

Artículo

# Comparación de Sintonización PID: Respuesta en Frecuencia, Ubicación de Polos y Ceros

Chavez-Sanchez O.<sup>1</sup>, Elizondo-Tagui A.<sup>2</sup>, Hernandez-Paredes-J.M.<sup>3</sup>, Muñoz-Barron-B.<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup> Estudiante de Ingeniería Mecatrónica, Tecnológico Nacional de México campus Huichapan/Instituto Tecnológico Superior Huichapan, Ingeniería Mecatrónica, México

<sup>3,4</sup> División de Ingeniería Mecatrónica y Maestría en Ingeniería Mecatrónica; Tecnológico Nacional de México, Campus Huichapan/ITESHU, Ingeniería Mecatrónica, México.

Correspondencia: a20021235@iteshu.edu.mx

**Resumen:** Este artículo tiene como objetivo comparar dos métodos de sintonización para controlar la posición de un motor con encoder, utilizando sintonización por el método de respuesta en frecuencia y ubicación de polos y ceros. Se desarrolla una interfaz gráfica en Python utilizando la biblioteca Qt para la interacción con el usuario y la representación visual de los datos obtenidos de los controladores. Se emplea un enfoque experimental para evaluar y comparar ambos métodos. Los resultados obtenidos se presentan mediante gráficos y análisis cuantitativos, destacando las diferencias en el rendimiento y la estabilidad de los sistemas controlados. Las conclusiones de este estudio permiten determinar la adecuación de cada método para aplicaciones específicas de control, proporcionando una guía práctica para la selección y aplicación efectiva de técnicas de sintonización de controladores PID.

**Keywords:** *Sintonización; PID; Python.*

Chavez,Sanchez,  
O..Elizondo,Tagui  
A.Hernandez,Paredes,J.  
Muñoz,Barron,B. Comparación  
de Sintonización PID: Respuesta  
en Frecuencia, Ubicación de  
Polos y Ceros

REÍA 2023, 7, (1), 1-10

Recibido: 24/11/2023

Aceptado: 22/12/2023

Publicado: 31/12/2023

## 1. Introducción

El diseño y la optimización de controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID) son fundamentales en el campo de la ingeniería de control para garantizar un rendimiento óptimo en una variedad de sistemas dinámicos [1]. El avance continuo en la ingeniería de control ha dado lugar a la evolución y adopción de distintos métodos para la optimización de controladores [2].

Uno de los métodos significativos en la sintonización de controladores fue propuesto utilizando el Fulscope 100 de Taylor Instrument. Este método, conocido por su enfoque de ubicación de polos y ceros, representó un avance fundamental en la automatización industrial al ofrecer una metodología sistemática para ajustar los parámetros de un controlador PID [3].

Desde su introducción, el método de ubicación de polos y ceros ha sido ampliamente utilizado en la sintonización de controladores en diversos procesos industriales. Su enfoque en la colocación estratégica de los polos y ceros en el dominio del tiempo o frecuencia permite adaptar el comportamiento del controlador a las características específicas del sistema. No obstante, la determinación precisa de estos puntos puede ser desafiante en entornos reales debido a la presencia frecuente de ruido y perturbaciones, lo que dificulta el cálculo preciso de dichos puntos de ubicación [4-5].

En el extenso dominio de la ingeniería de control, ajustar los controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) ha sido crucial para asegurar el desempeño ideal de sistemas en constante movimiento [6]. Un método común en la calibración de controladores PID para sistemas básicos está centrado en el método de Bode ya que ha surgido como una herramienta fundamental para el análisis y la sintonización de controladores PID, ofreciendo una perspectiva invaluable en el dominio de la respuesta en frecuencia de los sistemas [7].

El método de Bode se basa en el análisis de la respuesta en frecuencia de un sistema, revelando su comportamiento en términos de ganancia y fase a lo largo de un rango de frecuencias. Esta técnica proporciona una representación clara y visual de cómo el sistema responde a diferentes frecuencias de entrada, mostrando la relación entre la señal de entrada y la salida en función de la frecuencia.

La sintonización de un controlador PID mediante el método de Bode implica el ajuste de la ganancia y el ángulo de fase del controlador para lograr una respuesta en frecuencia deseada. Identificar las frecuencias de cruce de ganancia y fase se vuelve esencial, ya que estos puntos indican la frecuencia a la cual el sistema podría tornarse inestable o presentar retrasos en la respuesta [8-9].

El diagrama de Bode, compuesto por gráficos de ganancia y fase, se convierte en una herramienta esencial al utilizar este método. La ganancia se representa en una escala logarítmica, permitiendo identificar cómo amplifica o atenúa el sistema las diferentes frecuencias de entrada [10].

Este estudio se enfoca en la comparación de dos métodos prominentes de sintonización de controladores PID: el método clásico de ubicación de polos y ceros y el enfoque basado en la sintonización de Bode. La aplicación de estos métodos difiere según el sistema a controlar.

El objetivo principal de este trabajo es analizar, comparar y evaluar la eficacia de los métodos de sintonización de controladores PID mencionados anteriormente en sus respectivas aplicaciones, ofreciendo así una contribución significativa al campo de la ingeniería de control.

## **2. Materiales y Métodos**

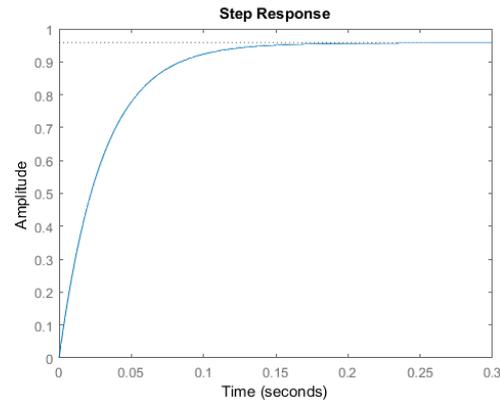
Se abordó la sintonización de controladores PID utilizando dos métodos: el método de sintonización de Bode y el método de ubicación de polos y ceros. Se destacó su aplicación en el proceso de sintonización basado en modelos teóricos y su aplicación directa a la planta para ajustar el comportamiento del sistema.

### **2.1 Estudio preliminar**

El control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es una técnica ampliamente utilizada en la ingeniería de control debido a su versatilidad y capacidad para mantener la estabilidad y precisión en una amplia gama de sistemas. Dos enfoques notables para sintonizar controladores PID son los métodos de Bode y ubicación de polos y ceros. Ambos métodos de sintonización serán evaluados para el control de posición de un motor con encoder: el método de ubicación de polos y ceros se empleó mediante un enfoque teórico basado en ecuaciones, mientras que el método de Bode se aplicó directamente al sistema para analizar su comportamiento a diferentes frecuencias, con uso de matlab.

### **2.2 Aproximación del modelo matemático de la planta**

El sistema consiste en un motor de corriente directa con encoder, para obtener la función de transferencia se aproximó mediante una prueba escalón para identificar la curva característica de respuesta y estimando la constante de tiempo de respuesta y el valor en estado estacionario como se muestra en la **Figura 1**.



**Figura 1. Gráfica prueba escalón.**

Estas pruebas fueron realizadas para generar un archivo de datos con los datos de la respuesta del sistema. Posteriormente, estos datos fueron procesados y graficados en MATLAB, para estimar la función de transferencia del sistema la cual se utilizó como base en los dos métodos de sintonización a evaluar: la respuesta en frecuencia mediante el método de Bode y el método de ubicación de polos y ceros.

## 2.4 Sintonización del controlador PID.

A partir de la función de transferencia aproximada Ec 1 vamos a utilizar el método de sintonización por ubicación de polos y ceros.

### 2.4.1 Método de sintonización ubicación de polos y ceros

$$G(s) = \frac{32.07}{s+33.51} \quad (1)$$

Para el control de un PID se utiliza la siguiente fórmula:

$$G(s) = \frac{Kw_n^2}{s^2+2\zeta w_n s+w_n^2}$$

Asignamos ambas funciones de transferencia a variables que representan polinomios, de la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{32.07}{33.51} \frac{1}{33.51s+1} = \frac{957.0277 \times 10^{-3}}{33.51s+1} \quad (2)$$

De dicha ecuación se asignaron los valores de  $k_p$  y  $\tau$ .

$$k_p = 957.0277 \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$\tau = 33.51 \quad (4)$$

Se integra los parámetros dentro de la ecuación

$$\left(\frac{957.0277 \times 10^{-3}}{33.51s+1}\right) \left(k_c \left(\frac{1}{\tau_{25}}\right)\right) \quad (5)$$

Desarrollamos la ecuación

$$\left(\frac{957.0277 \times 10^{-3} K_c (T_i s + 1)}{33.51s^2 T_i + T_i (1 + 957.0277 \times 10^{-3} k_c) s + 957.0277 \times 10^{-3} k_c}\right) \quad (6)$$

El polinomio característico del sistema de control sería en este caso

$$p(s) = s^2 + \left(\frac{1 + 957.0277 \times 10^{-3} K_c}{33.51}\right) s + \frac{957.0277 \times 10^{-3} K_c}{33.51 T_i} \quad (7)$$

Se desea que tenga la forma general

$$p(s) = s^2 + 2\zeta W_n s + W_n^2 \quad (8)$$

Se establecen  $M_p$  a consideración en porcentaje

$$M_p = 7\% \quad (9)$$

Sustituimos la Ec.9 para conocer el valor de  $\zeta$

$$7 = e^{-\pi / \sqrt{1-\zeta^2}} = \zeta = 0.5265 \quad (10)$$

Se establece  $T_a = 2$  a consideración en porcentaje y se sustituye en la ecuación.

$$2 = \frac{4}{(0.5265)} \quad W_n = 3.7986 \quad (11)$$

Conociendo el valor de  $W_n$  se sustituye en la ecuación Ec .12, para obtener  $K_c$ .

$$K_c = \frac{2\zeta W_n \tau - 1}{K_p} = \frac{(2)(0.5265)(3.7986)(33.51) - 1}{32.07} \quad (12)$$

$$K_p = 4.1483 \quad (13)$$

Sustituir en la ecuación general para obtener  $T_i$ .

$$T_i = \frac{2\zeta W_n \tau - 1}{K_p} = \frac{(2)(0.5265)(3.7986)(33.51) - 1}{(3.7986)^2 (33.51)} \quad (14)$$

$$T_i = 0.2751 \quad (15)$$

Se comienzan a conocer las ganancias, para conocer  $K_i$  se sustituye en la Ec.16.

$$K_i = \frac{1}{0.2751} = 3.6350 \quad (16)$$

Para  $K_p$ , es necesario utilizar Ec.13.

$$K_p = \frac{1}{4.1483} = 0.2410 \tag{17}$$

$K_d$  es igual a 0 debido a su sensibilidad al ruido y las perturbaciones en la señal, esto corresponde a la planta en uso.

$$K_d = 0 \tag{18}$$

### 2.4.2 Método de Sintonización por Respuesta en Frecuencia.

Basados en la misma planta se sintoniza por el método de respuesta en frecuencia.

$$G(s) = \frac{32.07}{s+33.51} \tag{Ec.1}$$

Se propone un ángulo de desfase y tiempo de respuesta ( $\tau$ ) que serán utilizados más adelante.

$$\theta = 45$$

$$\tau = \frac{1}{\frac{1}{25}} \tag{19}$$

Para conocer  $W_c$  Se utiliza la EC.19.

$$W_c = 25 \text{ rad/seg} \tag{20}$$

Utilizando Matlab graficando la función de Bode nos enfocamos en la gráfica de frecuencia, posicionando el valor en 25. Para ello obtenemos la magnitud de  $-2.31d_B$  para conocer la magnitud de forma escalar ( $x$ ).

$$- 2.31 = 20\text{Log}(x) \tag{21}$$

$$x = 0.7664 \tag{22}$$

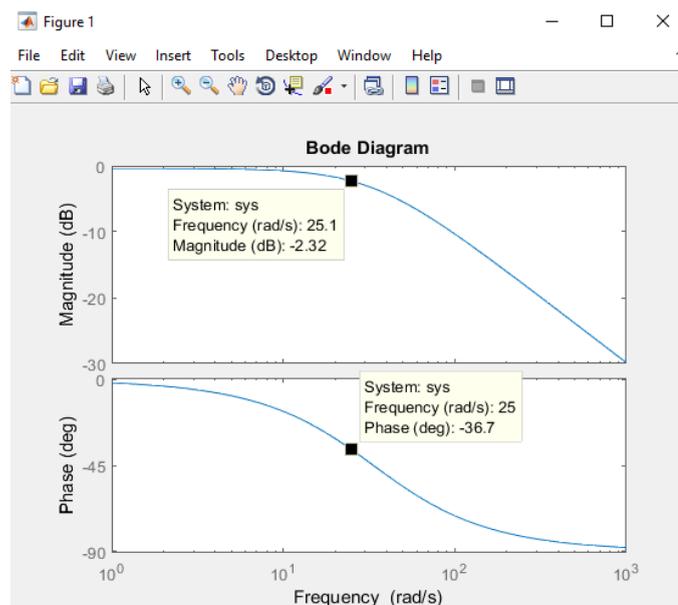


Figura 1. Gráficas de Bode

Se busca que la magnitud del sistema en la frecuencia analizada sea unitaria como se expresa en la ecuación 23.

$$K_p + JW_c(HjW_c) = 1 \quad (23)$$

Se agrega a la ecuación  $K_d$  sustituida y dividimos 1 sobre  $x$ .

$$K_p + JW_c K_d = \frac{1}{0.7664} \quad (24)$$

Para reducir el número de incógnitas se sustituyen los valores calculados en la Ec.20.

$$K_p + J25K_d = \frac{1}{0.7664} \quad (25)$$

Se calculó su raíz cuadrada elevando cada término

$$\sqrt{K_p^2 + 25K_d^2} = \frac{1}{0.7664} \quad (26)$$

Se desarrolla la ecuación, obtenemos el valor de fase dentro de las gráficas de Bode realizadas en Matlab, ubicándonos en el punto 25, a lo que se obtuvo el -36.6.

$$45 = 180 - 36.6 + \tan^{-1}\left(\frac{25K_d}{K_p}\right) - \frac{(180)(25)(0.05)}{2\pi} - 5^\circ \quad (27)$$

Se desarrolla la ecuación reduciendo término, Es necesario determinar la ganancia integral.

$$45 = 143.4 + \tan^{-1}\left(\frac{25K_d}{K_p}\right) - \frac{(180)(25)(0.05)}{2\pi} - 5^\circ \quad (28)$$

$$45 = 143.4 - 30.80 + \tan^{-1}\left(\frac{25K_d}{K_p}\right) \quad (29)$$

$$67.6 = \tan^{-1}\left(\frac{25K_d}{K_p}\right) \quad (30)$$

$$\tan(67.6) = \frac{25K_d}{K_p} \quad (31)$$

$$2.426K_d = 25K_p \quad (32)$$

Se desarrollaron las ganancias.

$$K_p = \frac{25K_d}{2.426} \quad (33)$$

$$K_p = 10.30K_d \quad (34)$$

Se desarrolló su raíz cuadrada, empleando la Ec.34, elevada: como se logra visualizar.

$$\sqrt{(10.30K_d)^2 + (25K_d)^2} = \frac{1}{0.7664} \quad (35)$$

$$\sqrt{(106.09K_d)^2 + (625)K_c^2} = \frac{1}{0.7664} \quad (36)$$

$$\sqrt{731.09K_d^2} = \frac{1}{0.7664} \quad (37)$$

$$27.02K_d = \frac{1}{0.7664} \quad (38)$$

Se comienzan a obtener las ganancias  $K_p, K_i, K_d$  para el control PID.

Determine la ganancia derivativa.

$$K_d = \frac{1}{0.7664(27.02)} = 0.0482 \quad (39)$$

$$K_d = 0.0482 \quad (40)$$

Determine la ganancia proporcional.

$$K_p = 10.30K_d \quad (41)$$

$$K_p = 0.4964 \quad (42)$$

Determine la ganancia integral.

$$K_i = Wc K_p \tan(5) \quad (43)$$

$$K_i = 1.08 \quad (44)$$

## 2.5 Control de un motor utilizando microcontroladores

El control del motor se llevó a cabo mediante un microcontrolador PIC18F4550. La selección de este microcontrolador se basó en su versatilidad y capacidad para gestionar tareas complejas, además de su robustez y amplia disponibilidad en aplicaciones de control.

La implementación del controlador requirió una serie de protocolos y técnicas de comunicación. Se utilizó la comunicación BULK, ya que esta es una modalidad eficiente y confiable que permitió la interacción bidireccional entre el microcontrolador y una interfaz programada en Python, facilitando la transferencia de datos y comandos esenciales para el control del motor.

Las ganancias obtenidas de los métodos de sintonización proporcionaron valores específicos para los parámetros del controlador PID, tales como la ganancia proporcional ( $K_p$ ), la constante integral ( $K_i$ ) y la constante derivativa ( $K_d$ ). Estos valores ajustados permitieron al microcontrolador regular con precisión la posición del motor, adaptándose dinámicamente a las demandas del sistema en tiempo real.

## 2.6 Interfaz de graficación en python utilizando Qt

La interfaz gráfica fue desarrollada con la librería de PyQt5 y Python. Este sistema permite no solo la regulación del motor, sino también la visualización dinámica de datos en online y la capacidad de guardar los registros en un archivo de texto para su posterior análisis.

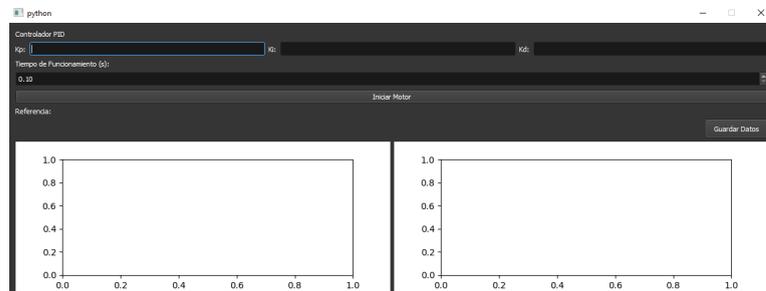


Figura 2. Interfaz gráfica.

### 3. Resultados

En la tabla adjunta se detallan las ganancias calculadas mediante los métodos de respuesta en frecuencia y ubicación de polos y ceros. Estos resultados ofrecen el rendimiento óptimo de la posición de un motor con encoder. El método de respuesta en frecuencia resalta variaciones de ganancia según la frecuencia de entrada. Mientras tanto, el método de ubicación de polos y ceros revela cómo los componentes del sistema influyen en la ganancia en distintas condiciones operativas **Tabla 1**.

	Ubicación de polos y ceros	Respuesta en frecuencia (Bode)
$K_p$	0.2410	0.4964
$K_i$	3.6350	1.08
$K_d$	0	0.0482

Tabla 1. Ganancias calculadas por distintos métodos de sintonización.

Además de las ganancias, es crucial examinar el error en estado estacionario y el tiempo de respuesta del sistema. El método de respuesta en frecuencia revela una discrepancia de 1.35 s comparada con el método de ubicación de polos y ceros. Es decir que el tiempo de respuesta de sintonización por Bode tarda en estabilizarse 0.15s mientras que el método de ubicación de polos y ceros tarda 1.5s.

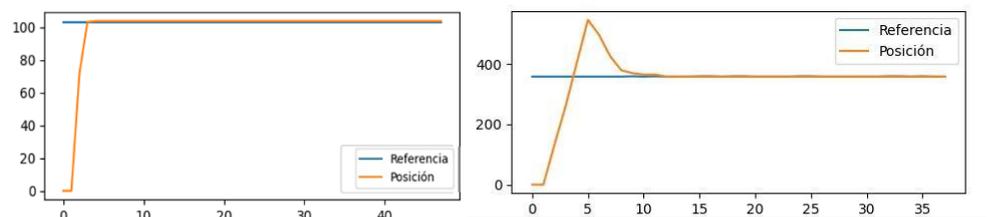
Haciendo enfoque en la estimación de error estacionario se evaluó mediante el método de ubicación de polos y ceros, se reveló en un índice del 0.9804%, mientras que el análisis a través del método de respuesta en frecuencia mostró un error del 0.6667%. Estos valores representan las diferencias porcentuales, brindando una visión precisa de y la capacidad de ajuste de ambos métodos **Tabla 2**.

	Ubicación de polos y ceros	Respuesta en frecuencia (Bode)
Tiempo de respuesta	1.5 s	0.15 s
Error en estado estacionario	0.9804%	0.6667%

**Tabla 2. Comparativa de error estacionario y su tiempo de respuesta.**

La representación gráfica, generada con Python y Qt, ofrece una visualización detallada del funcionamiento de un motor con encoder a través de una interfaz interactiva. En estas dos imágenes, se observa claramente el comportamiento dinámico del motor, evidenciando su seguimiento preciso de la posición deseada. Ambas representaciones ilustran el movimiento gradual y controlado del motor hacia la ubicación asignada, demostrando su capacidad para cumplir con precisión las posiciones indicadas.

Ambas imágenes destacan la consistencia en el cumplimiento del objetivo de mantener un error estacionario despreciable. La interfaz visual refleja una diferencia mínima validando la efectividad de los dos métodos de sintonización empleados. Estos resultados reafirman la capacidad del sistema para alcanzar y mantener con alta exactitud la posición deseada, resaltando su nivel de control y rendimiento.



**Figura 3. Interacción con la interfaz, analizando la referencia y posición para los métodos de sintonización.**

#### 4. Discusión

Los resultados obtenidos a través de los métodos de respuesta en frecuencia y ubicación de polos y ceros reflejan el comportamiento de un motor con encoder. Estos conocimientos pueden interpretarse y concordar con estudios anteriores, donde se ha reconocido la eficacia de estos métodos en el análisis y sintonización.

Ambos métodos obtuvieron como respuesta un error en estado estacionario menor al uno por ciento, siendo el método de respuesta en frecuencia el que obtuvo el menor error en estado estacionario de un 0.6 % contra el 0.9 % obtenido por el método de ubicación de polos y ceros. No obstante, no podemos garantizar que esto siempre se cumpla ya que los parámetros de sintonización de margen de fase y tiempo de respuesta para el método de respuesta en frecuencia se propusieron en función de la experiencia de haber trabajado con el motor de corriente directa, bajo otros parámetros el error en estado estacionario podría variar.

De los resultados obtenidos se observa que la respuesta del PID sintonizado por el método de respuesta en frecuencia es más rápida que la del método de ubicación de polos y ceros, sin embargo, se presenta como consecuencia un sobre paso que es cercano al 20% en el método de respuesta en frecuencia mientras que en el de ubicación de polos y ceros se calculó mínimo.

Ambos resultados se consideran útiles aunque su validez podría variar en función de la aplicación final del sistema de motor al que se están aplicando, ya que algunas aplicaciones no toleran que exista sobre paso. En contraparte, el tiempo de respuesta también cambia significativamente ya que el método de ubicación de polos y ceros responde más lento que el de respuesta en frecuencia.

Para la implementación de ambos métodos fue necesario contar con una estimación de la función de transferencia que para el desarrollo de este trabajo se estimó experimentalmente utilizando una entrada escalón que en el caso de motores es una tarea fácil de realizar, para utilizar estos métodos en otro tipo de sistemas se debe considerar la viabilidad de obtener la respuesta en lazo abierto ante la entrada escalón.

Finalmente, la interfaz gráfica desarrollada con PyQT5 permitió la comunicación USB entre el microcontrolador y la computadora transfiriendo las variables de control del sistema para poder analizarlas, los retrasos que maneja este tipo de comunicación se consideraron despreciables durante el funcionamiento del sistema.

## 5. Conclusiones

La evaluación detallada del tiempo de respuesta y el error en estado estacionario entre los métodos de respuesta en frecuencia y ubicación de polos y ceros amplía su enfoque sobre su desempeño y capacidad de ajuste en sistemas dinámicos.

Se observa una discrepancia notable en el tiempo necesario para la estabilización entre ambos métodos, donde el método de respuesta en frecuencia exhibe una respuesta más rápida, tardando 0.15 segundos en estabilizarse, en comparación con los 1.5 segundos requeridos por el método de ubicación de polos y ceros. Esta diferencia en el tiempo de respuesta señala la agilidad y eficiencia del método de sintonización por Bode en alcanzar la estabilidad del sistema.

En cuanto a la estimación del error en estado estacionario, se evidencia una ligera disparidad en los valores obtenidos. El método de ubicación de polos y ceros reveló un error del 0.9804%, mientras que el análisis a través del método de respuesta en frecuencia mostró un error del 0.6667%. Estas diferencias porcentuales, aunque sutiles, resaltan la sensibilidad y precisión relativa de cada método en la minimización del error en sistemas dinámicos.

Se considera que ambos métodos son adecuados para la sintonización de controladores de tipo PID y sus variantes cuando se trata de motores de corriente directa monitoreados por encoder. Ambos métodos requieren de un conocimiento de la función de

transferencia del sistema, sin embargo, como demostró, esta puede obtenerse o aproximarse mediante una prueba experimental.

**Contribución:** Todos los autores participaron en la lectura y aprobación de la versión final del manuscrito. La autoría se limita a aquellos que contribuyeron sustancialmente al trabajo reportado.

**Agradecimientos:** Queremos agradecer al Instituto Tecnológico Superior de Huichapan por el soporte técnico proporcionado durante el desarrollo de este estudio, de la misma manera agradecer a los docentes: José Miguel Hernández Paredes y Benigno Muñoz Barron de la división de ingeniería en Mecatrónica. Por la comprensión y colaboración de enseñanza para la elaboración del mismo.

**Conflicto de interés:** Los autores declaran no tener conflictos de interés que puedan influir en la representación o interpretación de los resultados de investigación presentados. Los financiadores no tuvieron ningún rol en el diseño del estudio, la recopilación, el análisis o la interpretación de datos, la redacción del manuscrito ni la decisión de publicar los resultados.

## Referencias

1. Chafuelán Vera, A. H. y Pico Pillasagua, J. C. Controlador I/PD para mejorar la respuesta de controladores PID y PI de motores de inducción (2023), *INGENIERÍA: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 10(1).
2. Ramos, A. I. M., & Itzayao, A..Comparación de métodos de sintonización de un controlador PID para procesos industriales (2018), *UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA*..
3. Paz, M. A., Ramírez-del Real, T. A., Algoritmo didáctico para la Asignación Implícita de Polos mediante la Especificación de Características Temporales deseadas usando Controladores PI Industriales (2008).*Formación universitaria*, 6(6), 23-40.
4. Jimenez, L. R, Yam, M. V, Cosgay,O.B. Sintonización de un controlador PI mediante un algoritmo genético multiobjetivo aplicado a un horno experimental(2017). *DYNA New Technologies*, 4(1). 14 p.
5. Pinzón, S., & Pavón, W. (2019). Diseño de Sistemas de Control Basados en el Análisis del Dominio en Frecuencia. *Revista Técnica &quot;energía&quot;*. 15(2), PP. 76–82.
6. Alcorta García, Efraín y Díaz Romero, David Alejandro y Castillo Martínez, Rodolfo y Rodríguez Alfaro, Luis Humberto (2023) Respuesta en frecuencia para sistemas en espacio de estados. *Ingenierías*, 26 (94). pp. 18-24.
7. Zayas Gato, F., Quintián Pardo, H., Jove Pérez, E., Casteleiro Roca, J.L., Calvo Rolle, J.L. (2020). Diseño de controladores PID. A Coruña. Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións
8. Romero, J. A. y Sanchis, R. (2011) «Benchmark para la Evaluación de Algoritmos de Auto-ajuste de Controladores PID», *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 8(1), pp. 112–117.
9. Ramírez Urrego, J. A., & Posada Restrepo, N. L. (2016). Aplicación de diseño, simulación, identificación de sistemas e implementación de controladores PID - Digitrol. *Revista Politécnica*, 12(23), 27–37.
10. Chafuelán Verá, A. H. y Pico Pillasagua, J. C. Controlador I/PD para mejorar la respuesta de controladores PID y PI de motores de inducción (2023), *INGENIERÍA: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 10(1).