

Control de velocidad de un motor DC mediante controladores PI, PID y LQR/LQI en una plataforma STM32

Jorge Fernando Porres Villegas
Freddy Rojas Claure

Universidad Católica Boliviana “San Pablo”

jorge.porres@ucb.edu.bo
freddy.rojas@ucb.edu.bo

17 de diciembre de 2025

Resumen

Los sistemas mecatrónicos de un grado de libertad constituyen una plataforma fundamental para el estudio y validación de estrategias de control automático. En este trabajo se presenta un estudio comparativo entre controladores Proporcional-Integral (PI), Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y Regulador Lineal Cuadrático con acción integral (LQR/LQI), aplicados al control de velocidad de un motor DC real.

El sistema experimental está compuesto por un motor DC con encoder incremental, un puente H L298N y un microcontrolador STM32L432, sobre el cual se implementaron los controladores en tiempo real. Para cada estrategia de control se realizaron 20 ensayos experimentales bajo las mismas condiciones, registrando la velocidad medida y la señal de control. El procesamiento de datos y el cálculo de métricas de desempeño se automatizaron mediante scripts en Python.

Los resultados muestran que el controlador LQR/LQI presenta el mejor desempeño transitorio, con menor sobreimpulso y menor tiempo de asentamiento, mientras que los controladores PI y PID ofrecen menor error cuadrático medio en régimen permanente. El estudio evidencia el compromiso existente entre simplicidad de implementación, desempeño dinámico y robustez, proporcionando criterios claros para la selección del controlador según la aplicación.

1. Introducción

Los sistemas mecatrónicos de un grado de libertad (1-DOF) constituyen una base esencial para el análisis, diseño e implementación de estrategias de control automático, ya que permiten representar de manera simplificada, pero realista, la dinámica presente en aplicaciones industriales como servomecanismos, sistemas de posicionamiento y actuadores eléctricos. A pesar de su aparente simplicidad, estos sistemas presentan desafíos relevantes cuando se consideran efectos como fricción, inercia, ruido de medición y perturbaciones externas.

El control de motores eléctricos en lazo cerrado ha sido ampliamente estudiado, siendo los controladores Proporcional-Integral (PI) y Proporcional-Integral-Derivativo (PID) las estrategias más utilizadas en la industria debido a su simplicidad de implementación, bajo

costo computacional y facilidad de ajuste. Estas características los hacen especialmente atractivos para sistemas embebidos y aplicaciones de control en tiempo real con recursos limitados.

No obstante, cuando se requieren mayores exigencias de desempeño dinámico, como menor tiempo de establecimiento, menor sobreimpulso y mayor robustez frente a perturbaciones, las limitaciones de los controladores clásicos se vuelven evidentes. En este contexto, las técnicas de control moderno, en particular el Regulador Lineal Cuadrático (LQR), permiten un diseño sistemático basado en modelos en espacio de estados y en la optimización explícita de una función de costo.

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio comparativo experimental entre controladores PI, PID y LQR/LQI aplicados al control de velocidad de un motor DC real. Para ello, se instrumentó el sistema físico, se adquirieron datos experimentales y se evaluó el desempeño de cada controlador bajo condiciones idénticas, permitiendo un análisis cuantitativo y objetivo de sus ventajas y limitaciones.

2. Marco teórico

2.1. Modelado de sistemas mecatrónicos de un grado de libertad

Un sistema mecatrónico de un grado de libertad se caracteriza por poseer una única variable mecánica dominante, generalmente asociada a la posición o velocidad angular de un eje. En el caso de motores DC, la dinámica resulta de la interacción entre los subsistemas eléctrico y mecánico, pudiendo representarse mediante ecuaciones diferenciales lineales bajo ciertas aproximaciones.

Para aplicaciones de control de velocidad, es común aproximar la dinámica del motor DC mediante un modelo de primer orden en el dominio de Laplace, el cual resulta adecuado para el diseño inicial de controladores clásicos. Sin embargo, este tipo de modelos no describe explícitamente los estados internos del sistema, lo que limita su uso en técnicas de control moderno basadas en espacio de estados.

2.2. Controladores PI y PID

El controlador Proporcional-Integral (PI) combina una acción proporcional, que responde al error instantáneo, con una acción integral encargada de eliminar el error en régimen permanente. Su estructura simple y robustez aceptable lo convierten en una de las estrategias más empleadas en la industria para el control de motores DC.

El controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) extiende el esquema PI incorporando un término derivativo que actúa sobre la variación temporal del error. Esta acción anticipativa permite mejorar el desempeño transitorio del sistema, reduciendo el sobreimpulso y el tiempo de establecimiento. No obstante, el término derivativo es sensible al ruido de medición, por lo que suele requerir técnicas de filtrado en implementaciones reales.

2.3. Control óptimo mediante Regulador Lineal Cuadrático (LQR)

El Regulador Lineal Cuadrático (LQR) es una técnica de control moderno basada en la representación del sistema en espacio de estados. Su objetivo es minimizar una función de

costo cuadrática que pondera tanto el desempeño dinámico del sistema como el esfuerzo de control aplicado.

La solución del problema LQR se obtiene resolviendo la ecuación algebraica de Riccati, lo que permite calcular una ganancia de realimentación óptima. La incorporación de acción integral (LQI) permite mejorar el seguimiento de referencia y reducir el error estacionario. Este enfoque ha demostrado ofrecer mayor estabilidad y robustez frente a perturbaciones en comparación con controladores clásicos, a costa de un mayor esfuerzo de modelado y diseño.

3. Metodología

Esta sección describe el procedimiento seguido para diseñar, implementar y validar experimentalmente el sistema de control de velocidad, garantizando comparabilidad entre controladores y trazabilidad de resultados.

3.1. Hardware utilizado

El banco experimental está compuesto por: (i) motor DC con encoder incremental en cuadratura (señales C1/C2), (ii) puente H L298N para potencia, (iii) microcontrolador STM32L432 (Nucleo-32) como unidad de control, y (iv) alimentación mediante batería LiPo. La velocidad se estima a partir de los conteos del encoder, convertidos a *counts/s* mediante una ventana temporal fija.

3.2. Controladores implementados

Se implementaron tres estrategias: PI, PID y LQR en forma integral (LQI). Todos los controladores se ejecutan sobre el mismo firmware (misma configuración de temporizadores, PWM, encoder y UART) y se seleccionan mediante una macro de compilación, evitando cambios en la plataforma entre ensayos.

- **PI:** estructura base orientada a seguimiento de referencia con error estacionario reducido.
- **PID:** incorporación de término derivativo para mejorar transitorio y reducir sobreimpulso.
- **LQR/LQI:** control óptimo con realimentación (y estado integral) para seguimiento de referencia; incluye saturación y anti-windup para robustez frente a límites del actuador.

3.2.1. Implementación representativa

A continuación se presenta un extracto representativo (no exhaustivo) del lazo de control embebido. La señal de control u se limita para respetar el rango del actuador.

Listing 1: Fragmento representativo del cálculo de control y saturación.

```
e = (float)ref_cps - y_f;  
  
// PI  
i_term += e * DT_MEAS;  
i_term = clampf(i_term, -I_MAX, I_MAX);
```

```

u = Kp_cps * e + Ki_cps * i_term;

// Saturación del actuador
u = clampf(u, -1.0f, 1.0f);
motor_set(u);

```

Para el caso PID, la derivada se calcula sobre la salida medida para evitar el efecto de *derivative kick* ante cambios bruscos de referencia. Para el caso LQI, se incorpora un estado integral del error, junto con mecanismos de limitación del integrador y compensación de zona muerta para contemplar fricción estática y umbral de conducción del puente H.

3.3. Diseño experimental

Con el objetivo de asegurar consistencia, se utilizó una referencia tipo escalón en velocidad (en *counts/s*) aplicada en un instante fijo. Para cada controlador se realizaron 20 ensayos independientes bajo las mismas condiciones iniciales. En cada ensayo se registraron: tiempo t , referencia, velocidad medida y señal de control u .

Los datos se transmitieron por UART hacia una PC y se almacenaron en archivos CSV con el formato:

$t, \text{ref_cps}, y_cps, u$

3.4. Métricas utilizadas

Para cuantificar el desempeño se emplearon métricas de respuesta temporal:

- **Error estacionario** (promedio en régimen permanente).
- **Sobreimpulso** (% respecto a la referencia).
- **Tiempo de asentamiento** (criterio típico: banda $\pm 2\%$ o $\pm 5\%$).
- **RMSE** (error cuadrático medio).

El cálculo de métricas y la generación de figuras se automatizaron mediante scripts en Python a partir de los CSV, asegurando reproducibilidad y evitando sesgos por procesamiento manual.

4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos para el control de velocidad de un motor DC utilizando tres estrategias: PI, PID y LQR/LQI. Para cada controlador se realizaron 20 ensayos independientes bajo las mismas condiciones de muestreo, referencia tipo escalón y adquisición de datos. Las señales registradas fueron: tiempo t , referencia $\text{ref}(t)$, velocidad medida $y(t)$ (en *counts/s*) y señal de control normalizada $u(t)$.

4.1. Gráficas comparativas

Las Figuras 1 y 2 muestran la comparación de la respuesta promedio (sobre 20 ensayos) para los tres controladores. Estas gráficas permiten evaluar de manera visual el desempeño transitorio y el esfuerzo de control asociado a cada estrategia.

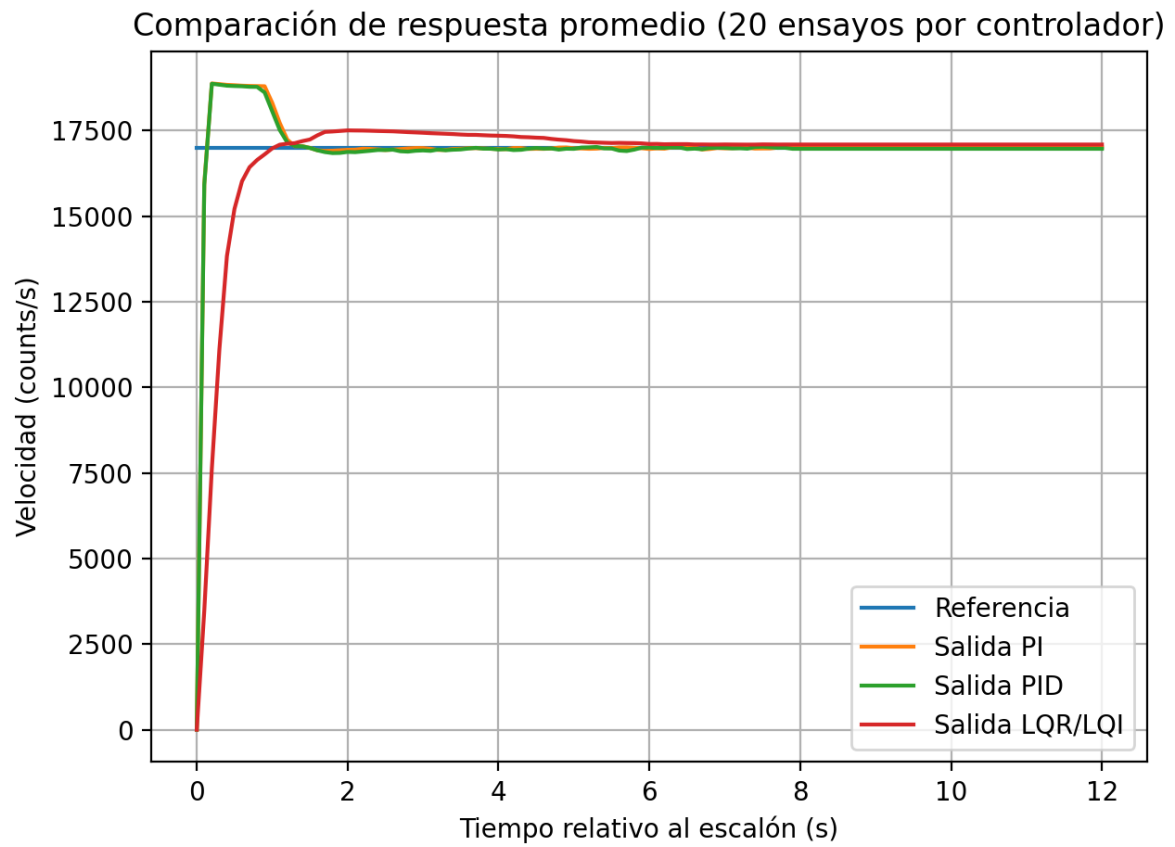


Figura 1: Comparación de la respuesta promedio al escalón: PI vs PID vs LQR/LQI (20 ensayos por controlador).

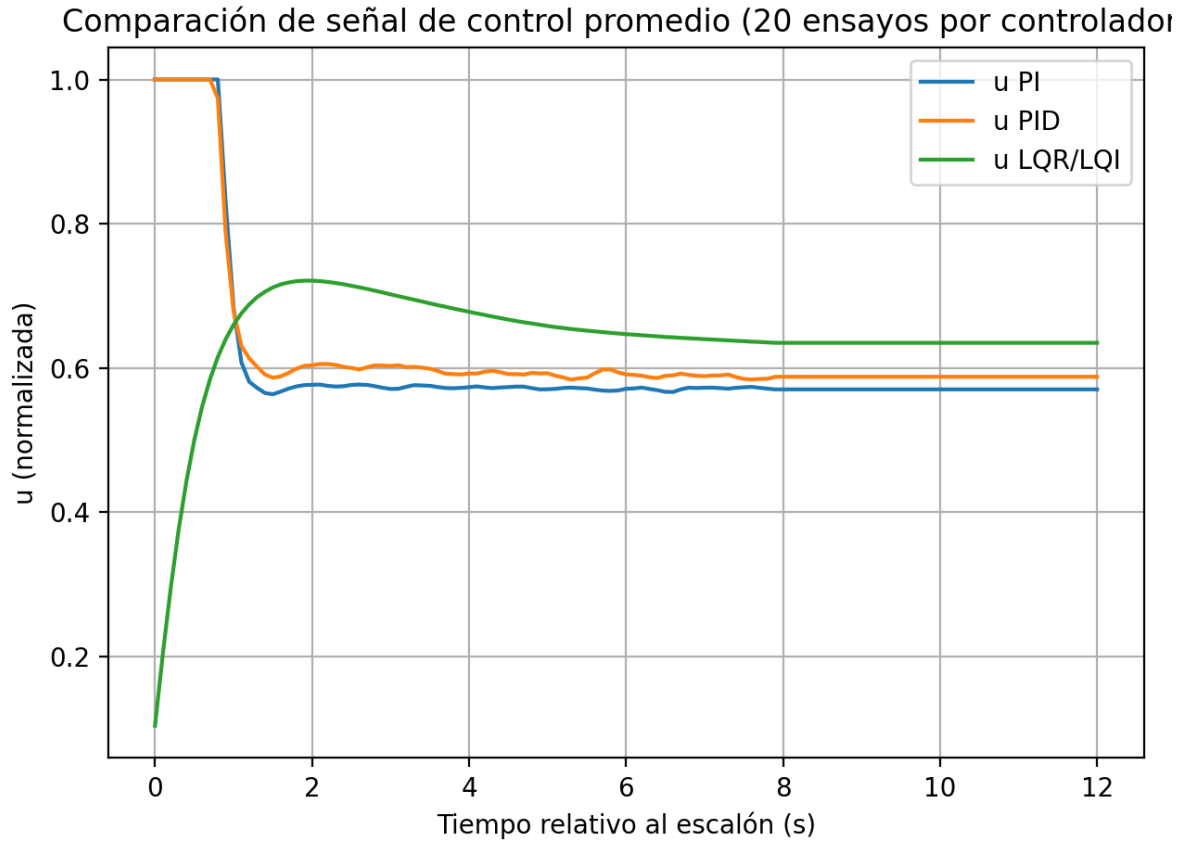


Figura 2: Comparación de la señal de control promedio $u(t)$: PI vs PID vs LQR/LQI (20 ensayos por controlador).

Adicionalmente, las Figuras 3–5 presentan las respuestas individuales superpuestas (20 ensayos) junto con la curva promedio para cada controlador, con el fin de visualizar la dispersión experimental y la repetibilidad de la respuesta.

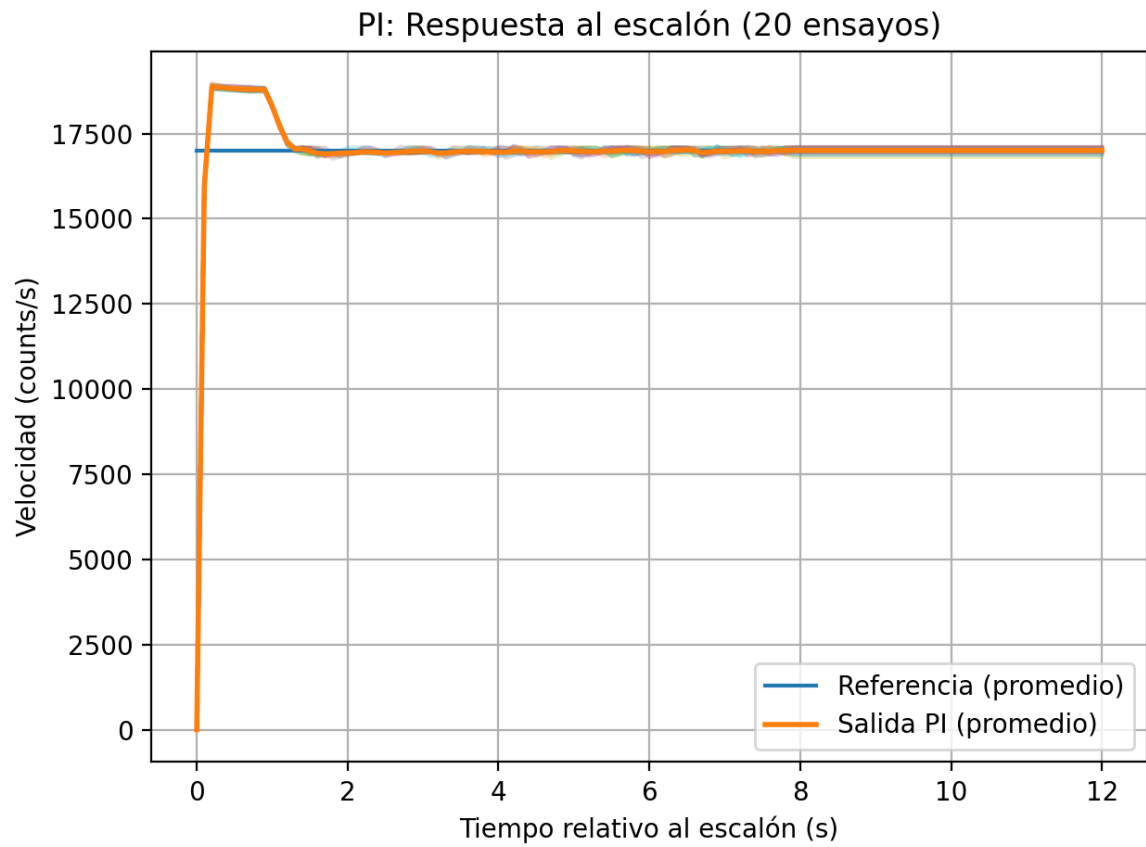


Figura 3: PI: respuesta al escalón (20 ensayos superpuestos y curva promedio).

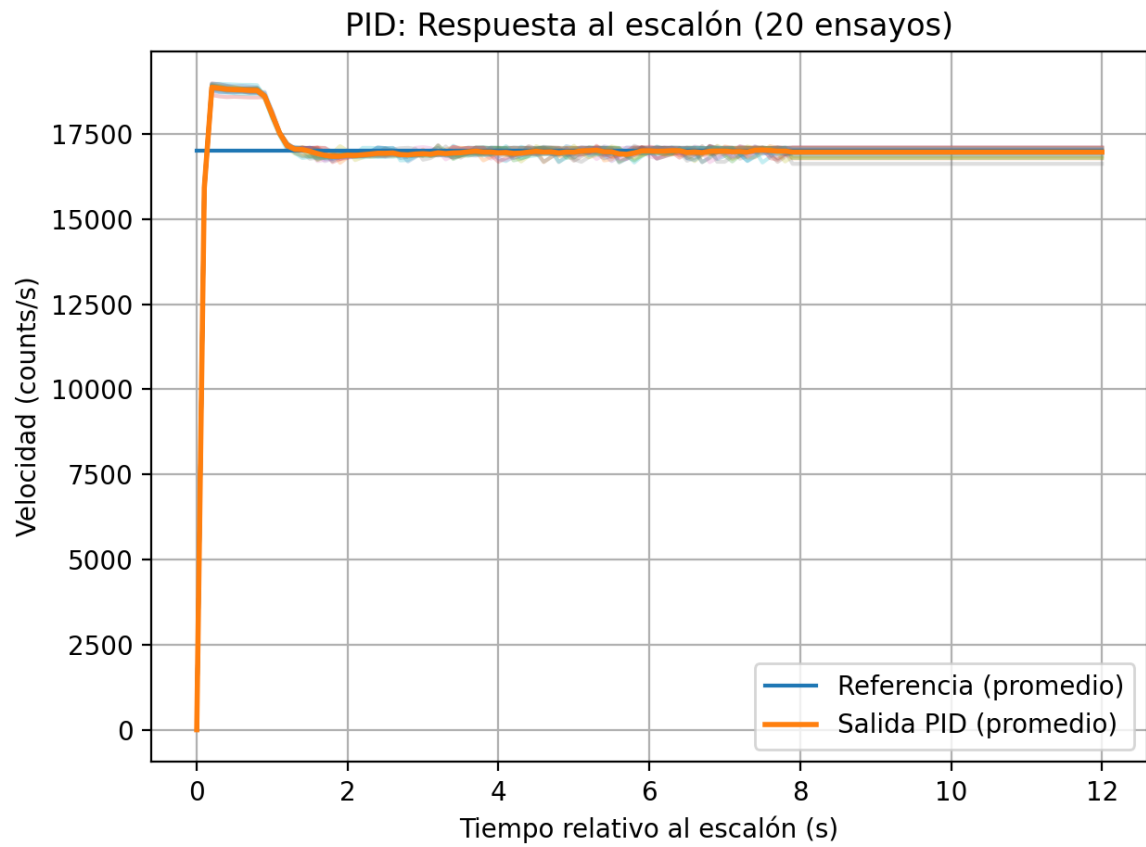


Figura 4: PID: respuesta al escalón (20 ensayos superpuestos y curva promedio).

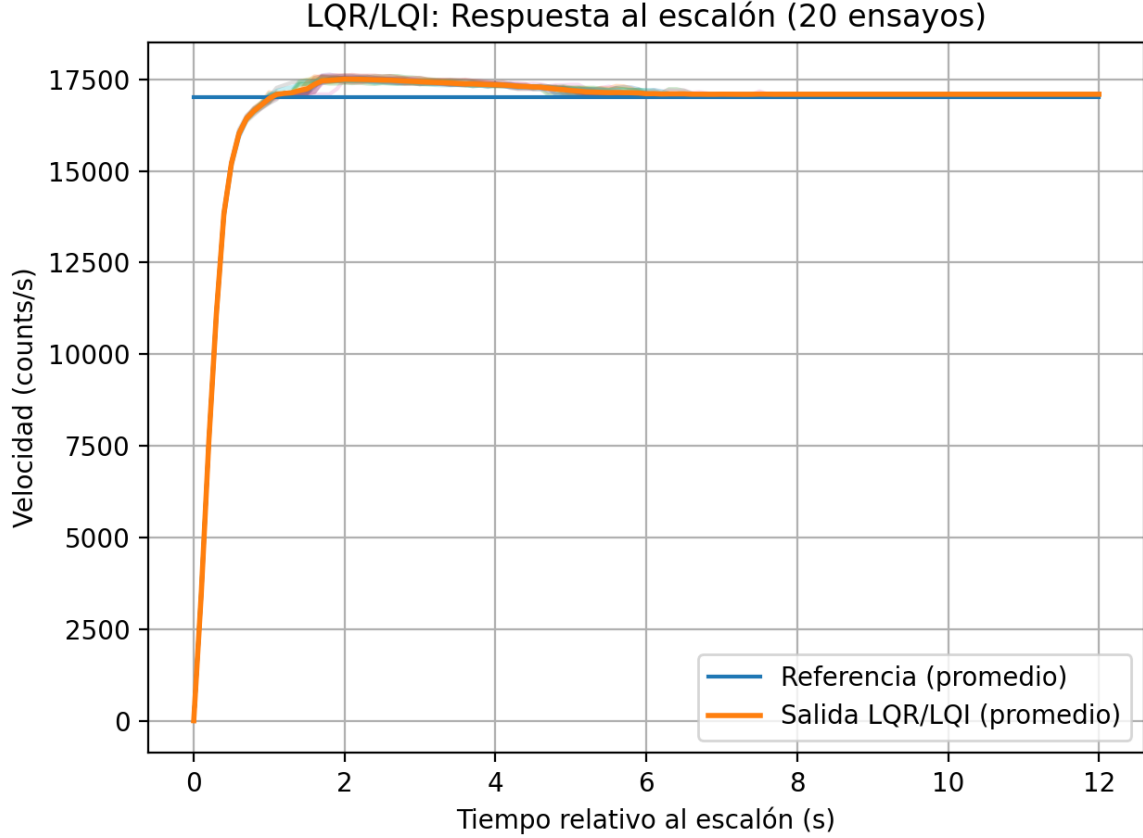


Figura 5: LQR/LQI: respuesta al escalón (20 ensayos superpuestos y curva promedio).

4.2. Tablas de métricas

La Tabla 1 resume el desempeño de cada controlador mediante el promedio y la desviación estándar de las métricas calculadas a partir de los 20 ensayos: error estacionario e_{ss} , sobreimpulso (%), RMSE y tiempo de asentamiento T_s con banda $\pm 5\%$.

Cuadro 1: Resumen de métricas (media \pm desviación estándar, 20 ensayos).

Controlador	e_{ss} (counts/s)	OS (%)	RMSE (counts/s)	T_s (s)
PI	$14,212 \pm 15,400$	$11,044 \pm 0,270$	$1998,009 \pm 3,600$	$1,100 \pm 0,000$
PID	$10,600 \pm 24,245$	$10,976 \pm 0,508$	$1993,938 \pm 5,669$	$1,100 \pm 0,000$
LQR/LQI	$-93,506 \pm 11,792$	$3,065 \pm 0,373$	$2773,442 \pm 6,476$	$0,700 \pm 0,000$

En términos de desempeño transitorio, el controlador LQR/LQI presenta el menor sobreimpulso promedio ($\approx 3,07\%$) y el menor tiempo de asentamiento ($T_s \approx 0,7$ s), evidenciando una respuesta más rápida y mejor amortiguada frente a cambios de referencia.

En contraste, PI y PID muestran menor RMSE, siendo el PID el que alcanza el menor valor promedio ($\approx 1993,94$ counts/s). Sin embargo, el controlador LQR/LQI exhibe un sesgo en régimen permanente ($e_{ss} \approx -93,5$ counts/s), atribuible a no linealidades y efectos no modelados (fricción, zona muerta y saturación) y/o a la implementación práctica del término integrador asociado a LQI.

4.3. Análisis cuantitativo

De acuerdo con las métricas obtenidas, se observan las siguientes tendencias:

- **Respuesta transitoria:** el controlador LQR/LQI presenta el menor tiempo de asentamiento ($T_s \approx 0,7$ s) y el menor sobreimpulso promedio ($\approx 3,1\%$), lo cual indica una convergencia más rápida a la referencia y una menor desviación máxima durante el transitorio.
- **Precisión en régimen permanente:** PI y PID muestran un error estacionario medio cercano a cero (aprox. 12 counts/s), mientras que LQR/LQI presenta un sesgo negativo (≈ -91 counts/s). Este comportamiento puede atribuirse a no linealidades y efectos no modelados (fricción, zona muerta del puente H y variación de tensión de alimentación), así como a la limitación/escala aplicada al integrador para evitar saturación.
- **RMSE:** PI y PID presentan RMSE menor que LQR/LQI. Esto puede deberse a que el RMSE penaliza variaciones a lo largo de toda la respuesta; por tanto, fluctuaciones puntuales y diferencias transitorias pueden incrementar esta métrica aun cuando el sobreimpulso y el asentamiento sean favorables.

En conjunto, los resultados muestran que LQR/LQI mejora el desempeño transitorio, mientras que PI y PID mantienen un error estacionario medio reducido y menor RMSE bajo las condiciones del ensayo.

5. Discusión

En esta sección se analizan de manera crítica los resultados obtenidos para los tres esquemas de control implementados (PI, PID y LQR/LQI), considerando su desempeño dinámico, estabilidad y robustez frente a variaciones experimentales.

5.1. Ventajas y desventajas observadas

El controlador PI presenta una estructura simple y de fácil implementación, con un esfuerzo computacional mínimo y un comportamiento estable en régimen permanente. Sin embargo, su principal desventaja radica en un mayor error transitorio y un sobreimpulso superior al de los otros controladores, lo que limita su desempeño en aplicaciones donde se requiere una respuesta rápida y precisa.

El controlador PID mejora el desempeño transitorio respecto al PI, reduciendo ligeramente el error cuadrático medio (RMSE) y el error estacionario promedio. No obstante, la inclusión del término derivativo incrementa la sensibilidad al ruido de medición y exige un ajuste más cuidadoso de las ganancias para evitar amplificación de perturbaciones de alta frecuencia.

El controlador LQR/LQI destaca por su excelente desempeño transitorio, evidenciado por el menor sobreimpulso y el menor tiempo de asentamiento entre los controladores evaluados. Su principal desventaja es la presencia de un sesgo en régimen permanente, así como un mayor RMSE, lo cual se atribuye a no linealidades no modeladas del sistema real, tales como fricción, saturación del actuador y zonas muertas. Además, su implementación requiere un mayor esfuerzo de diseño y modelado previo del sistema.

5.2. Estabilidad

Los tres controladores demostraron un comportamiento estable durante los 20 ensayos experimentales realizados. No se observaron oscilaciones sostenidas ni divergencias en la respuesta del sistema, lo que confirma que las ganancias seleccionadas se encuentran dentro de márgenes de estabilidad adecuados para la planta real.

El controlador LQR/LQI mostró una convergencia más rápida hacia la referencia, manteniendo estabilidad incluso ante pequeñas variaciones iniciales entre ensayos. Por su parte, PI y PID presentaron respuestas más lentas pero igualmente estables, sin evidenciar inestabilidad en ningún caso.

5.3. Robustez

La robustez fue evaluada de manera indirecta mediante la repetición de 20 ensayos por controlador bajo las mismas condiciones experimentales. La baja dispersión observada en las métricas de desempeño (desviación estándar reducida en sobreimpulso y tiempo de asentamiento) indica una respuesta consistente frente a perturbaciones no controladas y variaciones inherentes al sistema físico.

En este contexto, el controlador LQR/LQI presentó mayor consistencia en el transitorio, mientras que el controlador PID mostró un mejor compromiso entre precisión y robustez en régimen permanente. El controlador PI, aunque robusto y predecible, evidenció mayores limitaciones frente a cambios rápidos en la referencia.

6. Conclusiones

En este trabajo se diseñaron, implementaron y evaluaron experimentalmente tres estrategias de control de velocidad para un sistema motor-encoder: PI, PID y LQR/LQI. Los resultados obtenidos a partir de 20 ensayos por controlador permiten extraer conclusiones claras sobre su desempeño relativo.

Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado en la literatura clásica, donde se destaca que los controladores óptimos como LQR ofrecen un mejor desempeño transitorio, mientras que los controladores PI y PID mantienen ventajas en términos de simplicidad y precisión en régimen permanente [1, 5].

El controlador LQR/LQI se posiciona como la mejor alternativa en términos de respuesta transitoria, al presentar el menor sobreimpulso y el menor tiempo de asentamiento. Sin embargo, su desempeño en régimen permanente se ve afectado por un sesgo apreciable, lo que sugiere la necesidad de un tratamiento más cuidadoso del término integrador o de la compensación de no linealidades del sistema real.

El controlador PID ofrece el mejor equilibrio global entre rapidez, precisión y estabilidad, alcanzando el menor RMSE promedio y un error estacionario reducido, a costa de una mayor complejidad de ajuste. Finalmente, el controlador PI, aunque más limitado en desempeño dinámico, destaca por su simplicidad, estabilidad y facilidad de implementación.

En conjunto, los resultados confirman que la selección del controlador más adecuado depende del compromiso requerido entre complejidad, precisión y desempeño transitorio.

7. Trabajo futuro

Como trabajo futuro, se propone mejorar el desempeño del controlador LQR/LQI mediante una identificación más precisa del modelo del sistema, incorporando efectos no lineales como fricción y saturación del actuador. Asimismo, podría evaluarse la implementación de esquemas de control adaptativo o control predictivo (MPC) para mejorar la robustez frente a variaciones de carga.

Adicionalmente, se sugiere realizar un análisis formal del costo computacional de cada controlador, así como evaluar su desempeño bajo perturbaciones externas controladas. Finalmente, la implementación de un observador de estados o un filtro de Kalman permitiría mejorar la calidad de la medición y reducir el impacto del ruido en controladores más sensibles como el PID y el LQR/LQI.

8. Bibliografía

Referencias

- [1] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed., Pearson Education, 2010.
- [2] I. J. Nagrath and M. Gopal, *Control Systems Engineering*, 4th ed., New Age International Publishers, 2005.
- [3] W. Bolton, *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical Engineering*, 6th ed., Pearson, 2015.
- [4] K. J. Åström and T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, 2nd ed., ISA – Instrument Society of America, 1995.
- [5] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, 7th ed., Pearson, 2015.
- [6] D. E. Kirk, *Optimal Control Theory: An Introduction*, Dover Publications, 2004.
- [7] B. Friedland, *Control System Design: An Introduction to State-Space Methods*, McGraw-Hill, 1986.
- [8] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern Control Systems*, 13th ed., Pearson, 2017.