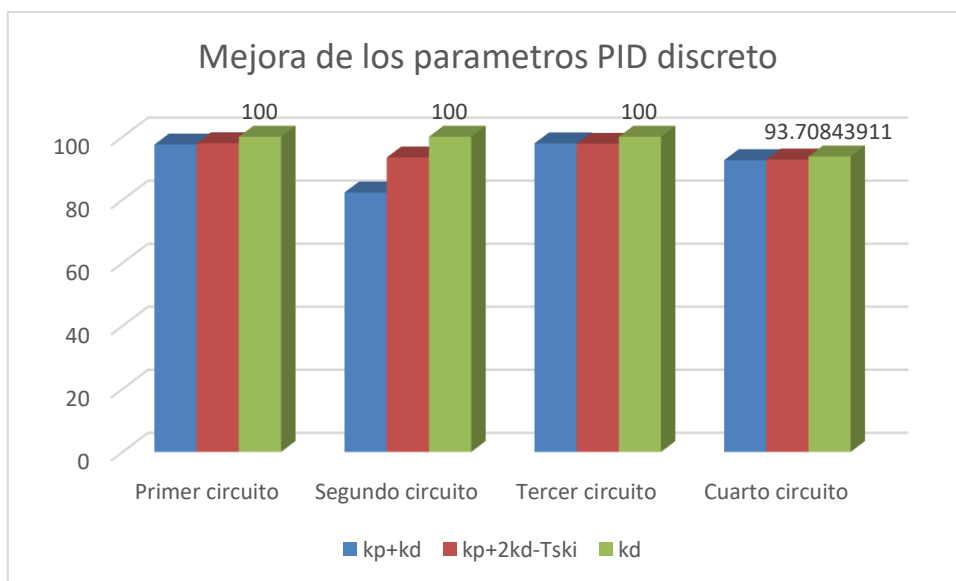


Figura 45: Comparación de los parámetros  $Kpa+2kda-Tskia$  Vs  $Kpb+2kdb-Tskib$   
Fuente: Elaboración propia



*Figura 46: Comparación de los parámetros Kda vs Kdb*  
*Fuente: Elaboración propia*

### 3.5.5. Gráfico de la mejora en el cálculo de parámetros para el controlador discreto.



*Figura 47: Mejora de los parámetros del PID discreto*  
*Fuente: Elaboración propia*

#### IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Desarrollo de la discretización del controlador PID analógico

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

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

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

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

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

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

El número de bloques del controlador PID son 4, esto se evidencia en el siguiente gráfico.

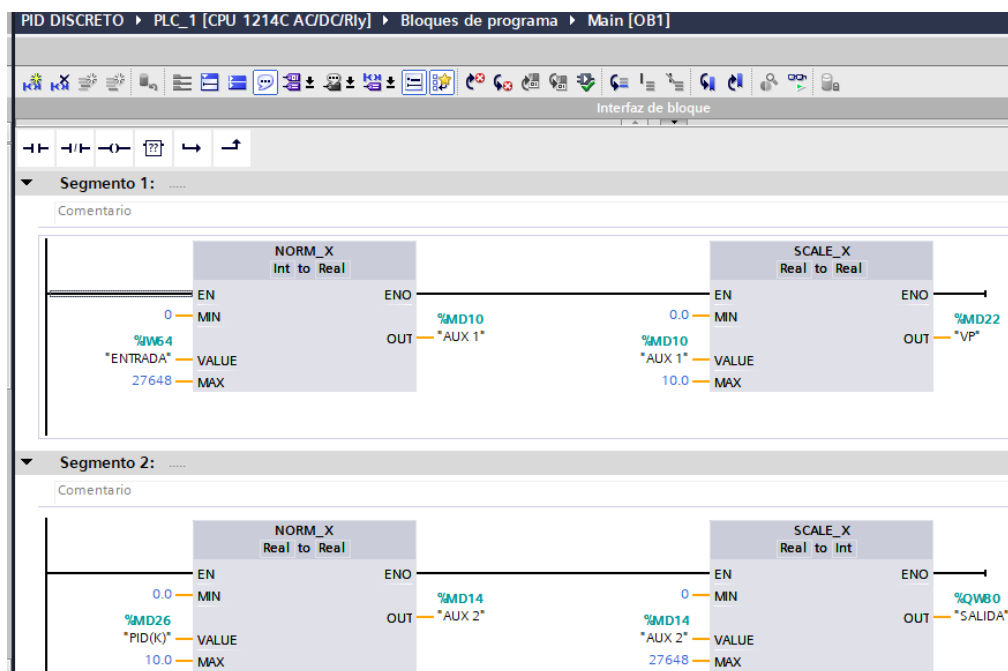


Figura 48: Configuración de los bloques del controlador PID  
Fuente: Elaboración propia

Para la programación del controlador PID discreto se utilizó un bloque de interrupción cíclica con 13 líneas de sentencia y el tiempo de interrupción fue de 10ms.

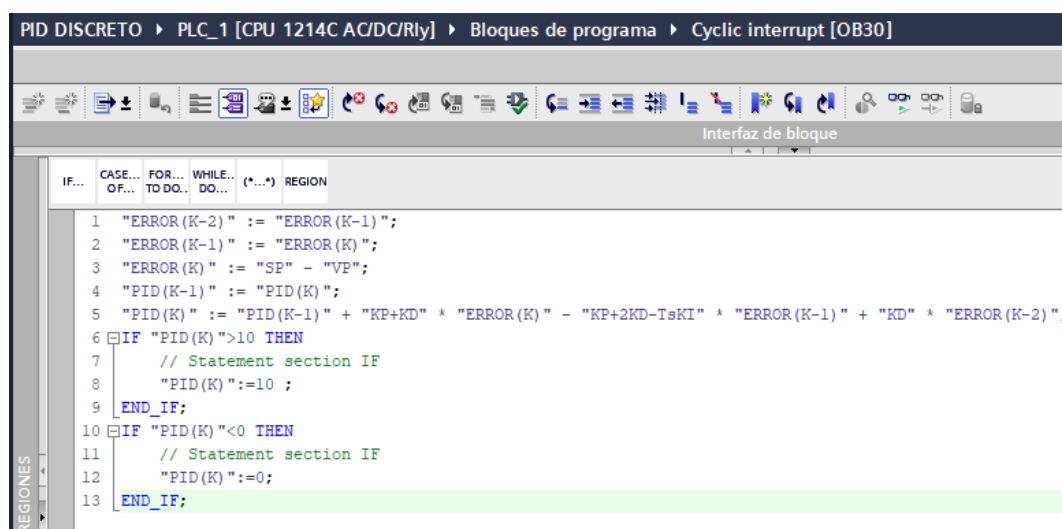


Figura 49: Programación del controlador PID discreto en lenguaje SCL  
Fuente: Elaboración propia

Los tiempos de establecimiento para dada circuito propuesto son.

Tiempos de establecimientos con el PID del PLC.

La tabla 18 muestra los valores de la constante proporcional, derivativa e integral que nos arroja el software TIA portal después de la autosintonía, el tiempo de establecimiento se tomó mediante el gráfico del HMI, desde el inicio del pulso hasta que la salida alcance aproximadamente el 96%.

Tabla 18

*Tiempo de establecimiento con el PID del PLC*

<b><i>kp</i></b>	<b><i>ki</i></b>	<b><i>kd</i></b>	<b><i>Testablec</i></b>
3.87525369	79.9348156	0.14741604	1
28.9337089	741.194943	4.2503379	1.8
185.185841	4544.52473	29.5953085	11
164.516421	849.174318	127.154456	20

Fuente: Elaboración propia

Tiempos de establecimientos con el controlador Discreto PID y parámetros de sintonía del PLC.

En la tabla 19 los parámetros  $k_p+k_d$ ,  $k_p+2k_d-T_{skia}$  y  $k_d$  se calculan a partir de los datos de la tabla 18 y el tiempo de establecimiento se determina de la gráfica del HMI.

Tabla 19

*Parámetros de sintonía del PLC*

<b><math>k_p+k_d</math></b>	<b><math>k_p+2k_d-T_{skia}</math></b>	<b><math>k_d</math></b>	<b>Tea</b>
4.02266973	3.37073762	0.14741604	1000000
33.1840468	30.0224352	4.2503379	2

214.78115	198.931211	29.5953085	12
291.670876	410.333589	127.154456	17

Fuente: Elaboración propia

Tiempos de establecimientos con el controlador discreto PID y parámetros de sintonía analítica.

En la tabla 20, los valores de  $k_p$ ,  $k_d$  y  $k_i$  se tomará del análisis del controlador continuo que se indica en la página 49. El tiempo de establecimiento se calcula del gráfico que presenta el HMI.

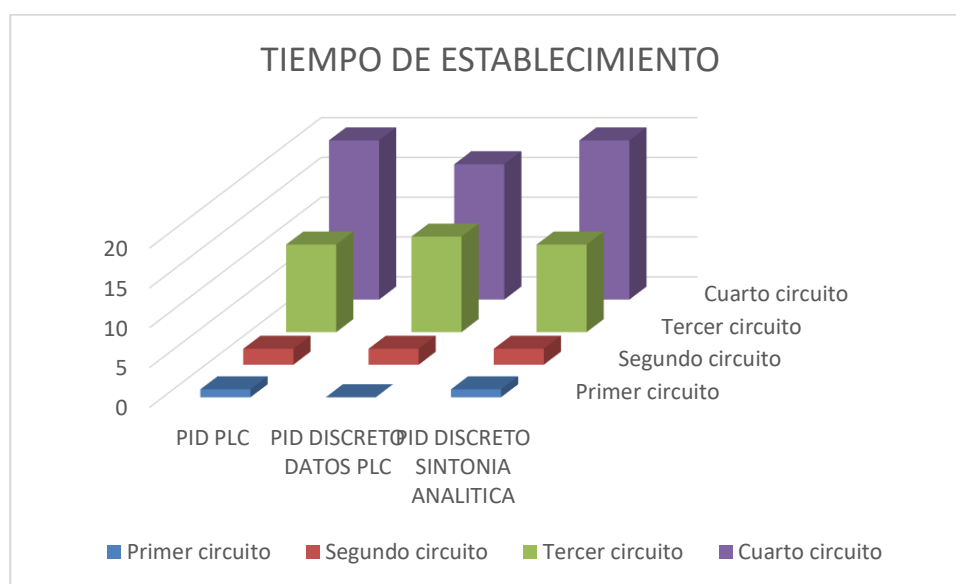
Tabla 20

*Parámetros de sintonía analítica*

$k_{pb}+k_{db}$	$k_{pb}+2k_{db}-T_{skib}$	$k_{db}$	$T_{eb}$
0.1	0.0697	0	1
5.877	1.977	0	2
4.5	4.486	0	11
21.7	29.6506	8	20

Fuente: Elaboración propia





*Figura 50: Comparación de los tiempos de establecimiento*  
*Fuente: Elaboración propia*

## V. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

**5.1.** La implementación del controlador discreto PID se realizó a partir de la discretización de un controlador PID analógico, para llevar a cabo esto se debió tener en cuenta que todos los sistemas digitales tienen inherentemente asociado a ellos un *sistema de muestreo y retención de orden cero*  $\left(Ho = \frac{1-e^{-sT_s}}{s}\right)$ , el cual permite la incorporación de este controlador cualquier plataforma digital, dando como resultado la siguiente ecuación en diferencias.

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

**5.2.** La implementación del controlador PID en el PLC se tomó en un bloque de interrupción ya que el algoritmo propuesto requiere que este repita en forma cíclica debido al parámetro  $[kp + 2kd - ki T_s]$

Para la comodidad de la programación se utilizó el lenguaje de programación SCL, en este lenguaje se puede realizar programación estructurada con lenguaje de alto nivel y así evitar el lenguaje ladder al que la mayoría de programadores de PLC están acostumbrados.

IF...	CASE... OF...	FOR... TO DO...	WHILE... DO...	(*...*)	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 51: Implementación del controlador PID mediante el lenguaje de programación SCL  
Fuente: Elaboración propia

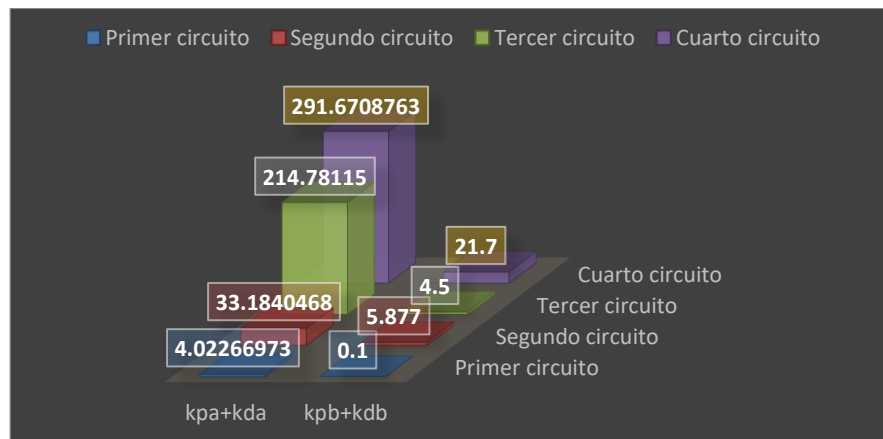
### 5.3. Los parámetros del controlador discreto:

$$P[kp + kd], [kp + 2kd - ki T_s] \text{ y } kd$$

Cambiaron drásticamente, esto es debido a que en el caso “a” se tomó la sintonía dada por el PLC utilizando el Auto Tuning que tiene el Software Tia Portal, pero debido a que el modelo de controlador PID usado para discretizar es diferente al usado por el PLC es que los parámetros de sintonía difieren en gran cantidad.

$$\left( kp + \frac{ki}{s} + Skd \right)$$

$$K_p \left[ (b \cdot w - x) + \frac{1}{T_i \cdot s} (w - x) + \frac{T_D \cdot s}{a \cdot T_D \cdot s + 1} (c \cdot w - x) \right]$$



*Figura 52: Parámetros Kpa+Kda vs Kpb+Kdb*  
*Fuente: Elaboración propia*

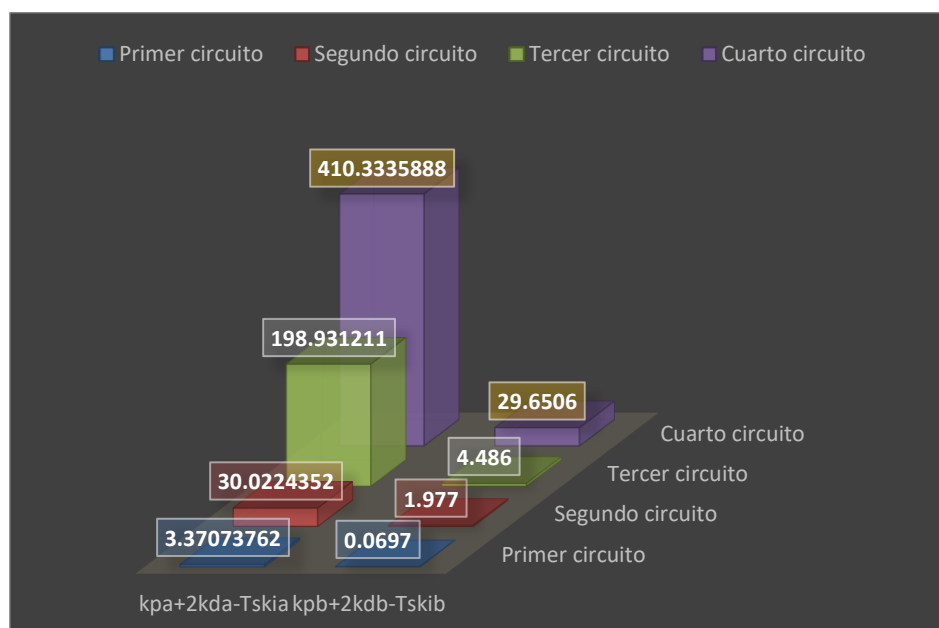


Figura 53: Parámetros  $Kpa+2kda-Tskia$  Vs  $Kpb+2kdb-Tskib$   
Fuente: Elaboración propia

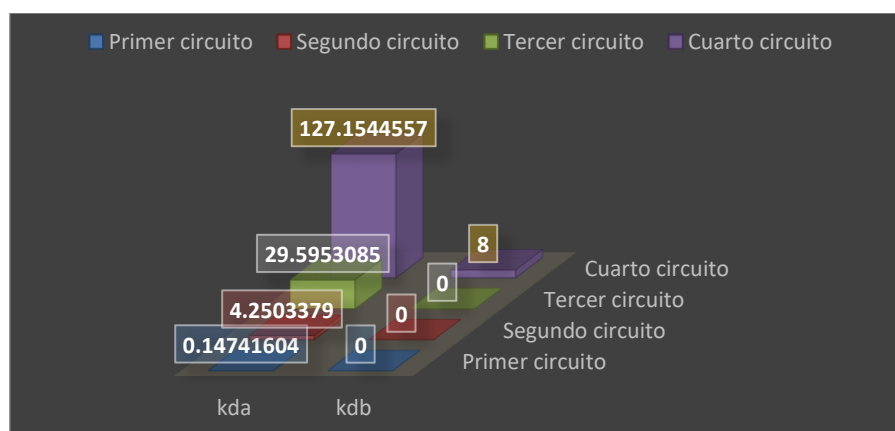


Figura 54: Parámetros  $Kda$  vs  $Kdb$   
Fuente: Elaboración propia

## CONCLUSIONES

- a) La discretización del controlador PID se realizó gracias a la introducción del bloque de muestreo y retención de orden cero y el uso de transformada Z, esto permitió reescribir el controlador atreves de ecuaciones en diferencias esto se evidencia en el capítulo 4.1.
- b) La implementación del controlador discreto se realizó en la plataforma de Siemens Tia Porta V15 , usando un bloque de interrupción cíclica con tiempo de muestreo de 10ms y fue probada en 3 circuitos de orden 1 y uno de segundo orden, esto se evidencia en el capítulo 3.
- c) Los tiempos de establecimiento obtenidos por los controladores PID del PLC y el propuestos fueron casi iguales con errores menores al 10% esto se evidencia en las gráficas realizadas en el capítulo 4.1.

## RECOMENDACIONES

- Realizar el estudio de implementación de controladores inteligentes (usando el método de enjambres) haciendo uso de interrupciones cíclicas.
- Realizar pruebas de velocidades de respuesta del controlador lógico programable a fin de determinar el tipo de variable a controlar.

## REFERENCIAS

Parra, A. (2007). “*Plataformas para Integración de conocimientos relacionados con ajuste de controladores PID para procesos Industriales*”. Tesis de Pregrado, Escuela Superior de Ingeniería, Cádiz, España.

Duque, A; López, J; Navas, A. (2016). “*Sintonización de un Controlador PID Implementado en un PLC haciendo uso de Inteligencia de Enjambres*”. Tesis de Pregrado, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia.

Vargas, J. (2016). “*Diseño e Implementación de un Algoritmo de Controlador PID para plataformas basadas en Microcontroladores PIC*”. Tesis de Pregrado, Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú.

Karl J. Amstrom, Tore Hagglund (2009). *Control PID Avanzado*. Editorial Pearson Educación S.A.

Ogata, K. (2003). *Ingeniería de Control Moderna*. 4th ed. Prentice-Hall.

Kuo, B. (1996). *Sistemas de Control Automático*. 7th ed. Prentice-Hall.

## ANEXOS

### Anexo 1: Especificaciones técnicas del PLC SIEMENS CPU 1214C

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.			



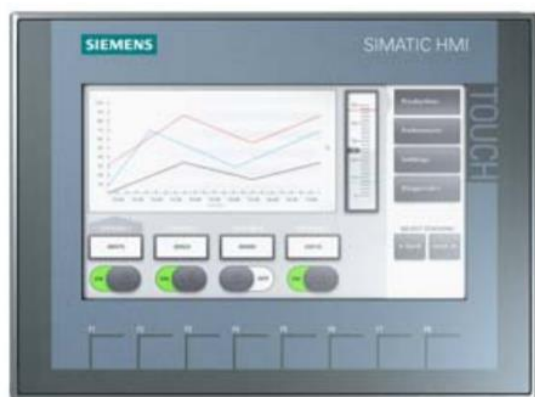
## Anexo 2: Especificaciones técnicas del SIGNAL BOARDS

<i>Signal Boards</i>	SB 1231 AI	SB 1231 RTD	SB 1231 TC
Entrada analógica	<i>AI 1 x 12 Bit ± 10 V DC, ± 5 V DC, ± 2.5 V DC or 0-20 mA</i>	<i>AI 1 x RTD x 16 Bit Type: Platinum (Pt)</i>	<i>AI 1 x TC x 16 Bit Types: J, K Voltage range: ± 80 mV</i>
<i>Signal Boards</i>	SB 1232 AQ		
Salida analógica	<i>AO 1 x 12 Bit ±10 V DC or 0-20 mA</i>		
<i>Communication Boards</i>	CB 1241 RS485		
Comunicación serie	<i>1 x 6 terminal screw connector</i>		

### Anexo 3: Especificaciones técnicas de la interface SIMATIC HMI

hoja de datos del producto

6AV2123-2GB03-0AX0



SIMATIC HMI, KTP700 BASIC, BASIC PANEL,  
MANDO POR TECLAS/TACTIL,  
PANTALLA TFT 7" , 65536 COLORS,  
INTERFAZ PROFINET,  
CONFIGURABLE CON DESDE WINCC BASIC V13/ STEP7  
BASIC V13,  
CONTIENE SW OPEN SOURCE QUE SE CEDE  
GRATUITAMENTE VER EN EL CD ADJUNTO