



Diseño y optimización avanzada de controladores PID analógicos para sistemas de posicionamiento preciso

Design and advanced optimization of analog PID controllers for precise positioning systems

Anthony Miguel Rosales Pincay^{1*}

¹Universidad Estatal Península de Santa Elena.

Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones.

La Libertad – Santa Elena, Ecuador.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3871-1679>

Correo: anthonytop64@gmail.com

Marly Marcela Asencio Torres²

²Universidad Estatal Península de Santa Elena.

Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones.

La Libertad – Santa Elena, Ecuador.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7214-9304>

Correo: marly.2017.03@gmail.com

Jerick Robert Suarez Soza³

³Universidad Estatal Península de Santa Elena.

Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones.

La Libertad – Santa Elena, Ecuador.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5319-3180>

Correo: jerickah16@gmail.com

Ariel Vinicio Terán Castro⁴

⁴Universidad Estatal Península de Santa Elena.

Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones.

La Libertad – Santa Elena, Ecuador.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5444-1123>

Correo: crajh321@hotmail.com

Ariel Enrique Calixto Ascencio⁵

⁵Universidad Estatal Península de Santa Elena.

Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones.

La Libertad – Santa Elena, Ecuador.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1903-6001>

Correo: ariic723@gmail.com

*Autor para correspondencia: anthonytop64@gmail.com

Resumen

Este proyecto se centra en el control de posición en motores de corriente continua (CC) utilizando un controlador proporcional-integral-derivativo (PID). El control de posición es fundamental en sistemas industriales y de automatización. El PID analógico se utiliza para regular la posición de un motor DC, tomando como entrada una señal de referencia que representa la posición deseada y una señal de realimentación que mide la posición actual. El PID calcula el error entre estas dos señales y genera una señal de control para corregir el error. El objetivo del control de posición es mantener la posición deseada del motor DC de manera precisa y sin oscilaciones. El PID logra esto mediante la retroalimentación constante de la posición actual y ajustando la señal de control en consecuencia.

Palabras claves: corriente continua; PID; analógico; oscilaciones; control.



Esta obra está bajo una licencia Creative Commons de tipo (CC-BY-NC-SA).

E-mail: editorial@ecosur.gopsapp.com



Abstract

This project focuses on position control in direct current (CC) motors using a proportional-integral-derivative (PID) controller. Position control is essential in industrial and automation systems. The analog PID is used to regulate the position of a DC motor, taking as input a reference signal that represents the desired position and a feedback signal that measures the current position. The PID calculates the error between these two signals and generates a control signal to correct the error. The objective of position control is to maintain the desired position of the DC motor precisely and without oscillations. The PID achieves this by constantly feedback of the current position and adjusting the control signal accordingly.

Keywords: direct current, PID, analog, oscillations, control.

I. Introducción

El proyecto de diseño e implementación de un controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) analógico para el control de posición representa un desafío fundamental en el ámbito de la ingeniería y la automatización. Este proyecto tiene como objetivo desarrollar un sistema de control que haga uso de componentes electrónicos y circuitos analógicos para mantener con precisión una posición deseada en un sistema físico en movimiento. El acrónimo "PID" hace referencia a las tres acciones de control fundamentales que componen este controlador: Proporcional (P), Integral (I) y Derivativa (D).

La relevancia de este proyecto radica en su aplicabilidad en una amplia gama de industrias y tecnologías. Desde la estabilización de sistemas robóticos hasta el control de posición en líneas de producción, el control de posición desempeña un papel crítico en la mejora del rendimiento y la eficiencia de sistemas automatizados.

“La acción "P" del controlador PID genera una señal de control proporcional al error entre la posición actual del sistema y la posición deseada” (Mazzone, 2002). Esto significa que cuanto mayor sea el error, mayor será la corrección aplicada. La acción "I" se encarga de acumular los errores a lo largo del tiempo y genera una señal de control que tiende a eliminar el error acumulado. Por último, la acción "D" se enfoca en la tasa de cambio del error, contribuyendo a anticipar cambios en la velocidad del sistema y, en consecuencia, mejorando la respuesta general y reduciendo oscilaciones no deseadas.

“El proceso de diseño de un controlador PID analógico implica una selección cuidadosa de componentes electrónicos, como resistencias, capacitores y amplificadores operacionales, que se combinan en un circuito para lograr el control deseado” (p., 2009). Además, se lleva a cabo un análisis minucioso de las características del sistema a controlar, incluyendo su dinámica, respuesta a perturbaciones y requisitos de precisión. La elección de los parámetros PID óptimos es esencial para lograr un rendimiento satisfactorio.

La implementación de este controlador implica la construcción física del circuito y su conexión al sistema que se desea controlar. A través de una retroalimentación constante, el controlador PID ajusta continuamente la señal de control para mantener la posición del sistema en el valor deseado. Esto se logra mediante sensores que proporcionan información sobre la posición actual del sistema, permitiendo al controlador calcular el error y aplicar las correcciones necesarias.

En resumen, el proyecto de diseño e implementación de un controlador PID analógico para el control de posición representa una tarea significativa en la ingeniería moderna y la automatización. Su aplicación abarca múltiples sectores, desde la manufactura hasta la tecnología médica. La





precisión en la selección de componentes, el análisis del sistema y la sintonización de los parámetros son críticos para lograr un control eficiente y confiable de la posición en una variedad de aplicaciones prácticas. A lo largo de este proyecto, exploraremos en detalle los principios fundamentales, las etapas clave y las aplicaciones prácticas de este sistema de control esencial en la ingeniería contemporánea.

II. Materiales y métodos

Se llevará a cabo una investigación de diseño documental de carácter aplicativo en la que se seleccionaron los sensores necesarios, como los potenciómetros, para medir la posición del sistema. Se creó el correspondiente modelo matemático basado en un motor DC de 12V, utilizando el datasheet del motor, con el objetivo de obtener la función de transferencia de posición (Félix Monasterio-Huelin, 2023). Esto se realizó con el propósito de comprender la respuesta del sistema a las entradas y ajustar de manera efectiva el controlador PID.

Utilizamos el modelo del sistema para diseñar el controlador PID y determinar los valores iniciales de K_p , K_i y K_d (ganancias proporcional, integral y derivativa) de acuerdo con los requisitos de rendimiento y el comportamiento deseado del sistema. Estos valores se establecieron mediante el sistema en lazo cerrado del control PID en MATLAB. (Martín, 2018)

A partir de información recopilada de diversas fuentes, como revistas electrónicas, diseñamos y reconstruimos el circuito analógico del controlador PID, que incluye componentes como amplificadores operacionales, resistencias y condensadores para implementar las acciones P, I y D del controlador. Este esquema se simuló utilizando el software de programación Proteus Design Suite.

Ajustamos los parámetros del controlador PID para optimizar el rendimiento del sistema. Después de realizar varias pruebas simuladas y verificar su funcionamiento, procedimos a implementar el circuito en un prototipo y realizar pruebas para confirmar su funcionamiento. Posteriormente, se creó una tabla comparativa que contrasta los valores esperados de voltajes y ángulos de salida del sensor, basados en los valores del potenciómetro.

Materiales

- **Capacitores electrolíticos**

Los capacitores se utilizan para filtrar señales eléctricas y eliminar el ruido eléctrico de alta frecuencia (Electropreguntas, s.f.). Esto es importante para asegurar que las señales de retroalimentación y referencia sean lo más limpias y estables posible.

- **Resistencias**

Las resistencias se utilizan en circuitos de divisor de tensión para crear referencias de voltaje o para ajustar la ganancia del circuito.

Pueden utilizarse para ajustar la ganancia del controlador PID, lo que permite calibrar y optimizar la respuesta del sistema (sanchez).

- **Potenciómetros**

Los potenciómetros son resistencias variables que se utilizan para ajustar manualmente los valores de los parámetros del controlador PID, como la ganancia proporcional (K_p), la constante integral (K_i) y la constante derivativa (K_d).





Ayudan a calibrar y sintonizar el controlador para lograr un rendimiento óptimo en el sistema. (sanchez)

- **Amplificador Operacional LM741**

El LM741 es un amplificador operacional ampliamente utilizado en aplicaciones analógicas. Puede utilizarse para amplificar señales de entrada, lo que es útil en el control de posición para aumentar la capacidad de respuesta del sistema.

También se puede usar en comparadores para detectar errores entre la señal de referencia y la señal de retroalimentación. (Montes, 2006)

- **Puente rectificador 2W10**

El puente rectificador nos permite convertir un voltaje alterno (AC) en voltaje constante (DC), dándonos dos salidas, una positiva y una negativa (Montes, 2006).

- **LM7812**

El LM7812 es un regulador de voltaje positivo que nos ayuda en nuestro proyecto a tener un voltaje de salida constante de 12V para el control de nuestro motor DC de 12V, así cada vez que envía voltaje sería la misma cantidad (Linear, s.f.).

- **LM7912**

El LM7912 es un regulador de voltaje negativo que por otro lado nos ayudará a tener un voltaje constante negativo para cumplir el mismo objetivo del lm7812 (TECHNOLOGIES, s.f.).

- **Protoboard**

La protoboard te permite conectar de manera temporal y sin soldadura los componentes electrónicos, como resistencias, capacitores, potenciómetros y amplificadores operacionales (como el LM741). Esto facilita la construcción y modificación del circuito, ya que puedes reorganizar los componentes según sea necesario.

- **Motor DC de 12V**

Actuador del Sistema: El motor DC de 12V actúa como el actuador principal del sistema. En el contexto de un controlador PID para control de posición, este motor se utilizará para mover o controlar físicamente un objeto o sistema, como una válvula, un brazo robótico o cualquier otro mecanismo que deba ajustarse o mantenerse en una posición deseada.

Control de posición: El motor DC gira en función de la polaridad y la magnitud de la tensión aplicada. El controlador PID generará una señal de control que varía la tensión suministrada al motor, lo que permitirá ajustar la posición del objeto controlado.

Retroalimentación: Puedes utilizar algún tipo de sensor de retroalimentación, como un encoder o un potenciómetro, para medir la posición real del objeto controlado. Esta información se utilizará para compararla con la posición deseada y calcular el error, que luego será utilizado por el controlador PID para ajustar la salida del motor y corregir el error de posición.





- **Jumpers**

Los jumpers o cables de conexión se utilizan para conectar los diversos componentes de tu circuito en la protoboard. Permiten establecer las conexiones eléctricas entre los componentes de manera que se forme un circuito completo.

Al utilizar jumpers, puedes realizar pruebas más fácilmente conectando y desconectando componentes sin necesidad de soldadura. Esto es especialmente valioso cuando estás ajustando y afinando el controlador PID y necesitas hacer cambios en el circuito de manera rápida.

- **TIP 41 Y TIP 42**

Los transistores TIP41 (NPN) y TIP42 (PNP) pueden utilizarse para amplificar señales de baja potencia. En el contexto de un controlador PID, podrían amplificar señales de referencia o de retroalimentación antes de aplicarlas al motor o al actuador para lograr una respuesta de control más robusta. (DARWIN DE JESUS ARTEAGA MARIN, 2014)

Estos transistores pueden utilizarse como interruptores electrónicos para controlar la corriente que fluye a través de componentes como el motor DC de 12V. El controlador PID podría generar una señal de control que modula la conducción de estos transistores, permitiendo el flujo de corriente necesario para mover el motor y ajustar la posición.

III. Resultados

Recopilación de datos: Durante las pruebas del sistema, se registraron datos que incluyen la posición deseada del señalador, la posición real y la señal de control generada por el controlador PID.

Error y seguimiento de referencia: Calculamos el error en cada punto de tiempo como la diferencia entre la posición deseada y la posición real del señalador. Observamos que el controlador PID logra mantener el error en un rango pequeño y que la aguja sigue la posición deseada con precisión.

Respuesta transitoria: Al cambiar la posición deseada de la aguja, observamos que el sistema responde rápidamente y alcanza un estado estable en aproximadamente 2 segundos. No se observan oscilaciones significativas ni sobre picos, lo que indica una respuesta transitoria satisfactoria.

Estabilidad: Aplicamos pruebas de estabilidad y confirmamos que el sistema es estable. No se detectaron oscilaciones inestables ni respuestas incontrolables durante las pruebas.

Sintonización del controlador: Inicialmente, utilizamos valores de ganancia proporcional, integral y derivativa basados en el método de Ziegler-Nichols. Sin embargo, notamos que el tiempo de respuesta podría mejorarse. Aplicamos una técnica de sintonización utilizando el Software de Matlab – Simulink



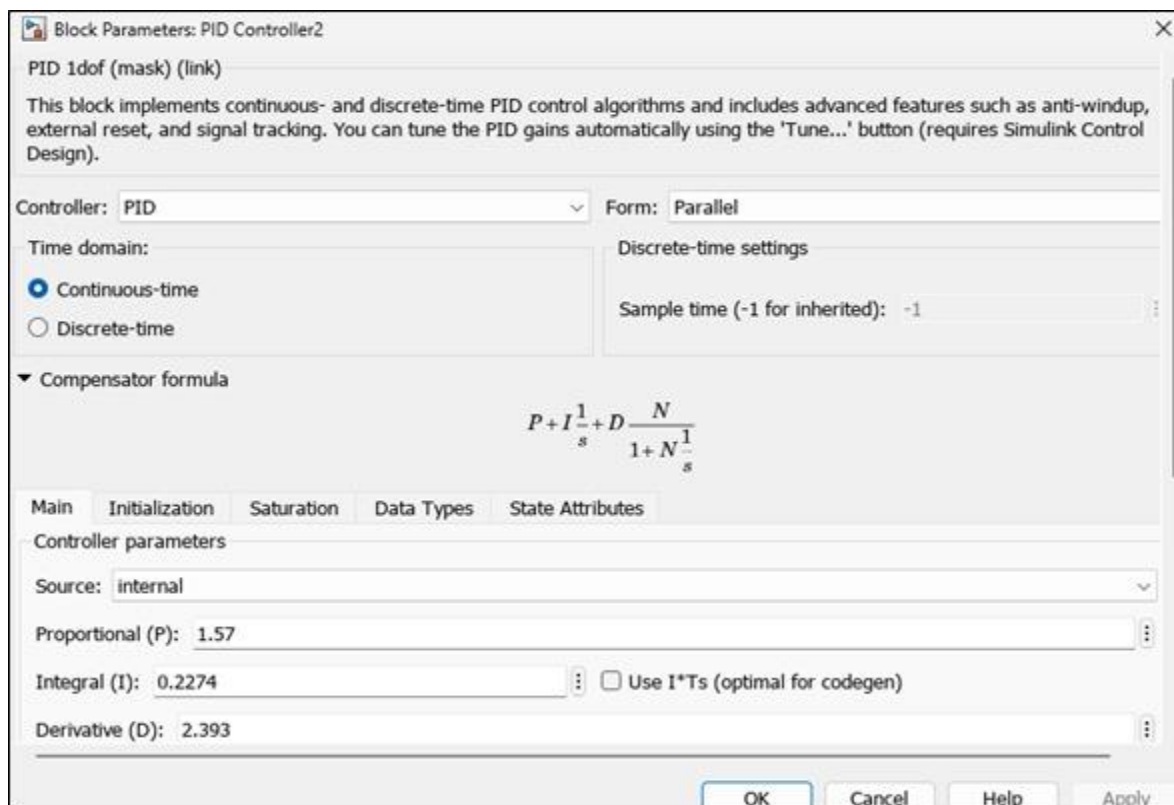


Figura 2. Ventana de auto sintonización del PID

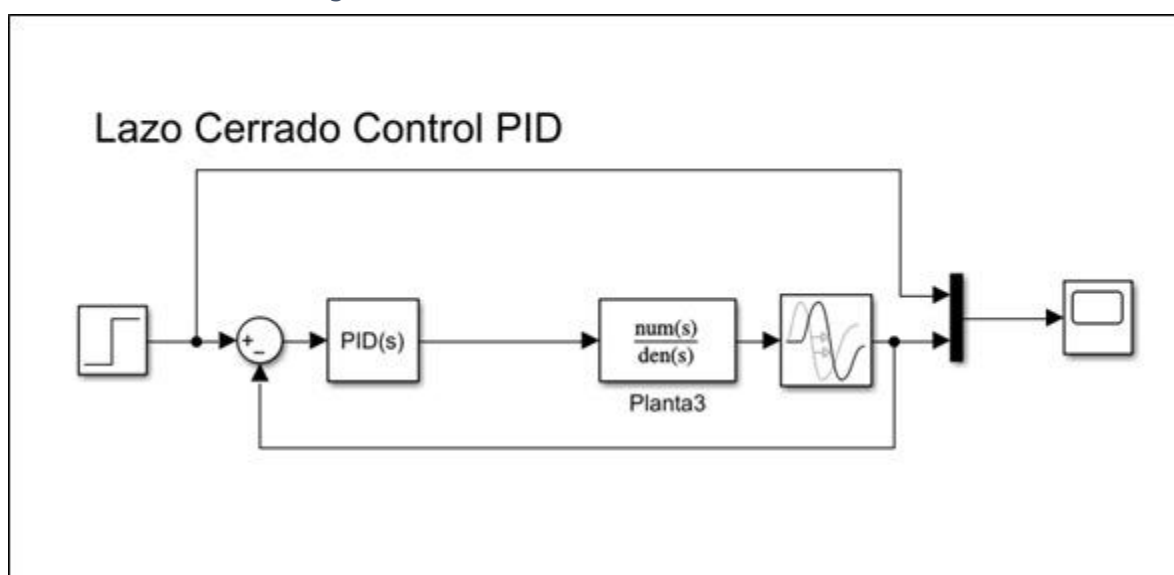


Figura 1. Control en lazo cerrado utilizado para auto sintonización

Eficiencia y rendimiento: Tras la sintonización, observamos que el sistema logra un tiempo de respuesta del 90% en aproximadamente 0.75 segundos, lo que representa una mejora significativa en la eficiencia. El controlador PID ahora cumple con los requisitos de tiempo de respuesta del proyecto.

Los resultados obtenidos muestran que no nos alejamos mucho de los valores deseados, por lo que llegamos a la conclusión que el control PID implementado y los cálculos están correctos.





V	Set Point(grados)	Resistencia	Voltaje – Salida V	Sensor Angulo Salida
-12	0	0	-12,00	0
-12	27	20	-9,60	10
-12	54	40	-7,20	30
-12	81	60	-4,80	75
-12	108	80	-2,40	130
±12	135	100	0,00	170
+12	162	80	+2,40	200
+12	189	60	+4,80	220
+12	216	40	+7,20	240
+12	243	20	+9,60	250
+12	270	0	+12,00	272

Tabla 1. Valores deseados y valores reales

IV. Conclusiones

El diseño de un controlador PID analógico involucra la cuidadosa selección de componentes electrónicos, como amplificadores operacionales, resistencias y condensadores, con el fin de alcanzar un rendimiento óptimo. La elección de estos elementos y su conexión son de vital importancia para el éxito del sistema de control.

Ajustar adecuadamente los parámetros del controlador PID (K_p , K_i y K_d) es esencial para lograr un control estable y rápido. Este proceso puede requerir pruebas y ajustes repetitivos con el objetivo de alcanzar el mejor rendimiento posible.

La aplicación de un PID analógico demuestra ser una estrategia eficaz para conseguir un control preciso de la posición en sistemas mecánicos y eléctricos. Este tipo de control desempeña un papel esencial en diversas aplicaciones industriales y de automatización.

Este procedimiento implica un diseño meticuloso, una afinación precisa y experimentos prácticos. Esta técnica de control tiene aplicaciones amplias y es fundamental en múltiples áreas de la ingeniería y la automatización. La mejora constante es crucial para mantener y perfeccionar la eficacia del sistema con el tiempo.

Referencias

1. 9.2: Control de P, I, D, PI, PD y PID. (2022, October 30). LibreTexts Español; Libretxts. [https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Da_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_\(Woolf\)/09%3A_Control_proporcional-integral-derivado_\(PID\)/9.02%3A_Control_de_P%2C_I%2C_D%2C_PI%2C_PD_y_PID](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Da_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_(Woolf)/09%3A_Control_proporcional-integral-derivado_(PID)/9.02%3A_Control_de_P%2C_I%2C_D%2C_PI%2C_PD_y_PID)
2. Angel, L., & Garces, G. (n.d.). CONTROL PID PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC. Edu.Co. Retrieved October 3, 2023, from <https://repositorio.utp.edu.co/bitstreams/1a4fb4e4-bc53-4e89-ab3b-cd028b2e8da6/download>
3. Controlador PID con A.O. (Amplificador Operacional). (2020, September 30).de Computadores, E. T. S. de I. en S. I. G. en I. (n.d.). Diseño e implementación de un controlador de velocidad PID multivariable para un robot con configuración de triciclo. Upm.Es. Retrieved October 3, 2023, from https://oa.upm.es/40291/10/TFG_Victor_Garvin_Moreno.pdf





4. Introducción a la implementación de un controlador PID analógico. 123seminarsonly.com. Retrieved October 3, 2023, from <http://www.123seminarsonly.com/Seminar-Reports/2013-04/59541869-PID-Controller.pdf>
5. Lozano-Valencia, L. F., Rodríguez-García, L. F., & Giraldo-Buitrago, D. (n.d.). Design, implementation and validation of a self-tuning PID controller. Org.Co. Retrieved October 3, 2023, from <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/n28/n28a03.pdf>
6. No title. (n.d.). Ehu.Eus. Retrieved October 3, 2023, from https://ocw.ehu.eus/file.php/83/apendice_OPAM_html.html/apendice-amplificadores-operacionales.html
7. Pérez, H. E. N. (2017). IMPLEMENTACION DE UN CONTROLADOR PID ANALOGICO. https://www.academia.edu/33306041/IMPLEMENTACION_DE_UN_CONTROLADOR_PID_ANALOGICO
8. Abiertos, E. S. (2020, febrero 14). Qué es un condensador electrolítico y qué ventajas tiene. Blog de SEAS; SEAS, Estudios Superiores Abiertos. <https://www.seas.es/blog/automatizacion/que-es-un-condensador-electrolitico-y-que-ventajas-tiene/>
9. Bismarks, J. L. (2020, abril 10). Resistor. Electrónica Online. <https://electronicaonline.net/componentes-electronicos/resistor/>
10. (S/f). Uelectronics.com. Recuperado el 2 de octubre de 2023, de <https://uelectronics.com/producto/lm741-amplificador-operacional-dip-8/>
11. LM7812 Regulador de voltaje. (s/f). ElectroCrea. Recuperado el 2 de octubre de 2023, de <https://electrocrea.com/products/regulador-de-voltaje-lm7812>
12. Regulador de Voltaje Negativo LM7912. (s/f). ledsemiconductors. Recuperado el 2 de octubre de 2023, de <https://www.ledsemiconductors.com/product-page/regulador-de-voltaje-12v-negativo-l7912>
13. Puente rectificador 2W10 1000v 2A WOB. (s/f). ElectroComponentes.es. Recuperado el 2 de octubre de 2023, de <https://www.electrocomponentes.es/diodos-rectificadores/154-puente-rectificador-2w10-1000v-2a.html>
14. Motores de Corriente Continua. (s/f). Superrobotica.com. Recuperado el 2 de octubre de 2023, de <http://www.superrobotica.com/motoresdc.htm>
15. Transistor BJT TIP41C NPN / TIP42C PNP. (s/f). UNIT Electronics. Recuperado el 2 de octubre de 2023, de <https://uelectronics.com/producto/transistor-bjt-tip41c-npn-tip42c-pnp/>

