

PROPUESTA DE CONTROL DE POSICIÓN EN MODO DESLIZANTE PARA EL SISTEMA NO LINEAL UT-SEA

Sliding Mode Control Proposal for Non-Linear UT-SEA System

Gaudi Morantes Quintana^{1,2} 

Gerardo Fernández López² 

Benito Fernández Rodríguez³ 

Juan Sebastián Rincón³ 

¹Universidad Nacional Experimental del Táchira. Táchira, Venezuela.

²Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela.

³The University of Texas at Austin, Texas, USA.

Correspondencia:

Dra. Gaudi Morantes Quintana
gmorantes@unet.edu.ve

Como citar este artículo: Morantes, G., Fernández, G., Fernández, B., & Rincón, J. (2024). Propuesta de control de posición en modo deslizante para el sistema no lineal UT-SEA. *Revista de Investigación Hatun Yachay Wasi*, 3(2), 22-36. <https://doi.org/10.57107/hyw.v3i2.70>

RESUMEN

El Control en Modo Deslizante (SMC) ofrece una alternativa innovadora en el diseño de control al proporcionar mecanismos para hacer frente a incertidumbres de modelado y perturbaciones desconocidas pero acotadas, tanto dentro como fuera de un sistema. El estudio presenta una propuesta de control en modo deslizante para el sistema UT-SEA, que es un actuador de impedancia variable en modo serie y que exhibe una combinación de sistema lineal y no lineal. El trabajo se centra en el estudio del sistema mediante la aplicación de técnicas de control lineal y no lineal, así como en la obtención de los parámetros necesarios a través de simulaciones, junto con la identificación del mejor método de control que posteriormente se aplicará en el sistema UT-SEA real. Finalmente, la propuesta de SMC demuestra un desempeño robusto frente a perturbaciones, con un método simple y de fácil implementación. En las pruebas de simulación, el SMC muestra un comportamiento en estado estacionario mejorado, eliminando por completo el error.

Palabras clave: Control en Modo Deslizante (SMC), UT-SEA, actuador, perturbaciones, simulación.

ABSTRACT

Sliding mode control (SMC) offers an innovative alternative in control design by providing mechanisms to cope with unknown but bounded modeling uncertainties and disturbances, both inside and outside a system. This paper presents a sliding mode control proposal for the UT-SEA system, which is a series variable impedance actuator and exhibits a combination of linear and nonlinear system. The work focuses on the study of the system by applying linear and nonlinear control techniques, as well as obtaining the necessary parameters through simulations, along with the identification of the best control method, which is subsequently applied to the actual UT-SEA system. Finally, the proposed SMC demonstrates robust performance against disturbances with a simple and easy to implement method. In simulation tests, the SMC shows an improved steady-state behavior, completely eliminating the error.

Keywords: Sliding mode control (SMC), UT-SEA, actuator, disturbances, simulation.



INTRODUCCIÓN

La aplicación práctica de técnicas de control en sistemas reales no lineales tiene que ser robusta frente a incertidumbres de modelado y perturbaciones desconocidas pero acotadas (en escala y frecuencia) dentro y fuera del sistema. El control en modo deslizante (SMC) ofrece una alternativa en el diseño de control que proporciona mecanismos para responder a este problema consolidándose como una técnica prometedora y una herramienta eficaz para mejorar la precisión en aplicaciones complejas (Wu et al., 2022).

Uno de los primeros estudios sobre modos deslizantes multivariables fue realizado por Fernández (1988), quien aplicó conceptos de control lineal a sistemas no lineales utilizando operadores de Lie. En su trabajo titulado "Control de Sistemas No Lineales Multivariables mediante el Método de Modo Deslizante", Fernández Rodríguez (1988) propone el método de modos deslizantes para estructuras de sistemas multivariables; este enfoque inicial sentó las bases para el desarrollo de técnicas más avanzadas en el control de sistemas complejos.

En un análisis más reciente, Yu et al. (2020) ofrecen una visión integral del control en modo deslizante terminal (TSMC), abordando sus fundamentos teóricos, desafíos prácticos y diversos enfoques aplicables a sistemas inciertos; su estudio destaca las ventajas del TSMC, como la convergencia en tiempo finito, alta precisión y robustez en sistemas de control. Además, abordan problemas como el chattering y el diseño de observadores, y muestran cómo el TSMC se aplica eficazmente en sistemas que van desde manipuladores robóticos hasta sistemas de potencia.

Por otro lado, Beyl et al. (2009), en su estudio titulado "Diseño y Control de un Exoesqueleto de Miembro Inferior para Entrenamiento de Marcha Asistido por Robot", implementaron un controlador

de modo deslizante basado en un link virtual para un exoesqueleto de miembro inferior. Los resultados demostraron una interacción segura entre el humano y la máquina, con un rendimiento de seguimiento efectivo a pesar de las perturbaciones en la posición objetivo, este trabajo muestra la aplicabilidad del control en modo deslizante en tecnologías de asistencia.

En el artículo "Diseño y Validación de un Exoesqueleto de Cadera Basado en Actuadores Elásticos en Serie con Control de Par para Locomoción Dinámica", Kang et al. (2023) analizan la optimización y validación del diseño de un exoesqueleto robótico de cadera con control de par. El estudio resalta las ventajas de los actuadores elásticos en serie (SEA), que mejoran el rendimiento y la experiencia del usuario del exoesqueleto al reducir el esfuerzo del controlador y mejorar el seguimiento del par, especialmente durante actividades de locomoción.

Asimismo, Lee y Oh (2019) desarrollaron un método de control híbrido robusto para una pata robótica biarticular accionada por un actuador elástico en serie, con el objetivo de conseguir una dinámica de péndulo invertido cargado por muelles. Su investigación, centrada en la coordinación del actuador biarticular para lograr una marcha estable, implementa un controlador robusto utilizando un Observador de Perturbaciones (DOB) para ajustar la entrada de control y mejorar la robustez y el rendimiento del sistema.

Además, Senoue et al. (2024) exploran la integración de un actuador elástico en serie con un motor ultrasónico para el control del par en robots quirúrgicos teleoperados en su estudio "Control de Par para la Retroalimentación de Fuerza de Agarre Usando un Actuador Elástico en Serie con un Motor Ultrasónico para un Robot Quirúrgico Teleoperado". Su investigación subraya la reducción de errores de par y la mejora en la estabilidad y precisión,

esenciales para procedimientos quirúrgicos en tejidos blandos. También se profundiza en la relación entre la constante de resorte del SEA y la precisión del par.

En este sentido, el artículo de Sun et al. (2020), titulado “Enfoque de Control de Par de Salida en Tiempo Finito Continuo para Actuadores Elásticos en Serie”, presenta un enfoque de control de par de salida en tiempo finito continuo utilizando un controlador y observador de modo deslizante. El estudio muestra que este método supera a los controladores PID en cascada convencional en términos de respuesta transitoria y robustez, especialmente en el modo de control de impedancia cero, validado experimentalmente en una plataforma SEA de construcción propia.

Por su parte este trabajo se presenta una propuesta de control en modo deslizante para el sistema UT-SEA (Paine & Sentis, 2012), un actuador de impedancia variable en modo serie que combina características de sistemas lineales y no lineales. Este actuador se emplea específicamente en la articulación de la rodilla de un exoesqueleto lumbar inferior, donde la combinación de sus propiedades lineales y no lineales optimiza el desempeño del sistema, mejorando la precisión y la adaptabilidad en aplicaciones robóticas de asistencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se inicia e incluye la mejora del desempeño del sistema mediante la aplicación de técnicas de control lineal y no lineal; para ello, se delimita el problema identificando las áreas específicas del sistema que se analiza, como el comportamiento en estado estacionario y las oscilaciones; lo cual permitirá, establecer un enfoque preciso y efectivo para el análisis; por tal motivo se realizó una revisión teórica exhaustiva sobre las técnicas de control relevantes, incluyendo una investigación detallada de métodos de control lineal y no lineal, con un enfoque particular en el

control en modo deslizante y en los observadores. Además, se estudiaron sistemas similares en la literatura para identificar prácticas efectivas y parámetros críticos que puedan aplicarse al sistema en cuestión. El siguiente paso implicó el desarrollo del modelo del sistema, elaborando un modelo matemático basado en las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento del sistema, integrando tanto técnicas de control lineal como no lineal; simultáneamente, se llevó a cabo la identificación de parámetros clave del sistema, como la inercia, fricción, y constantes del resorte, utilizando simulaciones y experimentación preliminar para obtener datos precisos.

Con el modelo del sistema establecido, se procedió a la aplicación de técnicas de control. Se diseñaron e implementaron técnicas de control lineal, como el control proporcional-integral-derivativo (PID), y se ha evaluado su desempeño en simulaciones. Posteriormente, se aplicaron técnicas de control no lineal, incluyendo el control en modo deslizante y el uso de observadores, para mejorar el rendimiento del sistema y reducir errores.

Las simulaciones se configuraron para evaluar el desempeño del sistema bajo diferentes configuraciones de parámetros y técnicas de control, analizándose los resultados para determinar el error en estado estacionario, la respuesta oscilatoria y la estabilidad general del sistema. Se realiza también una comparación entre las técnicas de control lineal y no lineal para identificar cuál ofrece mejores resultados para el sistema, este proceso garantiza la precisión y efectividad de las técnicas de control aplicadas.

Modelo UT - SEA

El actuador UT-SEA, desarrollado por el Human Centered Robotics Laboratory (HCRL) de la Universidad de Texas en Austin por Paine y Sentis (2012), fue diseñado como un actuador ligero, compacto y de alta potencia. Este actuador está

compuesto por dos sistemas interrelacionados: un sistema de fuerza y un sistema de posición, se puede apreciar que el sistema de fuerza, queda representado por el actuador elástico en serie con detección de la fuerza de reacción (RFSEA), ubica el resorte entre la carcasa del motor y el chasis fijo del actuador.

Control de Fuerza para UT – SEA

Debido a la configuración del actuador fue necesario realizar un control de fuerza en este sistema, para garantizar que se entregue al sistema la fuerza necesaria para obtener el seguimiento de la posición deseada. Este control se encuentra ubicado en el corazón del sistema y está constituido por un lazo cerrado donde la variable de entrada es la fuerza deseada (F_d) y la variable de salida es la fuerza entregada por el resorte (F_k). El control utilizado para esta parte del sistema consistió en un controlador PID, para el cálculo de las constantes se utilizaron en el modelo del sistema, los parámetros experimentales publicados en el trabajo (Fernández, Rincón et al, 2018) y que se muestra en la tabla 1.

Propuesta de Control en Modo Deslizante

El control en modo deslizante es un método de control avanzado basado en la linealización por retroalimentación. Su objetivo principal es diseñar una entrada $u(t)$ de forma tal que permita a la salida del sistema $y(t)$, seguir la señal de referencia $y_d(t)$ en presencia de errores de modelado y perturbaciones desconocidas e incluso en presencia de errores de modelado y perturbaciones desconocidas (Fernández Hedrick, 1987).

El primer paso es determinar el orden relativo de la salida, es decir, cuántas derivadas de la salida, $\gamma = \theta a$, hasta obtener la entrada de control, $u = \tau a$. El sistema del UT-SEA es un sistema generalizado de orden 2, $r=2$. El segundo paso es definir una superficie s , de manera tal que cumpla que $s(x)=0$, de dinámica estable y a su vez es una función diferencial lineal y estable que actúa sobre el error

$e(t)$.

El tercer paso consiste en diseñar la acción de control en modo deslizante de manera que se logre la accesibilidad a la superficie deslizante; el control debe garantizar que el movimiento del sistema se mantenga dentro de esta superficie para que sus características estáticas definan el comportamiento dinámico del sistema controlado. La ecuación que describe la condición de accesibilidad para el sistema UT-SEA se especifica en la ecuación 1, donde S_0 es el punto de equilibrio de la superficie deslizante.

$$\dot{s} = -\eta \tanh\left(\frac{s}{s_0}\right) \quad (1)$$

En el caso del control deslizante para el UT - SEA se definió una superficie deslizante con un elemento integrador en el error como se muestra en la ecuación 2, lo que representa una variación del modo de control deslizante, el cual se asemeja a la acción integradora del controlador PID tradicional. En la ecuación 3 se muestra la ecuación de superficie deslizante dependiente del error. Y, por último, la ley de control para el actuador UT-SEA es establecida como lo muestra la ecuación 4.

$$s = a_2 \dot{e} + a_1 e + a_0 \int e \quad (2)$$

$$\ddot{y} = \frac{a_2 \ddot{y}_r + a_1 \dot{e} + a_0 e - \dot{s}}{a_2} \quad (3)$$

$$u = \frac{\frac{a_2 \ddot{y}_r + a_1 \dot{e} + a_0 e - \dot{s}}{a_2} - \left(\frac{1}{J_a} [-B_a x_2 + m_a g l_m \cos(x_1 + \varphi)] \right)}{\frac{L(x_1)}{J_a}} \quad (4)$$

Este método necesita la medida de la posición y la velocidad en el sistema UT-SEA, sin embargo, el sistema real solamente cuenta con la medida de la posición, por lo tanto, es necesario diseñar un observador para obtener la medida de la velocidad. Es por ello que se propone utilizar un observador de Luenberger extendido para determinar la velocidad del sistema, obteniéndose la ecuación final del sistema como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 - \hat{x}_2 - h_1(x_1 - \hat{x}_1) \\ \frac{1}{J_a} [-B_a(x_2 - \hat{x}_2) + m_a g_l m (\cos(x_1 + \varphi) - \cos(\hat{x}_1 + \varphi)) + \dots \\ + u(t)(L(x_1) - L(\hat{x}_1)) - h_2(x_1 - \hat{x}_1)] \end{bmatrix} \quad (5)$$

implementación en matlab de la propuesta de control en modo deslizante para el sistema ut-sea

Una vez realizado el diseño teórico del control para el sistema no lineal UT - SEA, se procedió con los cálculos de las variables de diseño: K_p , T_d y T_i para el control PID de fuerza; H para el observador de Luenberger extendido; a_1 , a_0 , η y s_0 para SMC, utilizando el entorno de programación visual Matlab y Simulink de MathWorks®.

Simulación para la obtención de parámetros del observador de Luenberger, FBL y SMC.

Una vez obtenidos los valores de las ganancias PID del control de fuerza del sistema, se procedió a obtener los valores teóricos necesarios para el funcionamiento del sistema no lineal como son: el valor de la matriz H del observador de Luenberger extendido, los valores de a_0 y a_1 para FBL y los valores de η y s_0 para SMC.

En el caso del observador de Luenberger extendido, se partió del hecho que las matrices A y C del sistema

no lineal del UT - SEA son observables, se seleccionó una matriz H que ubicó los autovalores de $A_0=A-HC$ de forma tal que el sistema permaneciese estable.

Para ello se utilizó la función place de Matlab, en la cual se asignaron los polos deseados para asegurar que el sistema sea estable y se obtuvo como resultado la matriz H:

$$H = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 200 \\ 500000 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Para los controles por FBL y SMC, los cuales se caracterizan por ser robustos a las perturbaciones externas o a las fallas del modelado teórico, se le añadió al modelo no lineal una señal de perturbación a la entrada (ver ecuación 7) y otra a la salida (ver ecuación 8), con el fin de observar el comportamiento del sistema a las perturbaciones.

$$d_i(t) = 2 \cdot \arctan(x_2) \quad (7)$$

$$d_o(t) = 0.2 \quad (8)$$

Luego se calcularon las ganancias de trayectoria a_0 y a_1 del control FBL, para ello se utilizó un procedimiento similar a la entonación manual del controlador PID tradicional. Esto debido a la similitud que tiene la trayectoria de control definida en la ecuación 13, donde, la constante a_0 multiplica al error, lo que asemeja una acción proporcional, a su vez, la constante a_1 multiplica la razón de cambio del error lo que asemeja la acción derivativa del control PID tradicional.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Control FBL

En primer lugar, se realizó una prueba con valores base de los parámetros a_0 y a_1 , para observar su comportamiento de respuesta al sistema. Debido a que el método de control propuesto debe tener una trayectoria de entrada diferenciable, se evaluó el sistema para una entrada exponencial definida por un valor θ_f de referencia y un valor θ_i inicial, como se muestra en la ecuación 9, esto debido a que el sistema real posee una posición inicial del brazo con un valor θ_i .

$$\theta_d = \theta_f \cdot (1 - e^{-t}) + \theta_i \cdot e^{-t} \quad (9)$$

Control SMC

La Tabla 1 presenta los parámetros del sistema UT-SEA con una masa de 5 kg. La misma muestra valores clave que describen las características dinámicas y mecánicas del sistema. El parámetro J_a representa

la inercia del brazo del actuador, con un valor de $0.2153 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, lo que indica la resistencia del brazo a los cambios en su velocidad de rotación. La fricción del brazo, descrita por el parámetro B_a es 0.4367 , un valor adimensional que refleja la resistencia interna al movimiento. La masa del brazo, m_a es de 5.092 kg , y la distancia al centro de masa del brazo, l_m es de 0.1956 m , lo que es crucial para calcular los momentos de inercia y la distribución de fuerzas.

El ángulo offset ϕ es de 0.08 radianes, que puede influir en la alineación del sistema. La gravedad g está fijada en 9.8067 m/s^2 , que es la aceleración estándar en la superficie terrestre. Las distancias pivotaes, b y c , son 0.027 m y 0.1524 m , respectivamente, y definen la configuración geométrica del actuador en relación con el brazo. Finalmente, la constante del resorte K , que es de 242 N/mm , determina la rigidez del resorte en el actuador, afectando su capacidad para resistir deformaciones bajo carga. Estos parámetros son esenciales para modelar y controlar el sistema UT-SEA con precisión en aplicaciones robóticas.

TABLA 1

Parámetros del Sistema UT-SEA con una masa de 5 Kg

Parámetro	Descripción	Valor	Unidades
J_a	Inercia del brazo	0.2153	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
B_a	Fricción del brazo	0.4367	-
m_a	Masa del brazo	5.092	Kg
l_m	Distancia al centro de masa del brazo	0.1956	m
ϕ	Ángulo offset	0.08	rad
g	Gravedad	9.8067	m/s^2
b	Distancia pivote actuador/varilla	0.027	m
c	Distancia pivote actuador/brazo	0.1524	m
K	Constante del resorte	242	N/mm

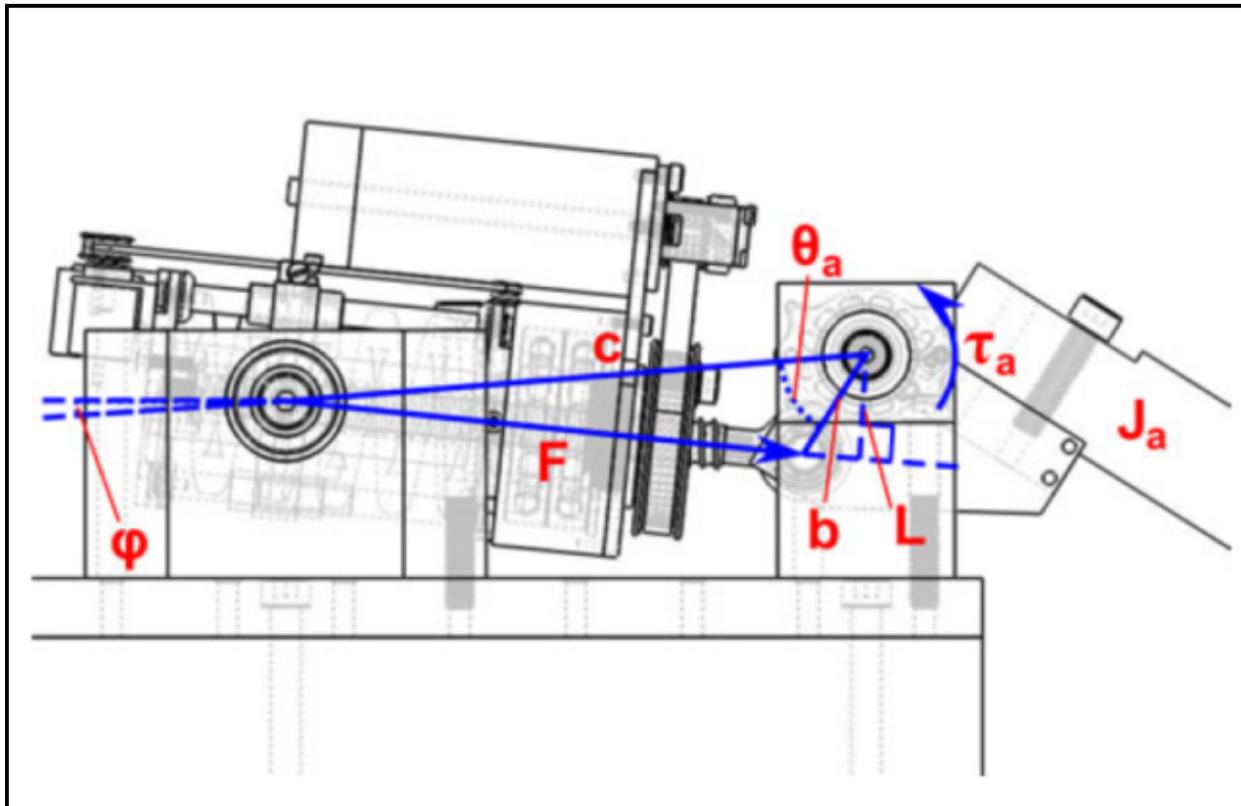
Además, la salida del sistema de fuerza se transforma mediante una relación geométrica no lineal conocida del sistema de posición del UT-SEA. Esta transformación es esencial, ya que la pierna articulada crea un momento variable en el brazo,

evidenciado en la figura

1. La dinámica acoplada entre la fuerza y la posición en el UT-SEA representa un comportamiento no lineal en la transmisión.

FIGURA 1

Geometría de UT – SEA.



Nota:

L: brazo de momento de la fuerza F.

c: distancia entre el pivote del actuador y el pivote del brazo.

b: distancia entre el pivote del brazo y la varilla de empuje.

F: Fuerza del actuador.

τ_a : torque en la salida del brazo.

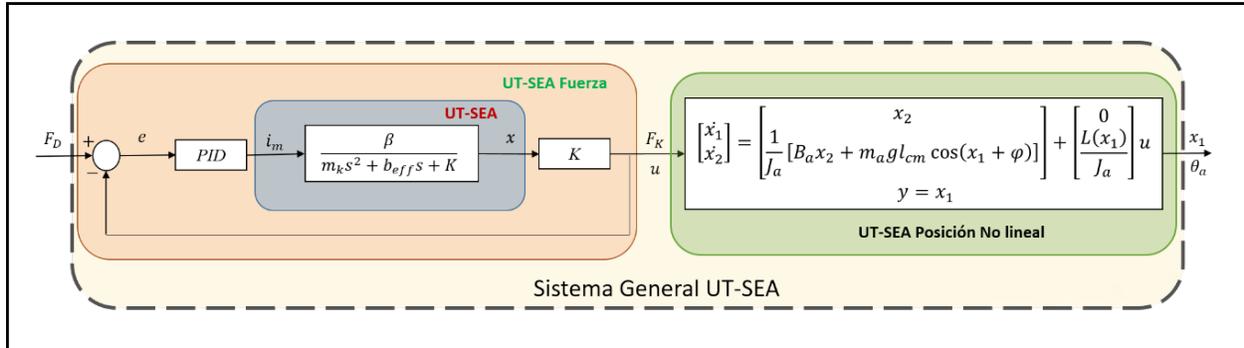
θ_a : ángulo de salida del brazo.

J_a : inercia del brazo. ϕ : ángulo offset.

Asimismo, las partes mecánicas, como las correas y el tornillo sin fin, presentan fricciones de comportamiento no lineal, complicando el modelado con métodos matemáticos tradicionales, como se ilustra en la figura 2 del diagrama general del UT-SEA.

FIGURA 2

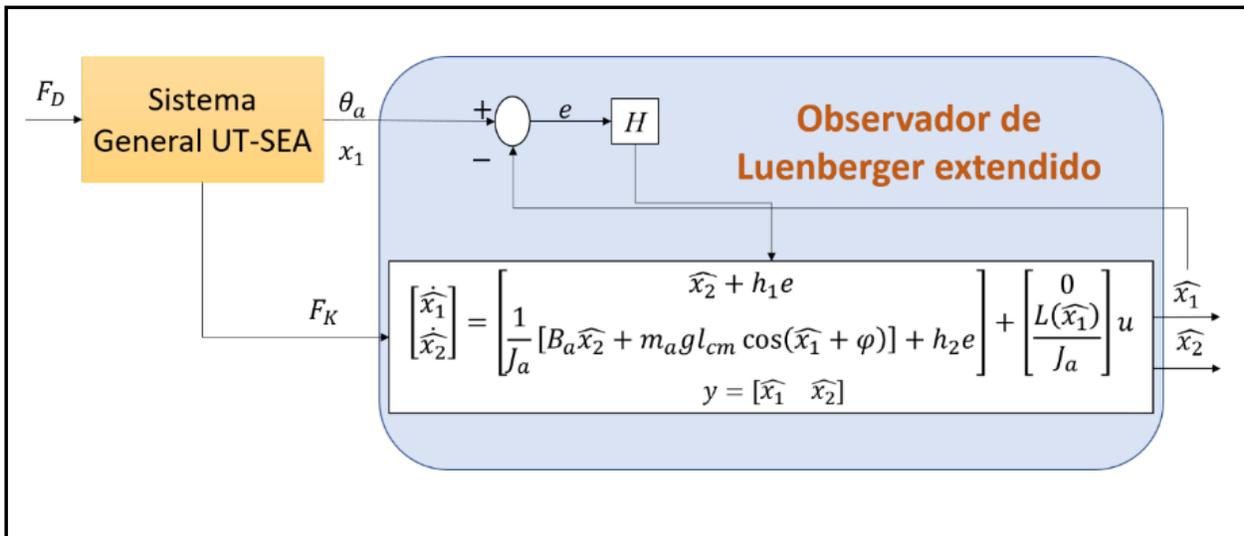
Diagrama del sistema general del UT – SEA



En el esquema detallado de la Figura 3 se ilustra la estructura del observador de Luenberger diseñado para el sistema, proporcionando una visión clara de su configuración y funcionalidad.

FIGURA 3

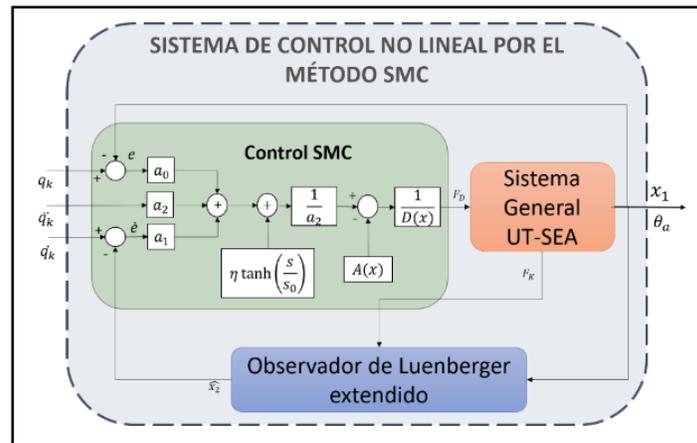
Diagrama del Observador de Luenberger del UT – SEA



Además, la Figura 4 presenta el esquema completo de todos los componentes y la arquitectura del control diseñado para mejorar el rendimiento del deslizando para el UT-SEA, mostrando la integración del actuador.

FIGURA 4

Sistema de control en modo deslizante para UT - SEA



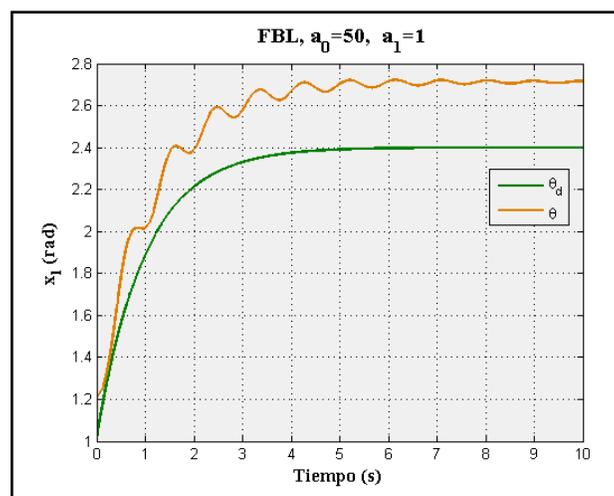
Nota: donde,
$$A(x) = \frac{1}{J_a} [-B_a x_2 + m_a g l_m \cos(x_1 + \varphi)]$$
 y
$$D(x) = \frac{L(\theta_a)}{J_a}$$

En la Figura 5 se presenta la respuesta del sistema utilizando los valores base $a_0=50$ y $a_1=1$, esta configuración muestra un error notable en estado estacionario y una respuesta oscilatoria significativa, lo que indica problemas de estabilidad y precisión. En contraste, la Figura 6 muestra los resultados

obtenidos tras el ajuste de los parámetros a_0 y a_1 . Estos ajustes mejoran considerablemente el desempeño del sistema, reduciendo tanto el error de estado estacionario como las oscilaciones, y proporcionando una respuesta más estable y precisa.

FIGURA 5

Respuesta Control de Posición FBL

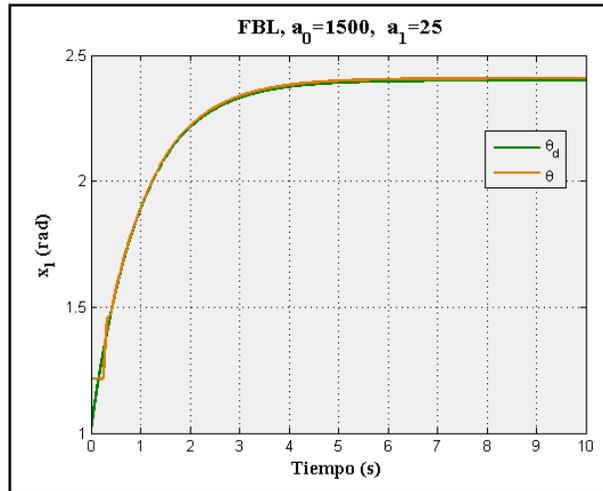


Nota: Entrada exponencial a variación de parámetros base $a_0=50$ y $a_1=1$.

Línea verde: referencia; línea naranja: salida del sistema.

FIGURA 6

Respuesta Control de Posición FBL



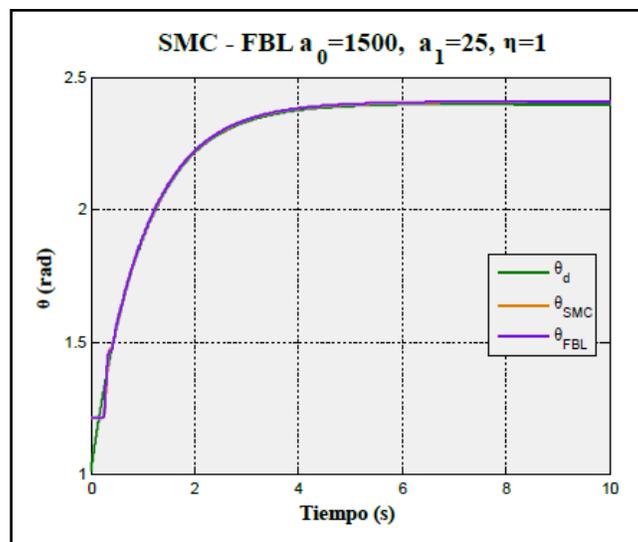
Nota: Entrada exponencial a variación de parámetros $a_0=1500$ y $a_1=25$.

Línea verde: referencia; línea naranja: salida del sistema. Para el método de control SMC propuesto se realizó un análisis del comportamiento del sistema tomando los valores de a_1 y a_0 obtenidos en el control FBL, un valor inicial de $s_0=0.1$ y de $\eta=1$ como se muestra en la figura 7, se puede observar

la similitud entre el comportamiento del control FBL y SMC, esto es debido a que ambos comparten las trayectorias de corrección de error que dependen de las constantes a_0 y a_1 , por lo tanto, la diferencia en la respuesta radica en la influencia del parámetro η y la superficie de control s para el control SMC.

FIGURA 7

Respuesta de Control SMC y FBL para trayectoria exponencial

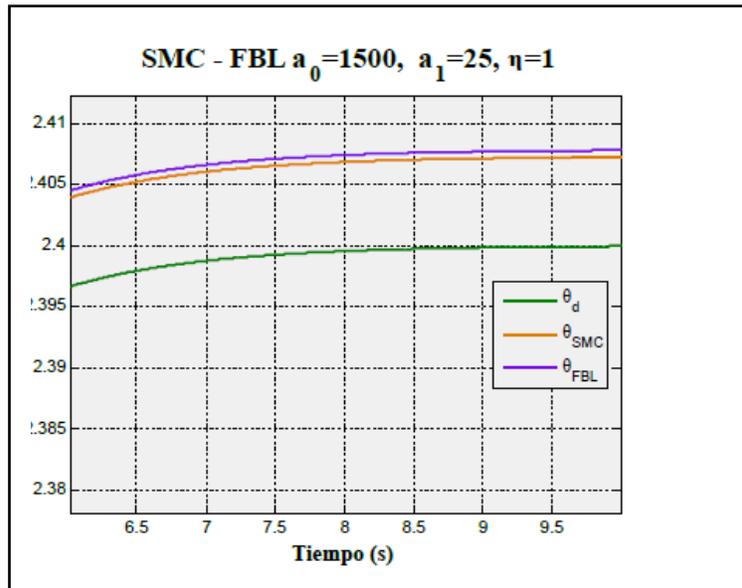


Revisando con detalle la respuesta del sistema para los valores base obtenidos de $a_0=1500$ y $a_1=25$ que se muestra en la figura 8, se observa que existe un

error de estado estacionario de 0.003 rad para FBL y 0.0025 para SMC.

FIGURA 8

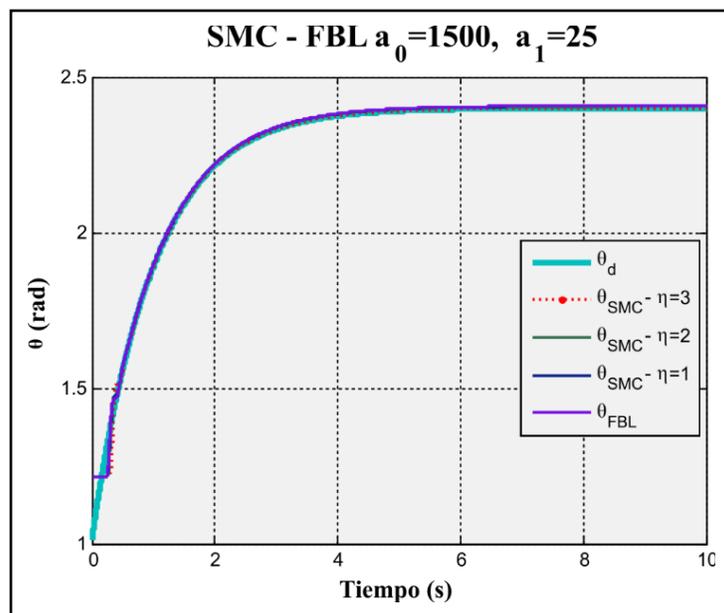
Detalle respuesta del sistema



Nota: Línea verde: referencia, línea naranja: respuesta control SMC, línea morada: respuesta control FBL

FIGURA 9

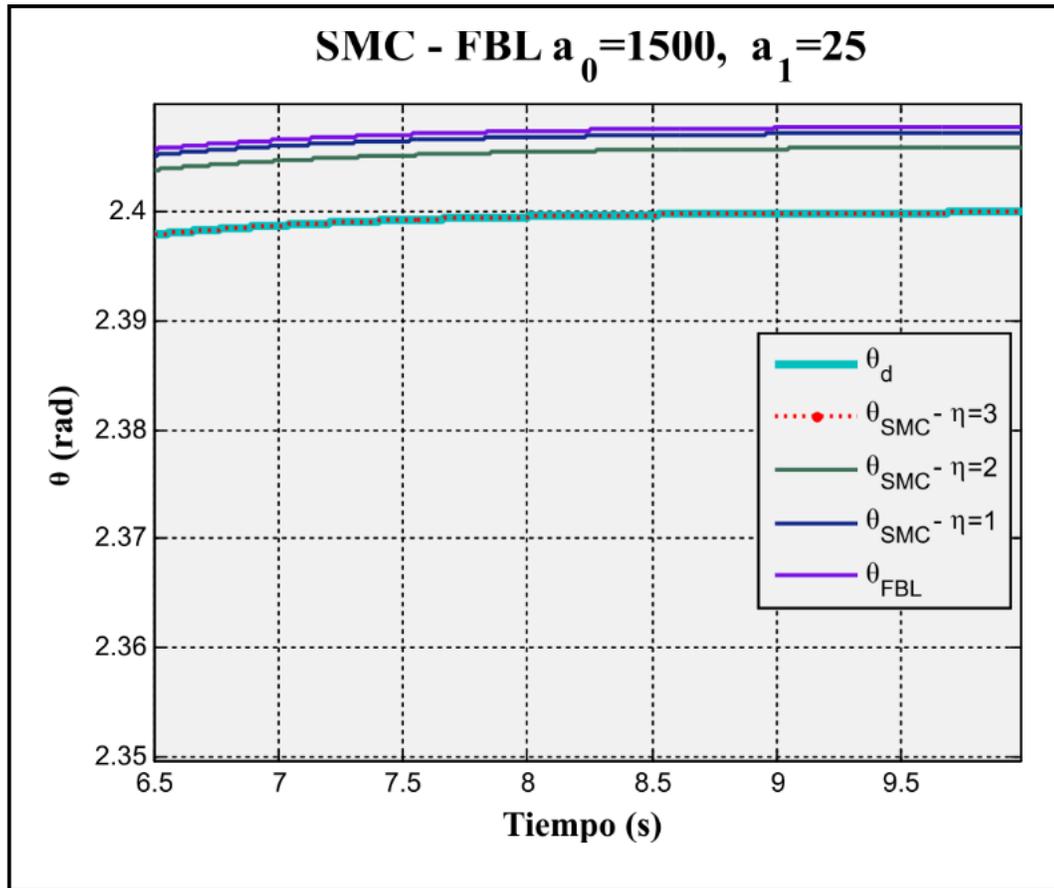
Respuesta de Control SMC y FBL para trayectoria exponencial a variación de parámetros



En la figura 9 se muestra la variación de η , aunque para este caso no se observa una mejora aparente de la respuesta, se realiza una ampliación en detalle de la respuesta en la figura 10 y se puede

observar el detalle de la variación de los valores η ; cuyo comportamiento refleja que a medida que se aumenta el valor de η se reduce el error de estado estacionario llegando a cero para un $\eta=3$.

FIGURA 10

Detalle variación de η 

Nota: Línea aguamarina: referencia, línea punteada roja: respuesta control SMC con $\eta=3$, línea verde oscuro: respuesta control SMC con $\eta=2$, línea azul: respuesta control SMC con $\eta=1$, línea morada: respuesta control SMC con $\eta=1$

Al analizar las leyes de control reflejadas en las ecuaciones 2 y 4, podemos observar que existen similitudes en la propuesta de control, como lo es la definición de la trayectoria de corrección en función del error; la diferencia fundamental radica en el control por SMC, en el cual se define es una superficie en la que se realizará el control, esta superficie viene delimitada por la superficie s y su razón de cambios. Los parámetros desconocidos para esta propuesta de control son además de a_1 y a_0 , η y s_0 .

Para la obtención de estos parámetros se realiza el mismo procedimiento que con el control FBL, con

el objeto de comparar ambos métodos. Se utilizan los parámetros a_1 y a_0 de FBL en SMC, y se proponen los valores de s_0 y η para SMC. Como se puede observar representa el valor del punto de inflexión de la curva, mientras más pequeño, más rápido el sistema se estabilizará en el valor límite η , el cual representa el borde de la superficie.

El uso de un actuador de elastómero en serie (SEA) para aplicaciones robóticas muestra un rendimiento notablemente superior en seguimiento en comparación con el uso de actuadores neumáticos, como lo indica el estudio de Beyl et al. (2009). Los resultados obtenidos al aplicar el control en modo

deslizante (SMC) al UT-SEA demuestran que una ley de control relativamente simple puede garantizar la ausencia de errores en el seguimiento de la trayectoria. Este hallazgo valida la eficacia de los actuadores SEA en robótica, tal como se señala en otros trabajos sobre el tema (Lin, Chen & Yao, 2020; Zhong et al, 2021; Kang et al. 2023).

Sin embargo, Sun et al. (2020) y Kim et al. (2021) identifican algunas desventajas del método de control en modo deslizante (SMC) en sistemas con actuadores elásticos en serie (SEA), como los efectos de vibración que pueden ser molestos durante las interacciones. A pesar de estas desventajas, los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que el control sigue la referencia sin oscilaciones ni “chattering”, gracias a la incorporación de un elemento integral en la superficie deslizante. Esta adición ha contribuido significativamente a la reducción de los efectos no deseados.

Por último, las simulaciones realizadas con el sistema de control propuesto permitieron obtener los parámetros teóricos iniciales necesarios para las pruebas experimentales, cuyos análisis comparativos y resultados serán publicados en futuros artículos; en general, la propuesta del SMC demuestra un desempeño robusto frente a perturbaciones, ofreciendo un método simple y de fácil implementación; en las pruebas de simulación, el SMC mostró un comportamiento superior en estado estacionario, eliminando el error completamente. Además, el uso del Observador de Luenberger permitió obtener la señal de velocidad del sistema sin necesidad de medición directa, siendo una consideración importante dado que el sistema real no dispone de esta medición, como se ha observado en otros trabajos científicos (Belbekri et al. 2020; Bechar et al. 2020; Jerbi et al. 2022; Gu et al. 2023).

CONCLUSIONES

La aplicación práctica de técnicas de control en sistemas no lineales reales necesita ser robusta frente a incertidumbres de modelado y perturbaciones desconocidas pero acotadas. El SMC ofrece una alternativa en el diseño de control que proporciona mecanismos para abordar esta cuestión. Por lo tanto, es un método prometedor para controlar el sistema UT-SEA debido a su rendimiento robusto frente a perturbaciones y su capacidad para hacer frente a incertidumbres de modelado y perturbaciones desconocidas pero acotadas.

La metodología implementada en Matlab para la propuesta de control en modo deslizante para el sistema UT-SEA es eficaz y podría utilizarse para sistemas similares; una vez realizadas las simulaciones teóricas se concluye que el control SMC presenta una mejor respuesta en el estado estacionario de la respuesta, eliminando completamente el error y con ausencia de chattering. Este trabajo preliminar permitió la toma de decisiones para la implementación del control en el sistema real, cuyos resultados se publicarán en el futuro próximo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento al Dr. Luis Sentis, al Dr. Benito Fernández, a Juan Rincón y a los estudiantes del The Human Centered Robotics Laboratory (HCRL) por permitirnos utilizar algunos de los equipos del laboratorio y por sus valiosos conocimientos. Gaudi Morantes recibió financiación parcial gracias a una beca Fulbright de Laspau.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bechar, M., Hazzab, A., Habbab, M., Sicard, P., & Slimi, M. (2020). RT-LAB platform for real-time implementation of Luenberger observer-based speed sensorless control of induction motor. *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 13, 65 – 72. <https://doi.org/10.1007/s12220-020-00000-0>

- org/10.14313/jamris/4-2019/39
- Belbekri, T., Bouchiba, B., Bousserhane, I., & Becheri, H. (2020). A study of sensorless vector control of IM using neural network Luenberger observer. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 11, 1259 – 1267. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i3.pp1259-1267>
- Beyl, P., Van Damme, M., Van Ham, R., Vanderborght, B., & Lefeber, D. (2009). Design and control of a lower limb exoskeleton for robot-assisted gait training. *Applied Bionics and Biomechanics*, 6(2), 229 – 243. <https://doi.org/10.1080/11762320902784393>
- Fernández, B. (2008). Control of multivariable nonlinear systems by the sliding mode method. *International Journal of Control*, 46(3), 1019 – 1040. DOI: 10.1080/00207178708547410
- Fernández, B. (2018). Parameterization of nonlinear systems using neuro bond graphs.
- Gu, D., Liu, T., Yao, Y., Ye, L., & Xu, H. (2023). Sensorless PMSM control system based on Luenberger observer. *Journal of Physics: Conference Series*, 2497, 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2497/1/012009>
- Jerbi, H., Al-Darraj, I., Tsaramirsis, G., Kchaou, M., Abbassi, R., & Alshammari, O. (2022). Fuzzy Luenberger observer design for nonlinear flexible joint robot manipulator. *Electronics*, 11(10), 1569. <https://doi.org/10.3390/electronics11101569>
- Kang, I., Peterson, R., Herrin, K., Mazumdar, A., & Young, A. (2023). Design and validation of a torque-controllable series elastic actuator-based hip exoskeleton for dynamic locomotion. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 15(2), 021007. <https://doi.org/10.1115/1.4055732>
- Kim, H., Lee, M., Cho, H., Hwang, J., & Won, J. (2021). SMC-SPO-based robust control of AUV in underwater environments including disturbances. *Applied Sciences*, 11(22), 10978. <https://doi.org/10.3390/app112210978>
- Lee, C., & Oh, S. (2019). Development, analysis, and control of series elastic actuator-driven robot leg. *Frontiers in Neurobotics*, 13, 17. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2019.00017>
- Lin, Y., Chen, Z., & Yao, B. (2020). Decoupled torque control of series elastic actuator with adaptive robust compensation of time-varying loadside dynamics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67, 5604 – 5614. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2934023>
- Paine, N., & Sentis, L. (2012). A new prismatic series elastic actuator with compact size and high performance. *2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 1759 – 1766. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2012.6491226>
- Senoue, T., Sasamura, T., Jiang, Y., & Morita, T. (2024). Torque control of grasping force feedback using a series elastic actuator with an ultrasonic motor for a teleoperated surgical robot. *Sensors and Actuators A: Physical*, 348, 115655. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.115655>
- Sun, L., Li, M., Wang, M., Yin, W., Sun, N., & Liu, J. (2020). Continuous finite-time output torque control approach for series elastic actuator. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 139, 105853. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.105853>
- Wu, L., Liu, J., Vazquez, S., & Mazumder, S. (2022). Sliding mode control in power converters and drives: A review. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 9, 392 – 406. <https://doi.org/10.1109/>

jas.2021.1004380

Yu, X., Feng, Y., & Man, Z. (2020). Terminal sliding mode control—an overview. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 2, 36 – 52. <https://doi.org/10.1109/OJIES.2020.2969471>

Zhong, H., Li, X., Gao, L., & Dong, H. (2021). Development of admittance control method with parameter self-optimization for hydraulic series elastic actuator. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 19, 2357 – 2372. <https://doi.org/10.1007/s12555-020-0465-y>