

Estabilización de un balancín eólico de bajo costo mediante un controlador LQR con compensación gravitatoria: Resultados experimentales.

José Raúl Alvarado-Hernández¹, Oscar Domínguez-Ortega¹, Mario Oscar Ordaz-Oliver²

¹Universidad La Salle Pachuca. Escuela de ingeniería

²Tecnológico Nacional de México, Campus Pachuca. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
jose.alvarado@lasallep.mx, oscar.dominguez@lasallep.mx,
mario.oo@pachuca.tecnm.mx

Resumen. En este estudio, se propone la implementación de un filtro de Kalman a un sistema balancín, con el objetivo de mitigar el ruido inherente a las mediciones y al término derivativo en el controlador LQR+G. Dicha estrategia permite una detección ágil de las oscilaciones del balancín y la aplicación precisa de fuerzas correctivas. La calibración de los parámetros del controlador es crucial para garantizar un rendimiento adecuado, con valores que pueden variar según las características específicas del balancín y las condiciones operativas. Para esto, se llevó a cabo un estudio comparativo entre el controlador LQR+G y un controlador PID, lo que proporciona una comprensión más profunda de las ventajas y limitaciones de cada enfoque. Concluyendo que el controlador LQR+G presenta un mejor desempeño para esta aplicación.

Palabras Clave: Filtro de Kalman, Balancín, LQR+G.

1 Descripción de la problemática prioritaria abordada

En el ámbito de la automatización y control industrial, un balancín es un sistema que oscila alrededor de un punto de equilibrio. Recientemente, se han sustituido los actuadores lineales por motores eléctricos con hélices, creando así el aeropéndulo o balancín eólico. El principal desafío de estos sistemas es la regulación del movimiento y el equilibrio para mantener la posición deseada. Para abordar este desafío, es posible la implementación de distintos controladores como el proporcional-integral-derivativo (PID). El controlador PID, ampliamente utilizado en ámbitos académicos e industriales, calcula el error comparando la salida del sistema con un valor deseado y genera una señal de control basada en acciones proporcional, integral y derivativa. El controlador LQR con compensación de gravedad, poco común en robots manipuladores, aborda la estabilidad del sistema frente a incertidumbres y se adapta a robots con articulaciones rotacionales minimizando el consumo de energía. El presente trabajo aborda la problemática del alto consumo de energía en procesos de control a nivel industrial, específicamente en sistemas robóticos con dinámicas no lineales que realizan tareas de regulación punto a punto. Esta investigación se centra en la combinación de un control óptimo con una compensación de efectos gravitatorios, buscando mejorar la eficiencia energética y la precisión en la regulación de estos sistemas, misma que está alineada con los objetivos 9 y 12 de Desarrollo Sostenible establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Estos objetivos, que son considerados como metas comunes por la Red Internacional de Investigación Lasallista (RIILSA), abordan preocupaciones tanto en la Industria, innovación e infraestructura como en la Producción y consumo responsables. La investigación

Memorias del Concurso Lasallista de Investigación, Desarrollo e innovación

Vol. 11, Núm. 1, pp. DyT 112-116, 2024, DOI: 10.26457/mclidi.v11i1.4210 Universidad La Salle México.

JOSÉ RAÚL ALVARADO HERNÁNDEZ, OSCAR DOMÍNGUEZ ORTEGA de la carrera en INGENIERÍA MECATRÓNICA, de la ESCUELA DE INGENIERÍA, de la UNIVERSIDAD LA SALLE PACHUCA.

MARIO OSCAR ORDAZ OLIVER fue el asesor de este trabajo.

pretende contribuir a estos objetivos mediante el desarrollo de soluciones tecnológicas que promuevan la eficiencia energética y la sostenibilidad en el sector industrial.

2 Objetivo

Construir una plataforma experimental para la investigación e implementar sobre esta un controlador LQR+G combinado con un filtro de Kalman para lograr un control preciso de la posición del balancín, minimizando el consumo de energía.

3 Propuesta teórico-metodológica

Este informe detalla el desarrollo de un sistema de control de posición para un balancín eólico utilizando un controlador LQR+G junto con un filtro de Kalman. Inicialmente, se implementa un controlador PID en una plataforma Arduino, ajustando sus ganancias mediante asignación de polos y evaluando su desempeño en diversas plataformas. La segunda fase del proyecto incluyó la construcción del mecanismo para el balancín, el cual se ve representado en la Figura 1, este fue diseñado en SolidWorks y fabricado con tecnología de corte láser en acrílico e impresión 3D para las partes móviles. Los componentes del balancín incluyeron un motor sin escobillas, un controlador electrónico de velocidad, un Arduino UNO como tarjeta de desarrollo programable, un potenciómetro para la retroalimentación de posición, y una batería de ácido plomo para la alimentación, además de una hélice 1045 para generar la sustentación. Para mejorar la precisión de las mediciones del potenciómetro, se implementó un filtro de Kalman, que estimó un valor de posición libre de ruido, reduciendo las oscilaciones alrededor del valor de referencia. El sistema de control ajusta la velocidad del motor utilizando tanto el controlador PID como el LQR con compensación gravitatoria, manteniendo así la velocidad cercana al valor deseado X_{ref} y minimizando las oscilaciones y errores en la posición del balancín. El controlador PID calcula la integral del error para mejorar la precisión en estado estacionario, ajustando los parámetros K_p , K_i y K_d mediante asignación de polos específicamente para este sistema. Por otro lado, el controlador LQR+G demostró ser más efectivo para estabilizar el sistema bajo la influencia gravitatoria, proporcionando una regulación más precisa y estable, aunque enfrenta desafíos en la reducción del consumo energético y la convergencia del estado. Como solución al alto consumo energético en sistemas robóticos con dinámicas no lineales, se propuso una combinación de regulador cuadrático lineal y la compensación gravitatoria, logrando una regulación subóptima que minimiza el consumo energético y mejora la convergencia del estado. La ecuación (1) expresa la ley de control con esta acción combinada:

$$u(t) = K_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \dots (1)$$

El controlador LQR+G, que incluye una estrategia para contrarrestar los efectos gravitatorios, se expresa como:

$$u(t) = -R^{-1}B^T P x(t) + \tau(t)_{F_{gy}} \dots (2)$$

Estas ecuaciones fueron discretizadas utilizando métodos como la sumatoria trapezoidal y la definición de la derivada de Euler con diferencias finitas divididas hacia atrás, para su

implementación en el sistema digital basado en la tarjeta Arduino UNO. El desarrollo de este sistema de control de posición para un balancín eólico demuestra una solución eficaz para la regulación precisa de sistemas mecánicos en entornos industriales, contribuyendo a la eficiencia energética y la sostenibilidad, alineándose con los objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU.

4 Discusión de resultados

En esta sección se presentan las características y condiciones experimentales relevantes, donde se analizan gráficamente la señal de control, el error de posición y la posición angular para cada ley de control implementada durante un periodo de 50 segundos. Para el controlador PID, las ganancias fueron ajustadas mediante un método de asignación de polos para optimizar su rendimiento en las pruebas experimentales. En contraste, para el controlador LQR+G, se penalizaron las matrices Q y R con el fin de minimizar el consumo de energía y maximizar la convergencia del estado. La Figura 2 muestra que el error disminuye hasta alcanzar cero en aproximadamente 7 segundos con el controlador LQR+G, demostrando su eficacia en la rápida reducción del error. En comparación, la Figura 3 revela que el controlador PID logra reducir el error hasta cero en aproximadamente 37 segundos, indicando una convergencia más lenta hacia el estado deseado en comparación con el LQR+G. En cuanto a la Figura 2, se observa la posición angular del balancín con el controlador LQR+G, alcanzando la referencia en aproximadamente 8 segundos, lo cual muestra una respuesta precisa y rápida del sistema. Por otro lado, la Figura 3 ilustra que el controlador PID alcanza la posición deseada en aproximadamente 38 segundos, indicando una regulación más lenta en comparación con el LQR+G. En la Figura 2, relacionada con el control LQR+G, se destaca que la señal de control alcanza su máximo cerca de los 4 segundos y se estabiliza en un valor cercano a 410 en regulación por ancho de pulso (PWM), mostrando una estabilidad notable con mínimas oscilaciones después de 8 segundos. Mientras tanto, la Figura 3 presenta la señal de control del PID, alcanzando su máximo alrededor de los 35 segundos y manteniéndose constante hasta el final del experimento, lo cual revela una regulación menos precisa en comparación con el control LQR+G, que muestra fluctuaciones menores y una estabilidad más consistente. Los índices de desempeño en sistemas de control, como la integral del valor absoluto del error (IAE), la integral del valor absoluto del error multiplicado por el tiempo (ITAE), la integral del tiempo del error al cuadrado (ITSE) y la integral del error al cuadrado (ISE), son herramientas cruciales para evaluar la eficacia y eficiencia de los controladores. Estos índices cuantitativos permiten medir cómo un sistema responde a errores con el tiempo y contribuyen a optimizar el rendimiento del controlador al minimizar el error y el consumo de energía. En el estudio comparativo entre el control PID y el LQR+G, se observa que el LQR+G supera significativamente al PID en todos los criterios evaluados. En la Tabla 1 se observa que el control LQR+G presenta valores menores en los distintos índices de desempeño, en comparación con el control PID, lo que indica una mejor capacidad para reducir tanto el error absoluto como el consumo de energía. Esta superioridad se debe a la capacidad del LQR+G para minimizar un índice de desempeño cuadrático a la vez que compensa los efectos gravitatorios, garantizando una convergencia en el estado deseado con consumo de mínimo de energía. Estas mejoras en el rendimiento del controlador LQR+G no solo benefician la precisión y estabilidad del sistema mecánico, sino que también contribuyen positivamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente en términos de eficiencia energética y gestión responsable de los recursos. Las tablas proporcionadas ilustran claramente cómo el LQR+G presenta mejores resultados en términos de desempeño en comparación con el

PID, destacando su capacidad para cumplir con los estándares de sostenibilidad y eficiencia energética establecidos inicialmente en el documento.

5 Conclusiones y perspectivas futuras

Los experimentos indican que el control LQR+G con compensación de gravedad representa una opción más eficaz para estabilizar el balancín eólico en comparación con el control PID. El enfoque LQR+G demuestra mejoras sustanciales en términos de estabilidad y rendimiento, mientras que el control PID, aunque responde de manera rápida y reduce el error en estado estacionario, puede experimentar oscilaciones debido a la asignación de polos y la consideración de la robustez del sistema en relación con el consumo de energía.

6 Referencias

1. Auger, F., Hilaret, M., Guerrero, J. M., Monmasson, E., Orłowska-Kowalska, T., & Katsura, S. (2013). Industrial Applications of the Kalman Filter: A Review. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(12), 5458-5471.
2. Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (1998). *Modern Control Systems*.
3. Fadali, M. S., & Visioli, A. (2012). *Digital Control Engineering: Analysis and Design*. Academic Press.
4. Kelly, R. (1997). PD Control with Desired Gravity Compensation of Robotic Manipulators: A Review. *The International Journal of Robotics Research*, 16(5), 660-672.
5. Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de Control Automático*. Pearson Educación.
6. Luna Hurtado J. et al. (2018). Control PID de un Sistema Balancín. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica.
7. O'dwyer, A. (2009). *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. World Scientific.
8. Ogata, K. (1996). *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*. Pearson Educación.
9. Ogata, K. (1998). *Ingeniería de Control Moderna (5a. ed.)*. Madrid: Prentice Hall.
10. Juan Garrido Jurado. (2012). Diseño de sistemas de control multivariable por desacoplo con controladores PID. En X Simposio CEA de Ingeniería de Control, pp. 64-71.
11. Åström, K. J. (1995). PID Controllers: Theory, Design and Tuning, 59.
12. Welch, G., & Bishop, G. (1995). *An Introduction to the Kalman Filter*.

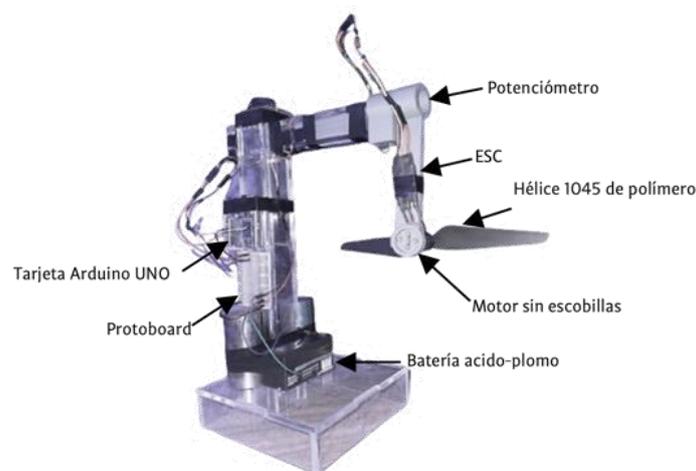


Figura 1. Plataforma experimental donde se realizó el experimento.

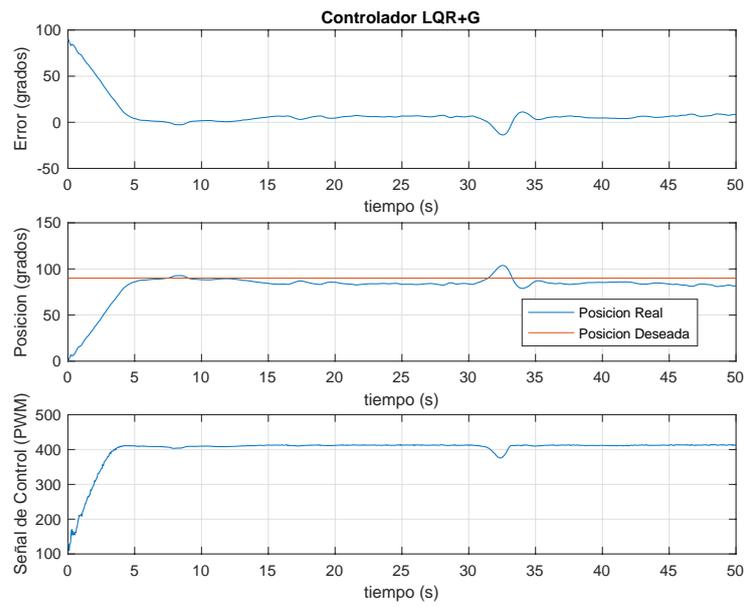


Figura 2. Señal de error, posición angular y señal de control del controlador LQR+G. Elaboración propia.

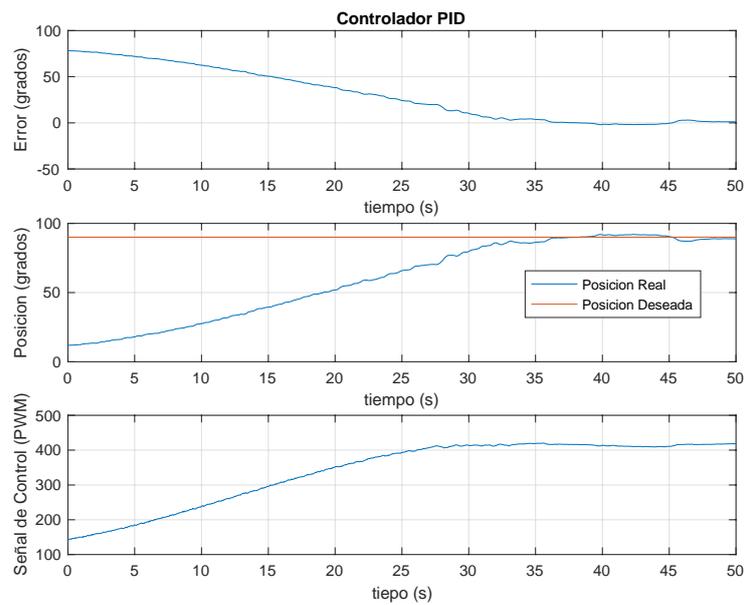


Figura 3. Señal de error, posición angular y señal de control del controlador PID. Elaboración propia.

Tabla 1. Análisis comparativo de los índices de desempeño basados en el error (IAE).

Controlador	IAE	ITAE	ITSE	ISE
LQR+G	452.2098	7655.2316	64512.2184	14535.3937
PID	1510.5416	18426.3759	765378.7453	83982.3961