

Proyecto final Control: Dos discos y un resorte

Fabrizio Alejandro Jallaza Maldonado
Alejandro Núñez Arroyo
Universidad Católica Boliviana "San Pablo"
La Paz, Bolivia

I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

A. Introducción

El proyecto consiste en el desarrollo de control de una planta la cual consta de dos discos que se encuentran conectados a través de un resorte, cada disco así como el propio resorte están sometidos a fricciones proporcionales a su velocidad, cada disco es accionado por su correspondiente motor, con esta información se procede a hacer los cálculos para el sistema de control, el proyecto se desarrollo con MATLAB y Simulink, los mismos se explican posteriormente.

B. Objetivos

1) Objetivo general:

- Desarrollar el control del ángulo del disco de la derecha aplicando un torque adecuado al disco de la izquierda.

2) Objetivo específicos:

- Comprobar si el sistema es controlable.
- Tomar en cuenta los requerimientos de control:
 - Overshoot menor a 6%.
 - Rise time menor a 2s.
 - Settling time menor a 5s.
 - Steady-state error menor a 2%.
- Desarrollar el análisis matemático a través de MATLAB.

II. MODELO DE LA PLANTA Y SUS PARÁMETROS

A continuación, se muestra la planta asignada al proyecto con sus respectivos componentes.

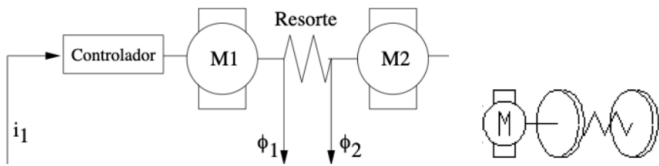


Fig. 1. Planta del proyecto.

Los componentes que incluyen el sistema son:

- Dos discos, llamado disco 1 y disco 2.
- Un resorte.
- Dos motores.

A. Modelo del sistema

El modelo del sistema esta dado por la siguiente representación de espacio de estados.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{c}{\Theta_1} & -\frac{d_1+d}{\Theta_1} & -\frac{c}{\Theta_1} & -\frac{d}{\Theta_1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{c}{\Theta_2} & -\frac{d}{\Theta_2} & -\frac{c}{\Theta_2} & -\frac{d_2+d}{\Theta_2} \end{bmatrix} \cdot x + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{k_{t1}}{\Theta_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_{t2}}{\Theta_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot x + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Fig. 2. Espacio de estados del sistema.

El vector de estados del sistema se define de la siguiente manera:

$$(\phi \quad \omega \quad \phi_2 \quad \omega_2)$$

B. Parámetros de la planta

Los parámetros de diseño de control a ser considerados son los siguientes.

$$\begin{aligned} \theta_1 &= 0.0019 \\ \theta_2 &= 0.0019 \\ k_{t1} &= 3.6242e^{-005} \\ k_{t2} &= 2.05e^{-005} \\ c &= 0.2038 \\ d &= 0.0022 \\ d_1 &= 4.7e^{-005} \\ d_2 &= 4.7e^{-005} \end{aligned}$$

Para aplicar las técnicas de control y cumplir con el objetivo general el cual es el control del ángulo del disco de la derecha aplicando un torque adecuado al disco de la izquierda, de acuerdo a esa definición se procederá a eliminar la entrada 2 (torque 2) y la salida 1 (ángulo 1), de esa forma las ecuaciones B y C presentadas en la Fig 2 cambian de la siguiente manera.

$$C = (0 \quad 0 \quad 1 \quad 0)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ k_{t1}/\theta_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Realizando este cambio en las matrices B y C nos permite continuar con el diseño de los controladores de la planta, ya que ahora se encuentran configuradas de acuerdo a nuestro objetivo de control.

C. Controlabilidad y Observabilidad

Andes de proceder a realizar los sistemas de control se analiza si el sistema es controlable y observable. Para eso es necesario calcular las matrices de controlabilidad y observabilidad, a continuación se muestra las ecuaciones y los comandos en Matlab para calcular cada una de estas respectivamente.

$$Con = (B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^{n-1}B)$$

$$Obs = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix}$$

$$Co = ctrb(A, B)$$

$$Ob = obsv(A, C)$$

$$Co = \begin{pmatrix} 0 & 0.0191 & -0.0226 & -1.9938 \\ 0.0191 & -0.0226 & -1.9938 & 9.4552 \\ 0 & 0 & -0.0221 & -1.9938 \\ 0 & -0.0221 & -1.9938 & 9.4552 \end{pmatrix}$$

$$Ob = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \\ -107.263 & -1.157 & -107.263 & -1.182 \\ 251.052 & -104.524 & 251.052 & -104.523 \end{pmatrix}$$

$$rc = rank(Co)$$

$$ro = rank(Ob)$$

$$rc = 4$$

$$ro = 4$$

Obteniendo los rangos de la matriz se puede verificar que estas son de rango 4, confirmando la controlabilidad y observabilidad del sistema lo que significa que se procede a realizar las técnicas de control de la planta.

D. Matrices extendidas

Se obtienen las matrices extendidas del sistema el cual se muestra en la Fig 2, para la la matriz A_{ext} se utiliza la matriz A y C, con ello se añadirá un una nueva fila de ceros en la matriz, en el caso de la matriz B_{ext} se utiliza las matrices B y D, en este caso se añade solo una fila, se realiza este proceso para trabajar con un polo más debido a la componente integral de control, las formulas son las siguientes.

$$A_{ext} = \begin{pmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{pmatrix} B_{ext} = \begin{pmatrix} B \\ -D \end{pmatrix}$$

Para obtener las matrices extendidas se utiliza MATLAB, el código y resultados son los siguientes:

$$n = size(A);$$

$$n = n(1);$$

$$m = size(C);$$

$$m = m(1);$$

$$A_{ext} = [A_{zeros}(n, 1); -C_{zeros}(m, 1)];$$

$$B_{ext} = [B; -D];$$

El resultado es el siguiente.

$$A_{ext} = \begin{pmatrix} 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 \\ -107.2632 & -1.1826 & -107.2632 & -1.157 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000 & 0 \\ -107.2632 & -1.1579 & -107.2632 & -1.182 & 0 \\ 0 & 0 & -1.0000 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B_{ext} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.0191 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

E. Controlabilidad de Matrices extendidas

Al obtener las nuevas matrices A_{ext} y B_{ext} se forma un nuevo espacio de estados extendidos, este se utiliza para aplicar los métodos de control, para ello es necesario verificar la controlabilidad en estas nuevas matrices. Las ecuaciones y código en MATLAB son las siguientes:

$$Con = (B_{ext} \quad A_{ext}B_{ext} \quad A_{ext}^2B_{ext} \quad \dots \quad A_{ext}^{n-1}B_{ext})$$

$$Con = ctrb(A_{ext}, B_{ext})$$

$$Con = \begin{pmatrix} 0 & 0.0191 & -0.0226 & -1.993 & 9.455 \\ 0.0191 & -0.0226 & -1.9938 & 9.455 & 405.586 \\ 0 & 0 & -0.0221 & -1.993 & 9.455 \\ 0 & -0.0221 & -1.9938 & 9.455 & 405.586 \\ 0 & 0 & 0 & 0.022 & 1.993 \end{pmatrix}$$

$$rank = rank(Con)$$

$$rank = 5$$

Obteniendo el rango de la controlabilidad de las matrices extendidas se puede evidenciar que el rango es de 5, con lo cual podemos proceder al diseño de control de la planta extendida.

III. DISEÑO DE CONTROL TÉCNICA I POLE PLACEMENT

Se eligió como técnica de control Pole placement para ello se debe considerar los lineamientos de control los cuales son:

- Overshoot menor a 6%.
- Settling time menor a 5s.

Con esos datos se procede a calcular ξ y ω_n , los cuales se obtendrán mediante las siguientes ecuaciones.

$$\xi = \frac{|\ln \frac{PO}{100}|}{\sqrt{\pi^2 + [\frac{PO}{100}]^2}}$$

$$\omega_n = \frac{4}{\xi t_s}$$

Remplazando datos:

$$\xi = \frac{|\ln \frac{6}{100}|}{\sqrt{\pi^2 + [\frac{6}{100}]^2}}$$

$$\xi = 0.6671$$

$$\omega_n = \frac{4}{\xi t_s}$$

$$\omega_n = \frac{4}{0.6671 * 5}$$

$$\omega_n = 1.1991$$

Luego de obtener ξ y ω_n se obtiene los polos dominantes del sistema.

$$\lambda_{1,2} = -\xi\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1}$$

$$\lambda_{1,2} = -0.6671 * 1.1991 \pm 1.1991\sqrt{0.6671^2 - 1}$$

$$\lambda_1 = -0.8000 + 0.8933i$$

$$\lambda_2 = -0.8000 - 0.8933i$$

Se calcula los 2 primeros polos para un sistema de segundo orden, las soluciones son las presentadas en la anterior ecuación. Se multiplica la parte real de los polos por 10 y 100 respectivamente, este paso adicional se realiza para que los dos primeros polos sean la base del control y los polos no afecten al sistema de control. Los polos no dominantes son:

$$p3 = \text{real}(p1) * 10;$$

$$p4 = \text{real}(p1) * 100;$$

$$p3 = -8.0000 + 0.0000i$$

$$p4 = -80.0000 + 0.0000i$$

Obteniendo los polos se obtiene la ganancia de pre-compensación del controlador la cual será retro-alimentada en lazo cerrado para el control de la planta, se obtiene la ganancia k_i la cual compensa el error del sistema y corrige la planta bajo control.

$$k1 = \text{place}(A, B, [p1, p2, p3, p4])$$

$$k1 = 1.0e + 04 * [2.9012, 0.4573, 2.8562, 0.4025]$$

Se obtiene un nuevo espacio de estados de la planta bajo control, para ello se obtiene la matriz A_{cl} y C_{cl} para ello se

utiliza la siguiente formula.

$$A_{cl} :$$

$$A_{cl} = A - Bk$$

$$A_{cl} = \begin{pmatrix} 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ -107.2632 & -1.1826 & -107.2632 & -1.1579 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \\ -107.2632 & -1.1579 & -107.2632 & -1.1826 \end{pmatrix}$$

$$- \begin{pmatrix} 0 \\ 0.0191 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} (29011.57 \quad 4573.31 \quad 28561.75 \quad 4025.11)$$

$$A_{cl} = \begin{pmatrix} 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ -660.6513 & -88.4174 & -652.0712 & -77.9360 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \\ -107.2632 & -1.1579 & -107.2632 & -1.1826 \end{pmatrix}$$

$$C_{cl} :$$

$$C_{cl} = C - Dk$$

$$C_{cl} = (0 \quad 0 \quad 1 \quad 0)$$

$$- (0) (29011.57 \quad 4573.31 \quad 28561.75 \quad 4025.11)$$

$$C_{cl} = (0 \quad 0 \quad 1 \quad 0)$$

Finalmente para obtener la planta con pre-compensación, con los polos del sistema obtenidos y las nuevas matrices A_{cl} y C_{cl} en close loop se utiliza la siguiente función para obtener la planta bajo control.

$$plant_{uc} = ss(A_{cl}, B, C_{cl}, D);$$

A. Pole Placement con parte integral

Para realizar este proceso de control con Pole Placement y su parte integral se debe utilizar las matrices extendidas, con ellas obtendremos una nueva ganancia del controlador denominadas k y k_e , se utilizan los mismos polos en la retro-alimentación de Pole Placement, se añade un nuevo polo al sistema ya que las matrices extendidas son de orden 5.

$$p5 = \text{real}(p1) * 10 - 1;$$

Obteniendo el quinto polo, los polos del sistema son los siguientes:

$$p3 = \text{real}(p1) * 10;$$

$$p4 = \text{real}(p1) * 100;$$

$$p3 = -8.0000 + 0.0000i$$

$$p4 = -80.0000 + 0.0000i$$

$$p5 = -9.0000 + 0.0000i$$

Con los polos se obtiene la ganancia del sistema en lazo cerrado, para ello se encuentra la ganancia k :

$$k_{ext} = \text{place}(A_{ext}, B_{ext}, [p1, p2, p3, p4, p5])$$

$$k_{ext} = 1.0e + 04 * [6.7364, 0.5045, 6.1897, 0.1119, 0.4048]$$

El siguiente paso es obtener la ganancia k_e , una ganancia que compensa a la planta bajo control integrada en la entrada del

sistema, además tiene una retroalimentación al sistema de la variable kn.

$$\begin{aligned} kn &= kext(1 : n) \\ ke &= kext(n + 1) \\ kn &= 1.0e + 04 * [6.7364, 0.5045, 6.1897, 0.1119] \\ ke &= 4.0484e + 03 \end{aligned}$$

IV. DISEÑO DE CONTROL TÉCNICA II ITAE

Se elige como técnica de control II ITAE para ello se debe considerar el polinomio característico, de acuerdo al orden de nuestro sistema, la cual se define a continuación, en nuestro caso el orden ecuaciones de las ecuaciones de estado es de orden 4 lo que genera cuatro polos para las ganancias de control. De acuerdo a la Fig 3 la ecuación del polinomio característico de nuestro sistema es la siguiente:

$$s^4 + 2.1\omega_n s^3 + 3.4\omega_n^2 s^2 + 2.7\omega_n^3 s + \omega_n^4$$

System Order	Characteristic Polynomial
First	$s + \omega_n$
Second	$s^2 + 1.4 \omega_n s + \omega_n^2$
Third	$s^3 + 1.75 \omega_n s^2 + 2.15 \omega_n^2 s + \omega_n^3$
Fourth	$s^4 + 2.1 \omega_n s^3 + 3.4 \omega_n^2 s^2 + 2.7 \omega_n^3 s + \omega_n^4$
Fifth	$s^5 + 2.8 \omega_n s^4 + 5.0 \omega_n^2 s^3 + 5.5 \omega_n^3 s^2 + 3.4 \omega_n^4 s + \omega_n^5$
Sixth	$s^6 + 3.25 \omega_n s^5 + 6.6 \omega_n^2 s^4 + 8.6 \omega_n^3 s^3 + 7.45 \omega_n^4 s^2 + 3.95 \omega_n^5 s + \omega_n^6$

Fig. 3. Polinomio característico para el control ITAE.

A. Ganancia controlador ITAE

Se halla los polos del sistema, se toma en cuenta una frecuencia natural igual a 1.5, esta frecuencia se añade en la ecuación característica del sistema. Se utiliza MATLAB para hallar los polos del sistema.

$$\begin{aligned} wi &= 1.5; \\ itaeeq1 &= (1 \quad 2.1 * wi \quad 3.4 * wi^2 \quad 2.7 * wi^3 \quad wi^4) \\ itaepol1 &= roots(itaeeq1); \\ pi1 &= itaepol1(1) \\ pi2 &= itaepol1(2) \\ pi3 &= itaepol1(3) \\ pi4 &= itaepol1(4) \\ pi1 &= -0.6360 + 1.8945i \\ pi2 &= -0.6360 - 1.8945i \\ pi3 &= -0.9390 + 0.6212i \\ pi4 &= -0.9390 - 0.6212i \end{aligned}$$

Obteniendo los polos, se obtiene la ganancia de pre-compensación del controlador, esta es retro-alimentada en lazo cerrado para el control de la planta, además, se obtiene la

ganancia kpl la cual compensa el error del sistema y corrige la planta bajo control.

$$\begin{aligned} ki &= place(A, B, [pi1, pi2, pi3, pi4]) \\ kpi &= 1 / -((C - D * ki) * inv(A - B * ki) * B - D) \\ kpi &= -2.4743 \end{aligned}$$

De esa manera se genera la ganancia aplicando solo ITAE.

B. ITAE con parte integral

Para realizar el control de la planta con ITAE y su parte integral es necesario calcular sus polos, en este caso se utilizan las matrices extendidas A_{ext} y B_{ext} las matrices son de rango 5, para ello es necesario el aumentar un nuevo polo y orden al sistema, para obtener la ganancia se requiere utilizar el polinomio característico de orden cinco que se presenta en la Fig 3. La ecuación que se utiliza es la siguiente:

$$s^5 + 2.8\omega_n s^4 + 5.0\omega_n^2 s^3 + 5.5\omega_n^3 s^2 + 3.4\omega_n^4 s + \omega_n^5$$

De la misma forma que la ganancia utilizando solo ITAE se utiliza MATLAB como herramienta para conocer los polos del sistema, en este caso la frecuencia natural es igual a 1.5.

$$\begin{aligned} wi &= 1.5; \\ itaeeq2 &= (1 \quad 2.8 * wi \quad 5.0 * wi^2 \quad 5.5 * wi^3 \quad 3.4 * wi^4 \quad wi^5) \\ itaepol2 &= roots(itaeeq2); \\ pin1 &= itaepol2(1); \\ pin2 &= itaepol2(2); \\ pin3 &= itaepol2(3); \\ pin4 &= itaepol2(4); \\ pin5 &= itaepol2(5); \\ pin1 &= -0.5646 + 1.9379i \\ pin2 &= -0.5646 - 1.9379i \\ pin3 &= -1.3433 + 0.0000i \\ pin4 &= -0.8638 + 0.8009i \\ pin5 &= -0.8638 - 0.8009i \end{aligned}$$

Con los polos se obtiene la ganancia del controlador, este es retro-alimentado en lazo cerrado para el control de la planta, se obtiene la ganancia kei la cual compensa el error del sistema y corrige la planta bajo control.

$$\begin{aligned} kiext &= place(Aext, Bext, [pin1, pin2, pin3, pin4, pin5]) \\ ki2 &= kiext(1 : n); \\ kei &= kiext(n + 1) \\ kei &= 3.7115 \end{aligned}$$

De esa manera se genera la ganancia aplicando ITAE con parte integral.

C. Diseño de observador

Se realiza el diseño de observador para la planta, esta se implementa en ambas técnicas de control, considerando el diseño polos que estén 10 veces alejados que los polos de la planta, posteriormente obtenemos las ganancias del observador con estos polos y con las matrices A y C:

$$\begin{aligned} PolesObs &= p(1:n) * 10 \\ L &= place(A', C', PolesObs)' \\ L &= [-8891.10, -9663.77, \\ &\quad 893.63, 75895.53] \end{aligned}$$

Con las ganancias obtenidas se obtiene el espacio de estados del observador que será implementado en las simulaciones de Simulink de la planta.

$$\begin{aligned} Aobs &= A - L * C \\ Bobs &= [B - L * DL] \\ Cobs &= eye(n) \\ Dobs &= zeros(n, 2) \end{aligned}$$

D. Parámetros de simulación en Simulink

Para realizar la simulación en Simulink se establecen parámetros de incerteza paramétrica y de perturbancia de entrada y salida para la planta. Estos valores se configuran mediante sus respectivos bloques en la simulación durante la implementación:

Perturbación de entrada:

$$\begin{aligned} PI &= 1.5 \\ Periodo &= 20s \\ Pulso &= 0.4\% \\ Phase_{delay} &= 0.5s \end{aligned}$$

Perturbación de salida:

$$\begin{aligned} P0 &= 0.001 \\ Periodo &= 20s \\ Pulso &= 0.4\% \\ Phase_{delay} &= 0.5s \end{aligned}$$

Los siguientes valores definen nuestras perturbancias de entrada y salida.

$$INC = 250$$

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ (-c/th1) * INC & -(d1+d)/th1 * INC & (-c/th1) * INC(-d/th1) * INC & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ (-c/th2) * INC & (-d/th2) * INC & (-c/th2) * INC & -(d2+d)/th2 * INC \end{pmatrix}$$

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -26815.79 & -295.66 & -26815.79 & -289.47 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -26815.79 & -289.47 & -26815.79 & -295.66 \end{pmatrix}$$

Las siguientes matrices son implementadas en los bloques de incerteza paramétrica con los nuevos valores obtenidos para la matriz A.

V. RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA - PLANTA

Los resultados de simulación del sistema se realizaron a través de MATLAB y Simulink, las plantas obtenidas en el código en .m se referencia desde Simulink, esto nos ayuda a utilizar los mismos valores obtenidos en el código (ganancia, polos, matrices) directamente en la simulación de Simulink. Todos los valores fueron exportados desde el simulador a variable de workspace con la siguiente figura:

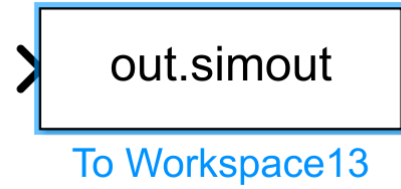


Fig. 4. Bloque a variable de sistema.

De esta manera el planteado se lo realiza en el script de matlab pero con las variables obtenidas en el Simulink.

A. Simulación de la planta

Se muestra la simulación de la planta, esta se realiza en MATLAB y en Simulink. Para graficar el comportamiento de la planta sin ningún control se utiliza como entrada un pulso unitario, los bloques utilizados en Simulink son los siguientes, como se observa no tiene retroalimentación.

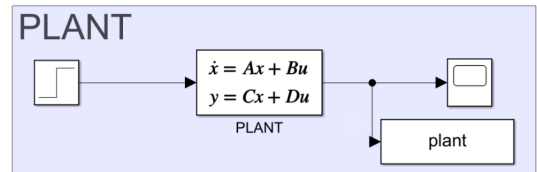


Fig. 5. Simulación en Simulink de la planta.

Se observa a continuación la gráfica de esta planta con el bloque "To Workspace" implementado.

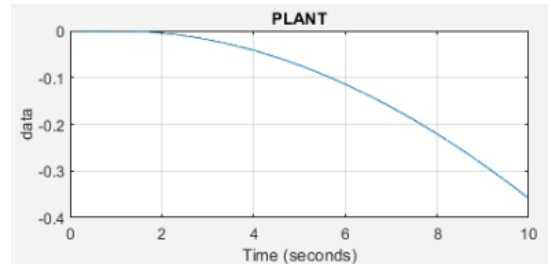


Fig. 6. Resultado simulación en código .m de la planta.

B. Simulación de la planta bajo control I Pole Placement

1) *Planta bajo control:* Se muestra la simulación de la planta bajo control por medio de Pole Placement, esta se realizó en MATLAB y en Simulink. Para mostrar la salida se utiliza una retroalimentación solamente con Pole Placement y con la parte integral.

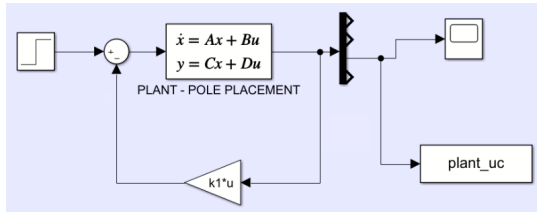


Fig. 7. Simulación en Simulink bajo control I Pole Placement

Se observa a continuación la gráfica de esta planta con el bloque "To Workspace" implementado.

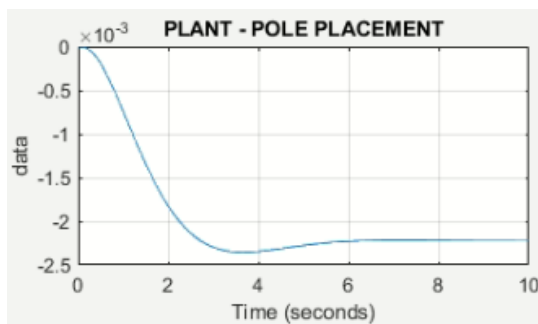


Fig. 8. Resultado simulación de .m bajo control I Pole Placement

2) *Planta bajo control con incerteza paramétrica:* Se muestra la simulación de la planta bajo control por medio de Pole Placement, bajo incerteza paramétrica, el valor de incerteza paramétrica fue expresado anteriormente y se muestra a continuación la implementación.

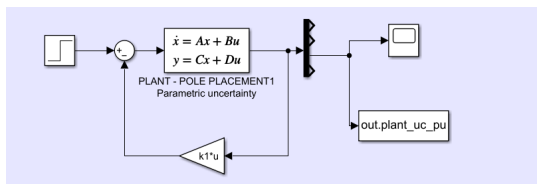


Fig. 9. Simulación en Simulink bajo control I Pole Placement con incerteza paramétrica

Se observa a continuación la gráfica de esta planta con el bloque "To Workspace" implementado.

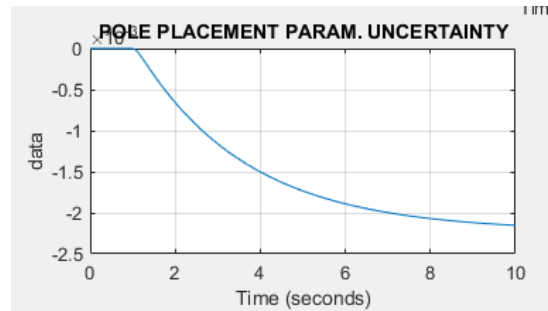


Fig. 10. Resultado simulación de .m bajo control I Pole Placement con incerteza paramétrica

3) *Planta bajo control con perturbaciones de entrada y salida:* Se muestra la simulación de la planta bajo control por medio de Pole Placement, bajo perturbaciones de entrada y salida, los valores de configuración fueron expresados anteriormente, se muestra a continuación la implementación.

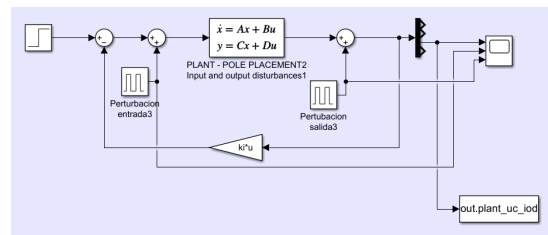


Fig. 11. Simulación en Simulink bajo control I Pole Placement con perturbaciones de entrada y salida.

Se observa a continuación la gráfica de esta planta con el bloque "To Workspace" implementado.

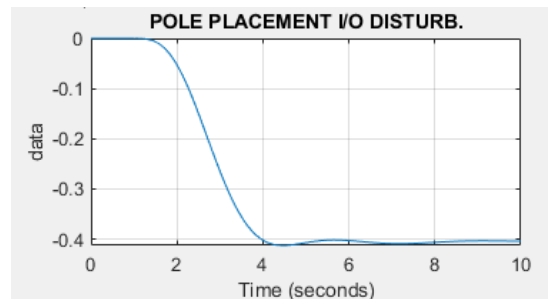


Fig. 12. Resultado simulación bajo control I Pole Placement con perturbaciones de entrada y salida.

4) *Planta bajo control, eliminación de error estático y observador:* Simulación bajo error estático y observador.

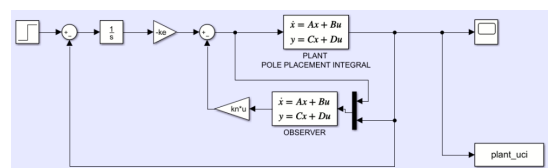


Fig. 13. Simulación en Simulink bajo control I Pole Placement con eliminación de error estático y observador

Se observa a continuación la gráfica de esta planta con el bloque "To Workspace" implementado.

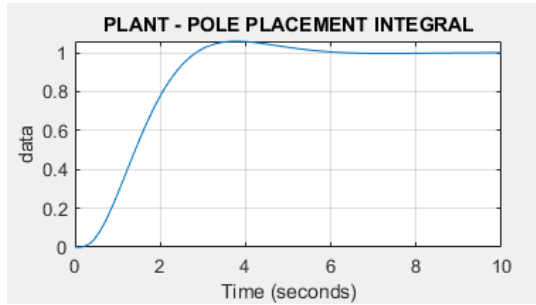


Fig. 14. Resultado simulación bajo control I Pole Placement con eliminación de error estático y observador

5) *Planta bajo control con perturbaciones de entrada y salida, eliminación de error estático y observador:* Simulación bajo error estático y observador con perturbaciones de entrada y salida.

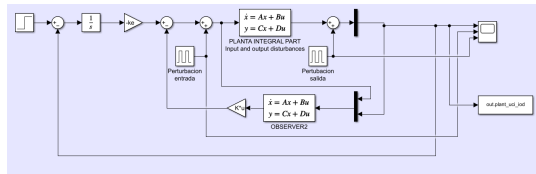


Fig. 15. Simulación en Simulink bajo control I Pole Placement con perturbaciones de entrada y salida, eliminación de error estático y observador

Se observa a continuación la gráfica de esta planta con el bloque "To Workspace" implementado.

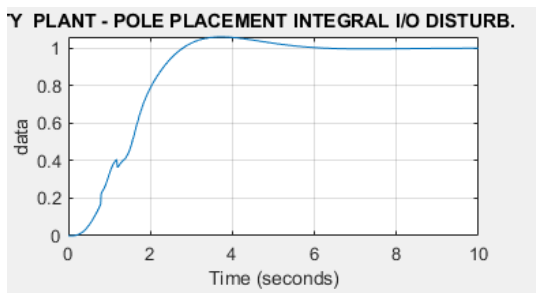


Fig. 16. Resultado simulación bajo control I Pole Placement con perturbaciones de entrada y salida, eliminación de error estático y observador

6) *Planta bajo control con incerteza paramétrica, eliminación de error estático y observador:* Simulación bajo error estático y observador con incerteza paramétrica.

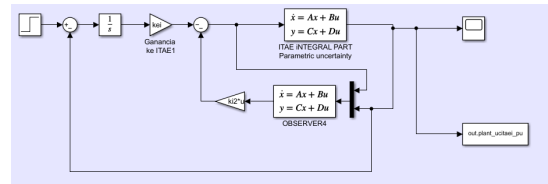


Fig. 17. Simulación en Simulink bajo control I Pole Placement con incerteza paramétrica, eliminación de error estático y observador

Se observa a continuación la gráfica de esta planta con el bloque "To Workspace" implementado.

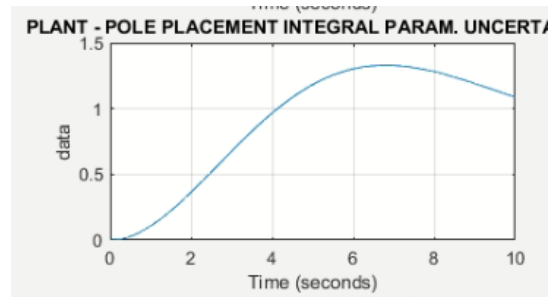


Fig. 18. Resultado simulación bajo control I Pole Placement con incerteza paramétrica, eliminación de error estático y observador

C. Simulación de la planta bajo control II ITAE

Como técnica de control II se escogió ITAE, se muestra la simulación de la planta bajo control con solo ITAE y ITAE más integral.

1) *Planta bajo control:* Se muestra la simulación de la planta bajo control por medio de ITAE, esta se realizo en MATLAB y en Simulink. Para mostrar la salida se utiliza una retroalimentación solamente con ITAE y con la parte integral.

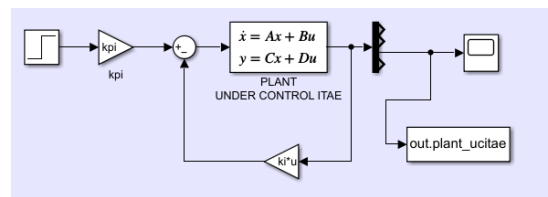


Fig. 19. Simulación en Simulink bajo control II ITAE

Se observa a continuación la gráfica de esta planta con el bloque "To Workspace" implementado.

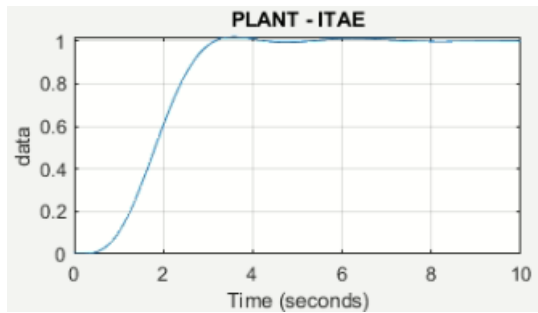


Fig. 20. Resultado simulación bajo control II ITAE

2) *Planta bajo control con incerteza paramétrica:* Se muestra la simulación de la planta bajo control por medio de ITAE, bajo incerteza paramétrica, el valor de incerteza paramétrica fue expresado anteriormente y se muestra a continuación la implementación

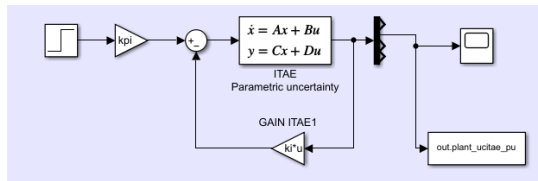


Fig. 21. Simulación en Simulink bajo control II ITAE con incerteza paramétrica

Se observa a continuación la gráfica de esta planta con el bloque "To Workspace" implementado.

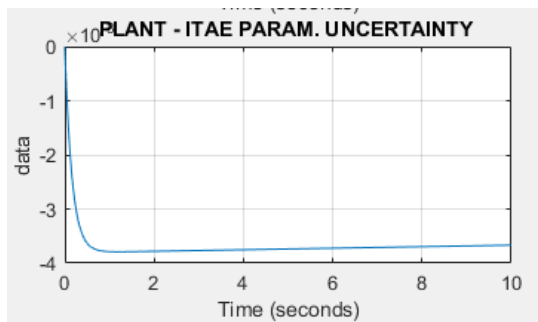


Fig. 22. Resultado simulación bajo control II ITAE con incerteza paramétrica

3) *Planta bajo control con perturbaciones de entrada y salida:* Se muestra la simulación de la planta bajo control por medio de ITAE, bajo perturbaciones de entrada y salida, los valores de configuración fueron expresados anteriormente y se muestra a continuación la implementación

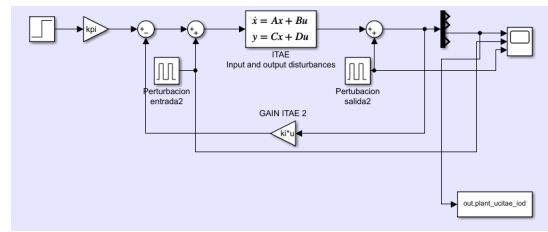


Fig. 23. Simulación en Simulink bajo control II ITAE con perturbaciones de entrada y salida.

Se observa a continuación la gráfica de esta planta con el bloque "To Workspace" implementado.

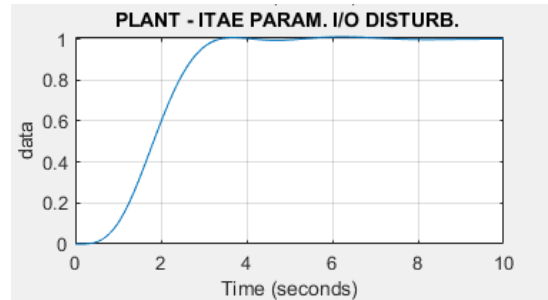


Fig. 24. Resultado simulación bajo control II ITAE con perturbaciones de entrada y salida.

4) *Planta bajo control, eliminación de error estático y observador:* Simulación bajo error estático y observador.

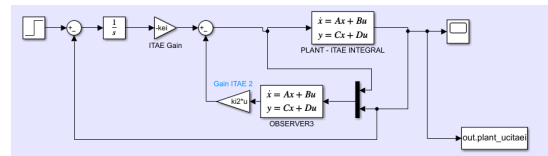


Fig. 25. Simulación en Simulink bajo control II ITAE con eliminación de error estático y observador

Se observa a continuación la gráfica de esta planta con el bloque "To Workspace" implementado.

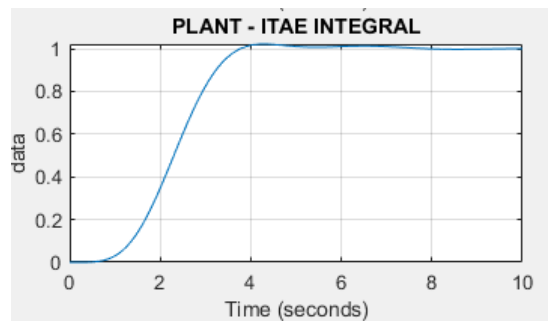


Fig. 26. Resultado simulación bajo control II ITAE con eliminación de error estático y observador

5) *Planta bajo control con perturbaciones de entrada y salida, eliminación de error estático y observador:* Simulación

bajo error estático y observador con perturbaciones de entrada y salida.

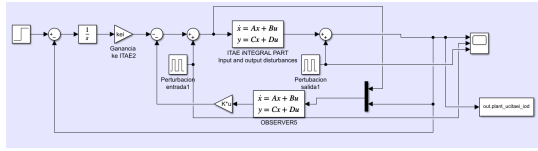


Fig. 27. Simulación en Simulink bajo control II ITAE con perturbaciones de entrada y salida, eliminación de error estático y observador

Se observa a continuación la gráfica de esta planta con el bloque "To Workspace" implementado.

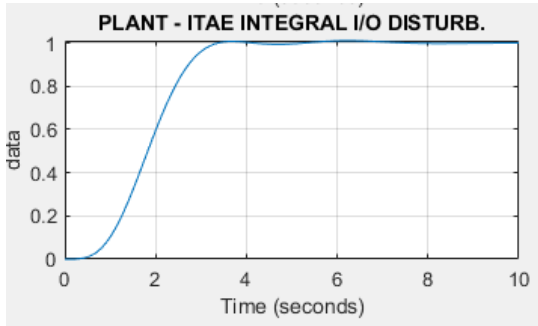


Fig. 28. Resultado simulación bajo control II ITAE con perturbaciones de entrada y salida, eliminación de error estático y observador

6) *Planta bajo control con incerteza paramétrica, eliminación de error estático y observador:* Simulación bajo error estático y observador con incerteza paramétrica.

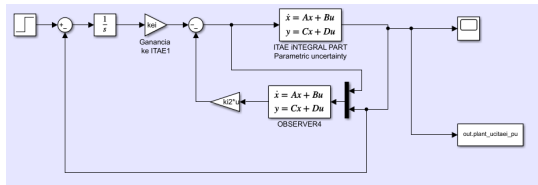


Fig. 29. Simulación en Simulink bajo control II ITAE con incerteza paramétrica, eliminación de error estático y observador

Se observa a continuación la gráfica de esta planta con el bloque "To Workspace" implementado.

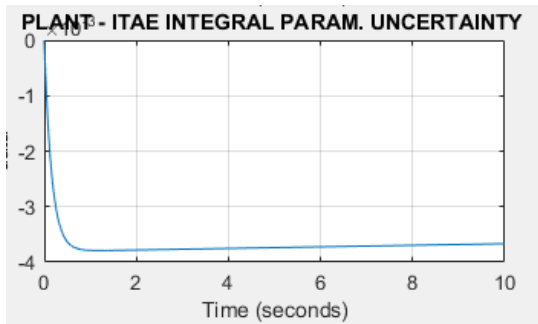


Fig. 30. Resultado simulación bajo control II ITAE con incerteza paramétrica, eliminación de error estático y observador

VI. METRICS

Se definieron ciertos requerimientos en la sección de objetivos como ser overshoot o rise time bajo un cierto porcentaje o valor. En la siguiente imagen se puede observar los valores obtenidos de la simulación en simulink y fueron recopilados a la siguiente tabla 1.

Como se puede observar en la tabla 1, la planta con error integral se estabiliza según las gráficas y lo hace bajo los requerimientos especificados. Se tienen 6 integraciones bajo error integral, 5 de estas cumplen los parámetros requeridos. La planta "POLE PLACEMENT INTEGRAL PARAM. UNCERTAINTY" no logra estabilizar dado que la frecuencia natural y el valor de incerteza paramétrica amplifica la ganancia de establecida para el método Pole Placement, se observa un resultado parecido para el mismo método sin integración del error integral, es decir, 3 filas mas arriba de la indicada.

Control Type	RiseTime	SettlingTime	OverShoot
'Plant'	5.74	9.91	0.00
'POLE PLACEMENT'	1.72	5.14	5.92
'POLE PLACEMENT PARAM. UNCERTAINTY'	5.04	8.77	0.00
'POLE PLACEMENT I/O DISTURB.'	1.65	4.58	2.07
'POLE PLACEMENT INTEGRAL'	1.73	5.26	5.88
'POLE PLACEMENT INTEGRAL PARAM. UNCERTAINTY'	3.05	9.79	22.14
'POLE PLACEMENT INTEGRAL I/O DISTURB.'	1.69	5.22	6.03
'ITAE'	1.67	3.00	1.92
'ITAE PARAM. UNCERTAINTY'	0.31	4.80	3.35
'ITAE I/O DISTURB.'	1.73	3.14	1.08
'ITAE INTEGRAL'	1.87	4.43	2.09
'ITAE INTEGRAL PARAM. UNCERTAINTY'	0.31	4.80	3.35
'ITAE INTEGRAL I/O DISTURB.'	1.73	3.14	1.08

TABLE I
CLASSIFICATION REPORT FOR TEST-SET

Los otros valores encontrados muestran que la planta no estabiliza o no cumple los requerimientos propuestos dado que presentan error estático en la planta y este no permite una correcta estabilización.

VII. CONCLUSIONES

Se cumplió con el objetivo general el cual es desarrollar técnicas de control adecuadas para el control del sistema. A la vez se cumplió con los objetivos específicos del proyecto, cumplir con los requerimientos de diseño de la planta. Como se puede observar en la Tabla 1 las plantas con un control de tipo integral se encuentran bajo los valores establecidos. Como fue mencionado anteriormente se tienen 6 de estas implementaciones. Las demás implementaciones si bien estabilizan, no cumplen los objetivos específicos. Ya que esta planta presenta un alto ruido y no permite una estabilización y tiempo de subida bajo los parámetros requeridos.

Dentro de las implementaciones con un control integral, la implementación bajo el método I no permite alcanzar los valores requeridos con la frecuencia natural establecida y el valor de incerteza paramétrica establecido. Si estos se modifican entonces los demás sistemas varían y dejan de controlar bajo lo requerido. Es así, que este sistema, incerteza paramétrica con eliminación de error estático y observador, pudo ser controlado bajo un rango de tiempo ligeramente superior.

Trabajo a futuro: Como se observa en la tabla 1 el la gráfica "POLE PLACEMENT INTEGRAL PARAM. UNCERTAINTY", pudo ser controlado en un rango de tiempo

superior, la mejora del sistema se puede hacer con una implementación en rango de tiempo menor, para ello se debe hacer un ajuste a la técnica de control y cambiar el valor de la frecuencia natural para obtener el control del sistema. Además, se recomienda trabajar con otras técnicas de control como ser LQR o fuzzy logic con las cuales se puede obtener desempeños que cumplan con los parámetros de control.