



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“IMPLEMENTACION DE UN CONTROLADOR DISCRETO PID
EMBEBIDO EN UN PLC CON UN TIEMPO DE MUESTREO
EFICIENTE”**

INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD, ELECTRÓNICA Y
AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

SAMUEL DAVID GUILLÉN PROAÑO

ERICK FERNANDO POSADA CASTRO

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2018

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al M. Sc. Franklin Kuonquí y al Ph. D. César Martín por la paciencia y confianza brindada para poder terminar este proyecto y también a todas las personas que de una u otra forma nos brindaron su ayuda y apoyo incondicional, de todo corazón gracias.

DEDICATORIA

Agradezco a Jehová, por brindarme la fuerza y el coraje para no rendirme nunca en mis momentos más difíciles, por haberme levantado en cada caída y por permitir que este momento se haga realidad.

A mi padre, Marcos Posada por darme todo su apoyo, por sus consejos para hacer de mí una mejor persona, por su confianza y por solventar mi educación en todo este tiempo.

A mi mamá, Zoraida Castro por su paciencia, por sus palabras de aliento en los momentos difíciles y por ayudarme a perseverar por la obtención de este importante logro personal.

A mi hermano, Álvaro Posada al cual lo quiero mucho y por brindarme su apoyo incondicional cada vez que lo necesité.

A mi mascota, Lucas por acompañarme en cada larga jornada de estudio.

A todas las personas que a lo largo de este camino me han aconsejado, me han dado ánimos, y me han impulsado para seguir adelante.

A todos ustedes, con todo el cariño del mundo

Erick Posada Castro.

DEDICATORIA

A Dios, por darme la salud, la fortaleza y el coraje para cumplir mis sueños y por darme una familia a la cual amo demasiado.

A mis padres, José Guillen y Mónica Proaño, por brindarme en todos estos años su apoyo incondicional, por todo su amor, por cada palabra de aliento y por creer en mí en todo momento.

A mis hermanos, que los quiero mucho y han sido un pilar importante para la obtención de este logro.

A mi abuela Judith Matías porque eres como mi segunda madre, por darme muchos consejos, por estar ahí siempre y por ayudarme a perseverar por la obtención de mis sueños.

A mi tía Isabel Moreira, por ser mi apoyo en todo este tiempo, por todos sus consejos que me has dado para seguir adelante y que me han ayudado en mi formación como un hombre de bien.

A todos ustedes, con mucho cariño

Samuel Guillen Proaño

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

M. Sc. Franklin Kuonquí

PROFESOR DE MATERIA
INTEGRADORA

Ph. D. César Martín

TUTOR ACADÉMICO

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

Erick Fernando
Posada Castro

Samuel David Guillén
Proaño

RESUMEN

La planta de tres tanques interactuantes del Laboratorio de Control Automático es una herramienta muy útil en la parte académica, para realizar prácticas de control de nivel, pero presenta una gran desventaja al no contar con un dispositivo que lo permita controlar desde cualquier lugar remoto y agilizar el proceso de toma de datos.

En el capítulo 1, se especifica los objetivos principales de implementar un controlador digital embebido en el PLC, el cual permitirá deshacerse de gran parte del cableado que compone la planta y ayudara a realizar un control más preciso en el nivel de llenado del segundo tanque.

En el capítulo 2, se describe cómo opera la planta, como realizar las pruebas de lazo abierto para encontrar un modelo matemático que represente mejor al sistema, para posteriormente discretizarlo y poder diseñar el controlador PID y luego ver cómo funciona la planta con el controlador aplicado en ella.

En el capítulo 3, se detalla los resultados obtenidos haciendo las pruebas reales en la planta ya aplicando el controlador embebido en el PLC, que beneficios se obtuvo y la importancia del uso del PID.

Y finalmente, en la última sección, que conclusiones y recomendaciones se sacaron al implementar este tipo de controladores en un proceso industrial y sus beneficios en la parte académica.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA	iii
DEDICATORIA.....	iv
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN.....	v
DECLARACIÓN EXPRESA.....	vi
RESUMEN.....	vii
ÍNDICE GENERAL	viii
ABREVIATURAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
CAPÍTULO 1 DELIMITACION DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Objetivos.	2
1.1.1 Objetivo general.....	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
1.3. Justificación.....	3
1.4. Alcance.....	4
CAPÍTULO 2 METODOLOGIA DEL TRABAJO.....	5
2.1. Especificación del comportamiento deseado	5
2.2. Pruebas en lazo abierto.....	6
2.3. Modelado Matemático	6
2.4. Diseño matemático del controlador.....	8
2.5. Simulación.....	15
2.6. Implementación	17
2.7. Pruebas en el sistema real	18
CAPÍTULO 3 RESULTADOS	25
3.1. Resultados del PID simulado.....	Error! Bookmark not defined.
3.2. Desempeño del PID embebido en el PLC	26
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	28
BIBLIOGRAFÍA.....	29
ANEXOS	30

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIEC	Facultad de Ingeniería en Electrónica y Computación
SCADA	Supervisión, Control y Adquisición de datos
PLC	Controlador Lógico Programable
PID	Proporcional, Integral, Derivativo
mA	Miliamperio
V	Voltio
Hz	Hertz
B	Bar
cm	Centímetro

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Metodología que describe el procedimiento realizado para el diseño de la planta	5
Figura 2. 2 Esquema de las pruebas en lazo abierto	6
Figura 2. 3 Importación de datos para comparar las dos señales en el dominio del tiempo...7	7
Figura 2. 4 Modelamiento matemático del sistema en Matlab para obtener la función de transferencia que represente mejor al sistema	7
Figura 2. 5 Función de transferencia de la planta que se obtuvo en las pruebas de lazo abierto	8
Figura 2. 6 Función de transferencia en tiempo continuo de la planta	8
Figura 2. 7 Función de transferencia en tiempo discreto de la planta	9
Figura 2. 8 Trayectoria de las raíces de la función de transferencia en tiempo discreto	9
Figura 2. 9 Función de transferencia en tiempo discreto en modo zpk, para saber la ubicación de los polos, ceros y la ganancia estática del sistema	10
Figura 2. 10 Gráfica del sistema ante una función de entrada escalón	10
Figura 2. 11 Establecimiento del parámetro Setting Time	11
Figura 2. 12 Gráfica de la trayectoria de las raíces con el parámetro Setting Time establecido	11
Figura 2. 13 Establecimiento del parámetro Percent overshoot	11
Figura 2. 14 Gráfica de la trayectoria de las raíces con el parámetro Setting Time y Overshoot percent establecido	12
Figura 2. 15 Comando Edit Compensator para diseñar el controlador	12
Figura 2. 16 Configuración del controlador para que tenga la forma zero/pole/gain	13
Figura 2. 17 Modelo del PID discreto a implementarse al sistema	13
Figura 2. 18 Controlador que se va aplicar al sistema	14
Figura 2. 19 Exportación del controlador desde Sisotool al programa principal de Matlab ..	15
Figura 2. 20 Paso previo para ver la simulación grafica del sistema con el controlador aplicado	15
Figura 2. 21 Gráfica de la simulación con el controlador PID ya aplicado al sistema	16
Figura 2. 22 Implementación del controlador PID a la planta en Simulink	17
Figura 2. 23 Circuito de arranque del motor de la planta	18
Figura 2. 24 Normalización de las variables de frecuencia y corriente	19
Figura 2. 25 Bloque MUL para realizar la conversión de Presión a Altura medida	19
Figura 2. 26 Sección para limitar la frecuencia	20
Figura 2. 27 Cálculo del error	20
Figura 2. 28 Acción Proporcional del PID	21
Figura 2. 29 Diagrama de bloque de la sección derivativa del PID	21
Figura 2. 30 Acción Derivativa del PID	22
Figura 2. 31 Diagrama de bloque de la sección integral del PID	22
Figura 2. 32 Acción Integral del PID	23
Figura 2. 33 Suma de las tres acciones del PID	23
Figura 2. 34 Cambio de variables para la siguiente secuencia	24
Figura 2. 35 Gráfica del bloque PID programado en TIA PORTAL	24
Figura 3. 1 Gráfica del sistema sin el controlador PID	25
Figura 3. 2 Gráfica del sistema con el controlador PID	26
Figura 3. 3 Gráfica del sistema con el controlador embebido en el PLC	27

CAPÍTULO 1

1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad, el Laboratorio de Control Automático de la ESPOL cuenta con una planta de tres tanques, la cual controla el nivel del agua en el segundo tanque, pero esta tiene algunos inconvenientes como por ejemplo, esta planta tiene movilidad limitada, ya que esta necesita estar cerca de una tarjeta de adquisición de datos (Compact Field Point) para poder realizar el respectivo control y no se ha adaptado hasta ahora un sistema o elemento computarizado el cual permita supervisar y controlar la planta remotamente.

Por otro lado, este laboratorio trabaja con controladores continuos desarrollados en forma analógica, pero éstos tienen algunas desventajas tales como: problemas de ruido, desgaste de componentes por causa de la antigüedad, tienen límites de almacenamiento de información, su resultado a la salida se modifica porque con el tiempo se deterioran los elementos o también por cambios en la fuente de alimentación.

Adicionalmente, la planta al no tener adherida en su estructura un PLC, no se le puede realizar un control en su funcionamiento que incluya: etapa de arranque, control y paro, generación de alarmas, paro de emergencia, configuración de red industrial o elaboración de un sistema SCADA.

Por último, no se puede embeber el controlador actual porque no se puede dejar funcionando en forma autónoma y necesita estar conectada a la red del laboratorio de Control Automático y también que no se puede escoger un tiempo de muestreo de toma de datos ya que tiene un proceso lento de estabilización.

1.2. Objetivos.

1.1.1 Objetivo general

Implementar un sistema de control discreto embebido en un PLC para la planta de tres tanques del Laboratorio de Control Automático que permita un uso más eficiente de los recursos del PLC sin que se afecte significativamente el desempeño del sistema.

1.1.2 Objetivos específicos

Instalar el PLC en el panel eléctrico de la planta para la implementación del controlador que se aplicará en ella.

Identificar el sistema para la obtención de un modelo matemático alrededor del punto de operación escogido con el cual se diseñará el controlador PID.

Diseñar el controlador discreto PID con la ayuda del programa de Matlab para su posterior verificación de desempeño en la planta.

Implementar el controlador discreto PID para liberar el uso de los recursos en el PLC, los cuales se podrían aprovechar en otros tipos de procesos.

1.3. Justificación.

En los últimos años, los controladores digitales han tenido un mayor auge en el campo de la ingeniería industrial debido a sus innumerables ventajas, por lo que este proyecto busca implementar un controlador digital PID en el Laboratorio de Control Automático, ya que ese laboratorio no cuenta con este tipo de controladores, los cuales son muy útiles y efectivos porque proporcionan mucha funcionalidad en un espacio pequeño (por su tamaño), una desventaja que tienen es que pueden ser costosos, pero funcionan durante mucho tiempo ya que no se desgastan con facilidad y son muy precisos en la toma de datos.

Otra de las ventajas de este tipo de controlador es que, dado el mismo conjunto de entradas (tanto en valor como en serie de tiempo), siempre producirá exactamente los mismos resultados a diferencia de los analógicos, ya que no les afectan factores externos como: ruido, temperatura, voltajes, etc.

La implementación de este tipo de controladores también servirá en la parte académica como base para el aprendizaje de los estudiantes que tengan que tomar la materia de Control Digital, ya que en ese laboratorio podrán realizar pruebas o prácticas y comparar el funcionamiento de los controladores analógicos y digitales, y verificar las ventajas de éstos últimos, ya que estos trabajan en espacios reducidos, no se desgastan con el tiempo y son muy eficientes ya que lo que se quiere reducir es el tiempo de muestreo de la toma de datos. Además, podrán familiarizarse con las virtudes de este controlador y vincular los conocimientos de control digital con programación de PLC.

Adicionalmente, otra de las razones muy importantes, es que, al implementar este tipo de controlador embebido en un PLC, eliminaría el exceso de cableado y habría un mayor espacio físico, reduciría significativamente el tiempo de estabilidad del sistema de la planta, esto ayudaría en gran medida a los estudiantes en su aprendizaje, brindando mayores comodidades y menos complicaciones.

1.4. Alcance.

Se realizará, mediante pruebas de lazo abierto, la búsqueda de un punto de operación en donde a una determinada frecuencia se obtendrá una altura promedio. Luego, se perturbará el sistema para realizar un proceso de identificación del sistema.

Después, partiendo del modelo obtenido en la identificación del sistema, se diseñará el controlador discreto PID con la ayuda de la herramienta de Sisotool del programa de Matlab, el cual posteriormente será probado usando Simulink con el modelo identificado y con la planta real.

Y, por último, se implementará el controlador discreto PID embebido en el PLC, con el lenguaje de programación de escalera y se procederá a realizar las pruebas reales en la planta de tres tanques del Laboratorio de Control Automático.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGIA DEL TRABAJO

La metodología de trabajo que se va a implementar para embeber el controlador PID digital en el PLC consta de 7 etapas, las cuales se detallan a continuación:

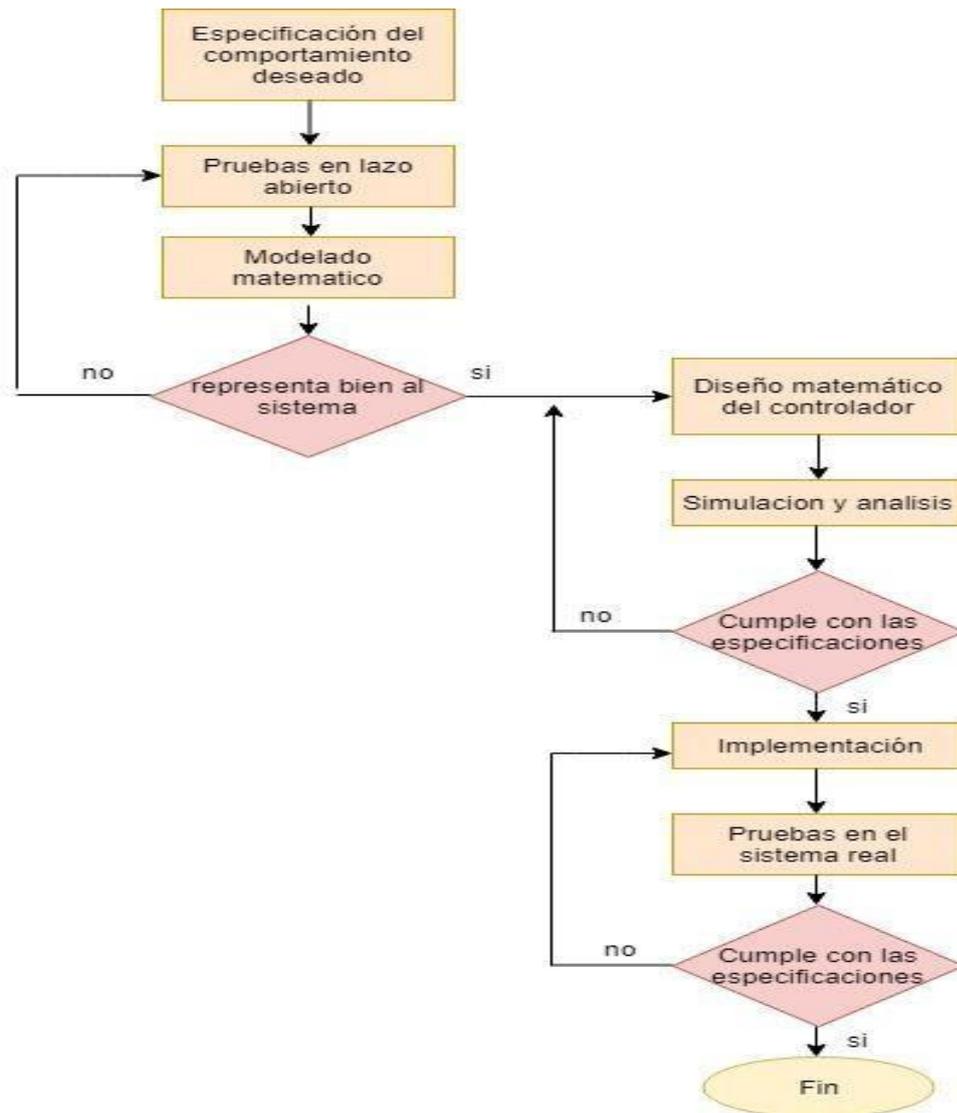


Figura 2. 1 Metodología que describe el procedimiento realizado para el diseño de la planta

2.1. Especificación del comportamiento deseado

Para especificar el comportamiento que se desea del sistema, se determina mediante varias pruebas, a qué valor de frecuencia se obtendría una altura promedio del segundo tanque.

A continuación, se obtiene la función de transferencia de la planta en lazo abierto mediante un proceso de identificación de sistemas. A partir de la función de transferencia, se procede a diseñar el controlador PID con la herramienta SISOTOOL de Matlab, en la cual se estableció como parámetros de tiempo de estabilización y sobrenivel porcentual 300 segundos y 10% respectivamente.

2.2. Pruebas en lazo abierto

Para realizar las pruebas de lazo abierto, se instala un PLC en el panel eléctrico de la planta, en él se conectan los 3 sensores y el variador de frecuencia. Desde Simulink-Matlab se hace la comunicación con el PLC, mediante el estándar de comunicación OPC. Desde Simulink se da una orden al PLC para que este envíe una señal analógica al variador, del variador salen tres líneas que van puenteadas a cada línea del motor trifásico (bomba). Este variador envía una señal analógica (frecuencia) al motor, para que a su vez el motor lleve el agua que está en el reservorio al primer tanque, a una determinada velocidad. De allí, gracias a la diferencia de presión, pasa al segundo tanque y así sucesivamente pasa al tercero, de donde retorna nuevamente al reservorio. Estas pruebas duraron alrededor de 2 horas y se determinó que a 22.1 Hz se llegaba a una altura promedio de 25 cm.

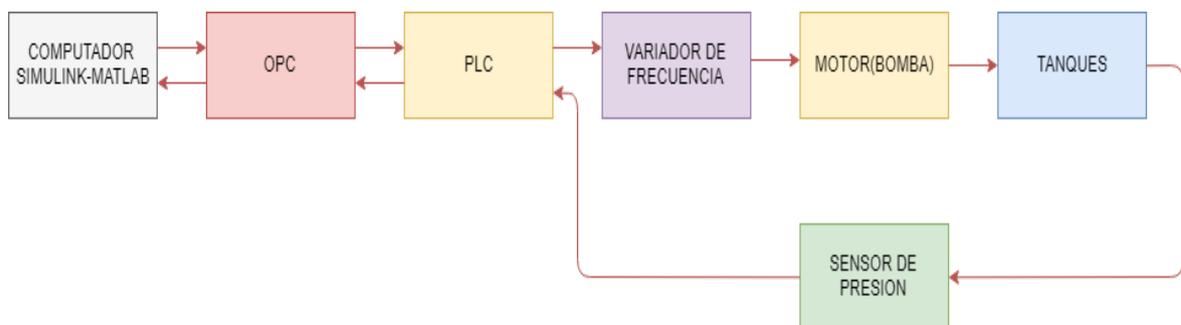


Figura 2. 2 Esquema de las pruebas en lazo abierto

2.3. Modelado Matemático

Realizada la prueba en lazo abierto, se procede a registrar los datos obtenidos en Matlab para hallar la función de transferencia continua de la planta, la cual tiene que cumplir los requerimientos de estabilidad y tener una estimación comparada con la gráfica real superior al 80%.

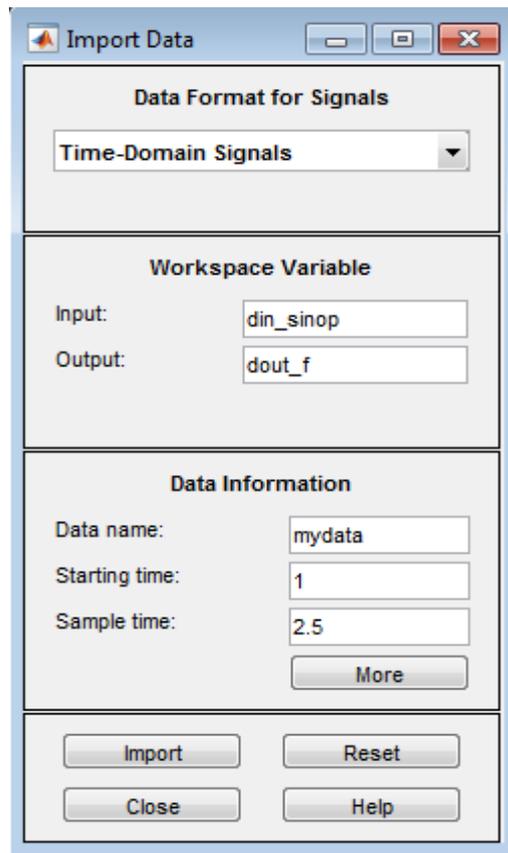


Figura 2. 3 Importación de datos para comparar las dos señales en el dominio del tiempo

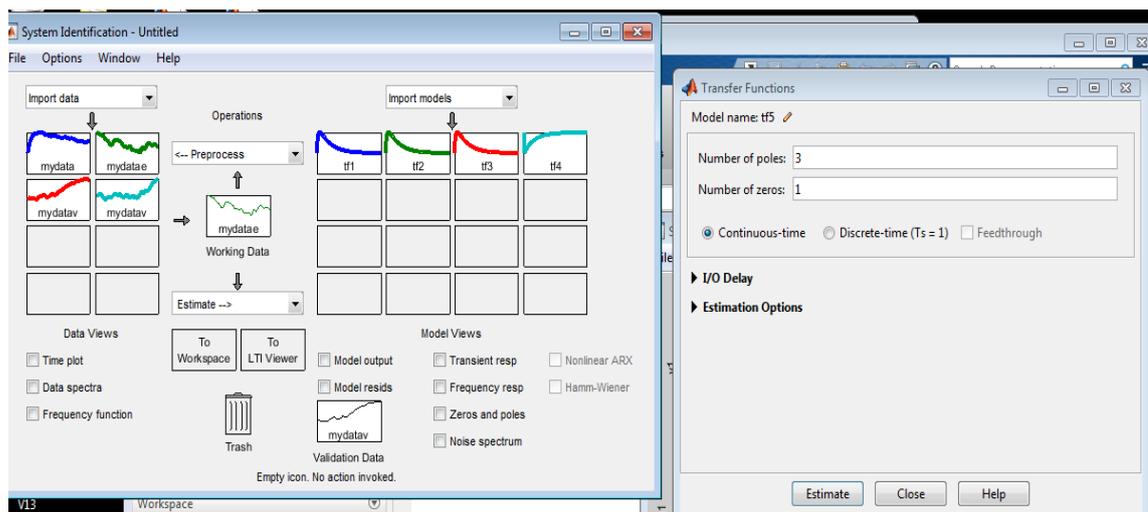


Figura 2. 4 Modelamiento matemático del sistema en Matlab para obtener la función de transferencia que represente mejor al sistema

De estas pruebas se obtuvo una función de transferencia con una estimación cercana con la gráfica real de 91.86%.

```

>> gplanta2=tf5

gplanta2 =

From input "u1" to output "y1":
      0.003604 s + 5.633e-06
-----
s^3 + 0.04247 s^2 + 0.0002394 s + 2.726e-07

Name: tf5
Continuous-time identified transfer function.

Parameterization:
  Number of poles: 3   Number of zeros: 1
  Number of free coefficients: 5
  Use "tfdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
  Estimated using IPEST on time domain data "mydatav".
  Fit to estimation data: 91.86% (simulation focus)
  FPE: 0.003492, MSE: 0.003403
>> step(gplanta2)

```

Figura 2. 5 Función de transferencia de la planta que se obtuvo en las pruebas de lazo abierto

2.4. Diseño matemático del controlador

Para el diseño de este controlador se hizo la conversión del sistema a una forma discreta, aplicando la técnica de mantenedor de orden zero (zoh Zero Order Hold) ya que se busca conservar la respuesta al escalón de su equivalente analógico y también su ganancia estática (relación entre la salida y la entrada cuando ambas se han estabilizado).

```

>> G=tf([0.003604 5.633e-06],[1 0.04247 0.0002394 2.726e-07])

G =

      0.003604 s + 5.633e-06
-----
s^3 + 0.04247 s^2 + 0.0002394 s + 2.726e-07

Continuous-time transfer function.

```

Figura 2. 6 Función de transferencia en tiempo continuo de la planta

```

>> Gz=c2d(G,2.5,'zoh')

Gz =

    0.01089 z^2 - 0.0003224 z - 0.01048
    -----
    z^3 - 2.898 z^2 + 2.797 z - 0.8993

Sample time: 2.5 seconds
Discrete-time transfer function.

>> sisotool(Gz)
>>

```

Figura 2.7 Función de transferencia en tiempo discreto de la planta

Después en la herramienta de Sisotool se puede observar la trayectoria de las raíces del sistema en tiempo discreto.

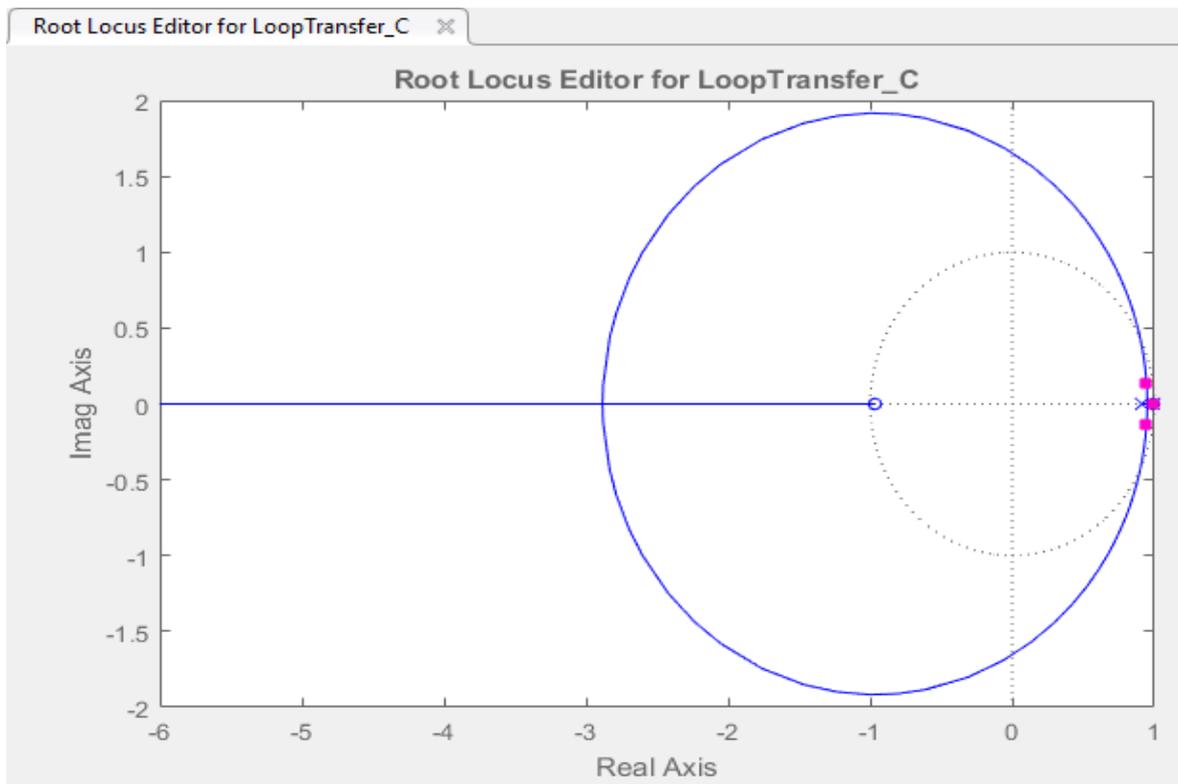


Figura 2.8 Trayectoria de las raíces de la función de transferencia en tiempo discreto

Como se puede ver en la gráfica discretizada, se tiene tres polos ($p_1=0.9961$, $p_2=0.9879$ y $p_3=0.9138$) y dos ceros ($z_1=0.9961$ y $z_2=-0.9965$).

```

>> Gz1=zpk(Gz)

Gz1 =

    0.010887 (z-0.9961) (z+0.9665)
-----
    (z-0.9961) (z-0.9879) (z-0.9138)

Sample time: 2.5 seconds
Discrete-time zero/pole/gain model.

```

Figura 2. 9 Función de transferencia en tiempo discreto en modo zpk, para saber la ubicación de los polos, ceros y la ganancia estática del sistema

En esta grafica se puede observar la respuesta de salida del sistema ante una entrada escalón cuando aún no se le ha aplicado el controlador PID al sistema.

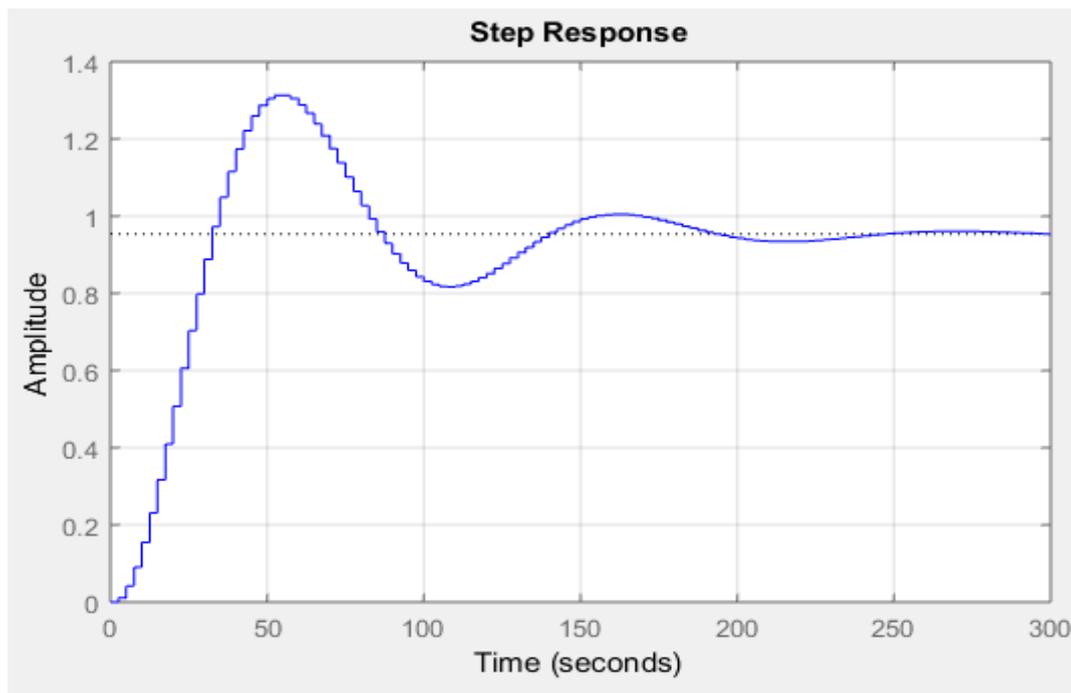


Figura 2. 10 Gráfica del sistema ante una función de entrada escalón

Para el diseño del controlador PID en Sisotool se estableció un Setting Time (tiempo de establecimiento) de 300 segundos y un Percent Overshoot (sobrenivel porcentual) menor a 10%.

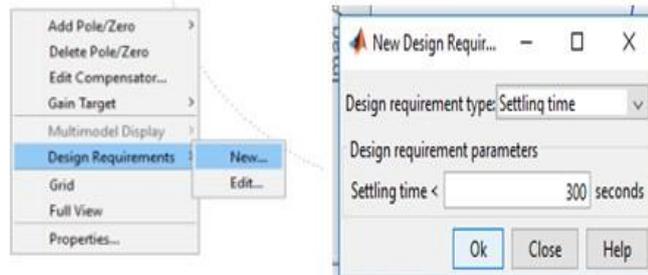


Figura 2. 11 Establecimiento del parámetro Setting Time

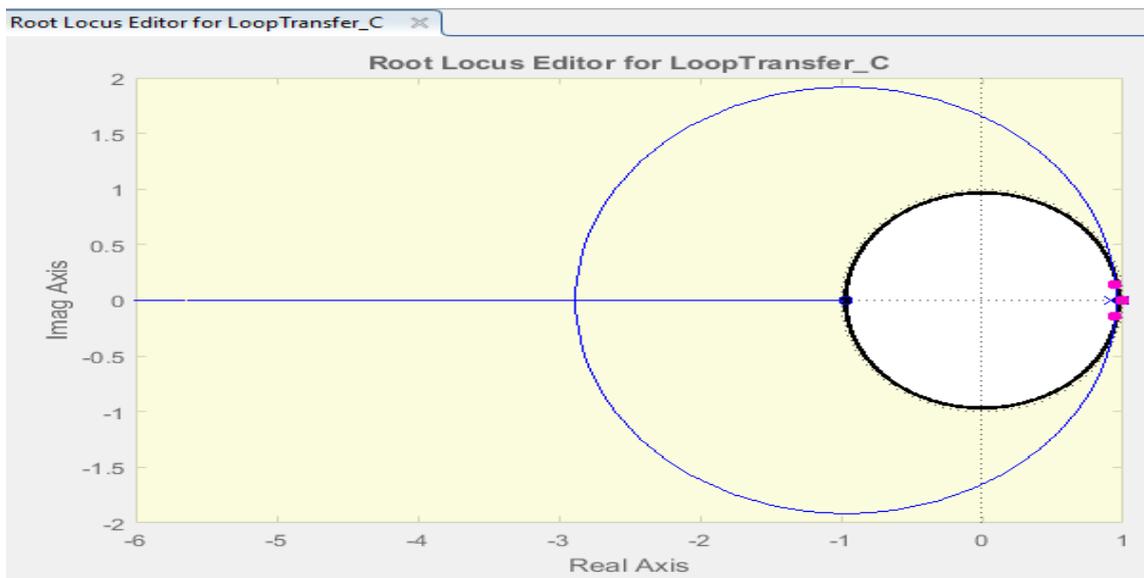


Figura 2. 12 Gráfica de la trayectoria de las raíces con el parámetro Setting Time establecido

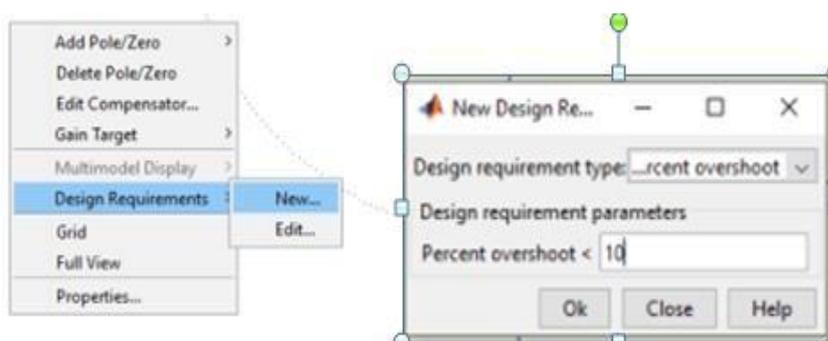


Figura 2. 13 Establecimiento del parámetro Percent overshoot

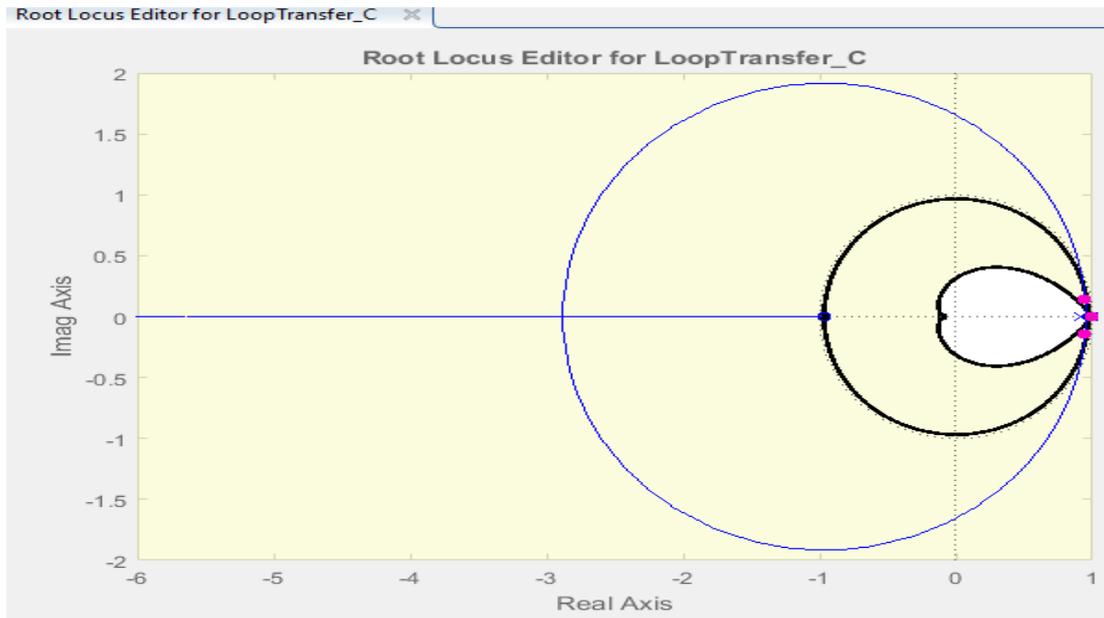


Figura 2. 14 Gráfica de la trayectoria de las raíces con el parámetro Setting Time y Overshoot percent establecido

Ya establecidos esos parámetros, para que seguir manteniendo el sistema estable en el dominio de las Z, los polos y ceros tienen que tener una magnitud menor o igual a 1, o sea estar dentro del círculo unitario, para lograr este efecto de estabilidad se tuvo que crear un compensador, así que dándole clic derecho a la gráfica se escoge la opción **Edit Compensator**.

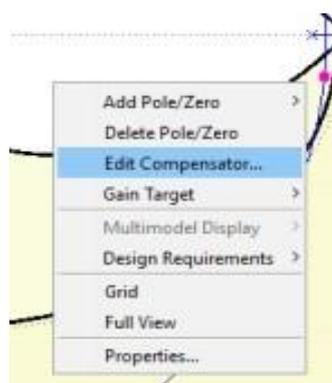


Figura 2. 15 Comando Edit Compensator para diseñar el controlador

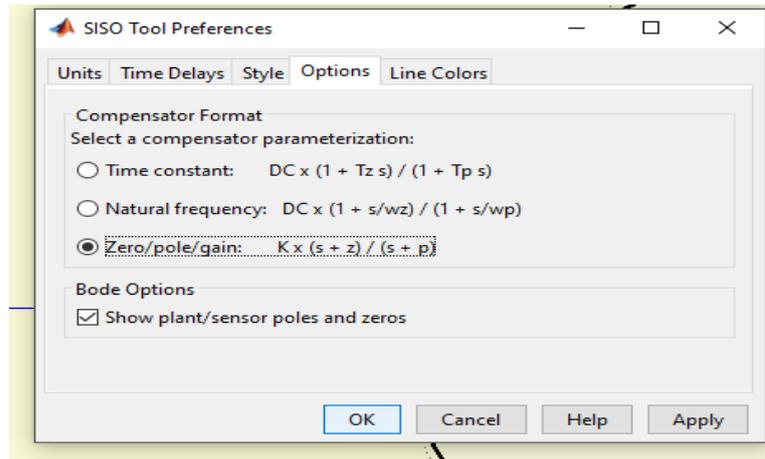


Figura 2. 16 Configuración del controlador para que tenga la forma zero/pole/gain

El controlador que se va a diseñar va a tener la siguiente forma:

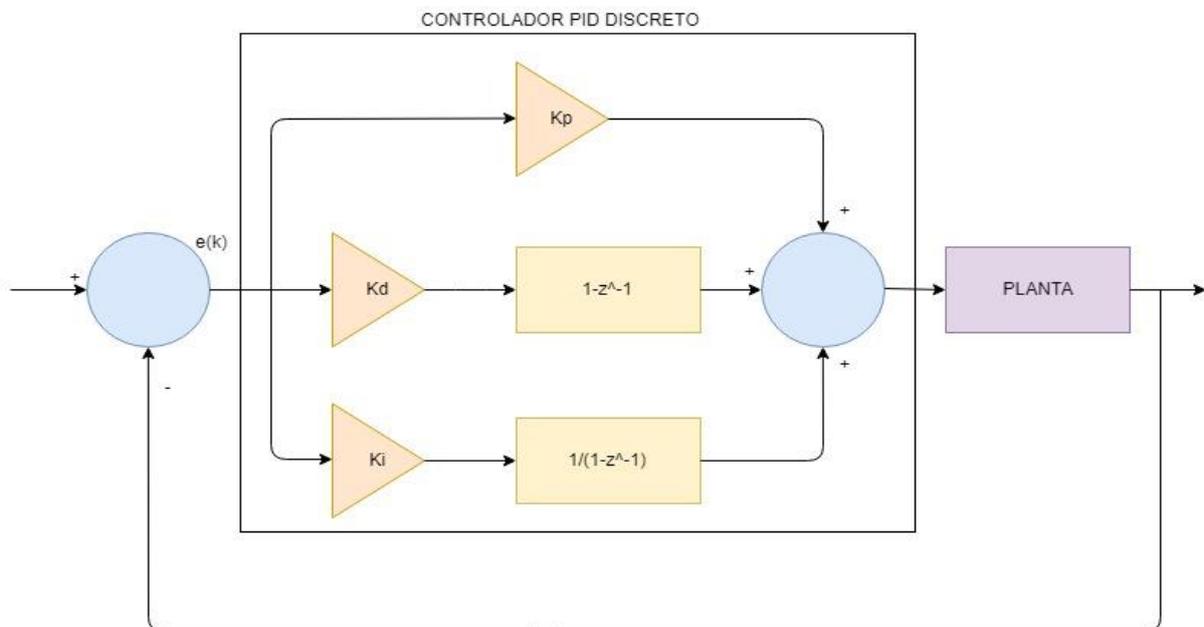


Figura 2. 17 Modelo del PID discreto a implementarse al sistema

Desarrollando el diagrama de bloques, se halló una expresión simple para el controlador PID:

$$G_c(z) = K_p + K_i \cdot \frac{1}{1 - z^{-1}} + K_d(1 - z^{-1})$$

$$G_c(z) = K_p + K_i \cdot \frac{z}{z - 1} + K_d \cdot \frac{z - 1}{z}$$

$$G_c(z) = \frac{K_p(z^2 - z) + K_i \cdot z^2 + K_d(z^2 - 2z + 1)}{z(z - 1)}$$

$$G_c(z) = \frac{(K_p + K_i + K_d)z^2 + (-K_p - 2K_d)z + K_d}{z(z-1)} \quad (2.1)$$

Se diseñó un compensador que tenga dos polos y dos ceros, esto es por la estructura del compensador PID (ecuación 2.1). Por la ecuación del compensador PID, se ve claramente que los dos polos van a estar ubicados en 0 y en, 1 y al mover los ceros de este compensador, para que el sistema tenga una respuesta sin error de estado estacionario se colocó los ceros en 0.976 y en 0.921 y una ganancia estática de 2.617.

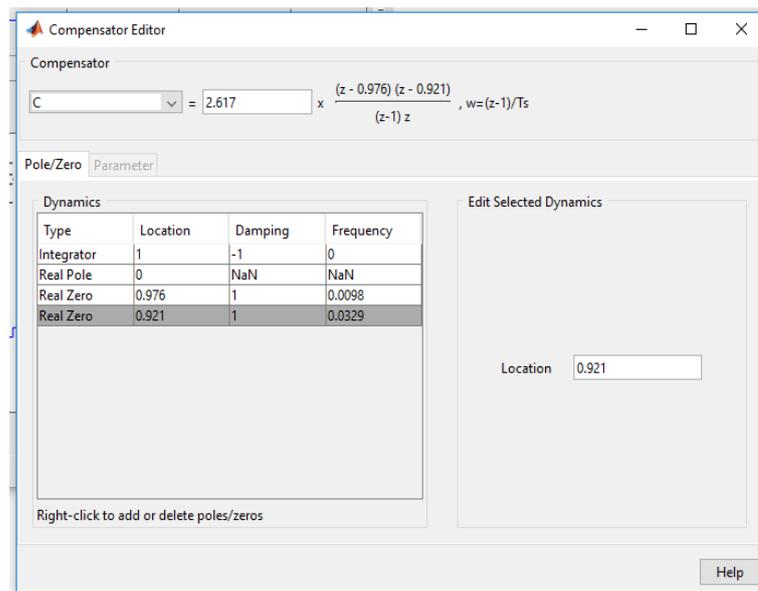


Figura 2. 18 Controlador que se va aplicar al sistema

Aplicando todo lo mencionado anteriormente en el compensador el sistema ahora es estable en el dominio Z y se lo exporta al programa principal de Matlab, se le da clic en **File ► Export**, se señala la opción del compensador y por último, se le da clic en **Export to Workspace**.

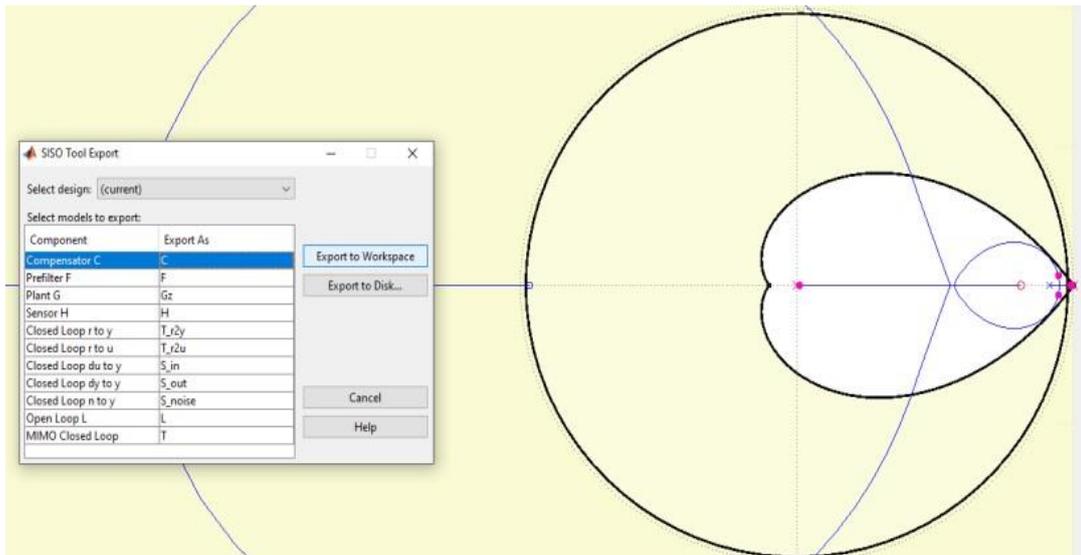


Figura 2. 19 Exportación del controlador desde Sisotool al programa principal de Matlab
E inmediatamente el compensador aparece en el programa principal de Matlab

2.5. Simulación

Ahora para ver la respuesta del sistema ante una entrada escalón, se le da clic en **Analysis** y se escoge la opción **Response to Step Command**.

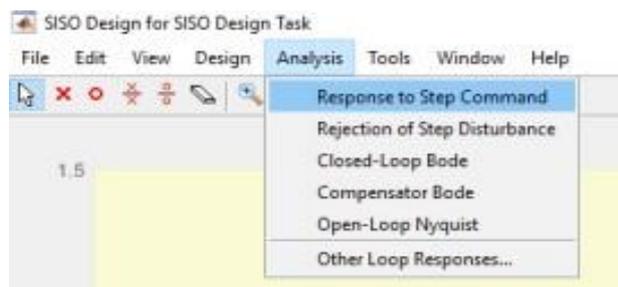


Figura 2. 20 Paso previo para ver la simulación grafica del sistema con el controlador aplicado

Finalmente, ya con el PID aplicado, se observa que el sistema tiene una respuesta en su salida aproximada a una entrada escalón.

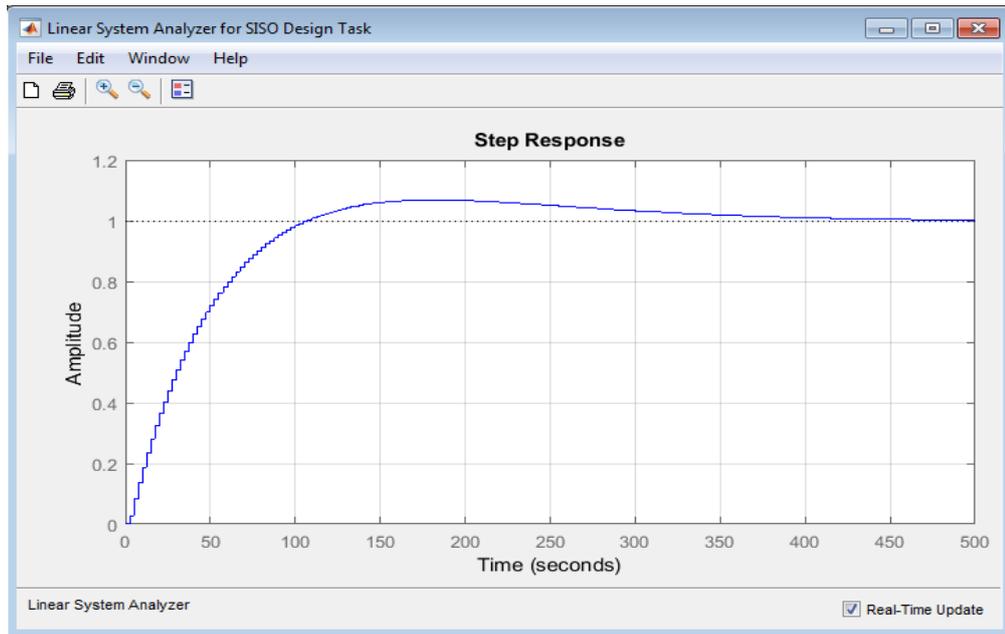


Figura 2. 21 Gráfica de la simulación con el controlador PID ya aplicado al sistema

Para encontrar las constantes del PID se reemplaza los valores de la siguiente ecuación:

$$G(z) = \frac{(K_p + K_i + K_d)z^2 + (-K_p - 2K_d)z + K_d}{z(z - 1)} = \frac{2.617z^2 - 4.964z + 2.352}{z(z - 1)}$$

$$(K_p + K_i + K_d) = 2.617$$

$$(-K_p - 2K_d) = -4.964$$

$$K_d = 2.352$$

Entonces, las constantes K_p , K_i y K_d son:

$$K_p = 0.26$$

$$K_i = 0.005$$

$$K_d = 2.352$$

2.6. Implementación

Ya con el controlador diseñado previamente, se procede a hacer la implementación de este en Simulink para aplicarlo a la planta. La comunicación entre Simulink y la planta mediante el estándar de comunicación OPC.

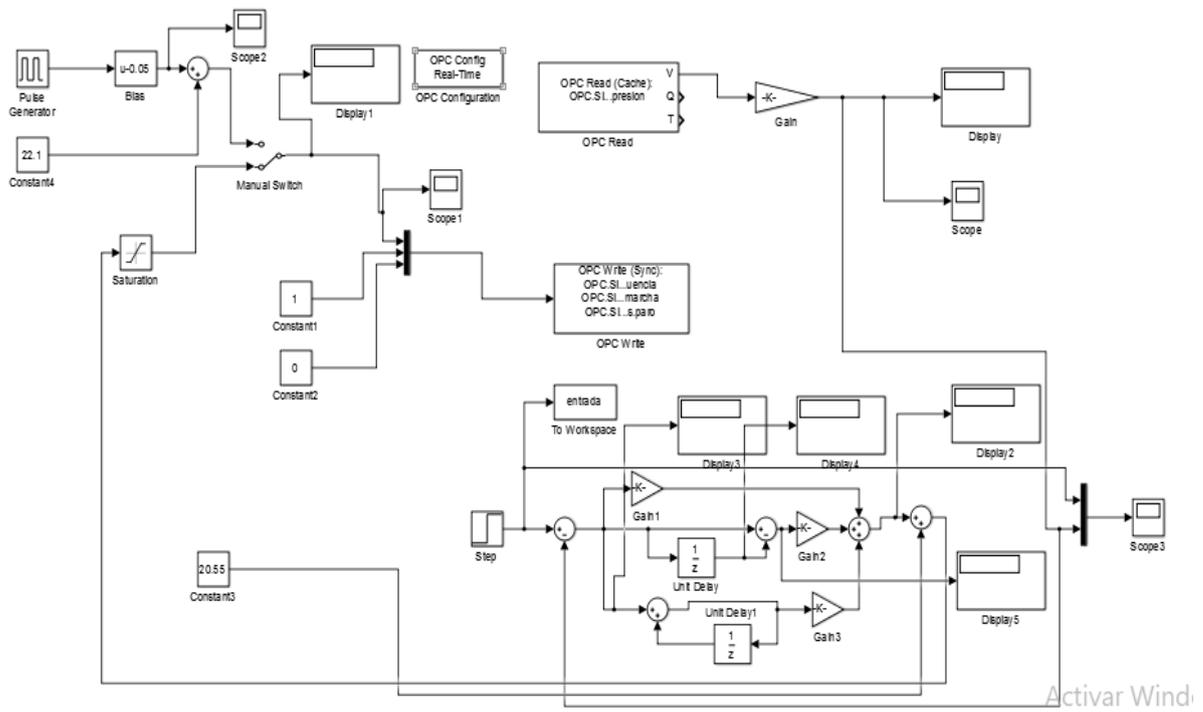


Figura 2. 22 Implementación del controlador PID a la planta en Simulink

2.7. Pruebas en el sistema real

Para realizar las pruebas en la planta, se procede a programar en lenguaje de escalera en TIA PORTAL.

Primero, se realiza un circuito de arranque para el motor, donde se le da la orden de marcha y paro.

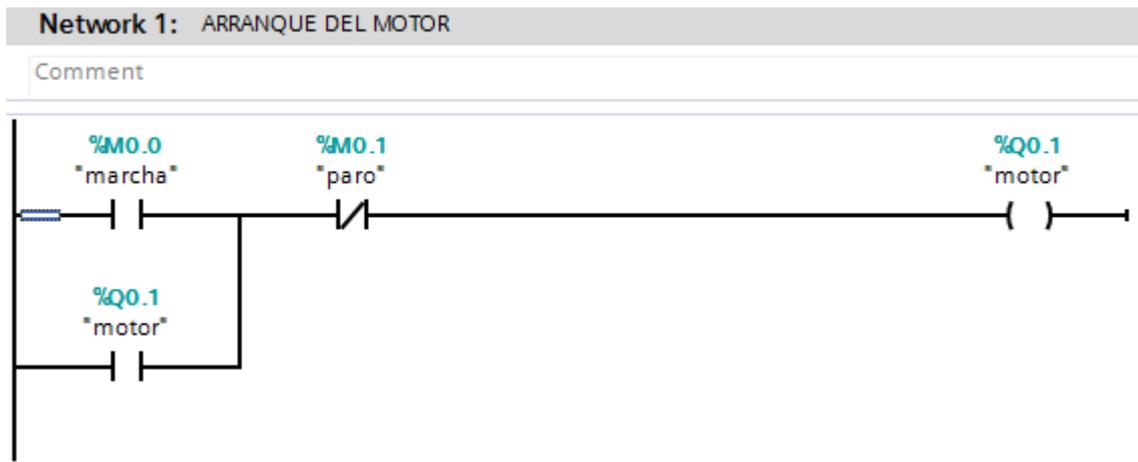


Figura 2. 23 Circuito de arranque del motor de la planta

En el primer bloque NORM_X se normaliza una cantidad entera a una real porque posteriormente el valor de la frecuencia de 0-50 Hz se lo va a escalar, para convertirlo finalmente en otro valor de frecuencia con el cual el variador va a operar.

En el segundo bloque NORM_X se normaliza una cantidad entera a una real porque el sensor tiene una entrada de corriente que va de 4 a 20 mA (4 mA equivalen a 0 y 20 mA a 27648), de ahí la salida de este bloque pasa al segundo bloque de SCALE_X para convertirlo finalmente en un valor de Presión que esta de 0 a 25 B.

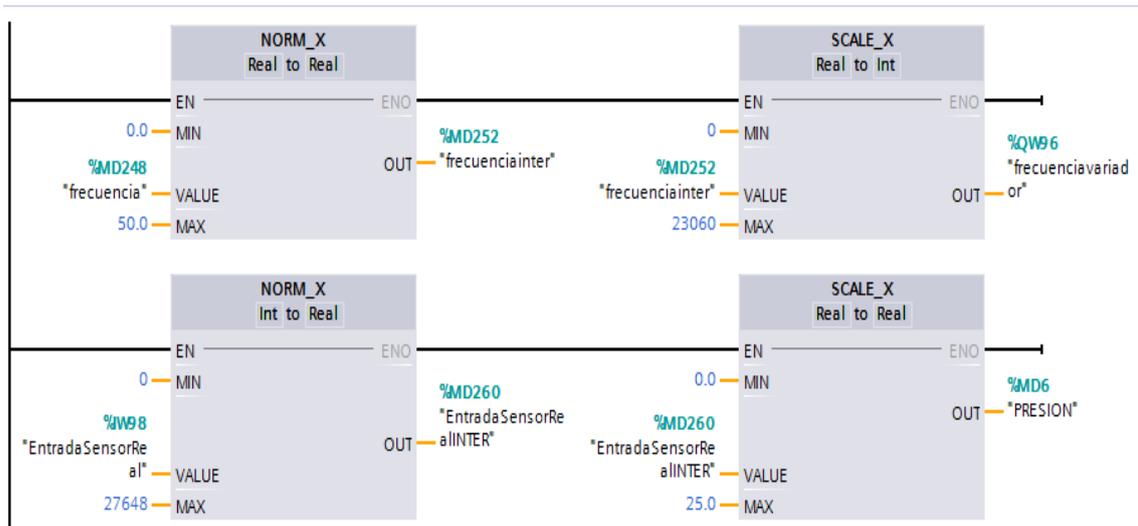


Figura 2. 24 Normalización de las variables de frecuencia y corriente

Este bloque MUL realiza la multiplicación entre el valor de la presión por un factor de 10.95 para determinar la altura del tanque en ese instante.

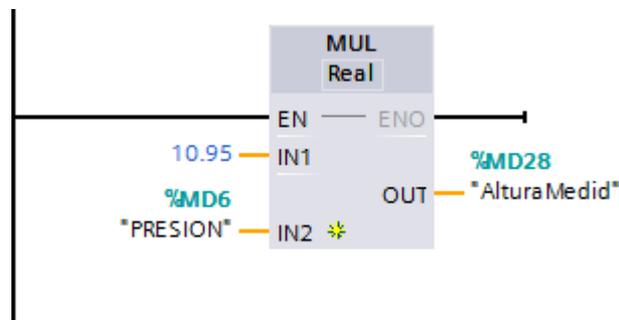


Figura 2. 25 Bloque MUL para realizar la conversión de Presión a Altura medida

Esta sección se la realizo para que la frecuencia no sobrepase los 24.5 Hz

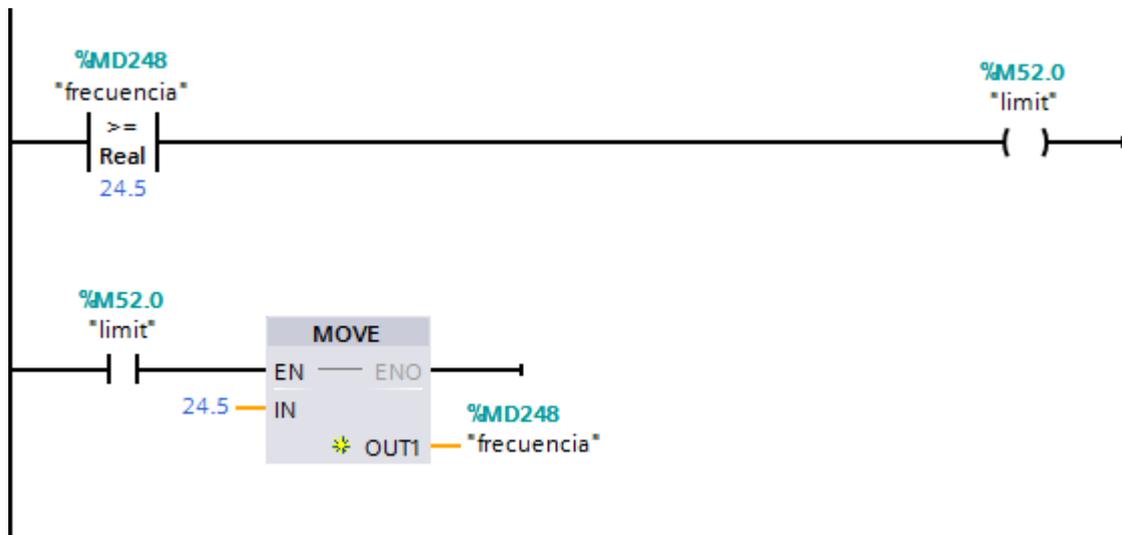


Figura 2. 26 Sección para limitar la frecuencia

Para el cálculo del error, se usa una variable temporal $e(k)_{temp}$, que va a estar en la salida del bloque sub, el cual procede a realizar la resta entre la altura a la que deseo que llegue el tanque y la altura actual del tanque ($e(k)_{temp} = altura\ ingrasada - altura\ medida$) y después esta variable temporal pasa a ser el nuevo dato del error $e(k)$.

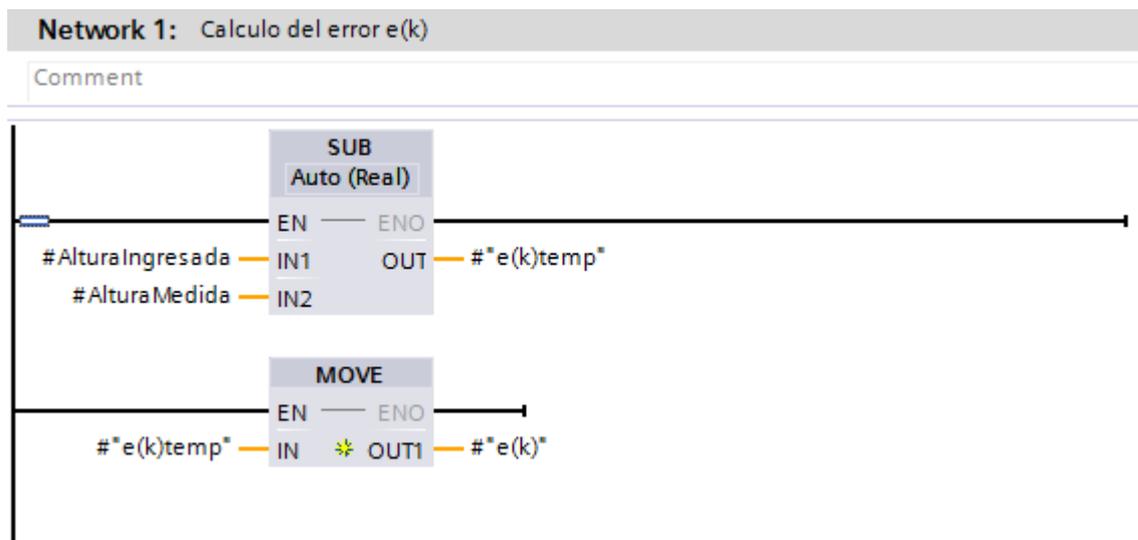


Figura 2. 27 Bloque que realiza el cálculo del error

Para la parte proporcional del PID se realiza la multiplicación entre el error previamente hallado después esta variable temporal pasa a ser el nuevo dato del error $e(k)$ y la constante proporcional K_p , a esa multiplicación se la llama A_p (acción proporcional).

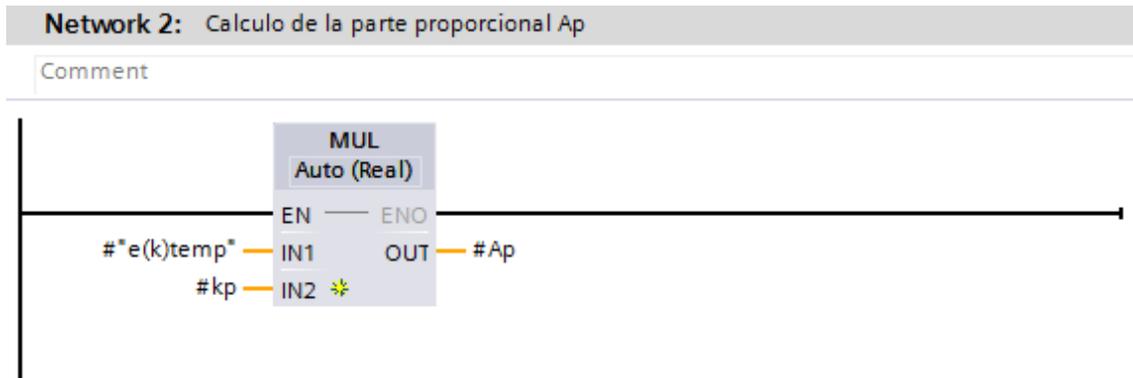


Figura 2. 28 Acción Proporcional del PID

Para la parte derivativa, se sigue la secuencia del siguiente diagrama de bloques:

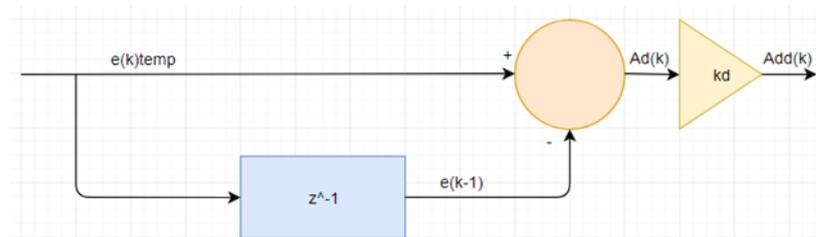


Figura 2. 29 Diagrama de bloque de la sección derivativa del PID

Donde previamente se halla una variable $Ad(k)$, la cual va a ser la resta entre el error temporal $e(k)_{temp}$ y el error anterior $e(k - 1)$, para posteriormente multiplicar esta variable $Ad(k)$ con una constante derivativa K_d , con esa multiplicación finalmente se obtiene la acción derivativa $Add(k)$.

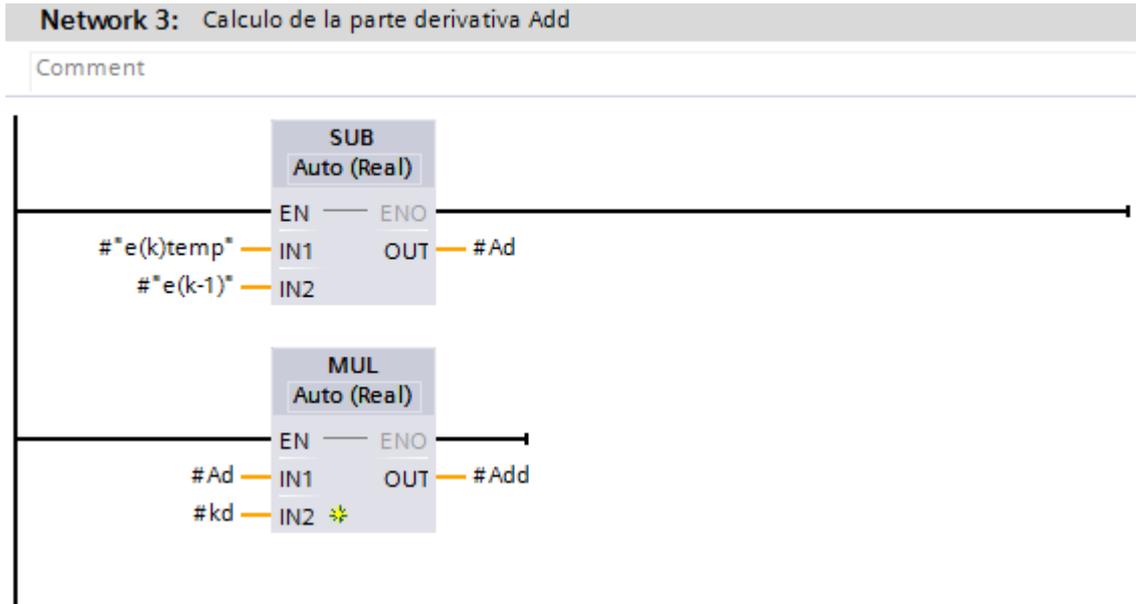


Figura 2. 30 Acción Derivativa del PID

Para la parte integral, se sigue la secuencia del siguiente diagrama de bloques:

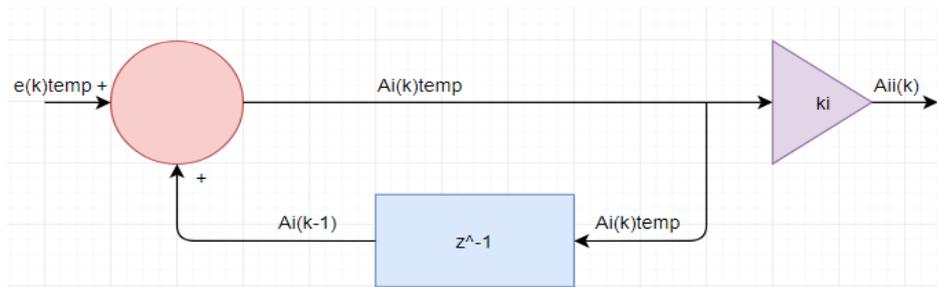


Figura 2. 31 Diagrama de bloque de la sección integral del PID

Donde previamente se halla una variable $Ai(k)_{temp}$, la cual va a ser la suma entre el error temporal $e(k)_{temp}$ y la acción integral anterior $Ai(k-1)$, después la variable temporal $Ai(k)_{temp}$ se mueve a $Ai(k)$ y posteriormente se multiplica la variable $Ai(k)_{temp}$ con una constante integral K_i , de esa multiplicación se obtiene la acción integral $Aii(k)$.

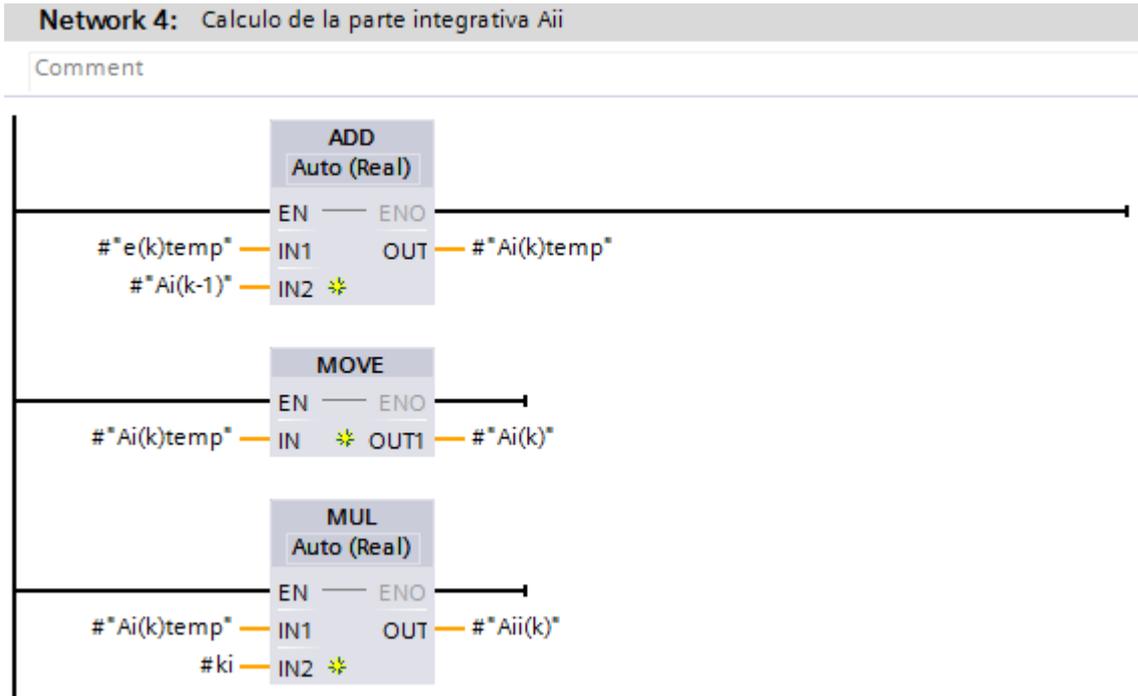


Figura 2. 32 Acción Integral del PID

Finalmente, en el bloque ADD se suman las tres acciones: proporcional, derivativa e integral.

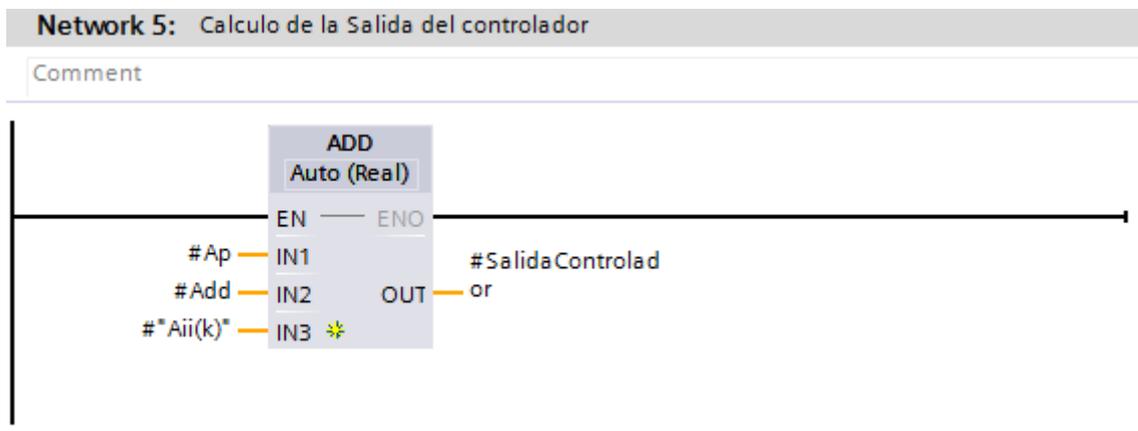


Figura 2. 33 Suma de las tres acciones del PID

Y para la siguiente secuencia, el error $e(k)$ pasa a ser el error anterior y asimismo la acción integral $A_i(k)$ pasa a ser la acción integral anterior $A_i(k - 1)$.

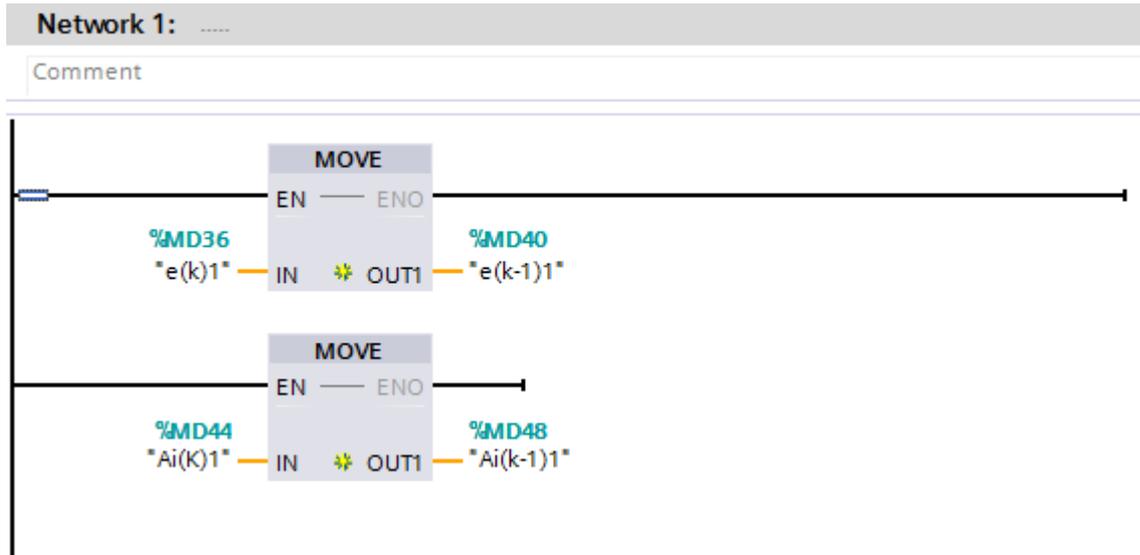


Figura 2. 34 Cambio de variables para la siguiente secuencia

Finalmente, se construye un bloque PID donde se implemente todas las operaciones antes mencionadas en el TIA PORTAL.

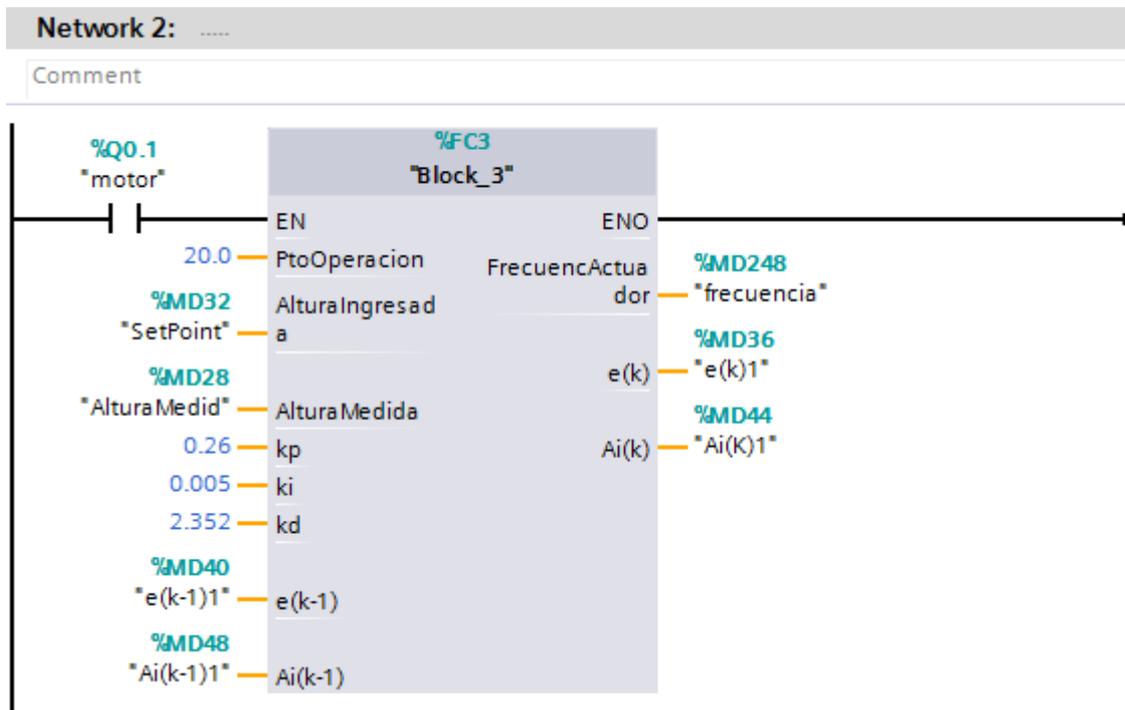


Figura 2. 35 Gráfica del bloque PID programado en TIA PORTAL

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

3.1. Resultados del PID simulado

Para aplicar el controlador PID en el sistema, se analizó los índices de desempeño en la gráfica de esta en lazo abierto. Como se puede observar en la gráfica en Sisotool, se tuvo un error de estado estacionario ($ess = 1 - final\ value$) de 0.046%. Lo que se busca obtener aplicando el controlador es que este error sea nulo y que disminuya el sobrenivel porcentual (overshoot).

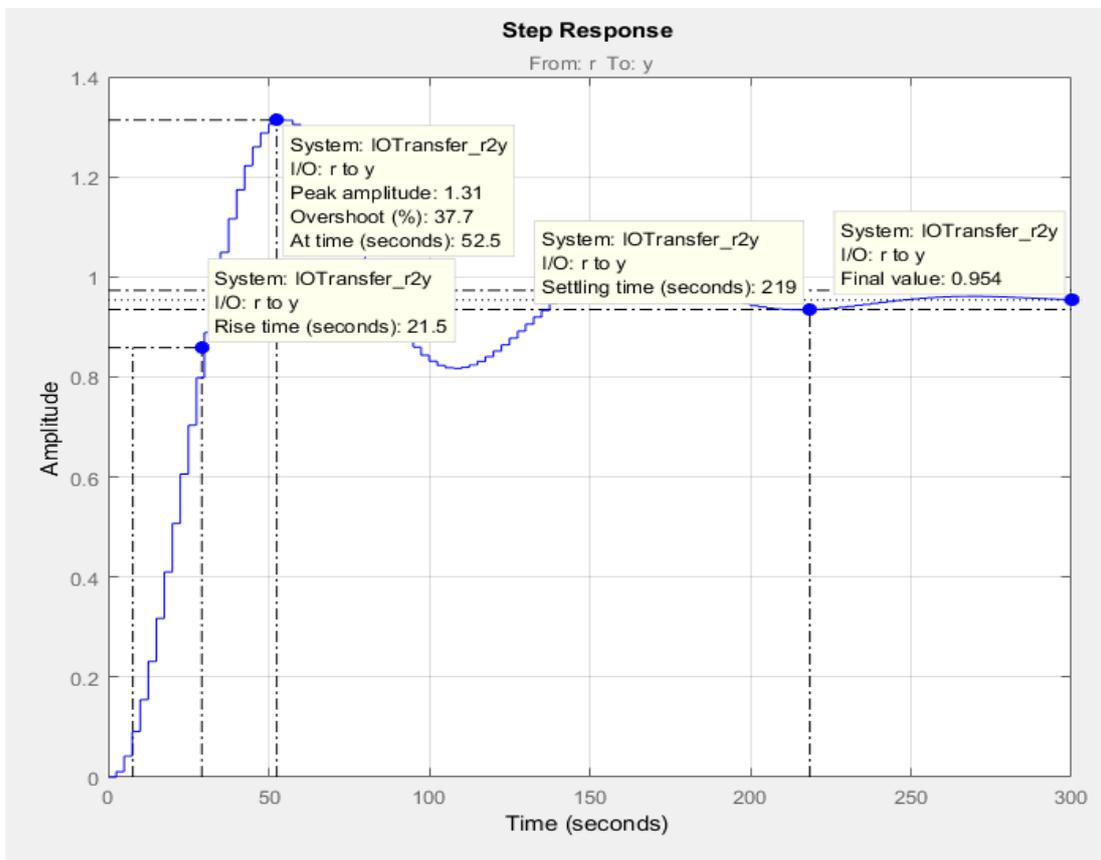


Figura 3. 1 Gráfica del sistema sin el controlador PID

Ya con el controlador PID, simulando de nuevo en Sisotool, se pudo observar el error de estado estacionario bajo a 0 y el sobrenivel porcentual se redujo a 6.84%.

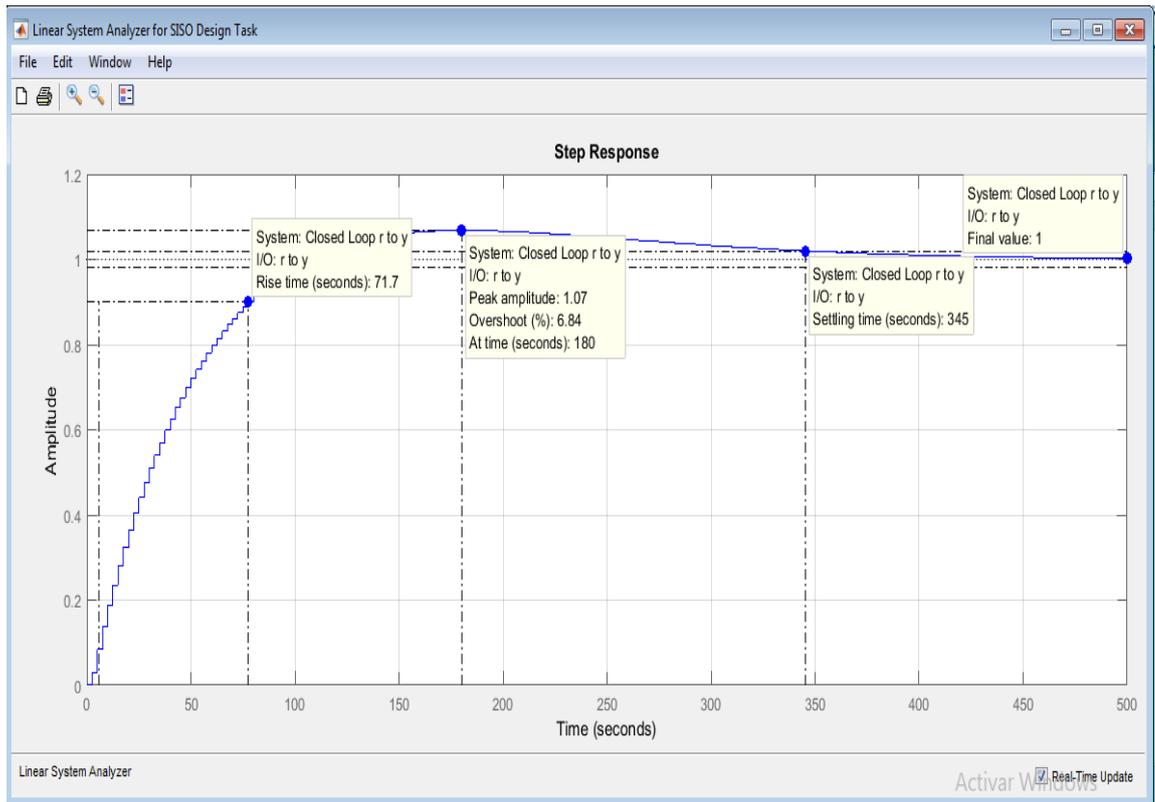


Figura 3. 2 Gráfica del sistema con el controlador PID

3.2. Desempeño del PID embebido en el PLC

Ya aplicando el controlador PID en la planta, se procede a obtener una gráfica de seguimiento de dicho controlador para visualizar su desempeño en una prueba real.

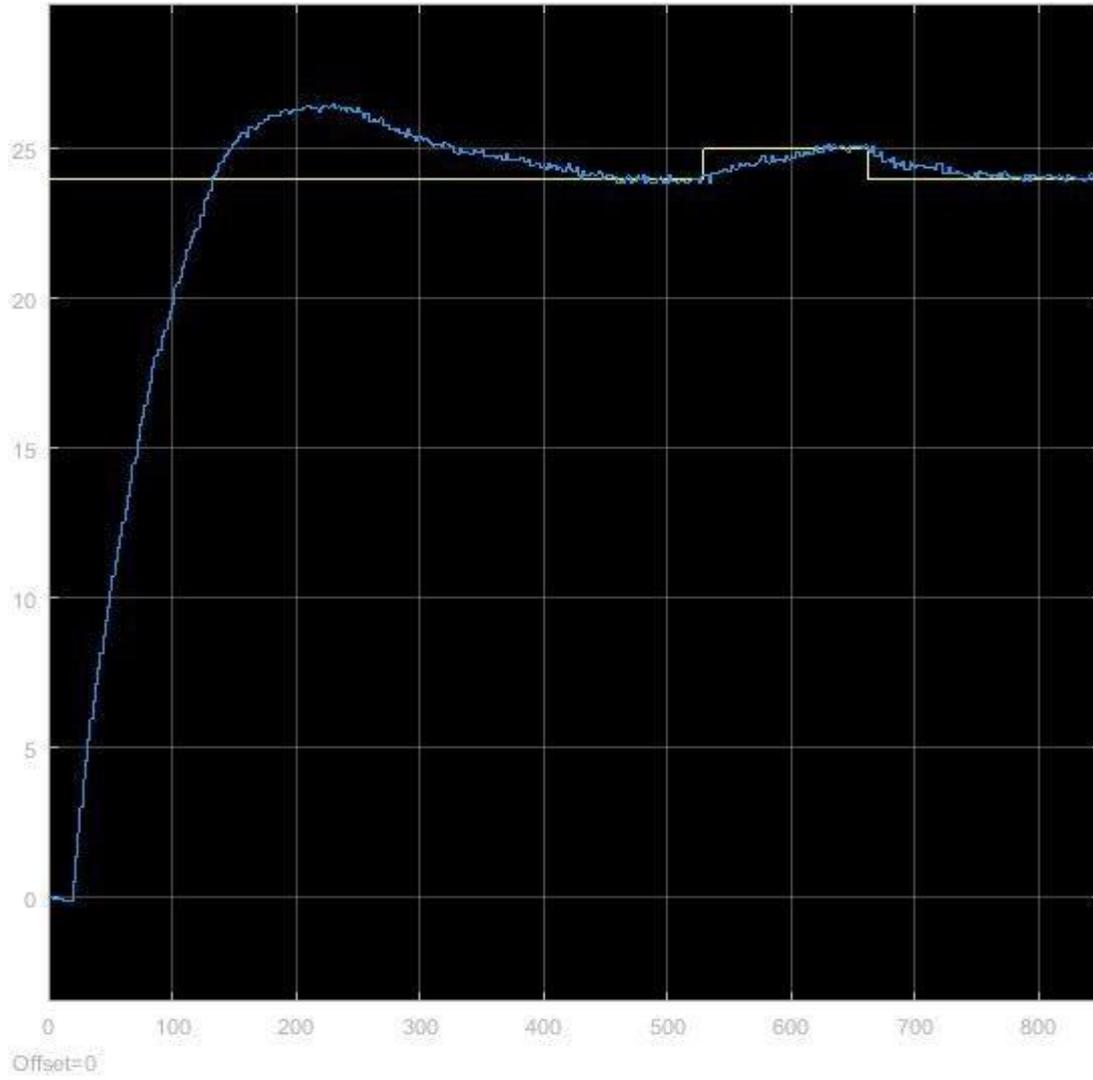


Figura 3. 3 Gráfica del sistema con el controlador embebido en el PLC

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se implementó un PID, ya que existen diferencias entre los algoritmos diseñados en Matlab y TIA PORTAL, provocando una distorsión en el controlador PI, por eso tuvo que ser necesaria la implementación de la parte derivativa.

Para el correcto diseño del controlador PID se encontró una planta con un ajuste superior al 90% respecto a los datos reales, esto para tener una mejor respuesta del controlador.

En el PLC se embebió un controlador PID discreto para tener un mayor aprovechamiento de sus recursos, esto es de mucha utilidad en la parte industrial, ya que se pueden implementar otros procesos y también sirve en la parte académica para el aprendizaje de nuevas técnicas de control.

Se recomienda comprobar que la versión del Firmware del PLC sea la misma que la utilizada en el proyecto del TIA PORTAL, debido a que si son diferentes no se podrá transferir el proyecto hacia el PLC.

Cuando se configure el módulo de entradas y salidas en el TIA PORTAL, se debe verificar que la entrada del módulo este en rango de corriente y la salida este en rango de voltaje, esto es porque la salida del sensor de presión de la planta que va conectada a la entrada del módulo trabaja en un rango de 4 a 20 mA y la salida del módulo va conectada a la entrada del variador, el cual se lo controla en un rango de 0 a 10 V.

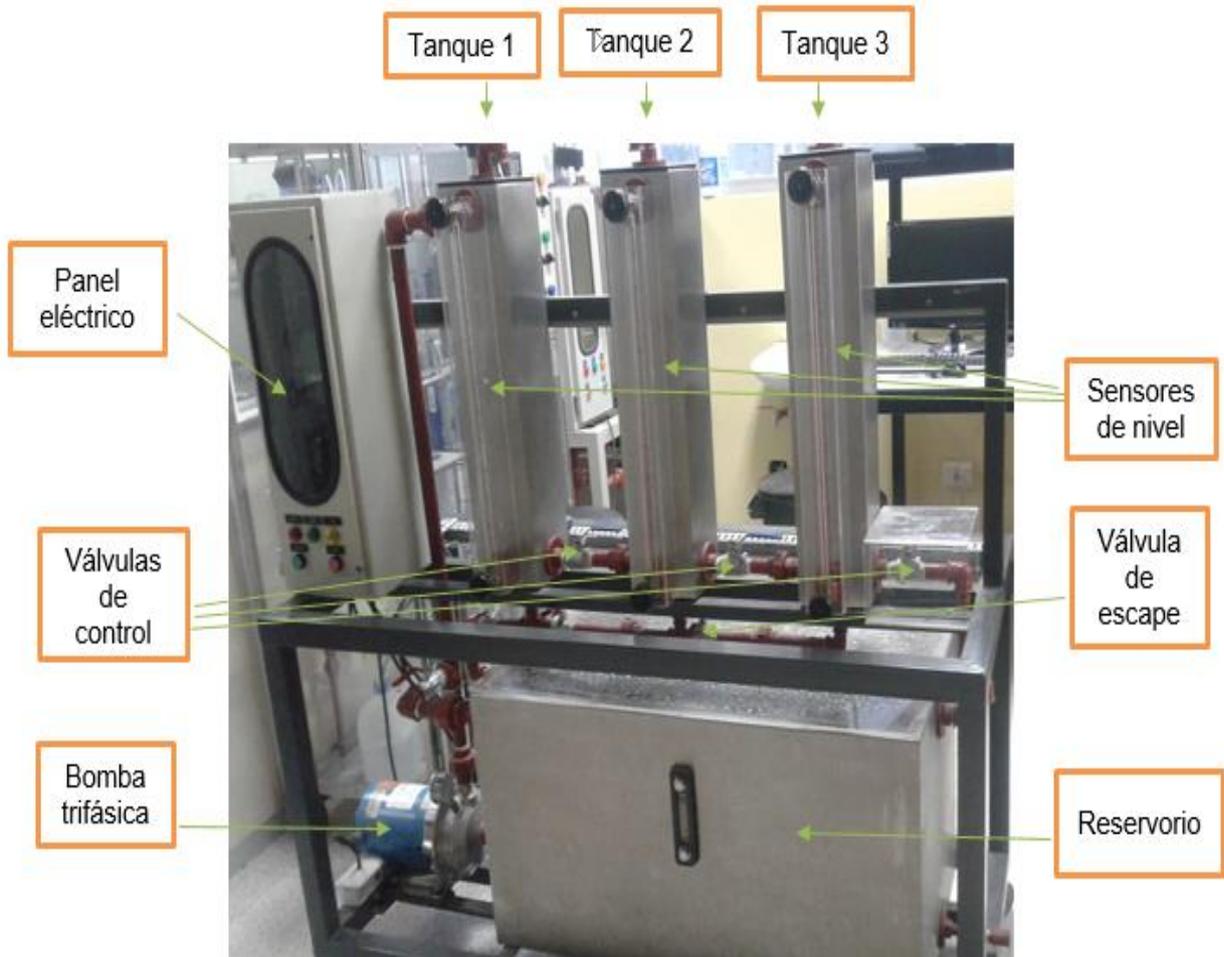
BIBLIOGRAFÍA

- [1]http://www.academia.edu/12564358/Dise%C3%B1o_de_un_controlador_PID_en_tiempo_discreto
- [2]K. Ogata, Discrete- Time Control Systems, PRENTICE HALL, 1994.
- [3]<https://la.mathworks.com/products/sysid/features.html#model-identification-from-data>
- [4]<http://perso.ya.com/ecoterso/ManualSimulink.pdf>
- [5]https://cache.industry.siemens.com/dl/files/484/67267484/att_61462/v1/v20_OPI_es-SP_es-ES.pdf
- [6]https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/controladores_modulares/Documents/S7-1200_COM_CPU_CPU.pdf
- [7]<https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/Documents/S71200-MANUAL%20DEL%20SISTEMA.PDF>
- [8]<http://www.infoplcn.net/descargas/103-siemens/automatas/s7-1200/2342-analogicas-automata-s7-1200>

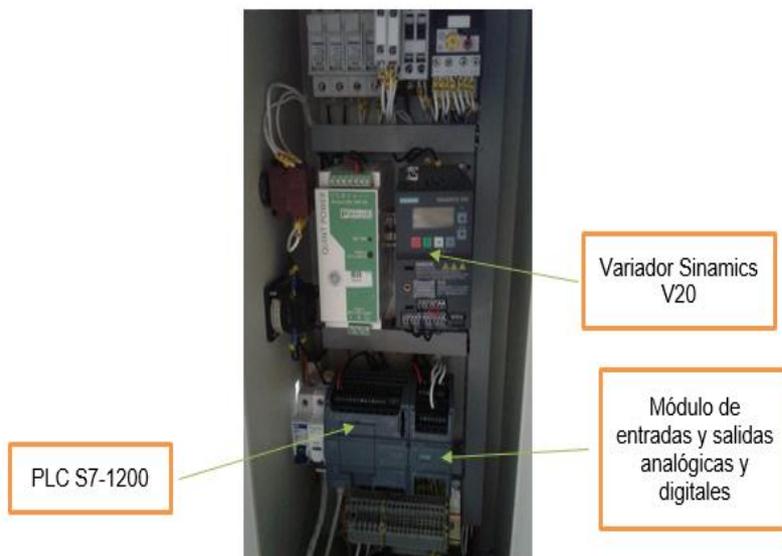
ANEXOS

Planta de tres tanques del Laboratorio de Control Automático

PARTE EXTERNA



PARTE INTERNA DEL PANEL ELÉCTRICO



Montaje

Los equipos S7-1200 son fáciles de montar. El S7-1200 puede montarse en un panel o en un raíl DIN, bien sea horizontal o verticalmente. El tamaño pequeño del S7-1200 permite ahorrar espacio.

ADVERTENCIA

Los PLCs S7-1200 SIMATIC son controladores abiertos. Por este motivo, el S7-1200 debe montarse en una carcasa, un armario eléctrico o una sala de control. Sólo el personal autorizado debe tener acceso a la carcasa, el armario eléctrico o la sala de control.

Si no se cumplen los requisitos de montaje, pueden producirse la muerte, lesiones corporales graves y/o daños materiales.

Vigile siempre los requisitos de montaje de los PLCs S7-1200.

Alejar los dispositivos S71200 de fuentes de calor, alta tensión e interferencias

Como regla general para la disposición de los dispositivos del sistema, los aparatos que generan altas tensiones e interferencias deben mantenerse siempre alejados de los equipos de baja tensión y de tipo lógico, tales como el S71200.

Al configurar la disposición del S7-1200 en el panel, se deben tener en cuenta los aparatos que generan calor y disponer los equipos electrónicos en las zonas más frías del armario eléctrico. Si se reduce la exposición a entornos de alta temperatura, aumentará la vida útil de cualquier dispositivo electrónico.

También se debe considerar la ruta del cableado de los dispositivos montados en el panel. Evite tender las líneas de señales de baja tensión y los cables de comunicación en un mismo canal junto con los cables AC y DC de alta energía y conmutación rápida.

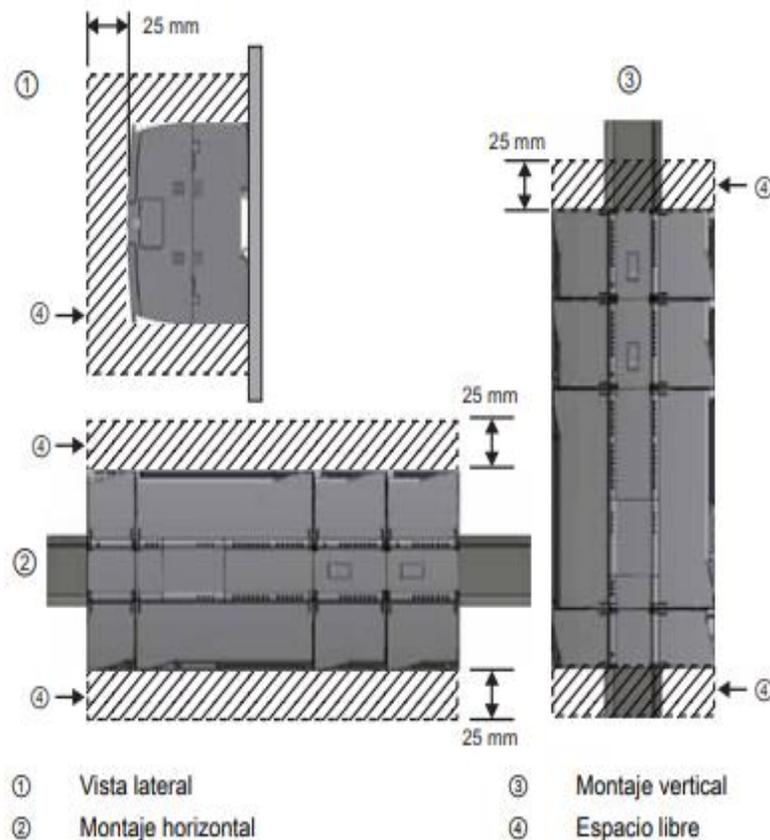
Prever espacio suficiente para la refrigeración y el cableado

La refrigeración de los dispositivos S71200 se realiza por convección natural. Para la refrigeración correcta es preciso dejar un espacio mínimo de 25 mm por encima y por debajo de los dispositivos. Asimismo, se deben prever como mínimo 25 mm de profundidad entre el frente de los módulos y el interior de la carcasa.

PRECAUCIÓN

En el montaje vertical, la temperatura ambiente máxima admisible se reduce en 10 grados centígrados. Un sistema S7-1200 montado verticalmente debe orientarse de manera que la CPU se encuentre en el extremo inferior del conjunto.

Al planificar la disposición del sistema S71200, prevea espacio suficiente para el cableado y la conexión de los cables de comunicación.



Corriente necesaria

La CPU dispone de una fuente de alimentación interna que suministra energía eléctrica a la CPU, los módulos de señales, la Signal Board y los módulos de comunicación, así como otros equipos consumidores de 24 V DC.

En los datos técnicos (Página 319) encontrará más información sobre la corriente de 5 V DC que suministra la CPU y la corriente de 5 V DC que requieren los módulos de señales, la Signal Board y los módulos de comunicación. En "Calcular la corriente necesaria" (Página 361) encontrará más información sobre cómo determinar cuánta energía (o corriente) puede proveer la CPU para la configuración.

La CPU provee una alimentación de sensores de 24 V DC que puede suministrar 24 V DC a las entradas y bobinas de relé de los módulos de señales, así como a otros equipos consumidores. Si los requisitos de corriente de 24 V DC exceden la capacidad de la alimentación de sensores, es preciso añadir una fuente de alimentación externa de 24 V DC al sistema. En los datos técnicos (Página 319) se indica la corriente necesaria para la alimentación de sensores de 24 V DC de las distintas CPUs S7-1200.

Si se requiere una fuente de alimentación externa de 24 V DC, vigile que no se conecte en paralelo con la alimentación de sensores de la CPU. Para aumentar la protección contra interferencias, se recomienda conectar los cables neutros (M) de las distintas fuentes de alimentación.

ADVERTENCIA

Si se conecta una fuente de alimentación externa de 24 V DC en paralelo con la fuente de alimentación de sensores de 24 V DC, puede surgir un conflicto entre ambas fuentes, ya que cada una intenta establecer su propio nivel de tensión de salida.

Este conflicto puede reducir la vida útil u ocasionar la avería inmediata de una o ambas fuentes de alimentación y, en consecuencia, el funcionamiento imprevisible del sistema PLC. El funcionamiento imprevisible puede producir la muerte, lesiones corporales graves y/o daños materiales.

La fuente de alimentación DC de sensores y cualquier fuente de alimentación externa deben alimentar diferentes puntos.

Algunos puertos de entrada de alimentación de 24 V DC del sistema S7-1200 están interconectados, teniendo un circuito lógico común que conecta varios bornes M. Por ejemplo, los circuitos siguientes están interconectados si no tienen aislamiento galvánico según las hojas de datos técnicos: la fuente de alimentación de 24 V DC de la CPU, la entrada de alimentación de la bobina de relé de un SM, o bien la fuente de alimentación de una entrada analógica sin aislamiento galvánico. Todos los bornes M sin aislamiento galvánico deben conectarse al mismo potencial de referencia externo.

ADVERTENCIA

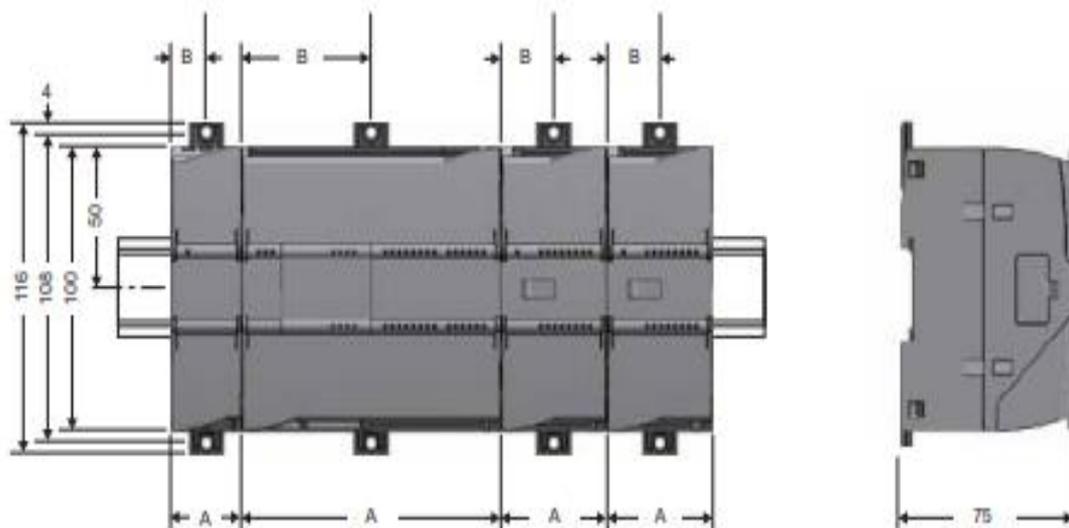
Si los bornes M sin aislamiento galvánico se conectan a diferentes potenciales de referencia, circularán corrientes indeseadas que podrían averiar o causar reacciones inesperadas en el PLC y los equipos conectados.

Si no se cumplen estas directrices, es posible que se produzcan averías o reacciones inesperadas que podrían causar la muerte, lesiones corporales graves y/o daños materiales.

Asegúrese que todos los bornes M sin aislamiento galvánico de un sistema S7-1200 están conectados al mismo potencial de referencia.

2.2 Procedimientos de montaje y desmontaje

Dimensiones de montaje (mm)



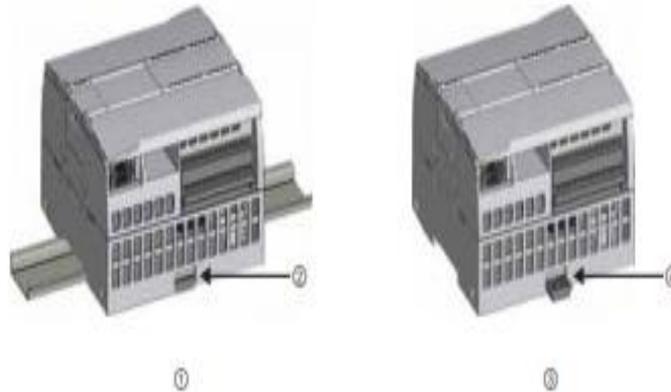
Dispositivos S7-1200		Ancho A	Ancho B
CPUs:	CPU 1211C y CPU 1212C	90 mm	45 mm
	CPU 1214C	110 mm	55 mm
Módulos de señales:	8 y 16 E/S, DC y relé (8I, 16I, 8Q, 16Q, 8I/8Q)	45 mm	22,5 mm
	Analógicos (4AI, 8AI, 4AI/4AQ, 2AQ, 4AQ)		
	16I/16Q relé (16I/16Q)	70 mm	35 mm
Módulos de comunicación:	CM 1241 RS232 y CM 1241 RS485	30 mm	15 mm

Las CPUs, los SMs y CMs pueden montarse en un perfil DIN o en un panel. Utilice los clips del módulo previstos para el perfil DIN para fijar el dispositivo al perfil. Estos clips también pueden extenderse a otra posición para poder montar la unidad directamente en un panel. La dimensión interior del orificio para los clips de fijación en el dispositivo es 4,3 mm.

Es preciso prever una zona de disipación de 25 mm por encima y por debajo de la unidad para que el aire pueda circular libremente.

Montaje y desmontaje de dispositivos S7-1200

La CPU se puede montar fácilmente en un perfil estándar o en un panel. Los clips de fijación permiten fijar el dispositivo al perfil DIN. Estos clips también encajan en una posición extendida para proveer orificios de montaje que permiten montar el dispositivo directamente en un panel.



- ① Montaje en perfil DIN
- ② Clip de fijación al perfil enclavado
- ③ Montaje en panel
- ④ Clip de fijación en posición extendida para el montaje en panel

Antes de montar o desmontar cualquier dispositivo eléctrico, asegúrese que se ha desconectado la alimentación. Asegúrese también que está desconectada la alimentación eléctrica de todos los dispositivos conectados.

ADVERTENCIA

Si el S7-1200 o los dispositivos conectados se montan o desmontan estando conectada la alimentación, puede producirse un choque eléctrico o un funcionamiento inesperado de los dispositivos.

Si la alimentación del S7-1200 y de los dispositivos conectados no se desconecta por completo antes del montaje o desmontaje, podrían producirse la muerte, lesiones corporales graves y/o daños materiales debidos a choques eléctricos o al funcionamiento inesperado de los equipos.

Respete siempre las medidas de seguridad necesarias y asegúrese que la alimentación del S7-1200 está desconectada antes de montar o desmontar las CPUs S7-1200 o los equipos conectados.

Al sustituir o montar un dispositivo S7-1200, vigile que se utilice siempre el módulo correcto o un dispositivo equivalente.

⚠ ADVERTENCIA

El montaje incorrecto de un módulo S7-1200 puede ocasionar el funcionamiento impredecible del programa del S7-1200.

Si un dispositivo S7-1200 no se sustituye por el mismo modelo o si no se monta con la orientación correcta y en el orden previsto, podrían producirse la muerte, lesiones corporales graves y/o daños materiales debido al funcionamiento inesperado del equipo.

Sustituya un dispositivo S7-1200 por el mismo modelo y móntelo con la orientación y posición correctas.

2.2.1 Montaje y desmontaje de la CPU

Montaje

La CPU se puede montar en un panel o en un perfil DIN.

Nota

Conecte los módulos de comunicación necesarios a la CPU y monte el conjunto en forma de unidad. Los módulos de señales se montan por separado una vez montada la CPU.

Para montar la CPU en un panel, proceda del siguiente modo:

1. Posicione y taladre los orificios de montaje (M4 o estándar americano n.º 8) según las dimensiones de montaje indicadas en la tabla.
2. Extienda los clips de fijación del módulo. Asegúrese que los clips de fijación al perfil DIN en los lados superior e inferior de la CPU están en posición extendida.
3. Atornille el módulo al panel utilizando tornillos dispuestos en los clips.

Nota

Si el sistema está sometido a vibraciones fuertes o si se monta verticalmente, el montaje en panel ofrece mayor protección al S7-1200.

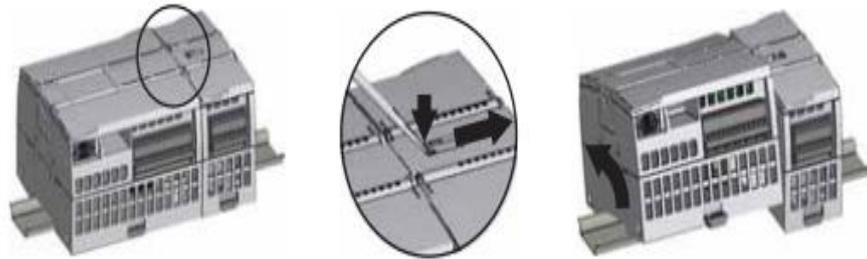
Para montar la CPU en un perfil DIN, proceda del siguiente modo:



1. Monte el perfil DIN. Atornille el perfil al panel de montaje dejando un espacio de 75 mm entre tornillo y tornillo.
2. Enganche la CPU por el lado superior del perfil.
3. Extraiga el clip de fijación en el lado inferior de la CPU de manera que asome por encima del perfil.
4. Gire la CPU hacia abajo para posicionarla correctamente en el perfil.
5. Oprima los clips hasta que la CPU encaje en el perfil.

Desmontaje

Para preparar la CPU para el desmontaje, desconecte la alimentación eléctrica y los conectores de E/S y retire el cableado y demás cables de la CPU. Desmonte la CPU y los módulos de comunicación conectados en forma de conjunto. Todos los módulos de señales deben permanecer montados.



Si un módulo de señales está conectado a la CPU, retraiga el conector de bus:

1. Coloque un destornillador junto a la lengüeta en el lado superior del módulo de señales.
2. Oprima hacia abajo para desenclavar el conector de la CPU.
3. Desplace la lengüeta por completo hacia la derecha.

Desmonte la CPU:

1. Extraiga el clip de fijación para desenclavar la CPU del perfil DIN.
2. Gire la CPU hacia arriba, extráigala del perfil y retírela del sistema.

2.2.3 Montaje y desmontaje de un módulo de comunicación

Montaje

Acople el CM a la CPU antes de montar el conjunto en forma de unidad en el perfil DIN o panel.

Retire la tapa de bus en el lado izquierdo de la CPU:

1. Inserte un destornillador en la ranura arriba de la tapa de bus.
2. Haga palanca suavemente en el lado superior de la tapa.



Retire la tapa de bus. Guarde la tapa para poder reutilizarla.

Conecte las unidades:

1. Alinee el conector de bus y las clavijas del CM con los orificios de la CPU.
2. Empuje firmemente una unidad contra la otra hasta que encajen las clavijas.



Montar las unidades en un perfil DIN o panel.

1. Para el montaje en un rail DIN, asegúrese de que el clip de fijación superior está en la posición enclavada (interior) y que el clip de fijación inferior está extendido, tanto en la CPU como en los CMs acoplados.
2. Monte la CPU y los CMs acoplados de la forma descrita en Montaje y desmontaje de la CPU (Página 29).
3. Una vez montados los dispositivos en el perfil DIN, enclave los clips de sujeción para sujetar los dispositivos al rail.

Para el montaje en un panel, asegúrese de que los clips de fijación al rail DIN están en posición extendida.

Desmontaje

Desmunte la CPU y el CM en forma de unidad del rail DIN o panel.



Prepare el CM para el desmontaje.

1. Desconecte la alimentación eléctrica de la CPU.
2. Desconecte los conectores de E/S y retire el cableado y demás cables de la CPU y los CMs.
3. Para el montaje en un rail DIN, extienda los clips de sujeción inferiores de la CPU y los CMs.
4. Desmunte la CPU y los CMs del rail DIN o panel.

Desmunte el CM.

1. Sujete la CPU y los CMs con las manos.
2. Sepárelos.

No utilice herramientas para separar los módulos, puesto que podrían deteriorarse.



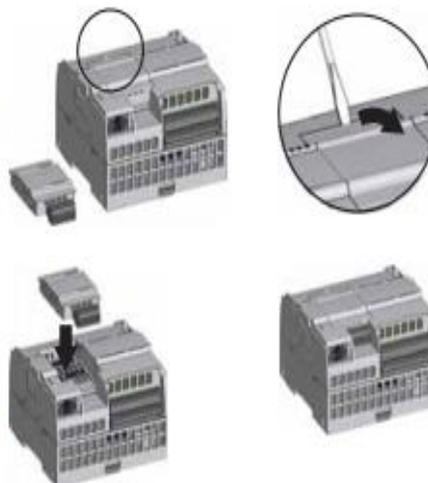
2.2.4 Montaje y desmontaje de una Signal Board

Montaje

Prepare la CPU para el montaje de la SB desconectando la alimentación de la CPU y retirando las tapas superior e inferior de los bloques de terminales de la CPU.

Para montar el SB, proceda del siguiente modo:

1. Inserte un destornillador en la ranura arriba de la CPU en el lado posterior de la tapa.
2. Haga palanca suavemente para levantar la tapa y retírela de la CPU.
3. Coloque la SB rectamente en su posición de montaje en el lado superior de la CPU.
4. Oprima firmemente la SB hasta que encaje en su posición.
5. Coloque nuevamente las tapas de los bloques de terminales.

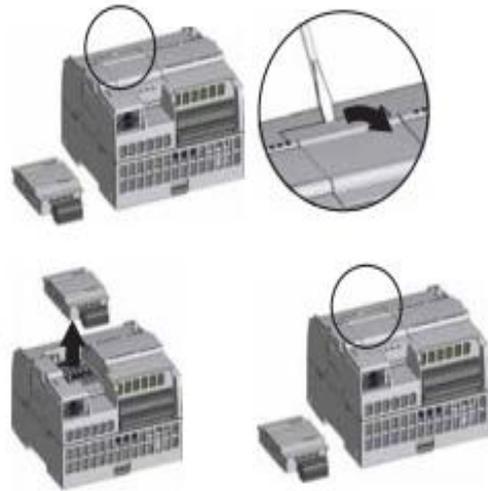


Desmontaje

Prepare la CPU para el desmontaje de la SB desconectando la alimentación de la CPU y retirando las tapas superior e inferior de los bloques de terminales de la CPU.

Para desmontar la SB, proceda del siguiente modo:

1. Inserte un destornillador en la ranura en el lado superior de la SB.
2. Haga palanca suavemente para desacoplar la SB de la CPU.
3. Retire la SB rectamente desde arriba de su posición de montaje en el lado superior de la CPU.
4. Coloque nuevamente la tapa de la SB.
5. Coloque nuevamente las tapas de los bloques de terminales.



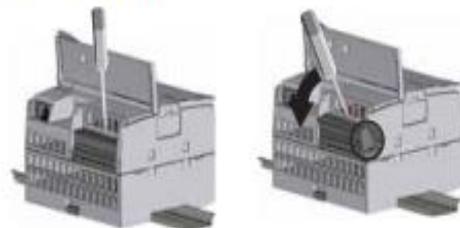
2.2.5 Extraer e insertar el conector del bloque de terminales del S7-1200

La CPU, la SB y los módulos SM incorporan conectores extraíbles que facilitan la conexión del cableado. Para preparar el sistema para la extracción del conector del bloque de terminales:

- Desconecte la alimentación eléctrica de la CPU.
- Abra la tapa por encima del conector.

Para desmontar el conector, proceda del siguiente modo:

1. Busque la ranura para insertar la punta del destornillador en el lado superior del conector.
2. Inserte un destornillador en la ranura.
3. Haga palanca suavemente en el lado superior del conector para extraerlo de la CPU. El conector se desenclava audiblemente.
4. Sujete el conector con las manos y extráigalo de la CPU.



Para montar el conector, proceda del siguiente modo:

1. Prepare los componentes para el montaje del bloque de terminales desconectando la alimentación de la CPU y abriendo la tapa del bloque de terminales.
2. Alinee el conector a los pines del dispositivo.
3. Alinee el lado de cableado del conector en el zócalo.
4. Con un movimiento giratorio, empuje firmemente el conector hacia abajo hasta que encaje.

Compruebe si el conector está bien alineado y encajado correctamente.

