

**ANEXO 1: SINTONIZACION A TRAVÉS DEL METODO DE ZIEGLER-NICHOLS**

Luego de realizar las pruebas necesarias con el modelo de planta obtenido y no lograr los resultados esperados, se diseñará el controlador PID del sistema de control. Para lograrlo, se definen las constantes proporcional, integral y derivativa del controlador, mediante un método de sintonización.

La sintonización de un controlador se puede realizar mediante técnicas heurísticas (prueba y error) o métodos sistemáticos. En esta tesis se realizará la sintonización a través de un método sistemático muy difundido: el método de Ziegler-Nichols en Lazo Abierto. Los resultados de este método se deducen a partir de un sistema de primer orden con retardo puro. Para nuestro caso, se partirá de la función de transferencia obtenida del pasteurizador y se añadirá un retardo igual a 180.

Entonces se tiene:

$$\frac{T_i(s)}{I(s)} = \frac{2RR_t I_0}{(R_t Cs + 1)} = \frac{2(7)(0.23)}{(0.23)(9973.82)s + 1} e^{-180s}$$

$$\frac{T_i(s)}{I(s)} = \frac{3.22}{2293.98s + 1} e^{-180s}$$

Donde:

$$K = 3.22$$

$$\tau = 2293.98$$

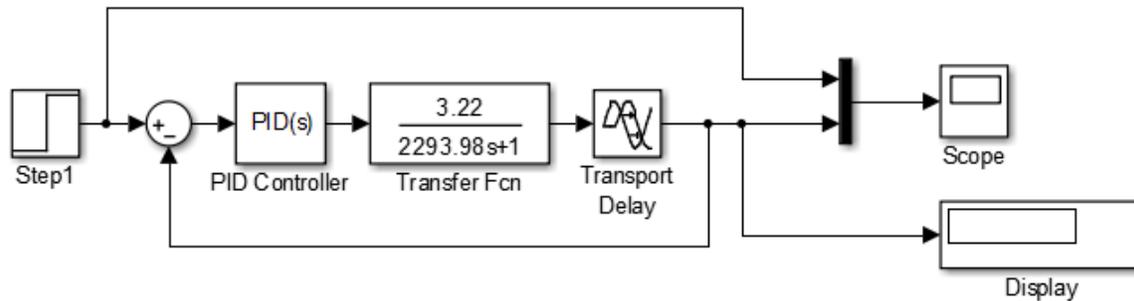
$$T_d = 180$$

De acuerdo al tipo de controlador obtenemos los siguientes valores:

	$K_p$	$T_I$	$T_D$
P	$\frac{\tau}{K \cdot T_d} = 3.96$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{\tau}{K \cdot T_d} = 3.56$	$3T_d = 540$	0
PID	$1.2 \frac{\tau}{K \cdot T_d} = 4.75$	$2T_d = 360$	$0.5T_d = 90$

**Tabla 5.1: Cálculo de las constantes del controlador.**

Una vez que se tienen los resultados de la sintonización mediante el método de Ziegler-Nichols en Lazo Abierto, se llevan a Simulink y se pone a prueba cada tipo de controlador.



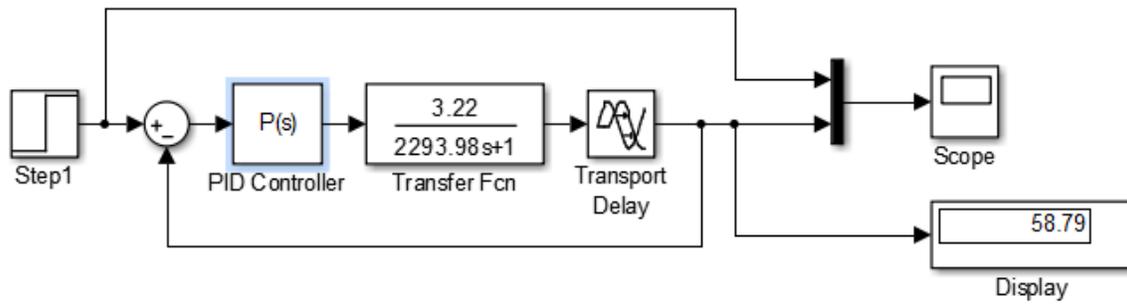
**Figura 5.1: Diagrama de bloques del sistema de control con controlador.**

**Fuente: Elaboración propia.**

La figura 5.1 muestra los principales bloques del sistema de control. El bloque “Step1” representa la entrada tipo escalón que alcanza un valor de 63.4. El bloque “PID Controller” representa, como su nombre lo dice, al controlador PID. Este bloque será modificado para probar los tres tipos de controladores (P, PI y PID) y comparar con cuál de ellos se obtiene el mejor resultado. El siguiente bloque, “Transfer Fcn”, contiene la función de transferencia del pasteurizador, mientras que el último bloque del lazo representa el retardo añadido para la sintonización. Además de los bloques antes mencionados, se agregaron los bloques “Display” y “Scope”. El primero nos permitirá identificar rápidamente el valor alcanzado por la variable controlada (temperatura) al final de la simulación, mientras que el segundo nos dará la curva descrita por dicha variable.

### Controlador P

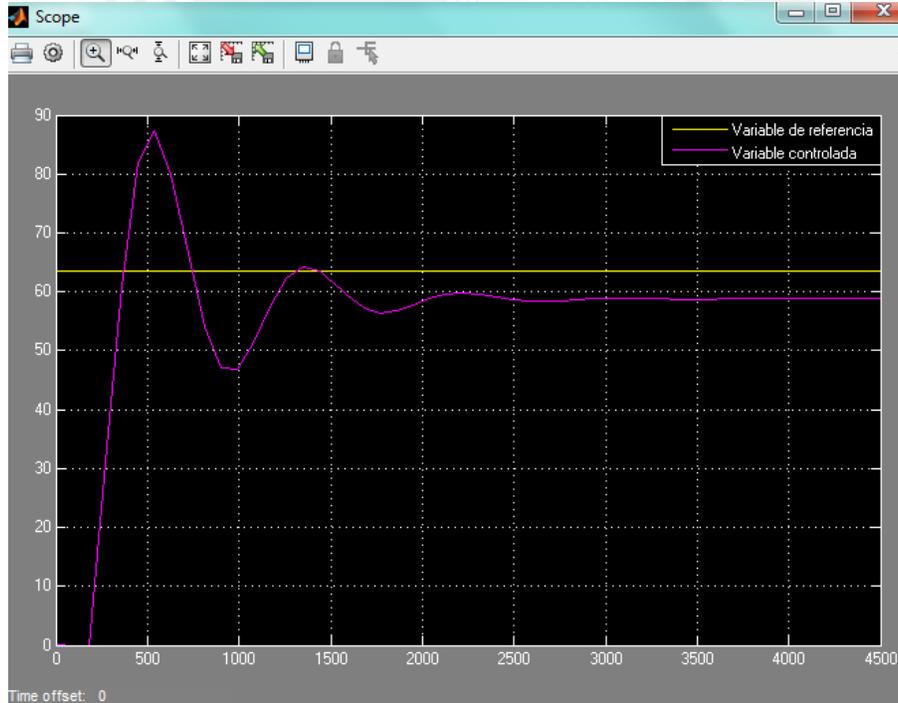
Modificamos el bloque “PID Controller” y seleccionamos la opción Controlador P. Luego ingresamos el parámetro del controlador, en este caso, 3.96 de acuerdo a la tabla. Una vez hecho esto, podremos realizar la simulación del sistema. Nótese que ahora en el interior del bloque se muestra “P(s)”, lo que indica que sólo actuará la parte proporcional del controlador (ver figura 5.2).



**Figura 5.2: Sistema de control con controlador P.**

**Fuente: Elaboración propia.**

Analizando el resultado obtenido en la figura 5.3, se observa que luego de 4500 segundos (75 minutos) la variable controlada se establece en 58.79, sin alcanzar el valor de referencia. Asimismo, presenta sobreimpulsos en los primeros minutos de la simulación. Por medio de este resultado se concluye que la acción proporcional debe modificarse a fin de que la curva no presente sobreimpulsos y para garantizar un error estacionario igual a 0, se deberá añadir al controlador la acción integral.

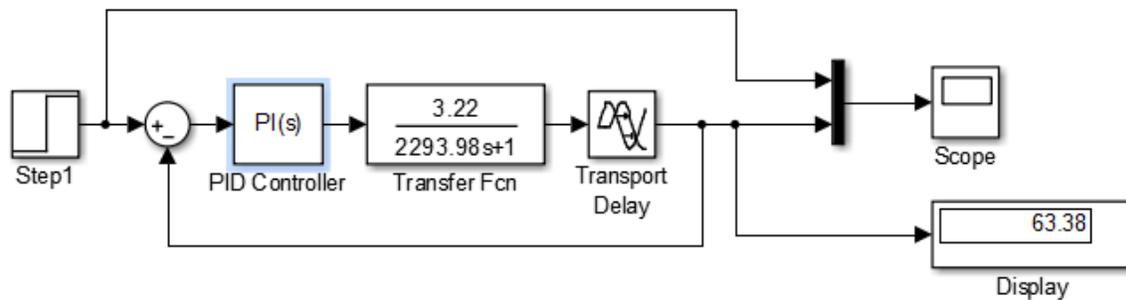


**Figura 5.3: Respuesta del sistema con controlador P con  $K_p = 3.96$**

**Fuente: Elaboración propia.**

## Controlador PI

Se accede nuevamente al bloque “PID Controller” y se elige la opción PI. Los valores que ahora se ingresarán serán 3.56 para la acción proporcional y 0.00659 para la acción integral. El último valor no corresponde al  $T_I$ , sino a  $K_I$  que se determina de la relación  $K_P/T_I$ . Al finalizar la configuración del bloque se observa que en el icono se muestra ahora “PI(s)” (ver figura 5.4).



**Figura 5.4: Diagrama de bloques del sistema de control con controlador PI.**

**Fuente: Elaboración propia.**

Al ver el resultado de la simulación en la figura 5.5 se obtiene lo esperado: un error estacionario igual a 0 debido a la acción integral del controlador, lo que permite que la variable controlada (temperatura) alcance los 63.4. Sin embargo, la curva aún presenta sobreimpulsos debido a la constante proporcional del controlador.

Partiendo de los valores antes fijados, se regulará la constante proporcional con el objetivo de anular los sobreimpulsos. Asimismo, se buscará llegar a la señal de referencia en un tiempo igual o menor al propuesto en esta tesis para cumplir con el objetivo planteado. Por estas razones, el controlador PI es, hasta el momento, el adecuado para satisfacer los requerimientos.

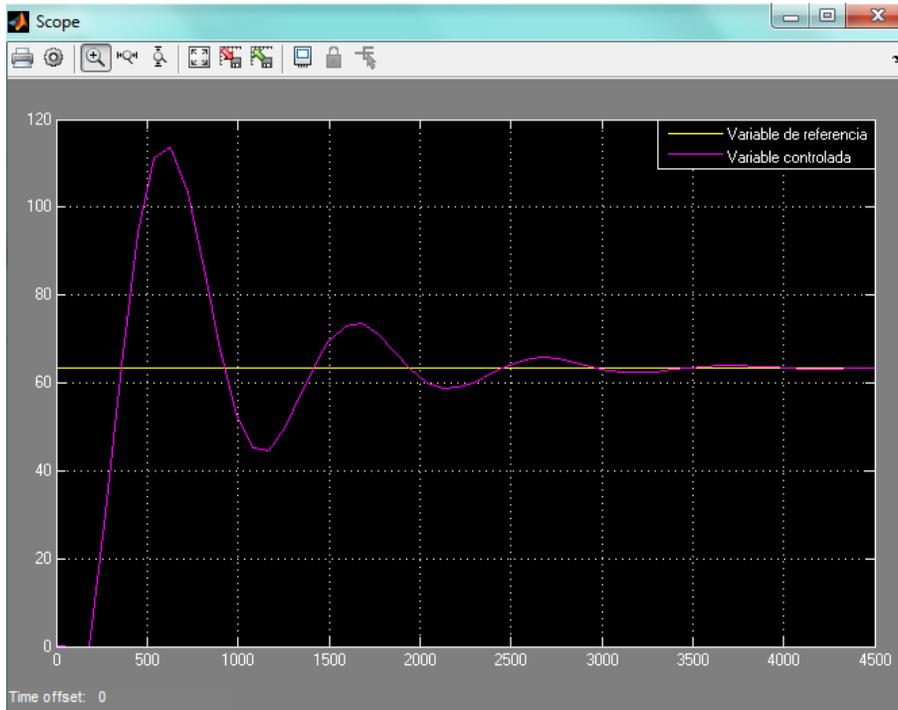


Figura 5.5: Respuesta del sistema con controlador PI con  $K_p = 3.56$  y  $T_i = 540$

Fuente: Elaboración propia.

Controlador PID

Finalmente, se realiza una prueba con el controlador PID. Se selecciona la opción PID y se ingresan los valores 4.75, 0.0132 y 427.5. Como se observa los dos últimos valores no se encuentran en la tabla ya que corresponden a las constantes  $K_i$  y  $K_D$  respectivamente. La constante  $K_i$  se deduce de la relación  $K_p/T_i$ , mientras que  $K_D$  corresponde a  $K_p \times T_D$ . Luego de ejecutar las modificaciones se ve que en la figura 5.6 el bloque indica "PID(s)".

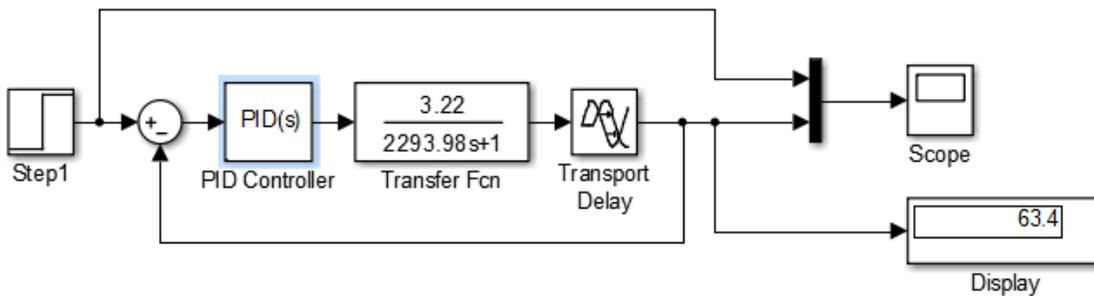
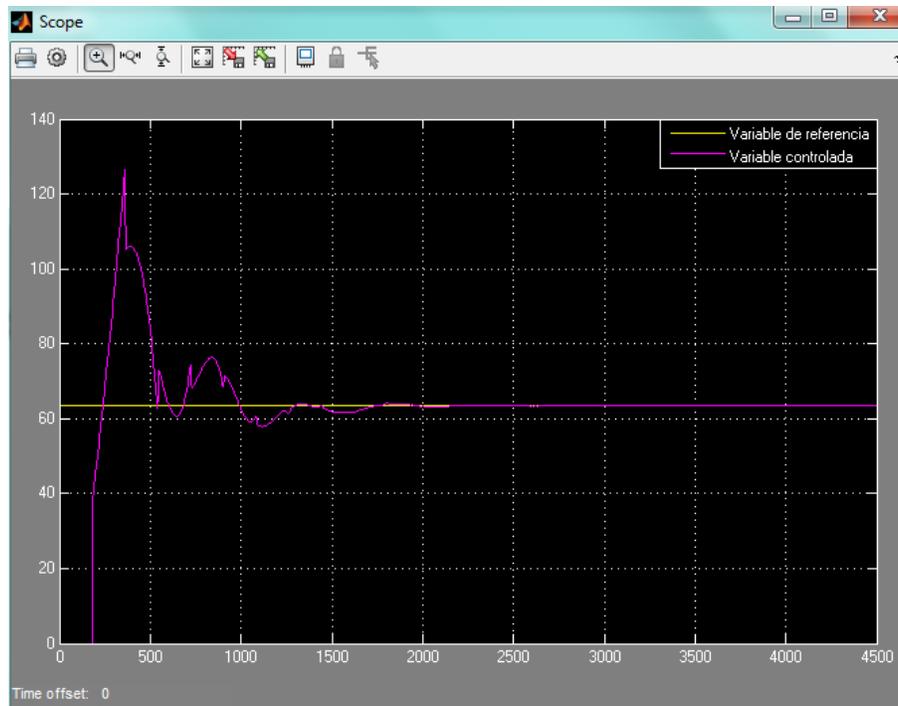


Figura 5.6: Diagrama de bloques del sistema de control con controlador PID.

Fuente: Elaboración propia.

En esta tercera simulación se observa que la curva obtenida presenta inestabilidad durante los primeros 1500 segundos (25 minutos) producto de la acción derivativa añadida. Sin embargo, la variable controlada alcanza la señal de referencia en un tiempo menor comparada con las simulaciones anteriores. Por tal motivo se concluye que la constante derivativa agregada está lejos del valor adecuado, lo que requerirá reducirla o suprimirla del controlador con el fin de cumplir los requisitos.



**Figura 5.7:** Respuesta del sistema con controlador PID con  $K_p = 4.75$ ,  $T_i = 360$  y  $T_D = 90$ . Fuente: Elaboración propia.

En base a las simulaciones realizadas con los tres tipos de controladores (P, PI, PID) se concluye que los parámetros que generan una curva más cercana a la deseada son los del controlador PI. No obstante, estos parámetros obtenidos a través del método de Ziegler-Nichols en Lazo Abierto deben ser ajustados de tal manera que se consiga una curva semejante a la curva de pre-calentamiento y pasteurización con un tiempo de establecimiento más corto.

Control para el sistema de enfriamiento

Una vez obtenido el modelo que representa a las celdas peltier será necesario diseñar el controlador que las acompañará en el sistema de control. Se seguirán los mismos pasos que el sistema de calentamiento, pero partiendo de una función de transferencia diferente.

$$F(s) = \frac{\alpha T_C R_{TH}}{C_F R_{TH} s + 1} = \frac{1.778}{288.804s + 1} e^{-5s}$$

Donde:

$$K = 1.778$$

$$\tau = 288.804$$

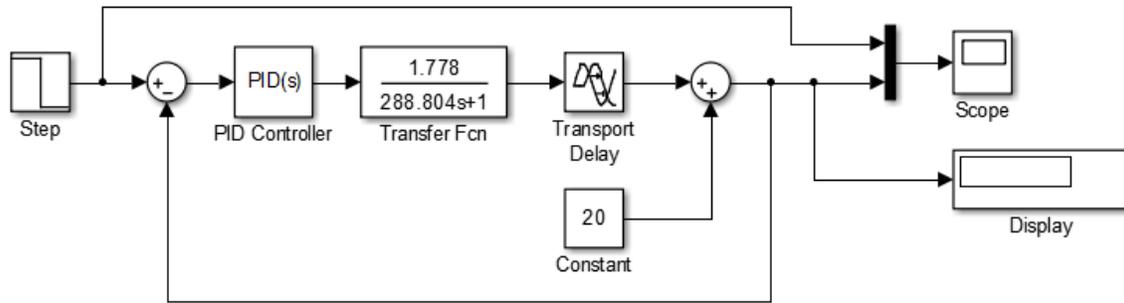
$$T_d = 5$$

En esta función de transferencia se añadió un retardo de 5 segundos que nos servirá posteriormente para calcular los parámetros del controlador. Luego de identificar las variables  $K$ ,  $\tau$  y  $T_d$ , calculamos los valores del controlador dependiendo del tipo.

	$K_p$	$T_I$	$T_D$
P	$\frac{\tau}{K \cdot T_d} = 32.49$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{\tau}{K \cdot T_d} = 29.24$	$3T_d = 15$	0
PID	$1.2 \frac{\tau}{K \cdot T_d} = 38.98$	$2T_d = 10$	$0.5T_d = 2.5$

**Tabla 5.2: Cálculo de las constantes del controlador para el sistema de enfriamiento. Fuente: Elaboración propia.**

Después, mediante el método de sintonización de Ziegler-Nichols en Lazo Abierto, llevamos el sistema a Simulink, donde se simulará cada tipo de controlador. En la figura 5.8 se muestra el modelo que utilizaremos para los tres casos, lo que se modificará con los valores del controlador. Estos valores nos sirven de referencia para saber que controlador se adecúa mejor a las necesidades del sistema; sin embargo, no son los valores reales sino que a partir de las simulaciones se llegarán a dichos valores.



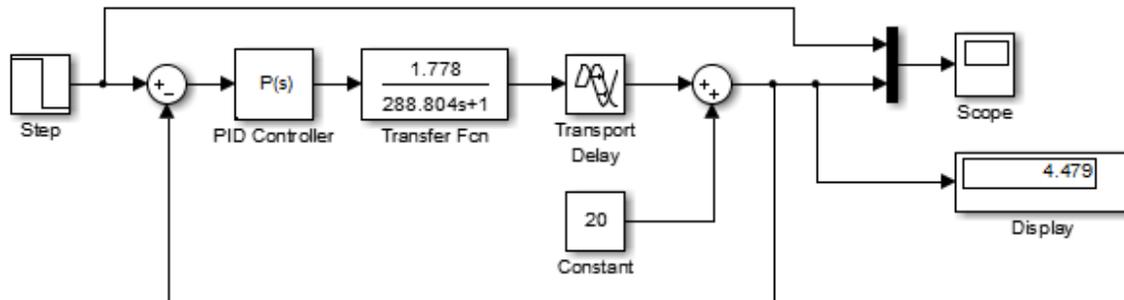
**Figura 5.8: Diagrama de bloques del sistema de control con controlador PID.**

**Fuente: Elaboración propia.**

Los valores obtenidos en la tabla son referenciales y nos darán una respuesta aproximada a la que queremos. El objetivo será ajustar ese valor para alcanzar la respuesta deseada. Por medio de este diagrama de bloques se simulará la etapa de enfriamiento, por tal motivo la entrada es una escalón descendente y a la variable del proceso se le suma 20 unidades, para representar un descenso de temperatura desde los 20°C (temperatura ambiente) hasta los 3°C.

Controlador P

Configuramos el sistema para que trabaje con un controlador tipo P y se ingresa el dato obtenido de la tabla.



**Figura 5.9: Diagrama de bloques del sistema de control con controlador P**

**Fuente: Elaboración propia.**

Al simular este sistema se obtiene lo siguiente.

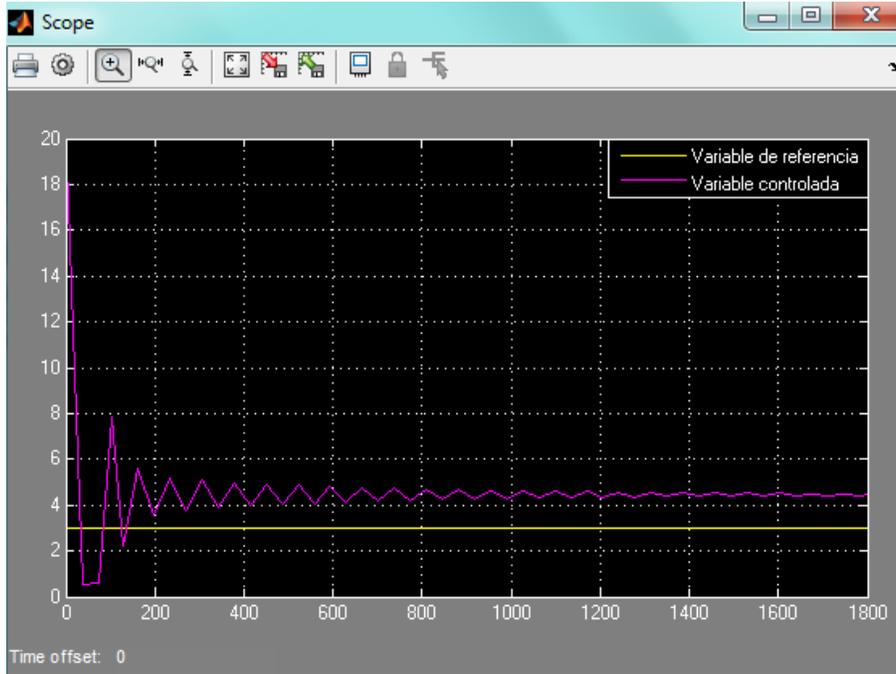


Figura 5.10: Respuesta del sistema con controlador P con  $K_p = 32.49$

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la gráfica, el sistema se acerca al valor deseado; sin embargo presenta inestabilidad durante los primeros segundos, la cual se reduce conforme avanza el tiempo.

### Controlador PI

Se modifica la configuración del sistema y se agrega el parámetro integral al controlador.

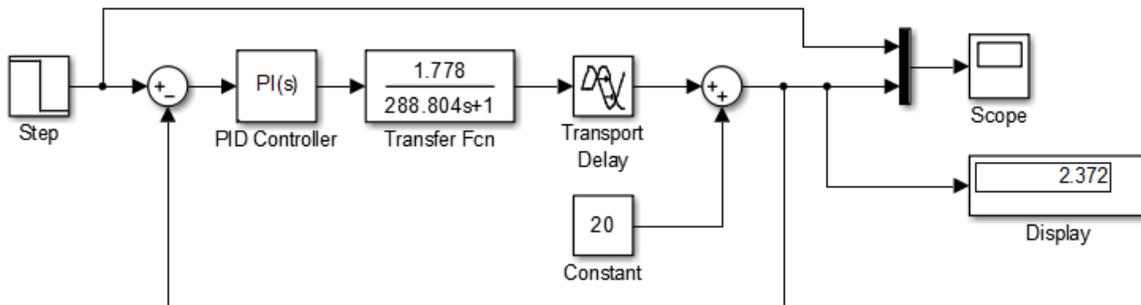


Figura 5.11: Diagrama de bloques del sistema de control con controlador PI.

Fuente: Elaboración propia.

Después se simula el sistema.

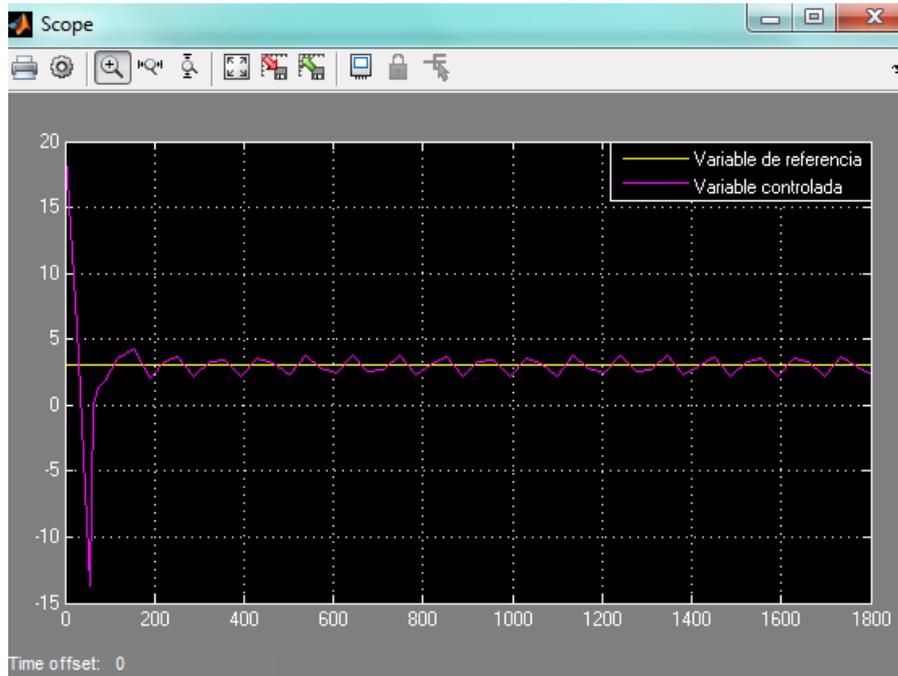


Figura 5.12: Respuesta del sistema con controlador PI con  $K_p = 29.24$  y  $T_i = 15$

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura 5.12 la variable controlada continua presentando una pequeña inestabilidad; sin embargo, ahora se aproxima más a la variable de referencia, lo que nos indica que este controlador, ajustando los parámetros, podría ser el apropiado para el sistema.

### Controlador PID

Finalmente, para este controlador añadimos el parámetro derivativo.

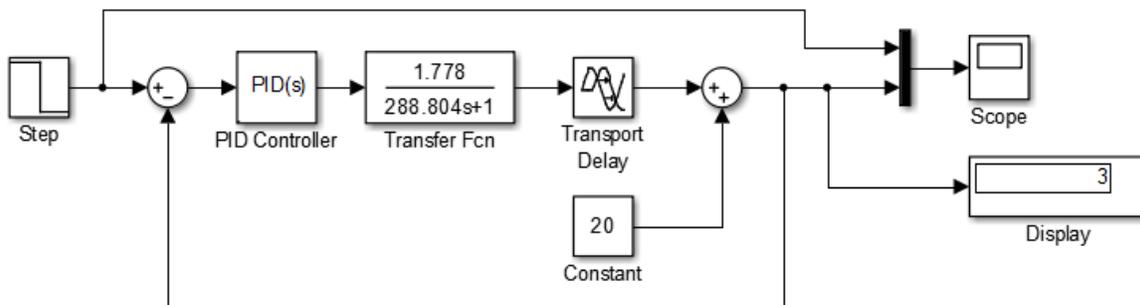
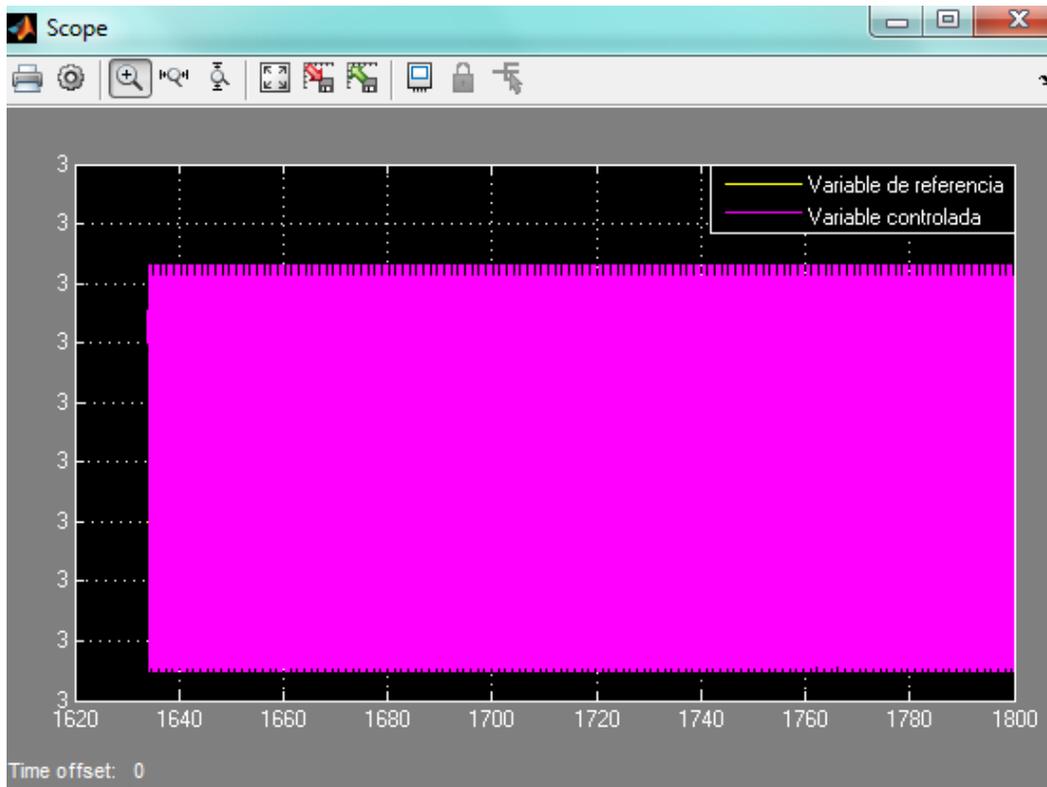


Figura 5.13: Diagrama de bloques del sistema de control con controlador PID.

Simulando este sistema, se obtiene el siguiente resultado.



**Figura 5.14: Respuesta del sistema con controlador PID con  $K_p = 38.98$ ,  $T_i = 10$  y  $T_D = 2.5$ . Fuente: Elaboración propia.**

Se ve claramente en esta última simulación que el parámetro derivativo altera la estabilidad del sistema. Por lo tanto no será considerado como un posible controlador. Concluimos entonces que, luego de realizar las simulaciones con los tres tipos de controladores, el controlador PI es el más adecuado para este sistema, previo ajuste de sus parámetros.