

Esquema de doble lazo de control para sistema de Iluminación LED Dual-loop control scheme for LED lighting system

E. Estrada-Cruz ^{a,*}, I. Barrera-González ^a, V. Pedraza-Ramírez ^a, A. F. Dawe-Pérez ^a

^aDepartamento de Ingeniería Electromecánica, TecNM/ITS del Occidente del Estado de Hidalgo, 42700, Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo, México.

^bÁrea Académica de Matemáticas y Física, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^cDepartamento de Control Automático, CINVESTAV-IPN, 07360, CDMC, México.

Resumen

La creciente población mundial y el agotamiento de los recursos energéticos han intensificado el desafío de la conservación de energía, siendo los edificios responsables del 30 % al 40 % del consumo total de energía. La iluminación, que constituye hasta el 20 % del uso energético global, requiere estrategias innovadoras para su conservación. La tecnología LED, conocida por su eficiencia, sirve como una solución fundamental. En este trabajo, exploramos el esquema de control de doble lazo proporcional-derivativo más integral (PD+I) con el fin de mejorar el ahorro energético de una lámpara LED y garantizar el confort visual. Se emplean modelos matemáticos, tanto lineales como no lineales, para la caracterización de lámparas y el diseño del esquema de control. Los resultados de simulación demuestran la efectividad del PD+I propuesto para lograr eficiencia energética en diferentes escenarios.

Palabras Clave: Modelado, Simulación, Control de iluminación, Ahorro de energía

Abstract

The escalating global population and depletion of energy resources have intensified the challenge of energy conservation, with buildings alone responsible for 30 % to 40 % of total energy consumption. Lighting, constituting up to 20 % of global energy usage, necessitates innovative strategies for conservation. LED technology, renowned for its efficiency, serves as a pivotal solution. In this work, we explore the proportional-derivative plus integral (PD+I) control scheme in order to improve the energy savings of an LED lamp and ensure visual comfort. Mathematical models, both linear and nonlinear, are employed for lamp characterization and control scheme design. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed PD+I control in achieving energy efficiency across different scenarios.

Keywords: Modelling, Simulation, Control Illumination, Energy saving

1. Introducción

La rápida expansión de la población mundial, junto con el agotamiento de los recursos energéticos y las consecuentes repercusiones ambientales, ha convertido la conservación de energía en un desafío crucial. De acuerdo a datos del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), los edificios representan entre el 30 % y el 40 % del consumo total de energía mundial (Santamouris, 2019), representando la iluminación hasta un 20 % de la energía utilizada a nivel global (Pompei *et al.*, 2022), con una considerable proporción proveniente tanto de edificios comerciales como residenciales. Por lo tanto, es imperativo desarrollar estrategias innovadoras

para la mejorar la eficiencia energética, integrando tecnologías avanzadas y métodos de control eficientes en iluminación.

La NOM-025-STPS-2008 establece los niveles de iluminación para una oficina o aulas de 300 lux, mientras para un pasillo es de 100 lux, para un taller de precisión se recomienda 500 lux. Una iluminación menor a la establecida por la norma crea entornos visuales tenues y poco inspiradores porque se reduce la claridad y contraste, puede hacer que los espacios parezcan menos acogedores y más opresivos, mientras que un exceso de luz puede provocar deslumbramiento. Una iluminación acorde a la norma no solo reduce los costos de consumo

*Autor para correspondencia: eestrada@itsoeh.edu.mx

Correo electrónico: eestrada@itsoeh.edu.mx (Edgar Estrada-Cruz), ibarrera@itsoeh.edu.mx (Ismael Barrera-González), 19011069@itsoeh.edu.mx (Victor Pedraza-Ramírez), 19011310@itsoeh.edu.mx (A. F. Dawe-Pérez).

Historial del manuscrito: recibido el 29/04/2024, última versión-revisada recibida el 10/09/2024, aceptado el 09/07/2025, en línea (postprint) desde el 22/08/2025, publicado el 05/01/2026. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v13i26.12925>



de energía, sino que también garantiza el confort visual, permitiendo que los empleados realicen sus tareas sin la tensión indebida causada por una iluminación inadecuada en su entorno. Konstantzos et al. afirman que trabajar en condiciones adecuadas de iluminación, junto con un sentido de bienestar, aumenta significativamente la productividad (Konstantzos *et al.*, 2020).

La tecnología LED se destaca como una fuente de luz importante en la actualidad debido a su prolongada vida útil, su elevada eficiencia energética y luminosa, y la rentabilidad inherente en el diseño de un sistema de iluminación con capacidades de atenuación.

Se ha demostrado que la implementación de sistemas de control con capacidades de atenuación tiene un gran potencial para reducir el consumo de energía en iluminación, como se describe a continuación. Petrov investigó la dependencia del cambio en el flujo luminoso de un sistema de iluminación LED en la electricidad consumida, presentando un modelo matemático no lineal (Petrov, 2020). Mientras que Le et al. presentan un modelo matemático donde el cambio en el flujo luminoso depende de la corriente eléctrica, pero incorpora un sensor de resistencia dependiente de la luz (LDR), que tiene la desventaja de una respuesta lenta (Le *et al.*, 2019). Los investigadores derivaron un modelo matemático dinámico lineal de tercer orden para un sistema de iluminación de lámparas fluorescentes de 2 zonas (De Keyser e Ionescu, 2010), emplearon dos enfoques de control principales: diseño asistido por computadora y técnicas de autoajuste. Copot utilizó la optimización por enjambre de partículas para ajustar finamente el controlador PID para un sistema de control de iluminación basado en el modelo para una habitación de 2 zonas (Copot *et al.*, 2018). Los investigadores han propuesto diversas estrategias de control para mejorar el ahorro de energía. Una de esas metodologías implica el uso de un sistema de control de iluminación inteligente. La mayoría de estas estrategias tratan el problema de control de iluminación como un problema de minimización sujeto a restricciones y típicamente lo resuelven utilizando programación lineal (Wen y Agogino, 2008; Kurian *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2012; Pandharipande y Caicedo, 2011; Görgülü y Ekren, 2013).

Los estudios mencionados no abordan el modelo de lámpara LED ni proporcionan información sobre el mapeo de la relación entre la iluminación y las señales de atenuación (voltaje). En este estudio, se presenta un esquema de control de iluminación diseñado para una lámpara LED de doble lazo. Este esquema incorpora control proporcional-derivativo dentro del lazo interno y control integral dentro del lazo externo, todo basado en el modelo matemático de la lámpara. Además, se introduce una estrategia de sintonización para las ganancias del controlador basada en los parámetros de diseño del sistema de segundo orden estándar. Es importante destacar que la lámpara opera de forma aislada de cualquier estímulo lumínico externo, ya sea natural o artificial. Por lo tanto, el enfoque se centra exclusivamente en el control de la iluminación de la lámpara.

La estructura de esta investigación se desarrolla de la siguiente manera: En la Sección II se introduce algunos prelimi-

nares matemáticos, mientras que en la Sección III se adentra en la presentación del modelo matemático de la lámpara LED como un sistema estático. Avanzando hacia la Sección IV, se presenta un esquema de control proporcional-derivativo-integral más completo junto con la regla de sintonización correspondiente para el controlador. La Sección V revela los resultados numéricos del esquema propuesto. La investigación concluye con una recapitulación de los hallazgos en la sección de conclusiones.

2. Preliminares

2.1. Linearización basada en series de Taylor

El acto de reemplazar un sistema no lineal con su aproximación lineal se denomina linearización (Khalil, 2002). La motivación para la linearización surge del comportamiento dinámico de muchos sistemas no lineales, donde, dentro de un rango de variables, pueden aproximarse a modelos de sistemas lineales.

Considere el caso de un sistema no lineal con una variable de estado x y una variable de salida y , relacionadas por

$$y = h(x), \quad (1)$$

donde la función $h : R \rightarrow R$ es continua y diferenciable; es decir, $h \in C$. Considere x_0 como el punto de operación. Si expande h en la serie de Taylor alrededor del punto x_0 , obtenemos

$$y = h(x_0) + \frac{dh(x_0)}{dx} (x - x_0) + \frac{d^2h(x_0)}{dx^2} (x - x_0)^2 + \dots \quad (2)$$

La linearización de $h(x)$ alrededor del punto x_0 implica reemplazar $h(x)$ con una aproximación lineal de la forma

$$\hat{y} = \frac{dh(x_0)}{dx} \hat{x}, \quad (3)$$

donde $y_0 = h(x_0)$, $\hat{y} = y - y_0$ y $\hat{x} = x - x_0$. Sobre un pequeño rango de \hat{x} , es una buena aproximación de la curva $y = h(x)$ en las proximidades del punto de operación x_0 , ver Figura 1.

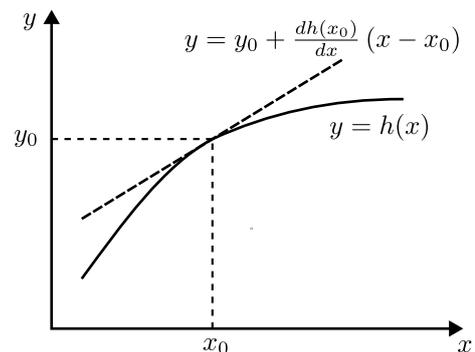


Figura 1: Descripción gráfica de la linearización.

3. Modelo matemático

3.1. Lámpara LED regulable

Se eligió una lámpara LED regulable comercial con las siguientes características: voltaje nominal de 100-127 V, consumo de energía de 10 W, consumo de corriente de 0.08-0.1 A en un rango de voltaje de 120-100 V, flujo luminoso de 850 lm

y una iluminación de 1200 lux. Esta lámpara ha sido seleccionada entre una variedad en el mercado debido a su capacidad para ajustar su nivel de brillo.

Se muestra un sistema típico de control automático de iluminación en la Figura 2. El entorno de iluminación considerado en este sistema consta de una lámpara LED y un plano de trabajo. Una lámpara LED es alimentada desde un controlador LED, el cual es controlado por un microcontrolador a través de PWM. La iluminación es medida por un sensor de iluminación (sensor BH1750).

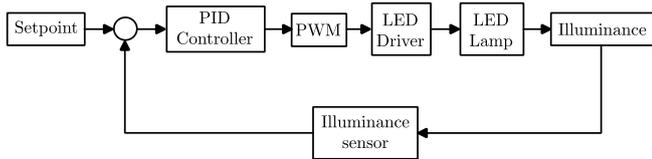


Figura 2: Esquema de control automático de iluminación.

La iluminación de una lámpara en un entorno siempre está expuesta a estímulos externos, ya sean naturales o artificiales. En otras palabras, la iluminación en una superficie es la suma de la iluminación de la lámpara más la luz externa, que puede provenir del sol (natural) o de otra lámpara en su cercanía (artificial). Desde el punto de vista del control automático, la luz natural es una perturbación, para este estudio, la lámpara está aislada de cualquier fuente externa, ya sea natural o artificial.

3.2. Condiciones para medir la iluminación de la lámpara

Para crear un modelo para una lámpara de iluminación, se ajusta sistemáticamente el voltaje de suministro al regulador de la lámpara en pasos incrementales. La respuesta resultante, medida usando el sensor de luz BH1750, fue registrada utilizando una placa de adquisición de datos (Arduino MEGA 2560). Se tomaron medidas de iluminación bajo las siguientes condiciones:

- La lámpara regulable mostrada en la Figura 3 estaba completamente aislada de la iluminación externa (natural o artificial).
- Se utilizó la placa de desarrollo Arduino MEGA2560 para adquirir señales del sensor de luz.
- Se eligió el sensor de luz ambiental BH1750 con interfaz de bus I2C y un amplio rango de resolución (1-65535 lux) para las mediciones de iluminación.
- Para validar las mediciones tomadas por el sensor BH1750, se utilizó el medidor de luz digital Kyoritsu modelo 5202.
- La distancia entre el sensor de luz ambiental BH1750 y la lámpara regulable era de 60 cm en trayectoria vertical directa hacia el centro de la lámpara.
- Se tomaron medidas de iluminación aplicando un voltaje entre 30.4 y 122.9 V a la lámpara.



Figura 3: Plataforma experimental de lámpara LED.

Los datos recopilados de las mediciones se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1: Mediciones realizadas con el sensor BH1750, luxómetro y corrección de mediciones en el sensor.

Nó.	Voltaje (V)	BH1750 (Lux)	Luxómetro (Lux)	Error (%)	Val. correg. (Lux)
1	129.9	1263	1198	5.42	1204.6
2	122.2	1210	1160	4.31	1154.0
3	116.3	1110	1066	4.12	1058.7
4	101.8	823	794	3.65	784.9
5	85.1	600	575	4.34	572.2
6	61.5	342	328	4.26	326.2
7	30.4	85	81	4.93	81.1

Las mediciones tomadas con el sensor BH1750 se muestran en la Figura 4 (línea punteada azul). Para validar los resultados obtenidos con el sensor BH1750, se tomaron mediciones de iluminación bajo las mismas condiciones descritas anteriormente utilizando un dispositivo calibrado, y los resultados se muestran en la Figura 4 (círculos rojos).

Como se observa en la Tabla 1, hay una desviación en la medición entre el instrumento calibrado (luxómetro digital Kyoritsu modelo 5202) y el sensor BH1750. La quinta columna de la Tabla 1 muestra el error porcentual entre ambas mediciones (tercera y cuarta columnas). A partir de la Tabla 1, se determinó un error porcentual promedio del 4.63 %, para mejorar la precisión de la medición con el sensor BH1750, se aplicó una corrección dentro del código de programación al adquirir las señales. Al corregir un error del 4.63 %, se obtuvieron los valores en la última columna de la Tabla 1.

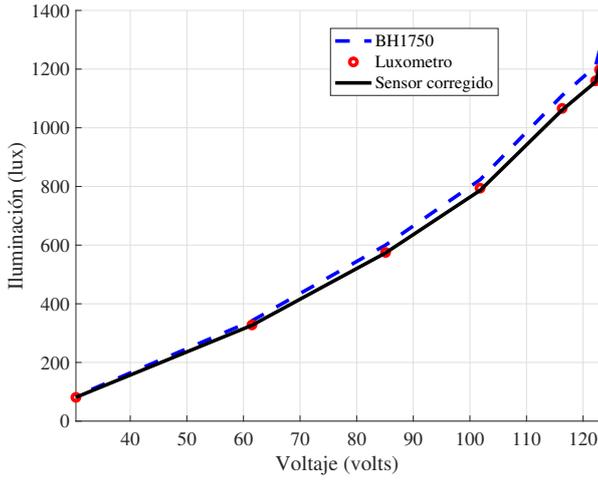


Figura 4: Corrección de error, utilizando el sensor BH1750 y el luxómetro.

El error porcentual promedio basado en el valor corregido es del 2 %, logrando una reducción promedio del 2.63 % a través del código de programación. Para visualizar la información presentada, se trazan los valores del sensor BH1750, el luxómetro y los valores corregidos con un error promedio del 2 % (ver Figura 4).

A partir de la Figura 4, se observa que la corrección aplicada a la medición del sensor BH1750 es apropiada, como se mencionó, se puede llevar a cabo dentro de la programación para adquirir mediciones e implementar estrategias de control. Algunas técnicas de control requieren conocimiento del modelo matemático de la planta, en las siguientes secciones revisaremos el modelo matemático no lineal y lineal para la lámpara LED.

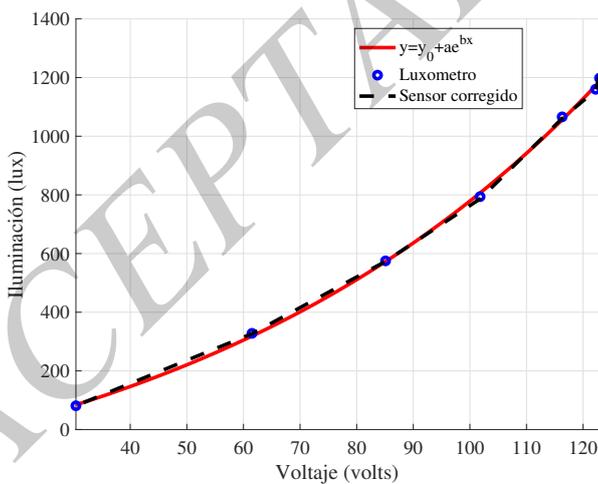


Figura 5: Modelo matemático, sensor BH1750 corregido y luxómetro.

Las variables eléctricas como voltaje, corriente y potencia consumida se pueden observar en la Tabla 2.

No.	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	BH1750 (Lux)
1	129.9	0.074	9.72	1263
2	122.2	0.081	9.90	1210
3	116.3	0.082	9.54	1110
4	101.8	0.079	8.08	823
5	85.1	0.082	7.05	600
6	61.5	0.090	5.56	342
7	30.4	0.092	2.79	85

La columna 4 (Potencia) de la Tabla 2 muestra que regular el voltaje de entrada a la lámpara para disminuir la cantidad de iluminación también reduce la potencia consumida por la misma. El ahorro de energía depende del espacio a iluminar, ya que la iluminación varía según el diseño arquitectónico y del sistema de iluminación. Por ejemplo, si la lámpara opera a 600 lux, se tiene un consumo de potencia de 7.05 W, lo que representa un ahorro del 29.5 %, respecto a los 10 W totales de la lámpara.

3.3. Modelado no lineal de la lámpara LED

Al caracterizar el comportamiento de la lámpara utilizando el software Sigma Plot, el modelo matemático que se ajusta a los datos presentados en la sexta columna de la Tabla 1 es

$$y = y_0 + y_1 e^{kx}, \quad (4)$$

donde $y_0 = -379.1$, $y_1 = 310.6$ y $k = 0.01316$. En la Figura 5, se observa la comparación del modelo (4) en línea punteada negra con los resultados experimentales del luxómetro y los valores corregidos del sensor. Se observa en la Figura 5 que el modelo proporcionado por Sigma Plot se ajusta al comportamiento de la lámpara previamente caracterizado a través de las mediciones realizadas.

3.4. Linealización del modelo de la lámpara LED

Como se ve en (4), el modelo matemático generado es no lineal. Se considera que la iluminación en la lámpara LED regulable no cambia en relación con un punto de operación específico, se puede utilizar un modelo matemático lineal.

Considere el sistema no lineal en (4),

$$y = y_0 + y_1 e^{kx},$$

al menos una vez diferenciable en el punto de operación x_0 . Al determinar la serie de Taylor en el punto de operación x_0 , considerando solo los términos de primer orden, es decir

$$y = h(x_0) + \frac{dh(x_0)}{dx}(x - x_0). \quad (5)$$

Se tiene la siguiente ecuación

$$h(x_0) = y_0 + y_1 e^{kx_0},$$

y

$$\frac{dh(x_0)}{dx} = y_1 k e^{kx_0},$$

Por lo tanto, al sustituir en (5), se obtiene el modelo lineal

$$y = y_0 + y_1 e^{kx_0} + y_1 k e^{kx_0} (x - x_0),$$

al definir $a = y_1 k e^{kx_0}$, $b = y_0 + y_1 e^{kx_0} (1 - kx_0)$ y $\tilde{y} = y - b$, resulta en

$$\tilde{y} = ax. \quad (6)$$

4. Esquema de control proporcional-derivativo más integral

Introducir un control para una función de transferencia constante puede parecer innecesario a primera vista, ya que una función de transferencia constante implica un sistema lineal y estacionario cuya respuesta no cambia con el tiempo. Sin embargo, hay varias razones por las cuales se podría querer introducir un control en este tipo de sistemas. Aunque la función de transferencia sea constante, el sistema puede estar sujeto a perturbaciones que afectan su rendimiento o la referencia de entrada puede cambiar.

Introducir un control proporciona beneficios, ayuda a mantener al sistema en el punto de operación deseado al compensar perturbaciones, permite al sistema seguir variaciones de la referencia de manera precisa. Además, puede aumentar la robustez del sistema frente a variaciones en los parámetros del sistema y condiciones operativas inciertas, garantizando un rendimiento consistente.

Considere el esquema de control mostrado en la Fig. 6 para una lámpara LED. La estrategia de control presentada presenta un control de doble lazo, donde el lazo de control interno o primario es un control proporcional-derivativo (PD), y el lazo de control externo o secundario es un control integral (I). Las ganancias del controlador k_p , k_d y k_I son positivas.

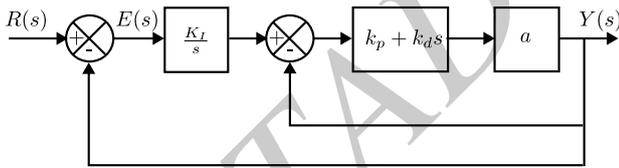


Figura 6: Esquema de control proporcional-derivativo e integral.

En el modo de alta resolución, la salida del sensor BH1750 es casi lineal. Esta linealidad y correspondencia simple hacen que usar una función de transferencia unitaria sea una aproximación razonable.

4.1. Sintonización de control proporcional-derivativo más integral

La siguiente proposición establece las reglas para ajustar las ganancias proporcional, integral y derivativa del controlador.

Proposición 1. Considere el sistema estático descrito por la ecuación

$$\tilde{y} = a x,$$

con un esquema de control de doble lazo, proporcional-derivativo en el lazo interno e integral en el lazo externo. Las

ganancias del controlador k_p , k_d y k_I son positivas. Si ω_n y ζ positivos satisfacen la condición

$$\begin{bmatrix} \omega_n & \zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda^2 & -\lambda \\ -\lambda & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_n \\ \zeta \end{bmatrix} < -1, \quad (7)$$

para $\lambda > 0$, las ganancias del controlador se eligen por

$$\begin{aligned} k_p &= \frac{1}{a(2\zeta\omega_n\lambda - \lambda^2\omega_n^2 - 1)}, \\ k_d &= \frac{\lambda}{a(2\zeta\omega_n\lambda - \lambda^2\omega_n^2 - 1)}, \\ k_I &= \lambda\omega_n^2. \end{aligned} \quad (8)$$

entonces, el sistema es estable con error en estado estacionario cero.

Prueba 1. La función de transferencia en lazo cerrado del esquema de control en la Figura 6 se da como

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{k_D k_I s + k_p k_I}{k_D s^2 + (1 + k_p + k_D k_I) s + k_p k_I},$$

donde $k_p = ak_p$ y $k_D = ak_d$. El polinomio característico de esta función de transferencia se denota como

$$p(s) = s^2 + \frac{1 + k_p + k_D k_I}{k_D} s + \frac{k_p k_I}{k_D}. \quad (9)$$

El comportamiento y la estabilidad de un sistema lineal están determinados por la ubicación de las raíces de su polinomio característico en el plano complejo- s . El polinomio característico para un sistema de segundo orden estándar se da por

$$q(s) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2. \quad (10)$$

Al igualar el polinomio característico (9) con el sistema de segundo orden estándar (10), tenemos

$$s^2 + \frac{1 + k_p + k_D k_I}{k_D} s + \frac{k_p k_I}{k_D} = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2.$$

Se establece que la ganancia derivativa $k_D = \lambda k_p$. Al igualar términos y después de una manipulación algebraica, llegamos a la ecuación

$$1 + k_p + \lambda k_p k_I = 2\lambda\zeta\omega_n k_p, \quad (11)$$

y la expresión para la ganancia integral

$$k_I = \lambda\omega_n^2. \quad (12)$$

Sustituyendo k_I de (12) en (11) y después de manipulación algebraica resultan en la siguiente expresión para la ganancia proporcional k_p ,

$$k_p = \frac{1}{2\zeta\omega_n\lambda - \lambda^2\omega_n^2 - 1}. \quad (13)$$

Sean las ganancias del controlador son positivas, el denominador de (13) debe satisfacer la condición

$$2\zeta\omega_n\lambda - \lambda^2\omega_n^2 - 1 > 0, \quad (14)$$

que puede expresarse en forma matricial como sigue

$$\begin{bmatrix} \omega_n & \zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda^2 & -\lambda \\ -\lambda & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_n \\ \zeta \end{bmatrix} < -1. \quad (15)$$

suponiendo ω_n y ζ positivos.

Si se cumple la condición (15), entonces la ganancia proporcional k_p se determina mediante (13). Anteriormente, se definió la ganancia derivativa como $k_D = \lambda k_p$, por lo tanto

$$k_D = \frac{\lambda}{2\zeta\omega_n\lambda - \lambda^2\omega_n^2 - 1}$$

mientras que la ganancia integral se expresa como $k_I = \lambda\omega_n^2$. Recordando que $k_P = a k_p$ y la ganancia derivativa como $k_D = \lambda k_p$ y $k_D = a k_d$, así, las ganancias son

$$k_p = \frac{1}{a(2\zeta\omega_n\lambda - \lambda^2\omega_n^2 - 1)}$$

$$k_d = \frac{\lambda}{a(2\zeta\omega_n\lambda - \lambda^2\omega_n^2 - 1)}$$

$$k_I = \lambda\omega_n^2$$

4.2. Estabilidad del esquema de control

Sea el polinomio característico de un sistema estándar de segundo orden (10). Las raíces de este polinomio característico se definen por

$$p_{1,2} = -\sigma \pm j\omega_d \quad (16)$$

con $\sigma = \zeta\omega_n$ y $\omega_d = \omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}$. En teoría de control, se afirma que el sistema estándar de segundo orden exhibe estabilidad si y solo si sus raíces poseen una parte real negativa, específicamente, cuando $\sigma > 0$ en (16).

La Proposición 1, que establece el proceso de sintonización para el esquema de control PD+I, se basa en la identificación de las raíces en el plano complejo al igualar el polinomio característico (9) con el de un sistema estándar de segundo orden.

Luego, a partir de (8) para la ganancia de control proporcional, y después de algunas manipulaciones algebraicas, se tiene

$$\sigma = \frac{1 + ak_p\lambda^2\omega_n^2 + ak_p}{2ak_p\lambda} \quad (17)$$

sujeto a las siguientes condiciones establecidas: las ganancias de control k_p , k_d y k_I son positivas, el valor de λ debe ser mayor que cero, y $[\omega_n - \zeta] > 0$. Además, es importante destacar que a representa un parámetro característico de la planta y es inherentemente positivo. En consecuencia, la estabilidad del sistema está asegurada siempre que se cumpla la Proposición 1.

Tabla 3: Valores de ganancias para condiciones de ajuste.

No	λ	ω_n	ζ	k_p	k_i	k_d
1	0.1	2.988	3.132	0.142	0.014	0.893
2	0.5	1.203	1.325	0.480	0.240	0.724
3	0.9	1.084	1.108	0.529	0.476	1.058

5. Resultados Numéricos

Sea el sistema no lineal, expresado en (4), donde

$$y = y_0 + y_1 e^{kx}.$$

El punto de operación se puede determinar utilizando la función inversa de la ecuación anterior

$$x = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{y - y_0}{y_1}\right), \quad (18)$$

Para una iluminación de $y = 300$ lux, y con los valores $y_0 = -379.1$, $y_1 = 310.6$, y $k = 0.01316$, el punto de operación correspondiente es $x_0 = 59.442$ V. Aplicando la Proposición 1 al punto de operación $x_0 = 59.442$ V, se tiene el modelo

$$\tilde{y} = 8.937x, \quad (19)$$

donde $\tilde{y} = y + 231.234$.

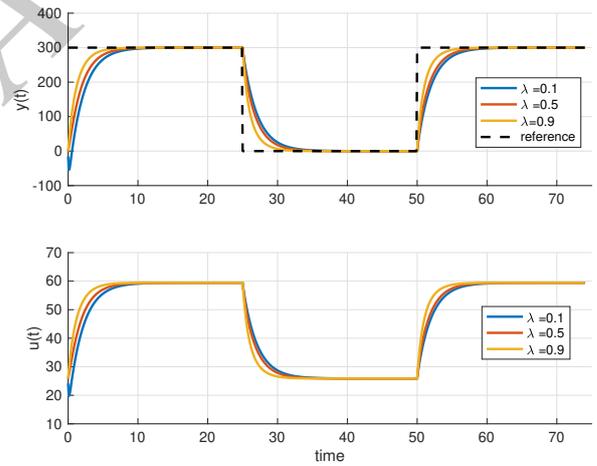


Figura 7: Simulación para diferentes valores de λ para una entrada de 300 lux.

Se determinan las ganancias de control k_p , k_d y k_I utilizando (8), obteniendo valores para ω_n y ζ a partir de la condición (7) de la Proposición 1 con de Matlab para diferentes valores de λ . Los valores resultantes se presentan en la Tabla 3.

La Figura 7 ilustra el comportamiento de la simulación del esquema de control propuesto para una entrada escalón en Matlab/Simulink. Se puede observar que se logra el objetivo de control para diferentes valores de λ , la respuesta con el mejor rendimiento es para un valor de $\lambda = 0.9$, mientras que el peor caso es para $\lambda = 0.1$.

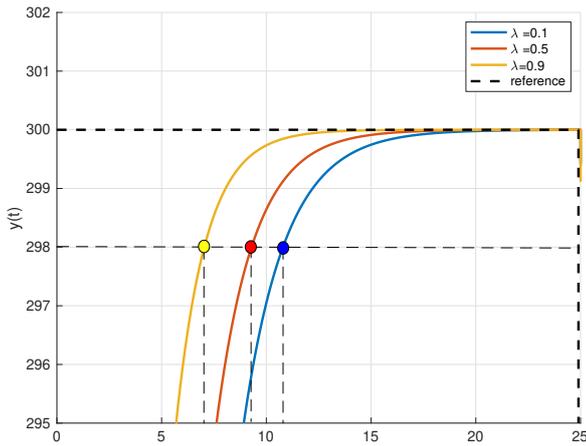


Figura 8: Tiempos de establecimiento para diferentes valores de λ para una entrada de 300 lux.

En la Tabla 4, podemos observar el tiempo de establecimiento para cada respuesta, utilizando el criterio del 2 %, lo que significa el tiempo que tarda la salida en alcanzar el 98 % de su valor final. Destacando que un valor de $\lambda = 0.9$, alcanza el 98 % de su valor final en 7.03 segundos, siendo el más rápido. Por el contrario, para $\lambda = 0.1$, se necesitan 10.79 segundos para alcanzar el mismo valor, siendo la más lenta, como se muestra en la Figura 8.

Tabla 4: Tiempo de establecimiento para diferentes valores de λ .

No	λ	t_s (seg)
1	0.1	10.79
2	0.5	9.29
3	0.9	7.03

Este trabajo resalta la importancia fundamental de desarrollar enfoques innovadores que integren tecnologías avanzadas y estrategias de control para abordar la eficiencia energética y garantizar el confort visual, así como aumentar la productividad mediante la tecnología LED en el control de iluminación.

6. Conclusión

El trabajo desarrollado se basa en el modelo matemático de la lámpara LED aislada de la luz externa (natural o artificial).

Los resultados obtenidos llevan a la conclusión de que el esquema de control de doble lazo, con proporcional-derivativo en el lazo interno e integral en el lazo externo, junto con la regla de sintonización para las ganancias del controlador, permite el control de la iluminación de la lámpara led. Para un valor de $\lambda = 0.9$ la respuesta alcanza el 98 % de su valor final en 7 seg., esto indica que la ganancia derivativa es ligeramente menor en comparación con la ganancia proporcional ($k_D = 0.9k_P$). Es importante destacar que la respuesta no presenta sobreamortiguamiento y tiene un comportamiento suave, lo que implica que no hay generación de deslumbramiento.

Referencias

- Chen, S. Y., Zhang, J., Zhang, H., Kwok, N. M., y Li, Y. F. (2012). Intelligent lighting control for vision-based robotic manipulation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(8):3254–3263.
- Copot, C., Thi, T. M., e Ionescu, C. (2018). Pid based particle swarm optimization in offices light control. *IFAC-PapersOnLine*, 51(4):382–387. 3rd IFAC Conference on Advances in Proportional-Integral-Derivative Control PID 2018.
- De Keyser, R. e Ionescu, C. (2010). Modelling and simulation of a lighting control system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18(2):165–176.
- Görgülü, S. y Ekren, N. (2013). Energy saving in lighting system with fuzzy logic controller which uses light-pipe and dimmable ballast. *Energy and Buildings*, 61:172–176.
- Khalil, H. K. (2002). *Nonlinear systems; 3rd ed.* Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Konstantzos, I., Sadeghi, S. A., Kim, M., Xiong, J., y Tzempelikos, A. (2020). The effect of lighting environment on task performance in buildings ? a review. *Energy and Buildings*, 226:110394.
- Kurian, C., Aithal, R., Bhat, J., y George, V. (2008). Robust control and optimisation of energy consumption in daylight?artificial light integrated schemes. *Lighting Research & Technology*, 40(1):7–24.
- Le, N. P., Giap, L. N., Khanh, N. B., Trung, B. T., y An, T. N. T. (2019). Mathematical and simulation models of lighting automatic control system in according with natural light. *IOSR Journal of Engineering*, 9:45–52.
- Pandharipande, A. y Caicedo, D. (2011). Daylight integrated illumination control of led systems based on enhanced presence sensing. *Energy and Buildings*, 43(4):944–950.
- Petrov, O. L. (2020). Research of effectiveness on led dimming lighting installations. En *2020 Fifth Junior Conference on Lighting (Lighting)*, pp. 1–3.
- Pompei, L., Blaso, L., Fumagalli, S., y Bisegna, F. (2022). 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*, 263:112025.
- Santamouris, M. (2019). *Minimizing Energy Consumption, Energy Poverty and Global and Local Climate Change in the Built Environment: Innovating to Zero.* UK.
- Wen, Y.-J. y Agogino, A. M. (2008). Wireless networked lighting systems for optimizing energy savings and user satisfaction. En *2008 IEEE Wireless Hive Networks Conference*, pp. 1–7.