# NATIONAL UNIVERSITY OF ENGINEERING

## COLLEGE OF MECHANICAL ENGINEERING

**Laboratory N° 2**

**Advanced Control**

- **COURSE:**

  *Advanced Control – MT229*

- **PROFFESOR:**

  *Daniel Leonardo Barrera Esparta*

- **CLASS:**

  *A.*

- **STUDENT:**

  *Cirineo Ulloa Justo Omar* *20154019H*

- **DATE:**

**UNI**

**2019-I**

## LABORATORY 2

It is required to effectively control an industrial plant that has a dominant time delay (> 2T, the delay is 2 times greater than the dominant time constant of the plant).

The plant is controlled by a PID controller, which does not allow for effective control.

When the operating conditions of the plant vary, variations in time delay originate and control of the plant deteriorates.

The industrial plant is made up of the following elements:

Model of the valve:

$$G_v(s) = \frac{k_v}{(T_v s + 1)}$$

Model of the Plant:

$$G(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-\tau s}$$

Model of the transmitter sensor:

$$G_T(s) = \frac{k_T}{(T_T s + 1)}$$

The plant model is determined by expression:

$$G_p(s) = G_v(s) G(s) G_T(s)$$

In order to design the controller, the following data is presented:

Base parameters

| PLANT | | | | VALVE | | TRANSMITTER | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| k | $T_1$ | $T_2$ | $\tau$ | $k_v$ | Tv | $k_T$ | $T_T$ |
| 8.1 | 15 | 7 | 150 | 7.2 | 4.5 | 1.1 | 4.45 |

X: Number in oeraae→ x=1

CO1: Student= Base Parameters + x*0.005 = 8.1+1*0.005=8.105; 15,005; 7.005.

CO2: Student = Base Parameters - x*0.007 = 8.1-1*0.007=8.093; 14.993; 6.993.

CO3: Student = Base Parameters + x*0.009 = 8.1+1*0.009=8.109; 15.009; 7.009.

Perform the following tasks:

- Adjust the PID controller of the plant without time delay using some method of controller adjustment (theoretical adjustment), considering the following specifications of temporal response: PM <20%, eee = 0, tss = min. Show the numerical results of the theoretical adjustment of the PID controller.
- Evaluate the behavior of the control system (with the PID controller set), of the plant without time delay by simulation, considering a step through the reference r(s). Show the results of the temporary response of the control system with the theoretical adjustment of

the controller obtained. Perform the fine adjustment of the controller by simulation and show the values of the fine adjustment of the controller (see Ogata, IV edition).

- Evaluate the behavior of the plant control system without time delay by simulation, considering a simultaneous step by the reference r(s) and by the disturbance z(s). Perform the fine adjustment of the PID controller by simulation and show the values of that adjustment.
- Evaluate by simulation the temporary response of the plant control system (with the PID controller set for one step through the reference) for different time delay quantities (τ, 5 τ and 10τ) and one step through the reference r(s). Obtain new values from the fine tuning of the controller for each time delay magnitude (if possible).
- Evaluate by simulation the temporary response of the plant control system (with the PID controller set for a simultaneous passage through the reference and by z(s)) for different time delay quantities (τ, 5 τ and 10 τ) and a simultaneous step by the reference r(s) and by z(s). Obtain the new values of the fine adjustment of the controller for each time delay magnitude (if possible).
- Evaluate by simulation the temporal response of the Smith's predictor-based control system of the plant using the fine adjustment of the controller obtained for the plant without time delay and a step through the reference "r(s)" with different magnitudes of delay of time (τ, 5 τ and 10 τ).
- Evaluate by simulation the temporal response of the Smith's predictor-based control system of the plant with time delay τ using the fine adjustment of the controller obtained for the plant without time delay and a simultaneous passage through the reference r(s) and by z(s).
- Evaluate by simulation the temporal response of the Smith's predictor-based control system of the plant with time delay τ using the fine adjustment of the controller obtained for the plant without time delay and a step through the reference r(s) considering a gain of the process K = 2K and gain of the models (Gm1 and Gm2) Km = K.
- Evaluate by simulation the temporal response of the Smith's predictor-based control system of the plant with time delay τ using the fine adjustment of the controller obtained for the plant without time delay and a step through the reference r(s) considering a gain of the process K = 2K and gain of the models (Gm1 and Gm2) Km = 2K.

## Resolution:

We will work with condition 1:

- **Adjust the PID controller of the plant without time delay using some method of controller adjustment (theoretical adjustment), considering the following specifications of temporal response: PM <20%, eee = 0, tss = min. Show the numerical results of the theoretical adjustment of the PID controller.**

We will use the second method of Ziegler-Nichols in a theoretical way:
Now I must calculate the closed loop transfer function:
Model of the valve:

$$G_v(s) = \frac{7.2}{(4.5s + 1)}$$

Plant model without time delay:

$$G(s) = \frac{8.105}{(15.005s + 1)(7.005s + 1)}$$

Model of the temperature transmitter sensor:

$$G_T(s) = \frac{1.1}{(4.45s + 1)}$$

The model of the plant is determined by the expression:

$$G_p(s) = G_v(s)G_T(s)G_T(s)$$

Then:

$$G_p(s) = \frac{64.1916}{2104.828s^4 + 1381.485s^3 + 322.1245s^2 + 30.96s + 1}$$

Considering a proportional controller with KP value, then the closed loop transfer function is:

$$G_{LC}(s) = \frac{G_p(s)K_p}{1 + G_p(s)K_p}$$

$$G_{LC}(s) = \frac{64.1916K_p}{2104.828s^4 + 1381.485s^3 + 322.1245s^2 + 30.96s + 1 + 64.1916K_p}$$

Now we apply Routh hurwitz:

| | | | |
|---|---|---|---|
| $s^4$ | 2104.828 | 322.1245 | 1+64.1916Kp |
| $s^3$ | 1381.485 | 30.96 | 0 |
| $s^2$ | 274.9539 | 1+64.1916Kp | 0 |
| $s^1$ | -323(Kp-0.080414) | 0 | 0 |
| $s^0$ | 1+64.1916Kp | | |

Then we must look for sustained oscillations to obtain the critical Kp, which will be:

$$-323(K_{pcr} - 0.080414) = 0$$
$$K_{pcr} = 0.080414$$

So the characteristic equation is:

$$2104.828s^4 + 1381.485s^3 + 322.1245s^2 + 30.96s + 6.1619$$

To find the critical frequency we make the change of variable s = jw and equal zero:

$$(2104.828w^4 - 322.1245w^2 + 6.1619) + (30.96w - 1381.485w^3)j = 0$$

So to find the critical frequency we do:

$$30.96w_{cr} - 1381.485{w_{cr}}^3 = 0$$
$$w_{cr} = 0.1497$$

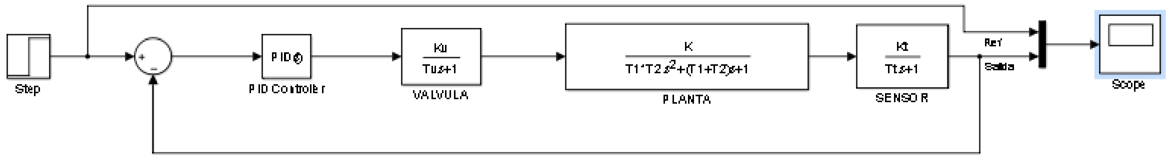
With this we find that the critical period is:

$$P_{cr} = \frac{2\pi}{w_{cr}} = 41.9718$$

Then the PID parameters according to this method will be:

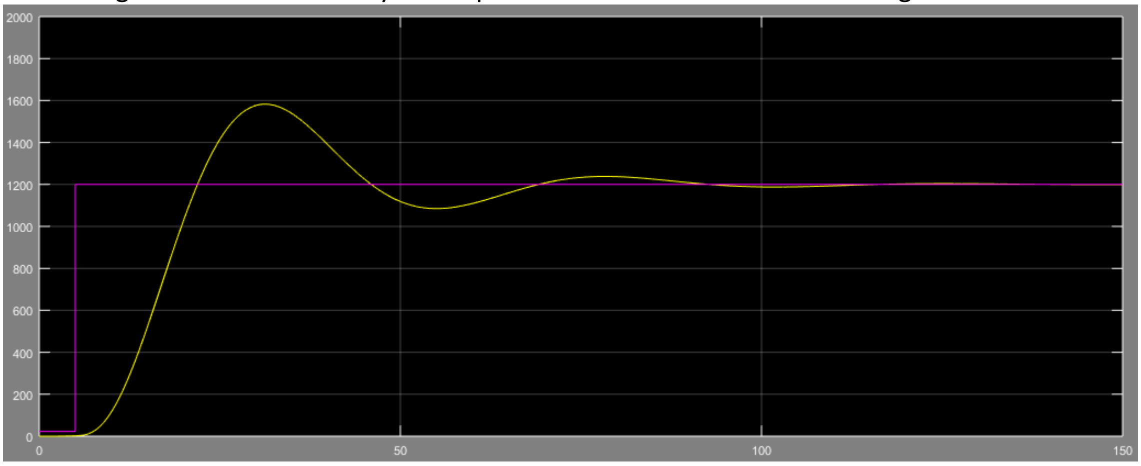
| Controller type | Kcr | Pcr | Kp | Ti | Td |
|---|---|---|---|---|---|
| PID | 0.080414 | 41.9718 | 0.0474 | 20.9859 | 5.246475 |

Then the block diagram would be:



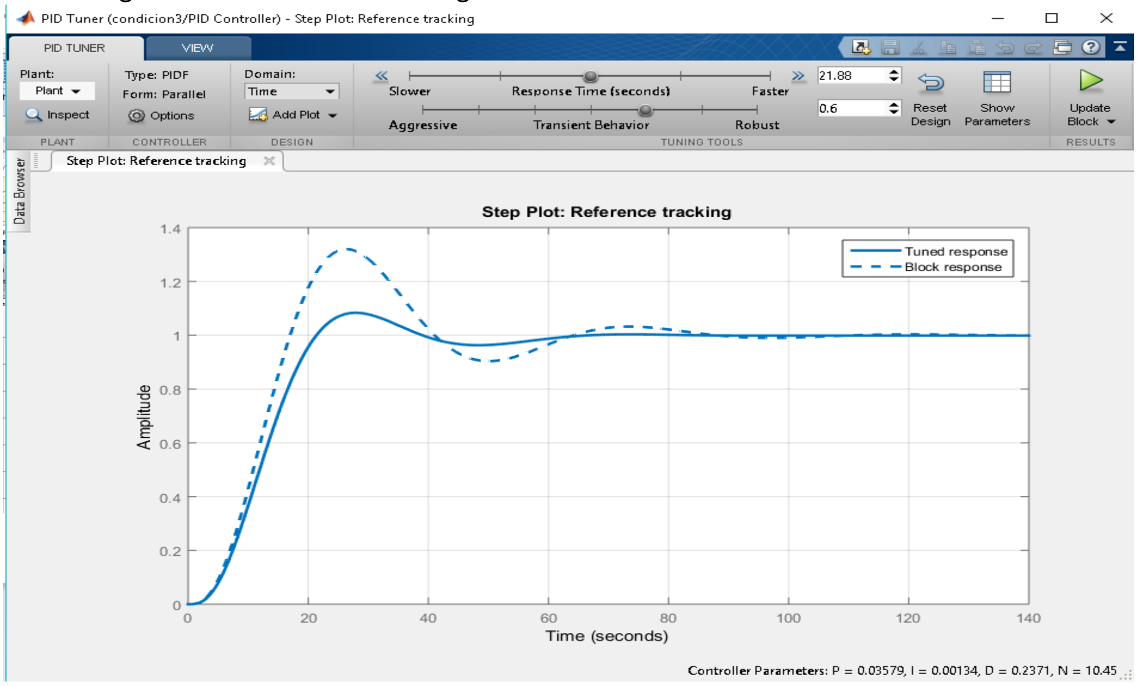

- **Evaluate the behavior of the control system (with the PID controller set), of the plant without time delay by simulation, considering a step through the reference r(s). Show the results of the temporary response of the control system with the theoretical adjustment of the controller obtained. Perform the fine adjustment of the controller by simulation and display the values of the fine adjustment of the controller.**

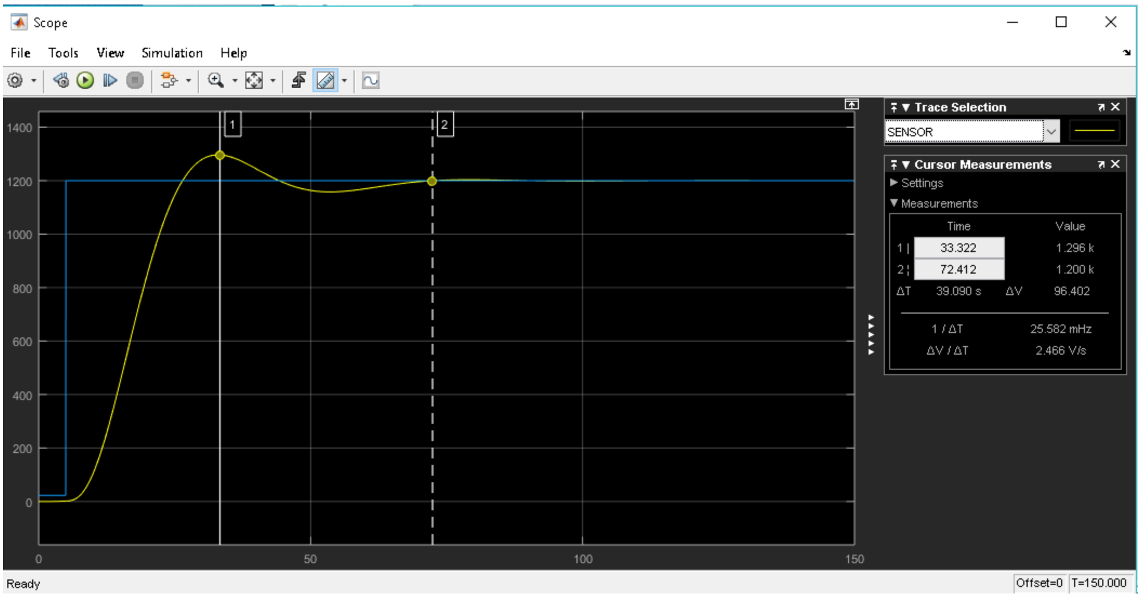
Simulating with the theoretically found parameters for the PID the following result is obtained:




It is clear that with the theoretical values obtained a good response to the plant is found without time delay, but it is still not adequate because the maximum peak is 31.89% and the maximum allowed value is 20% so we need to adjust our PID.

Then using the Matlab PID TUNER we get:





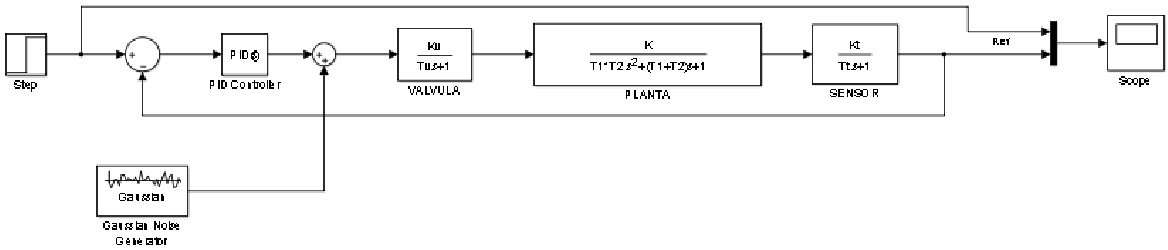

Con este nuevo ajuste tenemos que:
Kp=0.03579; Ki=0.00134; Kd=0.2371.
PM= (96.402/1200)*100% = 8.03%; eee= 0; tss = 72.412 Segundos.

Se cumplen las especificaciones, y mediante simulaciones compruebo que son los mejores parámetros de PID para controlar mi planta sin retardo, entonces mis parámetros finales son:

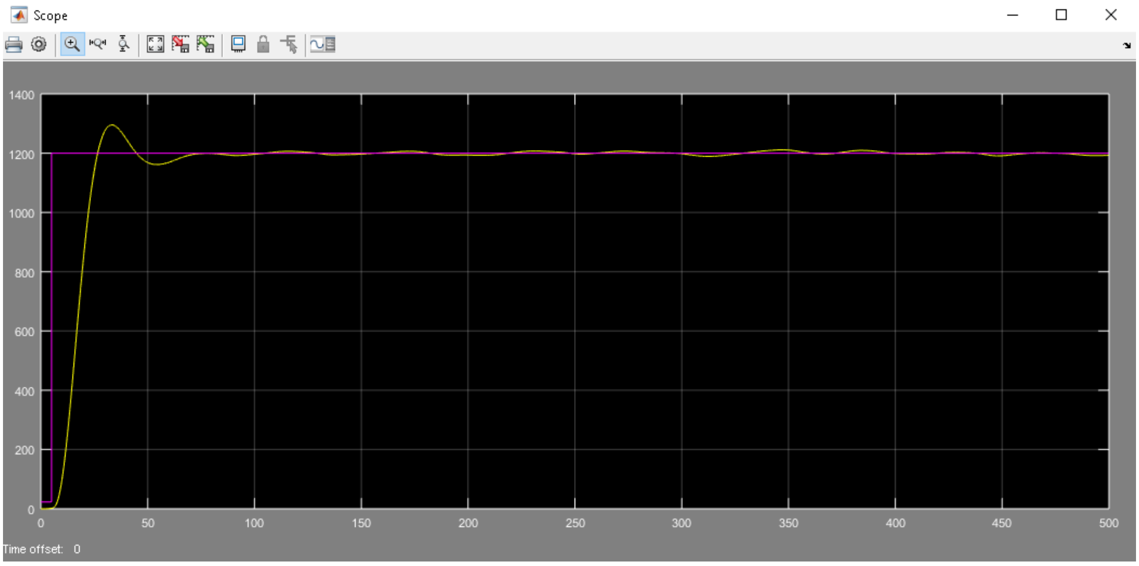
| PID | Kp | Ti | Td |
|---|---|---|---|
| | 0.03579 | 26.7 | 6.62 |

- **Evaluar el comportamiento del sistema de control de la planta sin retardo de tiempo mediante simulación, considerando un paso simultáneo por la referencia r(s) y por la perturbación z(s). Realizar mediante simulación el ajuste fino del controlador PID y mostrar los valores de dicho ajuste.**

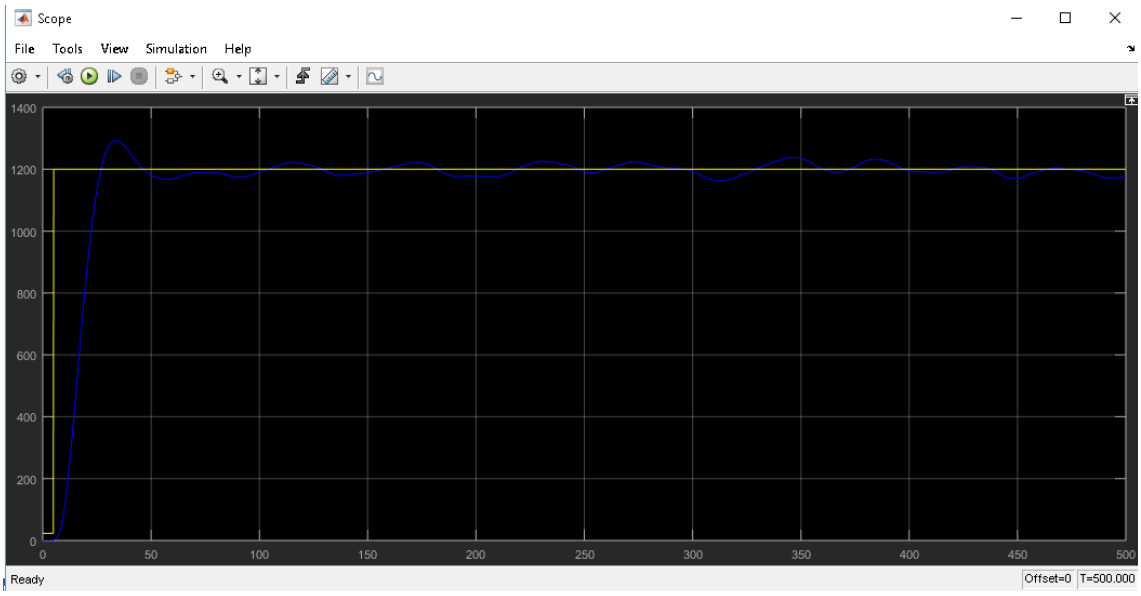
Ahora agregando una perturbación z(s) entonces mi diagrama de bloques seria:




Colocando como parámetros del PID los encontrados en el ajuste fino y simulando encontramos la siguiente respuesta:



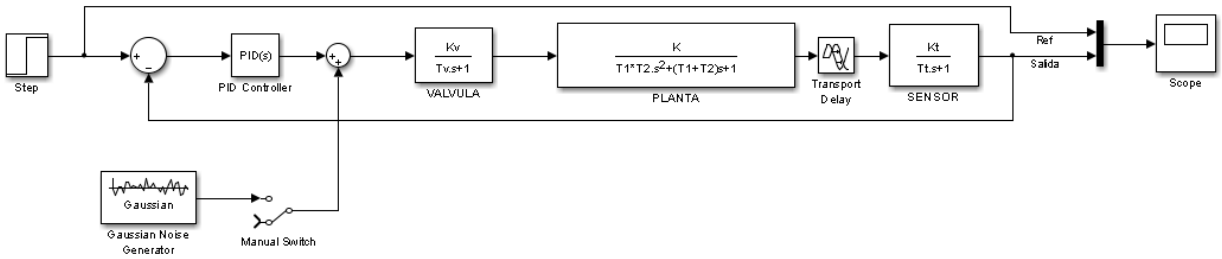

Se aprecia claramente que la respuesta en estado estacionario con el controlador PID ya no puede trabajar adecuadamente cuando hay perturbaciones, para la perturbación agregada se podría considerar que aún puede trabajar el controlador PID si se considera que el error en estado estacionario que se tiene es aceptable para la planta, pero para perturbaciones más grandes ya no es posible trabajar con un PID como por ejemplo:




- **Evaluar mediante simulación la respuesta temporal del sistema de control de la planta (con el controlador PID ajustado para un paso por la referencia) para diferentes magnitudes de retardo de tiempo (τ, 5 τ y 10τ) y un paso por la referencia r(s). Obtenerlos nuevos valores del ajuste fino del controlador para cada magnitud de retardo de tiempo (si resulta posible).**

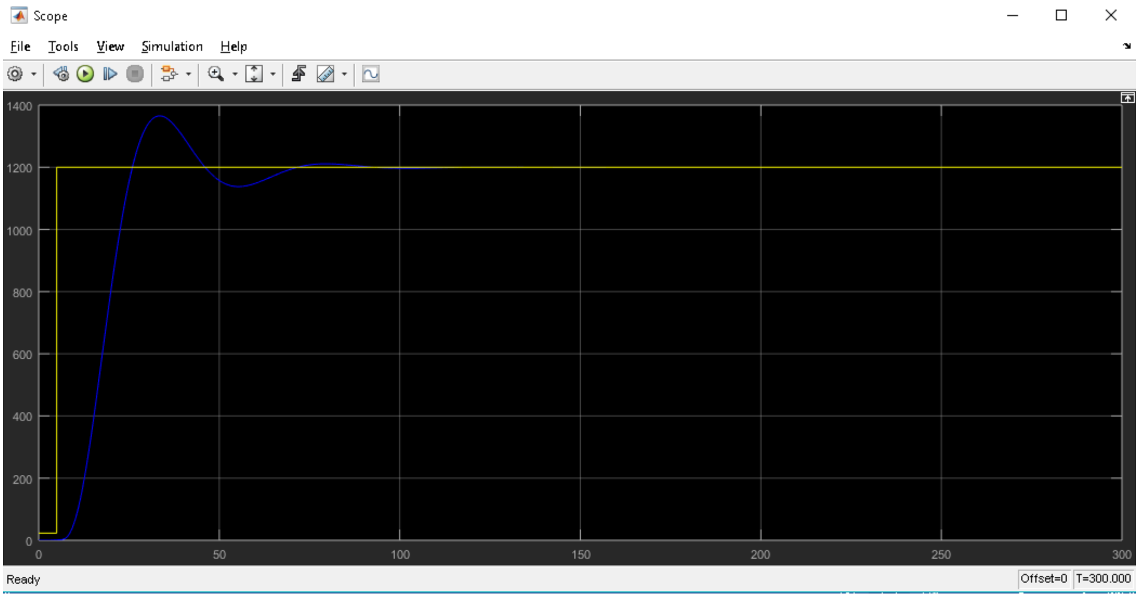
Considerando un valor de τ de 1 segundo, probaremos la respuesta de mi planta al ser controlada por un PID para los retardos de tiempo que se piden:

Mi diagrama de bloques es:




En todos los casos no consideraremos perturbaciones.

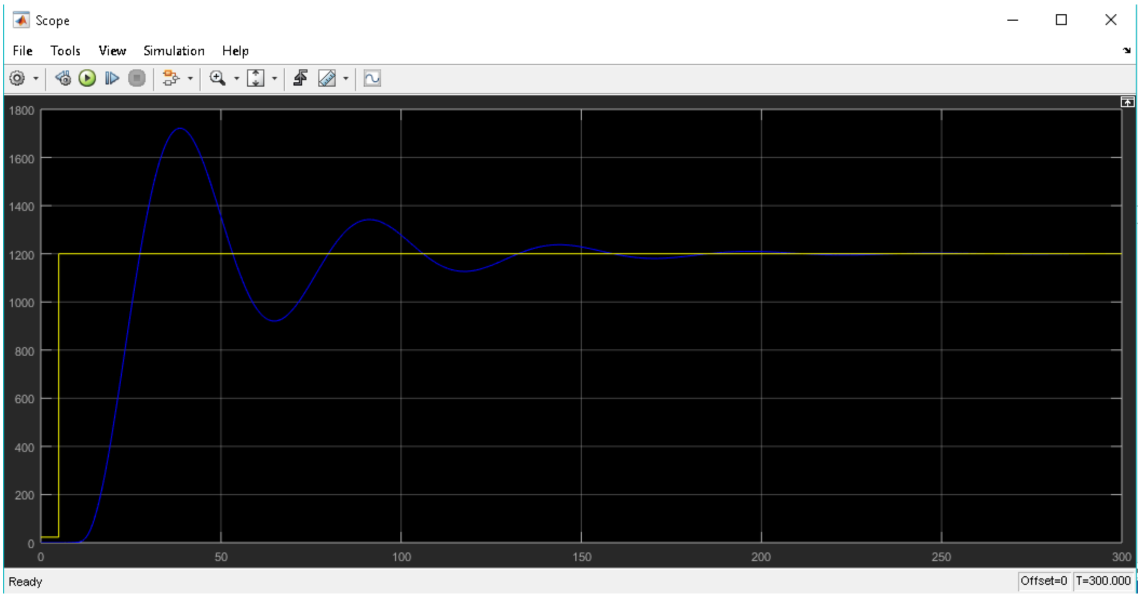
**Caso τ=1 segundo:**




El retardo de 1 segundo afecta a la respuesta pero aún podemos trabajar con un controlador PID usando el ajuste ya sintonizado.

| **PID** | **Kp** | **Ti** | **Td** |
|---|---|---|---|
| | 0.03579 | 26.7 | 6.62 |

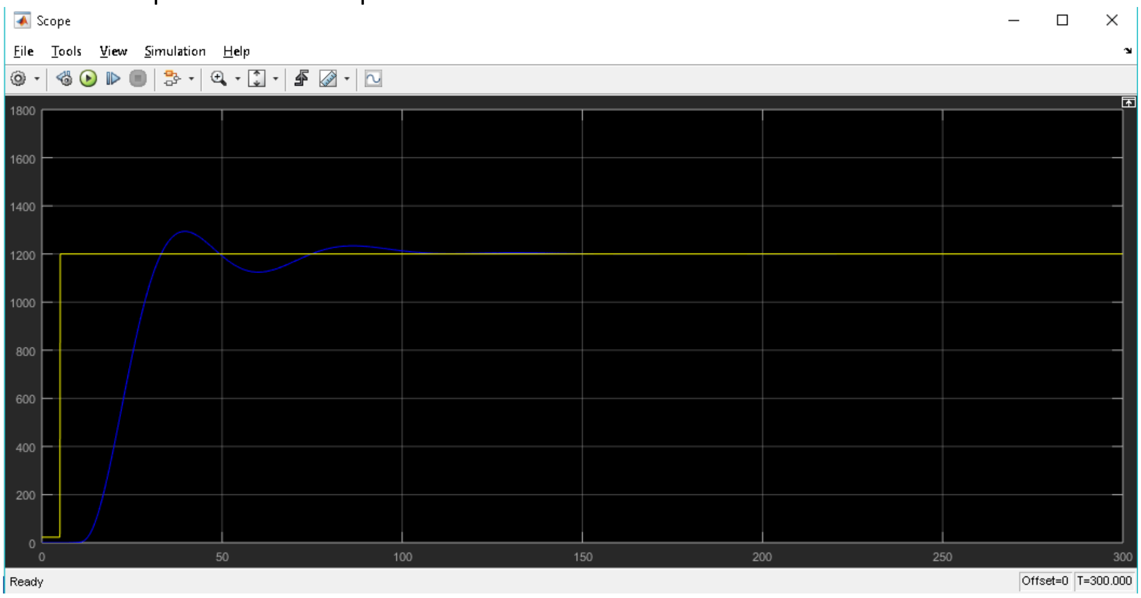
**Caso τ=5 segundos:**



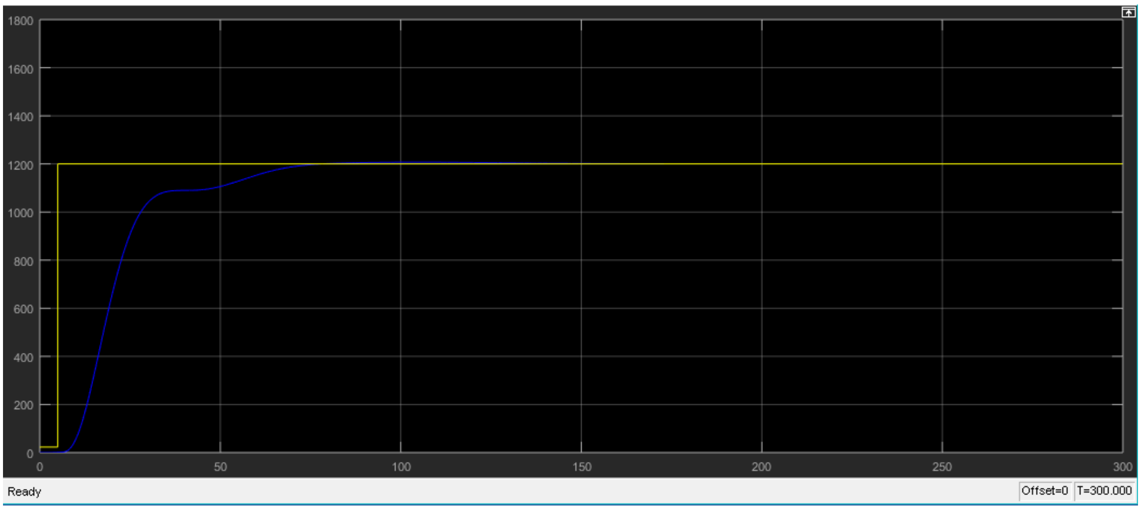

El retardo de 5 segundos afecta a la respuesta de forma más considerable, así que se tiene que volver a sintonizar para este caso, los nuevos parámetros de PID para este caso son:

| PID | Kp | Ti | Td |
|---|---|---|---|
| | 0.024 | 26.7 | 9.42 |

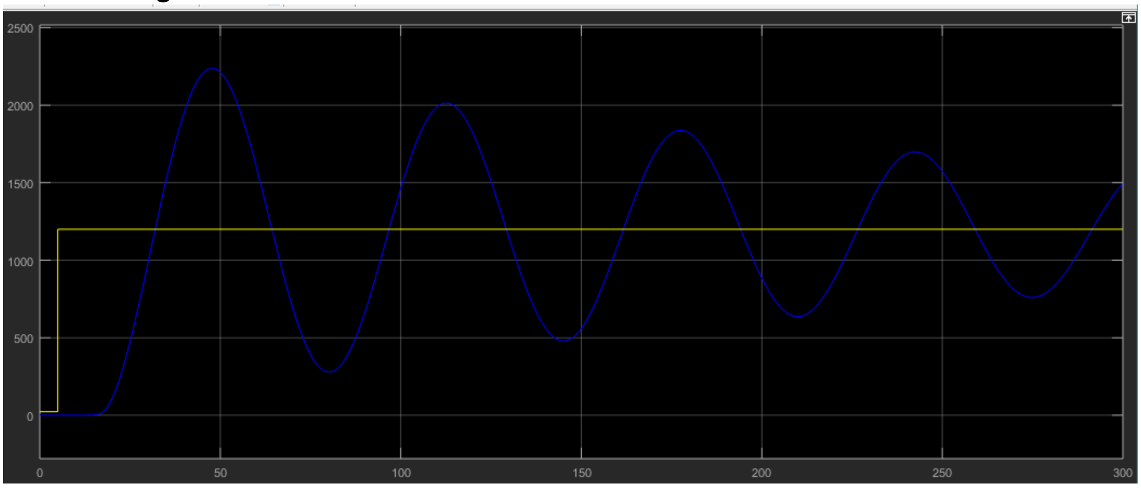
La nueva respuesta con estos parámetros es:




Entonces esta sintonía si puede usarse para este caso, pero cabe resaltar que si usamos estos parámetros para el caso 1 (retardo de 1 segundo) la respuesta encontrada seria sobre amortiguada:



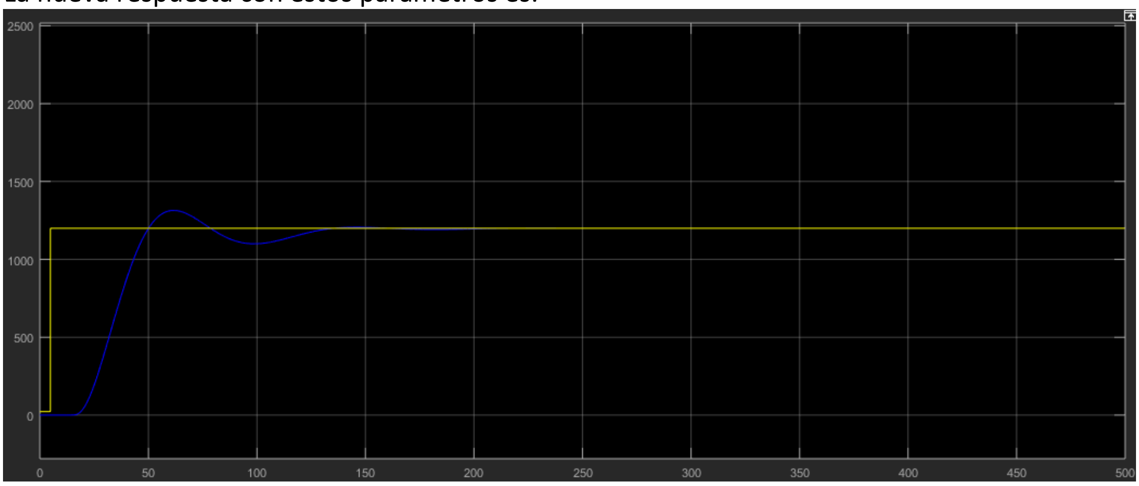

**Caso τ=10 segundos:**



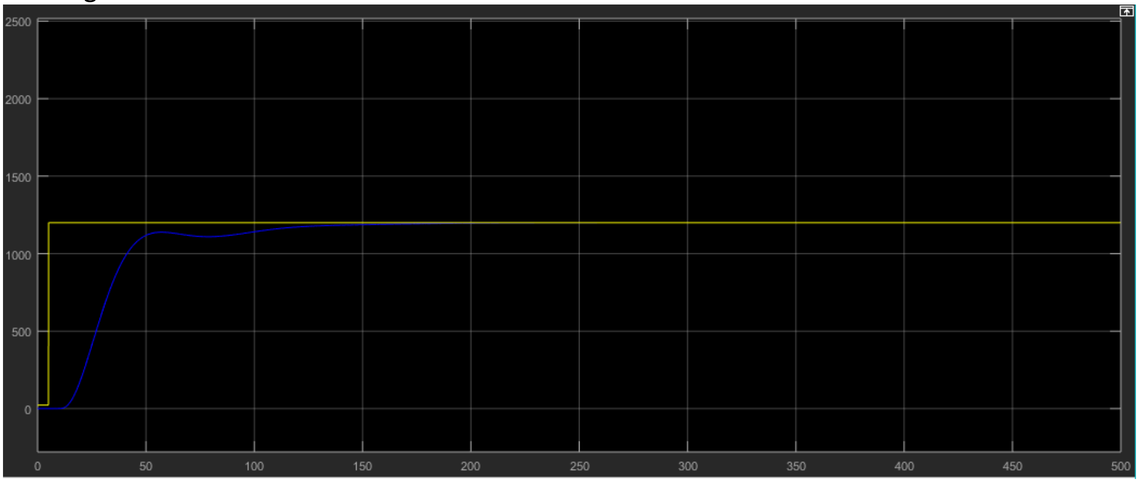

El retardo de 10 segundos afecta a la respuesta de forma muy considerable de tal manera que no puede controlarse con los parámetros de PID hallados, así que se tiene que volver a sintonizar para este caso, los nuevos parámetros de PID para este caso son:

| | | | |
|---|---|---|---|
| **PID** | **Kp** | **Ti** | **Td** |
| | 0.0166 | 32.4 | 5.34 |

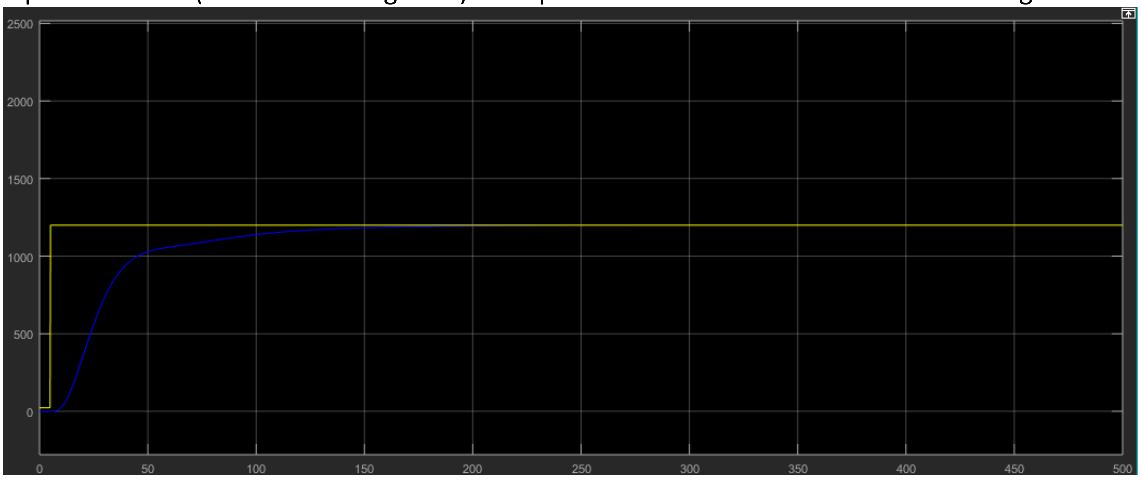
La nueva respuesta con estos parámetros es:



Entonces esta sintonía si puede usarse para este caso, pero cabe resaltar que si usamos estos parámetros para el caso 2 (retardo de 5 segundos) la respuesta encontrada seria sobre amortiguada:



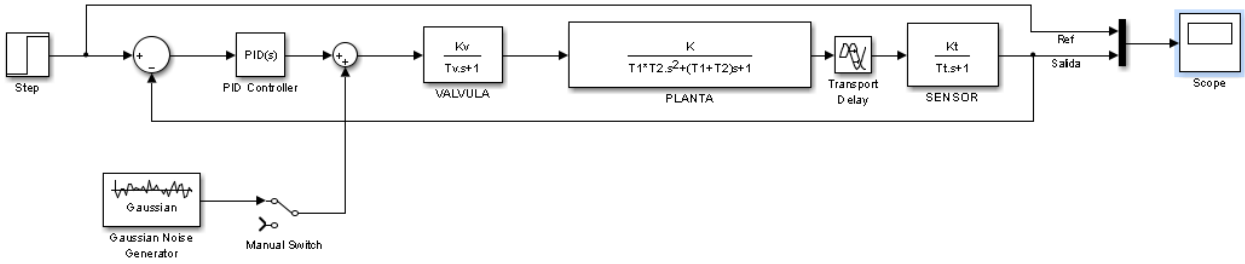

Y para el caso 1 (retardo de 1 segundo) la respuesta encontrada seria también amortiguada:




Por lo que se aprecia que para diferentes retardos se debe de volver a sintonizar el PID, si el retardo es variable en el Tiempo el controlador PID simple no podría usarse, sin embargo si se puede saber cuándo varia el retardo se puede construir un controlador de ganancia programada, pero en la realidad es muy complicado saber cuándo va a variar el retardo.

- **Evaluar mediante simulación la respuesta temporal del sistema de control de la planta (con el controlador PID ajustado para un paso simultáneo por la referencia y por z(s)) para diferentes magnitudes de retardo de tiempo (τ , 5 τ y 10 τ ) y un paso simultaneo por la referencia r(s) y por z(s). Obtener los nuevos valores del ajuste fino del controlador para cada magnitud de retardo de tiempo (si resulta posible).**

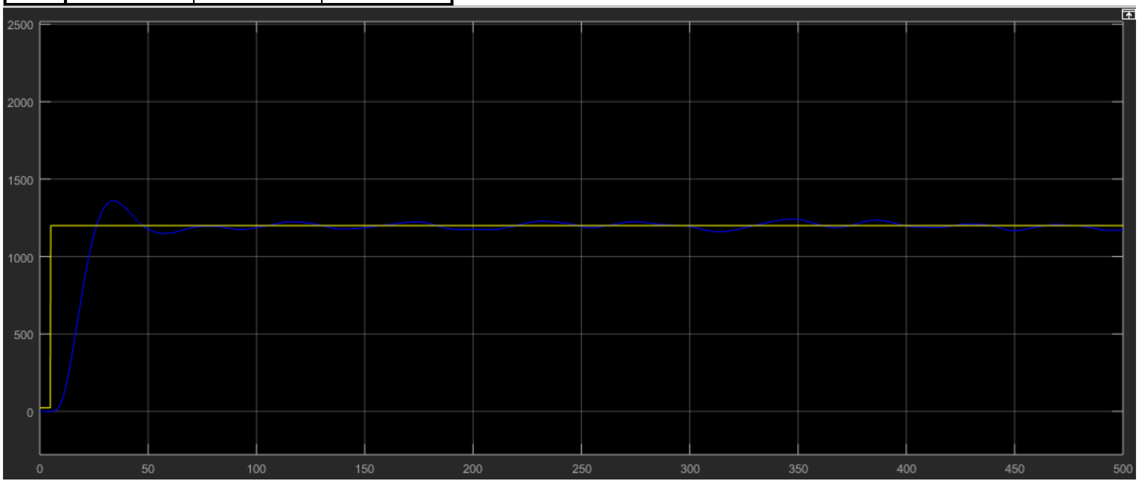
El diagrama de bloques seria:




Para cada caso consideraremos sus ajustes respectivos:

**Caso τ=1 segundo:**

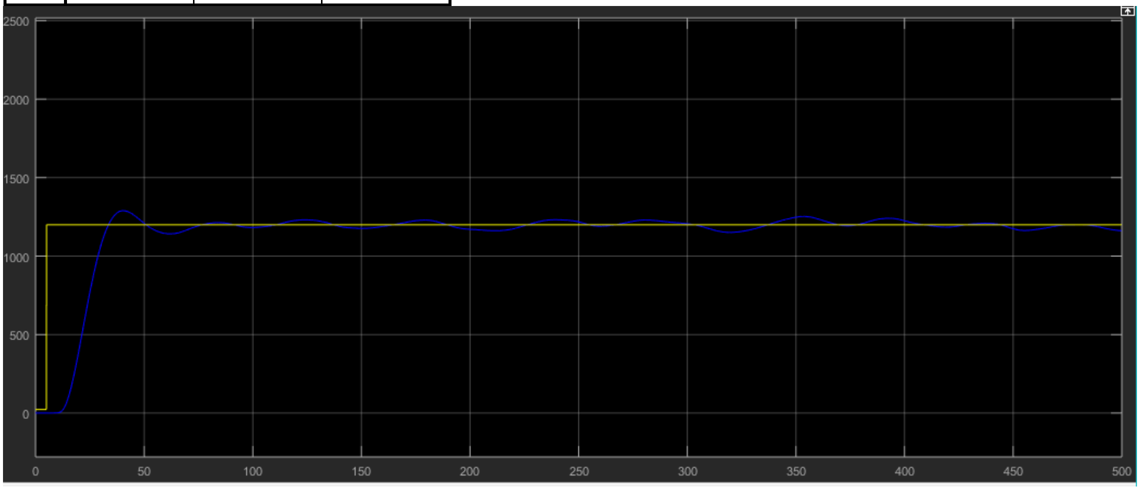
| PID | Kp | Ti | Td |
|---|---|---|---|
| | 0.03579 | 26.7 | 6.62 |



El retardo de 1 segundo y la perturbación agregada afecta a la respuesta pero aún podemos trabajar con este controlador PID y su ajuste indicado si se considera que el error en estado estacionario que se tiene es aceptable para la planta, no es posible mejorar la respuesta en estado estacionario variando los parámetro, esto fue probado con las simulaciones.

**Caso τ=5 segundos:**

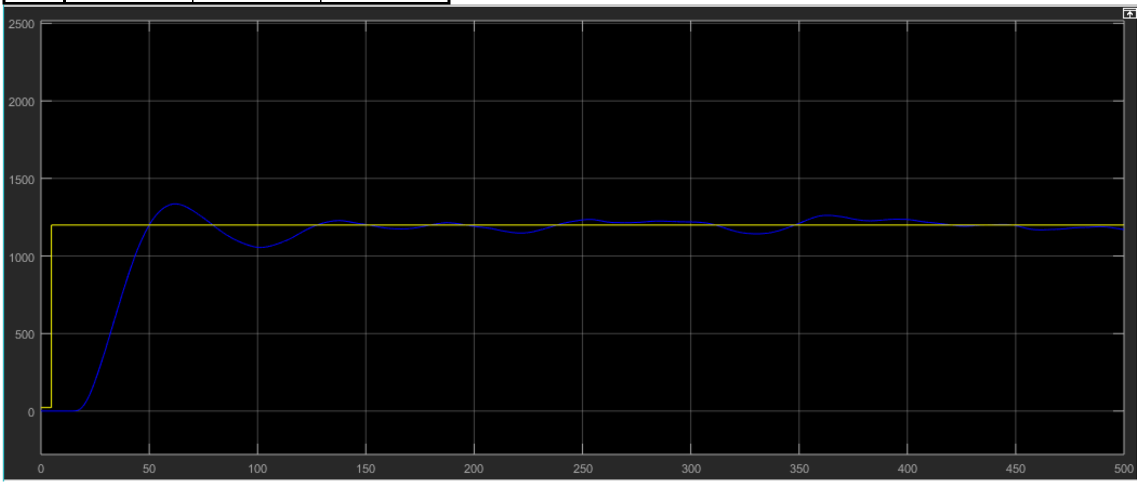
| PID | Kp | Ti | Td |
|---|---|---|---|
| | 0.024 | 26.7 | 9.42 |



El retardo de 5 segundos y la perturbación agregada afecta más significativamente a la respuesta el error en estado estacionario ya no se puede considerar aceptable para la planta, no es posible mejorar la respuesta en estado estacionario variando los parámetros, esto fue probado con las simulaciones.

**Caso τ=10 segundos:**

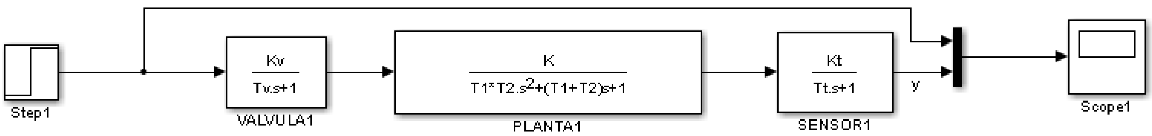
| PID | Kp | Ti | Td |
|---|---|---|---|
| | 0.0166 | 32.4 | 5.34 |



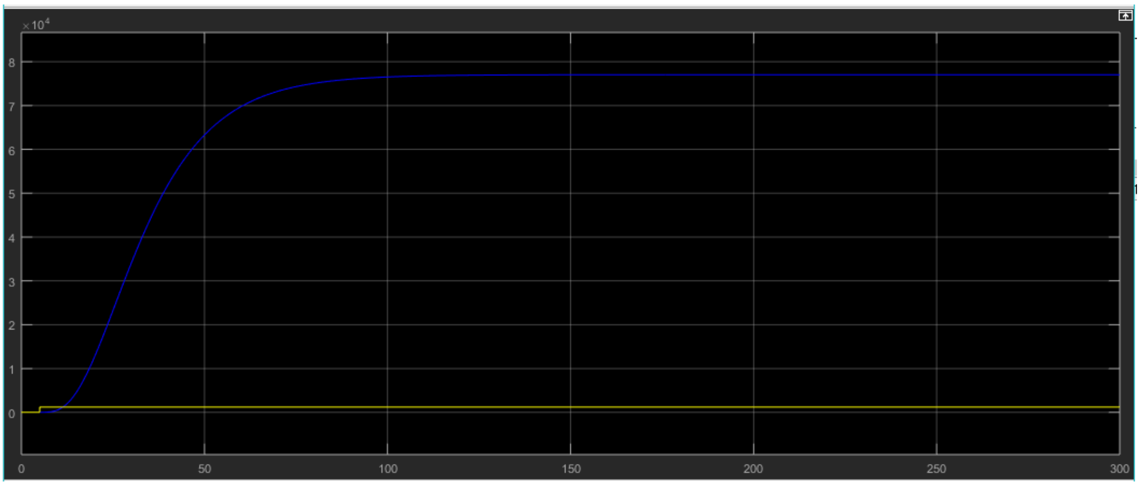

El retardo de 10 segundos y la perturbación agregada afecta muy significativamente a la respuesta el error en estado estacionario ya no se puede considerar aceptable para la planta, no es posible mejorar la respuesta en estado estacionario variando los parámetros, esto fue probado con las simulaciones.

- **Evaluar mediante simulación la respuesta temporal del sistema de control basado en predictor de Smith de la planta utilizando el ajuste fino del controlador obtenido para la planta sin retardo de tiempo y un paso por la referencia “r(s)” con diferentes magnitudes de retardo de tiempo (τ , 5 τ y 10 τ ).**

Primero voy a identificar mi proceso, para esto trabajo en lazo abierto, genero señales y las guardo para poder identificar mi planta mi diagrama de bloques para generar las señales seria:



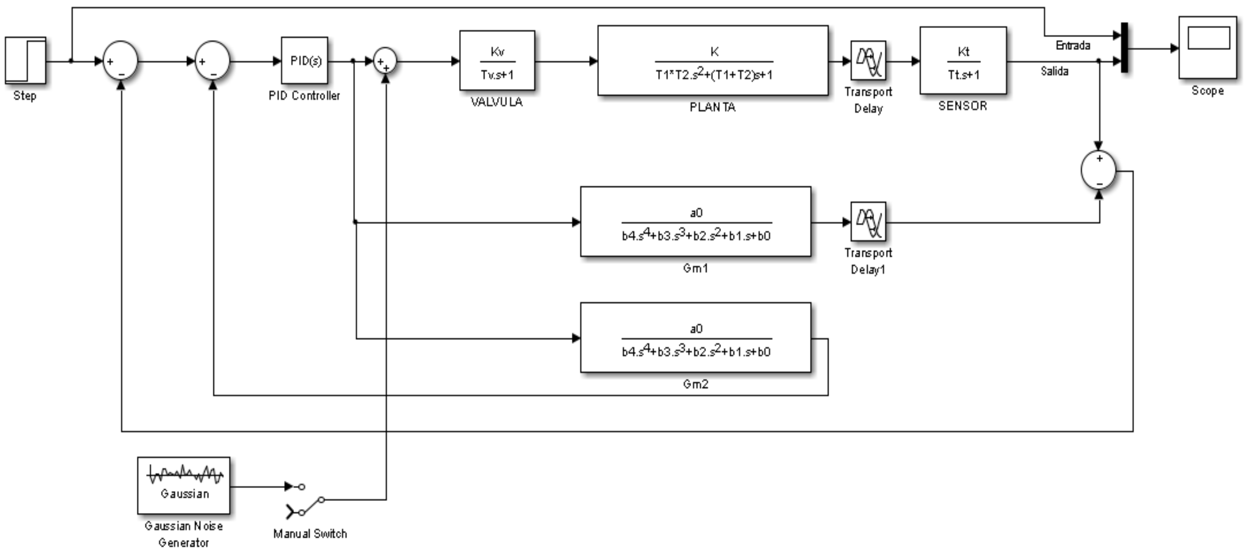

Los datos generados son:




Entonces mi modelo es:

$$G_m(s) = \frac{0.03050}{s^4 + 0.65634s^3 + 0.15304s^2 + 0.01471s + 0.0004751}$$

Mi diagrama de bloques del predictor de Smith es:

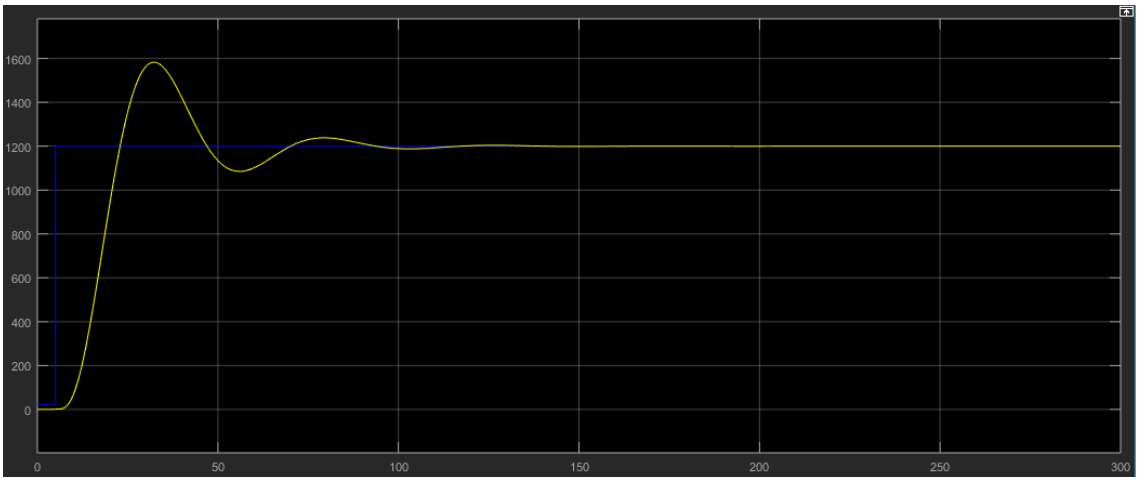



Para todos los casos considerare el ajuste inicial del PID:

| PID | Kp | Ti | Td |
|---|---|---|---|
| | 0.0474 | 20.9859 | 5.246475 |

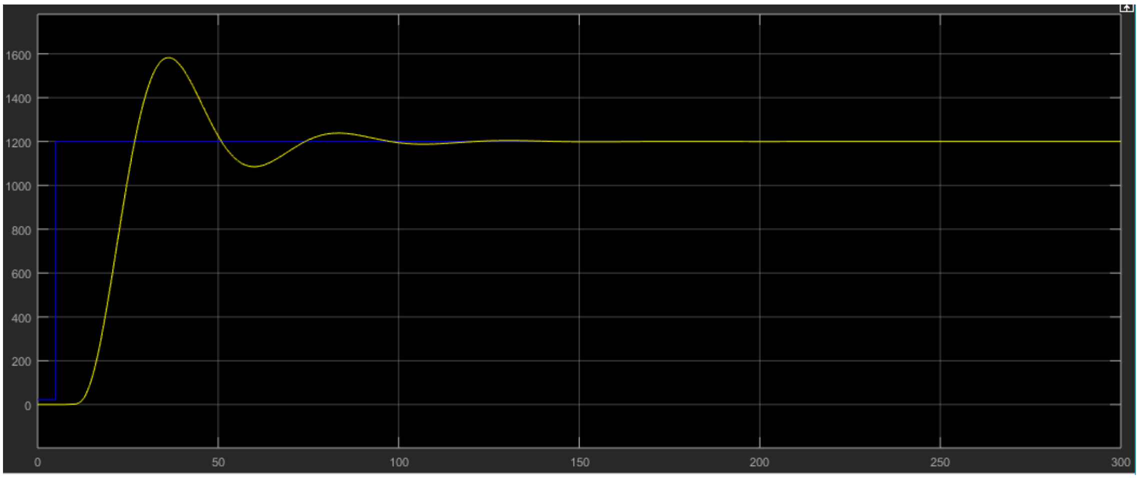
En todos los casos no hay perturbaciones.

**Caso τ=1 segundo:**



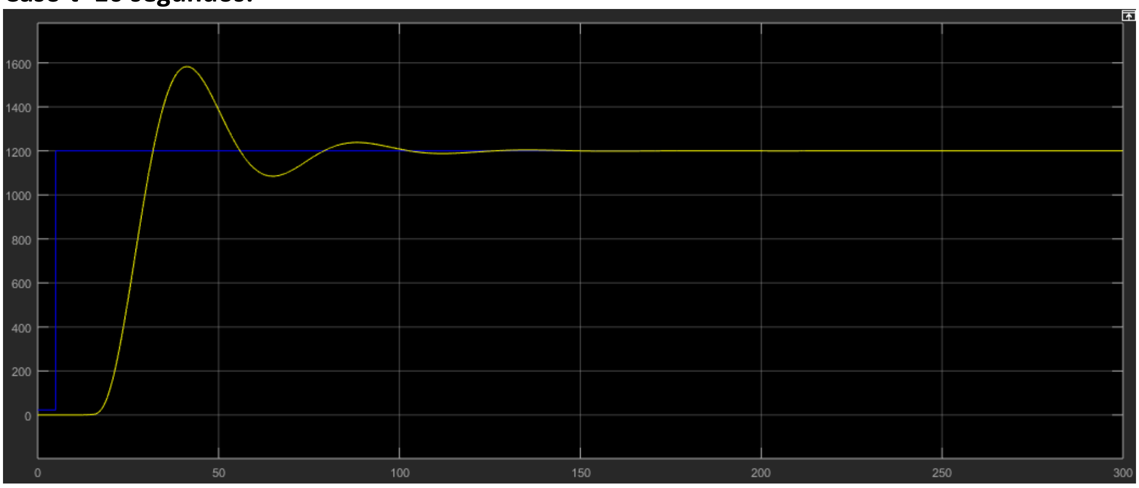
El predictor Smith mejora la respuesta pero no se aprecia muy bien porque el retardo es de solo 1 segundo.

**Caso τ=5 segundos:**



En este caso se aprecia mejor como el predictor Smith mejora la respuesta sin cambiar los ajustes del PID.

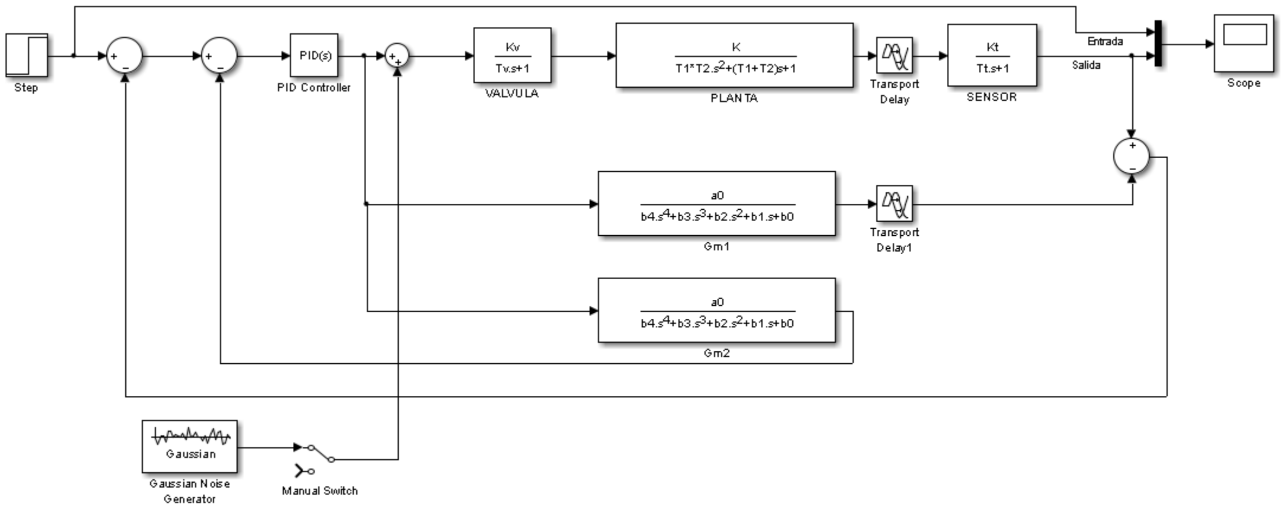
**Caso τ=10 segundos:**



En este caso se aprecia aún más como el predictor Smith mejora la respuesta sin cambiar los ajustes del PID.

- **Evaluar mediante simulación la respuesta temporal del sistema de control basado en predictor de Smith de la planta con retardo de tiempo τ utilizando el ajuste fino del controlador obtenido para la planta sin retardo de tiempo y un paso simultáneo por la referencia r(s) y por z(s).**

Mi diagrama de bloques del predictor de Smith es:

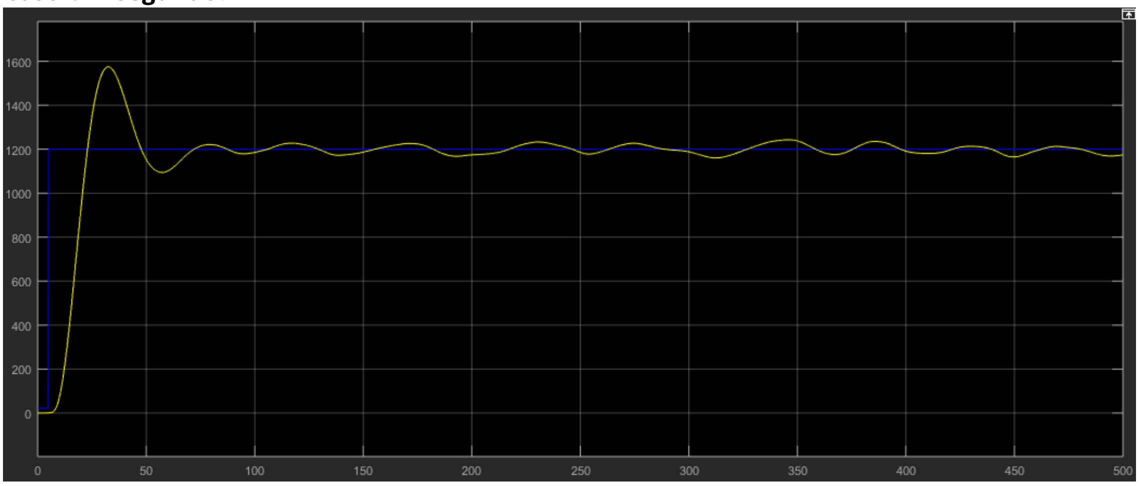



Para todos los casos considerare el ajuste inicial del PID:

| PID | Kp | Ti | Td |
|---|---|---|---|
| | 0.0474 | 20.9859 | 5.246475 |

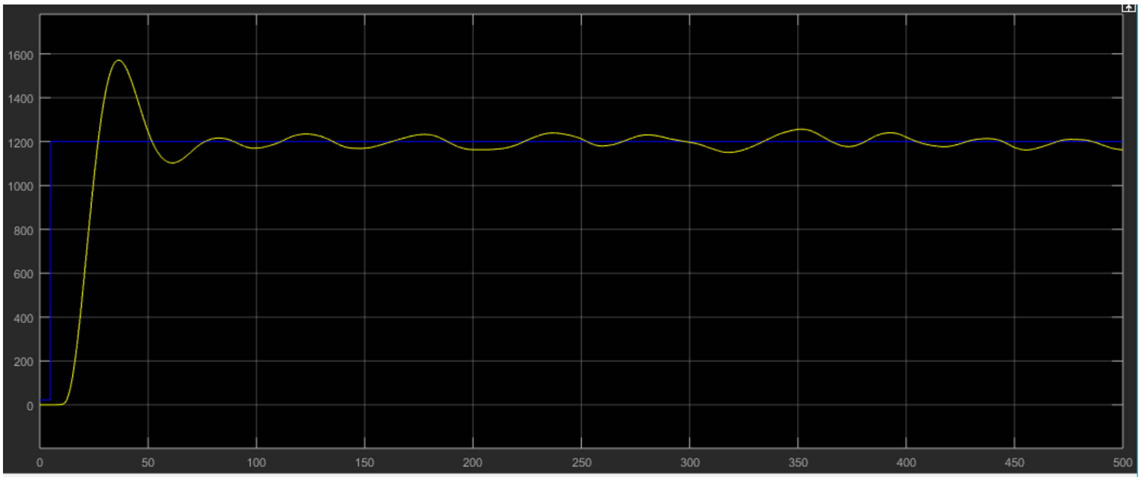
**EN TODOS LOS CASOS HAY PERTURBACIONES:**

**Caso τ=1 segundo:**



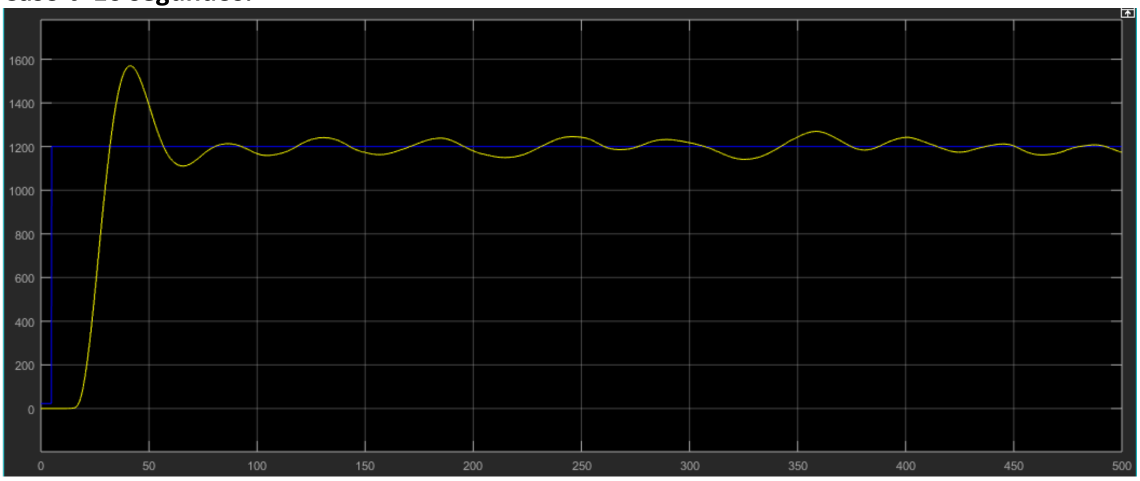

El predictor Smith tiene una respuesta adecuada aunque se le agregue perturbación a la planta y sin variar los ajustes del PID.

**Caso τ=5 segundos:**



El predictor Smith tiene una respuesta adecuada aunque se le agregue perturbación a la planta y sin variar los ajustes del PID.

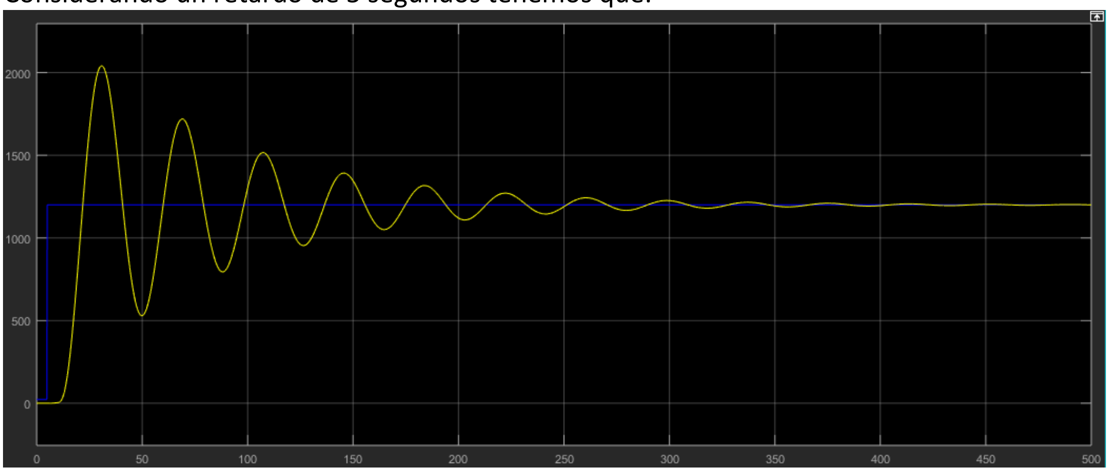
**Caso τ=10 segundos:**



El predictor Smith tiene una respuesta adecuada aunque se le agregue perturbación a la planta y sin variar los ajustes del PID.

- **Evaluar mediante simulación la respuesta temporal del sistema de control basado en predictor de Smith de la planta con retardo de tiempo τ utilizando el ajuste fino del controlador obtenido para la planta sin retardo de tiempo y un paso por la referencia r(s) considerando una ganancia del proceso K = 2K y ganancia de los modelos (Gm1 y Gm2) Km = K.**

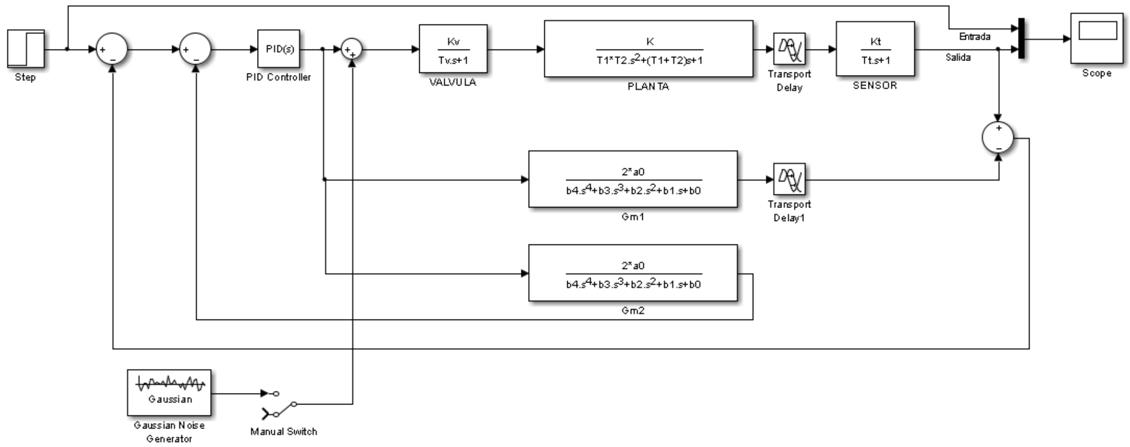
Considerando un retardo de 5 segundos tenemos que:



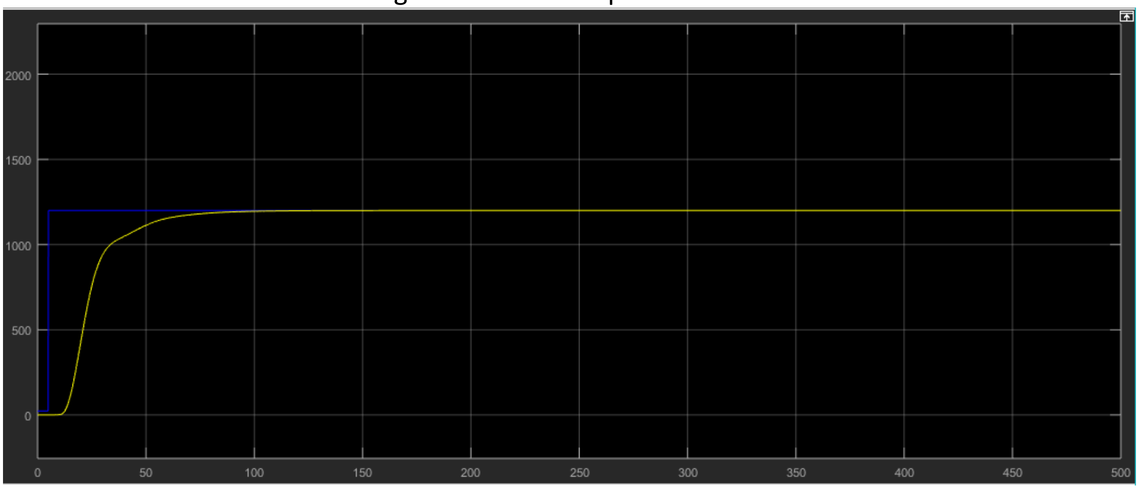
Podemos apreciar que al variar la planta aumentando al doble su ganancia se altera la respuesta pero llega a estabilizarse gracias al predictor de Smith aunque su tiempo de respuesta a aumentado así como también su pico máximo, era lógico imaginar que se iba alterar la respuesta debido a que el modelo de la planta no corresponde a la planta actual, para poder mejorar el control habría que modelar la nueva planta.

- **Evaluar mediante simulación la respuesta temporal del sistema de control basado en predictor de Smith de la planta con retardo de tiempo τ utilizando el ajuste fino del controlador obtenido para la planta sin retardo de tiempo y un paso por la referencia r(s) considerando una ganancia del proceso K = K y ganancia de los modelos (Gm1 y Gm2) Km = 2K.**

Mi diagrama de Bloques es:




Considerando un retardo de 5 segundos tenemos que:




Podemos apreciar que al variar el modelo de la planta aumentando al doble su ganancia se altera la respuesta sobre amortiguándola pero se puede considerar trabajar con este predictor de Smith, lo mejor es tener un modelo adecuado de la planta.