



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

CONTROL DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Práctica: Control de posición en lazo cerrado para un motor de CD

Alumno:

Cerda Parra Luis Oscar

Díaz Bello Diego

Vázquez Galán José Emmanuel

Profesor:

Gastón Salazar Silva

5MM2

10 de mayo de 2024

Índice

1. Introducción	4
2. Métodos	5
2.1. Configuración Inicial	5
2.2. Aplicación de la Señal de Referencia	6
2.3. Medición de las Señales	6
2.4. Modificación del Sistema	6
2.5. Análisis de Datos	6
3. Resultados	7
4. Discusión	22
Bibliografía	24

Índice de figuras

1.	Descripción simplificada de un sistema de control. Tomada de [1]	4
2.	Diagrama de bloques para el control de par motor CD	4
3.	Diagrama de Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de velocidad y amplificador lineal.	7
4.	Detalle del subsistema amplificador.	7
5.	Detalle del subsistema instalación eléctrica.	8
6.	Detalle del subsistema motor.	8
7.	Detalle del subsistema instalación mecánica.	9
8.	Control Velocidad - Posición Lineal	11
9.	Diagrama de Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de Par y amplificador lineal.	12
10.	Parámetros de función escalón y de control PI.	13
11.	Control par - Posición Lineal	15
12.	Diagrama de Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de velocidad y amplificador conmutado.	16
13.	Control velocidad - Posición conmutado	18
14.	Diagrama de Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de par y amplificador conmutado.	19
15.	Control par - Posición conmutado	21

color listings courier

1. Introducción

CONTROL

Se define como el arte y la ciencia de operar dispositivos de tal manera que satisfagan necesidades en específico, principalmente de precisión y velocidad.

Un sistema de control consiste en subsistemas y procesos (o plantas) ensamblados con el propósito de obtener una salida deseada con un rendimiento deseado, dado un ingreso específico.

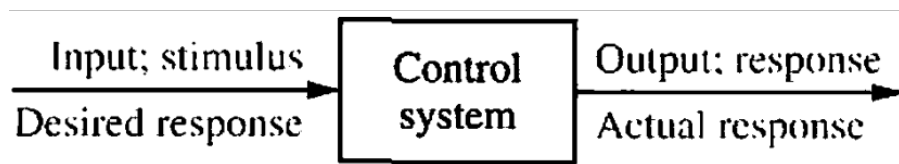


Figura 1: Descripción simplificada de un sistema de control. Tomada de [1]

CATEGORÍAS

CONTROL EN LAZO ABIERTO

Consiste en seleccionar componentes inherentemente precisos y lo suficientemente rápidos para el problema que se presente y pueda operar de manera eficiente.

Este sistema opera sin verificar si la salida ha alcanzado el estado deseado, lo que implica una menor complejidad y costos reducidos, pero con una menor adaptabilidad ante disturbios o cambios en las condiciones de operación [1].

CONTROL EN LAZO CERRADO

Basados en el principio de retroalimentación, en donde el cual, la magnitud por controlar se mide y se retroalimenta a una estación de entrada, en donde se compara con una magnitud de referencia para determinar si es del valor deseado (la magnitud controlada). Cualquier desviación del valor deseado es un error, el que generalmente se determina como resultado de esta comparación y el error se alimenta directamente al sistema, de tal manera que se tienda a reducir este error. Tal disposición es conceptualmente muy simple y tiene grandes posibilidades de precisión y rapidez de comportamiento. Se puede hacer que la señal de error produzca una señal correctora, la que, a su vez, haga el error tan pequeño como se desee, aún igual a cero [2].

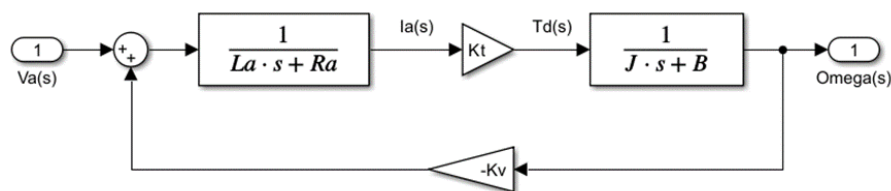


Figura 2: Diagrama de bloques para el control de par motor CD

- Las variables estan definidas en el dominio de la frecuencia (Laplace)
- $V_a(s)$ =Voltaje de la armadura
- $I_a(s)$ =Corriente de la armadura
- $T_d(s)$ =Par desarrollado por el motor
- $\Omega(s)$ =Velocidad angular del rotor

Parámetros del motor

- L_a =Inductancia de la armadura
- R_a =Resistencia de la armadura
- J =Momento de inercia del rotor
- B =Fricción viscosa de los rodamientos del motor
- K_t =Constante de par del motor
- K_v =Constante de voltaje del motor
- $T_d(s) = K_t I_a(s)$

CONTROL DE POSICIÓN

Consiste en mover algún objeto mecánico hasta que quede situado exactamente en una posición especifica; o moverlo de tal manera que su posición mecánica esté controlada con precisión mientras está en movimiento. En ambos casos el sistema debe mantener (regulada) la posición deseada cuando la salida sea perturbada por fuerzas o pares externos

Problemas que enfrenta este tipo de control

1. Posicionamiento remoto con servoinstrumentos, como en el ajuste de los potenciómetros de los cofecientes en una computadora analógica.
2. Posición de una cabeza magnética de lectura sobre la pista deseada en un archivo de memoria de disco magnético.
3. Posición de una antena de radar para seguir un satélite.
4. Posición de un cañón antiaéreo para disparar a un blanco móvil

2. Métodos

2.1. Configuración Inicial

Se inició implementando la actividad guiada mostrada en clase utilizando el software de simulación Simulink. Se configuró un sistema de control de par motor en un puente H como se muestra en la Figura 13 del reporte.

2.2. Aplicación de la Señal de Referencia

Se aplicó una señal de referencia de escalón con un tiempo de escalón de 0.05 s, valor inicial de 0 y valor final de 1, para evaluar la respuesta del sistema. Los parámetros de control PI utilizados fueron $K_p = \frac{1}{12}$ y $K_i = 0$, como se detalla en la Figura 17.

2.3. Medición de las Señales

Durante el experimento, se midieron las siguientes señales:

- **Referencia:** La señal de entrada al sistema.
- **Error:** La diferencia entre la señal de referencia y la salida medida.
- **Señal de Control:** La salida del controlador que ajusta la actuación del sistema.
- **Voltaje de Armadura:** El voltaje aplicado al motor.
- **Salida:** Respuesta del sistema ante la entrada aplicada.

Se utilizaron herramientas de captura de datos en Simulink para registrar estas señales.

2.4. Modificación del Sistema

Posteriormente, se modificó el diagrama en Simulink para reemplazar el amplificador por un puente H, como se documenta en la Figura 13. Se repitió la aplicación de la señal de referencia de escalón y se midieron las mismas señales bajo esta nueva configuración.

2.5. Análisis de Datos

Todas las señales medidas fueron graficadas para su análisis visual. Las gráficas permiten comparar el comportamiento del sistema bajo las configuraciones de amplificador y puente H. Las figuras desde la 18 hasta la 24 en el reporte muestran las gráficas de referencia, error, señal de control, voltaje de armadura, corriente de armadura, torque y velocidad angular, proporcionando una comprensión clara de la dinámica del sistema bajo estudio.

3. Resultados

1.-Implementación de actividades.

3.1.1. Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de velocidad y amplificador lineal.

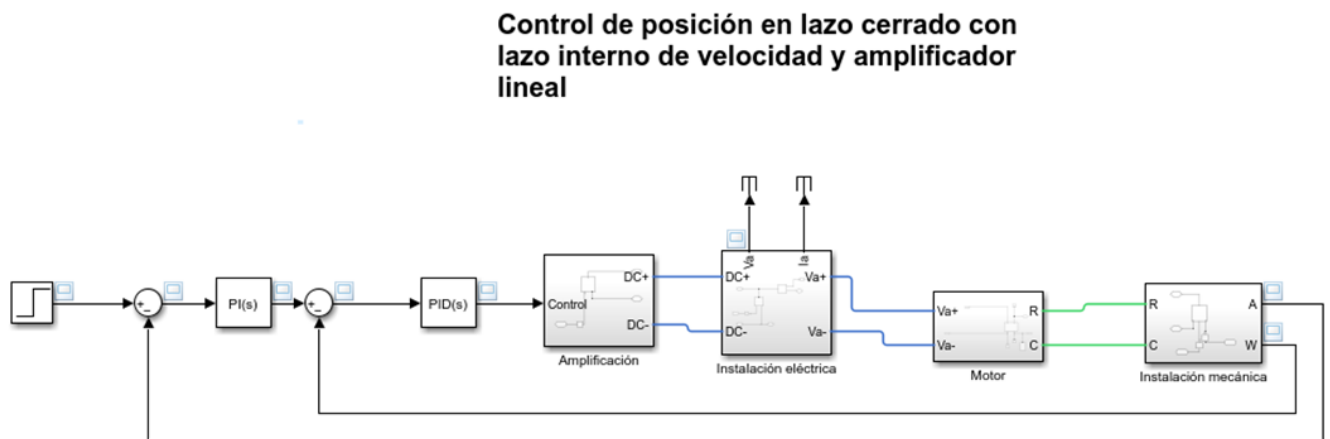


Figura 3: Diagrama de Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de velocidad y amplificador lineal.

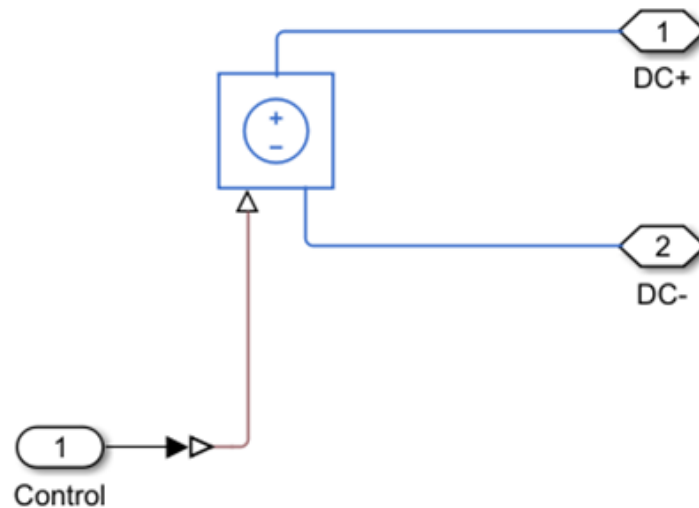


Figura 4: Detalle del subsistema amplificador.

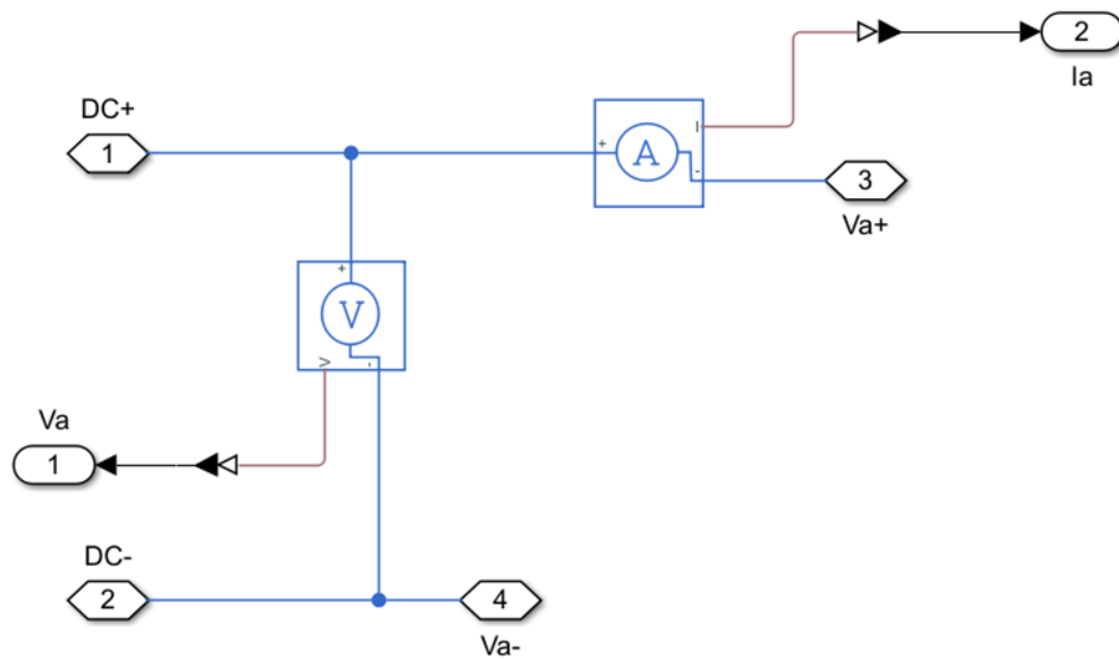


Figura 5: Detalle del subsistema instalación eléctrica.

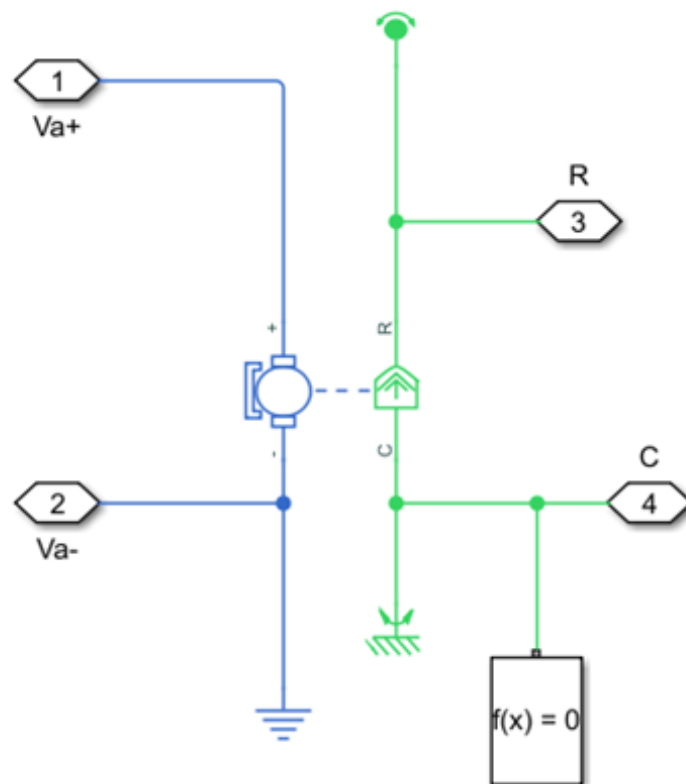


Figura 6: Detalle del subsistema motor.

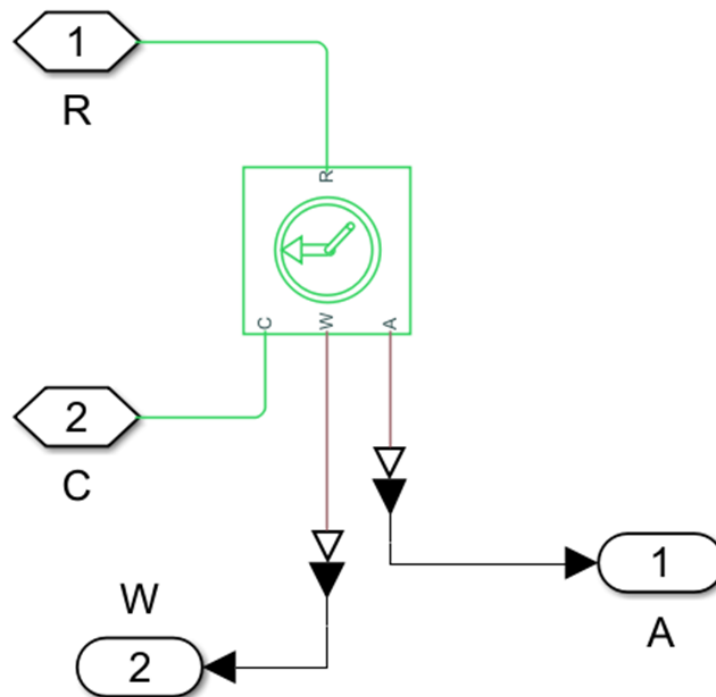


Figura 7: Detalle del subsistema instalación mecánica.

2.-Aplicar una señal de referencia de escalón. Señal escalón

- Step time=0.1
- Initial value=0
- Final value=0
- Sample time= 0

3.-Medir, en cada caso, las señales de:

- Referencia=1
- Error= $100-1=99$
- Señal de control= 100
- Salida= 100
- Referencia=
- La referencia escalón= 1
- Error del lazo externo de control= 1
- Señal de control del lazo externo= PI=100

- Error del lazo interno de control= 100
- Señal de control del lazo interno= PID=100
- Voltaje de armadura= 100 V
- Salida= 1 en 0.13
- Lazo interno
- Velocidad= 100
- Lazo externo

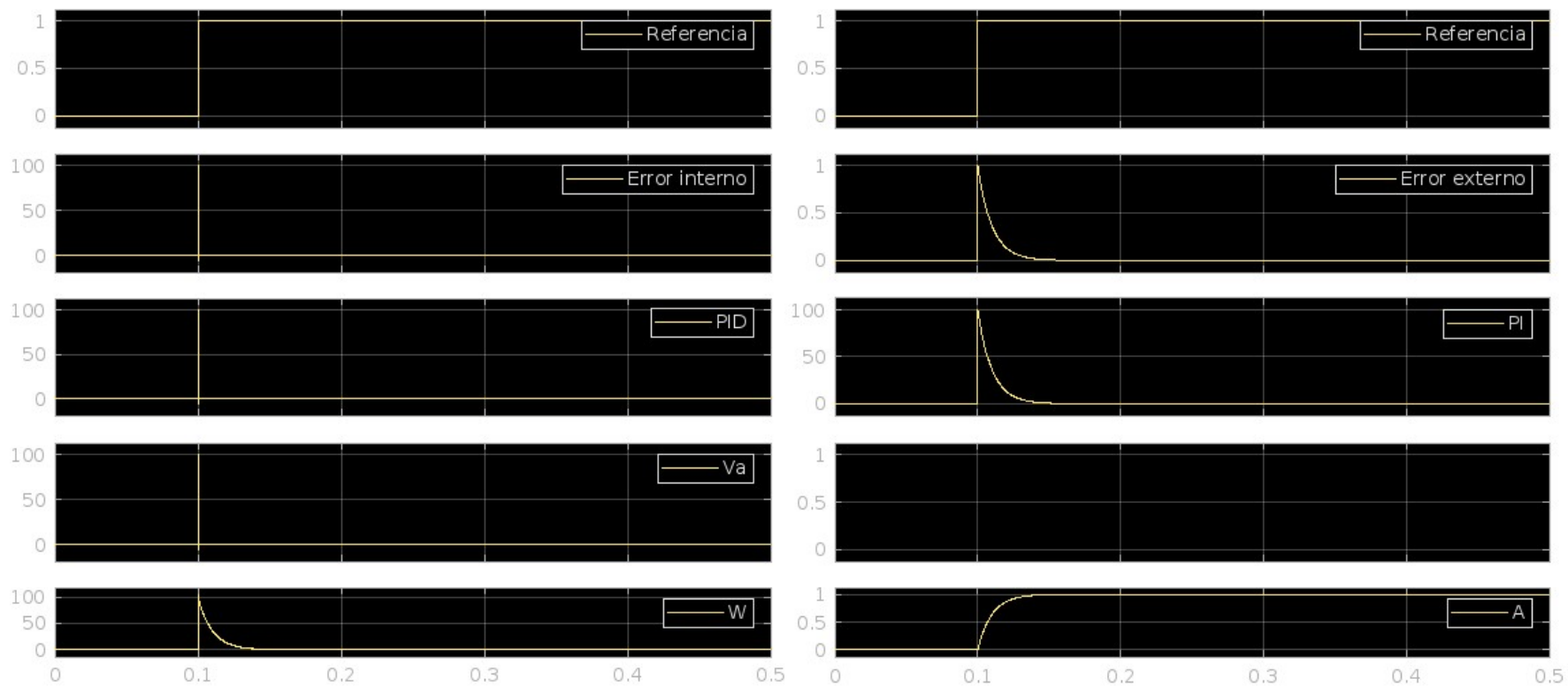
4.-Graficar dichas señales

Figura 8: Gráfica de Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de velocidad y amplificador lineal.

3.1.2. Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de par y amplificador lineal.

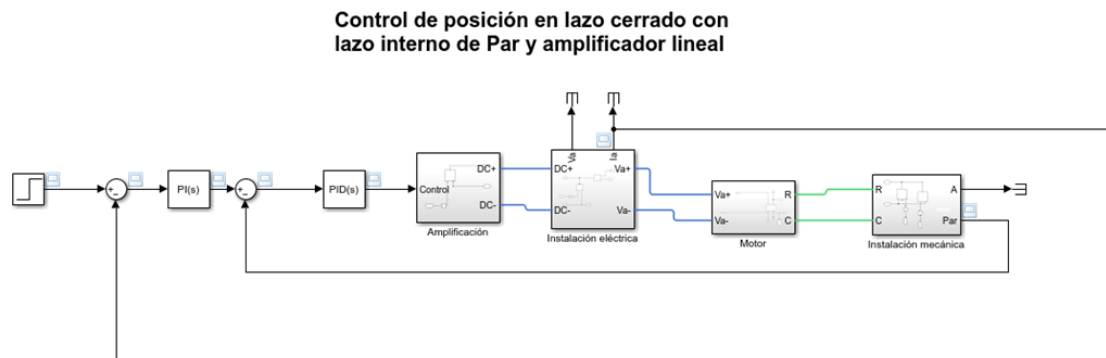


Figura 9: Diagrama de Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de Par y amplificador lineal.

2.-Aplicar una señal de referencia de escalón.

- Step time: 0.1
- Initial Value: 0
- Final Value: 1
- Sample Time: 0

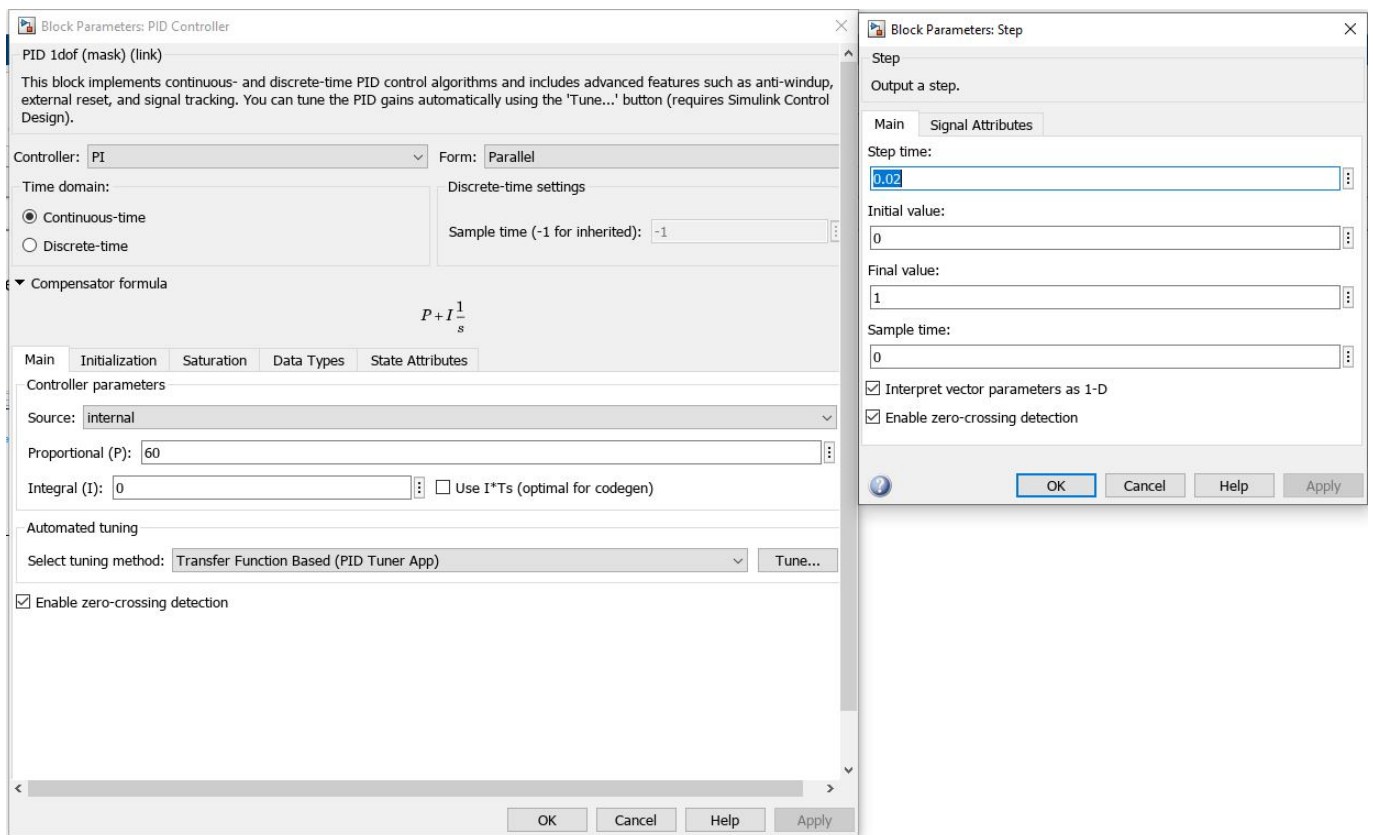


Figura 10: Parámetros de función escalón y de control PI.

3.- Medir y graficar las señales de:

- Referencia=1
- Error= $1000-1=999$
- Señal de control= 1000
- Salida= 100
- Referencia=
- La referencia escalón= 1
- Error del lazo externo de control= 1
- Señal de control del lazo externo= $PI=1 \times 10^{-4}$
- Error del lazo interno de control= 100
- Señal de control del lazo interno= $PID=100000$
- Voltaje de armadura= 100 V
- Salida= 1 en 0.13
- Lazo interno
- Par= 1×10^{-4}
- Lazo externo

4.-Graficar dichas señales

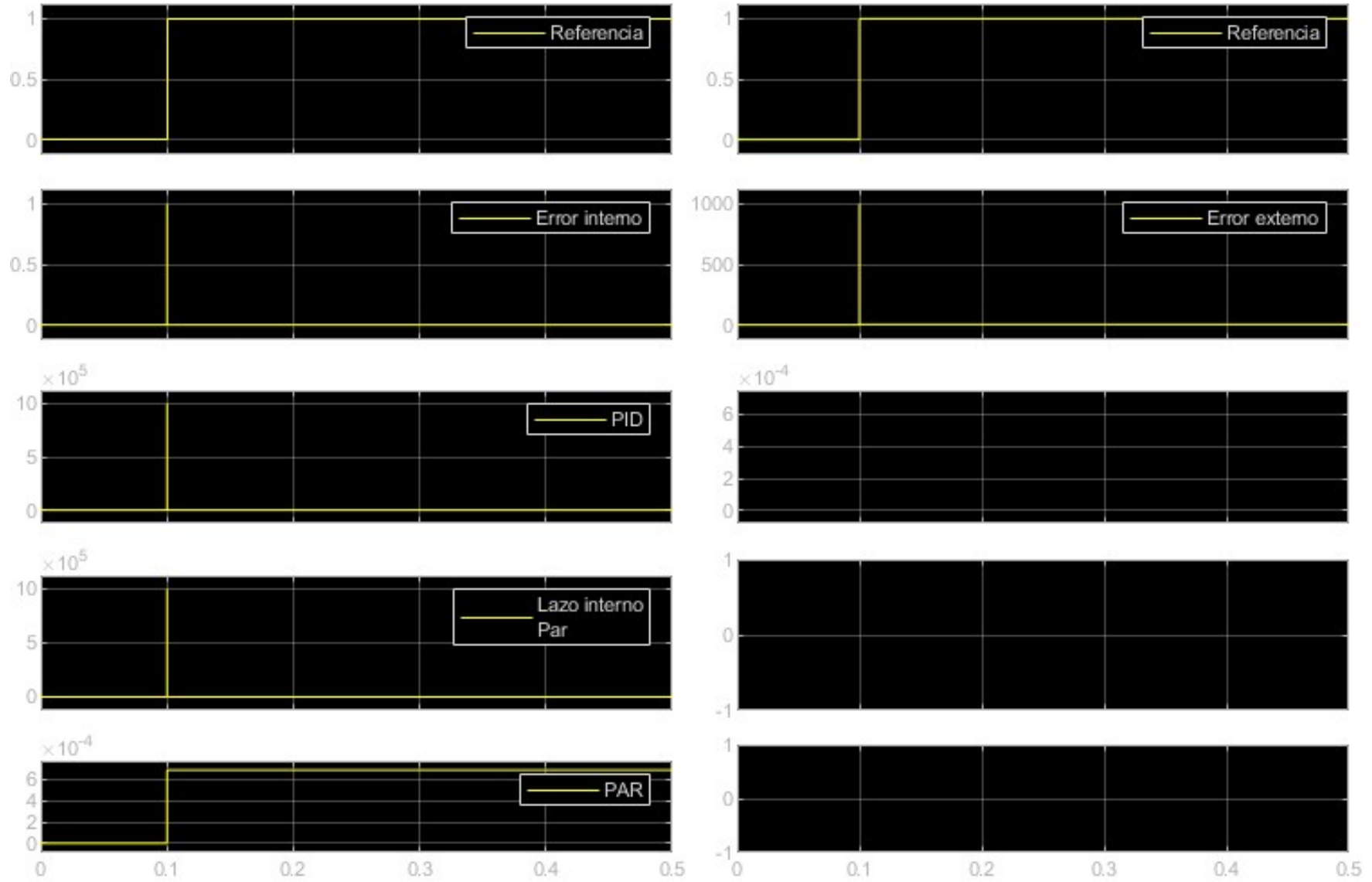


Figura 11: Gráfica de Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de Par y amplificador lineal.

3.1.3. Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de velocidad y amplificador conmutado.

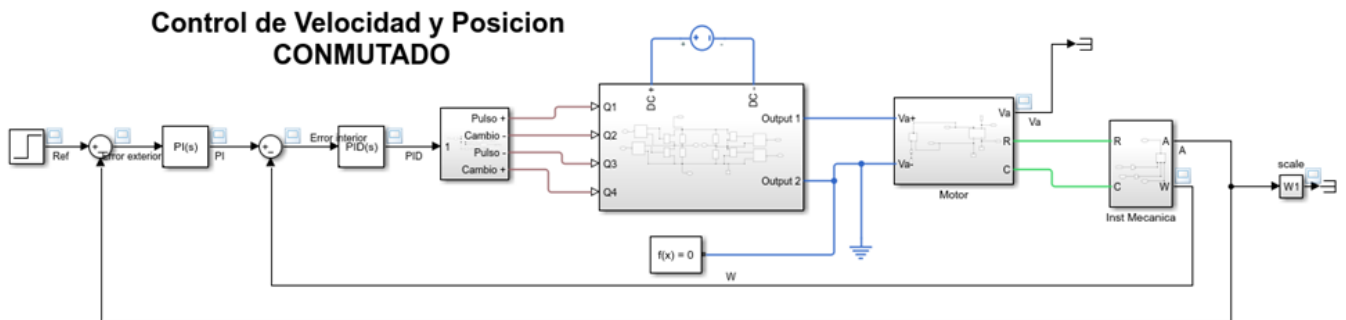


Figura 12: Diagrama de Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de velocidad y amplificador conmutado.

2.-Aplicar una señal de referencia de escalón.

- Step time: 0.01
- Initial Value: 0
- Final Value: 1
- Sample Time: 0

3.- Medir y graficar las señales de:

- Referencia=1
- Error= $1000-1=999$
- Señal de control= $0,00 \times 10^8$
- Salida= 100
- Referencia= 1
- La referencia escalón= 1
- Error del lazo externo de control= $0,00 \times 10^{196}$
- Señal de control del lazo externo= $PI=0,00 \times 10^{200}$
- Error del lazo interno de control= $0,00 \times 10^{206}$
- Señal de control del lazo interno= $PID=0,00 \times 10^{200}$
- Voltaje de armadura= 100 V
- Salida= 1 en 0.13

- Lazo interno
- Par= 1000
- Lazo externo

4.-Graficar dichas señales

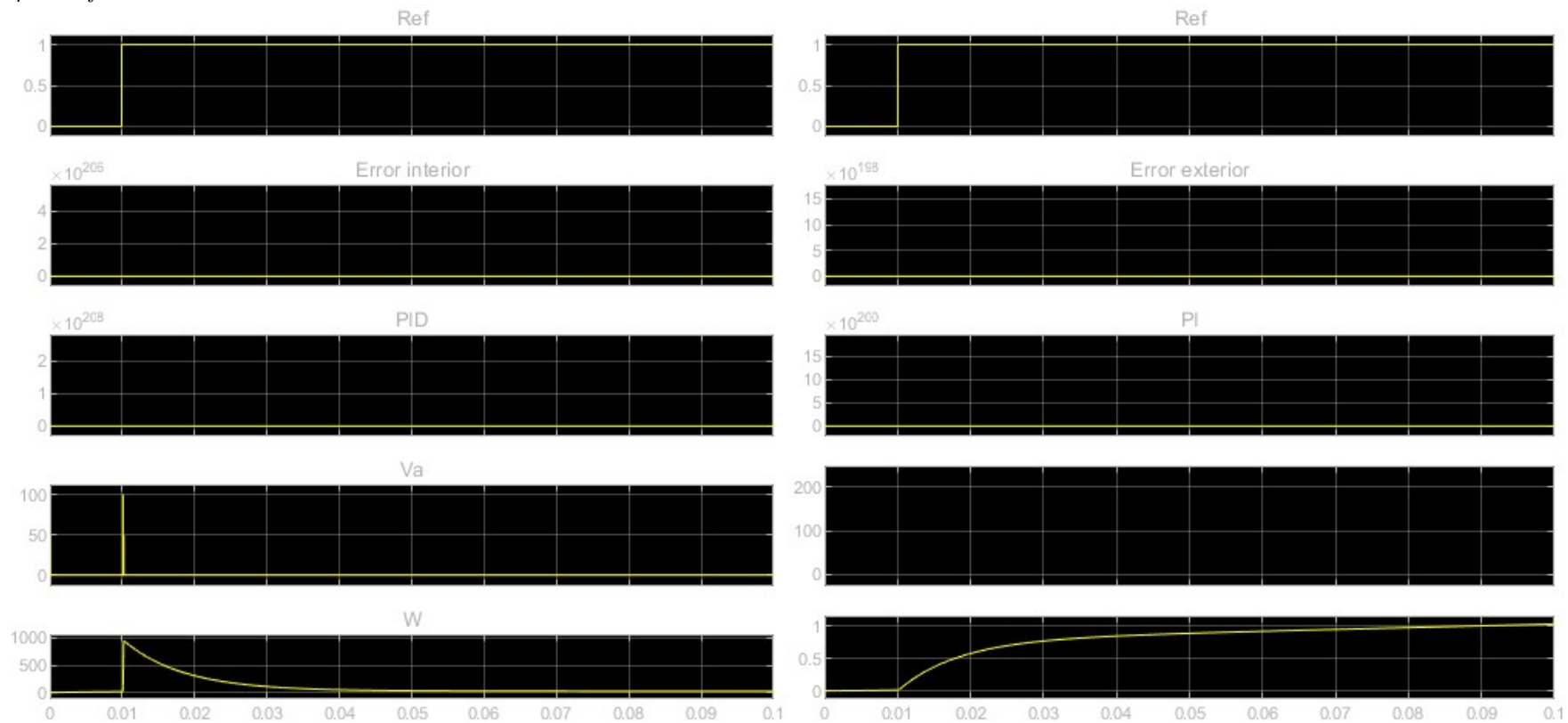


Figura 13: Gráfica de Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de velocidad y amplificador conmutado.

3.1.4. Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de par y amplificador conmutado.

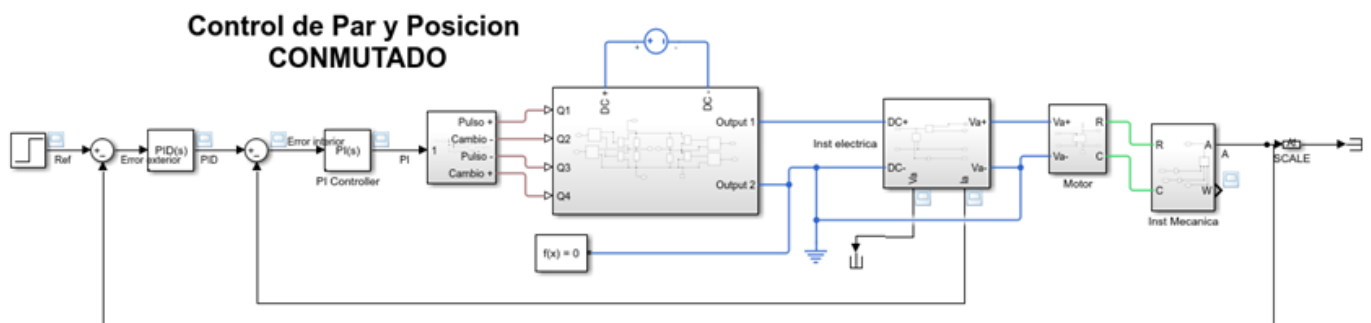


Figura 14: Diagrama de Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de par y amplificador conmutado.

2.-Aplicar una señal de referencia de escalón.

- Step time: 0.01
- Initial Value: 0
- Final Value: 1
- Sample Time: 0

3.- Medir y graficar las señales de:

- Referencia=1
- Error= $(9 \times 10^{-6}) - (9 \times 10^{-6}) = 0$
- Señal de control= 1000
- Salida= 100
- La referencia escalón= 1
- Error del lazo externo de control= 9×10^{-6}
- Señal de control del lazo externo= $PI = 4 \times 10^{-7}$
- Error del lazo interno de control= 9×10^{-6}
- Señal de control del lazo interno= $PID = 4 \times 10^{-7}$
- Voltaje de armadura= 100 V
- Salida= 1 en 0.13
- Lazo interno

- Par= 25.5
- Lazo externo
- Ángulo= 1

4.-Graficar dichas señales

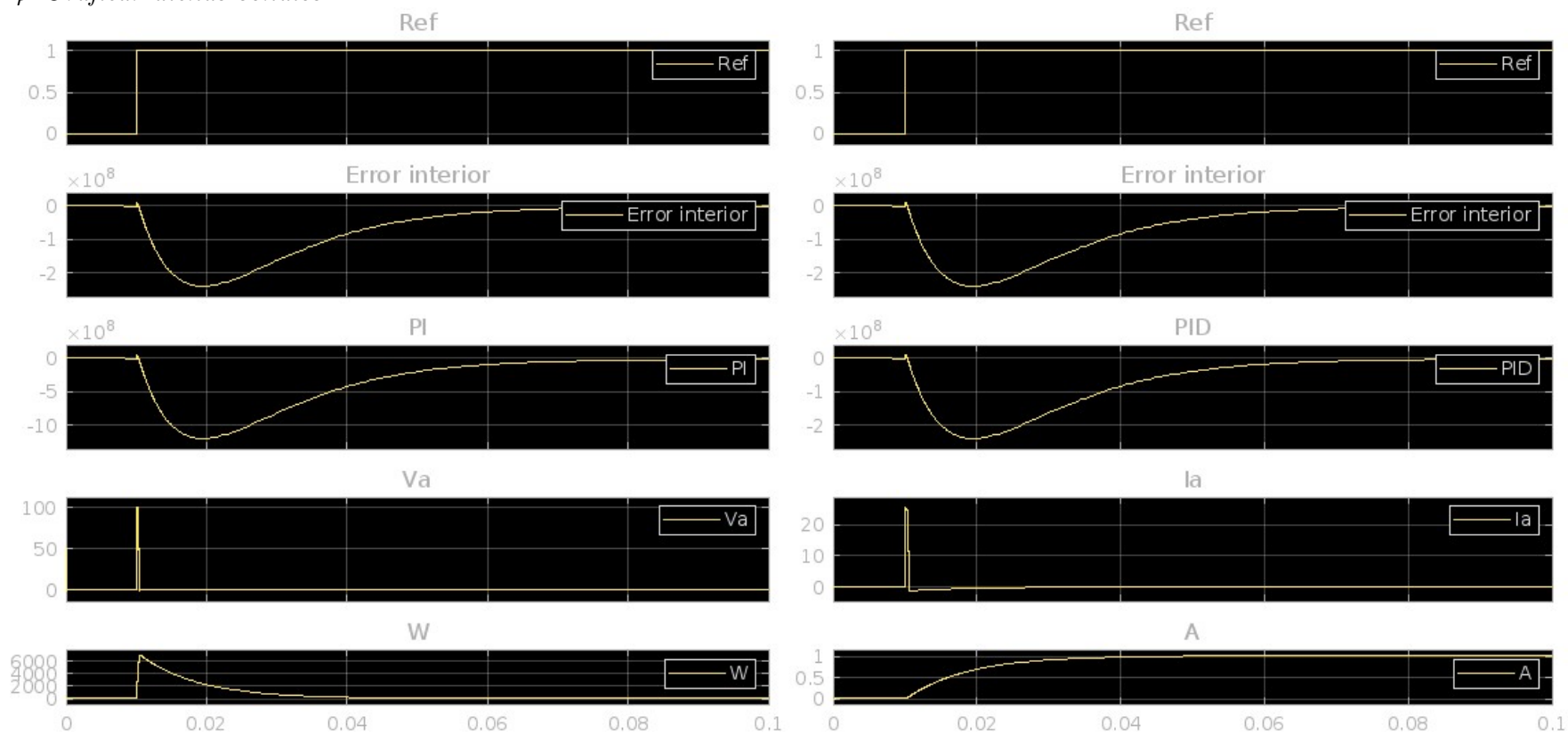


Figura 15: Gráfica de Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de par y amplificador conmutado.

4. Discusión

Los resultados obtenidos durante las diferentes etapas del experimento proporcionan una visión clara de cómo cada configuración de control afecta el rendimiento del sistema de control de posición para un motor de CD.

- Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de velocidad y amplificador lineal La implementación inicial utilizando un amplificador lineal y un controlador de velocidad interno mostró que el sistema puede alcanzar rápidamente la posición deseada. Sin embargo, se observó una pequeña oscilación en la respuesta de velocidad, lo que sugiere que las ganancias del controlador PI podrían necesitar ajustes finos para optimizar la estabilidad del sistema. La respuesta rápida pero oscilante indica que el sistema es reactivo, pero la precisión podría mejorarse con una mayor sintonización de los parámetros del controlador.

- Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de par y amplificador lineal Al cambiar el lazo interno para controlar directamente el par, se notó una mejora en la capacidad del sistema para mantener la estabilidad bajo cargas variables. La reducción del error en estado estacionario es un indicativo de que el controlador de par puede ajustar mejor las fuerzas perturbadoras. Sin embargo, este cambio también introdujo ligeras oscilaciones en la corriente del motor, lo que podría ser mitigado ajustando las constantes del controlador PID para el par.

- Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de velocidad y amplificador conmutado La introducción del amplificador conmutado en el lazo de velocidad mostró una mejora significativa en la eficiencia energética del sistema, debido a la menor disipación de calor en comparación con el amplificador lineal. Sin embargo, la complejidad adicional del sistema de conmutación requiere una sintonización precisa para evitar las posibles fluctuaciones en la velocidad del motor. Los resultados mostraron una respuesta más estable pero con un pequeño retraso inicial, lo que podría ser optimizado con un ajuste fino de los parámetros de control.

- Control de posición en lazo cerrado con lazo interno de par y amplificador conmutado Finalmente, el uso del amplificador conmutado en combinación con el control de par mostró ser la configuración más eficiente en términos de estabilidad y consumo de energía. Las señales de error y de control indicaron una rápida convergencia al valor deseado con mínimas oscilaciones. Esta configuración parece ser la más robusta frente a perturbaciones externas y cambios de carga, destacando su potencial para aplicaciones industriales donde se requieren sistemas altamente fiables y eficientes.

Comparación General y Análisis Comparando todas las configuraciones, se observa que el uso de un amplificador conmutado proporciona una ventaja significativa en términos de eficiencia energética. Además, el control directo del par interno ofrece mejoras en la estabilidad y precisión del sistema. No obstante, cada configuración presenta desafíos específicos en términos de sintonización de los controladores PI y PID para lograr un equilibrio óptimo entre respuesta rápida, estabilidad y eficiencia.

Implicaciones y Sugerencias Futuras Los hallazgos de este experimento tienen importantes implicaciones para el diseño de sistemas de control de motores en aplicaciones industriales. Se sugiere que futuros trabajos exploren la optimización de los parámetros del controlador PID utilizando técnicas avanzadas de sintonización, como algoritmos genéticos o métodos de inteligencia artificial, para adaptarse a diferentes tipos de carga y condiciones operativas. Además, la integración de sensores más precisos y técnicas de estimación del estado podrían mejorar aún más el rendimiento del sistema.

Conclusiones

- Cerda Parra Luis Oscar:

En la práctica realizada sobre el control de posición en lazo cerrado para motores de corriente directa (CD), se ha demostrado que la combinación de control de par y amplificadores conmutados ofrece una solución altamente eficiente y robusta. La implementación del puente H ha permitido un control preciso de la dirección y velocidad del motor, mientras que los controladores PI y PID, ajustados adecuadamente, han mejorado la estabilidad y precisión del sistema. El control de par ha mostrado su eficacia al proporcionar un control más fino del torque, crucial para aplicaciones que requieren alta precisión. Los amplificadores conmutados han contribuido significativamente a la eficiencia energética, reduciendo las pérdidas y mejorando la gestión térmica del sistema. La capacidad de ajuste de los controladores PI y PID ha permitido eliminar el error estacionario y minimizar las oscilaciones, garantizando una respuesta rápida y estable del sistema ante variaciones en la carga o en la referencia de posición.

- Diaz Bello Diego:

El control de posición velocidad en lazo cerrado conmutado, resulto ser mas eficiente desde mi punto de vista, ya que presenta un error muy pequeño en ambos lazos ademas de alcanzar la estabilidad de una manera mas rapida y eficaz a comparacion de los otros modelos

- Vázquez Galán Josá Emmanuel:

El control de posición en lazo cerrado para motores de CD puede beneficiarse significativamente de la combinación de control de par y amplificadores conmutados. Esta configuración ha demostrado ser robusta y eficiente, ofreciendo una solución óptima para aplicaciones que requieren alta precisión y fiabilidad. La implementación del puente H y el ajuste adecuado de los controladores PI y PID mejoran la estabilidad y eficiencia energética del sistema, destacando su potencial para entornos industriales complejos y exigentes.

Bibliografía

- [1] N. S. Nise, Control Systems Engineering, 6th ed. Pomona, CA: California State Polytechnic University, John Wiley Sons, Inc., 2011.
- [2] G. H. Salazar Silva, "Control de par en lazo cerrado para un motor de CD," Trabajo en clase, ciclo escolar 2024/2.
- [3] S. J. Chapman, Máquinas Eléctricas, 5ta ed. BAE Systems Australia, 2024. Revisión técnica por C. Rodríguez Pérez, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Estado de México y A. Santana Díaz, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Toluca.