

Control por observador de estados para actuadores elásticos series robóticos

State observer control for robotic series elastic actuators

MSc. Frank Nixon Giraldo Ramos ¹

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Grupo de Investigación DIGITI Ingeniería en Control y Automatización, Facultad Tecnológica, Bogotá, Colombia.

Correspondencia: fngiraldor@udistrital.edu.co

Recibido: 21 enero 2025. Aceptado: 30 mayo 2025. Publicado: 01 julio 2025.

Cómo citar: F. N. Giraldo Ramos, «Control por observador de estados para actuadores elásticos series robóticos», RCTA, vol. 2, n.º 46, pp. 32–39, jul. 2025.

Recuperado de <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/3801>

Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.



Resumen: Este artículo presenta los resultados obtenidos mediante la estrategia de control basada en observador de estado para un actuador elástico en serie (SEA) para cualquier extremidad robótica, con el propósito de evaluar la respuesta a la perturbación respecto a un controlador PID convencional. Mediante la implementación de un script en Matlab® el objetivo fue evaluar un controlador por observador de estado para el modelo de espacio de estados de un actuador elástico serie, en comparación con un controlador PID convencional, verificando el comportamiento de cada uno frente a la presencia de perturbaciones. Se pudieron comprobar las ventajas de la estrategia de control por observador de estado respecto al controlador PID convencional. El observador de estado asegura que el actuador elástico serie no se vea afectado por perturbaciones, presentando mejor desempeño que el PID convencional. La simulación en Matlab® del modelo dinámico en espacio de estados del actuador elástico en serie y su control por un observador de estado, mejora la respuesta dinámica en escenarios con perturbaciones y elimina su efecto sobre el proceso en estado estacionario.

Palabras clave: observadores de estado, actuador elástico serie, control de rechazo de perturbaciones.

Abstract: This implementation shows the results through a control state observer strategy for a series elastic actuator (SEA) of motorized robotic limbs, with the purpose of evaluate the disturbance response with regard to convetional PID controller. By implementing a Matlab® script, the goal was to evaluate the state observer controller for a series elastic actuator space state dynamic model in comparison with a conventional PID controller, verifying the behavior of each by adding disturbances. The advantages of the state observer control strategy with respect to the conventional PID controller could be verified. The state observer ensures that the series elastic actuator is not affected by disturbances, presenting better performance than the PID in SEA control. The Matlab® simulation of the state space dynamic model of the series elastic actuator and its control by a state observer, shows the advantage that it offers in its dynamic response in scenarios with disturbances and eliminates its effect on the process in steady state.

Keywords: state observers, series elastic actuator, disturbance rejection control.

1. INTRODUCCIÓN

La intención de esta investigación se orienta a la exploración de soluciones alternativas que proporcionen estrategias de control para mejorar el desempeño de los mecanismos robóticos actuadores. Este trabajo se fundamenta en los modelos de sistemas dinámicos de los actuadores, con el propósito de garantizar un mejor rendimiento del actuador y una mayor robustez frente a perturbaciones, de modo que se logre alcanzar un movimiento robótico de mayor naturalidad y maniobrabilidad.

Uno de los componentes fundamentales en el ámbito de la robótica es el actuador, ya que es el encargado de suministrar la potencia y movimiento necesario para ejecutar desplazamientos de manera natural. El actuador elástico en serie (SEA, por sus siglas en inglés) constituye una tecnología emergente que ha demostrado ser prometedora para su aplicación en robótica. Este tipo de actuador emplea elementos elásticos que imitan la función de los músculos humanos, lo que permite una mejor respuesta dinámica y una mayor eficiencia energética en miembros robóticos [1].

En cuanto a los sistemas de control aplicados a los mecanismos de actuación robótica, particularmente en el caso de los SEA, se han utilizado diversas estrategias dentro del marco del control clásico o convencional (PID), mediante el método de control de impedancia mecánica, aplicado en los componentes móviles de los robots. No obstante, se pretenden explorar otras estrategias de control con miras a identificar posibles mejoras en el rendimiento y la respuesta ante perturbaciones, especialmente en aplicaciones de actuadores elásticos en miembros robóticos motorizados [2].

1.1. Actuador Elástico Serie

La función de los actuadores es generar la fuerza requerida para mover un dispositivo mecánico. Esta fuerza generada puede provenir de tres fuentes: neumática, hidráulica y eléctrica. El tipo de fuente caracteriza el tipo de actuador y corresponde a la fuerza que genera la acción [3].

1.2. Impedancia de Salida

La impedancia mecánica de salida es la fuerza mínima F que generada por el actuador para lograr el movimiento X en la carga [4]. En teoría, debería ser cero. Está relacionada con la rigidez de salida del

actuador. Tiene la siguiente función de transferencia:

$$Z(s) = \frac{F(s)}{X(s)} \quad (1)$$

1.3. Control de Impedancia

El objetivo de un sistema de control es alcanzar el setpoint deseado en un proceso. El controlador modifica los parámetros del sistema (actuador) para que los estados de la señal se mantengan en el rango requerido ante cualquier variación o perturbación [5].

Para actuadores elásticos, se recomienda el control por impedancia mecánica, utilizado para controlar el mecanismo SEA en el diseño y desarrollo de extremidades robóticas motorizadas, se han implementado convencionalmente controladores de tipo proporcional, integral y derivativo (PID) [6].

La señal de error de posición es recibida por un controlador de impedancia, que calcula el par de referencia necesario para corregir este error. A continuación, se controla el par y, finalmente, la velocidad. Este método se ha utilizado para controlar diferentes tipos de actuadores con dispositivos actuadores elásticos flexibles y activos. Se logra un movimiento adecuado durante el movimiento de la extremidad robótica [7], [8].

"El SEA es idealmente una fuente de fuerza con impedancia de salida mecánica cero; por esta razón, la dinámica del actuador estaría completamente desacoplada de la carga". Sin embargo, el actuador es un sistema real con un cierto valor de impedancia de salida. "El modelo de impedancia de salida es equivalente a una masa física con fricción mecánica, en serie con un resorte, impulsada por el movimiento de la carga." [7], [10].

2. METODOLOGÍA

La construcción mecánica del SEA incluye un elemento de tipo resorte elástico entre el motorreductor y la carga, que permite desacoplar la carga de las inercias y fricciones no lineales del motor y transmisión, el cual aísla el motor y la transmisión de impactos y choques externos [11], [12].

Los SEA tienen ventajas sobre los actuadores convencionales rígidos en el diseño de aplicaciones de extremidades robóticas motorizadas, ya que tienen alta capacidad de control y fuerza/torque,

baja impedancia de salida mecánica y tolerancia a golpes y perturbaciones [13], [14].

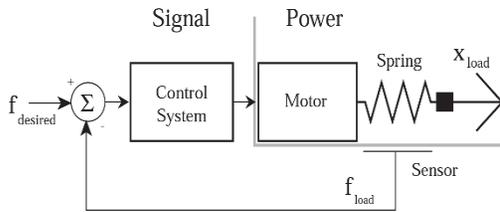


Fig. 1. Componentes SEA.
Fuente: tomado de la referencia [7].

La figura 1 muestra los componentes del SEA separados por potencia y dominio de señal [7], [15]. Los elementos principales son:

- Controlador PID
- Motor sin escobillas de CC
- Elemento elástico (resorte)
- Sensor

Se identifican tres componentes principales: motor sin escobillas, transmisión y resorte, que corresponden a un modelo de sistema mecánico de segundo orden: masa, resorte y amortiguador [16].

2.1. Motor Brushless del Actuador SEA

El motor sin escobillas es el elemento que proporciona energía al SEA. Su modelo puede desarrollarse en dos partes: un modelo eléctrico y un modelo mecánico, como se ilustra en la figura 2. En la parte eléctrica, presenta una resistencia de armadura R_a , una inductancia de armadura L_a y una fuerza contraelectromotriz V_b . En la parte mecánica, una fricción constante f y una inercia J [9].

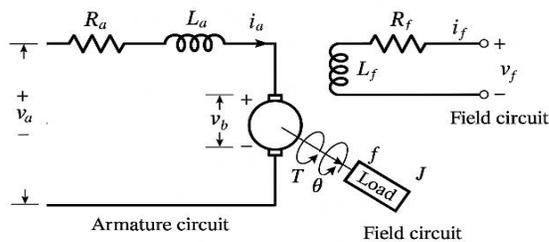


Fig. 2. Motor Brushless.
Fuente: elaboración propia de [9].

2.2. Modelo Eléctrico del Motor Brushless

En un motor brushless, el torque τ se relaciona con la corriente de armadura i_a :

$$\tau = K_\tau i_a(t) \quad (2)$$

El voltaje contraelectromotriz del motor sin escobillas $v_b(t)$ se relaciona con la velocidad angular como:

$$v_b(t) = K_b \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

Aplicando la Ley de Voltaje de Kirchhoff al circuito eléctrico del motor:

$$R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + v_b(t) = v_a(t) \quad (4)$$

Reemplazando $v_b(t)$:

$$R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + K_b \frac{d\theta}{dt} = v_a(t) \quad (5)$$

Aplicando transformada de Laplace a la ecuación que modela el sistema eléctrico del motor brushless:

$$R_a i_a(s) + L_a S i_a(s) + K_b S \theta(s) = v_a(s) \quad (6)$$

2.3. Modelo Mecánico Motor Brushless

Corresponde al sistema mecánico rotacional del motor constituido por una inercia J_m y fricción K_f :

$$\tau(t) = J_m \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + K_f \frac{d\theta}{dt} \quad (7)$$

Reemplazando la ecuación equivalente del torque del motor $\tau = K_\tau i_a(t)$:

$$K_\tau i_a(t) = J_m \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + K_f \frac{d\theta}{dt} \quad (8)$$

Aplicando transformada de Laplace:

$$K_\tau i_a(s) = J_m S^2 \theta(s) + K_f S \theta(s) \quad (10)$$

Resolviendo para $i_a(s)$:

$$i_a(s) = \frac{J_m S^2 \theta(s) + K_f S \theta(s)}{K_\tau} \quad (11)$$

2.4. Modelo Completo del Motor Brushless

Tomando la última ecuación y reemplazando:

$$(R_a + L_a S) i_a(s) + K_b S \theta(s) = v_a(s) \quad (12)$$

$$(R_a + L_a S) \left[\frac{J_m S^2 \theta(s) + K_f S \theta(s)}{K_\tau} \right] + K_b S \theta(s) = v_a(s) \quad (13)$$

Tomando el factor común y sumando términos:

$$\left[\frac{S(R_a + L_a S)(J_m S + K_f) + K_\tau K_b S}{K_\tau} \right] \theta(s) = v_a(s) \quad (14)$$

La función de transferencia del sistema para posición:

$$\frac{\theta(s)}{v_a(s)} = \frac{K_\tau}{S[(R_a + L_a S)(J_m S + K_f) + K_\tau K_b]} \quad (15)$$

Para obtener la función de transferencia del motor sin escobillas para la velocidad angular, se cancela el término integral 1/s:

$$\frac{\omega(s)}{v_a(s)} = \frac{K_\tau}{(R_a + L_a S)(J_m S + K_f) + K_\tau K_b} \quad (16)$$

Donde J_m es el momento de inercia del motor sin escobillas [kg·m²], K_f es la constante de amortiguamiento del sistema mecánico o coeficiente de fricción viscosa del motor brushless [N·m·s], K_τ es la constante de par del motor brushless [N·m/A], K_b es la constante de fuerza electromotriz [V/rad/s}, R_a es la resistencia de la bobina de la armadura [Ω] y L_a es la inductancia de la bobina de la armadura [H].

2.5. Modelo Completo SEA

A partir de la función de transferencia del sistema para posición y dado que la inductancia tiene valores despreciables comparada con las demás constantes, se asume que $L_a = 0$, por lo que el modelo se simplifica:

$$\frac{\theta(s)}{v_a(s)} = \frac{K_\tau}{S[(J_m R_a S + K_f R_a) + K_\tau K_b]} = \frac{K_m}{S(\tau_m S + 1)} \quad (17)$$

Donde las constantes del motor son:

$$K_m = \frac{K_\tau}{K_\tau K_b + K_f R_a} \quad (18)$$

$$\tau_m = \frac{J_m R_a}{K_\tau K_b + K_f R_a} \quad (19)$$

Ahora se incluye el efecto del modelo de transmisión y carga equivalente:

$$K_m = \frac{K_\tau}{K_\tau K_b + f_e R_a} \quad (20)$$

$$\tau_m = \frac{J_e R_a}{K_\tau K_b + f_e R_a} \quad (21)$$

En donde:

$$J_e = J_m + J_L \left(\frac{n \cdot p}{2\pi} \right)^2 \quad (22)$$

$$f_e = K_f + f_L \left(\frac{n \cdot p}{2\pi} \right)^2 \quad (23)$$

Donde $n = N_1/N_2$ es la relación de transmisión. El término $n \cdot p/2\pi$ corresponde a la conversión del desplazamiento lineal de la extremidad robótica motorizada en la rotación alrededor del eje del motor generada por la transmisión, y $(n \cdot p/2\pi)^2$ son las componentes de inercia y fricción viscosa del dispositivo que actúa sobre la carga, reflejadas en el eje del motor.

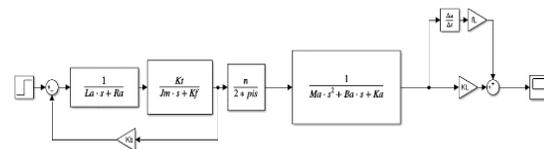


Fig. 3. Diagrama de Bloques Modelo SEA completo.
 Fuente: Elaboración Propia.

2.6. Parámetros del Modelo

A partir de la literatura, se obtuvieron los valores de los parámetros del modelo [7]. La constante de rigidez del resorte es el parámetro que caracteriza al actuador y define su dinámica. Los valores se ilustran en la tabla 1, junto con información tomada sobre los mecanismos de motor y transmisión, fichas técnicas de los fabricantes, etc.

Table 1: Parámetros Modelo SEA

Parámetro	Valor	Unidades
Momento de Inercia Rotor (J_m)	0.01	kg · m ²
Constante de Torque Motor (K_τ)	0.01	N · m/A
Constante fricción Viscosa Motor (K_f)	0.1	N · s/m
Constante f.e.m. (K_b)	0.01	v · s/rad
Resistencia Eléctrica (R_a)	1	Ω
Inductancia Eléctrica (L_a)	0.2	H
Constante de Inercia Carga (J_L)	0.1	kg · m ²
Constante de Fricción Carga (f_L)	0.1	N · s/m
Constante de Rigidez Carga (K_L)	0.8	N/m
Masa SEA (M_a)	2	Kg
Constante de Fricción SEA (B_a)	0.1	N · s/m
Constante de rigidez SEA (K_a)	0.8	N/m
Paso Engranaje de Bolas (p)	0.005	M
Razón de Transmisión (n)	0.001	-

Source: Elaboración Propia.

La Figura 4 muestra la representación del diagrama de bloques del actuador, incluyendo el modelo del motor, el modelo de la parte mecánica del SEA y el modelo de los efectos de la carga. Al simplificar y sustituir los valores constantes, se obtiene el modelo final de la Figura 4. Para el modelo de motor sin escobillas con carga:

$$G(s) = \frac{0.099}{0.099s^2 + s} \quad (24)$$

Para el modelo mecánico del actuador SEA:

$$G(s) = \frac{1}{2s^2 + 0.1s + 0.8} \quad (25)$$

Para el modelo de efecto de carga:

$$G(s) = 0.1s + 0.8 \quad (26)$$

Finalmente se obtiene la función de transferencia total con los parámetros del modelo SEA, considerando cada uno de sus componentes para posteriormente aplicar el control de impedancia:

$$G(s) = \frac{F(s)}{X(s)} = \frac{0.0099s + 0.079}{0.1998s^4 + 2.01s^3 + 0.1799s^2 + 0.8s} \quad (27)$$

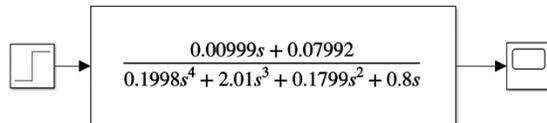


Fig. 4. Modelo Final SEA con Parámetros.
 Fuente: Elaboración Propia.

2.7. Representación Espacio de Estados del SEA

La representación formal de la ecuación de estado se muestra en la figura 5.

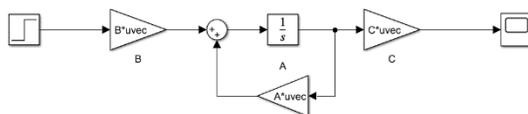


Fig. 5. Representación formal de espacio de estado.
 Fuente: Elaboración Propia.

Lo que corresponde a la representación matricial:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (28)$$

$$Y = CX \quad (29)$$

Tomando como punto de partida la función de transferencia de la ecuación del sistema:

$$0.19S^4y(s) + 2.01S^3y(s) + 0.17S^2y(s) + 0.8Sy(s) = 0.0099Su(s) + 0.079u(s) \quad (30)$$

Las ecuaciones diferenciales definida en términos de Laplace:

$$S^4y(s) + 10.1S^3y(s) + 0.85S^2y(s) + 4.02Sy(s) = 0.049Su(s) + 0.039u(s) \quad (31)$$

Tomando la transformada inversa de Laplace con condiciones iniciales cero:

$$y^{(4)} + 10.1\ddot{y} + 0.85\ddot{y} + 4.02\dot{y} = 0.049\dot{u} + 0.039u \quad (32)$$

El cambio de variable en los estados del sistema se realiza:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ \dot{x}_3 &= x_4 + 0.049u \\ \dot{x}_4 &= -4.02x_2 - 0.85x_3 - 10.1x_4 - 0.1u \end{aligned} \quad (33)$$

Finalmente, se obtiene la representación de espacio de estados del SEA:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -4.02 & -0.85 & -10.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.049 \\ -0.1 \end{bmatrix} u$$

$$y = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (35)$$

La Figura 6 muestra la representación de espacio de estados basada en las ecuaciones del sistema. La representación formal de espacio de estado, se basa en la ecuación 35, donde se obtienen las matrices A, B y C.

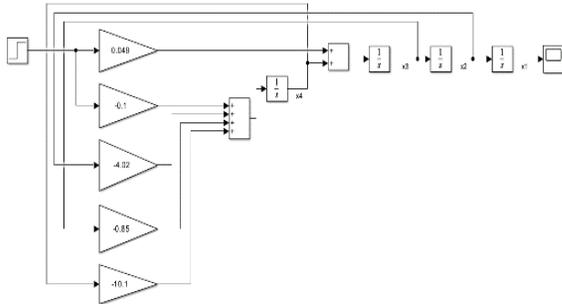


Fig. 6. Modelo SEA por representación de espacio de estados.
 Fuente: Elaboración Propia.

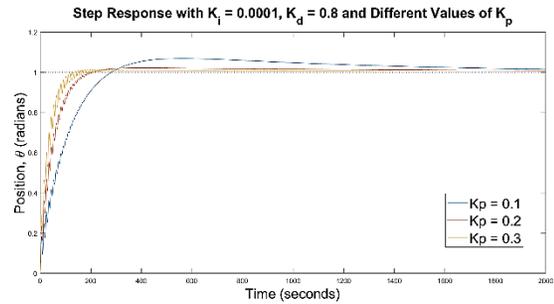


Fig. 8. Sintonización PID SEA.
 Fuente: Elaboración Propia.

3. DISCUSIÓN

3.1. Controlador PID del SEA

El control PID del SEA se simula con una entrada de tipo escalón y se grafica la posición del actuador en función del tiempo, así como los valores de la variable de estado en el controlador PID. Los parámetros del sistema y la función de transferencia se definen de la misma manera que en el código del anexo. A continuación, el controlador PID se define utilizando la herramienta Sisotool de Matlab®.

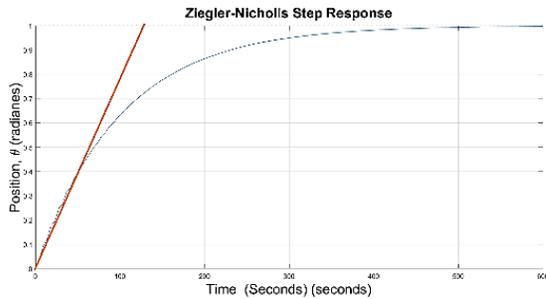


Fig. 7. Curva de reacción PID SEA.
 Fuente: Elaboración Propia.

En este caso, dada la dinámica del sistema SEA, se utilizó el primer método de Ziegler-Nicholls o la curva de reacción según la figura 7. De la curva se obtiene aproximadamente que $L = 5$ con $T = 120$ y $K = 1$, y la respuesta del control según la figura 8.

$$a = \frac{KL}{T} = \frac{5}{120} \quad (36)$$

Tiempo Integral:

$$T_i = 2L = 10 \quad (37)$$

Tiempo Derivativo:

$$T_D = \frac{L}{2} = \frac{5}{2} \quad (38)$$

3.2. Ubicación de Polos y Realimentación de Estado

El algoritmo de ubicación de polos mediante retroalimentación de variables de estado se implementa en Matlab®, para controlar el modelo. La ubicación de los polos se define arbitrariamente en una región a la izquierda del plano-S, lo que garantiza un diseño con bajo sobreimpulso y estabilidad. Con dos polos conjugados de valor $s \pm 2 \pm 0,5i$, se calcula la ganancia. El error de ganancia en estado estacionario en lazo cerrado se corrige con el algoritmo N^- , verificando la respuesta final del controlador, obteniendo la respuesta del controlador con bajo sobreimpulso y una respuesta de estabilización óptima, como se muestra en la figura 9.

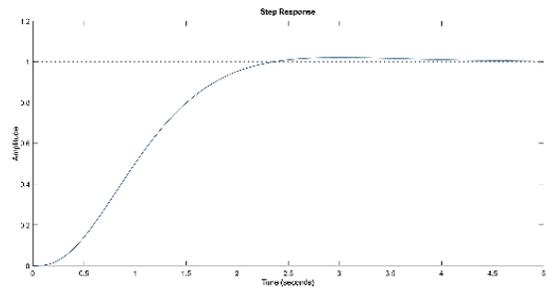


Fig. 9. Respuesta Control RVE por ubicación de polos.
 Fuente: Elaboración Propia.

3.3. Resultados del Observador de Estados

El observador de estado se implementa en Matlab® junto con la ganancia de control calculada por el algoritmo de retroalimentación de variables de estado. Se verifica la observabilidad del modelo y la respuesta del controlador. Se verifica que la estimación presenta la misma respuesta que el control de retroalimentación de las variables de estado (figura 10), lo que indica que el estimador se diseñó correctamente. Ahora se verifica el rendimiento del observador de estado y se compara con el del controlador PID convencional. Se agrega

una perturbación constante al control PID diseñado previamente (figura 10). Al observar la respuesta (figura 11), se observa que la perturbación altera el estado del valor de referencia establecido, generando una desviación permanente del valor deseado, lo cual es inaceptable en el análisis SEA.

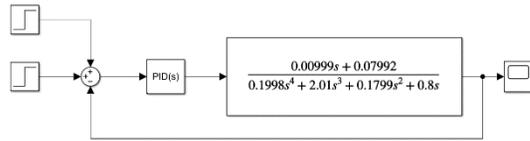


Fig. 10. PID con perturbación.
 Fuente: Elaboración Propia.

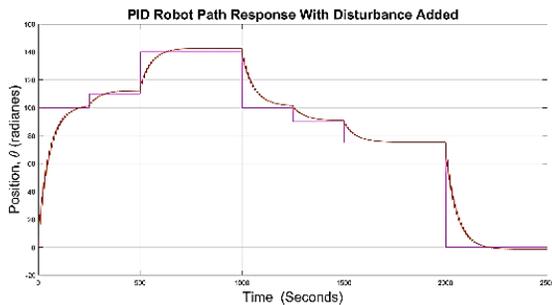


Fig. 11. Respuesta del control PID con perturbación.
 Fuente: Elaboración Propia.

Ahora se implementa el observador de estado agregando la perturbación según la lista de código del anexo, y se verifica en Simulink® según la figura 12 para obtener la respuesta de la figura 13 en donde se puede ver que, a pesar de ingresar la perturbación, el observador ajusta rápidamente la respuesta y restaura la salida del SEA al valor de setpoint ajustado originalmente.

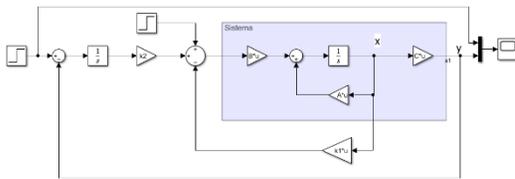


Fig. 12. Observador de Estado.
 Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos al probar las estrategias de control, es evidente que el observador de estado permite obtener una respuesta del SEA que cumple con los requisitos de diseño en cuanto a sobreimpulso máximo y tiempo de estabilización. Además, ofrece una alternativa ante perturbaciones en el sistema, reaccionando rápidamente y manteniendo la referencia original dentro de los rangos adecuados. Esto se refleja en un mejor rendimiento del actuador, con todas las ventajas en el ahorro de energía en extremidades

robóticas motorizadas. Ante la perturbación de tipo escalón, el actuador responde y se estabiliza alrededor del punto de ajuste, atenuándolo y manteniendo el error de estado estable cercano a cero.

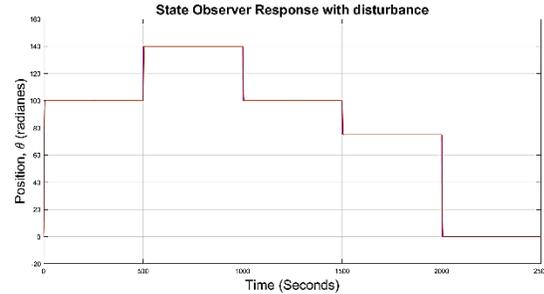


Fig. 13. Respuesta SEA Observador de Estado
 Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que un comportamiento de seguimiento de referencia del punto de referencia establecido en la estrategia de control por retroalimentación de la variable de estado [17] permite que la variable permanezca en el valor de setpoint previamente configurado. La señal de control que actúa sobre el sistema no excede los límites esperados de la fuerza del actuador según el punto de ajuste establecido y cumple con todos los objetivos propuestos para el sistema, según la implementación del código Matlab® en el anexo.

4. CONCLUSIONES

La simulación en Matlab® del modelo SEA dinámico en espacio de estados de una extremidad robótica motorizada, su control mediante un observador de estado y la retroalimentación de variables de estado como ganancia de control, muestra la ventaja que ofrece en su respuesta dinámica en escenarios con perturbaciones y elimina su efecto en el proceso en estado estacionario. Esto demuestra que esta estrategia de control es una opción viable en comparación con el control PID clásico para mejorar la respuesta del SEA.

La función de transferencia de control de impedancia del SEA facilita la definición de la dinámica del actuador, lo que ha permitido verificar diferentes tipos de controladores a partir de un controlador PID inicial, cuyos resultados se han mejorado significativamente con la implementación de un controlador mediante un observador de estado y la retroalimentación de variables de estado.

RECONOCIMIENTOS

Se da crédito a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y al grupo de investigación DIGITI por sus contribuciones.

REFERENCIAS

- [1] Toubar, H., Awad, M. I., Boushaki, M. N., Niu, Z., Khalaf, K., & Hussain, I. Design, modeling, and control of a series elastic actuator with discretely adjustable stiffness (seadas). *Mechatronics*, 86, 102863, 2022.
- [2] Zaki, Noureldeen M., et al. "Design, implementation and control of physical series elastic actuated robotic manipulator." *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 71.1_suppl: S157-S169, 2023.
- [3] Wang, Jilong, et al. "Partial-state feedback based dynamic surface motion control for series elastic actuators." *Mechanical Systems and Signal Processing* 160: 107837, 2021.
- [4] Alves, Joana, et al. "Design and dynamic modelling of an ankle-foot prosthesis for humanoid robot." 2017 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC). IEEE, 2017.
- [5] Lee, Hyunwook, and Sehoon Oh. "Series elastic actuators-driven parallel robot with wide-range impedance realization for balance assessment and training." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 27.6: 4619-4630, 2022.
- [6] Sarkisian, Sergei V., Lukas Gabert, and Tommaso Lenzi. "Series-elastic actuator with two degree-of-freedom PID control improves torque control in a powered knee exoskeleton." *Wearable Technologies* 4: e25, 2023.
- [7] Robinson, David William. Design and analysis of series elasticity in closed-loop actuator force control. Diss. Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [8] Liu, Junming, and Huijun Yu. "Active Disturbance Rejection Control of SEA Based on Reduced Order Extended State Observer." *Proceedings of the Eighth Asia International Symposium on Mechatronics*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022.
- [9] Chen, Chi-Tsong. Analog and digital control system design: transfer-function, state-space, and algebraic methods. Oxford University Press, Inc., 1995.
- [10] Liu, J., Li, Z., Lin, W., & Sun, L. Predefined Performance Torque Control for a Series Elastic Actuator Based on State Observer and Disturbance Observer. In 42nd Chinese Control Conference (CCC) (pp. 50-54). IEEE, 2023.
- [11] Liu, Yueyue, et al. "Whole body control of an autonomous mobile manipulator using series elastic actuators." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021.
- [12] Petrea, Razvan Andrei Budau, Roberto Oboe, and Giulia Michieletto. "Safe high stiffness impedance control for series elastic actuators using collocated position feedback." *IEEE Journal of Industry Applications* 12.4: 735-744, 2023.
- [13] Wang, Tianshuo, et al. "Design and control of a series-parallel elastic actuator for a weight-bearing exoskeleton robot." *Sensors* 22.3: 1055, 2022.
- [14] Mustalahti, Pauli, and Jouni Mattila. "Position-based impedance control design for a hydraulically actuated series elastic actuator." *Energies* 15.7: 2503, 2022.
- [15] Chen, Jinfeng, Yu Hu, and Zhiqiang Gao. "On practical solutions of series elastic actuator control in the context of active disturbance rejection." *Advanced Control for Applications: Engineering and Industrial Systems* 3.2: e69, 2021.
- [16] Silawatchananai, Chaiyaporn, Suppachai Howimanporn, and Piyanun Ruangurai. "Development of force compliant in series elastic actuator systems." *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* 11.6: 422-428, 2022.
- [17] Castaño G., Sergio. Control por Realimentación de Estados, Control Automático Educación . <https://controlautomaticoeducacion.com/sistemas-dinamicos-lineales/control-por-realimentacion-de-estados/>, consultado mayo 2025.