

**Pontificia Universidad Católica del Perú**

**IEE243 – Sistemas de Control**



**Examen Parcial**

**Profesor:** Celso De La Cruz

**Alumno:** Yábar Reaño, Luis Salvador 20200408

**San Miguel, 21 de octubre del 2025**

## 1. Objetivos

- Identificar la planta del sistema secador solar
- Diseñar un controlador PI digital, validar las especificaciones mediante simulación en Simulink
- Diseñar el servosistema con observador, validar las especificaciones mediante simulación en Simulink
- Comparar los resultados de ambos sistemas de control

## 2. Desarrollo del examen

### 2.1 Respuesta al escalón

En simulink, se obtiene la respuesta del sistema a un escalón de 0.02, observando que el sistema se estabiliza después de alrededor de 300 segundos. Desde el punto de equilibrio, se aplica el escalón de 0.03. Se observa que, ante escalones positivos desde el punto de operación, la salida del sistema decrece.

q

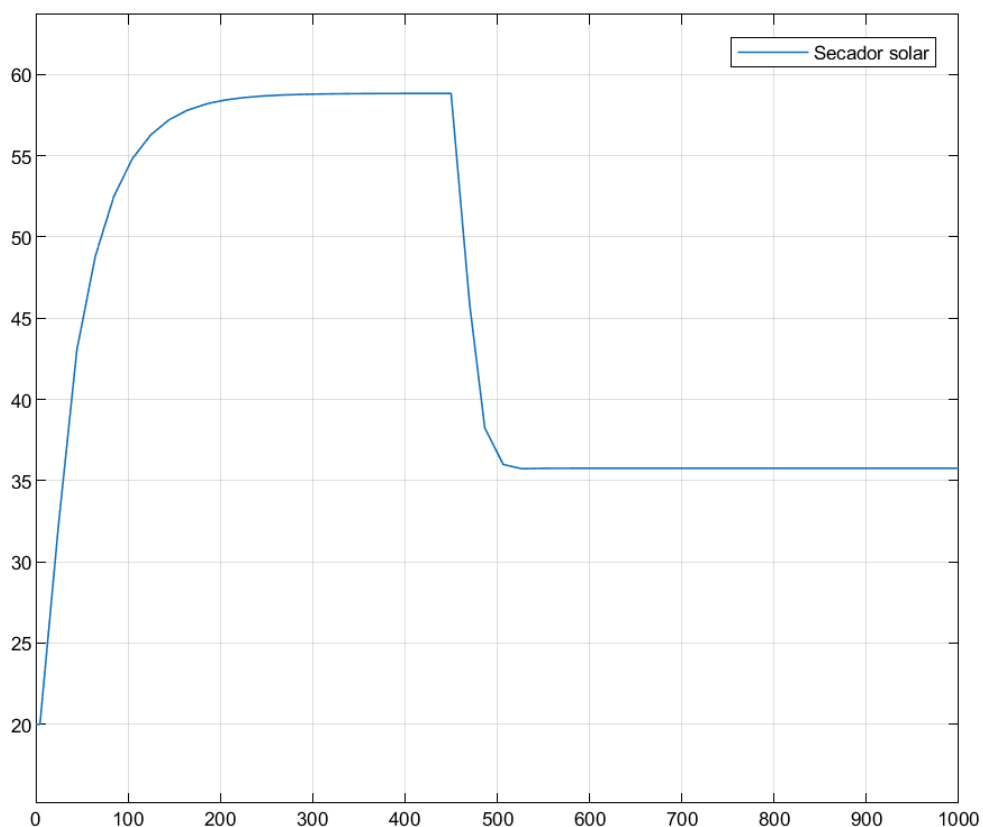


Figura 1. Respuesta al escalón de 0.03 desde el equilibrio

## 2.2 Identificación del modelo

Para realizar la identificación del sistema, es necesario importar los datos de la entrada y su respuesta a MatLab. Para seleccionar un tiempo de muestreo adecuado, se considera el valor del tiempo de subida entre 10.

Considerando que la respuesta al escalón de 0.03 desde el punto de operación varía de 58.83 a 35.76, se tiene un cambio  $\Delta y$  de 23.07. El 5% de  $\Delta y$  es 1.154. Así, se obtienen los siguientes puntos.

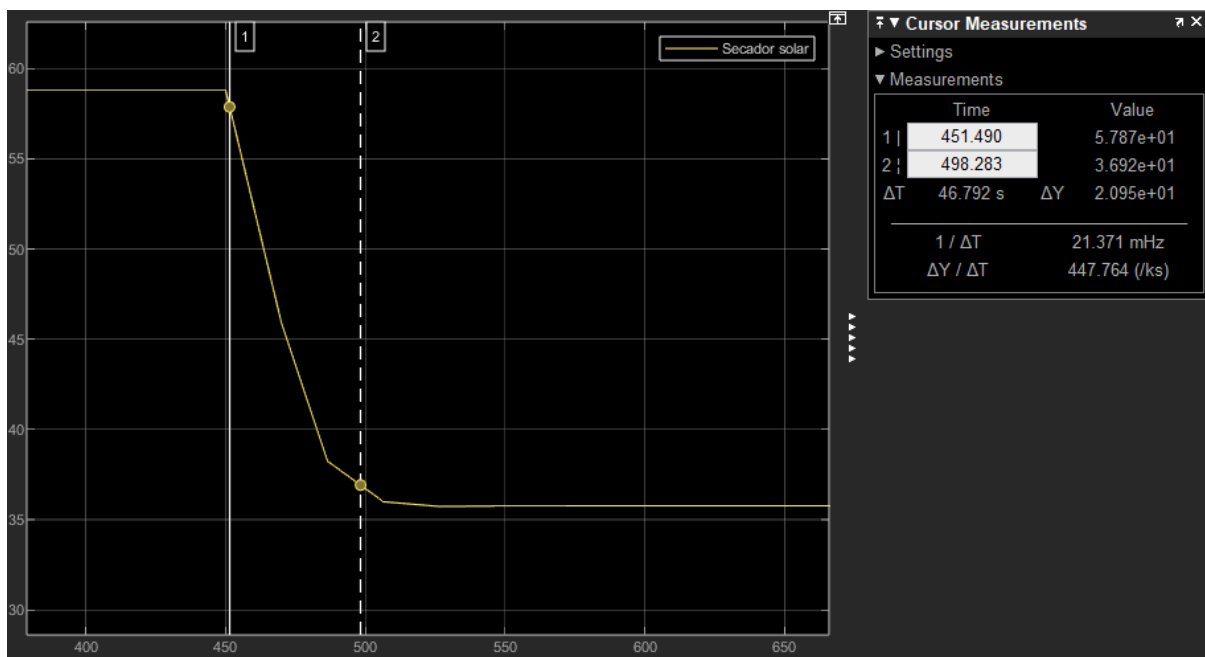


Figura 2. Cálculo del tiempo de subida

$$Tr = \Delta T = 46.792 \text{ s}$$

El periodo de muestreo:

$$T \approx \frac{Tr}{10}$$

$$T < 4.68 \text{ s}$$

Se elige:

$$T = 4.5 \text{ s}$$

Empleando el esquema observado en la Figura 3, se extraen los datos de la entrada y salida del sistema. Se emplean los bloques *To Workspace* con un tiempo de muestreo de 4.5 segundos.

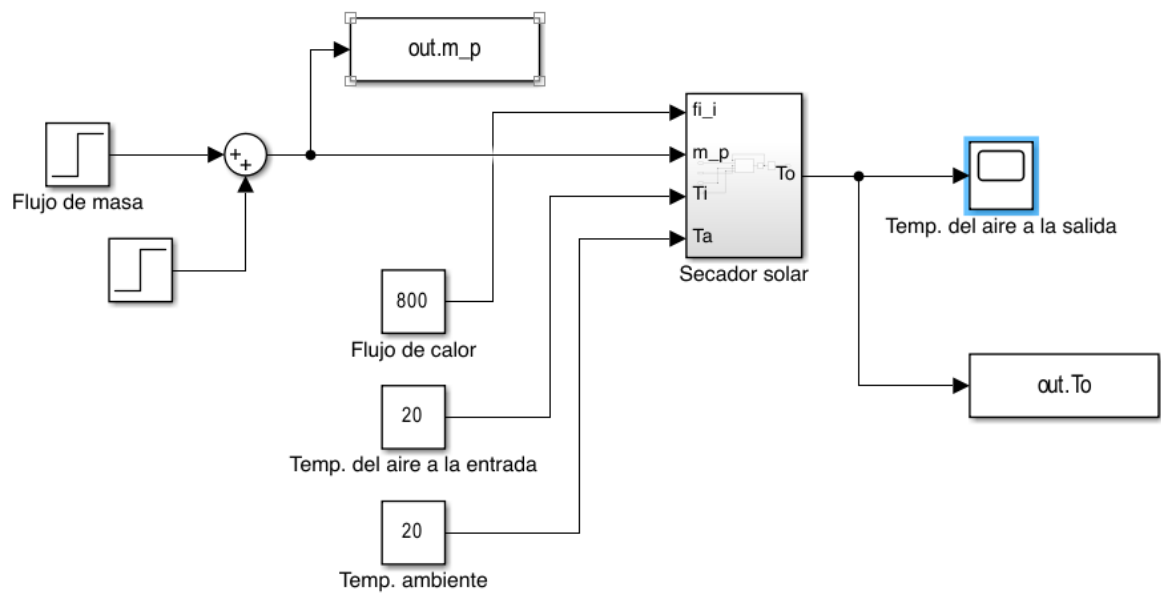


Figura 3. Esquema de recolección de datos

En la Figura 4 se observa la recreación en MatLab de la entrada y salida muestreadas. Como se aprecia, ambas curvas se conservan de manera adecuada.

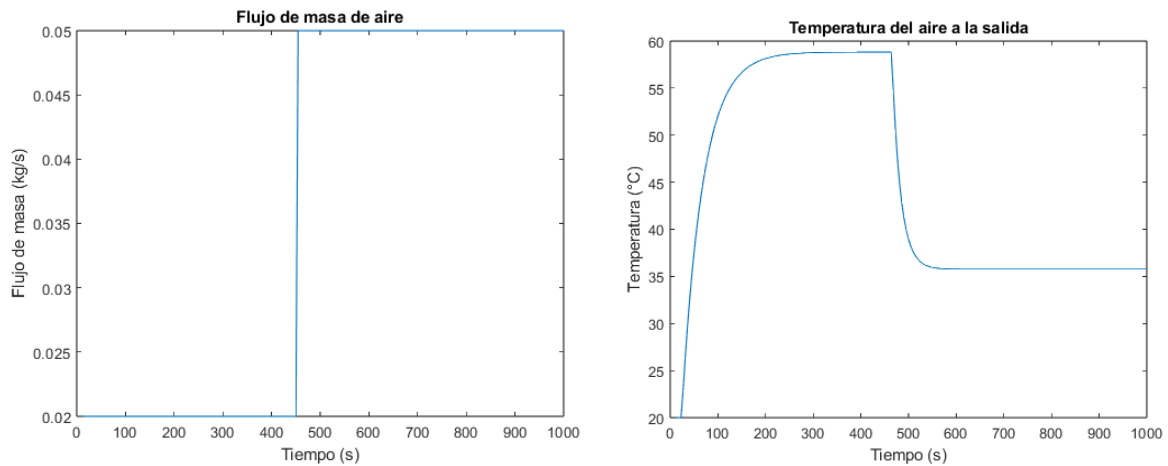


Figura 4. Sistema muestreado

La herramienta *systemIdentification* requiere de una curva de entrada y su respuesta, sin offset. Para ello, se sustrae el punto de operación tanto a la entrada como a la salida, y solo se consideran los puntos desde el punto de operación hasta la estabilización tras el escalón de 0.03.

```

m_p_op = 0.02; % Punto de operación
To_op = 58.83;
% Considerando desde el punto de operación
m_p_i = m_p(80:end) - m_p_op;
To_i = To(80:end) - To_op;

```

Figura 5. Adaptación para usar systemIdentification

Mediante *systemIdentification* se probaron 4 alternativas, considerando combinaciones de 2 o 3 polos y 0, 1 o 2 ceros.

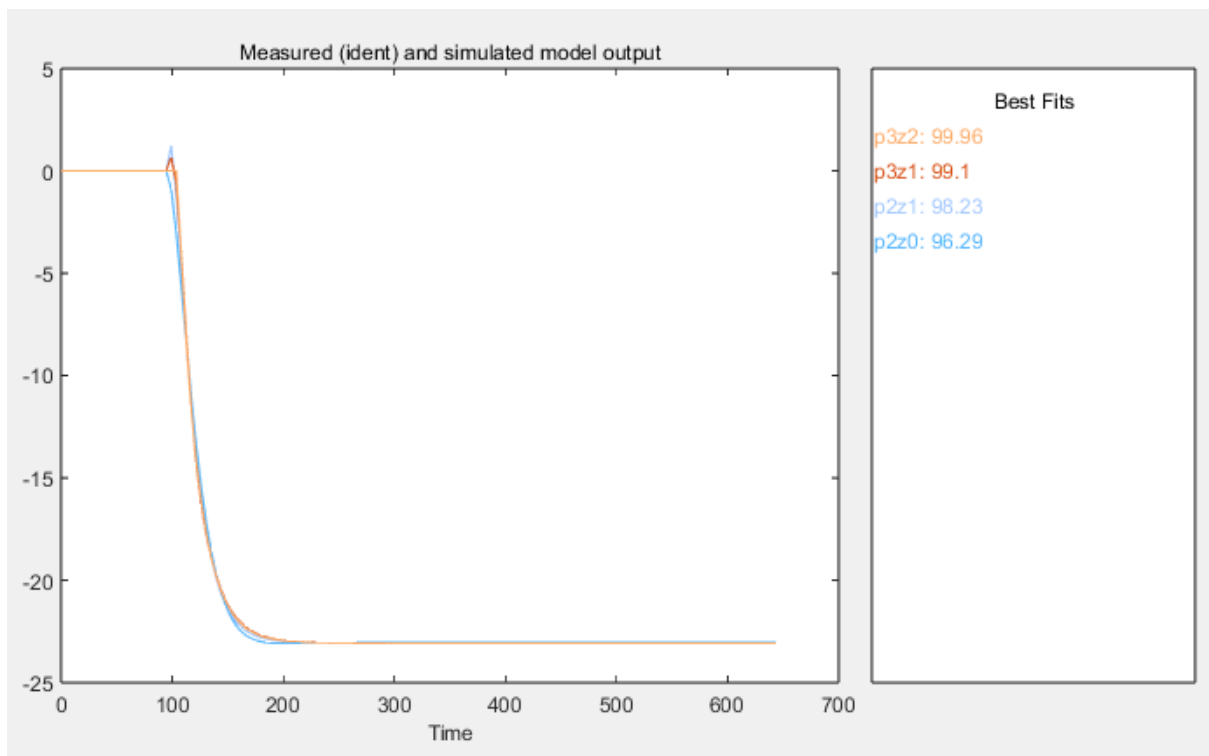


Figura 6. Identificación del sistema

Si bien la opción con 3 polos y 2 ceros presenta el mejor ajuste, se trabaja con la función de transferencia con 2 polos y sin ceros al ser más simple y presentar un ajuste adecuado.

$$\begin{array}{c}
 -3.487 \\
 \hline
 s^2 + 0.1207 s + 0.004541
 \end{array}$$

Figura 7. Función de transferencia de la planta

Al comparar el sistema con dos polos y sin ceros con el sistema con 2 polos y un cero, la respuesta es similar. Por ello, se opta por usar el modelo más simple.

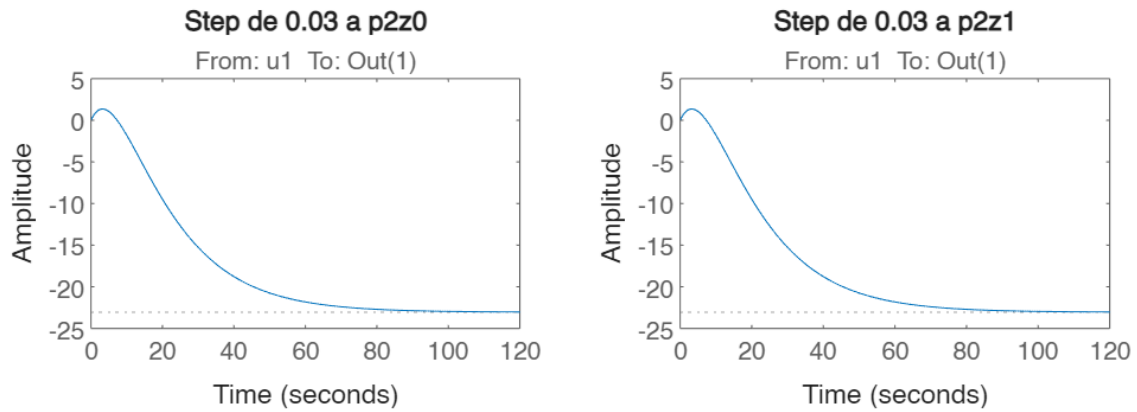


Figura 8. Respuesta al escalón del sistema identificado vs tf con mejor ajuste

## 2.3 Diseño del controlador

El controlador se diseña especificando un tiempo de establecimiento de 100 segundos y un máximo sobreimpulso de 5%. De esta forma, se tiene un margen respecto a las especificaciones del enunciado.

Se seleccionan los polos correspondientes al controlador PI mediante el Lugar Geométrico de Raíces.

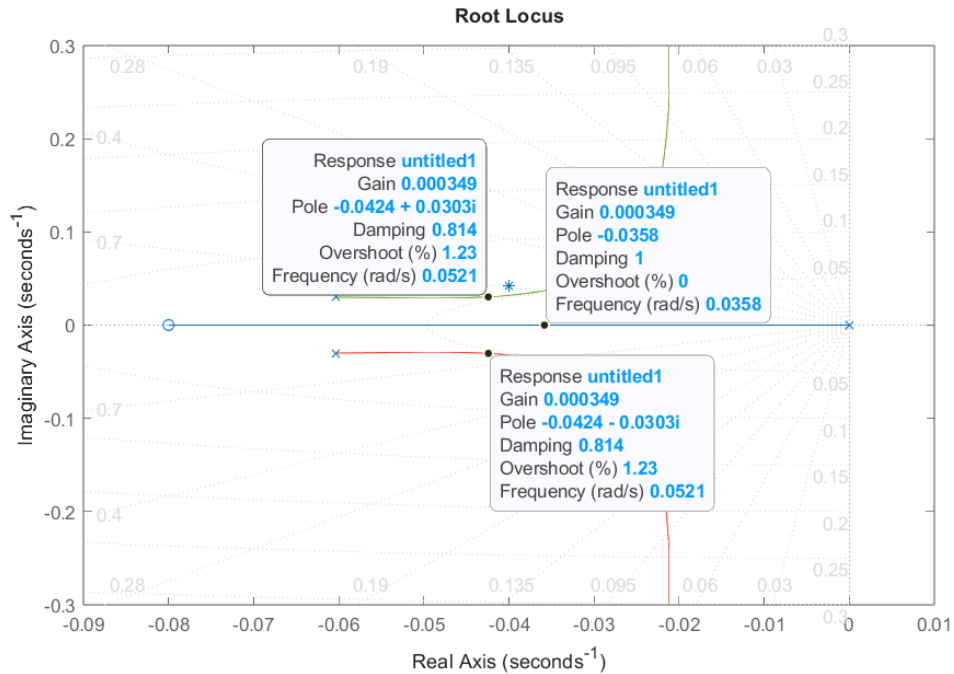


Figura 9. Polos escogidos en el diagrama de LGR

Así, se obtiene:

$$T_l = 12.5$$

$$K_p = -0.000349$$

En la Figura 10 se observa la respuesta del sistema en lazo cerrado al escalón. Se puede observar que no presenta sobreimpulso, y el tiempo de establecimiento es aproximadamente el solicitado.

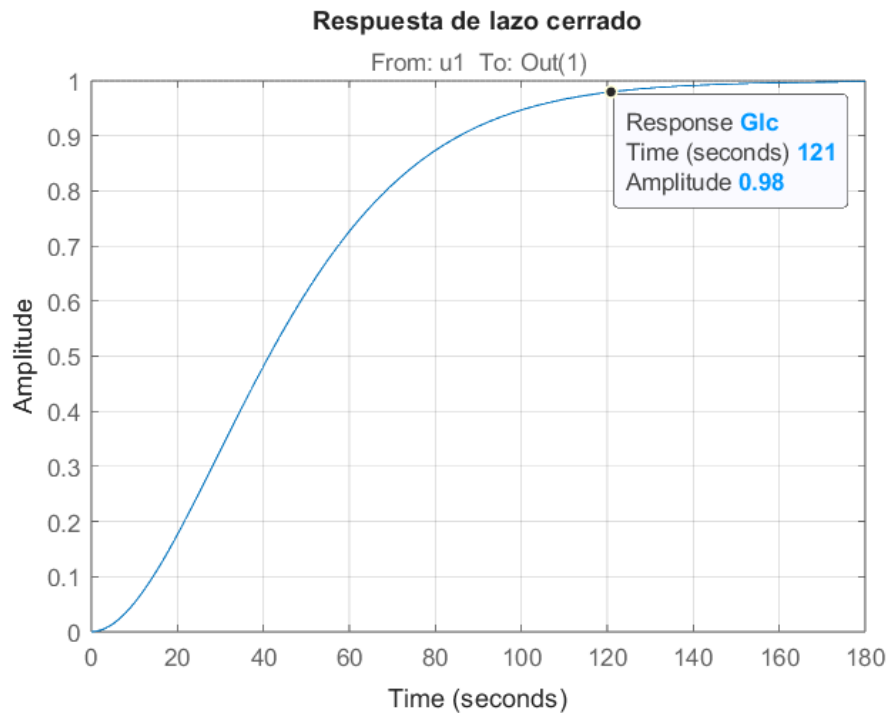


Figura 10. Respuesta del lazo cerrado ( $K_p = -0.000349$ )

## 2.4 Simulación del sistema de control

A partir de la respuesta anterior, se obtiene el tiempo de muestreo en base al tiempo de subida.

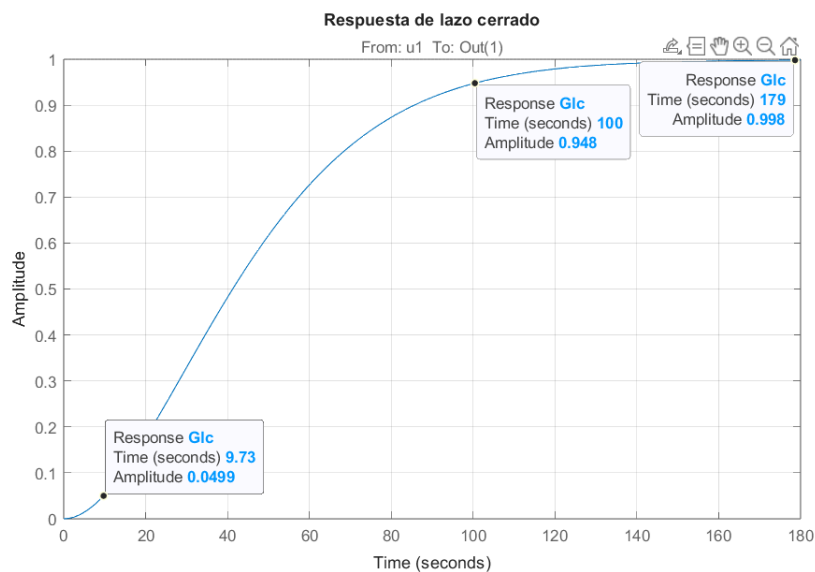


Figura 11. Cálculo del tiempo de subida

$$Tr = 100 - 9.73 = 90.27$$

$$T < \frac{90.27}{10} \approx 9.3$$

Se elige tiempo de muestreo para el controlador  $T_c = 9$  segundos.

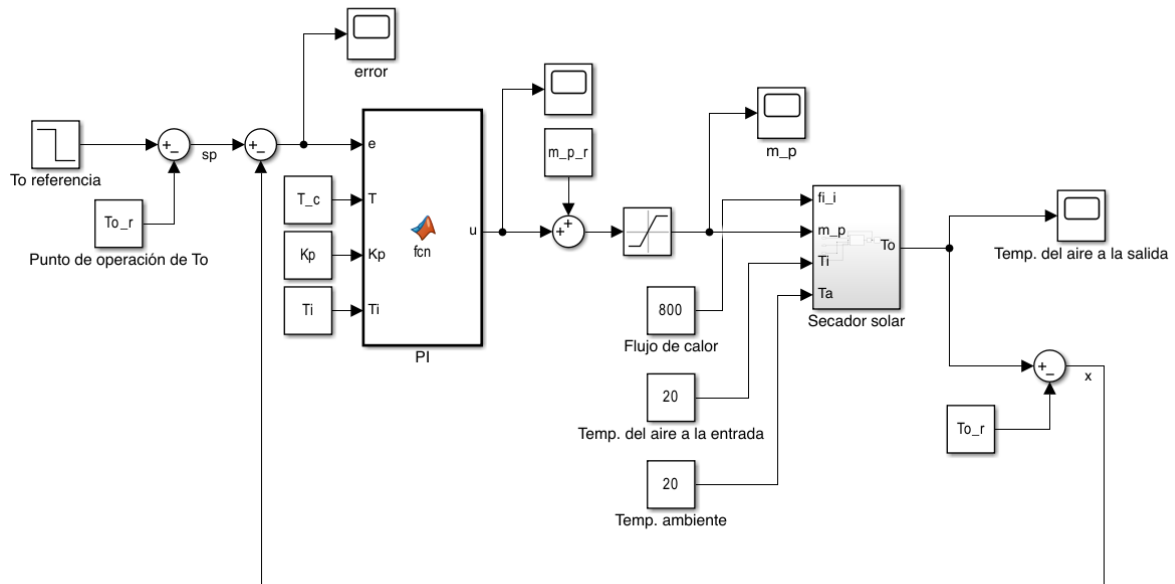


Figura 12. Sistema de control digital PI

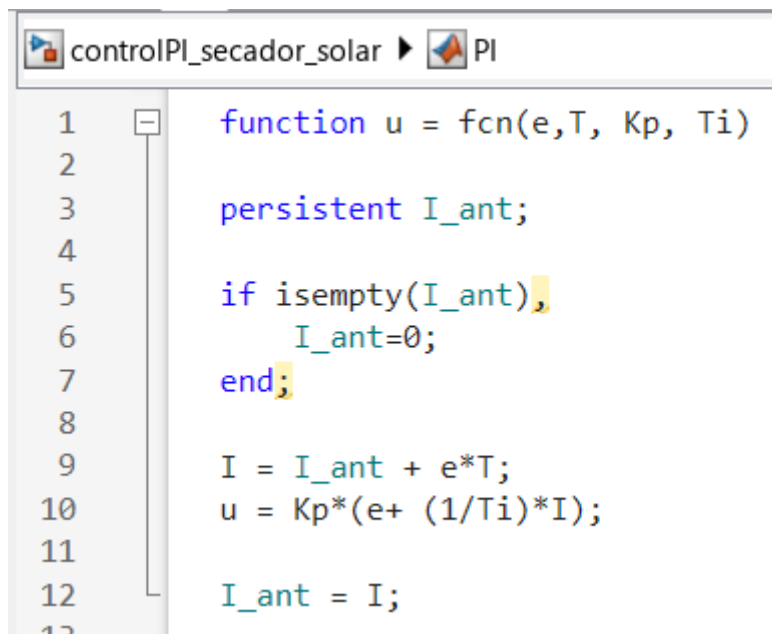


Figura 13. Controlador PI digital

Para el bloque de saturación, se considera un límite inferior de 0, asumiendo que el ventilador solo puede inyectar aire al sistema.



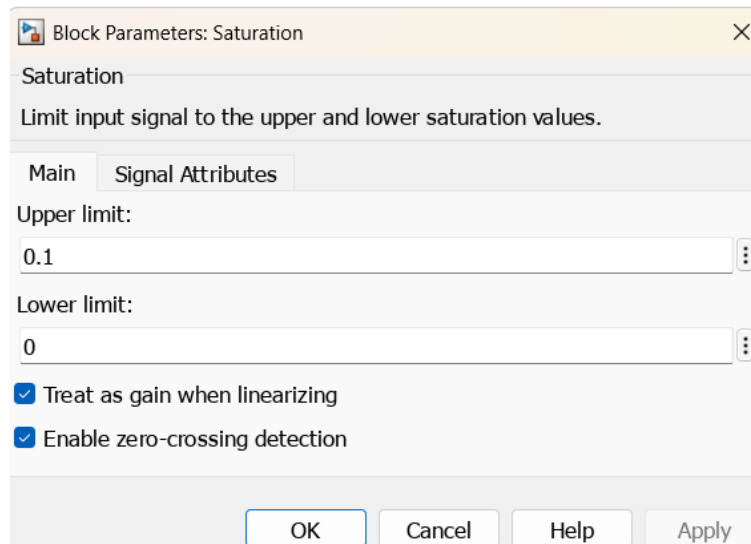


Figura 14. Saturación del sistema

Como se observa en la Figura 15, el sistema satura inicialmente en 0 hasta, no presenta saturación después de la etapa inicial.

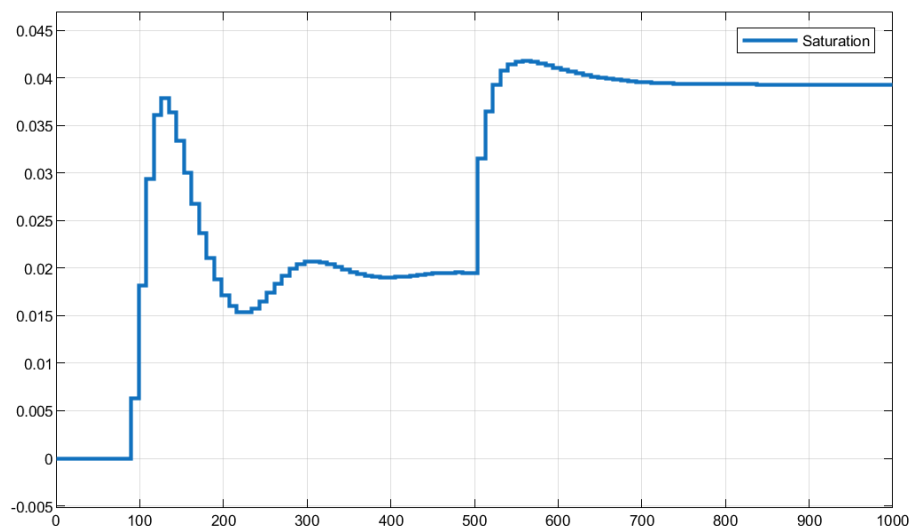


Figura 15. Señal de control saturada

La respuesta del sistema a la referencia planteada en el enunciado se muestra en la Figura 16. Se puede observar un sobreimpulso considerable y oscilación en la primera sección de la respuesta, esto puede deberse a que el sistema de control se diseñó alrededor del punto de operación, por lo que al entrar en la zona no lineal se obtienen resultados no esperados.

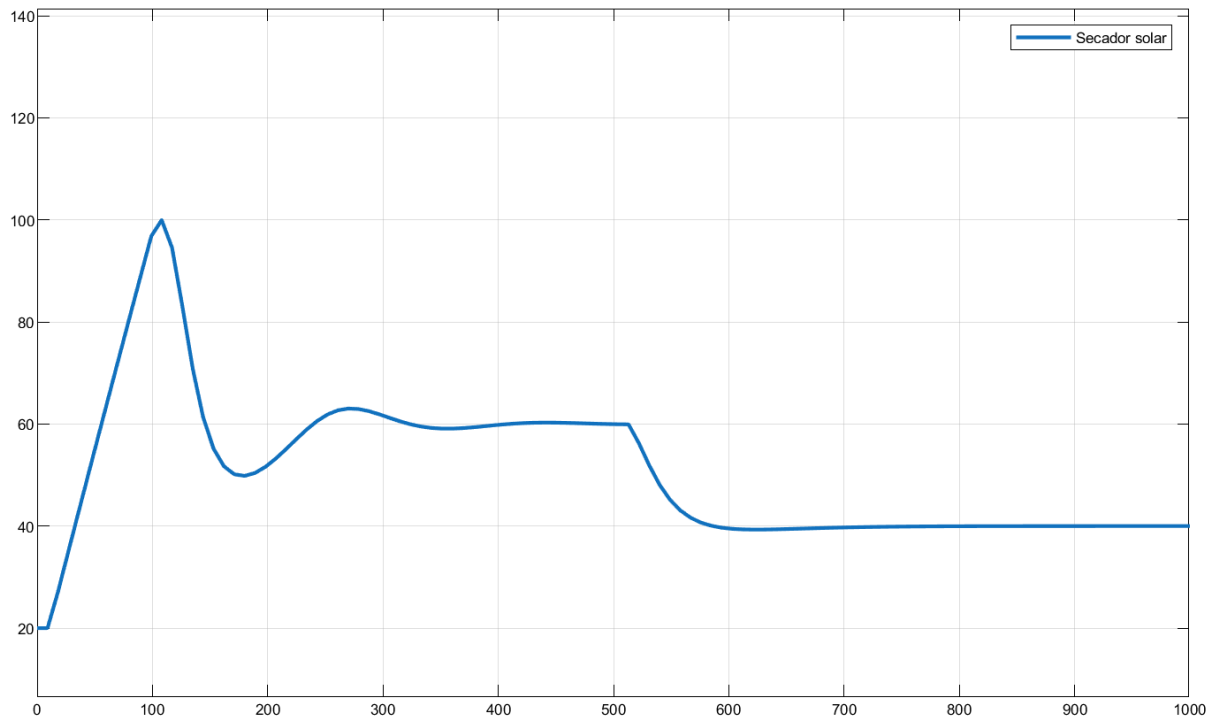


Figura 16. Respuesta del sistema

En la Figura 17 y Figura 18 se analiza el cumplimiento de los requerimientos de diseño. Como se puede observar, en 120 segundos la respuesta se encuentra cerca al sobreimpulso, pero dentro del  $\pm 2\%$  del valor en estado estable ( $[39.2 - 40.8]$ ).

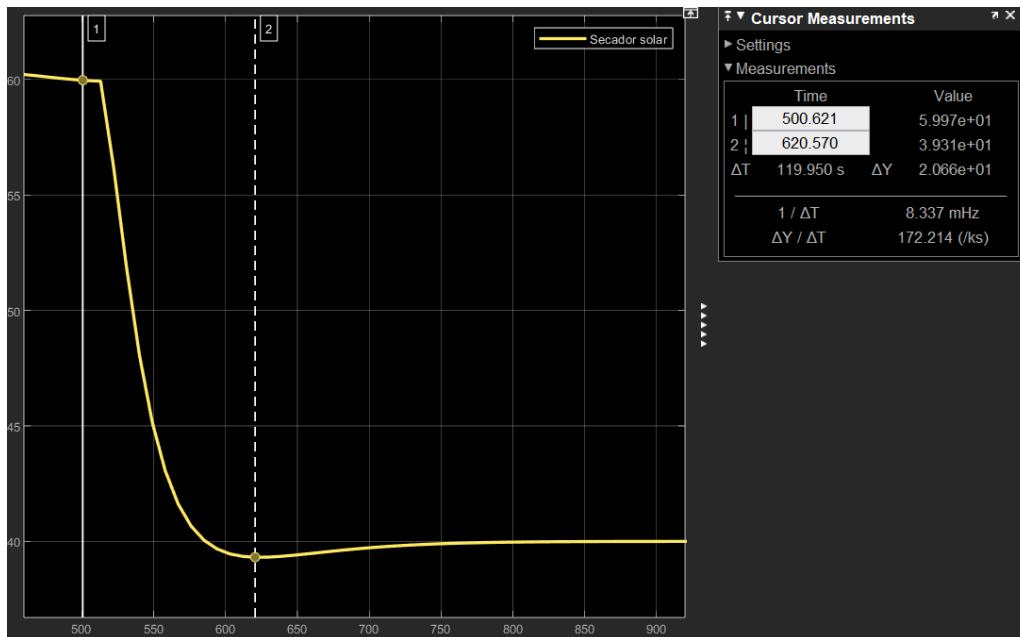


Figura 17. Tiempo de establecimiento

Se calcula el máximo sobreimpulso:

$$\frac{\Delta y}{y_{\infty}} \% = \frac{0.067}{40} \% = 0.17\%$$

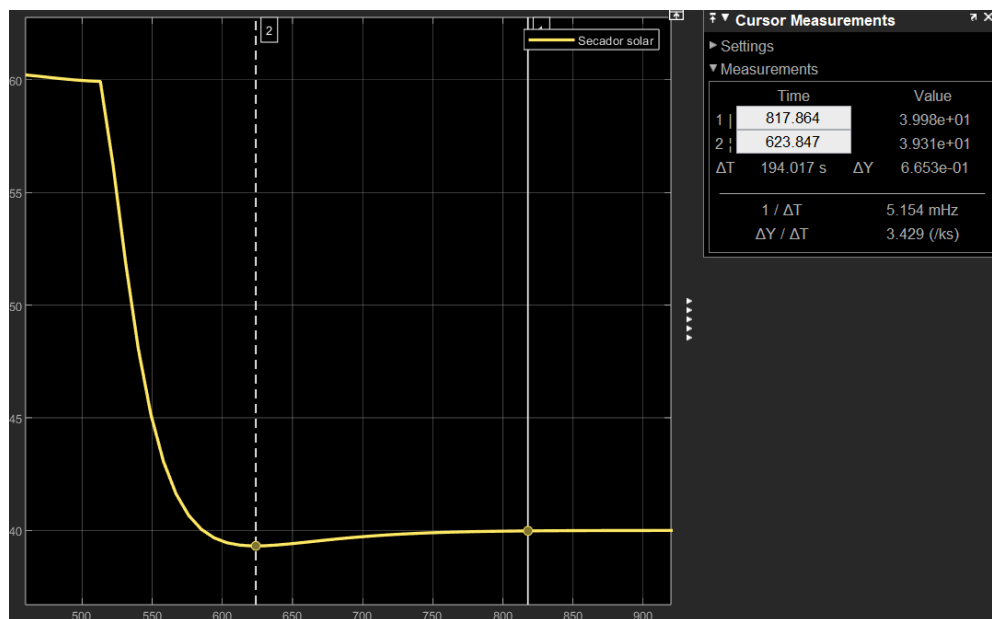


Figura 18. Máximo sobreimpulso

Por lo tanto, el sistema de control cumple tanto con el requisito del tiempo de establecimiento como el de sobreimpulso.

## 2.5 Diseño de servosistema con observador

Partiendo de la función de transferencia mostrada en la Figura 7, se obtiene la planta en espacio de estados en la forma canónica controlable.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1.0000 \\ -0.0045 & -0.1207 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} -3.4870 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura 19. Matrices de la planta en espacio de estados

Donde:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

Con el tiempo de subida calculado:

$$Tr = 37.3211$$

*Figura 20. Tiempo de subida (Espacio de Estados)*

Se obtiene el periodo de muestreo  $T = 4$  segundos.

Para el diseño del servosistema, se emplean las mismas especificaciones que para el controlador PI.

Se calcula la matriz de controlabilidad y la determinante del servosistema con integrador:

$$\text{CoN} = 3 \times 3$$

6.8195	16.4321	21.4222
3.1343	1.7544	0.8025
23.7796	81.0784	155.7776

---


$$\det\_CoN = -1.7392e+03$$

*Figura 21. Prueba de controlabilidad*

Al tener determinante distinta de cero, el sistema es controlable.

Mediante el comando acker, se obtiene:

$$K2 = 1 \times 2$$

0.0045	0.0369
--------	--------

$$K1 = -2.8511e-04$$

*Figura 22. Ganancia del servosistema*

Finalmente, para el diseño del observador se calcula la matriz de observabilidad.

---


$$Ob = 2 \times 2$$

-3.4870	0
-3.3790	-10.9293

---


$$\det Ob = 38.1104$$

*Figura 23. Prueba de observabilidad*

El sistema es observable dado que la determinante de la matriz es distinta de cero. Mediante el comando acker, se obtiene:

$$K_e = \begin{bmatrix} 2 \times 1 \\ -0.0540 \\ -0.0020 \end{bmatrix}$$

Figura 24. Ganancia del observador

## 2.6 Simulación del servosistema

En la Figura 25 se muestra la implementación del Servosistema con Observador en Simulink como una función de Matlab.

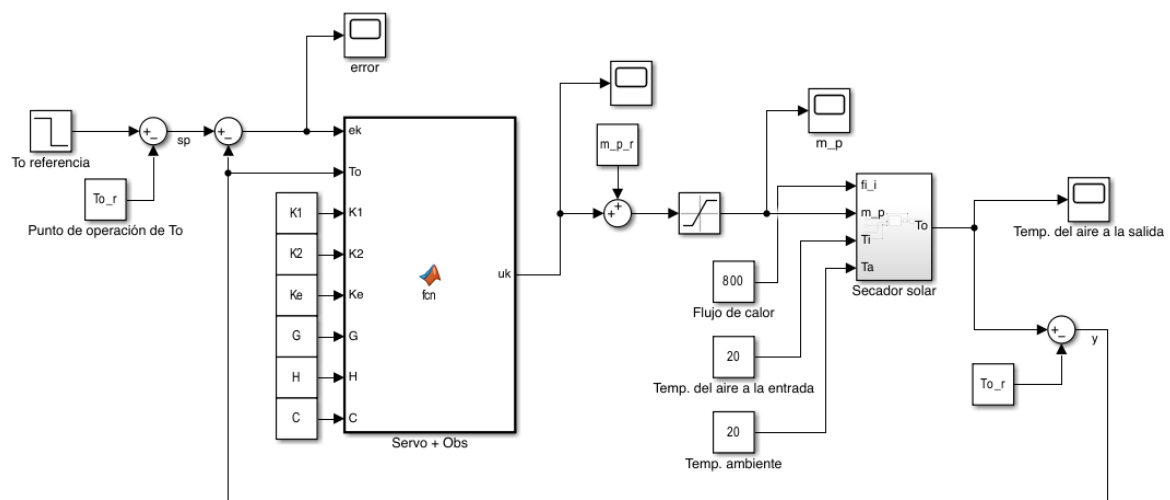


Figura 25. Servosistema con Observador

```

EspacioEstados_secador_solar ▶ Servo + Obs
1  function uk = fcn(ek, To, K1, K2, Ke, G, H, C)
2
3  persistent vk_1;
4  persistent xob;
5
6  if isempty(vk_1)
7      vk_1 = 0;
8      xob = [0;0];
9  end;
10
11  vk = vk_1 + ek;
12  uk = K1*vk - K2*xob;
13
14  %xob_m = xob(k+1)
15  % xob = xob(k)
16  xob_m = G*xob + H*uk + Ke*(To - C*xob);
17
18
19  vk_1 = vk;
20  xob = xob_m;

```

Figura 26. Código de servosistema+observador

La respuesta del sistema obtenida en espacio de estados es similar a la obtenida con el controlador PI.

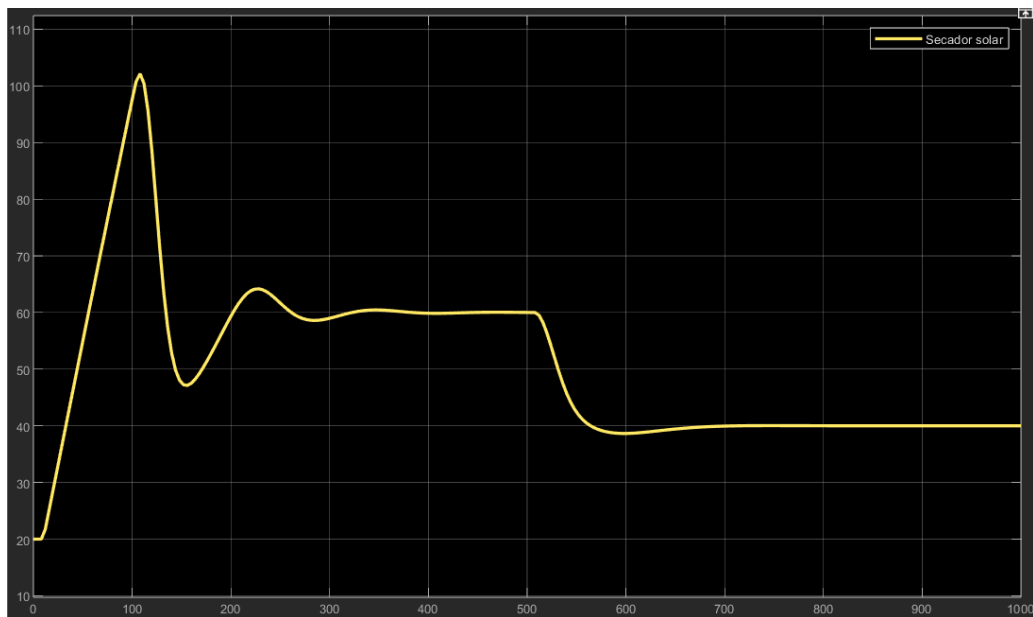


Figura 27. Respuesta del sistema (Espacio Estados)

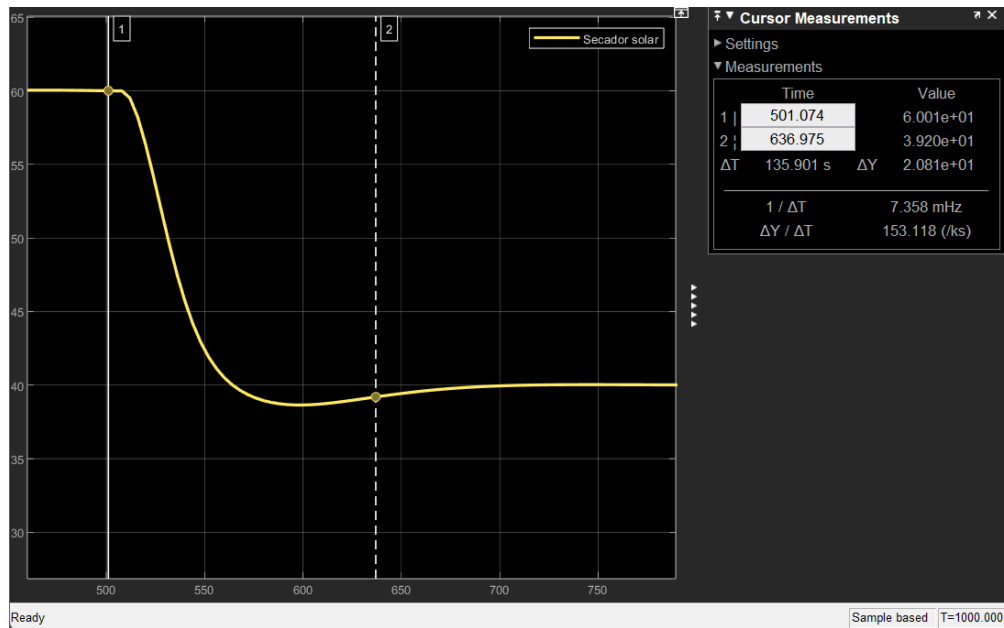


Figura 28. Tiempo de establecimiento (Espacio Estados)

Se observa que el tiempo de establecimiento es de 135.9 segundos, ligeramente superior al requerimiento de diseño.

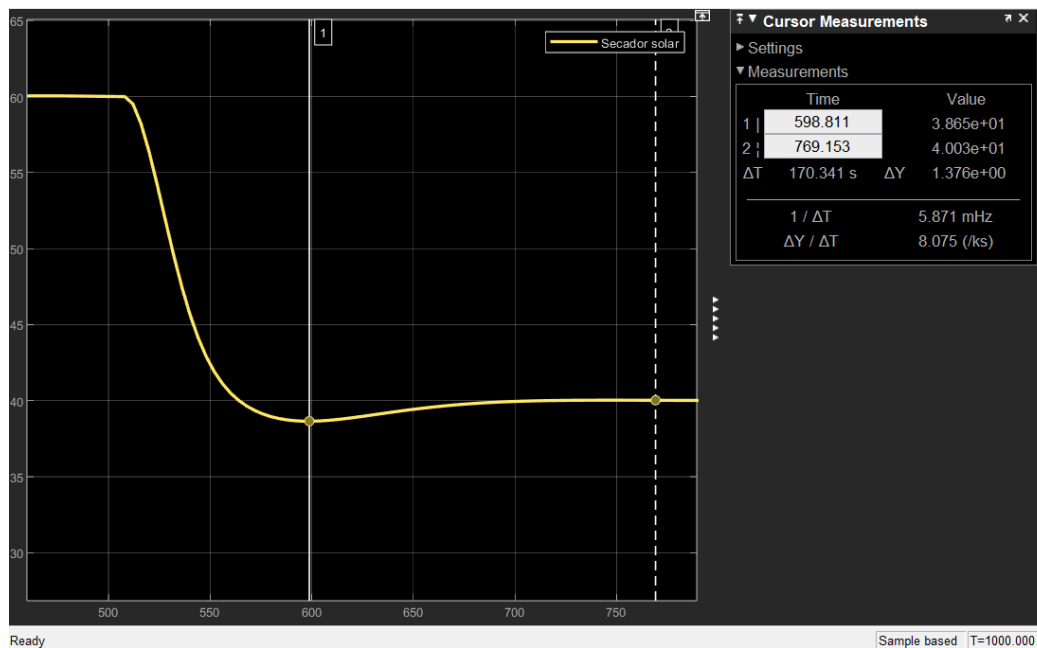


Figura 29. Máximo sobreimpulso (Espacio Estados)

Se calcula el máximo sobreimpulso:

$$\frac{\Delta y}{y_{\infty}} \% = \frac{1.376}{40} \% = 3.44\%$$

El sobreimpulso es mayor que en el controlador PI, pero se encuentra dentro de los requerimientos de diseño.

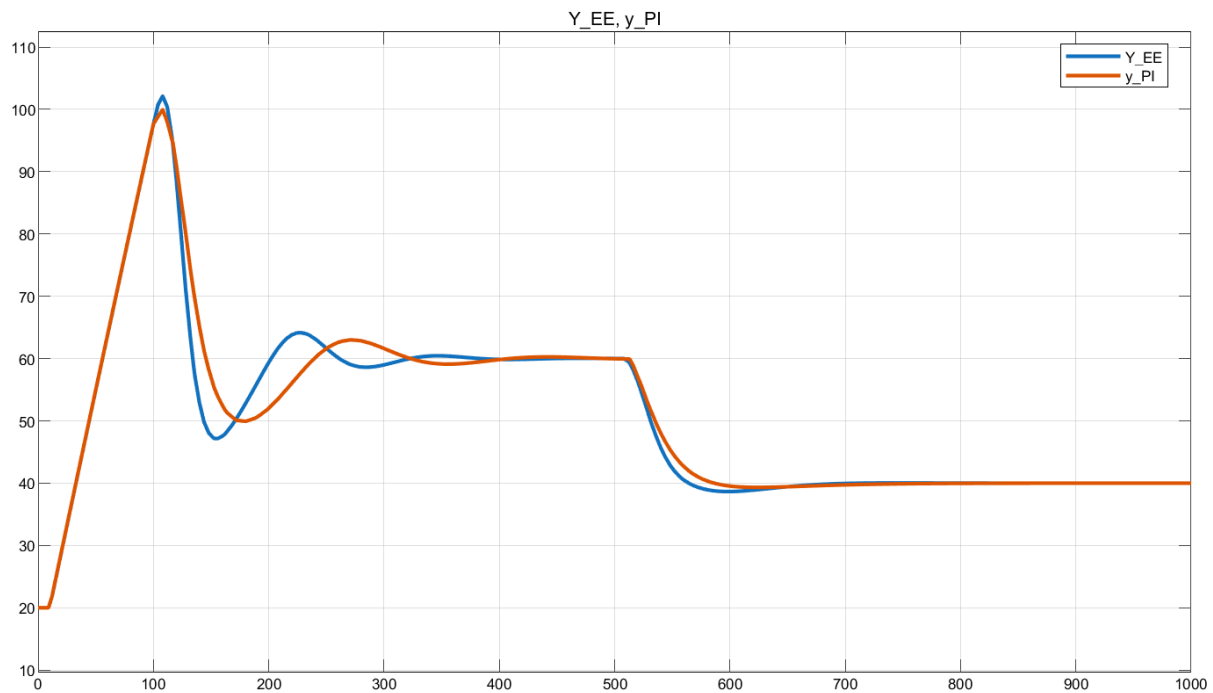


Figura 30. Respuesta de ambos sistemas

Finalmente, se muestra la respuesta de ambos sistemas en una gráfica. Se puede observar que son similares, con la curva de espacio de estados presentando sobreimpulso, tiempo de establecimiento y oscilaciones mayores que el controlador PI digital.

### 3. Conclusiones

Se identificó la planta en su zona lineal a través de la herramienta *systemIdentification*, obteniendo un modelo simple y con buen ajuste. Se diseñó un controlador digital PI, el cual cumplió con las especificaciones de diseño apropiadamente. El servosistema con observador cumplió la especificación de sobreimpulso, sin embargo, presentó un tiempo de establecimiento mayor al indicado.

El controlador PI digital presentó mejor desempeño dinámico y menor complejidad, mientras que el servosistema con observador confirmó la viabilidad de estimar estados no medidos.