



# CONTROL POR GANANCIAS PROGRAMADAS APLICADO A UN CONVERTIDOR DC-DC PARA LA REGULACIÓN DE LA INTENSIDAD LUMINOSA DE UNA LÁMPARA LED

## SCHEDULED GAINS CONTROL APPLIED TO A DC-DC CONVERTER FOR LIGHT INTENSITY DIMMING AN LED LAMP

Gregorio Saúl Olivar-Castellanos<sup>1,\*</sup> , Luis Gerardo Vela-Valdés<sup>1</sup> , Jesús Aguayo-Alquicira<sup>1</sup> 

Recibido: 12-11-2022, Recibido tras revisión: 01-12-2022, Aceptado: 09-12-2022, Publicado: 01-01-2023

### Resumen

En la actualidad existen diversas aplicaciones de la iluminación LED, sin embargo, algunas de estas requieren regular la iluminación con precisión y en un amplio rango de operación, principalmente en tareas de seguimiento. Es en estos casos en donde es necesario considerar la no linealidad del LED para el diseño de esquemas de control, además, se necesita de una fuente de alimentación eficiente ante los cambios de tensión y corriente requeridos por la lámpara. En este trabajo se presenta el diseño de un convertidor DC-DC capaz de realizar y soportar estas variaciones, así como el diseño, simulación y comparación de esquemas de control PI clásico, PI difuso y ganancias programadas para estas aplicaciones. Con el fin de validar los esquemas de control descritos, y con el propósito de cumplir las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud, se toma el control de la iluminancia producida por una lámpara de protección ocular como caso de estudio, en donde el controlador varía el ciclo de trabajo del convertidor, ajustando de esta manera la tensión de la lámpara, y en consecuencia regulando la intensidad luminosa. Comparando los esquemas de control, el desempeño del sistema con el control por ganancias programadas tiene mejores características para el caso de estudio descrito con anterioridad, presentándose un error en estado estable de 0 % y menor sobretiro en comparación con los otros esquemas de control desarrollados.

**Palabras clave:** control, convertidor, ganancias programadas, LED, no lineal, regulación

### Abstract

Nowadays there are several applications of LED lighting, but some of them require to precisely regulate lighting in a wide range of operation, mainly in tracking tasks. In these cases, it is necessary to consider the nonlinearity of the LED for the design of control schemes; moreover, an efficient power source is needed to supply the voltage and current variations required by the lamp. This paper presents the design of a DC-DC converter capable of implementing these variations, as well as the design, simulation and comparison of classical PI, fuzzy PI and gain-scheduling control schemes for these applications. In order to validate the described control schemes and to comply with the recommendations of the World Health Organization, the control of the illuminance produced by an eye protection lamp is taken as a case study, where the controller varies the duty cycle of the converter to adjust the voltage of the lamp, and consequently regulate the luminous intensity. Comparing the control schemes, the gain-scheduling control has a better performance for the case study described above, presenting a steady state error of 0% and lower overshoot.

**Keywords:** Control, Converter, Dimming, Scheduled Gains, LED, Nonlinear

<sup>1,\*</sup>Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Tecnológico Nacional de México, Cuernavaca-México. Autor para correspondencia ✉: m21ce085@cenidet.tecnm.mx.

Forma sugerida de citación: Olivar-Castellanos, G. S.; Vela-Valdés, L. G. y Aguayo-Alquicira, J. "Control por ganancias programadas aplicado a un convertidor DC-DC para la regulación de la intensidad luminosa de una lámpara LED," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 29, pp. 66-78, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n29.2023.06>.

## 1. Introducción

A lo largo del tiempo, la iluminación ha presentado diversos avances tecnológicos, como la incorporación del LED (diodo emisor de luz) en diferentes aplicaciones. Esto se debe principalmente a que el LED presenta un bajo consumo, fiabilidad y un mayor tiempo de vida útil en comparación con otras tecnologías, lo que provoca que sea una opción sostenible, práctica y funcional para lograr un ahorro de energía [1].

Dentro de esta tecnología, algunas aplicaciones son tan sencillas en donde basta con el control del encendido y apagado de la lámpara LED, pero muchas otras requieren regular la iluminación entre 0 % y 100 %, a menudo, con una resolución fina [2]. Existen distintas arquitecturas para los controladores LED; su objetivo es responder a los requisitos y limitaciones impuestas por las diferentes aplicaciones de la iluminación, como iluminación interior/ exterior, lámparas de invernadero, señales de tráfico, etc.

Los controladores LED suelen derivarse y adaptarse a partir de topologías básicas de convertidores AC-DC y/o DC-DC para integrar funciones como el control preciso de la potencia o la regulación de la intensidad luminosa [3].

Independientemente de la complejidad, todos estos sistemas de conversión de energía de potencia tienen en común la adopción de al menos una etapa de conversión DC-DC. Las topologías de convertidores DC-DC más comunes empleadas en el desarrollo de drivers LED incluyen convertidores buck, boost, flyback, sepic y/o medio puente [3].

Sin embargo, existen aplicaciones en donde es indispensable la incorporación de esquemas de control, con el fin de mejorar la precisión y la respuesta del sistema. Para ello, es común utilizar esquemas de control clásico, como los trabajos realizados en [4–7]. En estos trabajos, estos esquemas son suficientes dado que se trata de aplicaciones de regulación, es decir, se trabaja en un solo punto de operación del LED, garantizando la dinámica deseada alrededor de dicho punto.

Por otro lado, existen aplicaciones más complejas, en donde se requiere estabilidad en todo el rango de operación del LED, dando lugar a un control de seguimiento. En estas aplicaciones cobra importancia el hecho de que el LED es un dispositivo no lineal, puesto que al tener esta característica y requerir que trabaje en todo su rango de operación con precisión, se hace indispensable el uso de un control no lineal.

Para dar solución a esto, autores han incorporado esquemas como redes neuronales [8], lógica difusa [9–11], o incluso combinación de esquemas de control como el PID difuso [12]. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos se centran en garantizar un bajo error en estado estable, y para esos casos puede ser suficiente un único control lineal, como el trabajo presentado en [2]. No obstante, existen aplicaciones en

donde, además de garantizar un bajo porcentaje de error, es necesario cuidar el máximo sobretiro.

Debido a esto, en la literatura se presenta otra alternativa para dar solución a las no linealidades presentes en el LED, como lo es la técnica de ganancias programadas, presentada en [13], en donde se propone el control de la intensidad luminosa de un arreglo LED mediante un convertidor Flyback y la técnica de ganancias programadas, sin embargo, no se le da una aplicación en específico y la sintonización del controlador es de forma empírica.

La técnica de ganancias programadas permite utilizar herramientas lineales que aproximen la dinámica no lineal del sistema, siendo posible ajustar de manera previa un controlador para diversos puntos de operación, y posteriormente, actualizar los parámetros de este a partir de dichos diseños y según el punto de trabajo en el que se encuentre el proceso [14, 15].

El objetivo de este trabajo es diseñar una fuente de alimentación que permita regular la intensidad luminosa de una lámpara LED en un amplio rango de operación, con bajo porcentaje de error en estado estable y cuidando no dañar la lámpara con grandes sobretiros, para lo cual se toma como caso de estudio las lámparas de protección ocular.

Este artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: la sección 2 se refiere a metodología para el desarrollo del sistema, la cual comprende desde la caracterización de la lámpara hasta la sintonización de esquemas de control. En la sección 3 se analizan los resultados obtenidos y finalmente, en la sección 4 se abordan las conclusiones y los trabajos futuros.

### 1.1. Caso de estudio: Lámpara de protección ocular

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), al menos 2200 millones de personas tienen deficiencia visual o ceguera, y más de mil millones podrían haberse evitado [16]. Estudios demuestran que para el año 2050 el 50 % de la población mundial padecerá miopía, y la visión humana se enfrentará a una prueba cada vez más severa [17].

Una de las principales causas de la deficiencia visual es la miopía, la cual puede prevenirse teniendo los niveles de iluminación adecuados. Debido a esto, la OMS recomienda mantener niveles de iluminancia en 500 lx en las áreas de estudio o trabajo, de preferencia con fuentes de luz blanca, con el fin de prevenir este padecimiento [18].

Esto no es una tarea sencilla, puesto que fuentes de iluminación externas como la iluminación natural, o incluso otras fuentes de iluminación artificial, perturban la iluminación en el área deseada, provocando que no se tengan los niveles recomendados.

Con base en esto, es necesario un sistema capaz de regular la intensidad luminosa que proporciona una

lámpara de protección ocular, de manera que esta complemente a la iluminación exterior, manteniéndose el nivel de iluminancia en los 500 lx recomendados por la OMS.

Tomando esto en cuenta, se realiza el diseño de un convertidor CD-CD con esquemas de control PI clásico, PI difuso y ganancias programadas, con el propósito de seleccionar el esquema de control adecuado para este caso de estudio y con ello, demostrar que un esquema de control lineal no es apto para tareas de seguimiento en iluminación LED.

## 2. Materiales y métodos

El LED es un dispositivo en el que su intensidad luminosa depende de la corriente que circula a través de él [13]. No obstante, esta corriente depende de la tensión entre sus terminales. Por ende, para variar la intensidad luminosa de un LED resulta práctico realizar variaciones de tensión. Para ello, es necesaria una fuente de alimentación capaz de realizar y soportar estas variaciones.

Debido a esto, se propone implementar un convertidor DC-DC que cumpla estas características. Además, para garantizar los niveles recomendados por la OMS, se debe incorporar un esquema de control. Esto se representa mediante el diagrama a bloques mostrado en la Figura 1.

Al garantizar que la tensión en la lámpara es la deseada se asegura que el nivel de iluminancia sea el requerido. Por ello, para simplificar el sistema se sintonizan los distintos controladores tomando como referencia un valor de tensión.

Todo este proceso se muestra en los siguientes apartados, realizándose la simulación del sistema con los controladores en Simulink/Matlab.

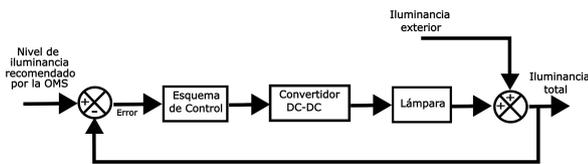


Figura 1. Diagrama a bloques del sistema propuesto

### 2.1. Caracterización de la lámpara

Para lograr que la lámpara de protección ocular complemente la iluminación natural, es necesario diseñar una fuente de alimentación con un controlador que permita regular la iluminancia dependiendo de las variaciones que se tengan en la luz natural.

El primer paso es realizar la caracterización de la lámpara. Para esto, se sigue el diagrama esquemático mostrado en la Figura 2. Se sabe que la lámpara se alimenta con una tensión de 12 VDC, por ello se conecta

a dicha tensión y se realizan variaciones descendentes, midiendo los cambios en tensión, corriente e iluminancia.

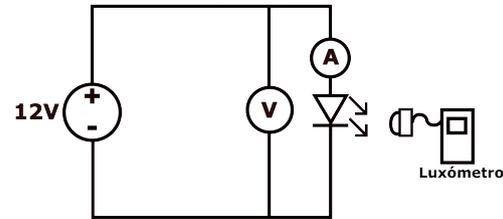


Figura 2. Circuito para la caracterización de la lámpara

Graficando los datos obtenidos, se obtiene la curva V-I (tensión-corriente) de la lámpara mostrada en la Figura 3, mientras que en la Figura 4 se muestra la curva V-E (tensión-iluminancia).

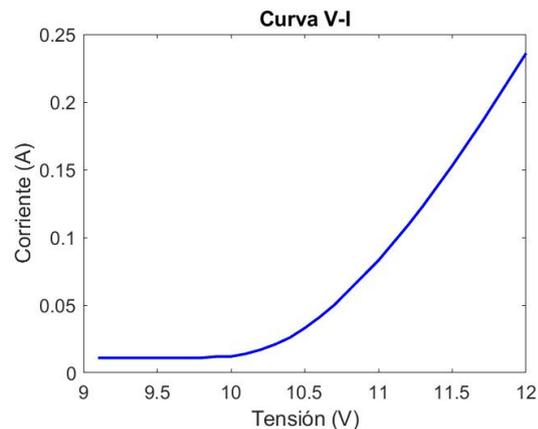


Figura 3. Curva V-I de la lámpara de protección ocular

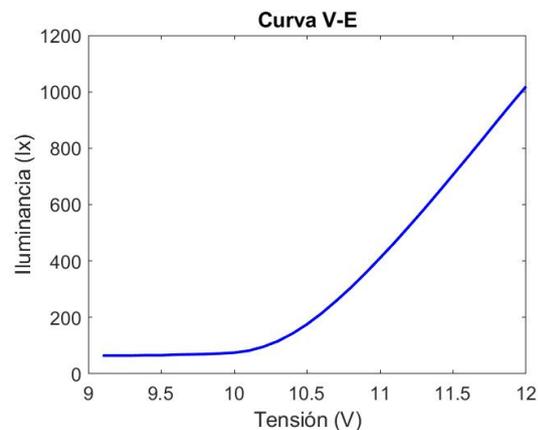


Figura 4. Curva V-E de la lámpara de protección ocular

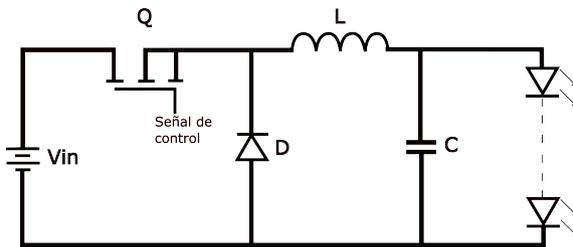
## 2.2. Diseño del convertidor DC-DC

El convertidor Buck es utilizado en aplicaciones en donde la carga requiere tensiones menores que la tensión de entrada del convertidor. Su implementación es sencilla debido a la poca cantidad de componentes, además, su control es simple, puesto que la relación entre la tensión de salida y la de entrada es proporcional al ciclo de trabajo de la señal de control [13].

Debido a lo anterior, se elige el convertidor Buck como fuente de alimentación de la lámpara. Para su diseño, se definen las especificaciones mostradas en la Tabla 1, propuestas a partir de la caracterización. En la Figura 5 se muestra la topología de este convertidor.

**Tabla 1.** Especificaciones de diseño del convertidor

Parámetro	Símbolo	Valor
Tensión de entrada	$V_{in}$	24 V
Tensión de salida mínima	$V_{omín}$	9 V
Tensión de salida máxima	$V_{omáx}$	12 V
Potencia de salida máxima	$P_{omáx}$	3.5 W
Frecuencia de conmutación	$f_s$	66.67 KHz
Rizo de corriente en el inductor	$\Delta_{iL}$	0.3 % $I_{omáx}$
Rizo de tensión en el capacitor	$\Delta_{vc}$	0.1 % $V_{omín}$



**Figura 5.** Topología del convertidor Buck

A partir del análisis y de las ecuaciones mostradas por Gamboa [19], se realiza el cálculo y selección de los componentes. El valor de estos se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Cálculo de los componentes y variables del convertidor

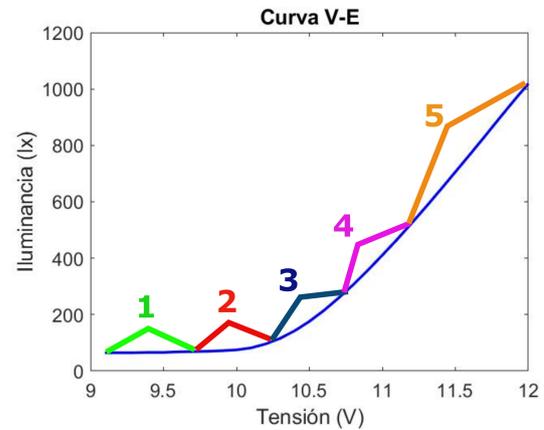
Parámetro	Símbolo	Valor
Ciclo de trabajo mínimo	$D_{mín}$	0.375
Ciclo de trabajo máximo	$D_{máx}$	0.5
Inductor	L	102.85 mH
Capacitor	C	182.29 nF
Corriente promedio en el interruptor	$I_Q$	0.146 A
Tensión en el interruptor	$V_{DS}$	24 V
Corriente promedio en el diodo	$I_D$	0.243 A
Tensión en el diodo	$V_D$	24 V

## 2.3. Funciones de transferencia

Para la obtención de las funciones de transferencia (F. T.) se debe tener claro que la carga del convertidor

es variable, puesto que el LED trabaja en diferentes puntos de operación según se requiera. Por ello, no es posible obtener una sola F. T. lineal que represente toda la dinámica del sistema.

Debido a lo anterior, y para facilitar el diseño de los controladores, se secciona la curva V-E de la lámpara en cinco rangos aproximadamente lineales, como se muestra en la Figura 6. Al dividir esta curva, es posible obtener cinco F. T. que aproximen la dinámica en cada uno de los rangos.



**Figura 6.** Curva V-E seccionada en cinco rangos

Posteriormente, dado que se tienen definidos los puntos de operación, es posible obtener la F. T. a partir de la función control-salida característica de un convertidor Buck, mostrada en la ecuación (1).

$$G_{vd} = \frac{y(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_{in} \left( \frac{1}{LC} \right)}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (1)$$

Puesto que el convertidor trabaja en todo el rango de operación de la lámpara, el valor de R en la ecuación (1) es variable. Por ello, se calcula una R promedio en cada uno de los rangos definidos, obteniéndose de esta manera una F. T. diferente para cada rango de operación. Los parámetros para estas F. T. se muestran en la Tabla 3, mientras que las funciones se muestran en las Ecuaciones (2) - (6).

$$\frac{24(53337524.95)}{s^2 + 6385.48s + 53337524.95} \quad (2)$$

$$\frac{24(53337524.95)}{s^2 + 6925.77s + 53337524.95} \quad (3)$$

$$\frac{24(53337524.95)}{s^2 + 14428.63s + 53337524.95} \quad (4)$$

$$\frac{24(53337524.95)}{s^2 + 38978s + 53337524.95} \quad (5)$$

$$\frac{24(53337524.95)}{s^2 + 80507.26s + 53337524.95} \quad (6)$$

**Tabla 3.** Cálculo de los componentes y variables del convertidor

Rango	Vin	L	C	R	F. T.
9.2 V				859.10 Ω	(2)
9.7 V					
9.7 V				792.08 Ω	(3)
10.2 V					
10.2 V	24 V	102.85 mH	182.29 nF	380.2 Ω	(4)
10.7 V					
10.7 V				140.74 Ω	(5)
11.3 V					
11.3 V				68.14 Ω	(6)
12 V					

Es importante mencionar que el hecho de que se tengan F. T. distintas para cada rango de operación, tiene como consecuencia que se consigan dinámicas diferentes en cada uno de ellos. Esto se debe a que se tiene un distinto factor de amortiguamiento ( $\zeta$ ) en cada rango, a pesar de tener la misma frecuencia natural ( $\omega_n$ ). Esto se detalla en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Factor de amortiguamiento y frecuencia natural en los rangos de operación

Rango	F.T.	$\zeta$	$\omega_n$
9.2 V-9.7 V	(2)	0.437	7304.32 rad/s
9.7 V-10.2 V	(3)	0.474	7304.32 rad/s
10.2 V-10.7 V	(4)	0.988	7304.32 rad/s
10.7 V-11.3 V	(5)	2.66	7304.32 rad/s
11.3 V-12 V	(6)	5.51	7304.32 rad/s

#### 2.4. Sintonización de un control PI

Debido a que el esquema de control PI es de los más utilizados en aplicaciones con convertidores DC-DC, se realiza la sintonización de este para validar y comparar su funcionamiento en la regulación de la iluminancia de una lámpara de protección ocular.

El controlador es sintonizado para el rango de operación intermedio, correspondiente a la F. T. de la Ecuación (4).

Para la sintonización se utiliza la metodología de asignación de polos. Se parte de que la ecuación característica de una F. T. de segundo orden se puede simplificar como se muestra en la Ecuación (7).

$$G(s) = \frac{k}{s^2 + as + b} \quad (7)$$

Además, se sabe que la F. T. de un control PI es de la forma mostrada en la ecuación (8).

$$C(s) = \frac{K_c s + K_i}{s} \quad (8)$$

Entonces, al cerrar el lazo de la planta con el controlador, se tiene la F. T. mostrada en la ecuación (9).

$$H(s) = \frac{k(K_c s + K_i)}{s^3 + as^2 + (b + kK_c)s + kK_i} \quad (9)$$

Por lo tanto, se debe definir una asignación de polos con base en un sistema de tercer orden con dos polos complejos conjugados y un polo real, de la forma mostrada en la ecuación (10), donde  $\beta$  representa un factor de proporcionalidad que relaciona la distancia entre el polo real con respecto a los polos complejos conjugados.

$$P_d = (s + \beta\zeta\omega_n)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) \quad (10)$$

Entonces, igualando (10) con el denominador de la F. T. en lazo cerrado de la ecuación (9) y despejando las incógnitas, se tienen tres ecuaciones útiles para el cálculo de las ganancias de un control PI. La forma de calcular se presenta en la ecuación (11), mientras que en las ecuaciones (12) y (13) se presenta el cálculo de la ganancia proporcional ( $K_c$ ) y la ganancia integral ( $K_i$ ) respectivamente.

$$\beta = \frac{\alpha}{\zeta\omega_n} - 2 \quad (11)$$

$$K_c = \left( \frac{2\beta\zeta^2 + 1}{k} \right) \omega_n^2 - b \quad (12)$$

$$K_i = \frac{\beta\zeta\omega_n^3}{k} \quad (13)$$

De esta manera, se puede calcular las ganancias del controlador PI a partir de un factor de amortiguamiento ( $\zeta$ ) y de una frecuencia natural ( $\omega_n$ ) deseados. Es importante mencionar que es posible calcular  $\zeta$  y  $\omega_n$  a partir de las Ecuaciones (14) y (15), definiendo un máximo sobretiro ( $M_p$ ) y un tiempo de asentamiento ( $t_{ss}$ ). En este caso, se propone un  $M_p$  no mayor al 5 % y se busca un  $t_{ss}$  de 1 ms.

$$\zeta = \frac{\sqrt{\ln\left(\frac{\%M_p}{100}\right)^2}}{\sqrt{\pi^2 + \ln\left(\frac{\%M}{100}\right)^2}} \quad (14)$$

$$\omega_n = \frac{4}{\zeta t_{ss}} \quad (15)$$

Por lo tanto, se obtiene que  $\beta = 1.608$ ,  $K_c = 0.247$  y  $K_i = 168.7537$ . Implementándose esto como se muestra en la Figura 7.

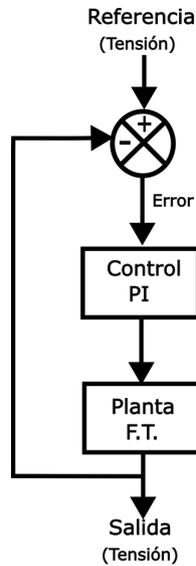


Figura 7. Diagrama a bloques de la implementación del control PI

### 2.5. Sintonización de un control PI difuso

Es común que el control por lógica difusa tenga un grado de incertidumbre, debido a que este puede ser expresado mejor como un control a través de palabras que interpretan el sentido común, en lugar de números, o bien sentencias en lugar de ecuaciones [20]. Sin embargo, las variables de los procesos no se miden en sentido común, sino en números.

Para corregir este problema, resulta conveniente incorporar las ganancias de un control PI, logrando así corregir numéricamente las falencias de la interpretación difusa. El diagrama a bloques que representa este esquema de control se muestra en la Figura 8.

Para el diseño del controlador difuso se deben tener claras las variables de entrada y de salida. En este caso, se tiene como variables de entrada el error y la integral del error, y como salida está el ciclo de trabajo, puesto que es la variable que requiere la planta.

Dado que el error se obtiene a partir de la comparación de la salida del convertidor, la cual es una tensión máxima de 12 V, se define un universo de discurso de  $\{-12, 12\}$  para ambas entradas. Es importante mencionar que se define un universo que contempla números negativos, puesto que es posible obtener una diferencia tanto positiva como negativa entre la salida y la referencia.

Las variables lingüísticas para la señal de error son definidas como:

- EN: Error Negativo
- EC: Error Cero
- EP: Error Positivo

Mientras que las variables lingüísticas definidas para la integral del error son:

- IEN: Integral del Error Negativa
- IEC: Integral del Error Cero
- IEP: Integral del Error Positiva

Una vez que se han establecido las distintas variables lingüísticas de las entradas, así como sus respectivos universos de discurso, se definen los conjuntos difusos como se muestra en la Figura 9 y Figura 10, respectivamente.

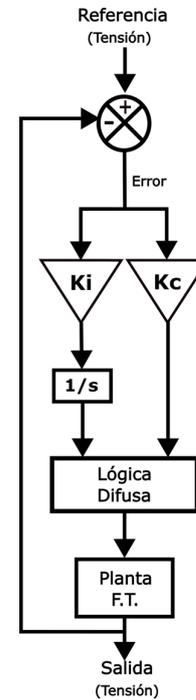


Figura 8. Diagrama a bloques de la implementación del control PI difuso

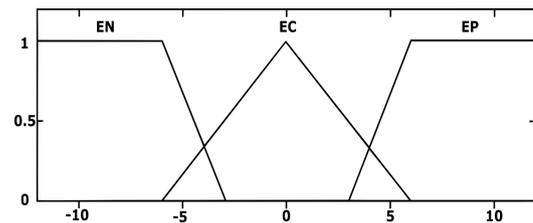


Figura 9. Conjuntos difusos del error

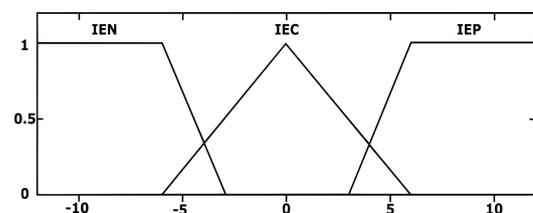


Figura 10. Conjuntos difusos de la integral del error

Por su parte, la salida del bloque difuso es el ciclo de trabajo, donde su universo de discurso se define de  $\{0, 1\}$  dado que es el intervalo en el que este opera.

Las variables lingüísticas definidas para el ciclo de trabajo son:

- P: Pequeño
- I: Ideal
- G: Grande

El conjunto difuso del ciclo de trabajo se muestra en la Figura 11.

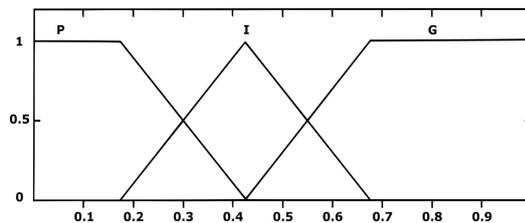


Figura 11. Conjuntos difusos del ciclo de trabajo

Una vez que se tienen definidos los distintos conjuntos difusos, se asignan las reglas de control. Para cada salida se asigna una variable lingüística según corresponda, en función de las posibles combinaciones de las entradas. El conjunto de reglas se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Reglas difusas para la variable de salida del controlador

		Integral del error		
		IEN	IEC	IEP
Error	EN	D: P	D: P	D: P
	EC	D: I	D: I	D: I
	EP	D: G	D: G	D: G

Para verificar el funcionamiento del controlador PI difuso, se cargan los conjuntos difusos definidos, así como las reglas difusas en la herramienta *fuzzyLogicDesigner*.

## 2.6. Control por ganancias programadas

El control por ganancias programadas consiste en ajustar de manera previa un controlador para diversos puntos de operación, y posteriormente, actualizar los parámetros de este a partir de dichos diseños y según el punto de trabajo en el que se encuentre el proceso [14, 15].

Uno de los métodos más utilizados para la selección de las ganancias es la lógica difusa, conformando así un tipo de control conocido como programación de ganancias difusa (*FGS: Fuzzy Gain Scheduling*) [13].

En este sentido, la lógica difusa se encarga de la variación en tiempo real de las ganancias, con la ventaja de que permite suavizar la transición entre los controladores, determinando valores intermedios de las ganancias y reduciendo los cambios drásticos que puedan afectar al controlador y a la planta.

Considerando lo anterior, se tiene el diagrama a bloques de la Figura 12, en el cual se muestra el sistema a implementar. El control de ganancias programadas diseñado está compuesto por un bloque de lógica difusa, encargado de seleccionar las ganancias del control PI, dependiendo del punto de operación requerido.

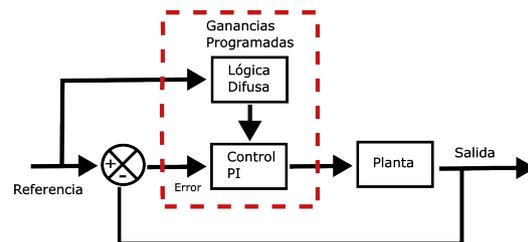


Figura 12. Diagrama a bloques de un control por ganancias programadas

Puesto que el rango de operación de la lámpara LED se ha seccionado en cinco intervalos, se tienen 5 F. T. diferentes, para las cuales se debe diseñar un control PI distinto.

Debido a que cada rango de operación presenta una dinámica diferente, se proponen especificaciones de diseño distintas para cada uno de los rangos.

Un punto importante a tener en cuenta es que no se debe tener un sobretiro muy alto en el rango de operación de 11.3 V – 12 V, dado que este podría llegar a dañar la lámpara LED. Tomando esto en cuenta, en la Tabla 6 se muestran las especificaciones de diseño para cada controlador.

Tabla 6. Especificaciones de diseño para los controladores PI

Rango	F.T.	% $M_p$	$t_{ss}$
9.2 V-9.7 V	(2)	10%	1.5 ms
9.7 V-10.2 V	(3)	8%	1.5 ms
10.2 V-10.7 V	(4)	5%	1.5 ms
10.7 V-11.3 V	(5)	2%	5 ms
11.3 V-12 V	(6)	1%	8 ms

Para la sintonización del controlador se utiliza la metodología de asignación de polos descrita en la sección 2.4, obteniéndose las ganancias mostradas en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Ganancias de los controladores PI

Rango	$K_c$	$K_i$
9.2 V – 9.7 V	0.0203	16.725
9.7 V – 10.2 V	0.0208	225.323
10.2 V – 10.7 V	0.0079	1.060.908
10.7 V – 11.3 V	0.0059	307.392
11.3 V – 12 V	0.0207	227.538

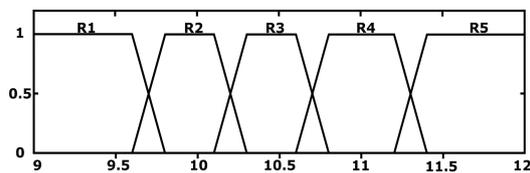
Por otro lado, para el selector de las ganancias del control PI se realiza el diseño de un control por lógica difusa.

Para este caso, resulta conveniente tener como variable de entrada la señal de referencia, ya que esta define el rango de operación en el que se trabaja. Así mismo, se definen como variables de salida las ganancias  $K_c$  y  $K_i$ , dado que estas variables cambian dependiendo del rango de operación.

Tomando en cuenta el rango de operación, se define un universo de discurso de la variable de entrada de  $\{9, 12\}$ . Por su parte, las variables lingüísticas para los rangos de operación se definen como:

- R1:  $\{9.2 - 9.7\}$
- R2:  $\{9.7 - 10.2\}$
- R3:  $\{10.2 - 10.7\}$
- R4:  $\{10.7 - 11.3\}$
- R5:  $\{11.3 - 12\}$

Una vez que se han establecido las variables lingüísticas de la entrada, se definen los conjuntos difusos como se muestra en la Figura 13.



**Figura 13.** Conjuntos difusos de los rangos de operación

Para los conjuntos difusos de salida, se define que el universo de discurso para  $K_c$  es de  $\{0.004, 0.022\}$  y para  $K_i$  es de  $\{10, 110\}$ .

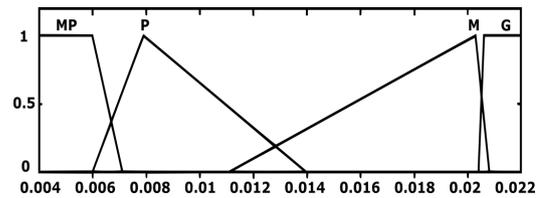
Mientras tanto, para las variables lingüísticas se observa que existen dos rangos en los que se tienen ganancias muy similares, por lo que se promedian y se definen como una sola, por lo tanto, las variables lingüísticas para  $K_c$  quedan definidas como:

- Muy pequeña - MP: 0.0059
- Pequeña - P: 0.0079
- Mediana - M: 0.0203
- Grande - G: 0.02075

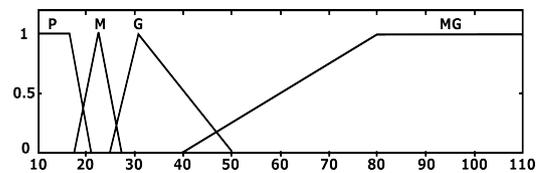
Por su parte, las variables lingüísticas para  $K_i$  se definen como:

- Pequeña - P: 16.725
- Mediana - M: 22.6430
- Grande - G: 30.7392
- Muy grande - MG: 106.0908

Entonces, el conjunto difuso para la ganancia  $K_c$  queda definido como se muestra en la Figura 14, mientras que el conjunto difuso de la ganancia  $K_i$  se muestra en la Figura 15.



**Figura 14.** Conjuntos difusos de la ganancia proporcional  $K_c$



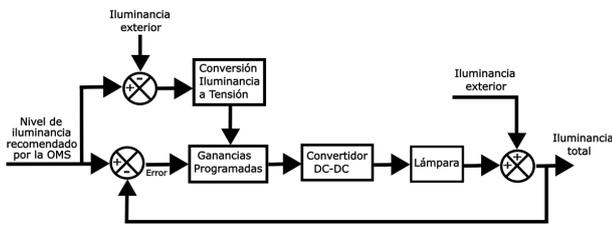
**Figura 15.** Conjuntos difusos de la ganancia integral  $K_i$

Para el conjunto de reglas, se asigna una variable lingüística en función de la entrada para cada salida, como se muestra en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Conjunto de reglas para la selección de ganancias

Referencia	Ganancias	
R1	$K_c = M$	$K_i = P$
R2	$K_c = G$	$K_i = M$
R3	$K_c = P$	$K_i = MG$
R4	$K_c = MP$	$K_i = G$
R5	$K_c = G$	$K_i = M$

No se debe perder de vista que se desea controlar el nivel de iluminancia en un área de estudio o trabajo, manteniendo los 500 lx recomendados por la OMS. En el diseño de estos controladores se trabajó con niveles de tensión para facilitar su diseño, por lo que se debe de adecuar el sistema, realizando conversiones de tensión a iluminancia. Esto se puede realizar a partir de la caracterización de la lámpara, modificándose el diagrama a bloques del sistema, como se muestra en la Figura 16.

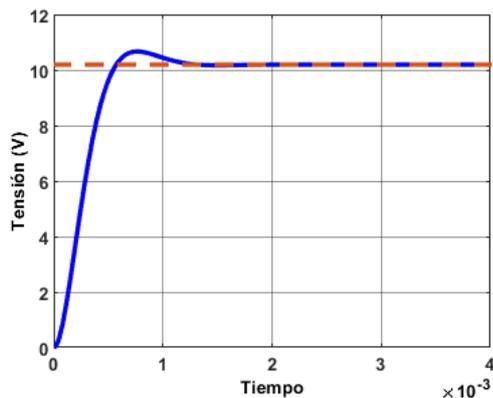


**Figura 16.** Diagrama a bloques del sistema con la incorporación de la lámpara

### 3. Resultados y discusión

Para la validación de los esquemas de control diseñados, estos se simulan con tres funciones de transferencia distintas: la función intermedia, mostrada en la ecuación (4), y las funciones de los extremos del rango de operación de la lámpara, mostradas en las ecuaciones (2) y (6).

Al simular la F. T. central con el control PI se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 17. Se observa que se tiene un error en estado estable de 0 %, un sobretiro máximo de 4.6 % y un tiempo de estabilización de aproximadamente 1.8 ms (Figura 17).



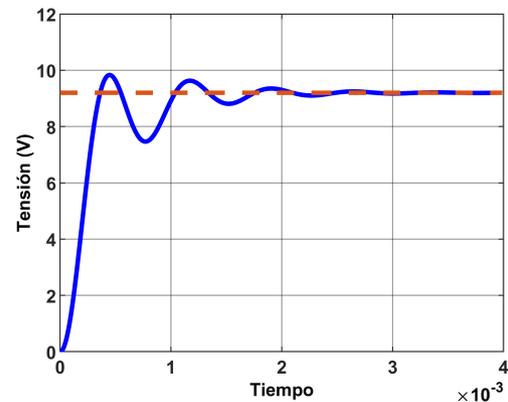
**Figura 17.** Respuesta de la función de transferencia del rango de operación central con un esquema de control PI

No obstante, al simular el mismo esquema de control con las mismas ganancias en los rangos de operación de los extremos, se obtienen dinámicas no deseadas, principalmente en el rango superior, puesto que el máximo sobretiro excede los 12 V de alimentación de la lámpara. Las respuestas de estas F. T. ante el esquema de control se muestran en las Figuras 18 y 19 respectivamente.

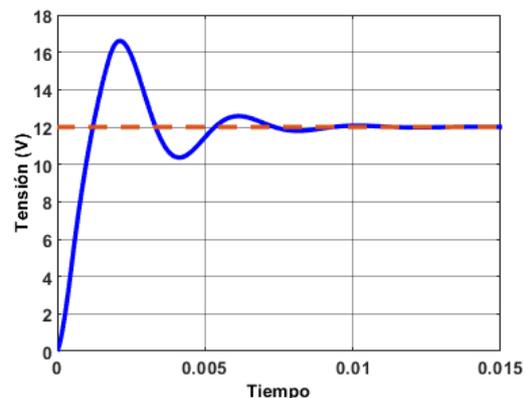
Aunque en los tres casos se alcanza un error en estado estable de 0 %, un sobretiro mayor a 12 V podría dañar la lámpara, razón por la cual un único control PI resulta poco apto para la aplicación.

Por otro lado, al simular el esquema de control PI difuso se obtiene una mejoría en la respuesta del sistema en el rango de sintonización, puesto que se reduce

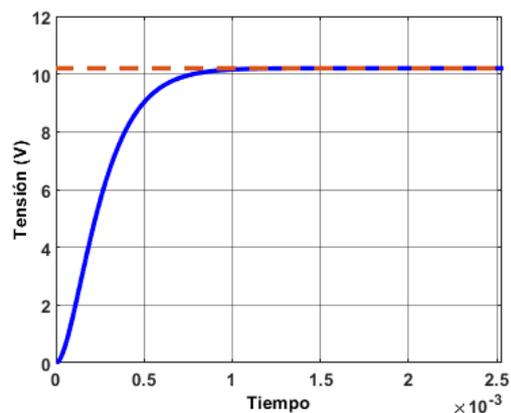
notoriamente el máximo sobretiro, como se muestra en la Figura 20. Además, se garantiza un error en estado estable de 0 % y se alcanza un tiempo de estabilización de 1.2 ms.



**Figura 18.** Respuesta de la función de transferencia del rango de operación inferior con un esquema de control PI

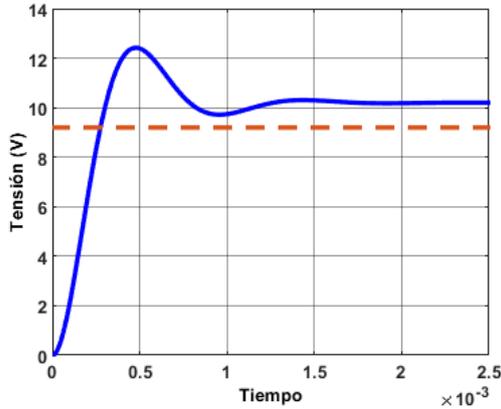


**Figura 19.** Respuesta de la función de transferencia del rango de operación superior con un esquema de control PI

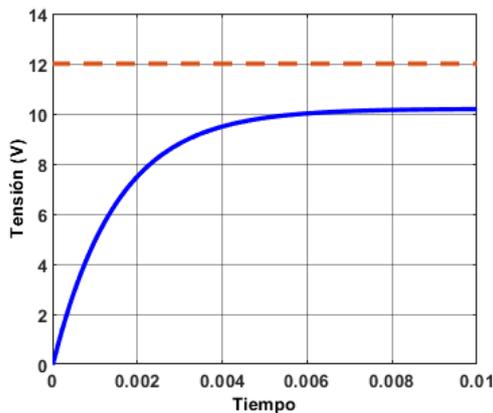


**Figura 20.** Respuesta de la función de transferencia del rango de operación central con un esquema de control PI difuso

No obstante, al aplicar el mismo controlador en los rangos de operación de los extremos se obtienen respuestas no deseadas, puesto que a pesar de que no se tiene sobretiro, el error en estado estable es mayor al 2 %, como se muestra en las Figuras 21 y 22.



**Figura 21.** Respuesta de la función de transferencia del rango de operación inferior con un esquema de control PI difuso

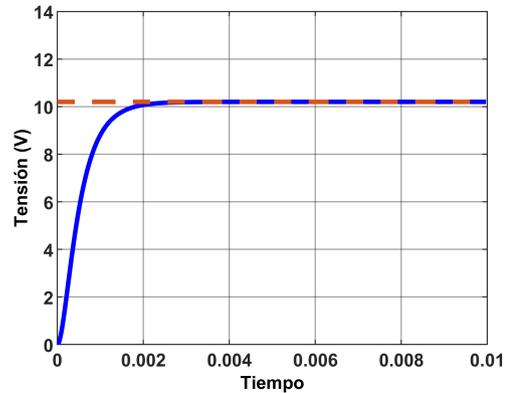


**Figura 22.** Respuesta de la función de transferencia del rango de operación superior con un esquema de control PI difuso

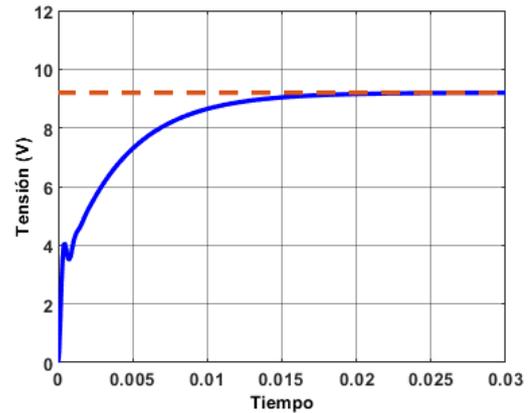
Mientras tanto, al simular el esquema de control por ganancias programadas se obtiene la respuesta deseada en cada uno de los rangos. En la Figura 23 se muestra la respuesta en el rango de operación central, mientras que la respuesta del rango inferior y superior se muestran en las Figuras 24 y 25 respectivamente.

Se observa que en todas las respuestas se tiene un error en estado estable de 0 %, además, se tienen sobretiros menores al 2 %. No obstante, el tiempo de estabilización aumenta.

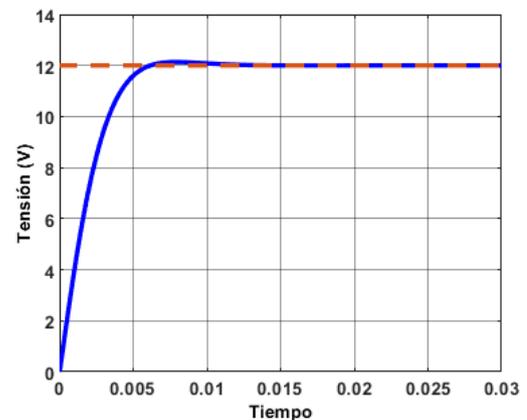
La comparación de las respuestas obtenidas con los tres esquemas de control se muestra en la Tabla 9.



**Figura 23.** Respuesta de la función de transferencia del rango de operación central con un esquema de control de ganancias programadas



**Figura 24.** Respuesta de la función de transferencia del rango de operación inferior con un esquema de control de ganancias programadas



**Figura 25.** Respuesta de la función de transferencia del rango de operación superior con un esquema de control de ganancias programadas

**Tabla 9.** Comparación de las respuestas con los esquemas de control PI, PI difuso y ganancias programadas

Parámetro	Tipo de control	Rango:	Rango:	Rango:
		9.2 V - 9.7 V	10.2 V - 10.7 V	11.3 V - 12 V
Tiempo de asentamiento	Control PI	3.95 ms	1.8 ms	13 ms
	Control PI difuso	2.2 ms	1.2 ms	9 ms
	Ganancias programadas	24 ms	3 ms	12 ms
Máximo sobretiro	Control PI	6.78 %	4.6 %	38.42 %
	Control PI difuso	35%	0%	0%
	Ganancias programadas	0%	0%	1.08 %
Error en estado estable	Control PI	0%	0%	0%
	Control PI difuso	10.86 %	0%	15%
	Ganancias programadas	0%	0%	0%

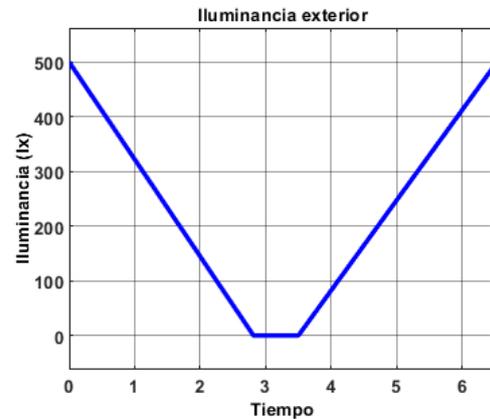
Es importante mencionar que el máximo sobretiro y el tiempo de estabilización para los cuales se sintonizó el control por ganancias programadas difieren de las especificaciones de diseño. Esto se debe principalmente a los efectos del polo real y del cero que se produce al cerrar el lazo.

Sin embargo, estos efectos no perjudican la dinámica deseada, sino que la benefician, lográndose sobretiros muy pequeños. El parámetro en el que se nota el efecto del polo real y del cero es en el tiempo de estabilización, sin embargo, este tiempo es del orden de milisegundos, que para efectos de iluminación y del convertidor no cobra relevancia.

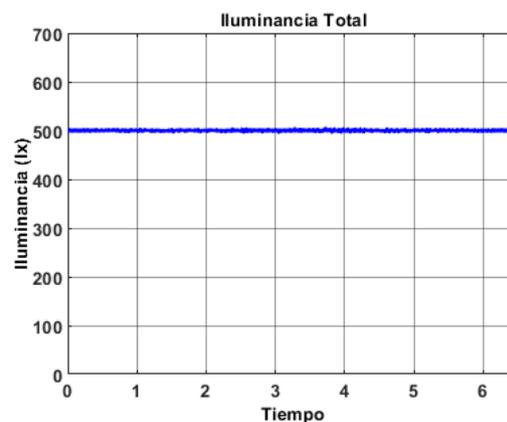
Con base en lo anterior, el control por ganancias programadas presenta una mejor respuesta en todo el rango de operación de la lámpara, por lo que se simula incorporando el modelo de la lámpara. El patrón de iluminancia exterior se toma a partir de los niveles de irradiancia solar en la ciudad de Cuernavaca, Morelos, México, en un día de primavera, recopilados de la base de datos del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [21]. Este patrón se muestra en la Figura 26.

La lámpara de protección ocular debe complementar la iluminación ante los cambios en la iluminación exterior, con el fin de mantener los 500 lx recomendados por la OMS. La respuesta del sistema ante los cambios en la iluminación exterior se muestra en la Figura 27.

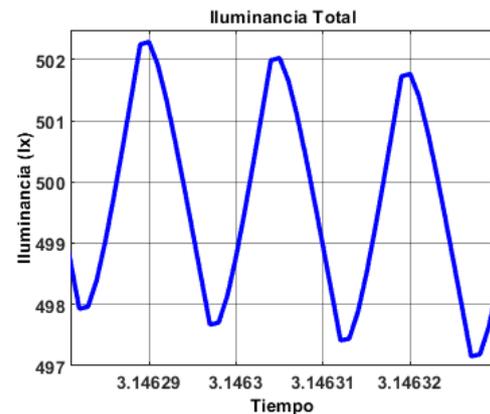
Se observa que a pesar de que la iluminación exterior cambie, el nivel de iluminancia total se mantiene en los 500 lx recomendados por la OMS. No obstante, en el momento en el que la iluminación exterior es mínima se observa que se tiene un mayor rizo. Este rizo se muestra en la Figura 28 y se debe a que en este punto el convertidor debe proporcionar una mayor tensión a la lámpara, y por consiguiente se tiene un mayor rizo de tensión debido a efectos del capacitor de salida del convertidor. Sin embargo, este rizo se encuentra alrededor del 1 %, por lo que se encuentra dentro de los márgenes aceptables de la teoría de control.



**Figura 26.** Patrón de iluminancia exterior



**Figura 27.** Iluminancia total del sistema



**Figura 28.** Efectos del rizo de tensión en la iluminancia

Por otro lado, en la Figura 29 se muestra la tensión suministrada por el convertidor diseñado. Se observa que la tensión se mantiene dentro de los rangos de operación, de manera que se garantiza no dañarla. Además, se muestra que la lámpara no trabaja en un solo punto de operación, sino que demanda diferentes niveles de tensión al convertidor según cambia el nivel de iluminancia exterior.

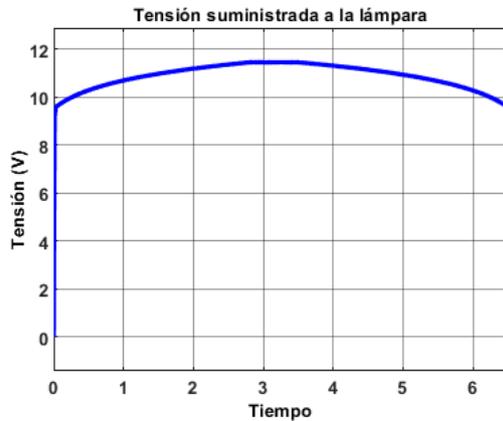


Figura 29. Tensión suministrada a la lámpara por el convertidor CD-CD

#### 4. Conclusiones

En la actualidad existen distintas aplicaciones para las lámparas LED, no obstante, algunas de ellas requieren de precisión al variar la intensidad luminosa, como el caso de las lámparas de protección ocular.

Debido a esto, en este trabajo se mostró la simulación de un convertidor DC-DC con tres esquemas de control para variar la iluminancia de una lámpara de protección ocular, con el fin de mantener los 500 lx recomendados por la OMS para prevenir enfermedades oculares, en donde fuentes de iluminación externas perturban a la iluminación proporcionada por la lámpara.

Un esquema de control PI clásico es capaz de garantizar un error en estado estable de 0 % en todo el rango de operación de la lámpara, sin embargo, no garantiza niveles de sobretiro adecuados para el funcionamiento de la misma.

Por otro lado, el esquema de control PI difuso diseñado es capaz de garantizar que no se excedan los niveles de tensión soportados por la lámpara, sin embargo, sí se cambia el punto de operación, el error en estado estable aumenta.

Por su parte, el control por ganancias programadas diseñado es una combinación entre controladores PI y lógica difusa, puesto que esta última se utiliza como selector de ganancias, logrando así ajustar la ganancia del controlador dependiendo del punto de operación en el que se encuentre el sistema. De esta manera, se logra garantizar un error en estado estable de 0 % y disminuir el máximo sobretiro.

Al simular el control por ganancias programadas incorporando el modelo de la lámpara, se logra mantener el nivel de iluminancia en 500 lx, de manera que la lámpara complementa a la iluminación exterior, cumpliéndose lo recomendado por la OMS. Además, se garantiza que el convertidor DC-DC no proporcione niveles de tensión por encima del rango de operación de la lámpara, con lo que se comprueba que se regula

la intensidad luminosa de la lámpara LED, con precisión y cuidando no dañarla, a diferencia de otros trabajos que se enfocan en el control en un solo punto de operación con un control lineal.

Cabe mencionar que como trabajo futuro es posible mejorar el rizo presente en la iluminancia total, aumentando el valor del capacitor de salida del convertidor, sin embargo, esto modifica las F. T. y, por consiguiente, las dinámicas obtenidas.

Por su parte, el control por ganancias programadas puede incorporarse en distintas aplicaciones, por lo que se recomienda su validación con otros casos de estudio en aplicaciones de iluminación.

#### Referencias

- [1] M. C. Gutiérrez Hernández, “Iluminación LED. ahorro, eficiencia e innovación. Proyecto de mejora de la iluminación de un hotel,” Universidad de la Laguna, España, 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/3uM3vie>
- [2] N. Pai and S. G. Kini, “Design and prototyping of dimmable LED driver for general lighting application,” in *2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, 2018, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICECA.2018.8474548>
- [3] F. Bento and A. J. M. Cardoso, “Comprehensive survey and critical evaluation of the performance of state-of-the-art LED drivers for lighting systems,” *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 21–36, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23919/CJEE.2021.000013>
- [4] S. Iturriaga-Medina, P. Martínez-Rodríguez, M. Juárez-Balderas, J. Sosa, and C. Limones, “A buck converter controller design in an electronic drive for LED lighting applications,” in *2015 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 2015, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2015.7395105>
- [5] M. Juárez, P. Martínez, G. Vázquez, J. Sosa, X. Prieto, and R. Martínez, “Analysis of buck converter control for automobile LED headlights application,” in *2014 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 2014, pp. 1–4. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2014.7036298>
- [6] M. D. Vijay, K. Shah, G. Bhuvaneshwari, and B. Singh, “LED based street lighting with automatic intensity control using solar PV,” in *2015 IEEE IAS Joint Industrial and Commercial Power Systems / Petroleum*

- and *Chemical Industry Conference (ICPSP-CIC)*, 2015, pp. 197–202. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CICPS.2015.7974074>
- [7] X. He, H. Wang, J. Cao, and D. Lei, “Design of high-power LED automatic dimming system for light source of on-line detection system,” in *2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, 2020, pp. 1487–1491. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ITOEC49072.2020.9141898>
- [8] N. K. Kandasamy, G. Karunakaran, C. Spanos, K. J. Tseng, and B.-H. Soong, “Smart lighting system using ANN-IMC for personalized lighting control and daylight harvesting,” *Building and Environment*, vol. 139, pp. 170–180, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.005>
- [9] R. B. Caldo, J. T. Seranilla, D. J. Castillo, K. S. Diocales, W. D. Gulle, B. L. Núñez, and C. T. Parreño, “Design and development of fuzzy logic controlled dimming lighting system using arduino microcontroller,” in *2015 International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*, 2015, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/HNICEM.2015.7393161>
- [10] M. G. Shafer, E. Saputra, K. A. Bakar, and F. Ramadhani, “Modeling of fuzzy logic control system for controlling homogeneity of light intensity from light emitting diode,” in *2012 Third International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation*, 2012, pp. 71–75. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ISMS.2012.90>
- [11] D. T. Phan, N. T. Bui, T. H. Vo, S. Park, J. Choi, S. Mondal, B.-G. Kim, and J. Oh, “Development of a LED light therapy device with power density control using a fuzzy logic controller,” *Medical Engineering & Physics*, vol. 86, pp. 71–77, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2020.09.008>
- [12] X. He, C. Huang, Y. Li, H. Wang, D. Lei, and M. Yao, “An adaptive dimming system of high-power led based on fuzzy pid control algorithm for machine vision lighting,” in *2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, vol. 1, 2020, pp. 2198–2202. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ITNEC48623.2020.9084741>
- [13] R. Gil Bernal and D. F. Díaz Caro, “Driver de potencia dimerizable para un arreglo de LED,” 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3WhnzVs>
- [14] M. Lara Ortiz, J. Garrido Jurado, M. L. Ruz Ruiz, and F. Vázquez Serrano, “Control PI adaptativo por ganancia programada del nivel de un tanque de sección trapezoidal,” in *XXXIX Jornadas de Automática*. XXXIX Jornadas de Automática, 2018, pp. 444–451. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497565>
- [15] J. A. Brizuela-Mendoza, A. Zavala-Río, and C. M. Astorga-Zaragoza, “Controlador de ganancias programadas aplicado a la estabilización de una bicicleta sin conductor,” in *Congreso Nacional de Control Automático*, 2013, pp. 36–41. [Online]. Available: <https://bit.ly/3BxfOfX>
- [16] OMS. (2019) La OMS presenta el primer informe mundial sobre la visión. [Online]. Available: <https://bit.ly/3YwQneO>
- [17] B. A. Holden, T. R. Fricke, D. A. Wilson, M. Jong, K. S. Naidoo, P. Sankaridurg, T. Y. Wong, T. J. Naduvilath, and S. Resnikoff, “Global prevalence of myopia and high myopia and temporal trends from 2000 through 2050,” *Ophthalmology*, vol. 123, no. 5, pp. 1036–1042, Feb. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2016.01.006>
- [18] Y. Xiaogang, W. Wang, and L. Fenna, “Design and simulation of intelligent dimmer based on fuzzy PID,” in *2020 International Conference on Intelligent Design (ICID)*, 2020, pp. 86–89. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICID52250.2020.00025>
- [19] R. A. Gamboa López, “Asistente para el diseño y simulación de convertidores CD-CD en lazo cerrado,” Master’s thesis, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3iVLSKI>
- [20] S. González de León, “Control PID con sintonización difusa y control difuso,” Master’s thesis, 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Fpn3hC>
- [21] INECC. (2019) Datos Estación Cuernavaca. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. [Online]. Available: <https://bit.ly/2wGUPvC>