

Comparación basada en simulación de controladores ADRC, PI y PID en un convertidor SEPIC: rendimiento y complejidad

Simulation-based comparison of ADRC, PI, and PID controllers on a SEPIC converter: performance and complexity

Oscar H. Sierra-Herrera¹   Luis D Patarroyo-Gutiérrez¹  Mario E. González-Niño² 

¹ Escuela de ingeniería electrónica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

² Escuela de ingeniería electromecánica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Duitama, Colombia.

Resumen

Introducción: los convertidores SEPIC son ampliamente empleados en electrónica de potencia por su capacidad de elevar o reducir voltajes. Sin embargo, su naturaleza no lineal y la presencia de un cero en el semiplano derecho dificultan el diseño de controladores rápidos y estables. Esta investigación analiza el desempeño de tres estrategias de control aplicadas a un convertidor SEPIC: Active Disturbance Rejection Control (ADRC), Proporcional-Integral (PI) y Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

Objetivos: comparar el seguimiento de referencia, el rechazo de perturbaciones y la complejidad de implementación de los controladores ADRC, PI y PID en un convertidor SEPIC de corriente continua.

Materiales y métodos: se realizaron simulaciones en MATLAB/Simulink introduciendo perturbaciones en la fuente y en el voltaje de salida. Los índices IAE, ITAE, ISE e ITSE se emplearon para cuantificar precisión, rapidez y robustez. También se analizó el efecto de los parámetros de sintonización del ADRC, como el ancho de banda del observador y la velocidad del diferenciador de seguimiento.

Resultados: el ADRC presentó la respuesta más rápida y mejor rechazo de perturbaciones, aunque con oscilaciones inherentes y mayor complejidad de diseño. El PI logró un equilibrio entre simplicidad y desempeño, mientras que el PID tuvo la respuesta más lenta pero más suave ante perturbaciones.

Conclusiones: el ADRC es adecuado para aplicaciones que exigen control rápido y robusto. No obstante, el PI y el PID siguen siendo alternativas válidas cuando se prioriza la simplicidad o la suavidad en la señal de control.

Palabras clave: Convertidor SEPIC; ADRC; PI; PID; Rechazo de perturbaciones; Sistemas de fase no mínima; Control de tensión; Control de sistemas de potencia; Simulación

Abstract

Introduction: SEPIC converters are widely used in power electronics due to their ability to either step up or step down voltage levels. However, their nonlinear behavior and the presence of a right-half-plane zero make it difficult to design fast and stable controllers. This study analyzes the performance of three control strategies applied to a SEPIC converter: Active Disturbance Rejection Control (ADRC), Proportional-Integral (PI), and Proportional-Integral-Derivative (PID).

Objectives: to compare the reference tracking capability, disturbance rejection, and implementation complexity of ADRC, PI, and PID controllers applied to a SEPIC DC-DC converter.

Materials and Methods: simulations were conducted in MATLAB/Simulink by introducing perturbations in both the power source and the output voltage. The performance indices IAE, ITAE, ISE, and ITSE were computed to quantify accuracy, speed, and robustness. The influence of ADRC tuning parameters, such as observer bandwidth and tracking differentiator speed, was also analyzed.

Results: the ADRC controller exhibited the fastest response and best disturbance rejection, although it showed inherent oscillations and higher design complexity. The PI controller achieved a good balance between simplicity and performance, while the PID controller displayed the slowest response but smoother behavior under disturbances.

Conclusions: ADRC is suitable for applications requiring fast and robust control performance. However, PI and PID controllers remain valid alternatives when simplicity or smoother control signals are prioritized.

Keywords: SEPIC converter; ADRC; PI; PID; Disturbance rejection; Non-minimum phase systems; Voltage control; Power system control; Simulation

¿Cómo citar?

Sierra-Herrera OH, Patarroyo-Gutiérrez LD, González-Niño ME. Comparación basada en simulación de controladores ADRC, PI y PID en un convertidor SEPIC: rendimiento y complejidad. Ingeniería y Competitividad, 2025, 27(3)e-20115084

<https://doi.org/10.25100/iyv.v27i3.15084>

Recibido: 04/07/25

Revisado: 03/09/25

Aceptado: 21/10/25

Online: 22/10/25

Correspondencia

Luis.patarroyo@uptc.edu.co.



¿Por qué se realizó este estudio?

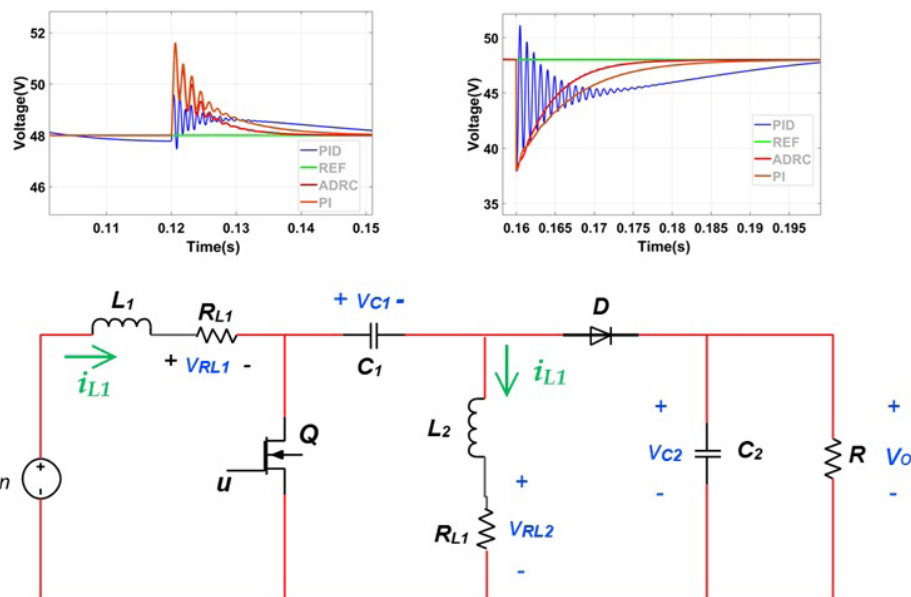
En los últimos años, la investigación se ha centrado cada vez más en estrategias de control avanzadas, como el Control Activo de Rechazo de Perturbaciones (ADRC), y en el desarrollo de modelos de convertidores más precisos. Este estudio se realizó para evaluar y comparar el rendimiento de los controladores ADRC, Proporcional-Integral (PI) y Proporcional-Integral-Derivativo (PID) aplicados a un convertidor CC-CC SEPIC con pérdidas resistivas internas. El objetivo era determinar si el controlador PID, ampliamente utilizado, sigue siendo la solución más eficaz y práctica para los convertidores CC-CC, o si estrategias más recientes, como el ADRC, pueden ofrecer un rendimiento dinámico y un rechazo de perturbaciones superiores. Dado que el convertidor SEPIC presenta un cero en el semiplano derecho y una dinámica no lineal, representa un reto para el diseño de control. El estudio tuvo como objetivo proporcionar una evaluación objetiva y cuantitativa del rendimiento de cada controlador en condiciones idénticas de seguimiento de referencia y rechazo de perturbaciones.

¿Cuáles fueron los hallazgos más relevantes?

ADRC logró la respuesta transitoria más rápida, el menor error acumulado y la mejor capacidad de rechazo de perturbaciones entre los controladores evaluados. Cuantitativamente, ADRC redujo el ITAE en más del 60 % en comparación con PID y aproximadamente un 35 % en comparación con PI, a la vez que logró un tiempo de estabilización casi un 75 % más rápido que PID. Sin embargo, ADRC presentó oscilaciones inherentes en la señal de control y requirió un ajuste e implementación más complejos. El controlador PI demostró un equilibrio entre simplicidad, robustez y velocidad de respuesta, lo que lo convierte en una opción atractiva para aplicaciones prácticas. Por otro lado, el controlador PID proporcionó acciones de control más suaves y redujo el sobreimpulso, pero su respuesta dinámica fue más lenta. En general, ADRC superó tanto a PI como a PID en términos de precisión y robustez, mientras que PI se mantuvo como la solución más simple y eficiente para implementaciones que requieren un menor esfuerzo computacional.

¿Qué aportan estos hallazgos?

Los hallazgos ofrecen una visión más profunda de la relación entre el rendimiento del control y la complejidad del diseño en los controladores ADRC, PI y PID aplicados a convertidores SEPIC. Al incorporar pérdidas resistivas internas en el modelo del convertidor y evaluar múltiples índices cuantitativos de rendimiento (IAE, ITAE, ISE e ITSE), este trabajo establece un punto de referencia para comparar estrategias de control en sistemas electrónicos de potencia. Los resultados cuantitativos confirman que el ADRC puede mejorar significativamente la precisión transitoria, reduciendo los índices de error integral hasta en un 60 %, pero a costa de un mayor esfuerzo de ajuste y un comportamiento no lineal. Los resultados proporcionan directrices valiosas para investigadores e ingenieros que buscan seleccionar o diseñar controladores basándose en el equilibrio entre velocidad, robustez y simplicidad de implementación. En definitiva, el estudio aclara el potencial práctico del ADRC como una alternativa de control robusta pero compleja, y confirma que los controladores PI siguen siendo una solución fiable y eficiente cuando se priorizan la simplicidad y la estabilidad.



Introducción

Los convertidores DC-DC desempeñan un papel clave en la electrónica de potencia moderna debido a su uso en microrredes, vehículos eléctricos, drones, dispositivos de internet de las cosas (IoT) y sistemas energéticos portátiles (1–3). Entre estos convertidores, el Convertidor de Inducción Primario de Un Solo Extremo (SEPIC) destaca por su versatilidad: puede proporcionar tensiones de salida que son mayores, menores o iguales a las de entrada, manteniendo la polaridad no invertida. Esto la hace atractiva para aplicaciones que requieren una regulación flexible del voltaje. El convertidor SEPIC también presenta ventajas como baja tensión de salida y corriente de entrada continua. Sin embargo, sufre de eficiencia limitada, mayor número de componentes y una estructura de control más compleja en comparación con otras topologías como el convertidor buck–boost. Además, su modelo de pequeña señal presenta un cero en semiplano derecho (RHP), lo que complica el diseño de controles y restringe el ancho de banda alcanzable, haciendo del convertidor un sistema no lineal difícil de regular (4,5).

Los controladores tradicionales de Proporcional–Integral (PI) y Proporcional–Integral–Derivada (PID) se utilizan ampliamente en convertidores SEPIC debido a su estructura sencilla y a sus conocidos procedimientos de sintonización. Por ejemplo (6) presenta un controlador PID optimizado mediante un algoritmo Bat, logrando una salida estable bajo variaciones de carga y entrada. No obstante, los controladores clásicos suelen mostrar una respuesta lenta o robustez limitada cuando se trata con el cero RHP y la dinámica no lineal. Estas limitaciones motivan el estudio de estrategias más avanzadas como el Control de Rechazo Activo de Perturbaciones (ADRC).

El ADRC es una estrategia de control capaz de estimar y compensar tanto perturbaciones internas como externas sin requerir un modelo exacto del sistema. Combina tres elementos principales: el Diferenciador de Seguimiento (TD), el Observador de Estado Extendido (ESO) y la Realimentación de Error de Estado No Lineal (NLSEF) (7–9). La principal ventaja del ADRC es su robustez frente a variaciones de parámetros e incertidumbres del modelo; sin embargo, se caracteriza por un comportamiento no lineal, la falta de métodos universales de ajuste y una complejidad de implementación relativamente alta. El convertidor SEPIC, con su característica de fase no mínima, proporciona un excelente punto de referencia para evaluar el potencial del ADRC en comparación con

los controladores clásicos PI y PID. Se hipotetiza que el ADRC produce un índice ITAE más bajo bajo perturbaciones de entrada, lo que mejora la estabilidad y eficiencia de los transitorios para sistemas energéticos basados en SEPIC. El criterio ITAE (Integral del Error Absoluto ponderado por el tiempo) fue seleccionado como un indicador clave de rendimiento porque penaliza los errores que persisten a lo largo del tiempo, proporcionando una representación más precisa de la respuesta transitoria y la efectividad del control en comparación con índices tradicionales como IAE o ISE.

Trabajos previos han explorado el ADRC en convertidores DC-DC con resultados prometedores. En (10), MATLAB/® Simulink™ proporciona un bloque ADRC integrado para convertidores SEPIC, logrando buen rendimiento pero con transparencia limitada, ya que los parámetros no pueden ser accedidos para su implementación en hardware digital como FPGAs. En (11), modificaciones al diferenciador de seguimiento mejoraron la respuesta del controlador, aunque las oscilaciones permanecieron en la señal de control. En (12), se utilizó un modelo SEPIC simplificado para implementar un controlador ADRC, pero no se hizo comparación con los controladores convencionales. Finalmente (13) presentó un diseño robusto de ADRC basado en un modelo de cuarto orden, pero el trabajo no informó de parámetros específicos de ajuste ni detalles de implementación. Estas limitaciones indican que aún no existen directrices claras para seleccionar controladores ADRC, PI o PID para el control de convertidores SEPIC, especialmente al considerar la precisión del modelo, el rendimiento y la complejidad de la implementación.

Este trabajo presenta un análisis comparativo de controladores ADRC, PI y PID aplicados a un convertidor SEPIC modelado con pérdidas resistivas internas en los inductores. El estudio evalúa las capacidades de seguimiento de referencia y rechazo de perturbaciones de cada estrategia de control bajo condiciones idénticas de simulación. El rendimiento se cuantifica mediante índices estandarizados IAE, ITAE, ISE e ITSE para proporcionar una comparación justa y objetiva.

Estudios recientes han abordado temas similares desde diferentes perspectivas. En (12), Kumar y Ajmeri implementaron un control basado en ADRC para un convertidor SEPIC, logrando una mejor respuesta transitoria pero sin analizar el compromiso entre el rendimiento del control y la complejidad del diseño. En (14), Patarroyo-Gutiérrez et al. modelaron el convertidor SEPIC considerando las pérdidas internas de energía, proporcionando una representación física precisa pero sin aplicar

estrategias de control avanzadas como el ADRC. Liu y otros. (15) presentó una visión general de las aplicaciones ADRC en servoaccionamientos electromecánicos, enfatizando la robustez y los desafíos de implementación, que también son relevantes para el control de convertidores DC-DC. A diferencia de estos trabajos, este artículo integra ambos aspectos: un modelo SEPIC que incluye pérdidas resistivas internas y una comparación cuantitativa de controladores ADRC, PI y PID usando índices de rendimiento estandarizados (IAE, ITAE, ISE, ITSE), analizando explícitamente el equilibrio entre complejidad de control y rendimiento. El análisis también examina si el ADRC representa una solución práctica para los convertidores SEPIC, considerando su mayor complejidad de diseño e implementación.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera:

La Sección 2 presenta el trasfondo teórico del convertidor SEPIC y el control ADRC. La sección 3 describe la metodología de diseño y la configuración de la simulación. La Sección 4 analiza los resultados obtenidos y la Sección 5 expone las principales conclusiones y las futuras líneas de investigación.

Análisis del sistema: convertidor SEPIC y controlador ADRC

Convertidor SEPIC

El convertidor SEPIC se construye mediante la interconexión de elementos de almacenamiento de energía, un interruptor, un diodo, una carga y una fuente de tensión de corriente continua. Figura 1 muestra el convertidor, incluyendo la resistencia interna de los inductores.

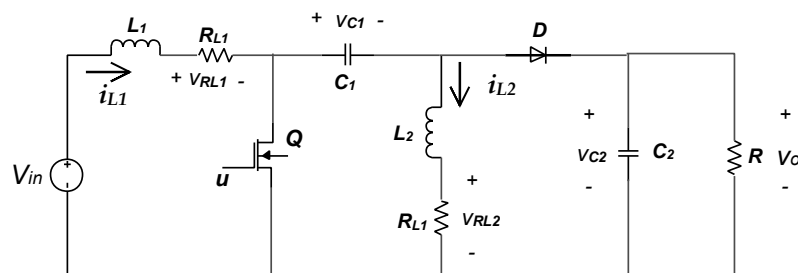


Figura 1. Convertidor SEPIC.

Para diseñar los controladores se necesita un modelo matemático del convertidor, en (14), un espacio se presenta el modelo de estado para el convertidor SEPIC.

El modelo del convertidor SEPIC se presenta en Equation (1).

$$\begin{aligned}
 L_1 \cdot \frac{di_{L1}}{dt} &= V_{in} - R_{L1} \cdot i_{L1} - (v_{C1} + v_{C2}) \cdot (1 - u) \\
 C_1 \cdot \frac{dv_{C1}}{dt} &= i_{L2} \cdot \alpha + i_{L1} \cdot (1 - u) \\
 L_2 \cdot \frac{di_{L2}}{dt} &= -R_{L2} \cdot i_{L2} - v_{C1} \cdot \alpha + v_{C2} \cdot (1 - u) \\
 C_2 \cdot \frac{dv_{C2}}{dt} &= (i_{L1} - i_{L2}) \cdot (1 - u) - \frac{1}{R} \cdot v_{C2}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Controlador ADRC

El controlador ADRC se presenta como una estrategia de control robusta que no depende de un modelo de sistema exacto. Para realizar las acciones de control, el ADRC se basa en tres componentes principales: el Diferenciador de Seguimiento (TD), el Observador de Estado Extendido (ESO) y la Retroalimentación de Error de Estado No Lineal (NLSEF). Internamente, ADRC utiliza las funciones no lineales fhan y fal. Ecuaciones (2) a través de (8) Describe la función de FHAN (7,15). Aquí, b_0 representa la ganancia de entrada de la planta, r_0 el ancho de banda del observador y h_0 el coeficiente diferenciador de seguimiento.

$$d = h_0 r_0^2, a_0 = h_0 v_2; y_0 = v_1 + a_0 \tag{2}$$

$$a_1 = \sqrt{d(d + 8|y|)} \tag{3}$$

$$a_2 = a_0 + \text{sign}(y)(a_1 - d)/2 \tag{4}$$

$$s_y = (\text{sign}(y + d) - \text{sign}(y - d))/2 \tag{5}$$

$$a = (a_0 + y - a_2)s_y + a_2 \tag{6}$$

$$s_a = (\text{sign}(a + d) - \text{sign}(a - d))/2 \tag{7}$$

$$fhan(v2, v2, r_0, h_0) = -r_0 \left(\frac{a}{d} - \text{sign}(a) \right) s_a - r_0 \text{sign}(a) \quad (8)$$

La función fal se presenta en Ecuación (9).

$$fal(e, \alpha, \partial) = \begin{cases} \frac{e}{\partial^{1-\alpha}}, & |x| \leq \partial \\ |e|^\alpha \text{sign}(e), & |x| \geq \partial \end{cases} \quad (9)$$

Las secciones 2.2.1 y 2.2.2 ofrecen una breve introducción al Diferenciador de Seguimiento y al Observador de Estado Extendido, respectivamente, y presentan sus representaciones matemáticas.

Diferenciador de seguimiento (TD)

Es responsable de generar una trayectoria de referencia suave y de calcular su derivada, permitiendo al controlador producir transiciones graduales y evitar cambios bruscos. Esto ayuda a evitar la amplificación de las mediciones de ruido, que es un problema común en los controladores PID. Existen varios métodos para generar trayectorias de referencia; en Ecuación (10), la forma tradicional presentada en (7) se utiliza.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -r * \text{sign}(x_1 - v(t) + \frac{x_2 |x_2|}{2r}) \end{aligned} \quad (10)$$

Observador de Estado Extendido (ESO)

El Observador de Estado Extendido (ESO) compensa y estima las perturbaciones casi en tiempo real. Estima tanto los estados internos del sistema como las perturbaciones no modeladas. El ESO utilizado se presenta en Equation (11); es la misma estructura propuesta en (7).

$$\begin{aligned} e &= z_1 - y \\ fe &= fal(e, 0.5, \partial), \quad fe_1 = fal(e, 0.25, \partial) \\ \dot{z}_1 &= z_2 - B_{01}e \\ \dot{z}_2 &= z_3 + bu - B_{02}e \\ \dot{z}_3 &= -B_{03}fe_1 \end{aligned} \quad (11)$$

La siguiente sección describe la metodología utilizada para diseñar los controladores que regulan el voltaje de salida del convertidor.

Metodología

El convertidor SEPIC está implementado en código MATLAB y luego llamado en Simulink como bloque de funciones MATLAB. Este bloque puede recibir y entregar cuatro señales multiplexadas, una para cada variable de estado.

La Tabla 1 muestra los parámetros del convertidor utilizado en este trabajo, que opera a una potencia nominal de 2 kW.

Tabla 1. Parámetros del convertidor.

Parámetro	Símbolo	Valor
Potencia de carga	P	2 kW
Tensión de entrada DC	V_{in}	90 V
Frecuencia de conmutación	f_s	50 kHz
Tensión de salida DC	v_{c2}	48 V
L_1 and L_2 Inductores	L_1, L_2	80 μ H
Resistencia interna del inductor L_1 and L_2	R_{L1}, R_{L2}	50 m Ω
C_1 condensador	C_1	330 μ F
C_2 condensador	C_2	680 μ F
Carga (resistencia)	R	1.15 Ω

La implementación del controlador ADRC se lleva a cabo en *MATLAB/® Simulink™*. Figura 2 muestra el sistema implementado. Dado que el sistema a controlar es de tipo cero, es necesario añadir una acción integral al ADRC.

El convertidor utiliza dos entradas: la primera es una señal PWM que controla la conmutación del MOSFET, y la segunda es el voltaje de entrada de la fuente de alimentación.

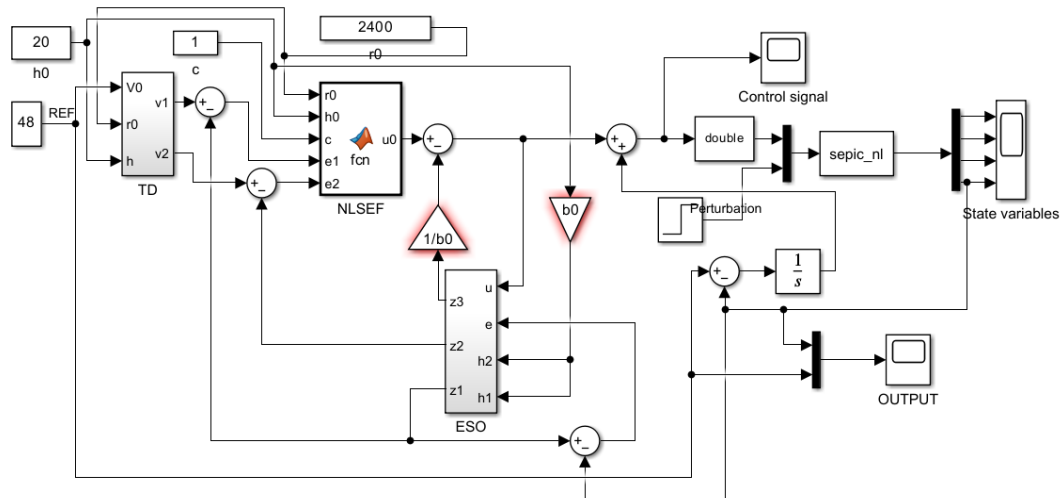


Figura 2. Convertidor SEPIC con ADRC

Figura 3 presenta el diagrama de bloques de la implementación de ESO. El estimador incluye las ganancias b_0 , $Bt01$, $Bt02$, $Bt03$.

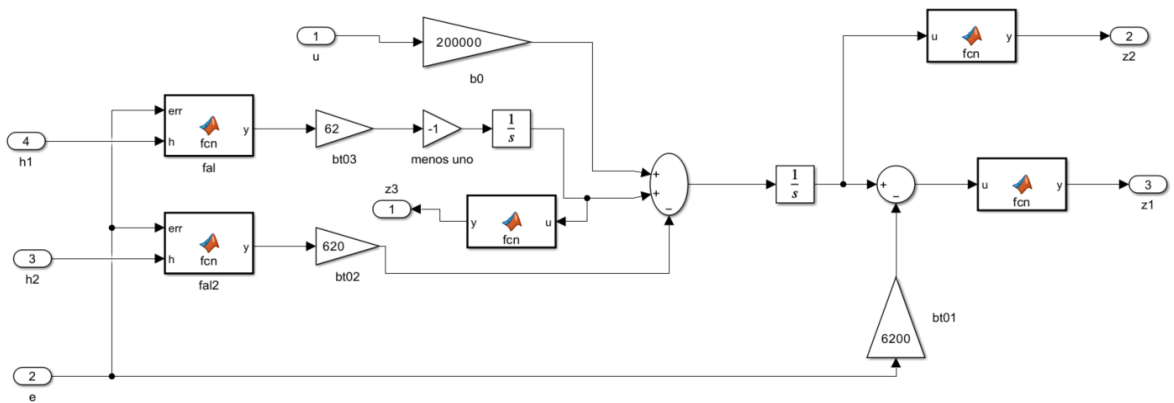


Figura 3. ESO implementado

La implementación del Diferenciador de Seguimiento mostrada en Figura 4. Este bloque es responsable de generar una trayectoria de referencia suave para el NLSEF.

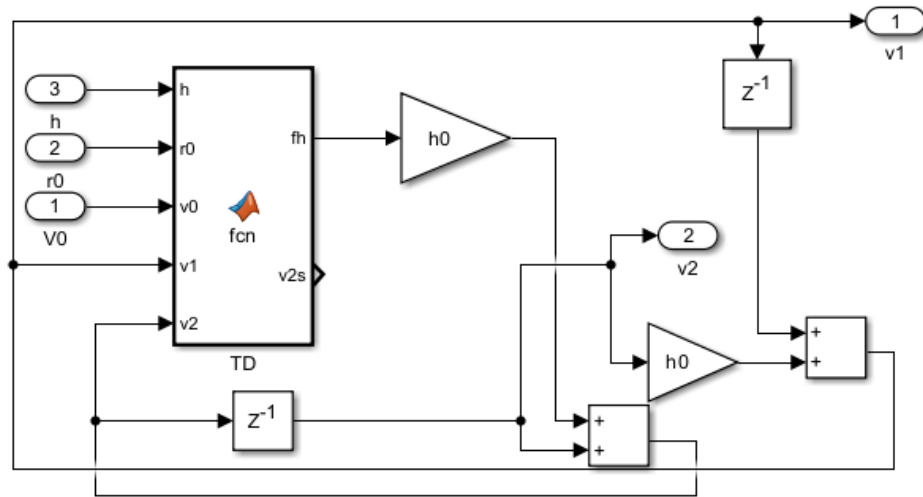


Figura 4. Diferenciador de seguimiento implementado

Implementación de PID y PI

Figura 5 muestra el convertidor SEPIC de lazo cerrado con un controlador PI, PID tiene la misma implementación.

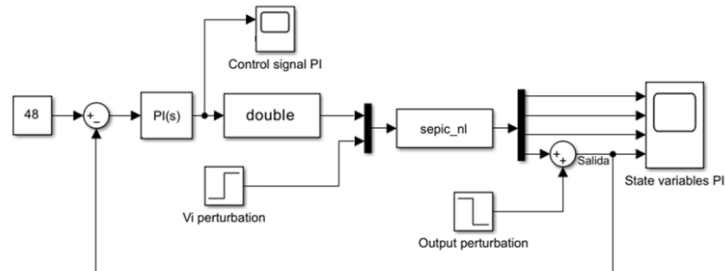


Figura 5. Convertidor SEPIC y PI

La sintonización de los controladores PI y PID sigue el mismo modelo dinámico del convertidor SEPIC presentado en (14), Asegurando la compatibilidad de parámetros con la configuración del convertidor de esta obra. Los parámetros del controlador PI se muestran en Ecuaciones (12) y (13) y los parámetros usados para el controlador PID pueden verse en Ecuaciones (14), (15) y (16).

$$K_{p1} = 0.00035 \quad (12)$$

$$K_{i1} = 0.686 \quad (13)$$

$$K_{p2} = 0.00035 \quad (14)$$

$$K_{i2} = 0.686 \quad (15)$$

$$K_d = 0.0001 \quad (16)$$

Diseño ADRC

El diseño del ADRC comienza calculando la frecuencia natural del convertidor a partir de su modelo, que en este caso es 6200 rad/s. Dado que el convertidor tiene una fase cero no mínima, es muy sensible al ruido. En este contexto, se sabe que Bt01 mejora la precisión de la estimación de salida, Bt02 mejora la respuesta dinámica y Bt03 incrementa la velocidad de detección de perturbaciones, aunque también hace que el sistema sea más sensible al ruido y a los errores de modelado. Se realizó un proceso de ajuste fino iterativo ajustando cada parámetro hasta que se observó una respuesta transitoria satisfactoria, según los criterios de minimización y reducción de sobrepaso de ITAE. Aunque empírico, este enfoque aseguró un mejor comportamiento dinámico bajo perturbaciones, los parámetros óptimos propuestos para el convertidor SEPIC (Bt01, Bt02 y Bt03) se presentan en Ecuaciones (17), (18) y (19).

$$Bt01 = w_0 = 6200 \quad (17)$$

$$Bt02 = w_0/10 = 620 \quad (18)$$

$$Bt03 = w_0/100 = 62 \quad (19)$$

Respecto a b_0 , la literatura sugiere que debería ser igual o ligeramente mayor que la ganancia del sistema (16). La ganancia en lazo abierto de este convertidor SEPIC en el punto de operación, de los

parámetros de la tabla 1, es 61000; Por lo tanto, B_0 se define tal y como se muestra en la ecuación (20):

$$b_0 = g = 61000 \quad (20)$$

El parámetro r_0 determina la tasa máxima de cambio de la señal de referencia. En este caso, la tasa requerida es de 48 V cada 20 ms. El valor de r_0 se muestra en Ecuación (21).

$$r_0 = \frac{48}{20mS} = 2400 \quad (21)$$

El parámetro C contribuye a la estabilidad del ADRC y mejora la capacidad del sistema para rechazar las perturbaciones estimadas por el ESO, ya que reescala efectivamente la entrada de control (17). Un valor mayor de C resulta en una respuesta del sistema más rápida, mientras que un valor menor conduce a una dinámica más lenta. Sin embargo, si C es demasiado grande, puede amplificar la medición del ruido y provocar un esfuerzo de control indeseable. Por lo tanto, C suele ajustarse en función de la constante de tiempo deseada del sistema de lazo cerrado. En este caso, se selecciona un tiempo de control del objetivo de aproximadamente 20 ms, como se muestra en la Ecuación (22).

$$C = \frac{1}{3 * T} = \frac{1}{3 * 20mS} = 16.67 \quad (22)$$

En este caso, con un valor de $C=16,67$, el sistema alcanza la referencia; sin embargo, la señal de control presenta oscilaciones excesivas tanto en frecuencia como en magnitud. Por lo tanto, el parámetro C estaba finamente ajustado. El valor final utilizado en este trabajo se presenta en Equation (23). Con este valor, el sistema alcanza la referencia en el mismo tiempo que con $C=120$, pero con una señal de control significativamente más suave.

$$C = 1 \quad (23)$$

El parámetro h_0 controla el ancho de banda del diferenciador de seguimiento (TD). Un valor mayor aumenta la capacidad de respuesta del TD, lo cual es necesario en sistemas rápidos para evitar el retraso de fase y asegurar una estimación precisa de la derivada (18),(7). Documentación de MathWorks (19) se centra en ajustar el ancho de banda del Observador de Estado Extendido (ESO), y principios similares se aplican al TD. Específicamente, se recomienda que los componentes internos

del ADRC (como el TD y el ESO) operen significativamente más rápido que la dinámica del sistema, típicamente por un factor de 5 a 10. A partir de esto, el parámetro h_0 está ajustado a un valor de 20, como se muestra en la Ecuación (24).

$$h_0 = 20 \quad (24)$$

La Tabla 2 resume los parámetros del ADRC obtenidos. Las simulaciones se realizaron en MATLAB/Simulink con un solucionador de pasos fijos usando el método Runge–Kutta (ode45), paso de integración de $1e-6$ s y tiempo total de simulación de 0,2 s. No se implementó ninguna estrategia anti-cuerda para controladores PI/PID.

Tabla 2. Parámetros ADRC

Parámetro	Valor
$Bt01$	6200
$Bt02$	620
$Bt03$	62
b_0	61000
$r0$	2400
C	1
h_0	20

El rendimiento de cada controlador se evaluó utilizando los índices en el dominio del tiempo IAE, ITAE, ISE e ITSE, calculados a partir del error de seguimiento. Como se muestra en $e(t) = v_{ref}(t) - v_{out}(t)$ **Figura 6.** Diagrama de bloques utilizado para calcular índices de rendimiento (IAE, ITAE, ISE e ITSE)., el error se integró durante el periodo de simulación, y en ITAE e ITSE se multiplicó por el tiempo para penalizar las desviaciones persistentes. Esta implementación de Simulink garantiza resultados numéricos consistentes y permite una comparación justa entre los controladores ADRC, PI y PID. Tt

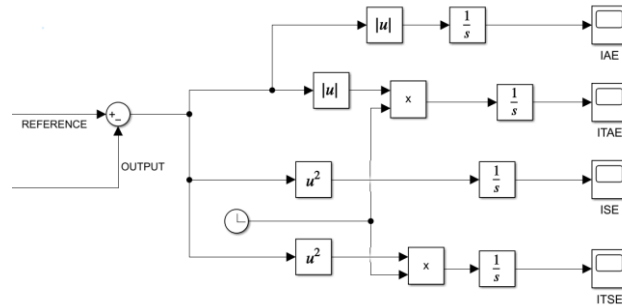


Figura 6. Diagrama de bloques utilizado para calcular índices de rendimiento (IAE, ITAE, ISE e ITSE).

Resultados y discusión

Figura 7. Voltaje de salida del convertidor SEPIC con controladores PI, PID y ADRC (Rango de tiempo: 0–200 ms) muestra la tensión de salida de un convertidor SEPIC controlado por controladores ADRC, PI y PID, la referencia es 48 V. A 0,12 segundos, se aplica una perturbación a la fuente de alimentación de entrada, provocando un cambio repentino de 90 V a 95 V. Luego, a 0,16 segundos, una perturbación de –Se aplican 10 V directamente a la salida del sistema.

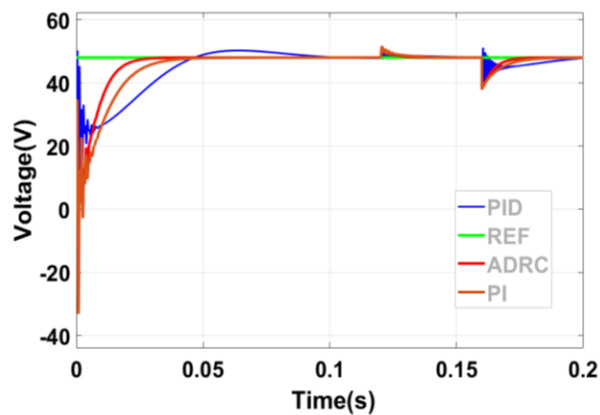


Figura 7. Voltaje de salida del convertidor SEPIC con controladores PI, PID y ADRC (Rango de tiempo: 0–200 ms)

Figura 8. Voltaje de salida del convertidor SEPIC con controladores PI, PID y ADRC (0-120 ms) muestra la misma salida que Figura 7, pero con un eje temporal modificado que va de 0 a 0,11 segundos, justo antes de que ocurran las perturbaciones. Este zoom permite un análisis detallado del rendimiento de

seguimiento de referencia de los controladores. Se pueden evaluar parámetros como el tiempo de asentamiento, el sobrepaso y el ruido en estado estacionario. Tanto los controladores ADRC como PI producen inicialmente tensiones de salida negativas debido a la característica de fase cero no mínima del convertidor SEPIC. El PID mitiga la subsubpotencia causada por la fase cero no mínima, reduciendo su efecto sobre la respuesta transitoria. Sin embargo, según la teoría de control, un cero en semiplano derecho no puede ser cancelado por un controlador causal. Sin embargo, presenta la respuesta más lenta, con un tiempo de asentamiento de aproximadamente 100 ms. El controlador ADRC se estabiliza mucho más rápido, alrededor de 25 ms, seguido por el controlador PI, que se estabiliza en unos 40 ms.

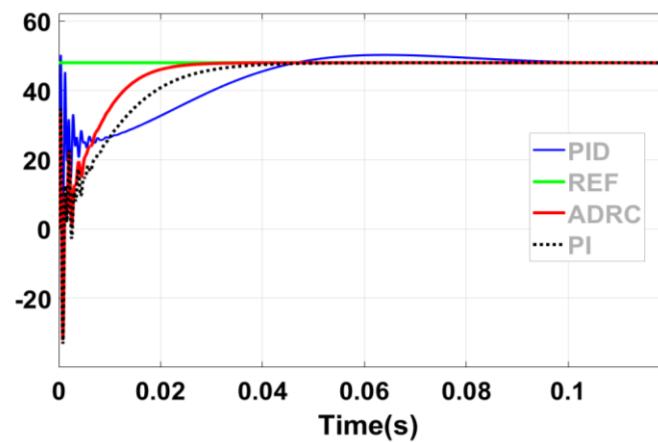


Figura 8. Voltaje de salida del convertidor SEPIC con controladores PI, PID y ADRC (0-120 ms)

Figura 9 muestra la respuesta de los controladores a la primera perturbación, que es un cambio repentino en la tensión de entrada del convertidor de 90 V a 95 V. El ADRC rechaza la perturbación en aproximadamente 20 ms, el PI en 25 ms y el PID en 40 ms. El controlador PID muestra el sobrepaso más pequeño, mientras que los controladores PI y ADRC muestran niveles similares de sobrepaso.

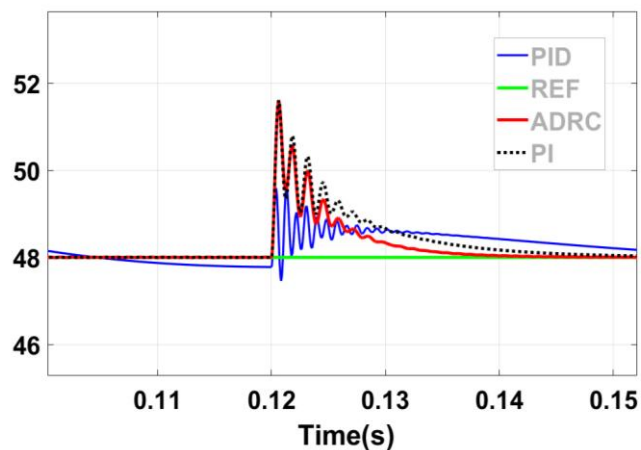


Figura 9. Voltaje de salida del convertidor SEPIC con controladores PI, PID y ADRC (Rango de tiempo: 100-150 ms)

Figura 10 muestra la respuesta de los controladores a una perturbación de tensión de salida, que consiste en una caída de 10 V. En este caso, el ADRC reacciona en aproximadamente 15 ms sin sobrepaso, el controlador PI responde en 20 ms, también sin sobrepaso, y el controlador PID tarda alrededor de 40 ms, mostrando un exceso considerable.

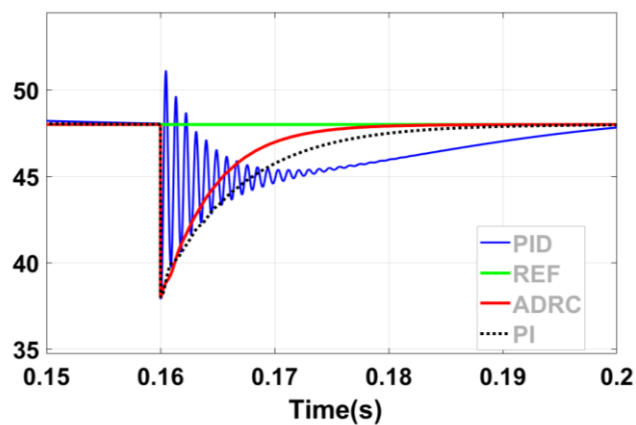


Figura 10. Voltaje de salida del convertidor SEPIC con controladores PI, PID y ADRC (Rango de tiempo: 150-200 ms)

Figura 11 presenta las señales de control de cada uno de los controladores (en este caso, el ciclo de trabajo PWM). Estas señales corresponden a la misma ventana temporal mostrada en Figura 7,

incluyendo la respuesta inicial, así como la primera y segunda perturbación. Se puede observar que la señal de control PID muestra picos que alcanzan 0,5 (ciclo de trabajo del 50%), especialmente durante las perturbaciones, mostrando un comportamiento coherente con su sobrepaso en la tensión de salida. En cambio, los controladores PI y ADRC producen señales de control sin exceso, lo cual es especialmente evidente durante las perturbaciones. Aunque puede no ser claramente visible, la señal de control del ADRC presenta oscilación persistente, esta oscilación en la señal de control del ADRC podría afectar la implementación en sistemas embebidos con resolución o ancho de banda de actuador limitados. Este comportamiento, aunque típico del ADRC, podría mitigarse reduciendo el ancho de banda del TD (h_0) o ajustando las ganancias del ESO.

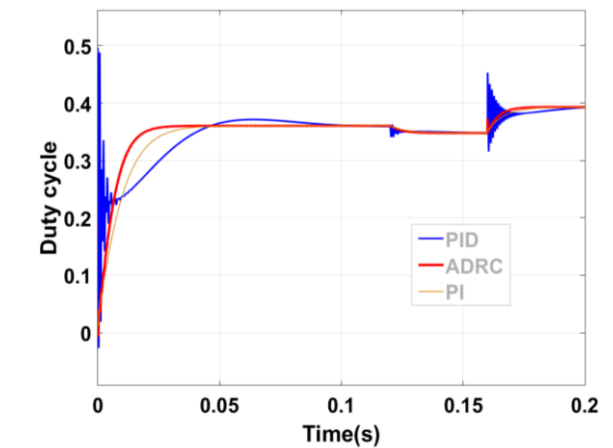


Figura 11. Señales de control de controladores PI, PID y ADRC

Se realizaron pruebas adicionales con diferentes voltajes de entrada (50 V, 60 V, 70 V y 85 V). Dado que el sistema mostró un comportamiento similar en todos los casos, los resultados correspondientes no se incluyen por brevedad.

Figura 12 presenta el índice IAE para los controladores ADRC, PI y PID. Se puede observar que el controlador ADRC presenta el menor error acumulado, seguido del controlador PI, mientras que el controlador PID funciona peor en general.

En cuanto a la respuesta a la perturbación, los controladores ADRC y PI se comportan de manera similar. El controlador PID funciona mejor durante la perturbación de tensión de entrada; sin embargo,

durante la segunda perturbación, acumula error más lentamente pero finalmente supera los niveles de error tanto de ADRC como de PI.

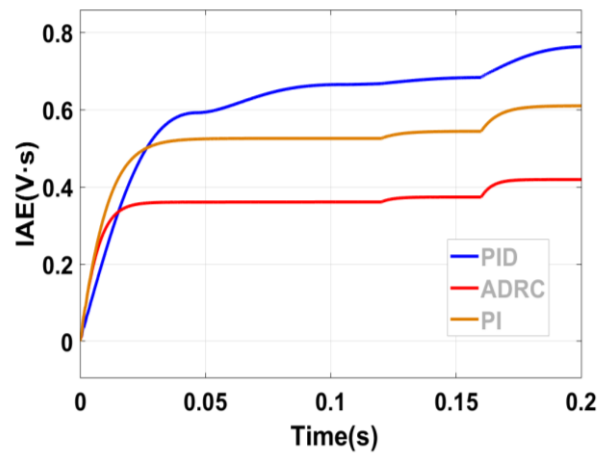


Figura 12. IAE de controladores PID, ADRC y PI

Figura 13 muestra que el controlador ADRC acumula el menor error ITAE, seguido del controlador PI. El controlador PID, en cambio, acumula más de tres veces el error del ADRC. Durante los eventos de perturbación, el ADRC demuestra el mejor rendimiento, seguido por el PI, siendo el PID el peor desempeño.

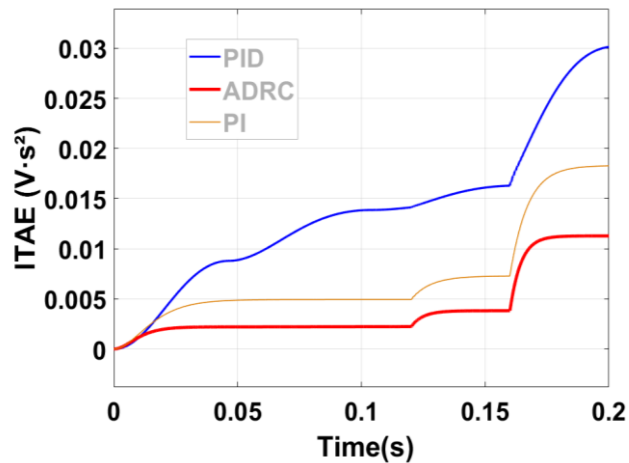


Figura 13. ITAE de controladores PID, ADRC y PI

Figura 14 muestra que el controlador ADRC alcanza el ISE más bajo, seguido de cerca por el controlador PID, con el controlador PI mostrando el valor más alto. Durante los eventos de perturbación, el controlador PID acumula el menor error, seguido de ADRC, mientras que PI sigue siendo el menos efectivo en esta métrica.

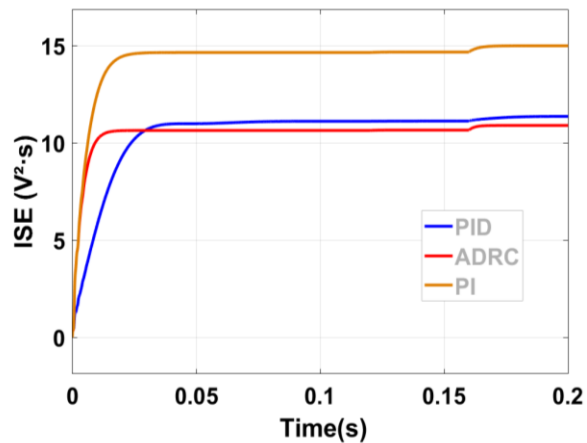


Figura 14. ISE de controladores PID, ADRC y PI

Figura 15 muestra que el controlador ADRC acumula el ITSE más bajo, seguido por el controlador PI, que muestra casi el doble de error, y finalmente el controlador PID, con más de tres veces el error.

En cuanto a la respuesta a las perturbaciones, el controlador PID acumula el menor error, seguido de ADRC y finalmente PI muestra un comportamiento similar al ADRC pero con valores ligeramente superiores.

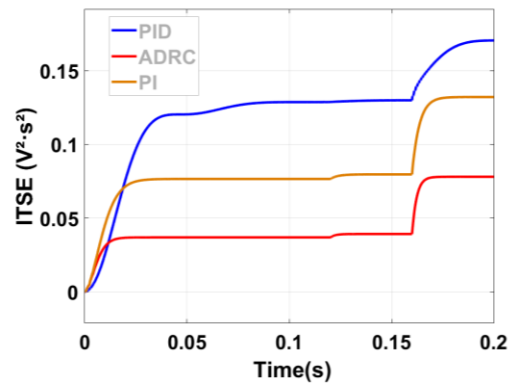


Figura 15. ITSE de controladores PID, ADRC y PI

A partir de las Figuras 12 a 15, se puede concluir que el controlador ADRC es el más eficaz tanto en seguimiento de referencia como en rechazo de perturbaciones, seguido de cerca por el controlador PI, que muestra un rendimiento comparable en varios indicadores. El controlador PID es el que funciona peor en general, mostrando un seguimiento de referencia más lento y un mayor error acumulado. Sin embargo, muestra una respuesta más suave a las perturbaciones, lo que puede ser ventajoso en sistemas con hardware sensible o de actuación limitada.

Conclusiones

En este trabajo, se diseñó y simuló un Controlador de Rechazo de Perturbaciones Activas (ADRC) para un convertidor SEPIC, y su rendimiento se comparó con el de controladores PI y PID. Los resultados muestran que el ADRC proporciona el seguimiento de referencia más rápido, el menor error acumulado y la mejor capacidad de rechazo de perturbaciones. Sin embargo, debido al cero en semiplano derecho inherente al convertidor SEPIC, el ADRC no puede eliminar completamente la subsumisión inicial. El controlador PID mitiga este efecto mediante su acción derivada, pero con una respuesta transitoria más lenta. El controlador PI, a su vez, ofrece un rendimiento intermedio con un buen compromiso entre velocidad, simplicidad y estabilidad.

Del análisis se puede concluir que, si se requiere un seguimiento rápido y un fuerte rechazo de perturbaciones, el ADRC representa la alternativa más eficaz. No obstante, su estructura no lineal y su

complejidad de afinación hacen que la implementación sea más exigente en comparación con los controladores clásicos. Cuando la simplicidad del diseño y la reducción del coste computacional son prioridades, el controlador PI sigue siendo una opción práctica y eficiente. El controlador PID, aunque más lento, proporciona una actuación más suave, lo que puede ser ventajoso en convertidores con ancho de banda de conmutación limitado o actuadores sensibles.

La principal contribución de este trabajo radica en la inclusión de pérdidas resistivas internas en el modelo SEPIC y en la comparación cuantitativa estandarizada de controladores ADRC, PI y PID a través de los índices IAE, ITAE, ISE e ITSE. Los resultados obtenidos sirven como referencia para la selección de controladores en sistemas de conversión de potencia basados en SEPIC y destacan el equilibrio entre rendimiento y complejidad de implementación.

Los trabajos futuros se centrarán en validar estos resultados en un entorno en tiempo real o hardware-in-the-loop (HIL) y en analizar el impacto del ruido de medición y las restricciones de implementación digital en la estructura del ADRC. Además, investigaciones adicionales podrían explorar la sintonización adaptativa o estructuras simplificadas del observador para reducir el comportamiento oscilatorio observado en ADRC y mejorar su aplicabilidad a sistemas embebidos.

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Oscar Humberto Sierra Herrera, Luis David Patarroyo Gutiérrez, Mario Eduardo González Niño. Curación de datos: Oscar Humberto Sierra Herrera Mario Eduardo González Niño. Investigación: Oscar Humberto Sierra Herrera, Luis David Patarroyo Gutiérrez, Mario Eduardo González Niño. Metodología: Oscar Humberto Sierra Herrera, Luis David Patarroyo Gutiérrez, Mario Eduardo González Niño. Dirección de Proyecto: Oscar Humberto Sierra Herrera, Mario Eduardo González Niño. Recursos: Oscar Humberto Sierra Herrera, Luis David Patarroyo Gutiérrez, Mario Eduardo González Niño Supervisión: Oscar Humberto Sierra Herrera, Luis David Patarroyo Gutiérrez, Mario Eduardo González Niño. Validación: Oscar Humberto Sierra Herrera, Luis David Patarroyo Gutiérrez. Redacción - borrador original - Elaboración: Oscar Humberto Sierra Herrera, Luis David Patarroyo Gutiérrez, Mario Eduardo González Niño. Redacción, revisión y edición - Preparación: Oscar Humberto Sierra Herrera, Luis David Patarroyo Gutiérrez, Mario Eduardo González Niño.

Financiación: no declara. Conflicto de intereses: no declara. Aspectos éticos: no declara.

Referencias

1. Abolghasemi M, Soltani I, Shivaie M, Vahedi H. Avances recientes de los convertidores DC-DC de varias etapas de mejora progresiva: Revisión sobre clasificaciones, estructuras y aplicaciones de la red eléctrica. *Informes energéticos*. 2025; 13:3050–81.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.02.025>
2. Wang R, Feng W, Nordman B, Gerber D, Li Y, Kang J, et al. Estándares tecnológicos para microrredes de corriente continua en edificios: una revisión. *Renew Sustain Energy Rev*. 2025;211:115278. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115278>
3. Venkatesan M, R N, Kacor P, Vrzala M. Transferencia inalámbrica bidireccional de energía: Conectando vehículos eléctricos y la red mediante análisis de convertidores, topologías de bobinas y revisión de protocolos de comunicación. *Resultados Eng*. 2025;25:103803. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103803>
4. Yadav A, Verma A. Convertidor SEPIC DC–DC: Revisión de diferentes técnicas y aplicaciones de aumento de tensión. 2020; 733–9.
doi:10.1109/ICIMIA48430.2020.9074897
5. Nazlıgül H, Mert ME, Edis C, Demir BN, Gurdal Y, Elattar KM, entre otros. Estudio experimental y computacional de un sistema de electrólisis alimentado por energía solar con un convertidor SEPIC para la producción de hidrógeno verde. *Energía solar*. 2025;298:113664. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113664>
6. Khather S, A. Ibrahim M. Modelado y simulación de convertidor controlado por SEPIC usando controlador PID. *Int J Power Electron Drive Syst*. 2020; 11:833–43.
doi:10.11591/ijped.v11.i2.pp833-843
7. Han J. Desde la PID hasta el control activo de rechazo de perturbaciones. *IEEE Trans Ind Electron*. 2009; 56(3):900–6. doi:10.1109/TIE.2008.2011621

8. Tu YH, Wang RF, Su WH. Control activo del rechazo de perturbaciones—Nuevas tendencias en cibernética agrícola en el futuro: una revisión exhaustiva. *Máquinas*. 2025; 13(2). doi:10.3390/machines13020111
9. Fareh R, Khadraoui S, Abdallah MY, Baziyad M, Bettayeb M. Control activo de rechazo de perturbaciones para sistemas robóticos: Una revisión. *Mecatrónica*. 2021;80:102671. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2021.102671>
10. The MathWorks Inc. 2024. 2024 [citado 15 de junio de 2025]. Diseña el control activo de rechazo de perturbaciones para el convertidor SEPIC. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/slcontrol/ug/design-adrc-for-sepic-converter.html>
11. Awad N, Humaidi A, Al-Araji A. Diferenciador de seguimiento modificado para mejorar el rendimiento del sistema exoesqueleto de rodilla basado en el control activo de rechazo de perturbaciones. *Juez de Ingeniería de la Universidad de Bagdad* 2023; 23:69–83. doi:10.33103/uot.ijccce.23.1.6
12. Kumar P, Ajmeri M. Control de Rechazo de Perturbaciones Activas de un Convertidor SEPIC. Shaw RN, Siano P, Makhilef S, Ghosh A, Shimi SL, editores. *Innov Electr Electron Eng*. 2024; 367–80. doi:https://doi.org/10.1007/978-981-99-8289-9_28
13. Kumar P, Ajmeri M. Control robusto de un convertidor inductor primario de extremo simple usando técnica ADRC. *Eng Res Express*. diciembre de 2023; 6(1):15010. doi:10.1088/2631-8695/AD153E
14. Patarroyo-Gutiérrez LD, González-Niño ME, Plazas JA. Convertidor SEPIC: Modelado y control teniendo en cuenta las pérdidas internas de energía. *Competir con la competencia*. 2024;26. doi:<https://doi.org/10.25100/iyv.v26i1.13016>
15. LIU C, LUO G, CHEN Z, DING X. Visión general sobre el control de rechazo de perturbaciones activas para servoaccionamiento electromecánico. *J Aeronaut chino*. 2025; 38(7):103292. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.11.002>

16. Herbst G, Madonski R. Control del rechazo activo de perturbaciones: de principios a práctica. 2025. doi:10.1007/978-3-031-72687-3
17. Tian G, Gao Z. Análisis de respuesta en frecuencia de un sistema de control basado en rechazo activo de perturbaciones. Aplicación de Control de la Conferencia Internacional IEEE 2007 2007 Oct; 1595–9. doi:10.1109/CCA.2007.4389465
18. Herbst G. Análisis de la función de transferencia e implementación del control activo del rechazo de perturbaciones. Teoría de Control Technol. 2021 feb; 19(1):19–34. doi:10.1007/s11768-021-00031-5
19. MathWorks Inc. diseña el control activo de rechazo de perturbaciones para el convertidor de sobrealimentación [Internet]. 2025 [citado 23 de febrero de 2025]. Disponible en: www.mathworks.com/help/slcontrol/ug/design-adrc-for-boost-converter.html