

Control proporcional para lámpara LED basado en modelado no lineal

Edgar Estrada Cruz ^{1,*}, Ismael Barrera González ¹ y Giovanni Flores Caballero¹

¹ Tecnológico Nacional de México/ITS del Occidente del Estado de Hidalgo, Ingeniería Electromecánica, México.

* Correspondencia: eestrada@itsoeh.edu.mx

Resumen: El agotamiento de los recursos energéticos ha convertido el ahorro de energía en un desafío crucial en las últimas décadas. La iluminación, que puede representar hasta el 20% del consumo global de energía, es un componente significativo, especialmente en edificios residenciales y comerciales. La tecnología LED ha surgido como una alternativa para iluminar espacios debido a su larga vida útil, alta eficiencia, bajo consumo y capacidades de atenuación. En este trabajo, presentamos un modelo matemático no lineal que describe el comportamiento de una lámpara LED comercial con capacidades de atenuación. Este modelo captura la naturaleza no lineal del sistema, proporcionando una base para el análisis y diseño de controladores. Para regular la iluminación de la lámpara, implementamos un control proporcional (P) y evaluamos la estabilidad del lazo cerrado utilizando métodos de Lyapunov. Los resultados demuestran que el control proporcional es efectivo para alcanzar el nivel deseado de iluminación en ausencia de perturbaciones externas.

Keywords: Sistema no lineal; Iluminación; Ahorro de energía

1. Introducción

El ahorro de energía se ha convertido en un desafío crucial, y la iluminación representa aproximadamente un 20% del consumo total global de energía, según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [1],[2]. En México, la Secretaría de Energía reporta que el 18% de la energía eléctrica generada se destina a la iluminación [3].

Se ha evidenciado que tanto la falta como el exceso de iluminación pueden perjudicar la agudeza visual y alterar la sensibilidad al contraste, e incluso, afectar diversas funciones oculares. En el primer caso, la insuficiencia de luz genera ambientes visuales poco inspiradores y oscuros. Por otro lado, la sobreexposición a la luz puede provocar deslumbramientos. Una iluminación adecuada no solo contribuye a reducir los costos de consumo energético, sino que también proporciona comodidad visual, permitiendo que el personal desempeñe sus actividades sin el desgaste que causa la mala iluminación. Además, diversos estudios han demostrado que trabajar en condiciones óptimas y con una sensación de bienestar mejora significativamente el nivel de productividad [4].

La tecnología led es una fuente de luz atractiva ya que proporciona tiempos de vida prolongados, alta eficiencia energética y luminosa, capacidad de regulación en el diseño de un sistema de iluminación a un bajo costo.

Varios estudios [5], [6] han demostrado que el consumo energético de la iluminación puede reducirse mediante sistemas de control interior con capacidad de atenuación. En [7], se desarrolló un controlador difuso para mantener niveles óptimos de iluminación, mientras que en [8] se planteó el control de la iluminación como un problema de programación lineal, buscando minimizar el consumo energético y al mismo tiempo

Estrada, E.; Barrera, I.; Flores, G.
Control proporcional para lámpara
LED basado en modelado no lineal.
REIA 2024, 8, (3), 26-32.

Recibido: 16/09/2024
Aceptado: 15/11/2024
Publicado: 29/11/24

satisfacer las preferencias de los ocupantes. Algunas estrategias para el control integrado de luz diurna y artificial, basadas en modelos computacionales, fueron presentadas en [9], y en [10] se introdujo una representación adaptativa de la iluminación junto con dos métodos de control que permiten alcanzar tanto ahorros energéticos como comodidad para el usuario. En [11], se implementó un sistema de control de iluminación artificial mediante lógica difusa, asegurando un nivel constante y confortable de iluminación, al tiempo que se considera la luz natural disponible.

Los trabajos mencionados en el párrafo anterior no disponen del conocimiento del modelo de la lámpara led que mapea la relación entre la iluminación y las señales de atenuación. En [12], para mejorar el rendimiento del sistema de control de iluminación led, proponen un modelo lineal que considera la influencia de la luminaria en su vecindario y tiene en cuenta el confort visual y el consumo de energía, demuestran que un optimizador lineal aplicado al modelo lineal propuesto tiene un mejor rendimiento, pero no dispone del modelo matemático para la lámpara.

El desarrollo de controladores LED con capacidad de entrada universal ha sido objeto de interés debido a la necesidad de mantener un factor de potencia alto y ofrecer capacidades avanzadas de atenuación, incluso en condiciones de bajo rizado de corriente. [13] realizaron un análisis exhaustivo de estos controladores, enfatizando la importancia de un control robusto para garantizar la estabilidad del sistema. Además, la reducción del rizado de corriente es fundamental para prolongar la vida útil de los LEDs en aplicaciones industriales y comerciales que demandan alta eficiencia energética.

Por otro lado, el desarrollo de módulos de control de iluminación ha avanzado significativamente. Vizir et al. describen los componentes clave y las técnicas utilizadas para integrar sensores y controles automáticos en los módulos de iluminación LED. Estos avances permiten una mayor flexibilidad y eficiencia, lo que mejora la capacidad de adaptación a diferentes necesidades de iluminación [14].

En un enfoque diferente, Xiao et al. investigan un método de control automático para luminarias de interiores basado en diodos emisores de luz de puntos cuánticos multicolores. Este estudio destaca cómo los puntos cuánticos permiten un control preciso del espectro de luz, ajustando automáticamente la salida lumínica a las condiciones del entorno. Esta tecnología no solo mejora la experiencia visual, sino que también optimiza el consumo energético mediante ajustes espectrales en tiempo real [15].

Estos estudios reflejan una tendencia hacia tecnologías de iluminación más sostenibles y versátiles. La investigación en controladores robustos para LEDs y en el uso de materiales avanzados, como los puntos cuánticos, apunta a satisfacer las crecientes demandas de personalización y eficiencia energética en diversas aplicaciones.

En este trabajo, presentamos un modelo matemático no lineal para describir el comportamiento de una lámpara led comercial con capacidad de regulación aislado de cualquier estímulo de iluminación externa ya sea natural o artificial. Para regular la iluminación de la lámpara, implementamos un control proporcional (P) y evaluamos la estabilidad del sistema en lazo cerrado utilizando Lyapunov.

El trabajo está organizado como sigue: en la Sección II, se presenta el modelo matemático de la lámpara LED. En la Sección III, se introduce el esquema de control proporcional, se analiza estabilidad y se presentan resultados numéricos de simulación; mientras en la sección IV se presenta una breve discusión de los resultados encontrados. El trabajo termina con algunas conclusiones.

2. Materiales y Métodos

Actualmente, diversas estrategias de control se fundamentan en modelos matemáticos de sistemas dinámicos. En esta sección, se caracteriza el comportamiento dinámico de la lámpara LED mediante un modelo matemático, lo que nos permitirá analizar a fondo su funcionamiento, evaluar diferentes escenarios y asegurar su estabilidad. Asimismo, se propone una estrategia de control con miras a su futura implementación práctica.

Una lámpara LED comercial con capacidad de regulación, en ausencia de estímulos externos, puede describirse mediante un modelo matemático, como se indica en [16]. Este modelo, expuesto en la ecuación (1), es de naturaleza estática.

$$z = -z_0 + z_1 e^{av}, \quad (1)$$

donde $z = z(t)$ representa la intensidad de la iluminación y $v = v(t)$ denota el voltaje aplicado a la lámpara. Además, los parámetros a , z_0 , y z_1 son constantes. En este trabajo, se omite la dependencia temporal de la intensidad y el voltaje por simplicidad. Para obtener un modelo dinámico de la lámpara, se calcula la tasa de cambio de la iluminación respecto al tiempo, derivando la ecuación (1), resultando en

$$\dot{z} = a z_1 e^{av} \dot{v}.$$

A partir de la ecuación (1), se puede observar que $z_1 e^{av} = z + z_0$ lo que transforma la ecuación anterior en:

$$\dot{z} = a (z + z_0) \dot{v}. \quad (2)$$

Definiendo la variable $x = z + z_0$, y dado z_0 es una constante, se tiene que $\dot{x} = \dot{z}$. Si consideramos la tasa de cambio del voltaje como $u = \dot{v}$, entonces la ecuación (2) se puede reescribir como:

$$\dot{x} = a x u. \quad (3)$$

Se observa que el modelo dinámico que describe el comportamiento de la lámpara es no lineal. A continuación, se analizará la implementación de un control proporcional para la lámpara LED.

Un sistema típico de control automático para la lámpara sin perturbaciones se muestra en la Figura 1.

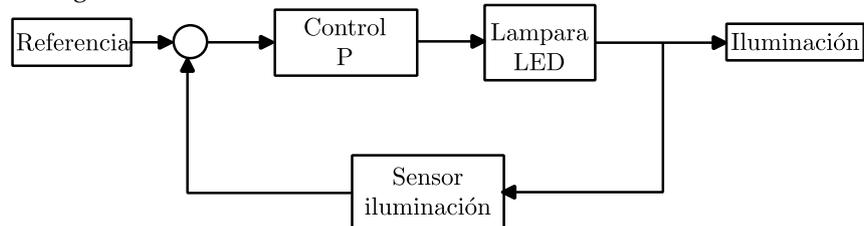


Figura 1. Estructura del esquema de control.

3. Resultados

El modelo dinámico de la lámpara LED, descrito en la ecuación (3), se considera una aproximación válida para este tipo de lámpara. Se observa que el sistema presenta características no lineales. Para el sistema descrito por (3), se define el control proporcional (P) como sigue:

$$u = -k(x - r), \quad (4)$$

Dado que la iluminación siempre es positiva, se asume que la referencia cumple con $r > 0$. Por lo tanto, la dinámica de la lámpara en lazo cerrado se puede expresar como:

$$\dot{x} = -akx(x - r), \quad (5)$$

Este modelo presenta puntos de equilibrio en $x = r$ y $x = 0$.

A continuación, se presenta la Proposición 1, que analiza la estabilidad del sistema de control en lazo cerrado, descrito en la ecuación (5):

Proposición 1:

Dada la dinámica de la lámpara LED (3) y el control proporcional (4) con una ganancia $k > 0$, se concluye que el sistema en lazo cerrado (5) es asintóticamente estable.

Prueba 1.

Para demostrar la estabilidad del sistema, comenzamos eligiendo la siguiente función candidata de Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2}(x - r)^2, \quad (6)$$

Es evidente que la función candidata satisface las condiciones $V(t) > 0$ para $x \neq r$ y $V(0) = 0$, lo que implica que V es definida positiva. A continuación, calculamos la derivada de la función de Lyapunov:

$$\dot{V} = \dot{x}(x - r).$$

Al sustituir la dinámica en lazo cerrado (5) en la derivada anterior, obtenemos:

$$\dot{V} = -akx(x - r)^2.$$

Es importante considerar que la iluminación en un espacio está acotada, lo que significa que existe un valor mínimo y uno máximo para x . Esto se expresa como:

$$0 < \bar{x}_{min} \leq x \leq \bar{x}_{max} < \infty \quad (7)$$

Dado que a es positivo por la naturaleza del modelo y k se elige también como positivo, se sigue que $\dot{V} \leq 0$. Esto indica que la derivada de la función de Lyapunov (6) es definida negativa a lo largo de la trayectoria del sistema. Por lo tanto, podemos concluir que el sistema en lazo cerrado es asintóticamente estable. ■

Para validar los resultados, se llevó a cabo la simulación en Matlab-Simulink utilizando los siguientes valores para las constantes: $a = 0.01316$, $z_0 = 379.1$ y $z_1 = 310.6$. Estos parámetros son representativos de la naturaleza física de la lámpara [16].

Se considera que la lámpara está aislada de cualquier estímulo externo, lo que implica que $\|x\| \leq \bar{x}_{max} = 1200$. Esto significa que la fuente proporciona una iluminación máxima de 1200 lux, correspondiente a la capacidad nominal de la lámpara.

Se realizó un estudio variando la ganancia proporcional con valores de $k = 1, 5, 10$, para comparar el comportamiento en diferentes escenarios. En la Figura 2 se presentan los resultados de la simulación para una referencia iluminación $r = 500$ lux.

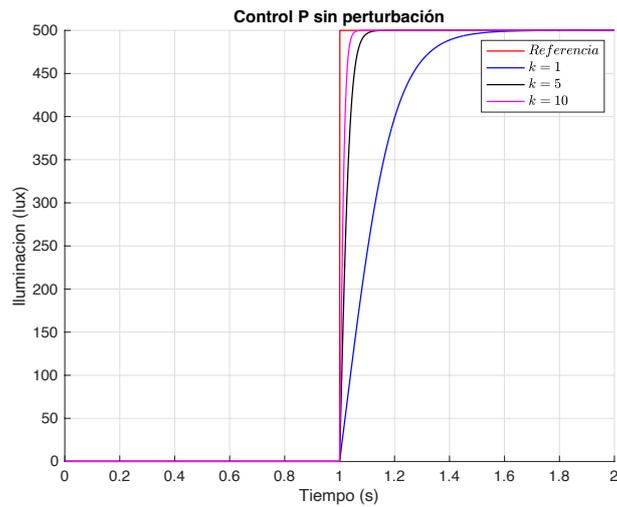


Figura 2. Respuesta de lámpara led para control proporcional.

Como se puede observar en la Figura 2, la respuesta de la iluminación para el sistema con control proporcional, en ausencia de perturbación, es estable y alcanza la referencia establecida. La Figura 3 ilustra la respuesta del error, mostrando que converge a cero para diferentes valores de k , lo que confirma que $x = r$. Es importante destacar que la respuesta más rápida se obtiene para un valor de $k = 10$. Esto sugiere que el control proporcional es capaz de alcanzar el objetivo de iluminación deseado.

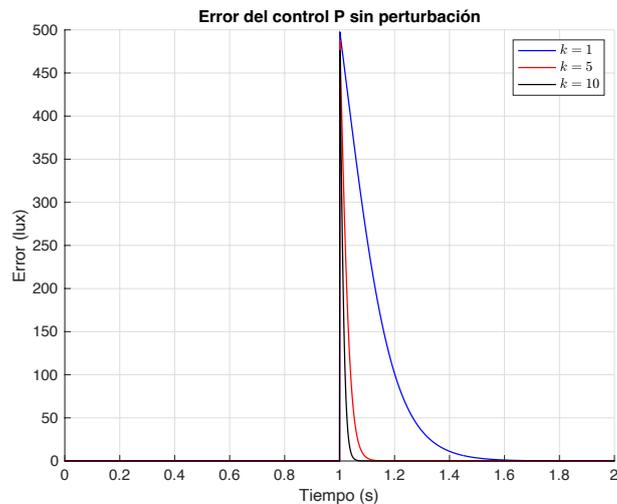


Figura 3. Error del sistema de control.

El modelo no lineal para una lámpara LED sin perturbaciones externas se presenta en (3). En condiciones reales, la iluminación sobre una superficie es la suma de dos tipos de luz: la generada por la lámpara y la que proviene de una fuente exterior, que pueden ser otras lámparas cercanas o la luz natural del sol.

Para estudiar el comportamiento ante una perturbación externa, consideramos la siguiente perturbación:

$$\phi = 500 \sin 0.1t$$

Esta perturbación es suave y se utiliza para modelar la variación de la luz natural a lo largo del día, simulando el comportamiento gradual de la luz solar desde el amanecer hasta el atardecer, así como las fluctuaciones de intensidad y dirección que ocurren a medida que el sol se desplaza por el cielo.

El esquema de control para el sistema dinámico de la lámpara bajo la influencia de la perturbación se muestra en la Figura 4.

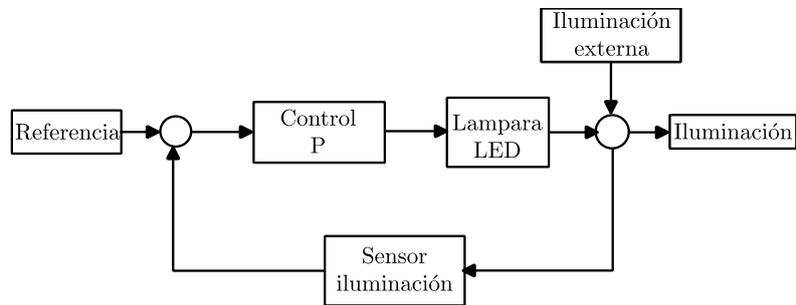


Figura 4. Esquema de control proporcional más perturbación.

La Figura 5 ilustra el comportamiento del sistema de control proporcional para la lámpara con un valor para la ganancia de $k = 10$. Se observa que el sistema no logra compensar completamente la perturbación externa, lo que resalta la necesidad de incorporar estrategias de control más avanzadas que garanticen la robustez del sistema. Una opción prometedora es el uso de redes neuronales, que han demostrado ser efectivas en la implementación de sistemas de control, permitiendo compensar tanto los errores de modelado como las perturbaciones externas.

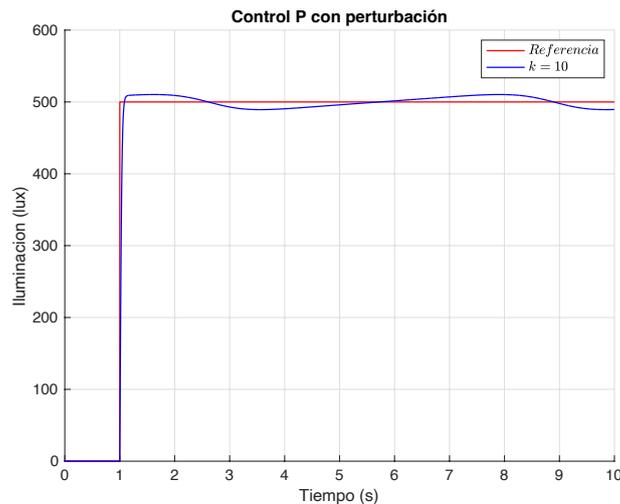


Figura 5. Respuesta de lámpara led para control proporcional con perturbación.

4. Discusión

Este estudio analiza la dinámica de una lámpara LED utilizando un control proporcional (P) basado en un modelo no lineal. Se ha demostrado que el sistema es asintóticamente estable cuando se aplica un control proporcional con una ganancia positiva, y esta estabilidad se verifica mediante un enfoque basado en funciones de Lyapunov.

Para corroborar los resultados teóricos, se llevaron a cabo simulaciones en Matlab-Simulink, en las cuales se observó que el sistema logra alcanzar la referencia de iluminación deseada en ausencia de perturbaciones externas. Además, se evidenció que valores más altos de la ganancia k generan una respuesta más rápida del sistema.

Sin embargo, también se encontró que el control proporcional por sí solo no es suficiente para compensar perturbaciones externas. Esto pone de manifiesto la necesidad

de emplear estrategias de control más sofisticadas, como el uso de redes neuronales, que podrían aumentar la robustez del sistema frente a fluctuaciones y variaciones inesperadas en el entorno.

5. Conclusiones

El presente trabajo se fundamenta en un modelo matemático que describe el comportamiento de la lámpara LED, aislada de fuentes de luz externas, ya sean naturales o artificiales. A través de un análisis exhaustivo y simulaciones, se ha comprobado que, aunque el control proporcional resulta efectivo en condiciones estables, su capacidad para gestionar perturbaciones es limitada. Por lo tanto, la incorporación de técnicas avanzadas, como el uso de redes neuronales, se vuelve crucial para aumentar la robustez y el rendimiento del sistema de iluminación LED en escenarios del mundo real, donde las perturbaciones son inevitables.

Esta integración de tecnologías promete proporcionar un control más preciso y adaptable, respondiendo de manera más eficaz a las demandas modernas de gestión de la iluminación. Además, es fundamental que la sección de materiales y métodos del estudio ofrezca detalles suficientes que permitan la reproducibilidad del experimento y la verificación de los resultados obtenidos, garantizando así la validez y la aplicabilidad de las conclusiones del trabajo.

Referencias

1. Santamouris, M. *Minimizing Energy Consumption, Energy Poverty and Global and Local Climate Change in the Built Environment: Innovating to Zero*. UK. 2019.
2. Pompei L.; Blaso, L.; Fumagalli S.; Biseegna F. The impact of key parameters on the energy requirements for artificial lighting in italian buildings based on standard en 15193-1:2017. *Energy and Buildings* 2022, 263, 112025.
3. Sener. Balance nacional de energía. 2016.
4. Konstantzos I.; Sadeghi S.A.; Kim M.; Xiong, J.; Tzempelikos, A. The effect of lighting environment on task performance in buildings – a review. *Energy and Buildings* 2022, 226, 110394.
5. Chinchero, H.F.; Alonso, J.M. (2020). A review on energy management methodologies for led lighting systems in smart buildings. In 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), 1–6.
6. Al-Ghaili, A.M.; Kasim, H.; Al-Hada, N.M.; Othman, M. y Saleh, M.A. A review: Buildings energy savings-lighting systems performance. *IEEE Access*, 8, 76108–76119 (2020).
7. Chen, S.Y.; Zhang, J.; Zhang, H.; Kwok, N.M.; Li, Y.F.. Intelligent lighting control for vision-based robotic manipulation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(8), 3254–3263.
8. Wen, Y.J.; Agogino, A.M.. Wireless networked lighting systems for optimizing energy savings and user satisfaction. In 2008 IEEE Wireless Hive Networks Conference, 1–7, (2008).
9. Kurian, C.; Aithal, R.; Bhat, J.; George, V. Robust control and optimization of energy consumption in daylight—artificial light integrated schemes. *Lighting Research & Technology*, 2008, 40(1), 7–24.
10. Pandharipande, A.; Caicedo, D. Adaptive illumination rendering in led lighting systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2013, 43(5), 1052–1062.
11. Görgülü, S.; Ekren, N. Energy saving in lighting system with fuzzy logic controller which uses light-pipe and dimmable ballast. *Energy and Buildings*, 2013, 61, 172–176.
12. Lobato-Ríos, V.; del Rocio Hernández-Castañón, V.; Carrasco-Ochoa, J.A.; Martínez-Trinidad, J.F. Linear model optimizer vs neural networks: A comparison for improving the quality and saving of led-lighting control systems. In 2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2664–2669, (2016).
13. Silva, B. H. D., Almeida, P. S., Soares, G. M., Barbosa, P. G., Montagner, V. F., & Almeida, P. M. D. (2023). Universal-input integrated LED driver with robust H^∞ controller for full-range high power factor and dimming capabilities under low current ripple. *Electrical Engineering*, 105(3), 1897-1910.
14. Vizir, Y., Chala, O., Maksymova, S., & Alkhalailah, A. (2023). Lighting Control Module Development. *Electronics and Electrical Engineering*, 22(3), 147-154.
15. Xiao, H., Wang, G., Zhang, W., Lu, S., Zhao, B., Wang, Z., ... & Liu, J. (2022). Automatic illumination control method for indoor luminaires based on multichromatic quantum dot light-emitting diodes. *Micromachines*, 13(10), 1767.
16. Estrada Cruz, E.; Barrera Gonzalez, I.; Lozano Hernández, B. Proportional-derivative plus integral controller tuning for led lighting based on the mathematical model. In Memorias del Congreso Nacional de Control Automático, 6, 296–300, (2023).