DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI

ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 14 No. Especial 3 (2026) 255-263

Diseño óptimo de un controlador FOPID para un sistema de levitación magnético
Optimal design of a FOPID controller for a magnetic levitation system

J González-Cabañas [a], A. P. Ginez-Sánchez [a,*], O. Aguilar-Mejía [a], A. Valderrábano-González [b], I. Barragán-Vite [a]

[a] *Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*
[b] *Facultad de Ingeniería, Universidad Panamericana, Álvaro del Portillo 49, Zapopan 45010, México.*

Resumen

En este estudio, se propone por primera vez utilizar el algoritmo de optimización del demonio de Tasmania (AODT) para calcular los parámetros óptimos de un controlador PID de orden fraccional (FOPID) para regular la posición de un objeto móvil dentro de un sistema de suspensión magnética. El AODT es un novedoso método de optimización metaheurística basado en población e inspirado en las diferentes formas de cómo obtener su alimento. Para validar el rendimiento del AODT los resultados se compararon con otros algoritmos, como el algoritmo de optimización del pelicano (APO) y el algoritmo de optimización del rumbo de las nubes (AORN). Para analizar el desempeño del FOPID-AODT se realizaron pruebas estadísticas y de perfil de convergencia para demostrar el éxito del algoritmo propuesto. El análisis de la eficiencia y desempeño dinámico del maglev con el controlador FOPID-AODT se realiza mediante análisis de respuesta transitoria y en estado estacionario. Los resultados mostraron que el esquema de control FOPID-AODT diseñado muestra un mejor rendimiento en comparación a los ajustados mediante los algoritmos AORN y APO.

Palabras Clave: Sistema de suspensión magnético, Control PI, Control de orden fraccionario PI, Optimización.

Abstract

This study proposes, for the first time, the use of the Tasmanian Devil Optimization Algorithm (AODT) to calculate the optimal parameters of a fractional-order PI controller (FOPID) for regulating the position of a moving object within a magnetic suspension system. The AODT is a novel population-based metaheuristic optimization method inspired by the different ways in which Tasmanian devils obtain food. To validate the performance of the AODT, the results were compared with other algorithms, such as the Pelican Optimization Algorithm (APO) and the Cloud Heading Optimization Algorithm (AORN). Statistical and convergence profile analyses were performed to analyze the performance of the FOPID-AODT and demonstrate the success of the proposed algorithm. The efficiency and dynamic performance of the maglev with the FOPID-AODT controller were analyzed using transient and steady-state response analyses. The results showed that the designed FOPID-AODT control scheme exhibits better performance compared to those tuned using the AORN and APO algorithms.

Keywords: Magnetic suspension system, PI Controller, Fractional order PI controller, Optimization.

1. Introducción

La interacción entre un objeto elaborado de material ferromagnético y un campo magnético aplicado puede utilizarse para levantarlo o suspenderlo en el aire para utilizarlo en muchas aplicaciones industriales. Estos sistemas electromecánicos se denominan sistemas de levitación magnética (Maglev) (Hernández et al., 2019). El campo electromagnético generado por estos sistemas proporciona la fuerza electromagnética necesaria para que esta tecnología funcione y poder eliminar la fricción entre dos materiales y por consecuencia reducir su desgaste (Rubio, 2024).

Los sistemas maglev se utilizan en muchas aplicaciones de ingeniería, como ascensores de alta velocidad (Duan et al., 2023), trenes de pasajeros (Kisilowski & Kowalik, 2020), armamento militar, reactores nucleares, sistemas de inspección de alimentos (Yuan et al., 2021), sistemas de aislamiento de vibraciones (Lou et al., 2024), dispositivos biomédicos (Dabbagh et al., 2021) y cirugía mínimamente invasiva (Lei et al., 2023). Sin embargo, estos sistemas son inestables en lazo

*Autor para la correspondencia: polginezsan@gmail.com
Correo electrónico: go507401@uaeh.edu.mx (Jaqueline González Cabañas), polginezsan@gmail.com (Aida Paola Ginez Sanchez), omar_aguilar@uaeh.edu.mx (Omar Aguilar Mejía), (avalder@up.edu.mx) Antonio Valderrábano González, (irvingb@uaeh.edu.mx) Irving Barragán Vite

Historial del manuscrito: recibido el 03/06/2026, última versión-revisada recibida el 25/08/2026, aceptado el 29/09/2026, publicado el 06/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial3.18034

abierto por la interacción de las variables electromecánicas en su modelo matemático que muestra características altamente no lineales. Estas condiciones hacen que el Maglev presenta grandes desafíos para poder diseñar esquemas de control para regular la trayectoria de la posición de la variable de salida del sistema (Avilés et al., 2025). Para ajustar el objeto móvil en la posición deseada es necesario diseñar esquemas de control robusto en lazo cerrado para regular la corriente del electroimán. Para realizar esta tarea se han diseñado controladores proporcionales-integrales-derivativos (PID) (F. Li et al., 2023), PID de orden fraccionario (FOPID) (Jamil et al., 2022), modos deslizantes (Leduc Sahagún et al., 2026), reguladores fuzzy, controladores basados en redes neuronales artificiales, para regular el seguimiento de la trayectoria de la posición deseada de la parte móvil. Los controladores PID convencionales se utilizan ampliamente en aplicaciones industriales, debido a su fácil implementación, robustez y simplicidad (Sivaramkrishnan et al., 2022), (Omar et al., 2023). Pero, en las últimas dos décadas los controladores FOPID se han estado utilizando como la versión ampliada y mejorada de los controladores PID al aumentar simplemente dos parámetros de y convertirlos de orden fraccionario (Jamil et al., 2022), con lo cual ayudan a mejorar la respuesta transitoria y el desempeño dinámico en estado estacionario del sistema (Romero-Ushiña et al., 2025).

Para determinar las ganancias de los controladores PID y FOPID se ha generalizado cada vez más el uso de algoritmos metaheurísticos para ajustar los parámetros de los controladores a valores óptimos dependiendo del sistema a regular. El uso de los algoritmos de optimización está sustituyendo a los métodos clásicos de sintonización, como la metodología de margen de fase y de ganancia para determinar la ubicación de los polos, (Naderi et al., 2021), (Nassef et al., 2023).

En diversos trabajos de investigación se han desarrollado controladores PID y FOPID para regular el Maglev utilizando algoritmos metaheurísticos. Mughees y Mohsin (2020) diseñan un controlador FOPID optimizado mediante el algoritmo de colonia de hormigas (ACO) para estabilizar el Maglev. El sistema electromagnético lo modelan por principios físicos, y validan su estabilidad mediante el criterio de Routh-Hurwitz y comparan el desempeño del FOPID frente al PID convencional, demostrando menores tiempos de establecimiento y la eliminación de oscilaciones en la posición del objeto móvil.

Bizuneh et al. (2024) aborda el problema de regular la posición de un Maglev utilizando un PID-proporcional (PID-P) de dos grados de libertad. El ajuste de los parámetros del PID-P lo realiza mediante los algoritmos metaheurísticos de optimización de enjambre de partículas (PSO) y la viuda negra (BWOA), utilizando el criterio de error absoluto integral ponderado en el tiempo (ITAE) como función objetivo en la cual integra el tiempo de subida y el sobreimpulso porcentual. El autor modela el Maglev matemáticamente y lo linealiza en un punto de equilibrio y lo estabiliza mediante retroalimentación proporcional. Los resultados de simulación en MATLAB/Simulink demuestran que el controlador PID-P sintonizado con BWOA supera al PID-P con PSO, al PID-P clásico y al PID convencional. Dey et al. (2022a) propone una metodología de diseño de controladores PID de orden entero (IOPID) y FOPID para el Maglev caracterizado por su dinámica no lineal, alta inestabilidad y amplia variación de puntos de operación. La sintonización de los parámetros la formula como un problema de optimización complejo mediante una función objetivo basada en especificaciones transitorias, resuelto con algoritmos metaheurísticos evolutivos: algoritmo de enjambre de aves, optimización por el algoritmo de optimización de manada de elefantes, y el algoritmo de optimización del lobo gris. Los resultados mostrados indican que los controladores FOPID superan a los IOPID en especificaciones de la respuesta a la frecuencia y mayor robustez ante incertidumbres paramétricas.

Ekinci et al. (2026) diseña un PID basado en tangente hiperbólica (tanh-PID) para el Maglev. La función *tanh* integra un preprocesamiento no lineal suave a los parámetros proporcional y derivativo. Los autores utilizan el algoritmo de optimización de los lemming (AOL) para calcular los parámetros del controlador usando una función de costo adaptativa que pondera la supresión del sobre impulso y la minimización del error absoluto integral. Los resultados de simulación demuestran que el tanh-PID optimizado con AOL presenta un mejor desempeño transitorio comparado con los controladores PID convencionales y FOPID.

Un método de diseño y sintonización de controladores PI y PI fraccionarios, incluyendo versiones con filtros fraccionarios, para el control de un Maglev se presenta en (Dey et al., 2022b). El autor sintoniza los controladores mediante el algoritmo metaheurístico de búsqueda atómica, los resultados demuestran que el controlador FOPID con filtro fraccionario (FOPID-F) que presenta excelente robustez ante variaciones paramétricas y buen desempeño comparado con los controladores PID clásicos.

Con la información de los trabajos anteriormente citados se puede mencionar que el uso de los algoritmos de optimización bioinspirados pueden sintonizar y encontrar los mejores parámetros de las diferentes formas de los controladores PID para mejorar la robustez y el desempeño dinámico del sistema. El estudio de nuevos algoritmos de optimización metaheurísticos es importante para encontrar y sintonizar los parámetros de los reguladores y mejorar el desempeño de planta en lazo cerrado cuando se presentan diferentes condiciones operativas. Por lo tanto, en este trabajo se ha decidido emplear el algoritmo de optimización del demonio de Tasmania (AODT) para sintonizar el esquema de control del sistema de levitación magnética. En la revisión bibliográfica se encontró que no existe ninguna aplicación del algoritmo AODT relacionados con el sistema Maglev. El AODT está basado en la imitación del comportamiento natural de caza y alimentación de los demonios de Tasmania (Dehghani et al., 2022). Este algoritmo ya se ha aplicado en diferentes problemas de ingeniería en diferentes áreas. Rizk-Allah et al. (2023) utiliza el AODT para la estimación de los parámetros de un transformador monofásico 1 kVA. Farhat et al. (2024) utiliza el AODT para resolver el problema de flujo de potencia óptimo en sistemas eléctricos de potencia convencionales con la integración de fuentes renovables. Kumar y Sivaraju (2025) sintoniza un controlador FOPID optimizado mediante el AODT para regular la velocidad un motor BLDC sin sensores. La estrategia de control minimiza el rizado del par, elimina el sobreimpulso y mejora la eficiencia del sistema electromecánico. Las simulaciones en MATLAB demuestran un excelente desempeño dinámico, menor tiempo de establecimiento de la respuesta transitoria y reducción de vibraciones frente a controladores PI, y un esquema de control

basado en redes neuronales artificiales. Uthirasamy et al. (2024) utiliza el AODT para resolver el problema de despacho económico sujeto a restricciones de emisiones de contaminantes, penalización de contaminantes y múltiples sistemas de generación de energía eléctrica. El método y el AODT minimiza simultáneamente el costo de combustible y las emisiones contaminantes en sistemas cogeneración no convexos y no lineales. Los resultados de los resultados muestran que el AODT entrega soluciones más económicas en comparación con otros algoritmos bioinspirados.

En la industria y en los laboratorios de investigación los controladores PID y PID de estructura modificada sintonizados con algoritmos de optimización metaheurísticos; se utilizan ampliamente para proporcionar estabilidad en lazo cerrado, seguimiento suave del valor de referencia, rechazo a las perturbaciones internas y externas. También proporcionan un buen desempeño dinámico y robusto para una amplia gama de condiciones operativas.

En este trabajo se realiza el ajuste de un controlador FOPID para un Maglev que tiene una dinámica altamente no lineal, aunque el sistema es inestable en lazo abierto con o sin retraso de la señal de salida del sensor de medición de la variable controlada.

Diferentes investigaciones recientes muestran la necesidad de desarrollar metodologías robustas para regular sistemas de suspensión magnética. Zhang et al. (2020) propone un controlador difuso Takagi-Sugeno para regular el Maglev. El controlador global se construye mediante un método de compensación distribuida paralela y las ganancias de retroalimentación se obtienen mediante una desigualdad matricial lineal. Por lo anterior el algoritmo de control anterior es difícil de implementar debido a que no existe una metodología clara para el diseño del controlador. Un controlador basado en la técnica de modos deslizantes se presenta en (Wu et al., 2023). Las ganancias de esquema de control se obtienen utilizando un algoritmo de optimización por enjambre de partículas mejorado para abordar el considerable número de parámetros ajustables en el controlador. Aunque el sistema es estable, los resultados muestran oscilaciones propias de la técnica de control. Para disminuir las oscilaciones, Dongardive et al. (2022), presenta un esquema de control super twisting basado en un observador por modos deslizantes. Pero los controladores basados en modos deslizantes y super-twisting presentan limitaciones técnicas relevantes. El fenómeno del castañeo, caracterizado por oscilaciones de alta frecuencia en la señal de control, constituye su principal inconveniente, pudiendo excitar dinámicas no modeladas y deteriorar los actuadores. Además, la selección de la superficie deslizante y las ganancias del algoritmo super-twisting no hay un procedimiento generalizado para su definición.

(S. Zhang et al., 2024), (Liu et al., 2021) y (Liu et al., 2024) utilizan un esquema de control fuzzy PID para regular la posición del Maglev. Pero los controladores Fuzzy-PID presentan diversas limitaciones técnicas, para realizar la sintonización del controlador, para definir las funciones de pertenencia y las reglas difusas no se realiza mediante una metodología sistemática, se depende del conocimiento de un experto. Adicionalmente, la carga computacional aumenta considerablemente con la dimensión del espacio de estados, dificultando implementaciones en tiempo real con hardware de recursos limitados.

El enfoque evolutivo de los algoritmos de optimización bioinspirados para el ajuste de los parámetros del controlador FOPID ha atraído a los ingenieros e investigadores del área de control debido a su simplicidad, fácil implementación, y convergencia estable. El objetivo del trabajo es identificar los parámetros óptimos del esquema de control FOPID para regular la trayectoria de la posición del objeto móvil dentro del Maglev utilizando el AODT presentado por Dehghani et al. (2022). La principal inspiración del AODT es simular el comportamiento de la forma de alimentarse el demonio de Tasmania, basada en dos estrategias: atacar presas vivas o alimentarse de carroña de animales muertos. La bibliografía ofrece detalles del uso del AODT para ajustar y regular el desempeño de sistemas inestables (Thlathini & Marzoughi, 2023; Wang & Lyu, 2024b; Dev et al., 2025 y Li, 2024).

Además, en este trabajo, se evalúa el rendimiento de la técnica de ajuste propuesta mediante un trabajo de simulación. También se realiza un estudio comparativo con estructuras de controladores PID y FOPI ajustados con el algoritmo de optimización del pelicano (Trojovský & Dehghani, 2022) y el algoritmo de optimización del rumbo de las nubes (Alibabaei Shahraki, 2025). El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se describe el sistema de suspensión magnética; en la sección 3 se presenta una visión general del algoritmo del demonio de Tasmania. El ajuste del controlador FOPID se analiza en la sección 4. La sección 5 ofrece los resultados simulados, seguidos de la conclusión del presente trabajo de investigación en la sección 6.

2. Análisis matemático del sistema de suspensión magnética

El Maglev es un sistema de levitación magnética para elevar y suspender un objeto ferromagnético utilizando un campo magnético sin contacto directo con él. El objetivo del sistema es modificar la corriente de un electroimán mediante una tensión de entrada $v(t)$ y controlar la posición del objeto ferromagnético, como una bola de acero. El diagrama esquemático del sistema de suspensión de una bola magnética se muestra en la Figura 1.

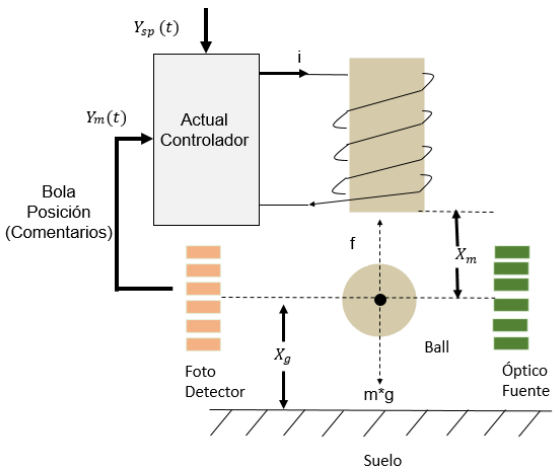


Figura 1: Esquema del sistema de suspensión magnética.

En este sistema, la corriente que entra a la bobina actúa como actuador electromagnético, de modo que la fuerza electromagnética que actúa sobre la bola es igual a su peso. De esta forma, la bola se mantiene en equilibrio. El control de un

sistema de suspensión magnética es complejo, ya que se trata de un sistema rápido, dinámico, no lineal e inestable. Para detectar la posición de la bola suspendida se utiliza un sensor de posición óptico. Por lo tanto, debe estabilizarse mediante un sistema de control por retroalimentación en lazo cerrado.

El comportamiento dinámico del sistema de levitación magnética se puede modelar analizando los subsistemas electromagnético y mecánico que se muestran en la Figura 1. La fuerza neta que actúa sobre la bola (según la segunda ley de Newton) se puede describir en la siguiente en la ecuación.

$$m\frac{d^2x(t)}{dt^2} = (mg) - C\left(\frac{i(t)}{x(t)}\right)^2 \quad (1)$$

donde $x(t) = X_m$ es la distancia entre el objeto y el imán, $i(t)$ es la corriente a través de la bobina, C es la constante de fuerza magnética, g es la fuerza de aceleración debida a la gravedad y m es la masa del objeto. De acuerdo a las leyes de voltaje de Kirchoff la relación entre $v(t)$ e $i(t)$ es:

$$v(t) = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

donde L es la inductancia de la bobina, R es la resistencia interna de la bobina. La fuerza del electroimán se puede definir como

$$f(x,i) = C\left(\frac{i(t)}{x(t)}\right)^2 \; and \; C = \frac{L_o x_0}{2} \quad (3)$$

donde L_0 es la inductancia incremental de la bobina magnética debido a la posición de equilibrio x_0. Definiendo las variables de estado como $x_1=x(t)$, $x_2=\mathrm{d}x(t)/\mathrm{dt}$ y $x_3=i(t)$, entonces el sistema del Maglev con (1) - (3), se puede obtener como sigue:

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = x_2(t) \quad (4)$$

$$\frac{d^2x_2(t)}{dt^2} = g - \frac{C}{m}\left(\frac{x_3(t)}{x_1(t)}\right)^2 \quad (5)$$

$$\frac{dx_3(t)}{dt} = -\frac{R}{L}x_3(t) + \frac{1}{L}v(t) \quad (6)$$

Para linealizar el sistema de finido por las ecuaciones diferenciales (4) (6), el sistema anterior se linealiza alrededor de un punto de equilibrio (x_0); entonces se puede obtener que

$$m\frac{d^2x(t)}{dt^2} = -C\left(\frac{i_0}{x_0}\right)^2\left\{1 + 2\left[\frac{i(t)}{i_0} - \frac{x(t)}{x_0}\right]\right\} + mg \quad (7)$$

donde i_0 es la corriente incremental de la bobina magnética debido a la posición de equilibrio x_0. Entonces el objeto suspendido alcanza el estado de equilibrio en

$$C\left(\frac{i_0}{x_0}\right)^2 = mg \quad (8)$$

utilizando (8) la ecuación (5) se puede formular como:

$$m\frac{dx(t)^2}{dt^2} = \frac{2{i_0}^2C}{{x_0}^2}x(t) \; - \frac{2i_0C}{{x_0}^2}i(t) \quad (9)$$

Los parámetros del Maglev considerados para desarrollar este trabajo se presentan en la Tabla 1. El modelo linealizado en espacio de estados utilizando (4), (6) y (9) se muestra a continuación:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{C{x_{03}}^2}{m{x_{01}}^3} & 0 & -2\frac{Cx_{03}}{m{x_{01}}^2} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/L \end{bmatrix}; \qquad C = [1 \quad 0 \quad 0]$$

Sustituyendo las constantes de la Tabla 1 en (10), se obtiene el modelo real del sistema linealizado, que tiene la forma:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1633.33 & 0 & -23.33 \\ 0 & 0 & -100 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 100 \end{bmatrix}; \qquad C = [1 \quad 0 \quad 0]$$

Tabla 1: Parámetros del sistema Maglev

Parámetro	Valor	Unidad
m	0.5	Kg
g	9.81	m/s^2
L	0.01	H
R	1	Ω
C	0.0001	
x_{01}	0.012	M
x_{02}	0	M/s
x_{03}	0.84	A

A partir de (11) se puede obtener la función de transferencia del sistema linealizado para para diseñar el controlador PID convencional, analizar su respuesta en la frecuencia y conocer si el sistema es estable o inestable en lazo cerrado. El modelo de función de transferencia del sistema que se obtiene a partir de (11) es:

$$G(s) = \frac{-2333}{s^3 + 100s^2 + 1088.3478s - 163333} \quad (12)$$

La función de transferencia $G(s)$ tiene dos polos complejos estables (-65.6797±29.8920i), un polo inestable ubicado en (31.3595) y ceros positivos. Por lo cual, el Maglev es físicamente inestable en lazo abierto y en lazo cerrado con retroalimentación unitaria. Por lo tanto, el objetivo principal del trabajo es diseñar un esquema de control FOPID para regular la posición del objetivo móvil del Maglev y obtener un desempeño dinámico robusto ante diferentes condiciones operativas.

3. Algoritmo de optimización del demonio de Tasmania (AODT)

El AODT es un algoritmo de optimización metaheurística bio-inspirado basado en el comportamiento de poblaciones, el cual es desarrollado por Dehghani et al. (2022). El AODT imita el comportamiento de las formas de conseguir comida el demonio de Tasmania. El demonio de Tasmania tiene dos opciones para alimentarse. Una de ellas es encontrar y comer carroña en la zona, mientras que la otra es cazar y comer presas. El modelo matemático de AODT se basa en estos dos comportamientos. Al igual que en el primer comportamiento, el demonio de Tasmania suele preferir comer la carroña dejada por las presas cazadas por otros depredadores en las inmediaciones. Esta estrategia se modela como sigue:

$$\boldsymbol{C_I = X_k} \quad (13)$$

donde X_k es la posición del k-ésimo demonio de Tasmania seguido por el i-ésimo para encontrar la mejor carroña. La regla de actualización de la posición del i-ésimo demonio de Tasmania se establece de la siguiente manera:

$${X_{i,j}}^{nuevo,S1} = \begin{cases} X_{i,j} + r\cdot\left(C_{i,j} - I\cdot X_{i,j}\right), & F_{ci} < F_{i;} \\ X_{i,j} + r\cdot\left(C_{i,j} - I\cdot X_{i,j}\right), & otra\ cosa, \end{cases} \quad (14)$$

$$\boldsymbol{X_i} = \begin{cases} \boldsymbol{{X_i}^{nuevo,S1}}, & \boldsymbol{{F_i}^{nuevo,S1} < F_i;} \\ \boldsymbol{X_{i,}} & \boldsymbol{otra\ cosa,} \end{cases} \quad (\mathbf{15})$$

donde $X_{i,j}$ y $X_{i,j}^{\text{nuevo,S1}}$ son las ubicaciones actual y nueva del *i*-ésimo demonio de Tasmania, respectivamente. *I* es un número aleatorio que toma el valor 0 o 1. *r* es un número aleatorio entre [0, 1]. En la primera estrategia para encontrar carroña, cada demonio de Tasmania dentro de la población sigue al otro para alcanzar la mejor ubicación. Si el valor de aptitud correspondiente a la ubicación objetivo, $F_i^{\text{nuevo,S1}}$, es inferior al valor de aptitud actual obtenido por el *i*-ésimo demonio de Tasmania, F_i, la posición del *i*-ésimo demonio de Tasmania se actualizará según (16). De lo contrario, la posición del *i*-ésimo demonio de Tasmania permanecerá igual para la iteración correspondiente de la optimización. En la segunda estrategia para cazar alimento vivo, se puede modelar como sigue:

$$P_i = X_k \tag{16}$$

donde X_k es la posición del *k*-ésimo demonio de Tasmania seguido por el *i*-ésimo para obtener la mejor posición para cazar y comer a la presa. Según esta estrategia, la regla de actualización de la posición del *i*-ésimo demonio de Tasmania se establece de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{X_{i,j}^{nuevo,S1}} = \begin{cases} \boldsymbol{X_{i,j} + r \cdot (P_{i,j} - I \cdot X_{i,j})}, & \boldsymbol{F_{pi} < F_i}; \\ \boldsymbol{X_{i,j} + r \cdot (X_{i,j} - P_{i,j})}, \boldsymbol{otra\ cosa}, \end{cases} \tag{17}$$

$$\boldsymbol{X_i} = \begin{cases} \boldsymbol{X_i^{nuevo,S1}}, & \boldsymbol{F_i^{nuevo,S1} < F_i}; \\ \boldsymbol{X_i}, & \boldsymbol{otra\ cosa}, \end{cases} \tag{18}$$

donde, $X_i^{\text{nuevo,S2}}$ y $F_i^{\text{nuevo,S2}}$ son la nueva posición del *i*-ésimo demonio de Tasmania y el valor de aptitud correspondiente a esta posición, respectivamente. De manera similar a la primera estrategia, los demonios de Tasmania actualizan sus posiciones para alcanzar la mejor ubicación para cazar y comer presas.

4. Esquema de control FOPID

Los parámetros conocidos como ganancia proporcional (K_p), integral (K_i) y derivativa (K_d), junto con los órdenes de integral fraccional (λ) y derivada fraccional (μ), definen un al controlador FOPID. La Figura 2 y (19) muestra la estructura interna del controlador FOPID. La función de transferencia del controlador FOPID se expresa como sigue.

$$G_{FOPID}(S) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu, (0 < \lambda,\ \mu\ < 1.99) \tag{19}$$

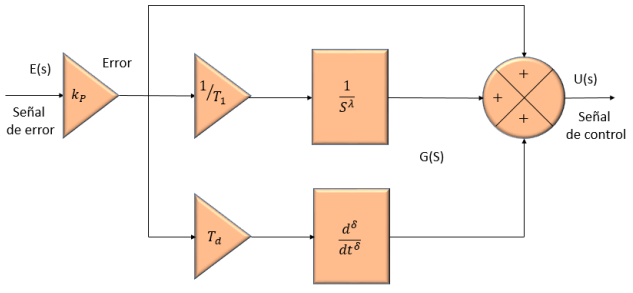


Fig. 2. Forma estándar de la estructura interna del controlador FOPID

De la función de transferencia del FOPID, se puede observar que el esquema de control FOPID es un caso especial de los controladores convencionales P, PI, PD y PID. La representación gráfica de los parámetros fraccionarios del controlador FOPID se muestra en la Figura 3, donde los ejes *x* e *y* representan los órdenes fraccionarios de los términos integral y derivativo, respectivamente. En la figura se puede observar la relación entre el controlador FOPID y los controladores PID convencionales, en relación a los valores de $\lambda\ y\ \mu$. En la Figura 3 se puede observar que el controlador FOPID representa una extensión del PID de un punto a un plano. Esta ampliación proporciona una mayor flexibilidad, lo que permite regular procesos con mayor precisión, aumentar la robustez y mejorar el desempeño dinámico (Llerena & Naranjo, 2025).

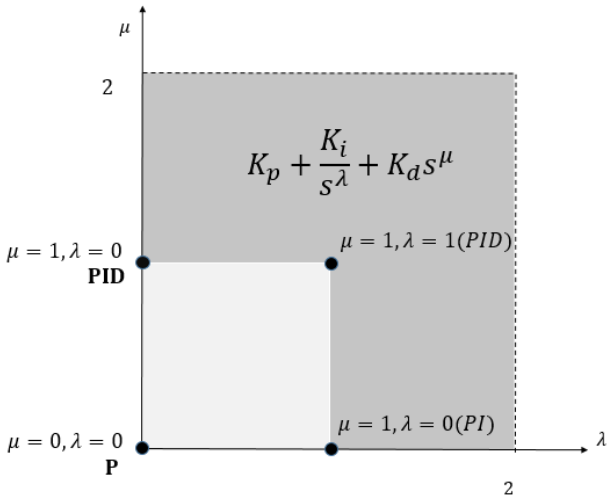


Figura 3. Plano del controlador FOPID

4.1. Aproximación de integrales diferenciales fraccionarias

En la aplicación práctica, es necesario calcular la solución numérica del sistema fraccionario. Sin embargo, resulta difícil aplicar los operadores fraccionarios (integrales y diferenciales) directamente en el dominio del tiempo. Para superar este problema, se han adoptado métodos de aproximación. El método de aproximación más conocido es el que presenta Oustaloup et al., (2000), que la distribución recursiva de polos y ceros. La función de transferencia aproximada como sigue

$$S^\beta \cong K \cdot \prod_{n=-N}^{N} \frac{1 + \frac{S}{\omega_{z,n}}}{1 + \frac{S}{\omega_{p,n}}}, \beta > 0 \tag{20}$$

donde *K* es el valor de una ganancia que garantiza que ambos lados de la ecuación (20) tengan una ganancia unitaria igual a 1 rad/s, y $2N+1$ es el número de polos y ceros preseleccionados. Las ecuaciones (21) y (22) proporcionan $\omega_{z,n}$ y $\omega_{p,n}$, respectivamente.

$$\omega_{z,n} = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b}\right)^{\frac{n+N+(1-\beta)/2}{2N+1}} \tag{21}$$

$$\omega_{p,n} = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b}\right)^{\frac{n+N+\frac{1-\beta}{2}}{2N+1}} \tag{22}$$

donde ω_b y ω_h son los límites de frecuencia superior e inferior de las expresiones de los valores aproximados y, por lo general, se toman valores para que $\omega_b \cdot \omega_h = 1$, es decir, $K = \omega_h^\beta$. En este trabajo, se considera la aproximación recursiva de orden 11 (N=5) dentro del límite de frecuencia de $\omega \in (10^{-3}, 10^3)$ rad/s, que es el rango más habitual en aplicaciones FOPID.

4.2. Aproximación del Controlador FOPID para el sistema de suspensión magnética Maglev

El diagrama de bloques del maglev, que incluye el controlador FOPID, se muestra en la Figura 4. La función de transferencia en lazo cerrado del sistema (incluido el controlador (FOPID) se presenta en la ecuación (23).

$$T(s) = \frac{G_{FOPI}(S)G(S)}{1 + G_{FOPI}(S)G(S)}$$

$$T(s) = \frac{-2333\left(K_P + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu\right)}{\left[s^3 + 100s^2 + 1088.3478s - 163333\right] s^\lambda - 2333\left(K_P + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu\right)} \quad (23)$$

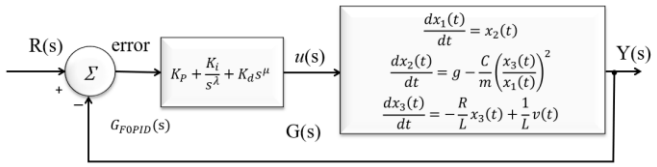


Figura 4: Diagrama de bloques del sistema de levitación magnética con controlador FOPID

Antes de realizar la búsqueda de optimización, es necesario asignar los siguientes parámetros del algoritmo: La dimensión del espacio de búsqueda es 3, la población de demonios de Tasmania son 100 y la probabilidad de eliminación-dispersión tiene un valor de 0.5. Durante la búsqueda, el rango del espacio de búsqueda en el algoritmo AODT influirá en el rendimiento del algoritmo de optimización, como la velocidad de convergencia y la precisión en los parámetros del controlador optimizado. En el método propuesto, el espacio de búsqueda de los parámetros del FOPID son: -500≤ K_P ≤ 500, -500 ≤ K_i ≤ 500, -500≤ K_d ≤ 500, 0.01≤ μ ≤ 1.99 y 0.01≤ λ ≤ 1.99.

4.3. Formulación de la función objetivo con restricciones

El objetivo del trabajo es identificar los parámetros óptimos del esquema de control FOPID para regular la trayectoria de la posición del objeto móvil dentro del Maglev (Avilés et al., 2025). Para encontrar las ganancias optimas del regulador de posición se utilizan métodos de optimización para minimizar el error entre el valor de referencia y la medición de la posición del objeto móvil. En el enfoque de optimización de parámetros el AODT requiere de la función de costo (FC) a minimizar, que se utiliza para evaluar el desempeño dinámico del sistema en lazo cerrado durante la búsqueda de optimización. La función objetivo para realizar la búsqueda de los parámetros óptimos del esquema de control emplea el criterio de error absoluto en el tiempo integral (ITAE), que se define como

$$\boldsymbol{FC = \int_0^T t \cdot |e(t)| dt = \int_0^T t \cdot [r(t) - y(t) dt]} \qquad (24)$$

donde $e(t)$ es error de la posición del objeto móvil, $r(t)$ es el valor de la referencia y $y(t)$= es la medición de la posición del objeto móvil. Pero, además, en los sistemas con retroalimentación en lazo cerrado, el objetivo principal del controlador es reducir al mínimo el sobreimpulso máximo (M_p), el tiempo de estabilización (t_s) y que el error en estado estacionario (e_{ss}) sea lo más pequeño posible. Al realizar la optimización de los parámetros del esquema de control se consideran las siguientes restricciones: a) que el porcentaje de sobre impulso (overshoot) <50% y b) ajustar el tiempo de establecimiento <1.8 seg. Por lo cual, el problema del ajuste del controlador consiste en encontrar los valores óptimos de K_p, K_d, K_i, μ y λ, en el espacio de búsqueda que minimiza la función objetivo (24).

La Figura 5 muestra el diagrama de bloques del proceso para determinar las ganancias optimas del controlador de la posición de la parte móvil del del sistema de suspensión magnética. Básicamente, el sistema de control compara la posición deseada con la posición real y la diferencia se utiliza como entrada para el controlador FOPID. De la misma forma, la posición real del objeto móvil se retroalimenta para calcular su magnitud en la función objetivo, que posteriormente, el AODT utiliza para actualizar y/o determinar los parámetros del controlador FOPID cuando cumple las restricciones y es el valor mínimo de la FC. Una vez obtenidos los parámetros óptimos, se verifica el rendimiento del sistema mediante pruebas estadísticas, de convergencia y de respuesta transitoria, como se muestra en la Fig. 5.

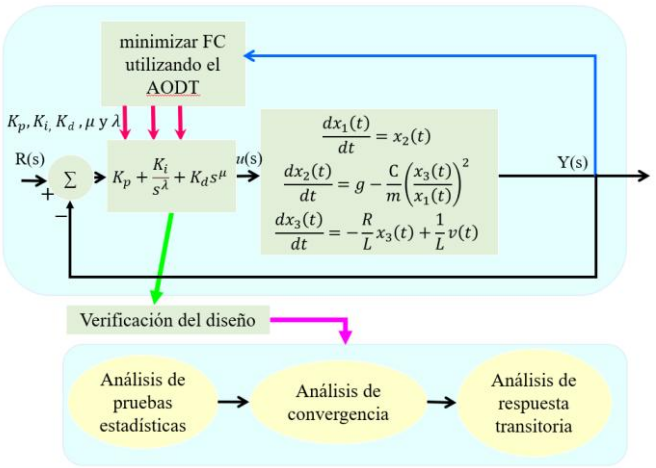


Figura 5: Diagrama de bloques para calcular los parámetros óptimos del FOPID utilizando el AODT para el sistema de levitación magnética.

5. Resultados y discusión

Se eligió el AODT, así como los algoritmos del pelicano y el algoritmo de optimización del rumbo de las nubes, para realizar una comparación estadística y de desempeño dinámico de la respuesta transitoria en función a de los parámetros óptimos calculados entre los tres algoritmos y con el esquema de control propuesto. Para obtener información detallada del algoritmo de optimización del pelicano (AOP) y del algoritmo de optimización del rumbo de las nubes (AORN), el lector puede consultar las referencias (Trojovský & Dehghani, 2022) y (Alibabaei Shahraki, 2025), respectivamente. La codificación de los algoritmos AODT, AOP y AORN, su adaptación e implementación del sistema maglev y todos sus análisis se realizaron utilizando el software MATLAB/Simulink (versión 8.3) en un ordenador personal con un procesador Intel i7 a 2,50 GHz y 16,00 GB de RAM. En ambos algoritmos se eligió un tamaño de población de 100 para realizar una comparación adecuada. El número máximo de iteraciones para todos los algoritmos es de 40.

5.1. Pruebas estadísticas

Los valores estadísticos de los algoritmos de optimización (AODT, AOP y AORN) de la función objetivo propuesta (FC), tales como la media, la desviación estándar (SD) y los valores mínimos (min) y máximo (max), se muestran en la Tabla 2, mientras que los resultados del análisis comparativo mediante diagramas de caja se muestran en la Figura 6. La Tabla 2 y la figura anterior muestran que el AODT tiene un mejor rendimiento estadístico comparado con los otros dos algoritmos de optimización.

Tabla 2: Valores estadísticos de la respuesta de la FC

Índice estadístico	AODT	AOP	AORN
Media	0.3430	0.7022	0.5073
Desviación estándar	0.0436	0.0983	0.0514
Mejor valor	0.2652	0.5498	0.4066
Peor valor	0.4105	0.8380	0.5897

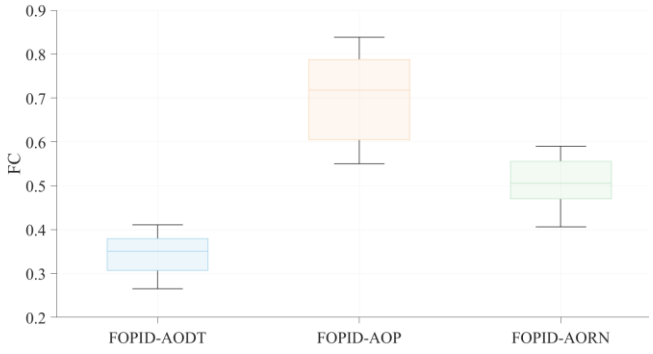


Figura 6: Resultados del análisis de los diagramas de caja de los algoritmos AODT, AOP y AORN.

5.2. Perfil de convergencia

Los parámetros óptimos del esquema de control FOPID encontrados por los algoritmos AODT, AOP y AORN se muestran en la Tabla 3. En la misma tabla se puede observar que los tres algoritmos presentan números negativos en los parámetros FOPID, lo cual es debido a que el numerador de la función de transferencia (12) es negativo, para disminuir el efecto del polo y raíz positiva de la planta (12). La Figura 7 muestra las curvas de convergencia comparativas de la función objetivo FC utilizada en la optimización de los parámetros FOPID del sistema de suspensión magnética, en función del número de iteraciones. Como se puede observar en la figura, el AODT alcanzó el valor más bajo de FC con un número mínimo de iteraciones (en la 22.ª iteración), mientras que los algoritmos AORN y AOP alcanzaron sus valores más bajos en las iteraciones 28 y 24, respectivamente.

Tabla 3: Mejores parámetros de los controladores FOPID usando diferentes algoritmos de optimización.

Controlador Parámetro	k_p	k_i	k_d	λ	μ
FOPID-AODT	-22.8688	-500.00	-61.1696	1.10046	0.16525
FOPID-AOP	-500.00	-500.00	-500.000	1.22852	1.270147
FOPID-AORN	-500.00	-500.00	-2.77708	1.226512	1.204278

5.3. Respuesta transitoria

Las respuestas transitorias del sistema ante un cambio en la posición de referencia alrededor del valor de referencia inicial de y_0=1 cm para los controladores FOPID-AODT, FOPID-AOP y FOPID-AORN se muestran en la Figura 8. Asimismo, en la Tabla 4 se presentan resultados numéricos comparativos en términos del sobre impulso máximo, tiempo de subida (del 10% al 90%) y tiempo de estabilización (banda del ± 3 %). Teniendo en cuenta los resultados del análisis comparativo de la respuesta transitoria de la Fig. 8 y la Tabla 4, todos los criterios de rendimiento, como el sobre impulsó, el tiempo de subida y el tiempo de estabilización, han alcanzado los valores más bajos con el controlador FOPID-AODT, diseñado para el sistema de suspensión magnética. Estos resultados confirman la superioridad del algoritmo AODT en términos de capacidad de búsqueda global y local, ya que mejora la respuesta transitoria del sistema Maglev.

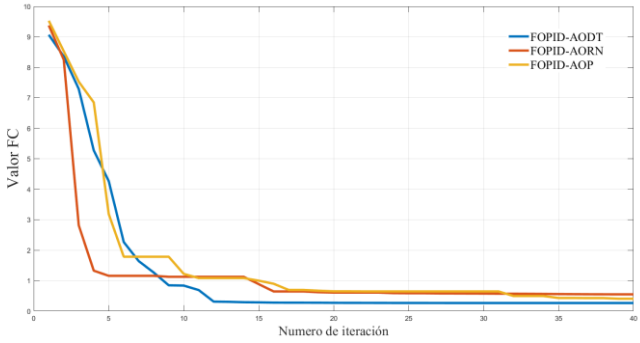


Figura 7: Curvas de convergencia comparativas de la función objetivo FC.

En la Figura 9 se muestra la respuesta de la señal de control de voltaje que calculan los tres algoritmos de optimización ante la respuesta escalón unitario. En la figura 9 se puede observar que la señal de voltaje de control del FOPID-AORN muestra un sobre impulso de más de 15 volts, el cual es un valor de magnitud muy alto que puede dañar al sistema mecatrónico. En la misma figura se muestra que el transitorio del voltaje de la señal de control del FOPID-AODT menor al FOPID-AORN. En estado estacionario, se puede observar que la señal de control es muy semejante para los tres FOPID, con un valor de 4.5 volts.

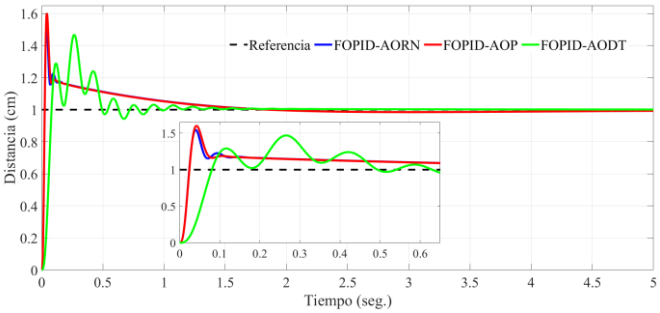


Figura 8: Respuesta transitoria del esquema de control FOPID para el Maglev usando los parámetros óptimos calculados por los tres algoritmos de optimización diferentes.

Tabla 4: Resultados del análisis comparativo de la respuesta transitoria del sistema de suspensión magnética

Controlador	Sobreimpulso máximo (%)	Tiempo de estabilización (s)	Tiempo de subida (s)
FOPID-AODT	1.4685	1.1029	0.047954
FOPID-AOP	1.6023	1.4159	0.014135
FOPID-AORN	1.5472	1.4293	0.014058

En la Figura 10 se muestra la posición de la parte móvil del Maglev cuando el valor de referencia cambia drásticamente de 1 cm a 1.3 cm en t= 7 seg. y se modifica la referencia de 1.3 cm a 0.8 cm en t= 14 seg. En la figura 10 se muestra que los tres algoritmos siguen la trayectoria deseada para la posición del objeto móvil pero el FOPID-AORN muestra un mejor desempeño que los otros dos algoritmos.

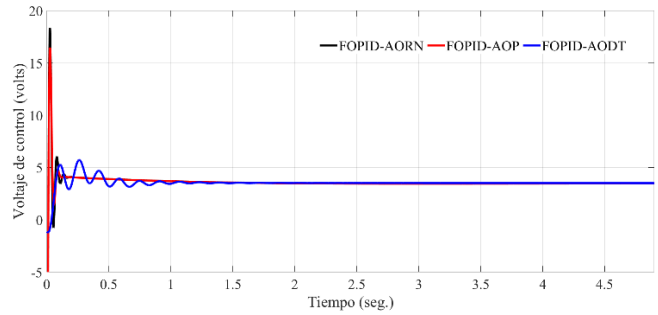


Figura 9: Señal de voltaje de control para el Maglev que calculan los tres algoritmos de optimización diferentes.

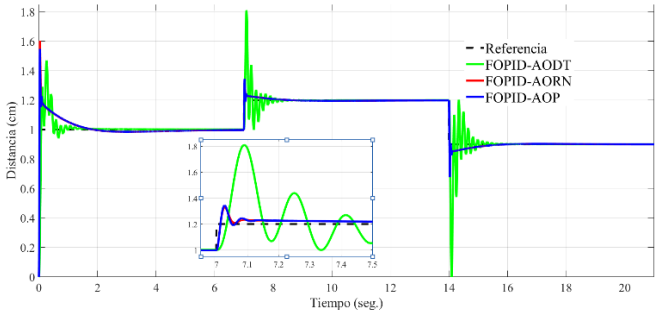


Figura 10: Posición de la parte móvil del Maglev cuando la referencia cambia drásticamente

En la Figura 11 se muestra la respuesta transitoria del FOPID-AODT cuando se modifica el peso de la parte móvil usando los mismos parámetros del controlador. En la figura se puede observar que cuando se disminuye el peso de la parte móvil del Maglev se presenta una respuesta transitoria muy similar a la respuesta dinámica de la masa nominal.

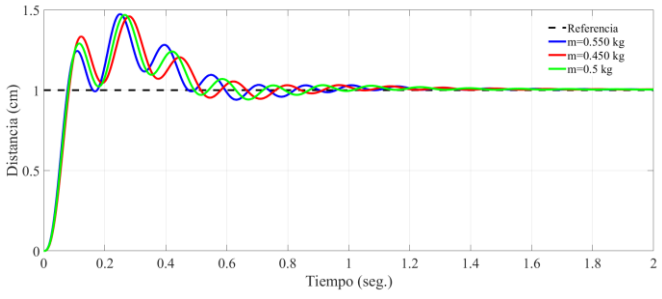


Figura 11: Respuesta dinámica del Maglev cuando se realizan variaciones del peso de la parte móvil

6. Conclusión

En este estudio, se utiliza por primera vez el AODT para optimizar un controlador FOPID en un sistema de suspensión magnética. Con el fin de demostrar la eficiencia del AODT se utilizaron el AOP y AORN. Los resultados estadísticos de los tres algoritmos de optimización para minimizar la función de costo se analizan en términos de la media, la desviación estándar, valores mínimos y máximos. De la misma forma, se realizaron comparaciones de rendimiento adicionales con los mismos algoritmos a través del perfil de convergencia y la respuesta transitoria.

Los resultados de la simulación han revelado que el controlador FOPID diseñado para el sistema de suspensión magnética, ajustado mediante una nueva y sencilla función objetivo con el AODT se obtienen mejores criterios de rendimiento, tales como el sobre impulso máximo, el tiempo de estabilización y el tiempo de subida. Por lo tanto, el enfoque de ajuste propuesto es eficaz y constituye un enfoque prometedor para su aplicación a otros problemas de ingeniería.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial generativa y tecnologías asistidas por IA

Durante la preparación del presente manuscrito, los autores utilizaron *grammarly* para la corrección gramatical y mejorar la redacción del texto. Todo el contenido generado o sugerido por la herramienta fue revisado y editado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la exactitud, originalidad, integridad y rigor científico del contenido final del manuscrito.

Referencias

Bizuneh, A., Mitiku, H., Salau, A. O., & Chandran, K. (2024). Performance analysis of an optimized PID-P controller for the position control of a magnetic levitation system using recent optimization algorithms. Measurement Sensors, 33, 101228. https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101228

Dabbagh, S. R., Alseed, M. M., Saadat, M., Sitti, M., & Tasoglu, S. (2021). Biomedical applications of magnetic levitation. Advanced NanoBiomed Research, 2(3). https://doi.org/10.1002/anbr.202100103

Dehghani, M., Hubalovsky, S., & Trojovsky, P. (2022). Tasmanian Devil Optimization: a new Bio-Inspired optimization algorithm for solving optimization algorithm. IEEE Access, 10, 19599–19620. https://doi.org/10.1109/access.2022.3151641

Dev, A., Kumar, V., Sarkar, M. K., & Bhatt, K. (2025). Enhanced frequency regulation using Tasmanian devil optimization tuned PID controller for hybrid energy system with electric vehicle. 2025 IEEE 5th International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET), 1–6. https://doi.org/10.1109/SEFET65155.2025.11255588

Dey, S., Banerjee, S., & Dey, J. (2022a). Practical Application of Fractional-Order PID Controller based on Evolutionary Optimization Approach for a Magnetic Levitation System. IETE Journal of Research, 69(11), 8168–8192. https://doi.org/10.1080/03772063.2022.2052983

Dey, S., Banerjee, S., & Dey, J. (2022b). Design of an improved robust fractional order PID controller for magnetic levitation system based on atom search optimization. Sadhana, 47(4). https://doi.org/10.1007/s12046-022-01962-8

Dongardive, A. M., Mane, H. R., Chile, R. H., & Hamde, S. T. (2022). Design of super twisting disturbance observer-based controller for magnetic levitation system. International Journal of Dynamics and Control, 11(3), 1190–1202. https://doi.org/10.1007/s40435-022-01036-x

Duan, X., Zhi, P., Zhu, W., & Wei, H. (2023). Fuzzy adaptive PID speed controller design for modern elevator traction machine. Energy Reports, 9, 175–183. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.262

Ekinci, S., Izci, D., Tümen, V., Jabari, M., Çelik, E., & Elrashidi, A. (2026). Intelligent control of magnetic ball suspension systems via a novel hyperbolic tangent PID controller tuned by the artificial lemming algorithm. Biomimetics, 11(3), 205. https://doi.org/10.3390/biomimetics11030205

Farhat, M., Kamel, S., & Abdelaziz, A. Y. (2024). Modified Tasmanian devil optimization for solving single and multi-objective optimal power flow in conventional and advanced power systems. Cluster Computing, 28(2). https://doi.org/10.1007/s10586-024-04790-z

Hernández, Y. L., Frías, O. O. G., & Bante, M. V. (2019). Control PI difuso de un sistema de levitación magnética mediante un sistema embebido. Ingeniería Investigación Y Tecnología, 20(4), 1–11. https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n4.043

Jamil, A. A., Tu, W. F., Ali, S. W., Terriche, Y., & Guerrero, J. M. (2022). Fractional-Order PID Controllers for Temperature Control: A review. Energies, 15(10), 3800. https://doi.org/10.3390/en15103800

Kisilowski, J., & Kowalik, R. (2020). Displacements of the levitation systems in the vehicle hyperloop. Energies, 13(24), 6595. https://doi.org/10.3390/en13246595

Kumar, P., & Sivaraju, S. S. (2025). An investigation on employing optimized FOPID controller to expand the performance of BLDC motor drives. Electrical Engineering, 107(8), 10981–10996. https://doi.org/10.1007/s00202-025-03072-0

Lei, C., Lan, Y., & Xu, Z. (2023). Fractional order sliding mode control for extended state observer. Journal of Vibration and Control, 30(21–22), 4681–4694. https://doi.org/10.1177/10775463231216133

Li, F., Sun, Y., Xu, J., He, Z., & Lin, G. (2023). Control methods for levitation system of EMS-Type Maglev Vehicles: An Overview. Energies, 16(7), 2995. https://doi.org/10.3390/en16072995

Li, S. (2024). Applicability of smell agent optimization and Tasmanian devil optimization hybridized with ANFIS and SVR as reliable solutions in estimation of cooling load in buildings. Multiscale and Multidisciplinary Modeling Experiments and Design.

Liu, Y., As'arry, A., Ahmed, H., Hairuddin, A. A., Hassan, M. K., Zakaria, M. Z., & Yang, S. (2024). Online optimal tuning of fuzzy PID controller using grey wolf optimizer for quarter car semi-active suspension system. Advances in Mechanical Engineering, 16(2). https://doi.org/10.1177/16878132231219620

Liu, Y., Fan, K., & Ouyang, Q. (2021). Intelligent traction control method based on model predictive fuzzy PID control and online optimization for permanent magnetic Maglev trains. IEEE Access, 9, 29032–29046. https://doi.org/10.1109/access.2021.3059443

Llerena, M. E. M., & Naranjo, P. G. V. (2025). Diseño y comparación de un PID de orden fraccional para un proceso de neutralización de PH. Revista Científica Multidisciplinar G-nerando, 6(2). https://doi.org/10.60100/rcmg.v6i2.753

Lou, Y., Zhang, H., Zhang, L., & Cai, H. (2024). Advancements in key technologies for vibration isolators utilizing electromagnetic levitation. Energies, 17(21), 5343. https://doi.org/10.3390/en17215343

Mughees, A., & Mohsin, S. A. (2020). Design and control of magnetic levitation system by optimizing fractional Order PID controller using ANT Colony Optimization Algorithm. IEEE Access, 8, 116704–116723. https://doi.org/10.1109/access.2020.3004025

Naderi, E., Narimani, H., Pourakbari-Kasmaei, M., Cerna, F. V., Marzband, M., & Lehtonen, M. (2021). State-of-the-Art of Optimal Active and Reactive Power Flow: A Comprehensive Review from Various Standpoints. Processes, 9(8), 1319. https://doi.org/10.3390/pr9081319

Nassef, A. M., Abdelkareem, M. A., Maghrabie, H. M., & Baroutaji, A. (2023). Metaheuristic-Based Algorithms for Optimizing Fractional-Order Controllers—A recent, systematic, and Comprehensive review. Fractal and Fractional, 7(7), 553. https://doi.org/10.3390/fractalfract7070553

Omar, O. a. M., Marei, M. I., & Attia, M. A. (2023). Comparative Study of AVR Control Systems Considering a novel Optimized PID-Based Model Reference Fractional Adaptive Controller. Energies, 16(2), 830. https://doi.org/10.3390/en16020830

Oustaloup, A., Levron, F., Mathieu, B., & Nanot, F. M. (2000). Frequency-band complex noninteger differentiator: characterization and synthesis. IEEE Transactions on Circuits and Systems. I, Fundamental Theory and Applications, 47(1), 25–39. https://doi.org/10.1109/81.817385

Rizk-Allah, R. M., El-Sehiemy, R. A., & Abdelwanis, M. I. (2023). Improved Tasmanian devil optimization algorithm for parameter identification of electric transformers. Neural Computing and Applications, 36(6), 3141–3166. https://doi.org/10.1007/s00521-023-09240-2

Romero-Ushiña, B. A., Salme-Montaluisa, K. A., Quinatoa-Caiza, C. I., & Camacho-Diaz, J. L. (2025). Control de convertidores formadores de red con fuente de voltaje conectado al sistema eléctrico de distribución balanceada. 8(15). https://doi.org/10.46296/ig.v8i15.0239

Sahagun, L. E. L., Escamilla, M. F. B., & Ortiz, D. C. (2026). Sistema de rehabilitaci´on con enfoque en control de modos deslizantes. PÄDI Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI, 14, 32–38. https://doi.org/10.29057/icbi.v14iespecial.15486

Sivaramkrishnan, M., Ramkumar, M. S., S, S. S., & Ladu, N. S. D. (2022). A Bridgeless LUO Converter with Glowworm Swarm Optimized Tuned PI Controller for Electrical Applications. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 1–8. https://doi.org/10.1155/2022/2401261

Thlathini, F. A., & Marzoughi, A. (2023). Tuning of PID controller based on Tasmanian devil optimization for unmanned vehicles. 2023 IEEE 14th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), 16–21. 10.1109/ICSGRC57744.2023.10215429.

Trojovský, P., & Dehghani, M. (2022). Pelican Optimization Algorithm: A Novel Nature-Inspired Algorithm for Engineering Applications. Sensors, 22(3), 855. https://doi.org/10.3390/s22030855

Uthirasamy, R., Arulkumar, T., Prabu, G., & Sivakumar, V. (2024). Solving economic emission dispatch of combined heat and power units problem using enhanced Tasmanian devil optimization strategy in power systems. Energy Sources Part a Recovery Utilization and Environmental Effects, 46(1), 14012–14032. https://doi.org/10.1080/15567036.2024.2404260

Wang, W., & Lyu, L. (2024b). Adaptive Tasmanian Devil Optimizer for global optimization and application in wireless sensor network deployment. IEEE Access, 12, 72382–72407. https://doi.org/10.1109/access.2024.3403089

Wu, Z., Fan, K., Zhang, X., & Li, W. (2023). Based on sliding mode and adaptive linear active disturbance rejection control for a magnetic levitation system. Journal of Sensors, 2023(1). https://doi.org/10.1155/2023/5568976[45

Yuan, Y., Luo, Y., Ye, F., Zhu, Z., Zeng, G., & Wang, G. (2021). Research on a novel locating method for track inspection based on onboard sensors in Maglev Train. Sensors, 21(9), 3236. https://doi.org/10.3390/s21093236

Zhang, J., Wang, X., & Shao, X. (2020). Design and Real-Time implementation of Takagi–Sugeno Fuzzy Controller for Magnetic Levitation Ball System. IEEE Access, 8, 38221–38228. https://doi.org/10.1109/access.2020.2971631

Zhang, S., Li, M., Li, J., Xu, J., Wang, Z., & Liu, S. (2024). Research on ride Comfort control of air suspension based on genetic algorithm optimized fuzzy PID. Applied Sciences, 14(17), 7787. https://doi.org/10.3390/app14177787