



Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Regulación de la intensidad luminosa de una
lámpara LED utilizando ganancias programadas

presentada por:

Ing. Gregorio Saúl Olivar Castellanos

como requisito para la obtención del grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica

Director de tesis
Dr. Luis Gerardo Vela Valdés

Co-director de tesis
Dr. Jesús Aguayo Alquicira

Cuernavaca, Morelos, México. Septiembre 2023

Cuernavaca, Mor.,

04/septiembre/2023

No. de Oficio:

DIE/067/2023

Asunto:

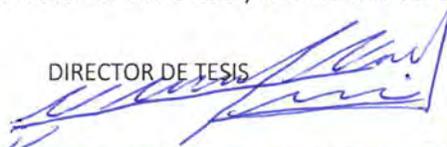
Aceptación de documentos de tesis

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

PRESENTE

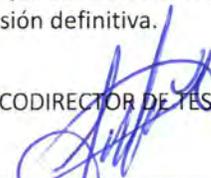
Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Gregorio Saúl Olivar Castellanos**, con número de control **M21CE085** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "Regulación de la Intensidad luminosa de una lámpara LED utilizando ganancias programadas" y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS



Dr. Luis Gerardo Vela Valdés
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 7980044

CODIRECTOR DE TESIS



Dr. Jesús Aguayo Alquicira
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 4706315

REVISOR 1



M.C. Alfredo González Ortega
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5695647

REVISOR 2



Dr. Carlos Aguilar Castillo
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 3581040

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante
JGM/kmqh

Cuernavaca, Mor.,
No. De Oficio:
Asunto:

07/septiembre/2023
SAC/146/2023
**Autorización de
impresión de tesis**

**GREGORIO SAÚL OLIVAR CASTELLANOS
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“Regulación de la Intensidad luminosa de una lámpara LED utilizando ganancias programadas”**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
“Conocimiento y tecnología al servicio de México”



**CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**

C. c. p. Departamento de Ingeniería Electrónica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/LMZ

Dedicatoria

A mis abuelos, Clodovea y Nicolas, desde el cielo han sido esa luz que me da fuerza para continuar y la motivación para concluir un posgrado

También, a mis abuelos Carmen y Rogelio, por creer siempre en mí y estar al pendiente de mi camino

A mis padres, Lidia y Homero, por todo su amor, por motivarme a seguir adelante y por acompañarme en cada paso que doy en la búsqueda de ser una mejor persona

A Diana, por todo su amor, paciencia y apoyo, por no soltar mi mano en todo este camino

A mi hermana, por su apoyo incondicional, como ejemplo de que todo se puede lograr

Finalmente, a mí, por esa perseverancia que me permitió seguir adelante a pesar de las circunstancias

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por proporcionarme los recursos necesarios para realizar una maestría.

Al Tecnológico Nacional de México, por facilitarme sus instalaciones para estudiar un posgrado

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), por haberme permitido realizar mi maestría, dándome la oportunidad de seguir aprendiendo y creciendo profesionalmente.

A mis directores de tesis, el Dr. Luis Gerardo Vela Valdés y Dr. Jesús Aguayo Alquicira, por brindarme la oportunidad de trabajar con ellos y por compartir sus conocimientos de la mejor manera posible.

A mi comité revisor, el M.C. Alfredo González Ortega y Dr. Carlos Aguilar Castillo, por todos sus valiosos comentarios que encaminaron este trabajo y contribuyeron a un mejor desarrollo del mismo.

A mis profesores, por compartir sus conocimientos y su experiencia a lo largo de mi formación, siempre con una buena actitud y la mejor disposición.

A mis compañeros, por hacer más agradable mi estancia durante la maestría, por su apoyo y motivación.

Resumen

En la actualidad existe una gran variedad de aplicaciones de los diodos emisores de luz, en donde cada aplicación define los requerimientos con los que debe cumplir tanto la lámpara como su controlador, por lo que se vuelve un reto el tener un controlador adecuado para cada aplicación.

En este trabajo se aborda el caso de estudio de las lámparas de protección ocular, en donde la lámpara debe complementar a la iluminación exterior con el fin de mantener los niveles de iluminancia recomendados por la Organización Mundial de la Salud para prevenir padecimientos oculares.

A lo largo de este trabajo se realiza el diseño de un controlador LED, abarcando su convertidor CD-CD, así como su esquema de control, con la finalidad de regular la intensidad luminosa de la lámpara en un amplio rango de operación.

Para el diseño de la técnica de control se realiza la comparación de las respuestas obtenidas con un control clásico y un control adaptable como lo es ganancias programadas. Con esto, se pone de manifiesto que el control de ganancias programadas presenta un mejor desempeño al tener un menor porcentaje de error en todo el rango de operación de la lámpara, garantizando los requerimientos del caso de estudio.

Abstract

Currently there is a wide variety of applications of light-emitting diodes, where each application defines the requirements to be met by both the lamp and its driver, so it becomes a challenge to have a suitable driver for each application.

This work addresses the case study of eye protection lamps, where the lamp must complement the outdoor lighting in order to maintain the illuminance levels recommended by the World Health Organization to prevent eye diseases.

Throughout this work, the design of an LED controller is carried out, including its DC-DC converter, as well as its control scheme, with the purpose of regulating the luminous intensity of the lamp in a wide range of operation.

For the design of the control technique, a comparison of the responses obtained with a classical control and an adaptive control such as gain scheduling is carried out. With this, it is shown that the control of gain scheduling presents a better performance by having a lower percentage of error throughout the operating range of the lamp, ensuring the requirements of the case study.

Contenido

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Planteamiento del problema.....	4
1.3 Propuesta de solución.....	5
1.4 Hipótesis	6
1.5 Objetivos	6
1.5.1 Objetivo general.....	6
1.5.2 Objetivos específicos.....	6
1.6 Justificación.....	7
1.7 Alcances y limitaciones	7
1.8 Organización del documento.....	8
Capítulo 2. Los LED y su regulador de intensidad luminosa	11
2.1 Magnitudes fotométricas en iluminación	12
2.2 Aplicaciones de los LED.....	14
2.3 Regulador de intensidad luminosa	15
2.4 Convertidores de potencia en iluminación LED.....	17
2.5 Esquemas de control para iluminación LED.....	22
2.5.1 Lazo abierto y lazo cerrado	22
2.5.2 Técnicas de control lineal	24
2.5.3 Técnicas de control no lineal	25
2.6 Señales de prueba típicas para los sistemas de control	26
Capítulo 3. Análisis y diseño de un regulador de intensidad luminosa.....	31
3.1 Selección y contextualización del caso de estudio.....	32
3.2 Caracterización de la lámpara.....	36
3.3 Diseño del convertidor CD-CD	38
3.4 Diseño de la estrategia de control.....	40
3.4.1 Sintonización de un control PI	42
3.4.2 Sintonización de un control de ganancias programadas	45
Capítulo 4. Simulaciones y resultados	53
4.1 Simulación en lazo abierto	54

4.2	Simulación en lazo cerrado con resultados en corriente	59
4.3	Simulación en lazo cerrado con resultados en iluminancia	67
Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros		75
5.1	Conclusiones generales	76
5.2	Trabajos futuros	77
Referencias		79
Anexo A Caracterización de la lámpara LED		87
Anexo B Análisis para la obtención de las ecuaciones de diseño del convertidor seleccionado		89
Anexo C Método generalizado de variables de estado promediado.....		95

Lista de símbolos y abreviaciones

ϕ	Flujo luminoso
Δi_L	Rizo de corriente en el inductor
Δv_C	Rizo de tensión en el capacitor
Ω	Ohm
A	Amperes
C	Capacitor
CA	Corriente alterna
cd	Candela
CD	Corriente directa
CFP	Corrección de factor de potencia
D	Ciclo de trabajo
E	Iluminancia
FP	Factor de potencia
I	Intensidad luminosa
i_c	Corriente del capacitor
I_D	Corriente promedio en el diodo
i_{dpk}	Corriente pico en el diodo
i_L	Corriente del inductor
i_o	Corriente de salida
i_{qpk}	Corriente pico en el transistor
I_Q	Corriente promedio en el transistor
IEA	Agencia internacional de energía
L	Inductor

LCK	Ley de corrientes de Kirchhoff
LED	Diodo emisor de luz
lm	Lumen
LVK	Ley de voltajes de Kirchhoff
lx	Lux
M	Ganancia de CD
P	Proporcional
P_o	Potencia de salida
PI	Proporcional Integral
PD	Proporcional Derivativo
PID	Proporcional Integral Derivativo
Q	Transistor
R	Resistencia
sr	Estereorradián
SVRM	Modelo fuente de voltaje - resistencia
THD	Distorsión armónica total
V	Volts
V_{in}	Tensión de entrada
v_c	Tensión en el capacitor
V_{DS}	Tensión drenaje-fuente
V_{GS}	Tensión compuerta-fuente
V_{KA}	Tensión cátodo-ánodo
v_L	Tensión en el inductor
V_o	Tensión de salida
W	Watts

Lista de figuras

Figura 1.1. Diagrama a bloques de una lámpara LED	3
Figura 1.2. Diagrama a bloques de la propuesta de solución	6
Figura 2.1. Flujo luminoso en una superficie	13
Figura 2.2. Diagrama de una fuente de alimentación para lámparas LED	16
Figura 2.3. Topología básica de un convertidor Buck	17
Figura 2.4. Topología básica de un convertidor Boost	18
Figura 2.5. Topología básica de un convertidor Buck-Boost	19
Figura 2.6. Topología básica de un convertidor Flyback	20
Figura 2.7. Topología básica de un convertidor Sepic	21
Figura 2.8. Esquema de control en lazo abierto	23
Figura 2.9. Esquema de control en lazo cerrado	23
Figura 2.10. Señales de prueba típicas para esquemas de control.....	27
Figura 2.11. Respuesta típica ante una entrada tipo escalón	28
Figura 2.12. Respuesta típica ante una entrada tipo rampa.....	29
Figura 2.13. Respuesta típica ante una entrada tipo parábola	30
Figura 3.1. Efectos de la iluminancia exterior en el área de trabajo	33
Figura 3.2. Perfil de iluminancia exterior e iluminancia que debe proporcionar la lámpara sin perturbación	35
Figura 3.3. Perfil de iluminancia exterior e iluminancia que debe proporcionar la lámpara con perturbación.....	35
Figura 3.4. Diagrama esquemático para la caracterización de la lámpara	36
Figura 3.5. Curva tensión-corriente de la lámpara LED	37
Figura 3.6. Curva tensión-iluminancia de la lámpara LED	37
Figura 3.7. Curva corriente-iluminancia de la lámpara LED	38
Figura 3.8. Topología del convertidor Buck con carga LED	39
Figura 3.9. Señal de referencia seccionada	42
Figura 3.10. Diagrama a bloques de un control PI	42

Figura 3.11. Respuesta al escalón del control PI con corriente de carga de 55mA	44
Figura 3.12. Respuesta al escalón del control PI con corriente de carga de 0.7mA	45
Figura 3.13. Respuesta al escalón del control PI con corriente de carga de 109mA	45
Figura 3.14. Esquema básico de ganancias programadas	46
Figura 3.15. Esquema de ganancias programadas con selector difuso	47
Figura 3.16. Diagrama a bloques del esquema de ganancias programadas a implementar.....	47
Figura 3.17. Curva I-E seccionada en rangos de operación	48
Figura 3.18. Respuesta al escalón del control de ganancias programadas con corriente de carga de 5mA	49
Figura 3.19. Respuesta al escalón del control de ganancias programadas con corriente de carga de 16mA	50
Figura 3.20. Respuesta al escalón del control de ganancias programadas con corriente de carga de 40mA	50
Figura 3.21. Respuesta al escalón del control de ganancias programadas con corriente de carga de 90mA	51
Figura 4.1. Modelo SVRM para simular la carga LED	54
Figura 4.2. Simulación del convertidor en lazo abierto	55
Figura 4.3. Rizo de tensión en el LED cuando la potencia de salida es 6.5 mW (ciclo de trabajo mínimo)	55
Figura 4.4. Rizo de tensión en el LED cuando la potencia de salida es 1.25 W (ciclo de trabajo máximo)	56
Figura 4.5. Rizo de corriente en el inductor cuando la corriente promedio es 0.76 mA (ciclo de trabajo mínimo).....	56
Figura 4.6. Rizo de corriente en el inductor cuando la corriente promedio es 109 mA (ciclo de trabajo máximo).....	57
Figura 4.7. Corriente en el LED cuando la corriente promedio es 0.76 mA (ciclo de trabajo mínimo)	57
Figura 4.8. Corriente en el LED cuando la corriente promedio es 109 mA (ciclo de trabajo máximo).....	58
Figura 4.9. Comparación entre la corriente en el inductor y corriente en el LED ..	58

Figura 4.10. Corriente del LED necesaria para proporcionar la iluminancia recomendada de acuerdo con la iluminancia exterior propuesta	59
Figura 4.11. Respuestas de los esquemas de control ante el seguimiento de la señal de referencia en corriente	60
Figura 4.12. Respuestas con ambos esquemas de control en el arranque.....	61
Figura 4.13. Respuestas de los esquemas de control en el rango de 60mA - 109mA.....	61
Figura 4.14. Error respecto a la referencia de los esquemas de control en el rango de 60mA - 109mA	62
Figura 4.15. Respuestas de los esquemas de control en el rango de 20mA - 60mA	63
Figura 4.16. Error respecto a la referencia de los esquemas de control en el rango de 20mA - 60mA	63
Figura 4.17. Respuestas de los esquemas de control en el rango de 12mA - 20mA	64
Figura 4.18. Error respecto a la referencia de los esquemas de control en el rango de 12mA - 20mA	64
Figura 4.19. Respuestas de los esquemas de control en el rango de 0.7mA – 12mA.....	65
Figura 4.20. Error respecto a la referencia de los esquemas de control en el rango de 0.7mA - 12mA	65
Figura 4.21. Curva I-E para la conversión de corriente a iluminancia	68
Figura 4.22. Conversión de corriente a iluminancia	68
Figura 4.23. Respuestas de los esquemas de control en términos de iluminancia	69
Figura 4.24. Iluminancia total obtenida con control PI.....	69
Figura 4.25. Iluminancia total obtenida con control de ganancias programadas...	70
Figura 4.26. Comparación de la iluminancia total con ganancias programadas y control PI	70
Figura 4.27. Iluminancia total con perturbación con el control PI	72
Figura 4.28. Iluminancia total con perturbación con el control de ganancias programadas	72
Figura 4.29. Comparación de la iluminancia total con perturbación	73
Figura B.1. Principio de funcionamiento del convertidor Buck	89
Figura B.2. Formas de onda del convertidor Buck en MCC	90
Figura C.1. Circuitos equivalentes del convertidor Buck en un ciclo de conmutación	95

Lista de tablas

Tabla 1.1. Comparativa de las fuentes de luz más usadas en iluminación	2
Tabla 2.1. Magnitudes fotométricas básicas y su unidad de medida	13
Tabla 2.2. Convertidores CD-CD más utilizados en iluminación LED	22
Tabla 2.3. Resumen de errores en estado estable ante distintas señales de prueba	30
Tabla 3.1. Especificaciones de diseño del convertidor	39
Tabla 3.2. Componentes y parámetros del convertidor	40
Tabla 3.3. Funciones de transferencia de los rangos de operación	48
Tabla 3.4. Ganancias en los distintos rangos de operación del control de ganancias programadas	49
Tabla 4.1. Comparación de las respuestas con control PI y ganancias programadas en el caso 1	66
Tabla 4.2. Comparación de las respuestas con control PI y ganancias programadas en el caso 2	66
Tabla 4.3. Comparación de los índices de desempeño obtenidos	67
Tabla 4.4. Mediciones de la iluminancia proporcionada por la lámpara e iluminancia total obtenida	71
Tabla A.1 Datos de la caracterización de la lámpara LED	87
Tabla B.1. Ecuaciones de diseño del convertidor Buck	94

Capítulo 1. Introducción

El uso de los diodos emisores de luz se ha expandido rápidamente, incorporándose en distintas aplicaciones y provocando que sus controladores tengan que acondicionarse a los requisitos de cada aplicación, con el objetivo común de aumentar la eficiencia, reducir los costos y seguir contribuyendo a disminuir el impacto ambiental. Considerando lo anterior, el presente trabajo se centra en el diseño de una fuente de alimentación con un esquema de control para un caso de estudio en específico, en donde es necesario regular la intensidad luminosa de la lámpara en un amplio rango de operación con precisión.

1.1 Antecedentes

A lo largo del tiempo, las nuevas tecnologías que se han desarrollado por medio del uso de la energía eléctrica han revolucionado diversas áreas de la ciencia y la tecnología, como lo es la incorporación del LED (*Light Emitting Diode*) 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 en materia de iluminación [1].

Son estas características las que han impulsado el uso del LED en una gran variedad de aplicaciones, además, esto cobra relevancia a nivel mundial puesto que según la IEA (*International Energy Agency*), aproximadamente el 20% de toda la electricidad utilizada a nivel global es empleada en iluminación [1], [2].

La tecnología LED es una de las formas más eficientes de convertir electrones en fotones [1], como se muestra en la Tabla 1.1. Este dispositivo ha representado un avance importante para la iluminación en casas habitación, alumbrado público, centros comerciales, industrias, y en otras áreas como la medicina, botánica y la biología, dado que combina una buena eficiencia con un mayor tiempo de vida útil, provocando que su uso se extienda a ritmos acelerados, desarrollando nueva tecnología o mejorando la existente.

Tabla 1.1. Comparativa de las fuentes de luz más usadas en iluminación

Tipo de lámpara	Eficiencia (lm/W)	Tiempo de vida útil (h)
LED	90-120	≥50,000
Sodio alta presión	95-130	28,000
Sodio baja presión	120-200	16,000
Fluorescente	60-100	8,000
Halogenuros metálicos	70-108	15,000
Halógena	20	1,200

Aunque la tendencia hacia la tecnología LED es buena, aún se deben seguir realizando esfuerzos, mejoras e incorporaciones en nuevas aplicaciones. De acuerdo con la IEA, se busca que para 2025 todos los equipos de iluminación sean de tecnología LED [3], con niveles de eficacia más altos para 2030 y con una mejora

continúa hasta el año 2050, reduciendo aún más el impacto ambiental, aumentando su utilidad y reduciendo los costos de funcionamiento [4].

Las lámparas LED están constituidas principalmente por la cadena de LEDs y el controlador o *driver*, el cual se encarga de la alimentación de estos dispositivos [5], como se muestra en la Figura 1.1. Entonces, para aprovechar las ventajas que proporcionan los LEDs, es obvio que toda la circuitería asociada a estos dispositivos ha de mantenerlas. Es decir, que el conjunto lámpara LED + fuente de alimentación ha de ser eficiente, con larga vida útil y bajo mantenimiento [6].

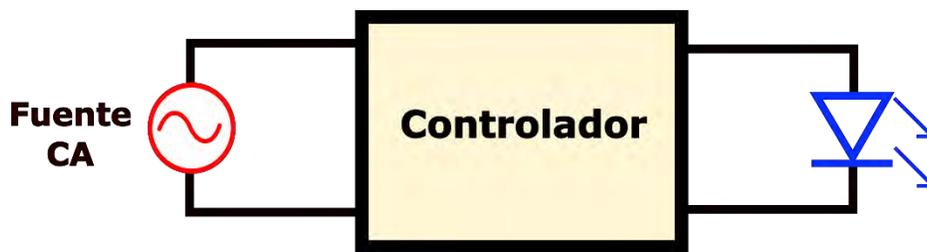


Figura 1.1. Diagrama a bloques de una lámpara LED

Actualmente existen distintas arquitecturas para los controladores LED, y su objetivo es responder a los requisitos y limitaciones impuestas por las diferentes aplicaciones. Cabe mencionar que existen casos en donde es indispensable la incorporación de esquemas de control en lazo cerrado, con el fin de mejorar la precisión y la respuesta del sistema. Esto se debe a que algunas aplicaciones son tan sencillas en donde basta con el control del encendido y apagado de la lámpara, pero muchas otras requieren regular la iluminación entre 0% y 100%, a menudo con una resolución fina [7].

En este trabajo son de interés estos casos, en donde se requiere estabilidad en un amplio rango de operación del LED, dando lugar a un control de seguimiento, en el que cobra importancia el hecho de que el LED es un dispositivo no lineal para el diseño de un esquema de control.

1.2 Planteamiento del problema

Debido a la creciente demanda del uso de los LEDs, y su incorporación en cada vez un mayor número de aplicaciones, los controladores LED deben encontrarse en mejora continua. Esto con el fin de cubrir los requerimientos y limitaciones impuestas por cada aplicación en específico, permitiendo no tener una única solución ante las problemáticas que se puedan presentar.

A causa de que el LED se emplea cada vez más en distintas áreas, se vuelve un reto tener un controlador ideal para cada aplicación, puesto que los requerimientos se vuelven más estrictos y críticos a medida que se expande el uso de este dispositivo en diferentes campos de la ciencia y la tecnología.

Dentro de este abanico de posibilidades de implementación del LED como dispositivo de iluminación, existen aplicaciones en las que es indispensable que la lámpara LED sea capaz de variar su iluminación en todo su rango de operación, con precisión y buena resolución.

Una primera solución para esto es tener el sistema en lazo cerrado e incorporar esquemas de control lineal. Sin embargo, es común que al utilizar un único control de este tipo se presenten inconvenientes como la limitación del rango de operación, puesto que se linealiza alrededor de un punto de operación. Entonces, si se cambia de punto de operación al tener parámetros variables, es probable que el sistema no responda según lo deseado, presentando un pobre desempeño dinámico, poca robustez o incluso inestabilidad en casos críticos [8].

En otras palabras, un único control lineal presenta una buena dinámica en tareas de regulación, sin embargo, cuando se tiene una aplicación de seguimiento de trayectoria, el punto de operación cambia constantemente, por lo que se tiende a presentar error en el seguimiento o incluso se puede inestabilizar el sistema.

No obstante, el error en el seguimiento también depende del tipo de señal que se tenga como referencia. Existen sistemas en los que, aunque se tenga un buen seguimiento con un control lineal frente a entradas tipo escalón, no es posible

garantizar un correcto seguimiento frente a entradas tipo rampa o parábola, principalmente en sistemas tipo I.

Es importante mencionar que el tipo de sistema, visto de forma matemática, se refiere a la cantidad de polos en $s = 0$, es decir, si el sistema tiene un único polo en $s = 0$, el sistema es tipo I; si se tienen dos polos en $s = 0$ el sistema es tipo II y así sucesivamente [9].

En estos casos, es necesario la incorporación de esquemas de control más sofisticados, como los esquemas de control no lineal, sin embargo, estos se caracterizan por involucrar un análisis matemático más complejo.

En concreto, existen aplicaciones que requieren que la iluminación producida por el LED varíe entre un 0% y 100% de manera progresiva, lo que se convierte en una tarea de seguimiento. Además, algunas de estas aplicaciones requieren una señal de referencia del tipo parábola, rampa o exponencial, por lo que es necesario un esquema de control que sea capaz de responder a dichos cambios de punto de operación, conservando un bajo error en estado estable, además de que sea sencillo de diseñar para una fácil implementación.

1.3 Propuesta de solución

Para lograr que el LED pueda funcionar en un amplio rango de operación, se plantea utilizar una técnica de control adaptativo empleada en sistemas no lineales, de diseño simple y fácil implementación, denominada ganancias programadas.

Ganancias programadas permite la aplicación de herramientas lineales, basándose en un conjunto de modelos lineales que se aproximan a la dinámica no lineal original [10], facilitando su diseño y conservando la característica de no linealidad para su aplicación en los LEDs.

Por otro lado, para conservar las ventajas de los LEDs y que el conjunto fuente de alimentación + LED sea eficiente, se plantea el uso de un convertidor CD-CD (corriente directa – corriente directa), siguiendo el diagrama a bloques mostrado en la Figura 1.2. El esquema de control varía el ciclo de trabajo del convertidor según

la señal de error obtenida, posteriormente al variar el ciclo de trabajo, la corriente en la carga LED se ajusta a la requerida, de manera que se obtiene la iluminación deseada.

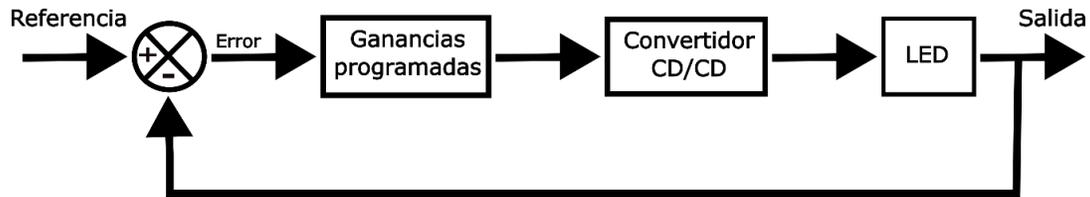


Figura 1.2. Diagrama a bloques de la propuesta de solución

1.4 Hipótesis

Al aplicar un control por ganancias programadas en tareas de seguimiento en aplicaciones de iluminación, es posible obtener un mejor desempeño en comparación con un esquema de control lineal clásico. Esto permitirá tener un menor porcentaje de error para las aplicaciones que así lo requieran

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Controlar la intensidad luminosa de una lámpara LED mediante un regulador no lineal en lazo cerrado, con la técnica de ganancias programadas, para su validación en una aplicación de iluminación

1.5.2 Objetivos específicos

- Identificar el caso de estudio que requiera una regulación de intensidad luminosa en un amplio rango de operación
- Analizar las diferentes topologías de convertidores CD-CD usadas en iluminación LED y seleccionar la más apropiada según las características del caso de estudio seleccionado
- Simular el sistema incluyendo el convertidor y su esquema de control para su validación en el caso de estudio seleccionado

1.6 Justificación

En la actualidad, el uso de los LEDs se extiende a gran velocidad, aumentando el número de aplicaciones de este dispositivo, en donde los requerimientos son cada vez más estrictos. Debido a ello, los controladores de los LEDs deben estar en mejora continua, dado que estos deben responder a los requisitos y limitaciones de las diferentes aplicaciones.

Existen aplicaciones que requieren que el LED (y por consecuencia su controlador) sea capaz de operar en todo su rango de operación, con precisión y con una resolución fina, y que además sea capaz de responder a señales de referencia del tipo exponencial o parábola. Debido a esto, es necesario un esquema de control capaz de responder a diferentes cambios de punto de operación, conservando un bajo error en estado estable.

La técnica de ganancias programadas es una técnica de control adaptativo que permite la aplicación de herramientas lineales, basándose en un conjunto de modelos lineales que aproximan la dinámica del sistema no lineal original [10]. En otras palabras, consiste en ajustar de manera previa un controlador para diversos puntos de operación, y posteriormente, actualizar los parámetros de éste a partir de dichos diseños y según el punto en el que se encuentre el proceso [11].

Entonces, al utilizar la técnica de ganancias programadas, es posible seccionar la no linealidad del sistema en pequeñas secciones lineales, permitiendo así la sintonización de diferentes esquemas de control lineales. Tomando esto en cuenta, es posible que LED opere en todo su rango de operación con precisión dado que se tiene un esquema de control adecuado para cada requerimiento en cada punto de operación. Además, se facilita el diseño al poder utilizar herramientas lineales para la sintonización del esquema de control.

1.7 Alcances y limitaciones

Este trabajo tiene como alcance principal realizar la regulación de la intensidad luminosa de una lámpara LED para un caso de estudio en específico, el

cual se detalla en capítulos siguientes. Esto involucra el diseño de un convertidor CD-CD y un esquema de control de ganancias programadas para las condiciones que el caso de estudio requiera.

Adicionalmente, se realiza la comparación en simulación de un esquema de control lineal y el control por ganancias programadas para validar que un control lineal no es suficiente para satisfacer las necesidades del caso de estudio.

Las pruebas que involucra la validación del sistema son las respuestas en simulación ante el seguimiento de la referencia, lo que conlleva a que se tengan cambios en la referencia y cambios en la tensión y corriente requerida por la carga. Estas simulaciones se realizan en *Simulink* de Matlab® y están limitadas a los dispositivos genéricos del simulador.

Por otro lado, se realiza la validación del sistema considerando que la fuente de CD conectada al circuito es un dispositivo que satisface las normas de factor de potencia (FP) y distorsión armónica total (THD), proporcionando una tensión de CD en donde ya no se requieren etapas adicionales para la corrección del factor de potencia (CFP).

Las simulaciones y el diseño en general se encuentran limitadas a los requerimientos de la lámpara seleccionada para el caso de estudio (se detalla en capítulos siguientes), dado que, si se desea conectar una lámpara con requerimientos distintos, es probable que tanto el convertidor CD-CD y el esquema de control se deban rediseñar.

1.8 Organización del documento

El presente trabajo de investigación se divide en 5 capítulos, los cuales se enlistan a continuación junto con una breve descripción de la temática que abordan cada uno de ellos.

Capítulo 2. Presenta un breve acercamiento a algunos conceptos necesarios para un mejor entendimiento del trabajo. Además, se muestra la revisión del estado del arte, en donde se describen distintas aplicaciones de los LEDs. Asimismo, se

abordan las distintas topologías de convertidores CD-CD utilizadas en aplicaciones de iluminación LED y se mencionan algunos esquemas de control empleados en este ámbito, así como parte de la teoría de base de este trabajo.

Capítulo 3. Plantea la metodología de diseño de todo el controlador LED. Primeramente, se explica el caso de estudio a abordar, y con base en ello se diseña el convertidor CD-CD de manera que se cumplan las especificaciones requeridas. También se detalla el diseño de un esquema de control lineal y un esquema de control de ganancias programadas, con el fin de simularlos, compararlos y evaluar su desempeño en el cumplimiento de los requerimientos del caso de estudio seleccionado.

Capítulo 4. Este capítulo se dedica a los resultados obtenidos. Se presenta el desempeño del sistema ante los requerimientos del caso de estudio, así como la comparación de la respuesta del sistema con un control lineal y el control por ganancias programadas.

Capítulo 5. Aborda las conclusiones obtenidas a partir del desarrollo de este trabajo. Se mencionan también las áreas de oportunidad de mejora del sistema desarrollado para trabajos futuros.

Capítulo 2. Los LED y su regulador de intensidad luminosa

Los LEDs son dispositivos capaces de emitir energía luminosa a partir de un flujo de electrones. Al controlar este flujo de electrones se pueden obtener distintos efectos en la iluminación producida por el LED. Para un mejor entendimiento de este fenómeno y del presente tema de investigación, es necesario conocer distintos términos y teoría de base que se aborda en este capítulo.

2.1 Magnitudes fotométricas en iluminación

Dentro de la iluminación, existen distintas variables necesarias para su entendimiento. Principalmente, se debe tener claro que la luz es energía radiante capaz de excitar la retina del ojo humano y crear una sensación visual [12]. Esto implica que la mayoría de las variables de iluminación toman como referencia la corrección que el ojo humano realiza al observar la luz, y aunque estas variables son términos relacionados, no son equivalentes.

El flujo luminoso (ϕ) es una de las variables más utilizadas en las aplicaciones de iluminación. Esto es el total de luz visible emitida por una fuente de luz y es medido en lúmenes (lm). De manera menos rigurosa, los lúmenes se pueden interpretar como una medida de la cantidad total de luz visible emitida por una fuente dada [13].

Por otro lado, la intensidad luminosa (I) cuantifica el flujo luminoso emitido por una fuente de luz en una determinada dirección, definida por unidad de ángulo sólido denominada estereorradián (sr) [12], [13]. Su unidad de medida es la candela (cd).

Otra variable importante es la iluminancia (E). Esta variable cuantifica la cantidad de flujo luminoso que recibe una superficie y es medida en lux (lx). En otras palabras, es la cantidad de lúmenes repartidos sobre una superficie de un metro cuadrado [13]. Dentro de esta variable cobra gran importancia la distancia a la que se encuentra la fuente de luz de la superficie, como se observa en la Figura 2.1, a mayor distancia se ilumina una mayor superficie, y por ende se obtendrá una menor iluminancia.

Por su parte, es posible cuantificar el rendimiento lumínico mediante el cociente entre el flujo luminoso producido por la lámpara y la potencia eléctrica consumida, aunque normalmente esto viene definido en las características de las lámparas [12].

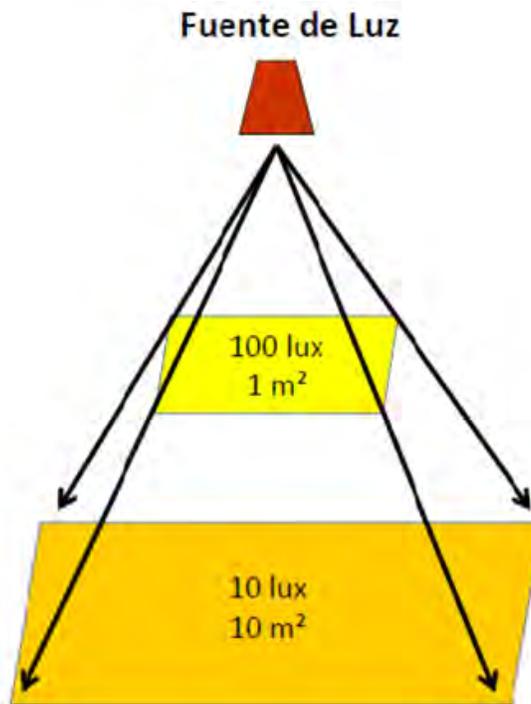


Figura 2.1. Flujo luminoso en una superficie [12]

En la Tabla 2.1 se muestra un resumen de las magnitudes fotométricas más utilizadas para aplicaciones de iluminación, junto con su unidad de medida en el sistema internacional (SI).

Tabla 2.1. Magnitudes fotométricas básicas y su unidad de medida

Magnitud fotométrica	Unidades SI	Definición
Flujo luminoso	Lumen (<i>lm</i>)	Cantidad total de luz emitida por una fuente luminosa
Intensidad luminosa	Candela (<i>cd</i>) = <i>lm/sr</i>	Cantidad de luz que se emite en una dirección determinada. Relación entre los lúmenes y el ángulo del haz de luz
Iluminancia	Lux (<i>lx</i>) = <i>lm/m²</i>	Flujo luminoso que llega a una superficie receptora
Rendimiento lumínico	<i>lm/W</i>	Relación entre el flujo luminoso emitido y la potencia eléctrica necesaria

2.2 Aplicaciones de los LED

La luz producida por los LED ha representado un avance importante para la iluminación en casas habitación, alumbrado público, centros comerciales, industrias, entre otros. Su uso se ha extendido con el propósito de ahorrar energía, debido a que los LEDs consumen menor energía que un foco incandescente común, además de que presentan mayor vida útil [14].

Por otro lado, los LEDs también se han incorporado en la turbidimetría, es decir, la medición de fenómenos mediante el uso de un haz de luz. En esta área, el LED es utilizado como detector óptico, permitiendo realizar mediciones lineales y estables. Un ejemplo de esta aplicación es la biotecnología, en donde se utiliza para monitorear y analizar el crecimiento celular [15].

Por su parte, en el ámbito de la botánica es imprescindible el uso de la luz, puesto que las plantas tienen como soporte vital este fenómeno físico debido a la fotosíntesis. Por ello, en cultivos en interiores es necesario un sistema de iluminación artificial. Sin embargo, existen sistemas de iluminación que producen un calor excesivo, razón por la cual los LEDs se vuelven una apuesta interesante, como los trabajos desarrollados en [16]–[22].

En ciencias de la salud, la iluminación también es indispensable. Por ejemplo, para utilizar el pulsioxímetro, el cual es una herramienta no invasiva esencial para el monitoreo de la saturación arterial de oxígeno. El pulsioxímetro utiliza la espectrofotometría para detectar sobre la piel intensidades de luz, las cuales proporcionan información indispensable para la detección de enfermedades [23].

Otra aplicación de la luz en el área de la ciencia de la salud es la fototerapia, utilizada para el tratamiento de diversos tipos de enfermedades, principalmente en recién nacidos [24]–[27]. O bien, como terapia dermatológica mediante la variación de la longitud de onda del haz de luz [28].

A su vez, el LED también se ha incorporado en aplicaciones cotidianas, como faros de automóviles [29], visión artificial [30], [31], lámparas de escritorio [32], [33] y hasta en iluminación de distintos tipos de habitaciones [34]–[36], revolucionando el concepto de iluminación.

2.3 Regulador de intensidad luminosa

Como se mencionó anteriormente, una lámpara LED está constituida principalmente por la cadena LED y el controlador. Un controlador LED puede ser entendido como una fuente de alimentación con un circuito de control autónomo que entrega a un conjunto de LEDs una señal eléctrica que cumple con los valores requeridos de tensión y corriente para su correcto funcionamiento. Estos controladores cuentan con al menos una entrada y una salida de potencia, pero si tiene la característica de ser regulable, es decir con la capacidad de variar la intensidad luminosa de los LEDs, posee una entrada adicional que determinará el grado de iluminación de estos [37].

Los controladores LED suelen derivarse y adaptarse a partir de topologías básicas de convertidores CA-CD y/o CD-CD para integrar funciones como el control preciso de la potencia o la regulación de la intensidad luminosa [38]. Estos convertidores incluyen componentes pasivos como inductores y capacitores, y componentes activos como interruptores y circuitos integrados, existiendo en la actualidad una gran variedad de topologías.

Es importante mencionar que las fuentes de alimentación para lámparas LED deben cumplir normas de calidad, principalmente de factor de potencia (FP) y distorsión armónica total (THD). En México se considera la NOM-030-ENER2016, la cual establece las especificaciones para el uso eficiente de energía de lámparas LED. Esta norma se aplica a todos los sistemas de iluminación con tensiones eléctricas de alimentación de $100V - 277V$ en corriente alterna a frecuencias de $50Hz - 60Hz$, y permite que una lámpara LED pueda marcarse con alto factor de potencia si se calcula un $FP \geq 90\%$, y puede marcarse con baja distorsión armónica si se obtiene una $THD_i \leq 30\%$ [39].

Por otro lado, en México también se tienen los criterios y límites de sello FIDE, que establece las especificaciones que deben cumplir los modelos luminarios y lámparas integradas con LED para el reconocimiento de eficiencia energética. Estos criterios se establecen para dispositivos LED de uso interior, con tensiones nominales de operación de $120V - 277V$, con una variación de $\pm 10\%$, a una frecuencia de 60Hz. Los requisitos que debe tener una lámpara para obtener el sello FIDE son un $FP \geq 90\%$ y una $THD_i \leq 32\%$ [40].

En la actualidad existen diferentes alternativas con el propósito de cumplir estas normativas, como se muestra en [41]. Una de las más utilizadas es una topología con diferentes etapas, mostrada en la Figura 2.2, en donde la etapa de corrección del factor de potencia (CFP) es la encargada de hacer que se cumplan las normativas antes descritas, permitiendo realizar el diseño del convertidor CD-CD obviando estos requerimientos.

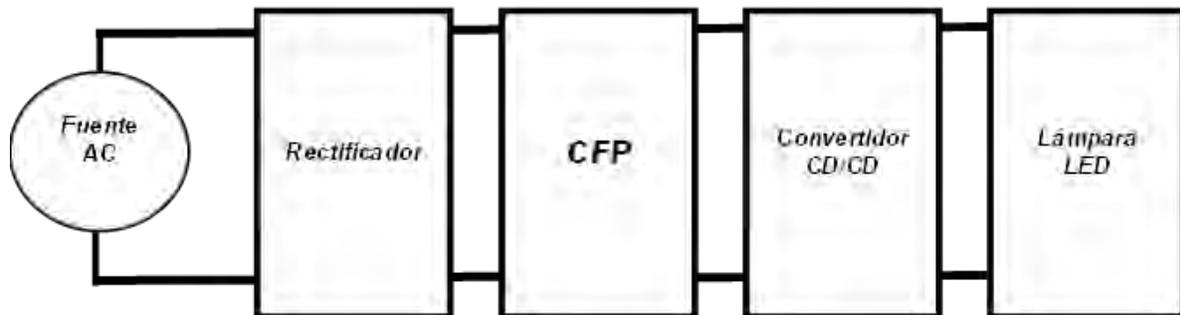


Figura 2.2. Diagrama de una fuente de alimentación para lámparas LED

Asimismo, es común que los convertidores de potencia incluyan algún esquema de control, con el fin de disminuir el error y/o mejorar la dinámica del sistema. Por lo que al momento de seleccionar el esquema de control es necesario tomar en cuenta los requerimientos de la aplicación, así como las ventajas y limitaciones de cada una de ellas.

2.4 Convertidores de potencia en iluminación LED

Independientemente de la complejidad, los sistemas de alimentación para LED tienen en común la adopción de al menos una etapa de conversión CD-CD. Existen distintas topologías de conversión CD-CD, sin embargo, la elección de alguna de ellas depende directamente de la aplicación.

Lo anterior se debe principalmente a que la aplicación, o incluso las características de la lámpara, define si se requiere reducir o aumentar los niveles de tensión y/o corriente para alimentar al LED. Incluso, determina si es necesario un convertidor con aislamiento galvánico o no.

Las topologías más comunes empleadas en el diseño de controladores LED incluyen convertidores Buck, Boost, Buck-Boost, Flyback y Sepic [37], [38].

El convertidor Buck es un convertidor reductor, utilizado en aplicaciones en donde la tensión que requiere la cadena de LEDs no es mayor al 85% de la tensión de la fuente de alimentación [37]. La topología de este convertidor se muestra en la Figura 2.3.

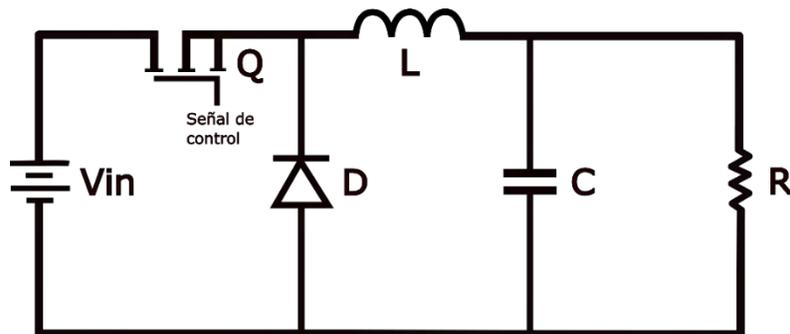


Figura 2.3. Topología básica de un convertidor Buck

Con base en lo reportado en [37], [42]–[44], las principales características de esta topología son:

- Implementación sencilla debido a la poca cantidad de componentes
- Control simple, puesto que la relación entre la tensión de salida y la de entrada es proporcional al ciclo de trabajo

- El interruptor no cuenta con una terminal conectada a tierra, por lo que se debe tomar en cuenta en el diseño del circuito de disparo
- Cuando la carga es variable se requiere el uso de un capacitor de salida lo suficientemente grande para evitar picos de tensión
- La presencia de contenido armónico en la corriente de entrada causa interferencia en el convertidor, afectando el rendimiento y la eficiencia.

Por otro lado, el convertidor Boost es ideal para aplicaciones en donde la tensión requerida por los LED es más alta que la tensión de entrada, generalmente para un mínimo de 1.5 veces [37]. En la Figura 2.4 se muestra la topología de este convertidor.

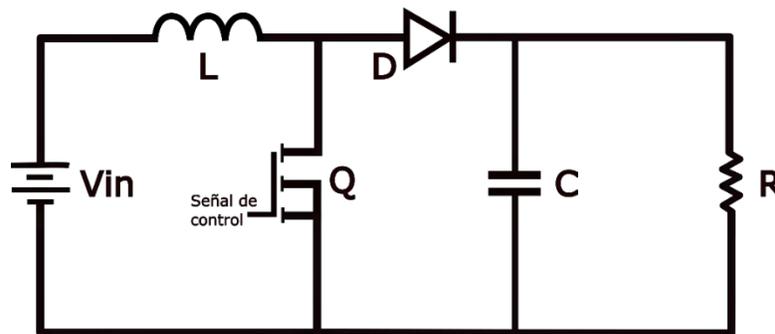


Figura 2.4. Topología básica de un convertidor Boost

De acuerdo con [37] y [45], las principales características de este convertidor son:

- Estructura simple, dado que involucra pocos componentes
- Provee altos factores de potencia y baja distorsión armónica en la corriente de entrada cuando se opera en modo de conducción discontinua
- Es muy eficiente cuando la relación entre la tensión de salida y la de entrada no es muy alta
- Se requiere de un capacitor de salida grande para reducir el rizado de la corriente en los LED, lo cual dificulta su uso en aplicaciones de regulación de intensidad luminosa

- Cuando se tiene una alta relación entre la tensión de salida y la de entrada disminuye notablemente la eficiencia del convertidor

Por su parte, el convertidor Buck-Boost reúne las características de los convertidores Buck y Boost, pues tiene la capacidad de reducir o elevar la tensión de entrada para suministrarla a la carga según se requiera. Este tipo de convertidor se muestra en la Figura 2.5.

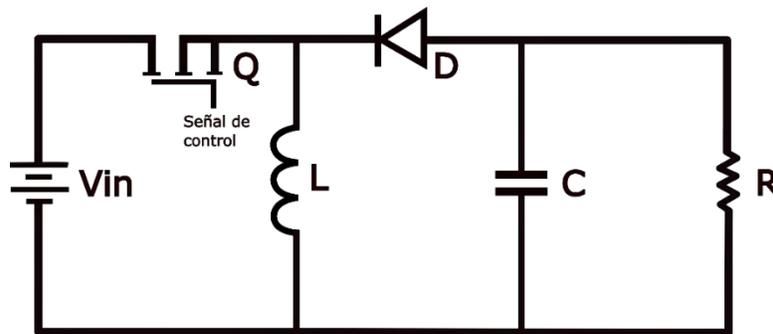


Figura 2.5. Topología básica de un convertidor Buck-Boost

A partir de lo reportado en [37], [46]–[48], el convertidor Buck-Boost reúne las siguientes características:

- La polaridad de la tensión de salida se encuentra invertida
- Permite tener un alto factor de potencia y baja distorsión armónica cuando se opera en modo de conducción discontinua
- Permite manejar un amplio rango de tensión de entrada y condiciones de carga
- El interruptor se encuentra flotado, por lo que se complica el circuito de disparo
- Su aplicación está limitada para algunos casos, debido a la inversión de la polaridad de la tensión de salida
- El control es más complejo dado que la relación entre la tensión de salida y la de entrada es no lineal

El convertidor Flyback, por su parte, está basado en un convertidor Buck-Boost, con la diferencia de la incorporación de un transformador con al menos dos devanados; el primario conectado a la fuente de alimentación y al interruptor, y el secundario conectado a la carga. Esta topología se muestra en la Figura 2.6.

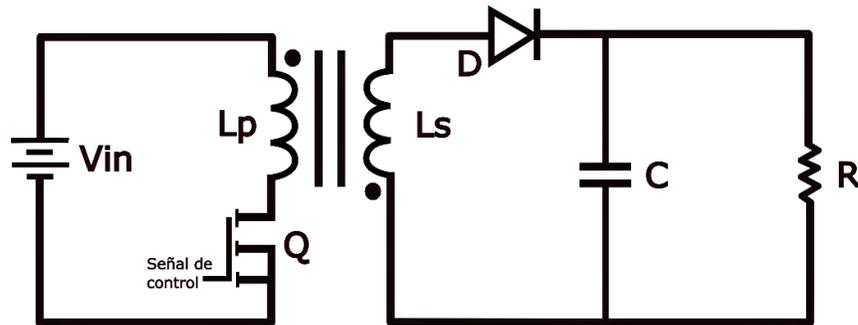


Figura 2.6. Topología básica de un convertidor Flyback

Con base en lo reportado en [37], [49], [50], el convertidor Flyback reúne las siguientes características:

- Permite obtener múltiples tensiones de salida simultáneamente, debido a que es posible conectar varias bobinas en el devanado secundario
- No requiere inductor de filtrado en la salida, puesto que la bobina del secundario actual como tal
- Se tiene aislamiento galvánico entre la entrada y la salida debido a la presencia del transformador
- Es posible obtener un mayor rango de tensión a la salida, en comparación con otras topologías debido a la presencia del transformador
- Posee un alto factor de potencia y baja distorsión armónica
- Su eficiencia es menor en comparación con otras topologías, debido a que se tienen pérdidas adicionales en el núcleo del transformador
- La presencia del transformador puede aumentar el volumen y el costo

Finalmente, el convertidor Sepic permite obtener tensiones de salida superiores o inferiores a la tensión de entrada, al igual que el convertidor Buck-Boost, con la diferencia de que no se invierte la polaridad de la tensión de salida [37]. La topología de este convertidor se muestra en la Figura 2.7.

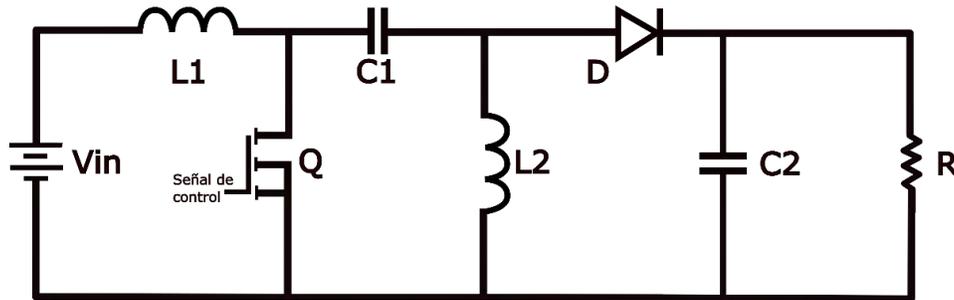


Figura 2.7. Topología básica de un convertidor Sepic

De acuerdo con [37] y [51], las principales características de este convertidor son:

- Posee un alto factor de potencia, alcanzando valores muy cercanos a la unidad
- Debido a la presencia del inductor en la entrada, el rizado de corriente se disminuye
- Es capaz de soportar un amplio rango de tensiones de entrada
- Puede reducir o elevar la tensión de entrada sin invertir la polaridad de salida
- Es un sistema de cuarto orden debido a sus cuatro elementos almacenadores de energía. Esto dificulta el modelado del convertidor, y en consecuencia el diseño de un esquema de control
- Posee un mayor número de componentes que el convertidor Buck-Boost, lo cual incrementa el costo y volumen

En concreto, cada tipo de convertidor posee diferentes características que pueden ser de utilidad dependiendo de la aplicación en la que se desee incorporar, por lo que será la aplicación la que determine la topología a implementar. En la

Tabla 2.2 se resumen algunas de las características de los convertidores antes descritos, con base en lo reportado en [37], [38], [42]–[52].

Tabla 2.2. Convertidores CD-CD más utilizados en iluminación LED

	Buck	Boost	Buck-Boost	Sepic	Flyback
Reductor o Elevador	Reductor	Elevador	Ambos	Ambos	Ambos
Eficiencia	80% - 94%	85% - 95%	80% - 92%	75% - 85%	75% - 85%
Interruptor flotado	Si	No	Si	No	No
Cantidad de componentes*	4	4	4	6	4 o más
Aislamiento galvánico	No	No	No	No	Si

*Considerando solo los elementos básicos de la topología de cada convertidor

2.5 Esquemas de control para iluminación LED

En la actualidad existen una gran variedad de sistemas de control, adaptados y diseñados dependiendo de los requerimientos de cada aplicación; desde sistemas en lazo abierto hasta esquemas de control más sofisticados donde se involucra la inteligencia artificial.

El área de la iluminación LED no es la excepción, puesto que existen aplicaciones en donde es necesario considerar las variaciones en la carga o los cambios en la referencia. En las siguientes secciones se describen algunos de estos esquemas de control.

2.5.1 Lazo abierto y lazo cerrado

En un sistema de control de lazo abierto, la salida no se mide ni se realimenta para compararla con la entrada. Los sistemas de control de lazo abierto son sistemas en los que la salida no tiene efecto sobre la señal o acción de control [53]. Por lo tanto, para cada entrada de referencia corresponde una condición de operación fija. Entonces, la exactitud del sistema depende de la calibración de los elementos que lo componen [53], [54]. La Figura 2.8 muestra la manera de implementar un esquema de control de este tipo.



Figura 2.8. Esquema de control en lazo abierto

Los sistemas de lazo abierto son económicos, pero normalmente inexactos. Un sistema de control de este tipo es útil cuando se tiene la seguridad de que no existen perturbaciones actuando sobre él mismo [54].

Este tipo de esquema de control se empleó con éxito en [23], [55], [56], logrando un ahorro de energía, con la desventaja de que se depende exclusivamente de la correcta calibración del sistema y en caso de existir perturbaciones el control no será capaz de responder.

En contraste, en los sistemas de control de lazo cerrado la salida o señal controlada debe ser realimentada y comparada con la señal de referencia. Esta señal, debe ser proporcional a la diferencia entre la entrada y la salida del sistema y se denomina señal de error del sistema; esto con el fin de disminuir el error y corregir la salida [53], [57]. La Figura 2.9 muestra la forma de implementar un esquema de control en lazo cerrado.

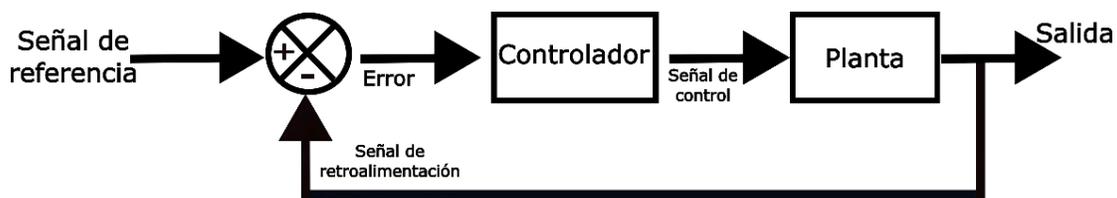


Figura 2.9. Esquema de control en lazo cerrado

La ventaja de los sistemas de control de lazo cerrado, es que al usar de forma adecuada la realimentación, es posible lograr que el sistema sea relativamente insensible a las perturbaciones externas y a variaciones internas de los parámetros del sistema. De esta manera, se pueden utilizar componentes más inexactos y económicos en su diseño, logrando aun así una exactitud de control [53].

Otro punto importante en los lazos de control es la estabilidad. En los sistemas en lazo cerrado, la estabilidad constituye un problema importante por la tendencia a sobre corregir errores, lo que puede introducir oscilaciones de amplitud constante o variable [53].

Los sistemas de control en lazo cerrado se pueden clasificar en diversas formas, dependiendo del propósito de la clasificación. De acuerdo con el método de análisis y diseño, los sistemas de control se clasifican en lineales y no lineales [53].

2.5.2 Técnicas de control lineal

Matemáticamente, los sistemas lineales están representados por ecuaciones diferenciales lineales. Es decir, no contienen potencias, productos entre variables u otras funciones de la variable dependiente y sus derivadas [53].

En la mayoría de casos en que se trabaja con modelos lineales de plantas, realmente se están tomando aproximaciones del proceso físico real. Estas aproximaciones serán suficientes si recogen toda la información sobre la dinámica de la planta en los rangos de operación [57].

Una primera incorporación de sistemas de control en lazo cerrado es mediante esquemas de control lineal como los controles tipo P, PI, PD o PID. Aunque también es posible encontrar esquemas de control del tipo atraso-adelanto de fase o el controlador por retroalimentación de estados [58].

En iluminación LED se logran buenos resultados con controladores del tipo PI como los trabajos presentados en [7], [29], [59], o bien mediante un control del tipo PID como se muestra en [32], [33]. Con estos esquemas de control en dichos trabajos, se logra un bajo porcentaje de error además de un rápido tiempo de estabilización. Sin embargo, en [60] se señala que se pueden presentar sobretiros no deseados en determinadas aplicaciones, principalmente si la carga o la tensión de entrada es variable, requiriendo establecer un compromiso entre el comportamiento transitorio deseado y el rango útil de operación.

2.5.3 Técnicas de control no lineal

Estos sistemas son regidos por ecuaciones no lineales, por ejemplo, ecuaciones diferenciales con coeficientes que son función de la variable dependiente, ecuaciones diferenciales parciales, multiplicación entre variables, funciones senoidales con argumentos en función de la variable dependiente, o cualquier otro tipo de ecuación funcional [53].

Cuando son necesarios unos márgenes de trabajo grandes y/o respuestas a gran velocidad, los efectos no lineales de la planta tendrán una importancia mayor en la dinámica y no podrán ser descartados [54]. En este punto se vuelve necesario utilizar esquemas de control no lineales para obtener el comportamiento deseado en la planta.

En el caso de los sistemas de control no lineal, no existe una metodología general a seguir para diseñar el controlador. Cada problema en particular tiene su mejor técnica aplicable. Entre las posibles técnicas aplicables en control no lineal existe el control en modo deslizante, lógica difusa, control adaptativo, entre otros [58].

En aplicaciones LED es común encontrar a la lógica difusa como esquema de control, ya sea por si sola como se muestra en [24], [34], o bien como complemento a un PID, recibiendo el nombre de PID Difuso, presentado en [30], [33]. Estos esquemas en general suelen presentar muy buena respuesta ante distintas condiciones, sin embargo, se caracteriza por ser un sistema interpretativo, el cual puede introducir cierto grado de incertidumbre. Además, presenta la principal desventaja de que para realizar un correcto diseño, es necesario tener un grado de experiencia sobre el sistema en el que se desea introducir el control [58], [61].

Asimismo, se suelen incorporar técnicas de control adaptable como lo es ganancias programadas, o bien la combinación de esta técnica con la lógica difusa, recibiendo el nombre de controlador de ganancias programadas difuso, como se presenta en [37]. Ganancias programadas presenta la principal ventaja de que es posible adaptar el esquema de control para diferentes condiciones, sin embargo,

para realizar esto es necesaria la sintonización de las ganancias en cada punto de operación.

Con el paso de los años, en los sistemas de iluminación se han incorporado esquemas de control más sofisticados como las redes neuronales [36], optimización por enjambre de partículas [35], o incluso inteligencia artificial como el Q-learning [62]. Estas técnicas suelen presentar una muy buena respuesta ante diversas condiciones, pero se caracterizan por ser complejas de diseñar, además de requerir un gasto computacional considerable. Sin embargo, estos esquemas son la evidencia de que el área de la iluminación se encuentra en constante innovación, buscando contribuir a mejorar los controladores LED.

2.6 Señales de prueba típicas para los sistemas de control

En general, las entradas de los sistemas de control pueden variar de forma aleatoria con respecto al tiempo, por lo que no se pueden predeterminedar. Esto provoca que sea difícil el diseñar un esquema de control que tenga un desempeño satisfactorio para todas las formas posibles de señales de entrada [9].

Debido a lo anterior, existen algunas señales de prueba básicas que facilitan el análisis y el diseño de los esquemas de control, dado que permiten la predicción del desempeño del sistema en caso de tener entradas más complejas. Las señales de prueba típicas son el escalón, la rampa y la parábola [9].

Una entrada de tipo escalón representa un cambio instantáneo en la entrada de referencia. Esta función es muy útil dado que revela que tan rápido responde un sistema a entradas con cambios abruptos [9].

Por otro lado, la función rampa es una señal que cambia constantemente con el tiempo, permitiendo probar la respuesta del sistema a señales que cambian linealmente con el tiempo [9]. Mientras tanto, una entrada del tipo parábola representa una señal que tiene un orden más rápido que la función rampa.

Estas señales tienen la característica común de que son simples de describir en forma matemática y gráfica, como se muestra en la Figura 2.10.

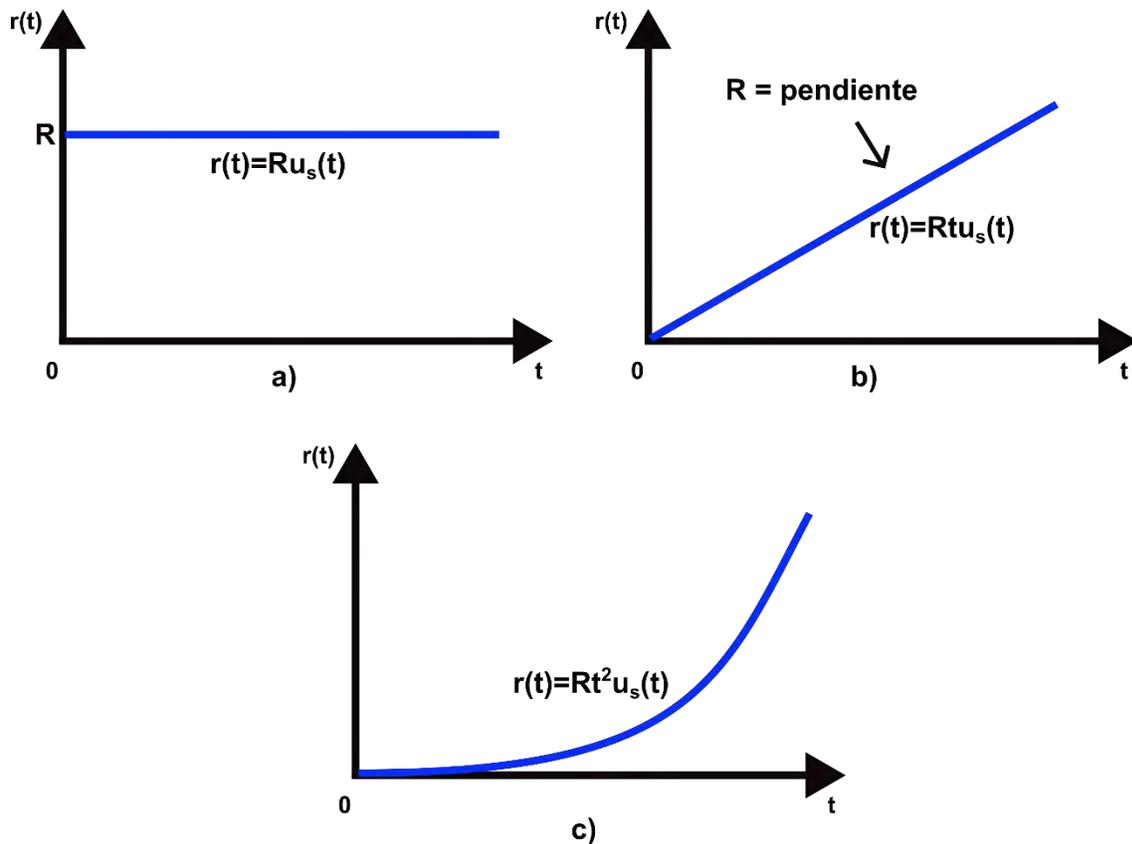


Figura 2.10. Señales de prueba típicas para esquemas de control. a) Escalón b) Rampa c) Parábola

De la función escalón a la parábola las señales se vuelven progresivamente más rápidas con respecto al tiempo. Aunque es posible definir señales con velocidades aún más rápidas, en realidad rara vez es factible [9]. Esto se debe principalmente a que, para seguir una entrada de orden superior en forma exacta, el sistema debe tener integradores de orden superior, lo que conlleva problemas de estabilidad.

Lo anterior cobra importancia dado que uno de los objetivos más importantes de los esquemas de control es mantener el error en estado estable al mínimo, o por debajo de un cierto valor tolerable, y al mismo tiempo hacer que la respuesta transitoria satisfaga determinadas especificaciones, definidas por la aplicación [9].

Naturalmente, los esquemas de control están sujetos a errores en estado estable por diferentes causas, aunque en general estos errores dependen del tipo de señal de referencia y del tipo del sistema.

En los sistemas con retroalimentación unitaria, el tipo de sistema está definido por la cantidad de polos en $s = 0$, es decir, en el origen. Si el sistema no cuenta con polos en el origen, se tiene un sistema tipo 0. En cambio, si se tiene un polo en el origen el sistema es tipo 1 y así sucesivamente [9], [63].

Esto es fundamental dado que cada una de las señales de prueba mencionadas anteriormente responden diferente dependiendo el tipo de sistema, principalmente cuando se analiza el error en estado estable del sistema.

Una señal del tipo escalón está definida en el dominio de la frecuencia como:

$$R(s) = \frac{R}{s} \quad (2.1)$$

Por lo que en un sistema tipo 0 el error en estado estable de la respuesta del sistema será constante ante este tipo de entrada, mientras que en un sistema tipo 1 o mayor, este error será 0 [9], [63]. La respuesta típica ante una entrada escalón se muestra en la Figura 2.11.

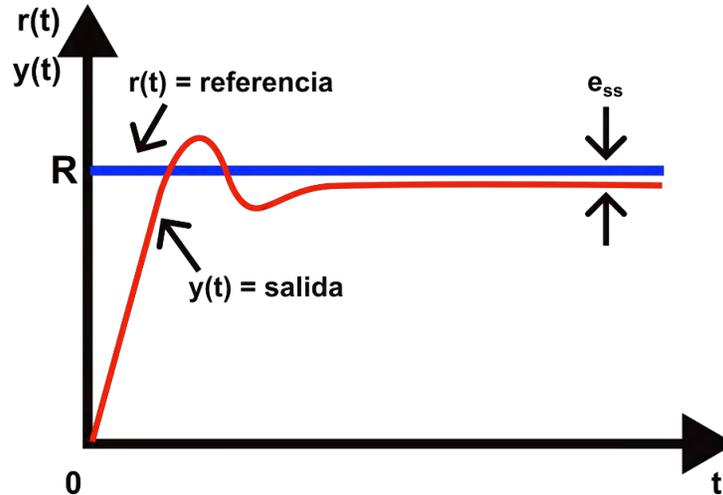


Figura 2.11. Respuesta típica ante una entrada tipo escalón

Por otro lado, la función rampa se define como:

$$R(s) = \frac{R}{s^2} \quad (2.2)$$

Entonces, en un sistema tipo 0 el error en estado estable será infinito cuando se tenga una entrada de este tipo. Mientras que en un sistema tipo 1 este error será constante, y si se tiene un sistema tipo 2 o superior el error en estado estable será 0 [9], [63]. En la Figura 2.12 se muestra la respuesta típica debido a una entrada rampa.

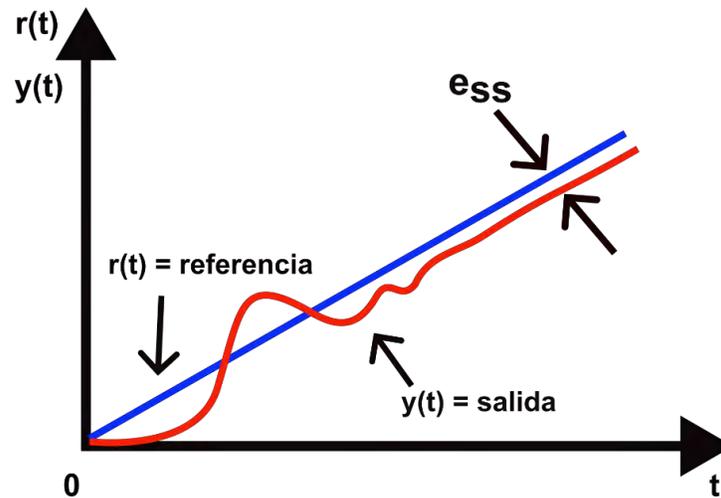


Figura 2.12. Respuesta típica ante una entrada tipo rampa

Por su parte, es posible definir una parábola en el dominio de la frecuencia como:

$$R(s) = \frac{R}{s^3} \quad (2.3)$$

Por consiguiente, si se utiliza esta señal de entrada en un sistema tipo 1 o inferior, el error en estado estable será infinito. Mientras que en un sistema tipo 2 este error será constante, y en un sistema tipo 3 o superior se tendrá un error en estado estable de 0 [9], [63]. La respuesta típica ante una entrada de tipo parábola se muestra en la Figura 2.13, mientras que en la Tabla 2.3 se muestra un resumen de los errores en estado estable ante diferentes señales de prueba.

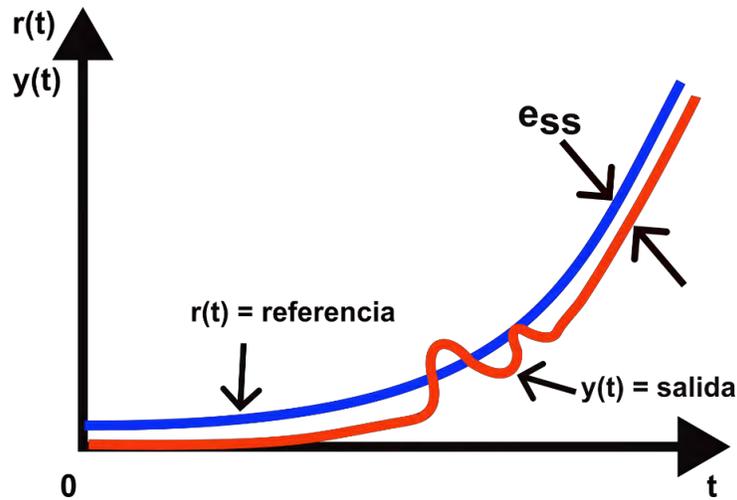


Figura 2.13. Respuesta típica ante una entrada tipo parábola

Tabla 2.3. Resumen de errores en estado estable ante distintas señales de prueba

Tipo de sistema	Error en estado estable		
	Entrada escalón	Entrada rampa	Entrada parábola
0	Constante	∞	∞
1	0	Constante	∞
2	0	0	Constante
3	0	0	0

Es importante mencionar que, si se desea conocer el valor de la constante de error en los diferentes tipos de sistemas, es posible obtenerla utilizando el teorema de valor final, en donde se involucra la función de transferencia del sistema.

Aunque teóricamente, el tener un sistema tipo III o superior reduce a 0 el error en estado estable ante las señales de prueba descritas, se debe tener cuidado con la tendencia de sobrecorregir el error, dado que esto puede introducir oscilaciones al sistema e incluso acarrear problemas de estabilidad [9], [53].

Capítulo 3. Análisis y diseño de un regulador de intensidad luminosa

Como se ha definido con anterioridad, una lámpara LED se compone principalmente de una cadena de LEDs y un controlador o regulador. Este controlador puede entenderse como una fuente de alimentación con un circuito de control autónomo que proporciona al LED los valores de tensión y corriente requeridos.

Para un correcto diseño del controlador, es necesario conocer las condiciones de operación en las que deberá trabajar la lámpara. Tomando esto en cuenta, en este capítulo se aborda la contextualización del caso de estudio, para posteriormente realizar el diseño de la fuente de alimentación de la lámpara, la cual comprende el convertidor CD-CD y el esquema de control.

3.1 Selección y contextualización del caso de estudio

En la actualidad es común pasar gran parte del tiempo en interiores, por lo que resulta importante cuidar la iluminación del entorno. La luz puede dañar los ojos cuando se produce una exposición a niveles de iluminación no adecuados de forma recurrente [33], [64], [65], razón por la cual surgen las lámparas de protección ocular, utilizadas para regular la iluminación en áreas de trabajo como los escritorios.

Esta aplicación de los LEDs cobra importancia debido a que, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), al menos 2200 millones de personas tienen deficiencia visual o ceguera, y más de 1000 millones podrían haberse evitado [66]. Una de las principales causas de la deficiencia visual es la miopía, la cual puede prevenirse teniendo los niveles de iluminación adecuados [33].

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 [67]. Una prueba de esta tendencia se presenta en países del continente asiático, en donde en la actualidad más del 70% de la población ya sufren este padecimiento [68]. Por su parte, en México más de 2 millones de personas padecen alguna deficiencia visual [65].

Aunque es posible prevenir la miopía al desempeñar actividades al aire libre, cada vez es más común pasar tiempo en interiores, en donde los niveles de iluminancia se reducen sustancialmente en comparación con el exterior. Esto cobra mayor relevancia en actividades que requieren un mayor enfoque de la vista, como lo es el estudio o el trabajo de oficina [69].

La OMS preocupada por este padecimiento, recomienda mantener niveles de iluminancia en 500 lx con luz blanca en las áreas de estudio o trabajo [33], debido a que estudios demuestran que con este nivel de iluminancia se tiene un mayor confort visual y permite prevenir la miopía a largo plazo [70]. Aunque la OMS solo ha emitido una recomendación, países como China se han tomado con seriedad

esta problemática, pues han emitido normas como la GB/T 9473-2017, la cual regula los requerimientos de las lámparas de protección ocular en dicho país [33], [70].

Es importante mencionar que las consecuencias de una mala iluminación serán notorias a largo plazo [67], [68], razón por la que se vuelve indispensable prevenir los padecimientos oculares.

Estudios han demostrado que tener variaciones de ± 10 lx o superiores en actividades que requieren mantener la vista enfocada de manera recurrente pueden desencadenar enfermedades como la miopía [69]. Entonces se vuelve indispensable reducir estas variaciones, procurando mantener un nivel de iluminancia constante.

No obstante, esto no es una tarea sencilla, debido a 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, como se muestra en la Figura 3.1.



Figura 3.1. Efectos de la iluminancia exterior en el área de trabajo

Para solucionar esta problemática, es necesario un sistema capaz de regular la intensidad luminosa que proporciona una lámpara de protección ocular, de manera que ésta complemente a la iluminación exterior, manteniéndose el nivel de iluminancia en los 500 lx recomendados por la OMS, con un nivel de error máximo de ± 10 lx (aproximadamente 2%). Esto se representa en forma matemática en la

ecuación (3.1), siempre y cuando la iluminancia exterior no exceda los niveles recomendados por la OMS.

$$500 \text{ lx} = E_{\text{exterior}} + E_{\text{lámpara}} \quad (3.1)$$

Donde:

500 lx es la iluminancia recomendada por la OMS

E_{exterior} es la iluminancia proporcionada por fuentes de iluminación externas

$E_{\text{lámpara}}$ es la iluminancia proporcionada por la lámpara de protección ocular

Es importante mencionar que la iluminación exterior no sigue el mismo patrón todos los días, debido a las diversas condiciones meteorológicas que se pueden tener, además existen fuentes de luz artificial que perturban a la iluminación deseada, lo que hace necesario la incorporación de algún esquema de control en lazo cerrado.

Generalmente, la iluminancia en el exterior es de alrededor de 15,000 lx – 25,000 lx en un día soleado, sin embargo, en interiores esta iluminancia se ve reducida a niveles de 10 lx – 800 lx [69], dependiendo de la cercanía del área de estudio con alguna ventana que permita el paso de luz natural.

Para este trabajo, se realiza la consideración de que en el área de estudio se tiene una iluminancia máxima de 500 lx al medio día. Además, tomando como base los datos de la estación Cuernavaca proporcionados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [71], se realiza la aproximación de la curva de irradiancia solar a la curva de la campana de Gauss, de forma ideal. De esta manera, se obtiene un patrón de iluminancia solar, suponiendo que la iluminancia solar es proporcional a la irradiancia. Por otra parte, se considera que se tiene una fuente de luz artificial que proporciona 100 lx al área de estudio, perturbando la iluminación deseada.

Tomando en cuenta lo anterior, es posible crear un patrón de iluminancia ideal que deberá cumplir la lámpara de protección ocular. Este perfil de iluminancia se muestra de color verde en la Figura 3.2, mientras que de color rojo se muestra la

iluminancia exterior o solar, de manera que estos se complementan obteniéndose el nivel recomendado por la OMS.

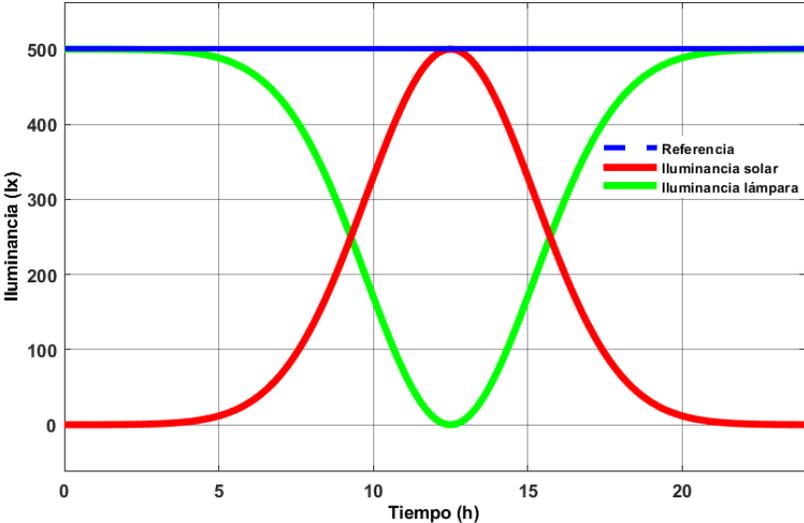


Figura 3.2. Perfil de iluminancia exterior e iluminancia que debe proporcionar la lámpara sin perturbación

Por su parte, en la Figura 3.3 se muestra la iluminancia exterior con una perturbación de una fuente de luz artificial de 100 lx, por lo que la iluminancia que deberá proporcionar la lámpara de protección ocular debe responder a dicha perturbación, con el fin de mantener los 500 lx recomendados.

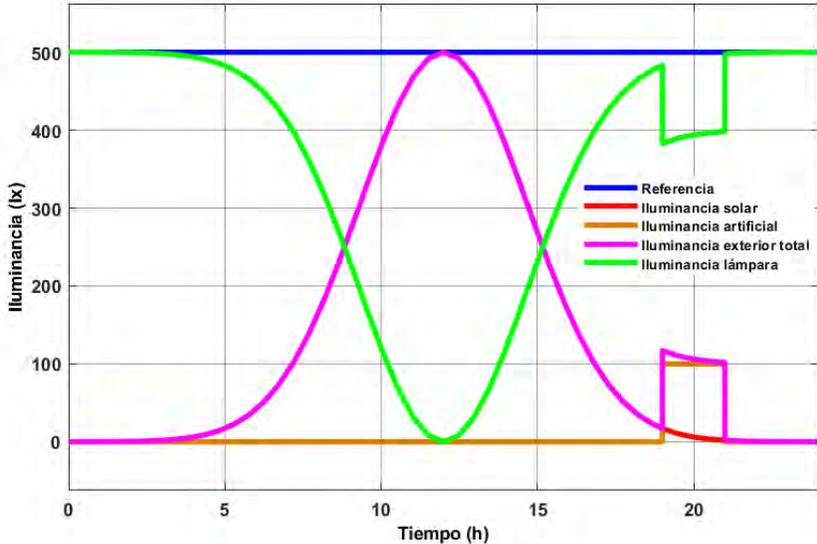


Figura 3.3. Perfil de iluminancia exterior e iluminancia que debe proporcionar la lámpara con perturbación

Otro fenómeno que afecta considerablemente a la salud visual en la iluminación es el *flicker* [33], [72]. El flicker puede definirse como una variación repetitiva en la magnitud del flujo luminoso de una fuente de luz, produciendo un parpadeo. Este parpadeo cobra relevancia cuando logra ser percibido por el ojo humano, propiciando enfermedades oculares u otros tipos de padecimientos a largo plazo.

3.2 Caracterización de la lámpara

Para lograr que la lámpara de protección ocular complemente a la iluminación exterior, es necesario diseñar su fuente de alimentación con un esquema de control que permita regular la iluminancia, dependiendo de las variaciones que se presenten en el entorno del área de trabajo. Por ello, el primer paso es realizar la caracterización de la lámpara de protección ocular.

Se sabe que se debe tener una lámpara de luz blanca que sea capaz de proporcionar al menos 500 lx, con el fin de cumplir las recomendaciones de la OMS. Por esta razón se elige la lámpara LAM-088 de Steren [73].

Para realizar la caracterización se sigue el diagrama esquemático mostrado en la Figura 3.4. De acuerdo con el fabricante, 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. Es importante mencionar que las mediciones de iluminancia se realizan a una distancia de 35 cm entre el emisor de luz y el luxómetro.

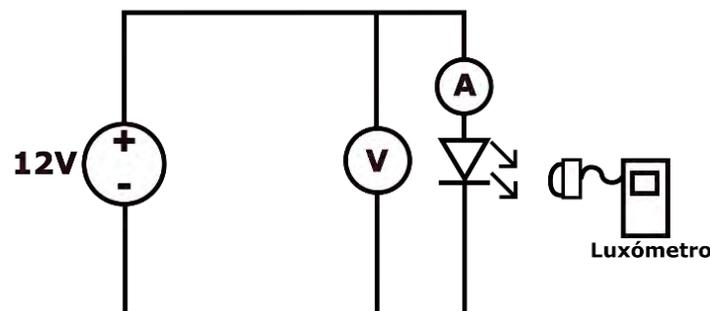


Figura 3.4. Diagrama esquemático para la caracterización de la lámpara

En el Anexo A se muestran los datos obtenidos con las mediciones en la lámpara. Graficando dichos datos, se obtiene la curva V-I (Tensión – Corriente) de la lámpara mostrada en la Figura 3.5, mientras que la relación de la iluminancia con la tensión y la corriente se muestran en la Figura 3.6 y Figura 3.7 respectivamente.

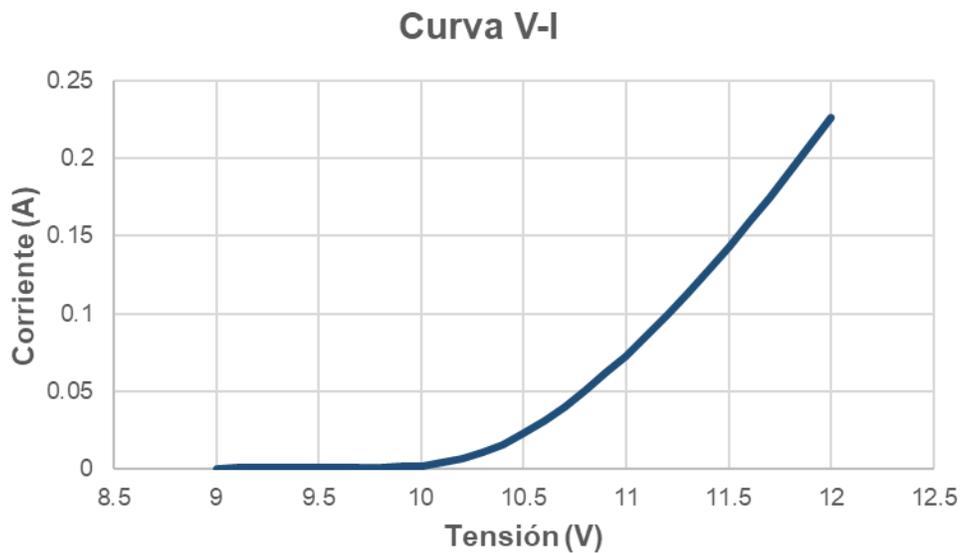


Figura 3.5. Curva tensión-corriente de la lámpara LED

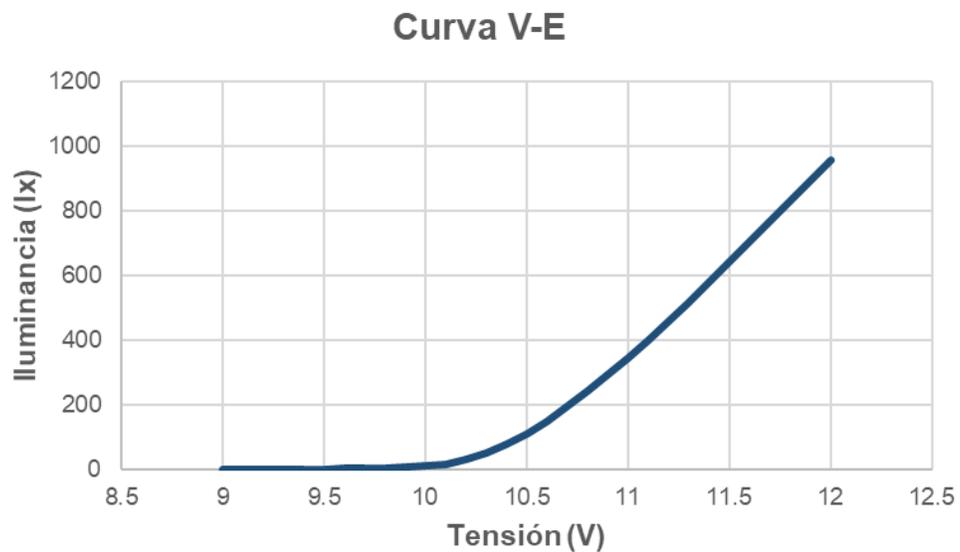


Figura 3.6. Curva tensión-iluminancia de la lámpara LED

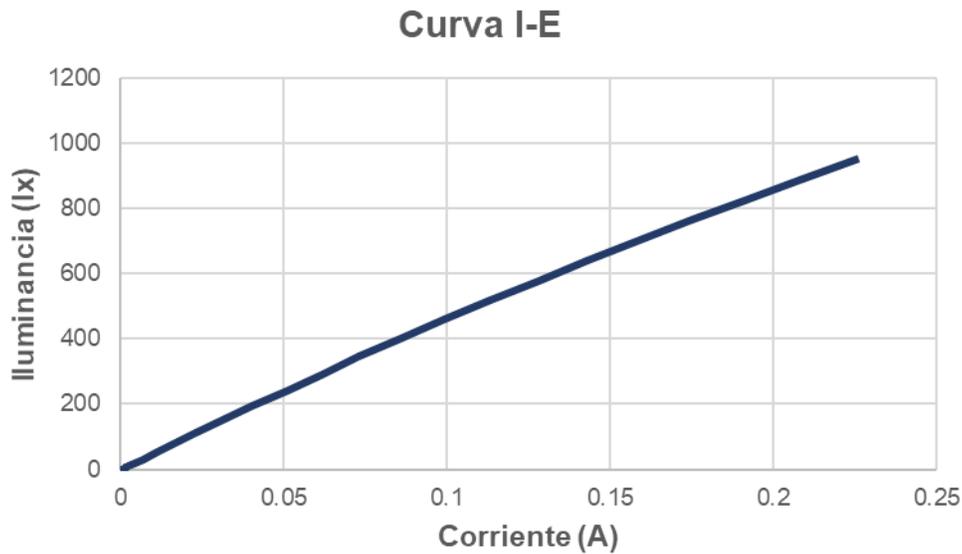


Figura 3.7. Curva corriente-iluminancia de la lámpara LED

3.3 Diseño del convertidor CD-CD

Como se mencionó anteriormente, para poder variar la intensidad luminosa de una lámpara LED es necesaria una fuente de alimentación capaz de realizar y soportar estas variaciones.

Para este trabajo, se hace la suposición de que se tiene un bus de CD en donde ya se cumplen las normativas necesarias para el diseño de las fuentes de alimentación de las lámparas LED. Debido a esto, se realiza el diseño contemplando solamente la etapa de conversión de CD-CD y la lámpara LED, descartando el diseño de un rectificador y de la etapa de CFP del diagrama a bloques de una fuente de alimentación para lámparas LED mostrado en capítulos anteriores.

El convertidor Buck es una de las topologías de conversión CD-CD más utilizadas en iluminación LED, principalmente 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 [37].

Debido a lo anterior, se elige el convertidor Buck como fuente de alimentación de la lámpara. La topología de este convertidor con la carga LED se muestra en la Figura 3.8.

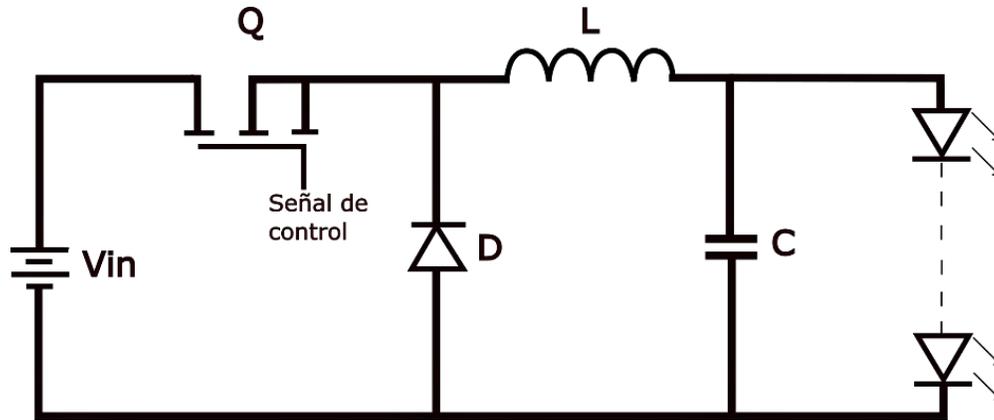


Figura 3.8. Topología del convertidor Buck con carga LED

Para su diseño, se definen las especificaciones mostradas en la Tabla 3.1, propuestas a partir de la caracterización de la lámpara.

Tabla 3.1. 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	Δi_L	0.3% $I_{omáx}$
Rizo de tensión en el capacitor	Δv_c	0.1% $V_{omín}$

Es importante mencionar que la potencia máxima se propone 20% mayor a la consumida por la lámpara para evitar el estrés en el convertidor. Además, el rizo de tensión se selecciona de manera que sea menor a las variaciones realizadas en la caracterización.

No obstante, los LEDs se caracterizan por ser dispositivos sensibles a las variaciones de corriente, provocando variaciones en la iluminación [72]. Por esta razón, se propone un rizo de corriente muy pequeño, con la finalidad de mantener un nivel de iluminancia lo más fino posible.

Por su parte, con la finalidad de aminorar el *flicker*, se elige una frecuencia de conmutación relativamente alta, dado que a frecuencias mayores a 4 KHz los efectos de este fenómeno se vuelven prácticamente insignificantes [72].

A partir del análisis del convertidor y las ecuaciones mostradas en el Anexo B con base en [74] y [75], se realizan los cálculos de diseño necesarios, obteniéndose el valor de los distintos componentes mostrados en la Tabla 3.2, así como los distintos parámetros en los que deberá operar el convertidor.

Tabla 3.2. Componentes y parámetros del convertidor

Parámetro	Símbolo	Valor
Ciclo de trabajo mínimo	D_{\min}	0.375
Ciclo de trabajo máximo	D_{\max}	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_{KA}	24 V

3.4 Diseño de la estrategia de control

Debido a las características del caso de estudio, es necesario incorporar un esquema de control que permita regular la intensidad luminosa de la lámpara LED, con la finalidad de que se tengan los cambios necesarios en la iluminancia en el área de estudio y minimizar el error para prevenir padecimientos oculares como la miopía.

El LED es un dispositivo en el que su intensidad luminosa depende de la corriente que circula a través de él [37]. Esta relación tiende a ser aproximadamente lineal [76], como se observó en la curva I-E de la Figura 3.7. Por esta razón, realizar un control de corriente para variar la intensidad luminosa de una lámpara LED presenta un mejor desempeño en comparación con un control de tensión [77]. Realizar este control de corriente es posible al regular el ciclo de trabajo del convertidor, existiendo en la actualidad distintas metodologías de diseño de control de convertidores.

En este trabajo, el diseño de los esquemas de control se realiza a partir de la función de transferencia control-salida del convertidor Buck, con la corriente del inductor como la variable controlada. Esto es posible dado que la corriente promedio del inductor es igual a la corriente promedio en la carga de este convertidor [74], permitiendo así regular la corriente que circula a través del LED.

El análisis para la obtención de dicha función se muestra en el Anexo C con base en [78], dando como resultado la función de transferencia mostrada en la ecuación (3.2). Es importante mencionar que este análisis considera una carga resistiva y no una carga LED. No obstante, para que este análisis sea válido, en este trabajo se consideran distintos puntos de operación, en donde con base en la caracterización de la lámpara se consideran valores equivalentes de R en cada uno de los puntos de operación, permitiendo simplificar el diseño del esquema de control.

$$\frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} = \frac{\frac{V_{in}}{L} \left(s + \frac{1}{RC} \right)}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (3.2)$$

Otro aspecto importante a considerar es el tipo de señal de referencia. De acuerdo con el caso de estudio seleccionado y con la curva mostrada en la Figura 3.9, se tienen puntos en donde la entrada de referencia es del tipo escalón, y secciones en donde se tiene una parábola, por lo que, de acuerdo con la teoría, se

debe presentar un error en el seguimiento, el cual, deberá ser reducido al emplear el control por ganancias programadas debido a su característica de adaptabilidad.

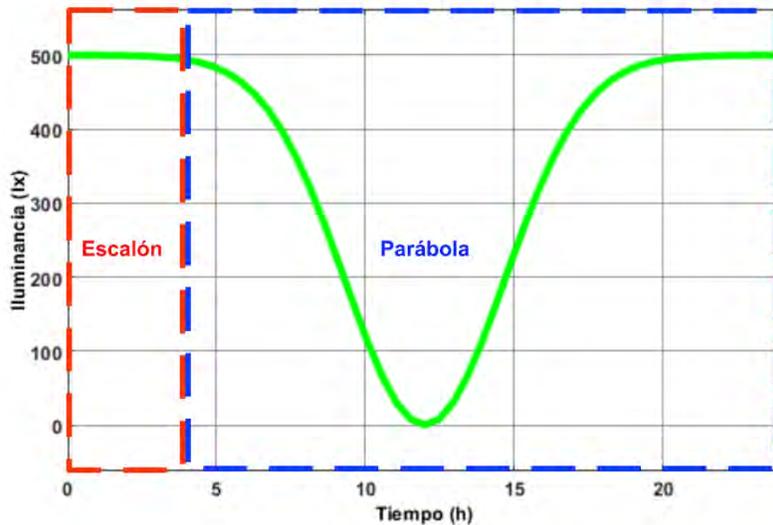


Figura 3.9. Señal de referencia seccionada

3.4.1 Sintonización de un control PI

El control PI es una combinación de un control proporcional (P) y un control integral (I). Este esquema de control proporciona un tiempo de respuesta más rápido que un control únicamente integral debido a la acción proporcional. El control PI correlaciona la salida del controlador con el error y la integral del error, y se trata en esencia de un filtro paso bajas [79]. Esto se representa matemáticamente con la ecuación (3.3), y de manera gráfica como se muestra en la Figura 3.10.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3.3)$$

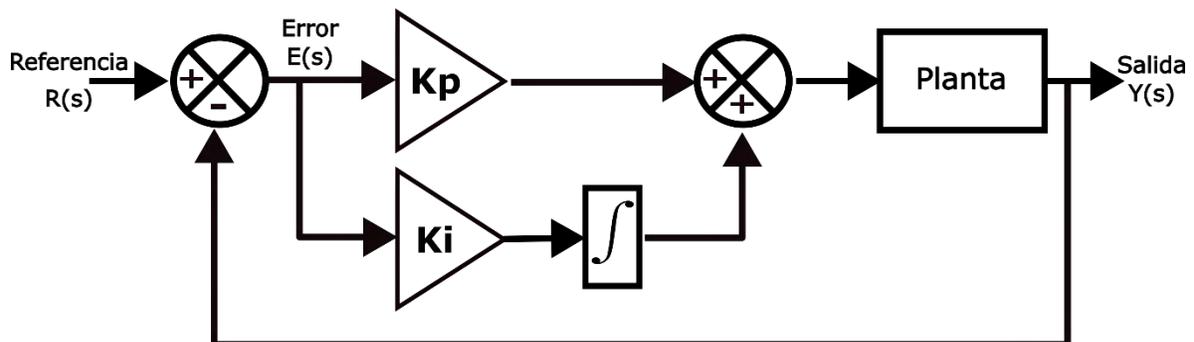


Figura 3.10. Diagrama a bloques de un control PI

Los efectos inmediatos de un control tipo PI son que se añade un cero en $s = -\frac{K_i}{K_p}$ y un polo en $s = 0$. Esto significa que el orden del sistema se incrementa en uno. Por lo tanto, el error en estado estable del sistema original se mejora en un orden; es decir, si el error en estado estable a una entrada dada es constante, el control PI lo reduce a cero (considerando que el sistema compensado permanece estable). Sin embargo, si la planta es de segundo orden y ahora se vuelve de tercer orden con el control PI, es posible que ahora sea menos estable que el sistema de segundo orden original o hasta inestable si los parámetros K_p y K_i no se han escogido adecuadamente [79]. Es por ello que el reto es elegir una combinación adecuada de las ganancias, con la finalidad de que la respuesta del sistema sea satisfactoria.

Este esquema de control es de los más utilizados en iluminación LED, principalmente cuando el propósito del control es únicamente reducir el error en estado estacionario [37], como los trabajos presentados en [7], [29], [59], [60], [80].

Para su sintonización, primeramente, es necesario reconocer el rango de operación útil de la lámpara para el caso de estudio, es decir, el rango de corriente que produce de 1 lx a 500 lx. Con ayuda de la caracterización se distingue que el rango de operación útil es de aproximadamente 0.7mA – 109mA.

Posteriormente, se toma un punto de operación intermedio del rango de operación útil de la lámpara, esto es $i = 55mA$, lo que equivale a $R \approx 196\Omega$ de acuerdo a los datos obtenidos en la caracterización de la lámpara.

Con este valor de R, y con los valores de la tensión de entrada del convertidor, L y C, se obtiene la función de transferencia mostrada en la ecuación (3.4).

$$\frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} = \frac{233.35(s + 27988.59)}{s^2 + 27988.59s + 53337524.95} \quad (3.4)$$

Con esta función de transferencia se realiza la sintonización de un control PI para todo el rango de operación útil del LED, con la herramienta PID Tuner de

Simulink. Esta herramienta permite ajustar interactivamente las ganancias de un controlador clásico (P, PI, PD o PID) para una planta SISO (*Single Input, Single Output*), buscando un equilibrio entre el rendimiento y la robustez [81].

En este caso, se sintoniza el esquema de control buscando un tiempo de asentamiento de aproximadamente 300 ms, y aproximando la respuesta a un sistema sobreamortiguado, con la finalidad de evitar los sobretiros. En este caso, bajo estos requerimientos, se obtiene una ganancia proporcional $K_p = 0.656$ y una ganancia integral $K_i = 134.20$, lográndose la respuesta ante un escalón mostrada en la Figura 3.11.

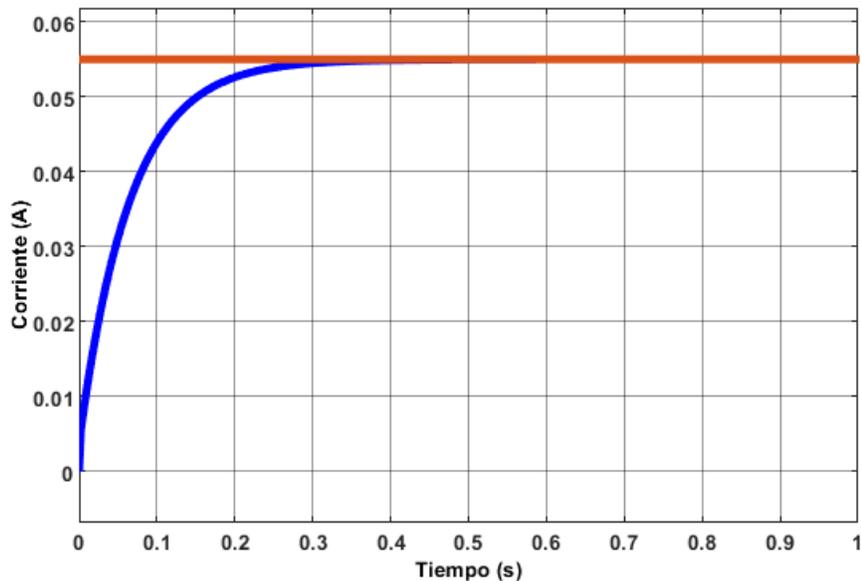


Figura 3.11. Respuesta al escalón del control PI con corriente de carga de 55mA

Por su parte, en la Figura 3.12 y Figura 3.13 se muestra la respuesta del control PI sintonizado en los puntos de operación de los extremos del rango de corriente útil, es decir, en 0.7 mA y 109 mA. En el punto de 0.7 mA, el esquema de control con las mismas ganancias sintonizadas hace que la respuesta sea más lenta que la deseada, teniéndose un tiempo de asentamiento de aproximadamente 1.4 s, mientras que en el punto de operación de 109 mA se tiene una respuesta más rápida que la deseada, presentándose un tiempo de asentamiento de 250 ms aproximadamente.

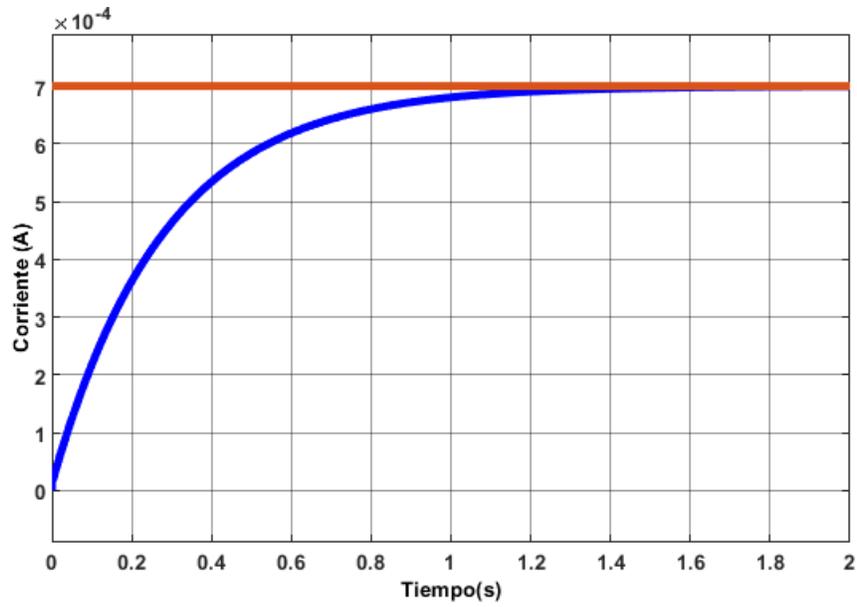


Figura 3.12. Respuesta al escalón del control PI con corriente de carga de 0.7mA

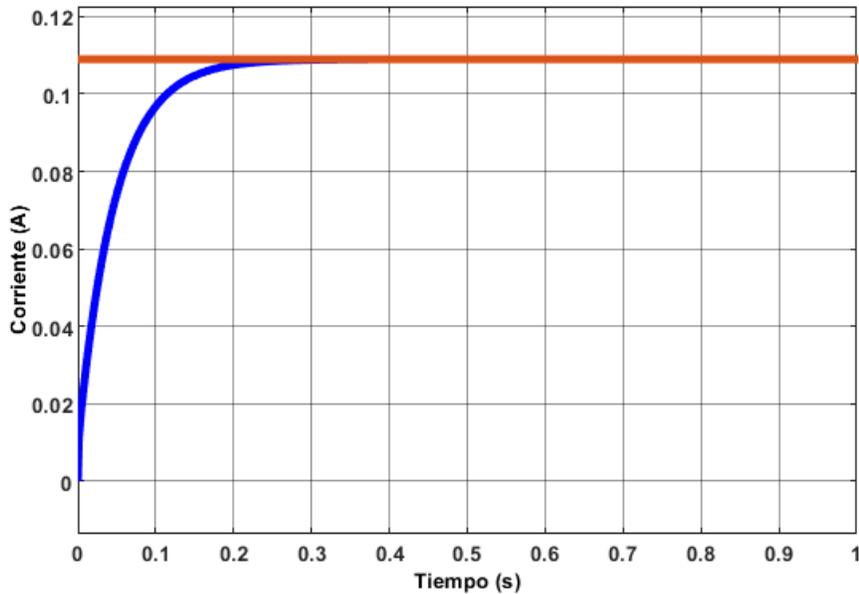


Figura 3.13. Respuesta al escalón del control PI con corriente de carga de 109mA

3.4.2 Sintonización de un control de ganancias programadas

Como se ha mencionado anteriormente, el control por ganancias programadas es una técnica de control adaptativo aplicada en sistemas no lineales, que consiste en ajustar de manera previa un controlador para diversos puntos de

operación, y posteriormente, actualizar los parámetros de éste a partir de dichos diseños y según el punto de trabajo en el que se encuentre el proceso [10], [11].

Existen diferentes esquemas de ganancias programadas en la literatura. Uno de ellos equivale a tener varios controladores funcionando en paralelo donde sólo se escoge la salida de uno ellos en función de las condiciones de operación, como el mostrado en la Figura 3.14, en donde se tienen 3 esquemas PID funcionando a la vez y se selecciona el más adecuado en función del valor de la referencia [10].

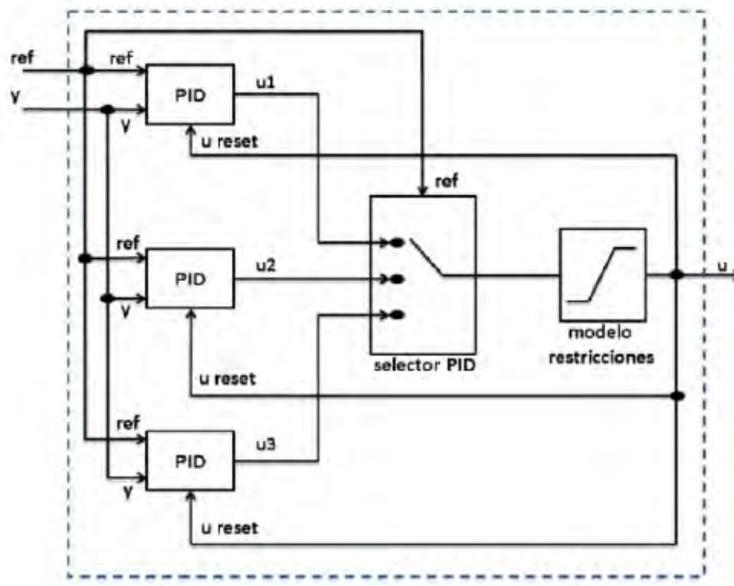


Figura 3.14. Esquema básico de ganancias programadas [10]

Otra metodología muy utilizada 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*) [37].

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 [37]. El diagrama a bloques del control FGS se muestra en la Figura 3.15.

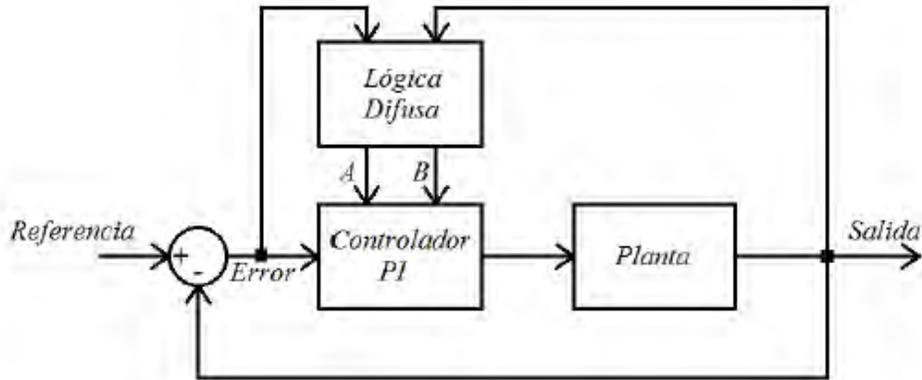


Figura 3.15. Esquema de ganancias programadas con selector difuso [37]

El esquema de ganancias programadas a implementar en este trabajo tiene como base estos esquemas presentados, y se basa en condicionales para la elaboración del selector de ganancias. Se mide la señal de referencia para conocer el punto de operación en el que se encuentra el proceso, y con ello se ajustan las ganancias de un controlador tipo PI. El diagrama a bloques del esquema de ganancias programadas a implementar se muestra en la Figura 3.16.

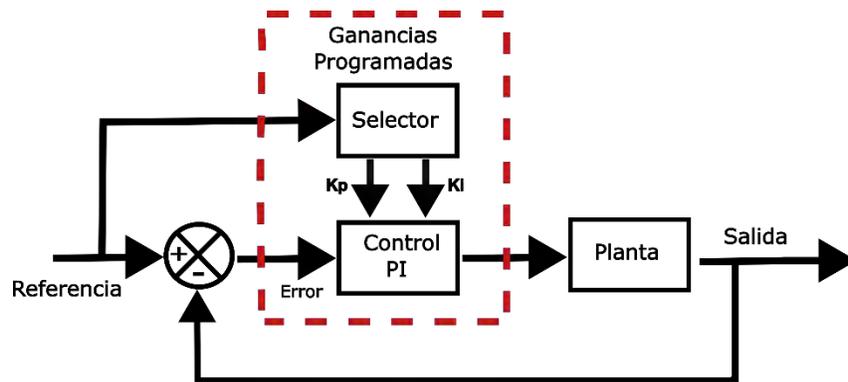


Figura 3.16. Diagrama a bloques del esquema de ganancias programadas a implementar

Para la sintonización de este esquema de control, primeramente, se divide la curva I-E del rango útil en secciones de operación aproximadamente lineales. En este caso se secciona esta curva en 4 rangos como se muestra en la Figura 3.17, obteniéndose una R equivalente en cada uno de ellos y, en consecuencia, una función de transferencia distinta.

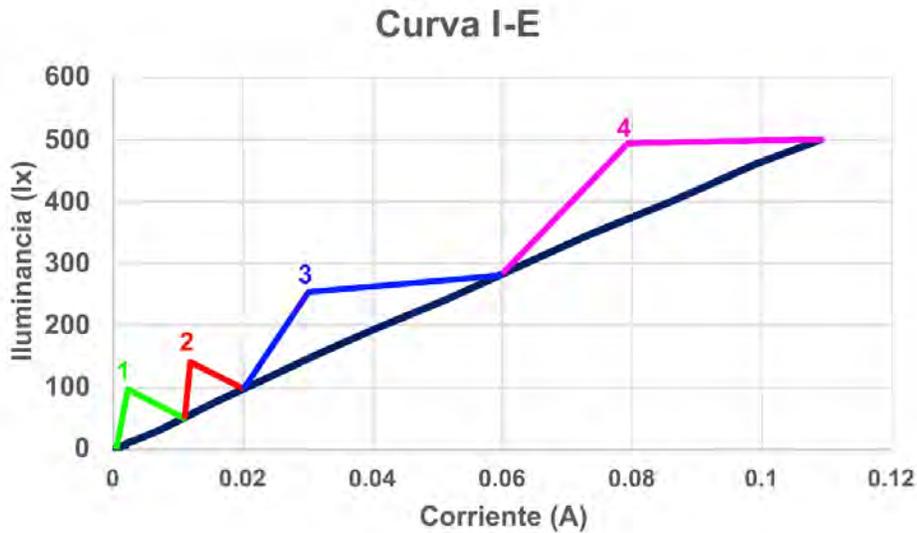


Figura 3.17. Curva I-E seccionada en rangos de operación

Es importante mencionar que el hecho de que se tengan distintas funciones de transferencia para cada rango de operación, tiene como consecuencia que se consigan dinámicas diferentes en cada uno de ellos. Las funciones de transferencia para cada rango de operación se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Funciones de transferencia de los rangos de operación

Rango	R equivalente (Ω)	Función de transferencia
0.7mA – 12mA	890	$\frac{233.35(s + 6163.78)}{s^2 + 6163.78s + 53337524.95}$
12mA – 20mA	750	$\frac{233.35(s + 7314.35)}{s^2 + 7314.35s + 53337524.95}$
20mA – 60mA	350	$\frac{233.35(s + 15673.61)}{s^2 + 15673.61s + 53337524.95}$
60mA – 109mA	140	$\frac{233.35(s + 39184.03)}{s^2 + 39184.03s + 53337524.95}$

De igual manera, se realiza la sintonización de las ganancias de un control del tipo PI para cada rango de operación con la herramienta PID Tuner, buscando obtener una respuesta aproximada a un sistema sobreamortiguado y un tiempo de

asentamiento de aproximadamente 300 ms, obteniéndose las ganancias mostradas en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Ganancias en los distintos rangos de operación del control de ganancias programadas

Rango	Ganancia Proporcional	Ganancia Integral
0.7mA – 12mA	5.43	622.28
12mA – 20mA	9.21	561.42
20mA – 60mA	2.51	222.78
60mA – 109mA	0.46	92.62

En la Figura 3.18, Figura 3.19, Figura 3.20 y Figura 3.21 se muestran las respuestas obtenidas en la sintonización del control de ganancias programadas en un punto de los diferentes rangos de operación. Es importante mencionar que estas respuestas se obtienen ante una entrada escalón.

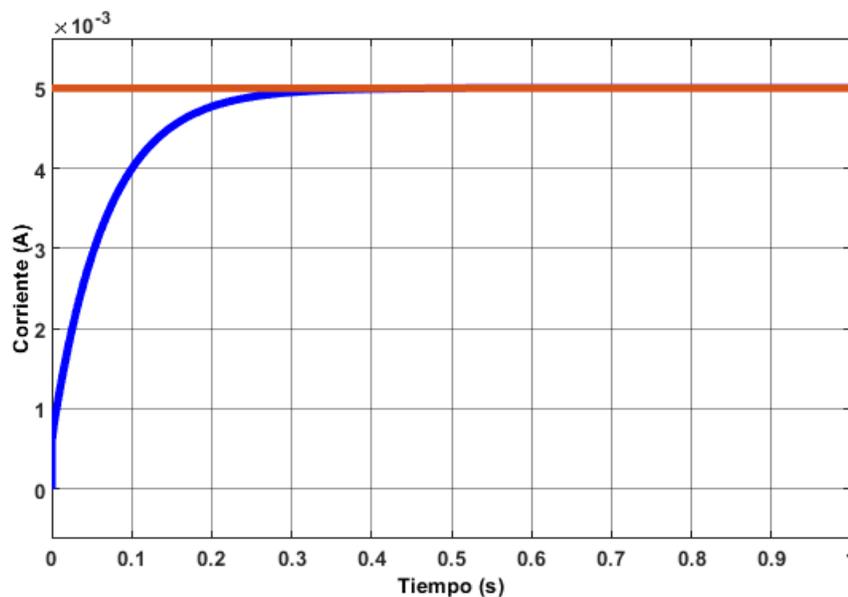


Figura 3.18. Respuesta al escalón del control de ganancias programadas con corriente de carga de 5mA

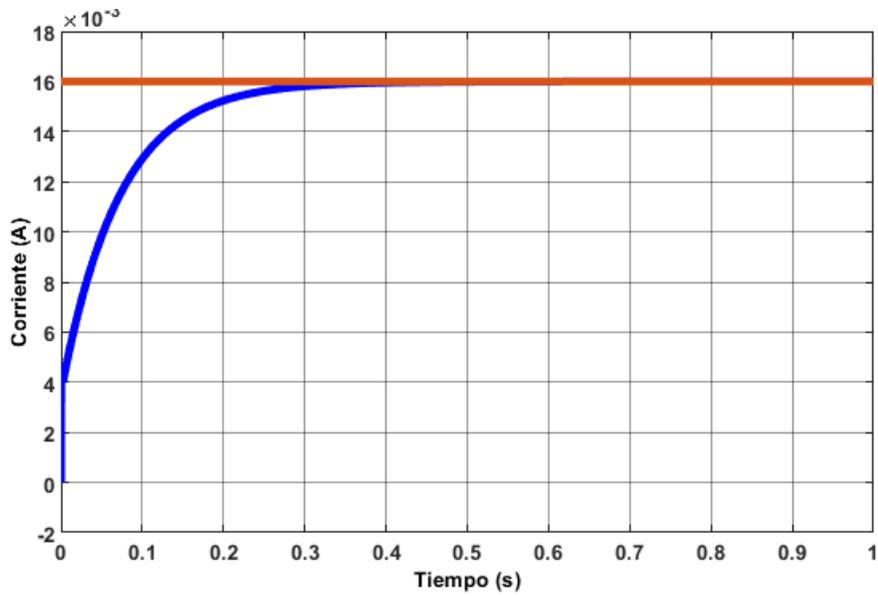


Figura 3.19. Respuesta al escalón del control de ganancias programadas con corriente de carga de 16mA

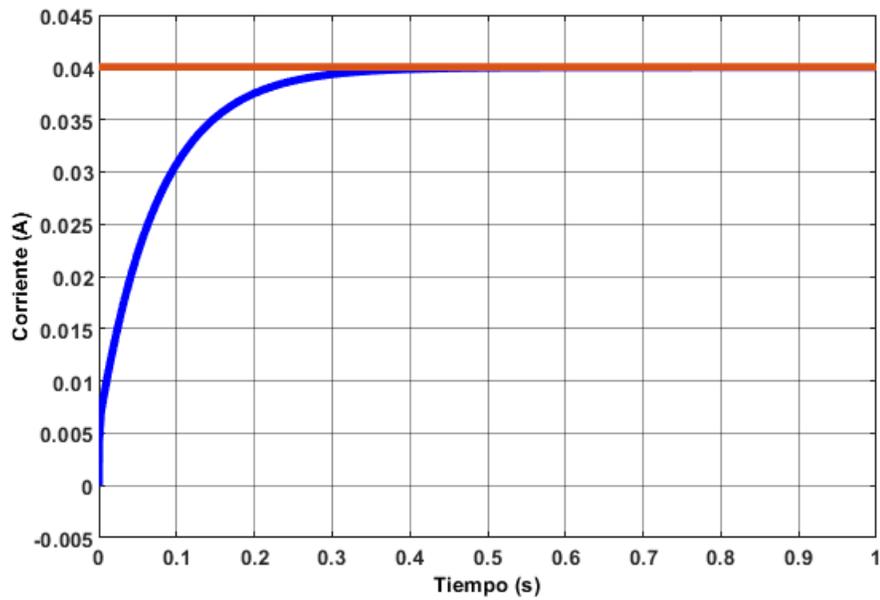


Figura 3.20. Respuesta al escalón del control de ganancias programadas con corriente de carga de 40mA

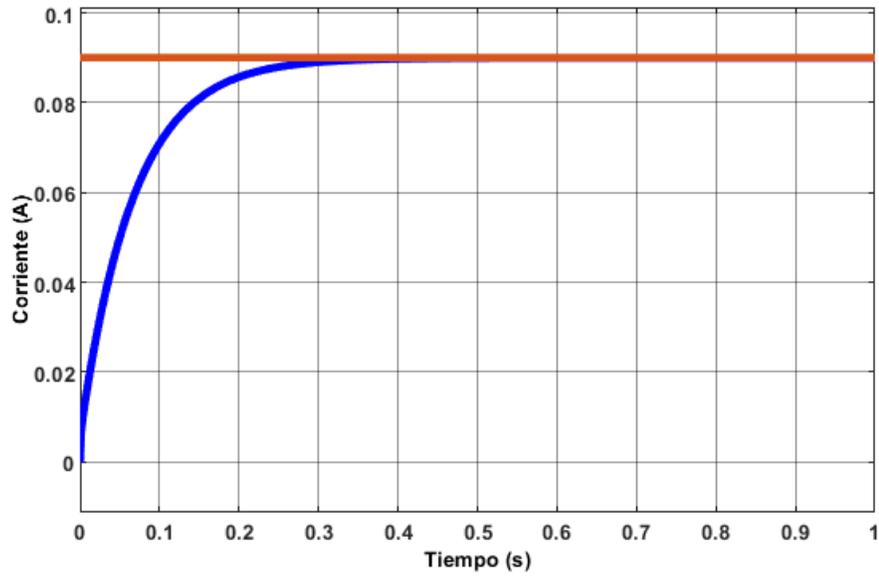


Figura 3.21. Respuesta al escalón del control de ganancias programadas con corriente de carga de 90mA

Capítulo 4. Simulaciones y resultados

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos al simular el controlador LED diseñado, con la finalidad de validar el correcto funcionamiento tanto del convertidor CD-CD como del esquema de control. También, se realiza la comparativa de un esquema de control clásico con el control por ganancias programadas para evaluar su desempeño y demostrar la funcionalidad del esquema seleccionado.

4.1 Simulación en lazo abierto

Para una correcta simulación del sistema, es necesario emular la carga LED del convertidor, en este caso la lámpara de protección ocular. Para ello, se considera el modelo SVRM (*Source Voltage and Resistor Model*) utilizado en [41], [82]. Este modelo se muestra en la Figura 4.1, en donde V_{th} corresponde a la tensión de ruptura de la lámpara y R_D denota la resistencia dinámica, calculada a partir de la pendiente de la curva V-I de la lámpara LED.

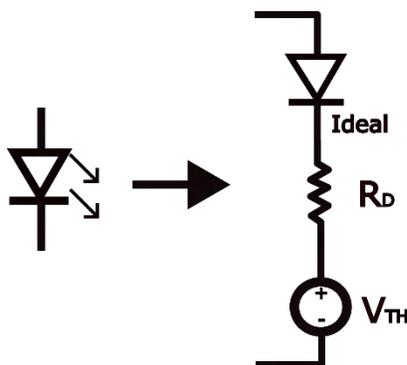


Figura 4.1. Modelo SVRM para simular la carga LED

Al utilizar este modelo es posible simular de forma aproximada la dinámica del LED, dado que ya no se considera a este dispositivo como una carga puramente resistiva, permitiendo obtener resultados más cercanos a la realidad.

Con base en lo anterior, se realiza la sustitución de la carga en el convertidor para las pruebas en lazo abierto, como se muestra en la Figura 4.2. Esta simulación se realiza con la finalidad de verificar que se cumplan las especificaciones de diseño propuestas. En este caso, se realiza la simulación con $R_D = 14.752\Omega$ y $V_{TH} = 9.45V$

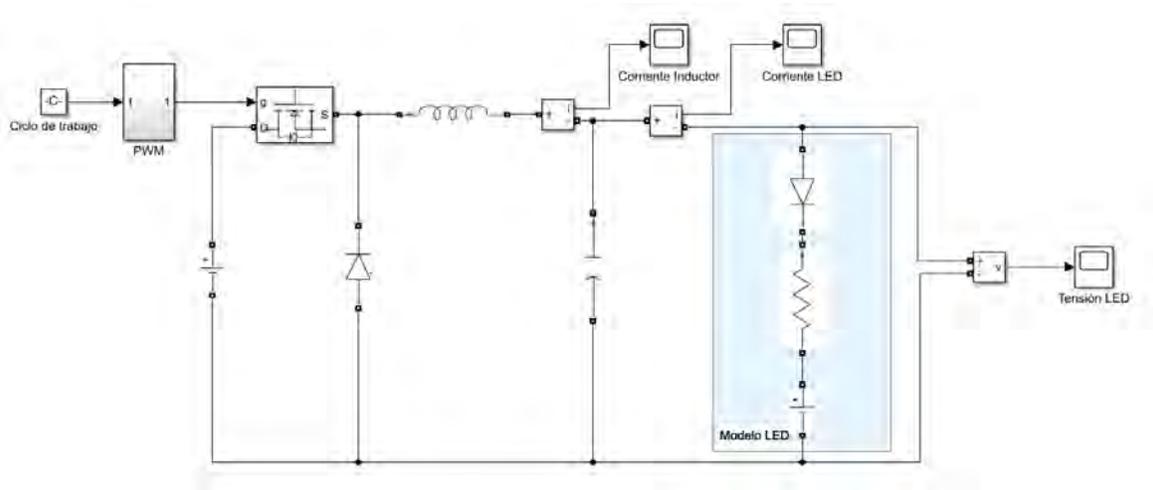


Figura 4.2. Simulación del convertidor en lazo abierto

Uno de los aspectos importantes a verificar son los rizados de tensión y corriente, esto debido a que se desea mantenerlos dentro del límite establecido. En la Figura 4.3 y Figura 4.4 se muestra el rizo de tensión cuando el convertidor opera en la potencia mínima y máxima del rango útil para el caso de estudio, es decir, un ciclo de trabajo mínimo de 40% y un máximo de 47% aproximadamente. Con esto se comprueba que el rizo de tensión no excede los 7mV, encontrándose dentro del límite establecido en las especificaciones de diseño (9mV).

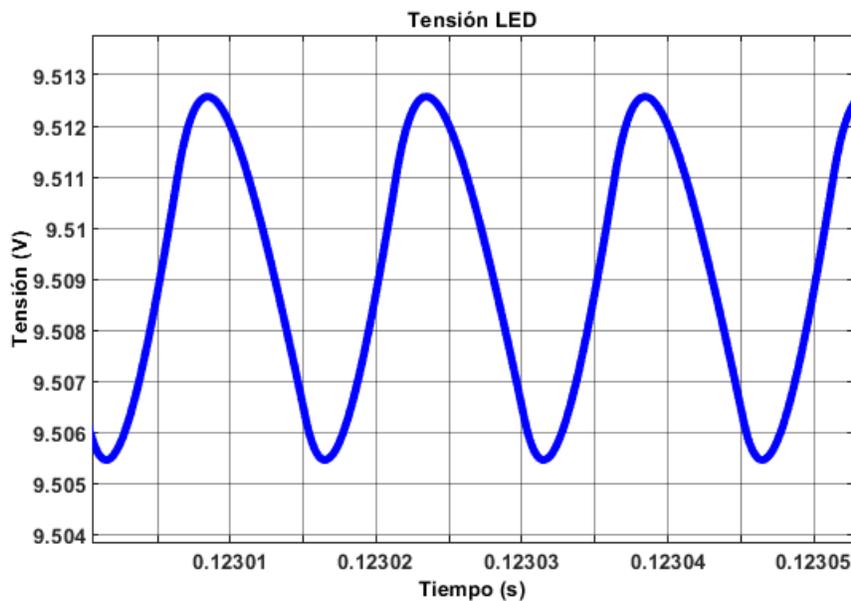


Figura 4.3. Rizo de tensión en el LED cuando la potencia de salida es 6.5 mW (ciclo de trabajo mínimo)

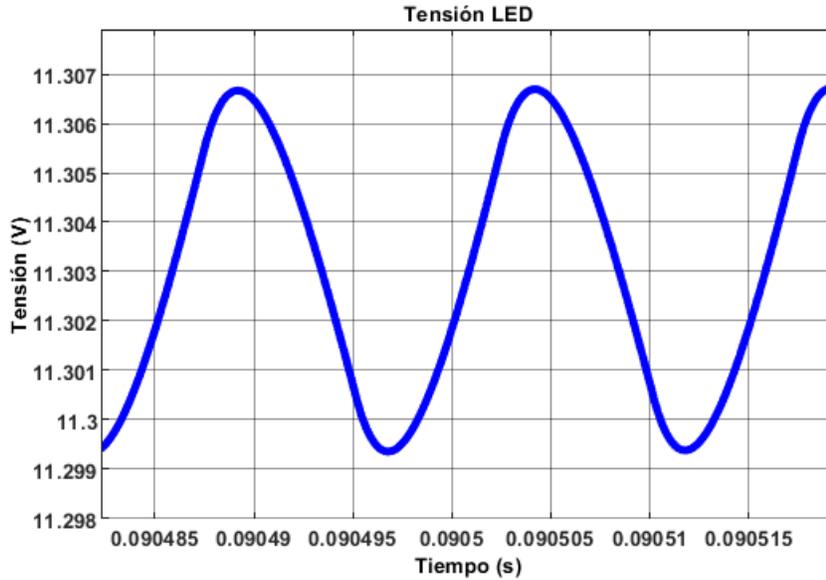


Figura 4.4. Rizo de tensión en el LED cuando la potencia de salida es 1.25 W (ciclo de trabajo máximo)

Por su parte, en la Figura 4.5 y Figura 4.6 se muestran los rizos de corriente en el inductor cuando el convertidor opera en los ciclos de trabajo mínimo y máximo. De igual manera, se tiene que el rizo se encuentra en 0.9 mA aproximadamente, cumpliendo con encontrarse por debajo de los 1.2 mA propuestos en las especificaciones de diseño.

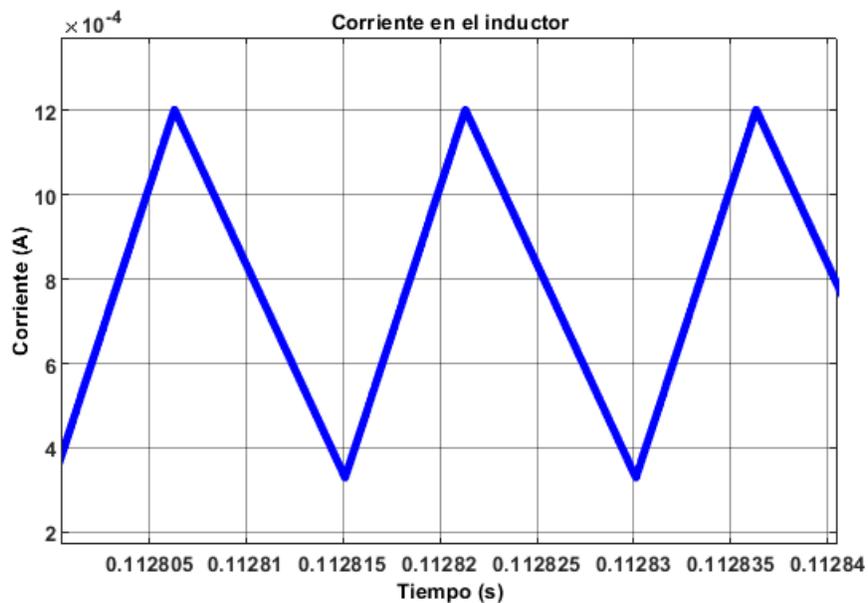


Figura 4.5. Rizo de corriente en el inductor cuando la corriente promedio es 0.76 mA (ciclo de trabajo mínimo)

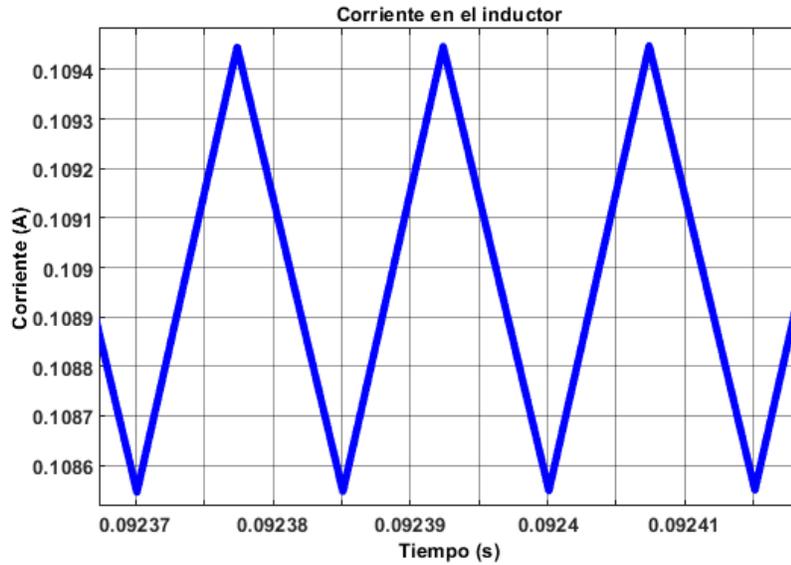


Figura 4.6. Rizo de corriente en el inductor cuando la corriente promedio es 109 mA (ciclo de trabajo máximo)

De acuerdo con la teoría, la corriente en el inductor tiene efectos directamente en la corriente del LED. Por tal motivo, en la Figura 4.7 se muestra la corriente del LED cuando el convertidor opera en el ciclo de trabajo mínimo, en el cual la corriente promedio en el LED es de aproximadamente 0.76 mA, mientras que en la Figura 4.8 se muestra la misma medición, pero con el convertidor operando con el ciclo de trabajo máximo, en el cual la corriente promedio en el LED es de 109 mA.

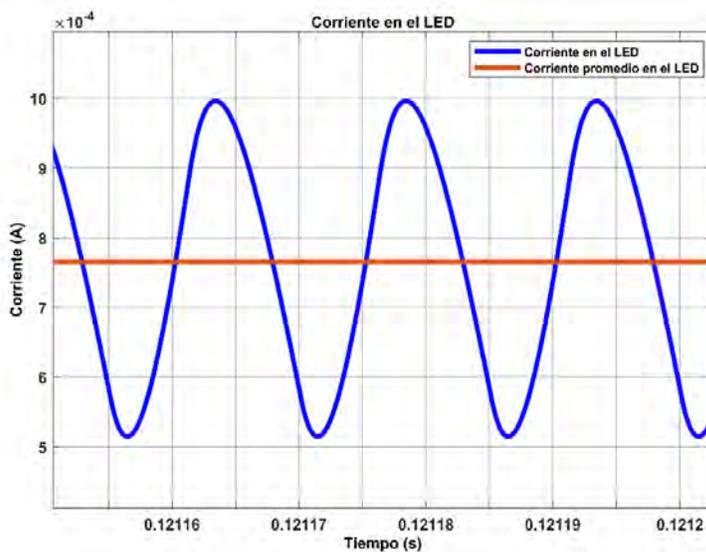


Figura 4.7. Corriente en el LED cuando la corriente promedio es 0.76 mA (ciclo de trabajo mínimo)

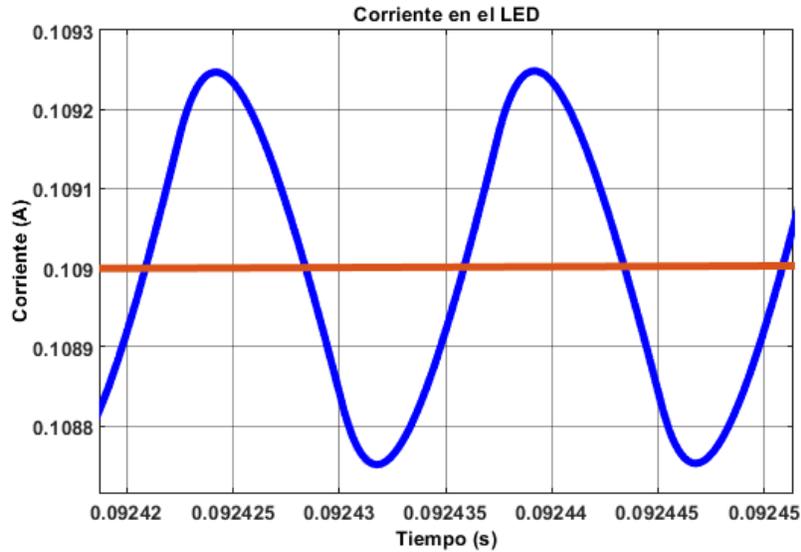


Figura 4.8. Corriente en el LED cuando la corriente promedio es 109 mA (ciclo de trabajo máximo)

Es importante mencionar que en el convertidor Buck la corriente promedio de la carga es igual a la corriente promedio del inductor. Bajo esta consideración es posible controlar la corriente en la carga. Esta prueba se muestra en la Figura 4.9, en donde se muestran las corrientes instantáneas y promedio tanto del inductor como del LED, en donde las corrientes promedio son prácticamente las mismas, con un valor de 109 mA.

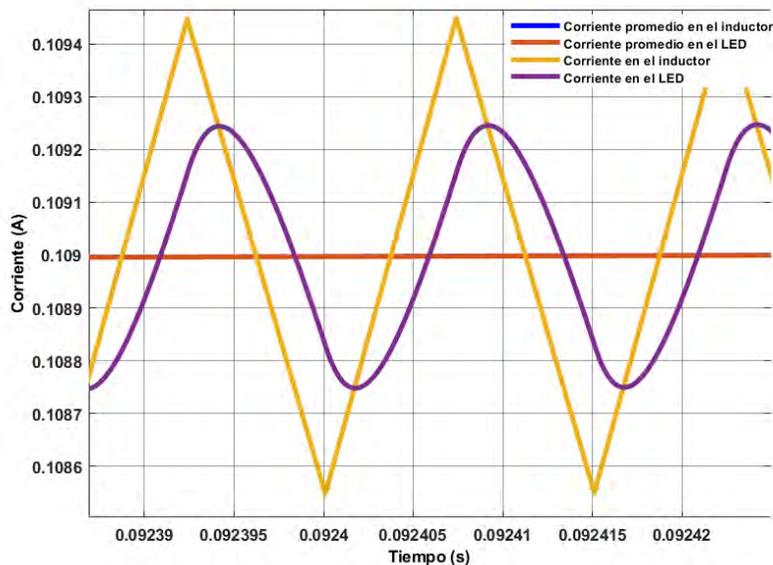


Figura 4.9. Comparación entre la corriente en el inductor y corriente en el LED

4.2 Simulación en lazo cerrado con resultados en corriente

Para realizar las pruebas en lazo cerrado se debe tener claro el tipo de señal de referencia. En este caso la señal de referencia es el complemento de una señal del tipo campana de Gauss, como se muestra en la Figura 4.10. Esta curva va desde los 109 mA aproximadamente hasta los 0.7 mA, dado que este es el rango de corriente útil para obtener los 500 lx de acuerdo con la caracterización de la lámpara.

Con esta señal de referencia, se realiza una primera simulación verificando el seguimiento de trayectoria en la corriente del LED, con un esquema de control PI y el control de ganancias programadas. Lo anterior con la finalidad de evaluar ambos esquemas y seleccionar el de mejor desempeño.

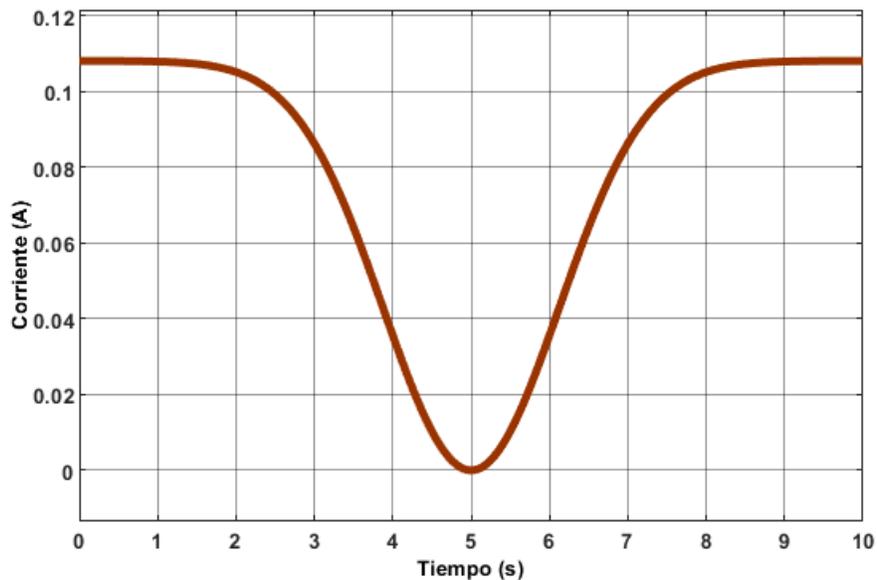
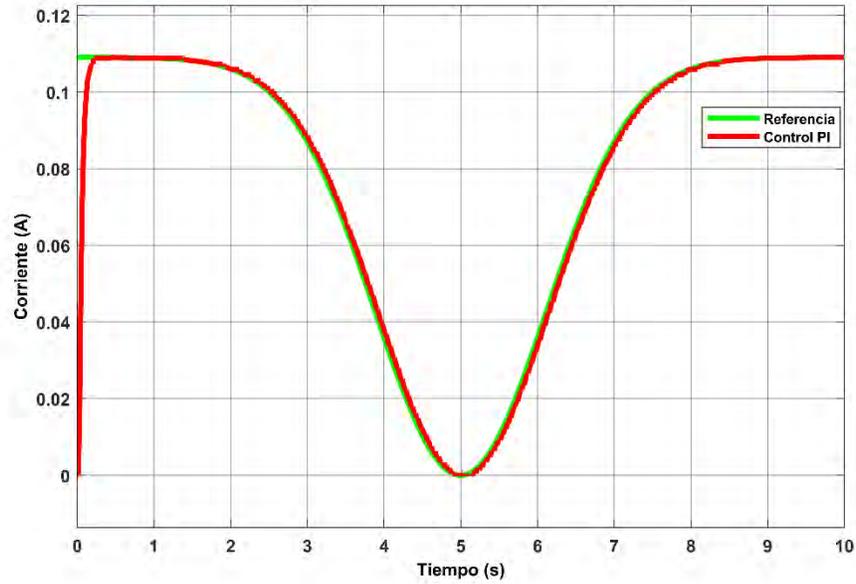
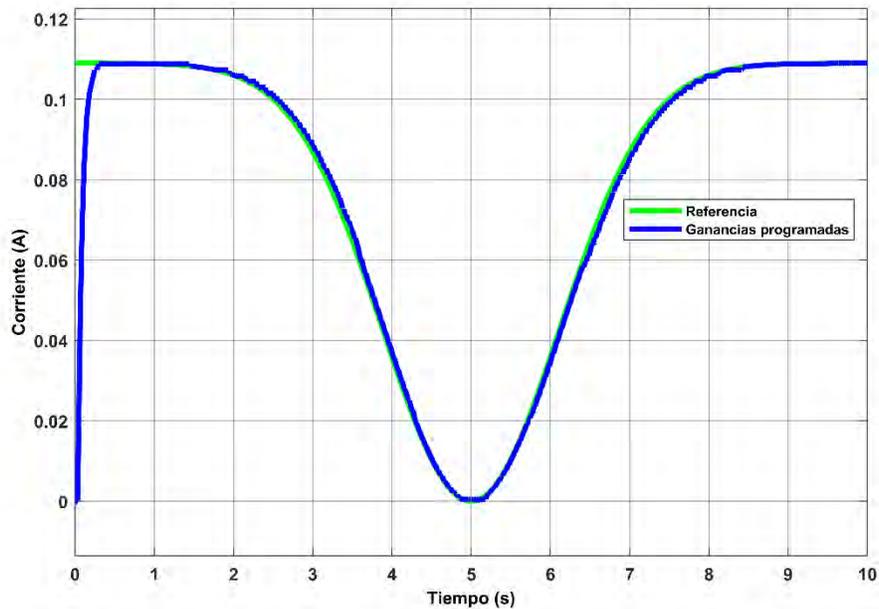


Figura 4.10. Corriente del LED necesaria para proporcionar la iluminancia recomendada de acuerdo con la iluminancia exterior propuesta

En la Figura 4.11 se muestra la comparación de las respuestas obtenidas al simular ambos esquemas de control. Se observa que ambos esquemas de control presentan una dinámica muy similar, sin embargo, al analizar con detalle se tienen puntos en donde se obtienen dinámicas distintas.



a)



b)

Figura 4.11. Respuestas de los esquemas de control ante el seguimiento de la señal de referencia en corriente. a) Control PI. b) Ganancias programadas

En las siguientes figuras se muestra la comparación de la dinámica del sistema con un control PI y con el control por ganancias programadas a detalle. En primera instancia, en la Figura 4.12 se observa que el control PI presenta una dinámica diferente a la deseada en el arranque, que es cuando ocurre el escalón.

Esto se debe a que se trata de un punto de operación diferente al punto de sintonización. En este punto las ganancias del control PI hacen que el sistema tenga una dinámica más rápida, teniendo un tiempo de asentamiento de 250 ms.

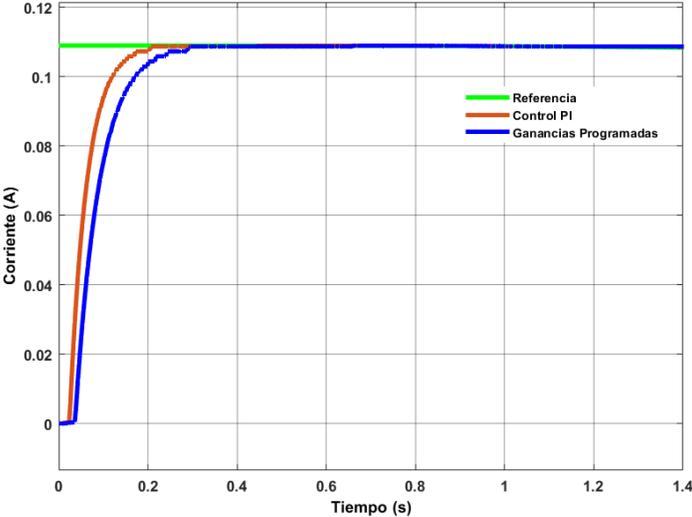


Figura 4.12. Respuestas con ambos esquemas de control en el arranque

Por otro lado, en el rango de 60mA – 109mA mostrado en la Figura 4.13, el control PI presenta una respuesta muy similar en comparación con el control de ganancias programadas, esto debido a que las ganancias en este rango son muy similares.

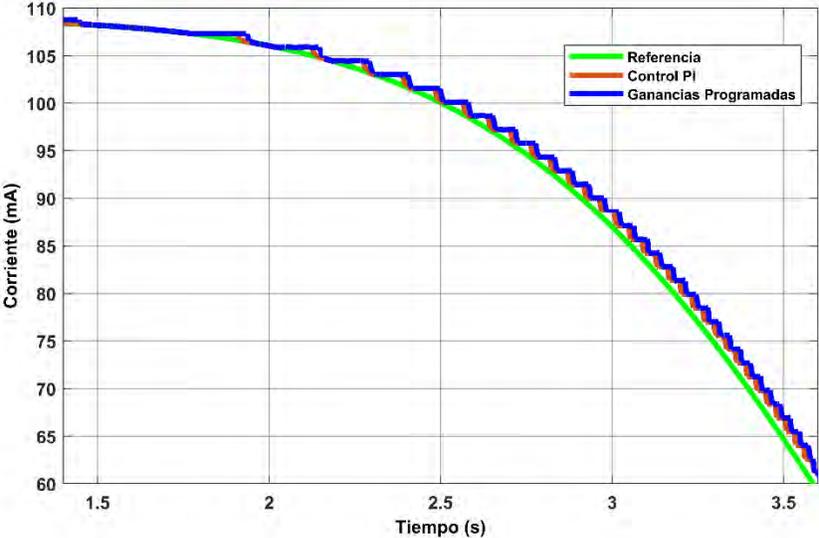


Figura 4.13. Respuestas de los esquemas de control en el rango de 60mA - 109mA

Por su parte, en la Figura 4.14 se muestra el error respecto a la referencia presente en ambos esquemas de control en el rango de 60mA – 109mA, en donde el control por ganancias programadas presenta un error máximo de 3 mA con respecto a la referencia, mientras que el error máximo con el control PI es de aproximadamente 2.3 mA

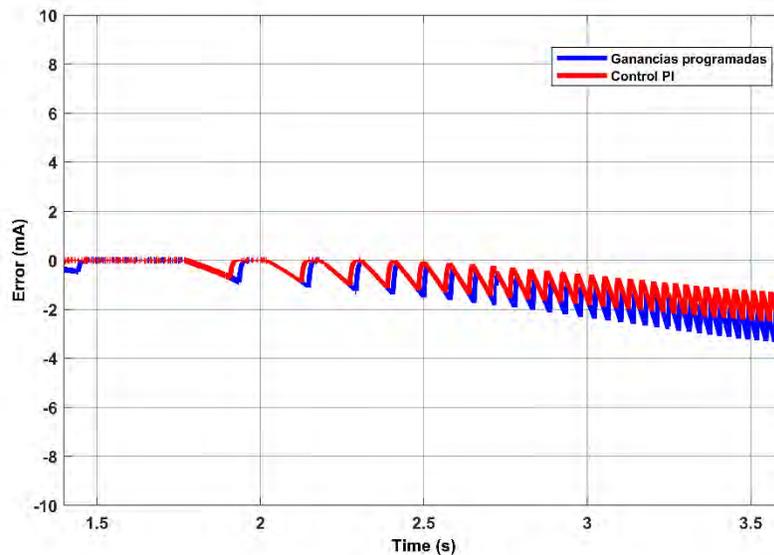


Figura 4.14. Error respecto a la referencia de los esquemas de control en el rango de 60mA - 109mA

Mientras tanto, en la Figura 4.15 se muestra la respuesta tanto del control PI como del control de ganancias programadas en el rango de 20mA – 60mA, en donde el control por ganancias programadas sigue de mejor manera la referencia. Esto se debe a que presenta un menor error como se muestra en la Figura 4.16, dado que el control PI presenta un error máximo de 2.5 mA en todo el rango de operación, mientras que el error de ganancias programadas es de 1.5 mA.

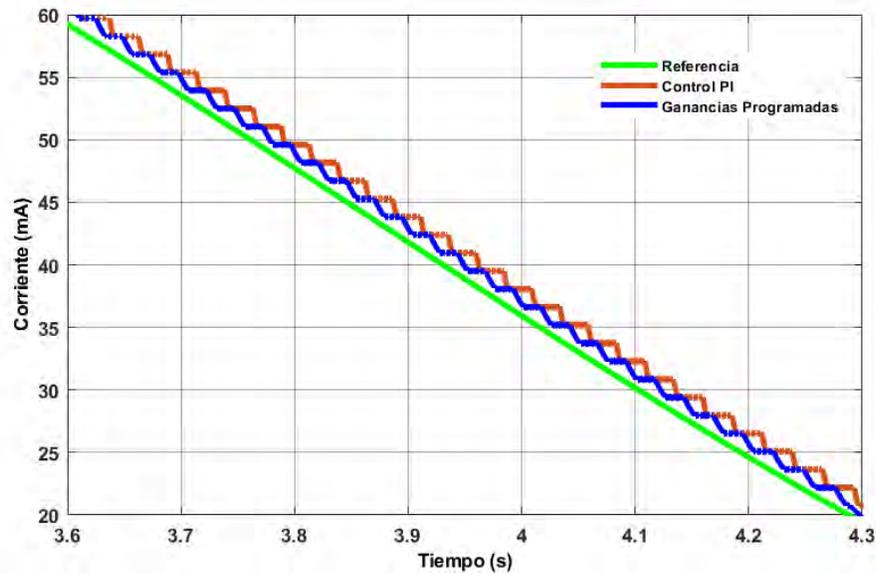


Figura 4.15. Respuestas de los esquemas de control en el rango de 20mA - 60mA

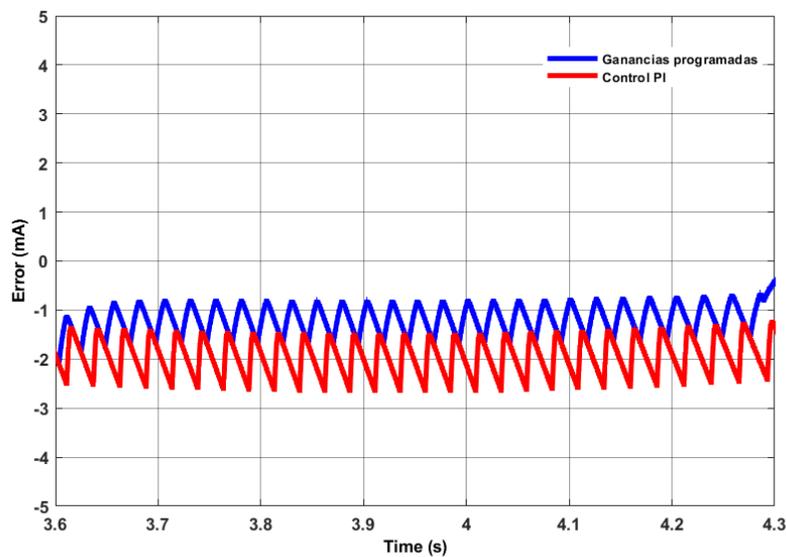


Figura 4.16. Error respecto a la referencia de los esquemas de control en el rango de 20mA - 60mA

Por otro lado, en la Figura 4.17 se muestra la respuesta de ambos esquemas de control en el rango de 12mA – 20mA, en donde, al igual que en el rango anterior, el control por ganancias programadas sigue de mejor manera la referencia, presentando un menor error con respecto a la referencia, como se muestra en la Figura 4.18. El control PI presenta un error con respecto a la referencia de

aproximadamente 2.3 mA en todo el rango de operación, mientras que el error de ganancias programadas se reduce a 0.5 mA.

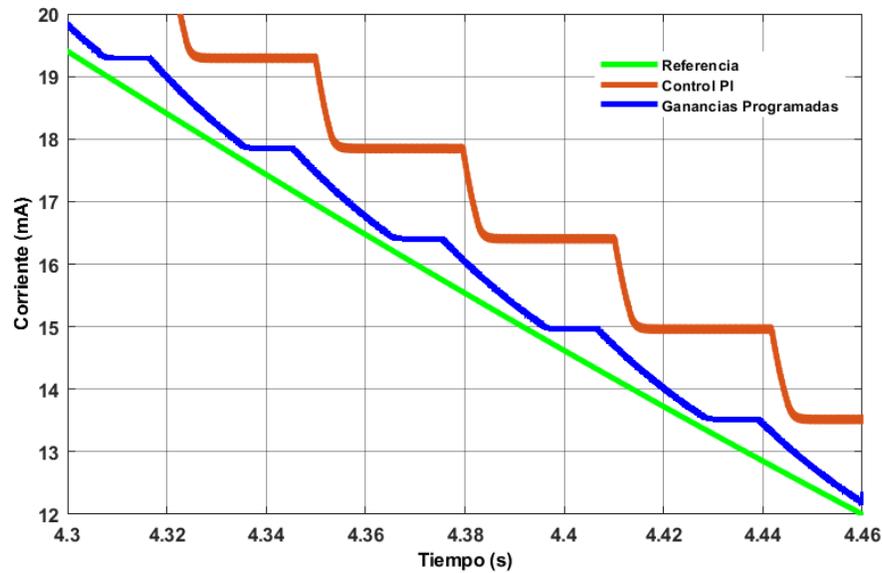


Figura 4.17. Respuestas de los esquemas de control en el rango de 12mA - 20mA

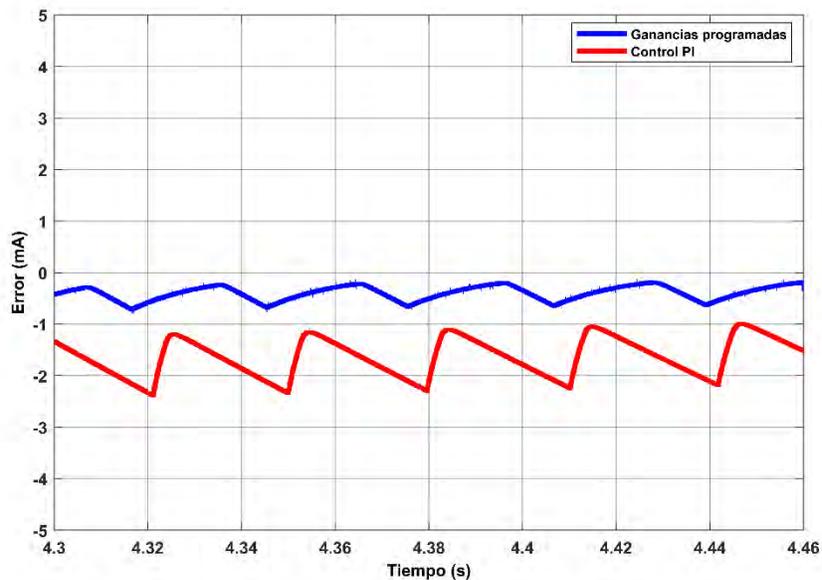


Figura 4.18. Error respecto a la referencia de los esquemas de control en el rango de 12mA - 20mA

Finalmente, en la Figura 4.19 se muestra la respuesta de ambos esquemas de control en el rango de 0.7mA – 12mA, en donde, de igual manera, el control por ganancias programadas sigue de mejor manera la referencia, presentando un

menor error con respecto a la referencia, como se muestra en la Figura 4.20. El control PI presenta un error con respecto a la referencia de 2 mA, mientras que el error de ganancias programadas se mantiene en un máximo de 0.5 mA.

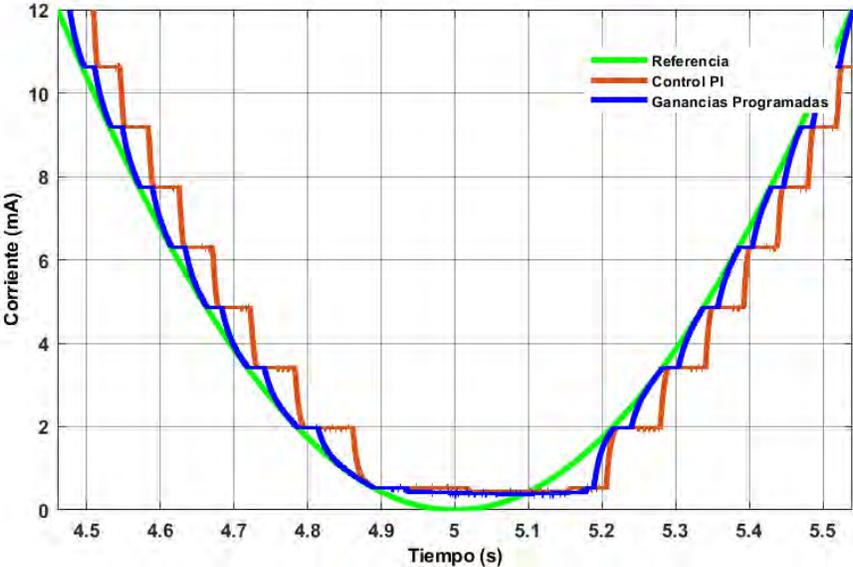


Figura 4.19. Respuestas de los esquemas de control en el rango de 0.7mA – 12mA

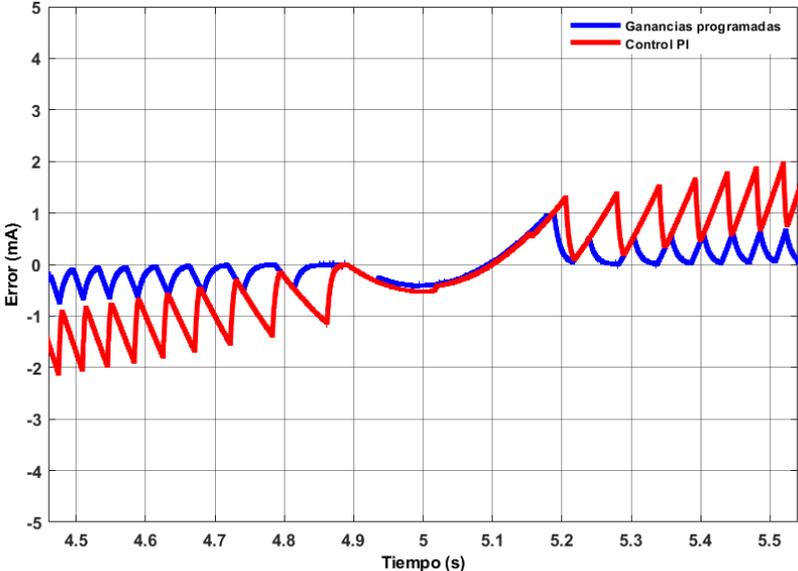


Figura 4.20. Error respecto a la referencia de los esquemas de control en el rango de 0.7mA - 12mA

Al evaluar ambas respuestas de los esquemas de control, se divide el análisis en dos casos: caso 1, cuando la iluminancia que debe proporcionar la lámpara disminuye y, caso 2, cuando la iluminancia que debe proporcionar la lámpara aumenta, obteniéndose la Tabla 4.1 y Tabla 4.2 respectivamente, en donde se concentran los porcentajes de error en distintos puntos de operación.

Tabla 4.1. Comparación de las respuestas con control PI y ganancias programadas en el caso 1

Punto de operación (mA)	Caso 1			
	Control PI		Ganancias programadas	
	Valor (mA)	Error	Valor (mA)	Error
109	108.9	0.09%	108.8	0.18%
100	100.1	0.1%	100.7	0.7%
90	91.40	1.5%	91.46	1.6%
80	81.34	1.7%	81.42	1.8%
70	71.83	2.6%	72.68	3.8%
60	62.58	4.3%	62.55	4.3%
50	52.50	5.0%	51.06	2.1%
40	42.90	7.3%	40.96	2.4%
30	33.27	10.9%	30.85	2.8%
20	22.91	14.6%	20.86	4.3%
10	12.06	20.6%	10.38	3.8%
5	6.96	39.2%	5.04	0.8%
0.7	1.01	44.3%	0.71	1.4%

Tabla 4.2. Comparación de las respuestas con control PI y ganancias programadas en el caso 2

Punto de operación (mA)	Caso 2			
	Control PI		Ganancias programadas	
	Valor (mA)	Error	Valor (mA)	Error
0.7	0.45	35.7%	0.68	2.9%
5	3.71	25.8%	4.86	2.8%
10	7.83	21.7%	9.74	2.6%
20	17.86	10.7%	19.45	2.7%
30	27.17	9.4%	29.28	2.4%
40	37.04	7.4%	38.73	3.1%
50	47.18	5.6%	48.52	2.9%
60	58.28	2.9%	58.35	2.7%
70	68.36	2.3%	67.91	3.0%
80	78.45	1.9%	78.42	2.0%
90	88.57	1.6%	88.55	1.6%
100	99.88	0.12%	98.66	1.3%
109	108.9	0.09%	108.7	0.3%

Analizando la Tabla 4.1 y la Tabla 4.2, se tiene que el control PI presenta mayores porcentajes de error a medida que se tiene un valor más pequeño de referencia. Esto se debe a que a pesar de que el error se mantiene en aproximadamente 2 mA en toda la curva, estos 2 mA de error se vuelven más significativos conforme el valor de referencia disminuye.

Lo anterior no sucede con el control de ganancias programadas debido a que el valor de las ganancias cambia conforme se cambia de punto de operación, lográndose una adaptabilidad, reduciendo el error respecto a la referencia y, en consecuencia, reduciendo el porcentaje de error final.

Para verificar lo mencionado, se realiza la evaluación ante los índices de desempeño ISE (*Integral Square Error Criterion*) e IAE (*Integral Absolute Error Criterion*) presentada en la Tabla 4.3. Se observa que ante las condiciones simuladas el control por ganancias programadas tiene un mejor desempeño dado que presenta menores porcentajes de error.

Tabla 4.3. Comparación de los índices de desempeño obtenidos

Índice de desempeño	Control PI	Ganancias Programadas
Criterio ISE $\times 10^{-3}$	0.764	0.522
Criterio IAE $\times 10^{-3}$	16.83	14.41

4.3 Simulación en lazo cerrado con resultados en iluminancia

Para obtener los resultados en términos de la iluminancia, se realiza la conversión de la corriente que circula a través del LED a iluminancia. Esta conversión se realiza a partir de la ecuación (4.1), obtenida a partir de la curva I-E mostrada en la Figura 4.21.

$$E = -3335.1i^2 + 4979.2i - 2.4541 \quad (4.1)$$

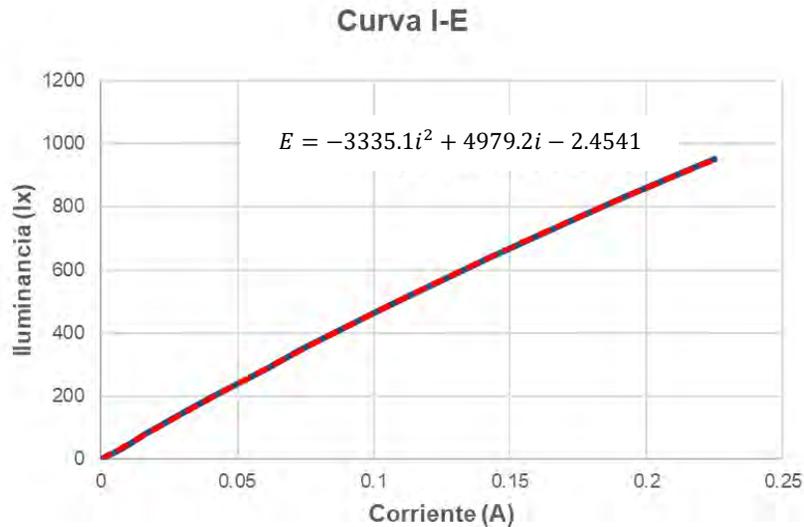


Figura 4.21. Curva I-E para la conversión de corriente a iluminancia

Para realizar esta conversión, se mide la corriente que circula a través del LED y con la cual se lleva a cabo el cálculo correspondiente en Simulink, como se muestra en la Figura 4.22.

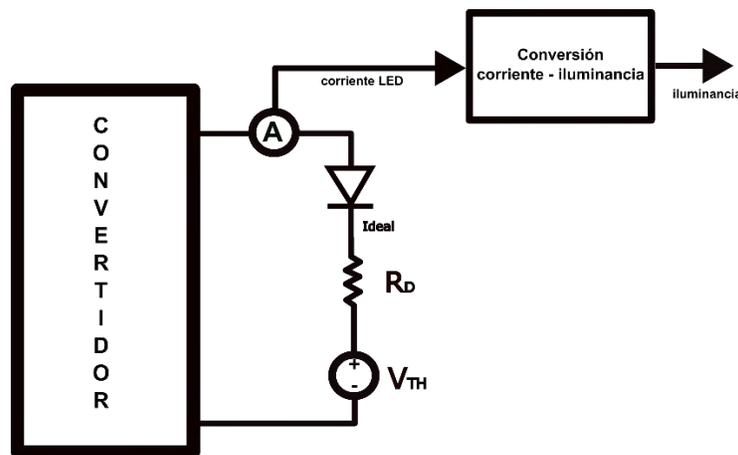


Figura 4.22. Conversión de corriente a iluminancia

Entonces, al graficar la iluminancia producida por el LED, se obtienen las respuestas mostradas en la Figura 4.23, en donde se muestra tanto la respuesta obtenida con el control PI como la obtenida con el control de ganancias programadas. Es importante destacar que existe una similitud entre las respuestas de iluminancia con las de corriente, debido a que la iluminación producida por el LED es casi lineal a la corriente que circula a través de él.

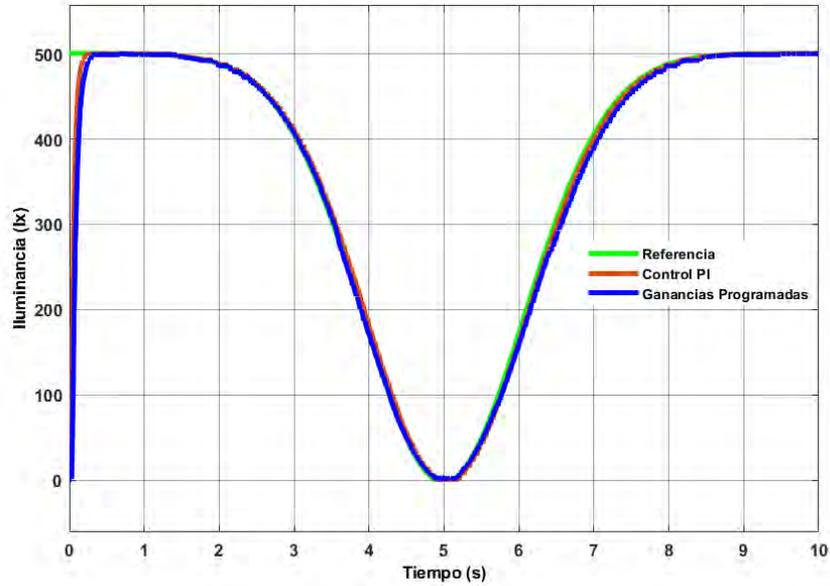


Figura 4.23. Respuestas de los esquemas de control en términos de iluminancia

De esta manera, al simular primeramente la iluminancia solar y sumar la iluminancia generada por la lámpara de protección ocular con el control PI y con el control de ganancias programadas, se obtiene la iluminancia mostrada en la Figura 4.24 y Figura 4.25 respectivamente, buscando obtener los 500 lx recomendados por la OMS.

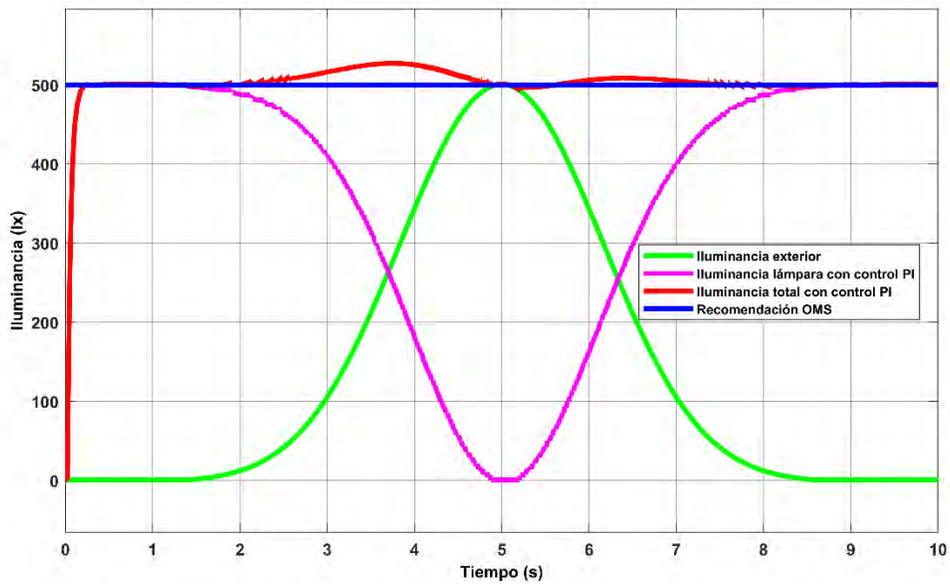


Figura 4.24. Iluminancia total obtenida con control PI

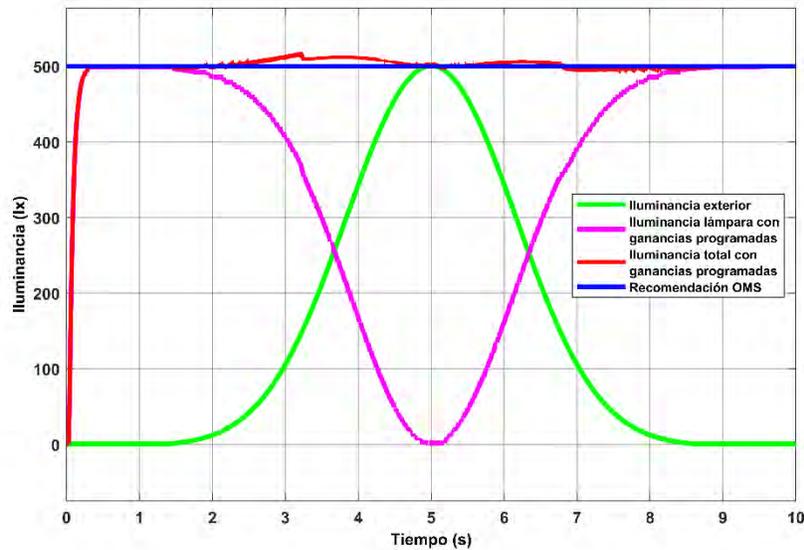


Figura 4.25. Iluminancia total obtenida con control de ganancias programadas

Aplicando el mismo orden de ideas, se compara la iluminancia total obtenida con el control de ganancias programadas y la obtenida con un control PI clásico. Esto se muestra en la Figura 4.26, en donde se tiene que el control PI presenta una desviación máxima de 20 lx con respecto a los 500 lx recomendados por la OMS, principalmente en la parte central de la gráfica, que corresponde a la sección de la parábola en la señal de referencia. Mientras tanto, el control por ganancias programadas presenta una desviación máxima de 10.27 lx.

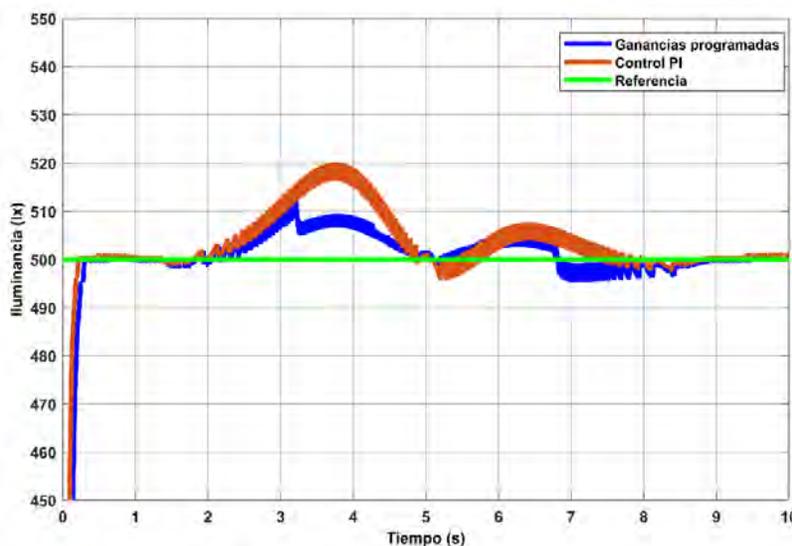


Figura 4.26. Comparación de la iluminancia total con ganancias programadas y control PI

Analizando y cuantificando la iluminancia total obtenida al simular el sistema, se obtienen las mediciones en distintos puntos de operación mostrados en la Tabla 4.4, en donde se puede observar que el control por ganancias programadas no excede el 5% de error en todo el rango de operación, lo cual se refleja en mantener la iluminancia total en 500 lx, con una desviación máxima de 8.4 lx, estando dentro de los límites establecidos por el caso de estudio. En comparación, el control PI provoca que se tengan desviaciones en la iluminancia total de hasta 20.09 lx, lo cual excede la desviación máxima permitida de ± 10 lx.

Tabla 4.4. Mediciones de la iluminancia proporcionada por la lámpara e iluminancia total obtenida

Iluminancia exterior (lx)	Iluminancia de la lámpara deseada (lx)	Iluminancia de la lámpara obtenida (lx)				Iluminancia total obtenida (lx)	
		Control PI	Error	Ganancias programadas	Error	Control PI	Ganancias programadas
0	500	498.70	0.26%	496.90	0.62%	498.70	496.90
100	400	406.70	1.68%	407.20	1.80%	506.70	507.70
200	300	312.40	4.13%	308.80	2.93%	512.40	508.40
300	200	220.09	10.45%	207.50	3.75%	520.09	507.50
350	150	167.40	11.60%	155.40	3.60%	517.40	505.40
400	100	114.30	14.30%	104.90	4.90%	514.30	504.90
450	50	64.19	28.38%	51.72	3.44%	514.19	501.72
500	0	7.12		1.92		507.12	501.92
450	50	48.08	3.84%	48.82	2.36%	498.08	498.82
400	100	97.34	2.66%	101.90	1.90%	497.34	501.90
350	150	146.80	2.13%	148.60	0.93%	496.80	498.60
300	200	194.50	2.75%	198.10	0.95%	494.50	498.10
200	300	309.60	3.20%	300.30	0.10%	509.60	500.30
100	400	406.80	1.70%	399.70	0.07%	506.80	499.70
0	500	497.90	0.42%	497.30	0.54%	497.90	497.30

Adicionalmente, se realiza la simulación de una perturbación de la iluminancia de aproximadamente 100 lx en $t = 6s$ y hasta $t = 8s$, aplicando el control por ganancias programadas y el control PI, con la finalidad de emular que otra fuente de iluminación adicional incide sobre el área de estudio.

La respuesta obtenida con el control PI se muestra en la Figura 4.27, mientras que la respuesta con el control de ganancias programadas se muestra en la Figura 4.28.

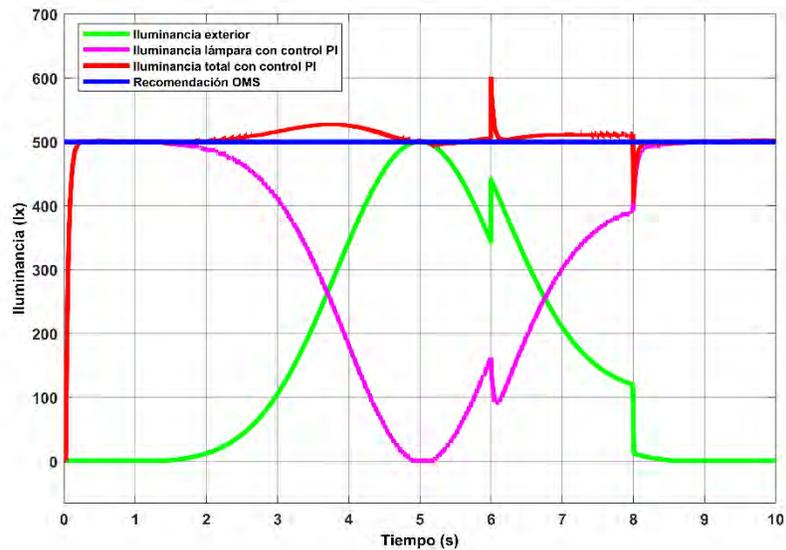


Figura 4.27. Iluminancia total con perturbación con el control PI

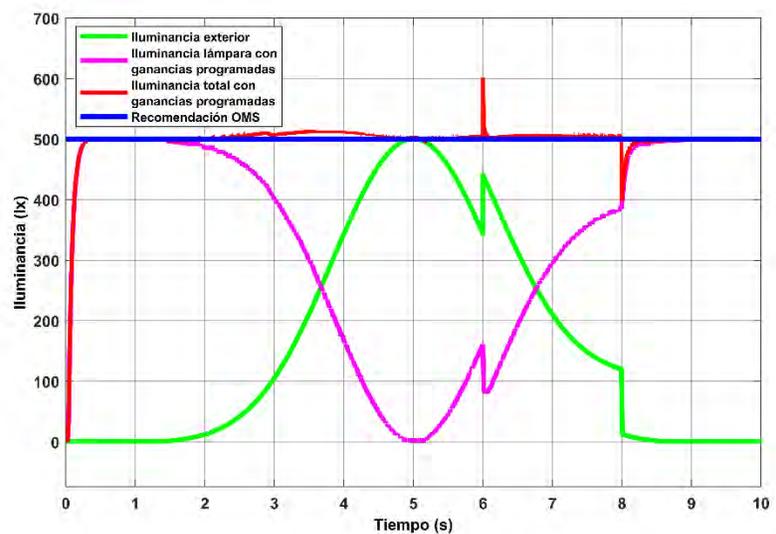


Figura 4.28. Iluminancia total con perturbación con el control de ganancias programadas

En la Figura 4.27 y Figura 4.28 se muestra que tanto en el control PI como el control de ganancias programadas buscan compensar la perturbación, lo cual es un efecto de tener un esquema de control en lazo cerrado. Además, ambos esquemas de control exhiben el mismo sobretiro de 20% aproximadamente, el cual corresponde a los 100 lx de la perturbación.

No obstante, en la Figura 4.29 se muestra que al momento de que ocurre la perturbación el control por ganancias programadas presenta un error de 7 lx, siendo este menor que los 13 lx que presenta el control PI, por lo que el control por ganancias programadas compensa de mejor manera la perturbación producida por una fuente de luz adicional a la producida por el Sol.

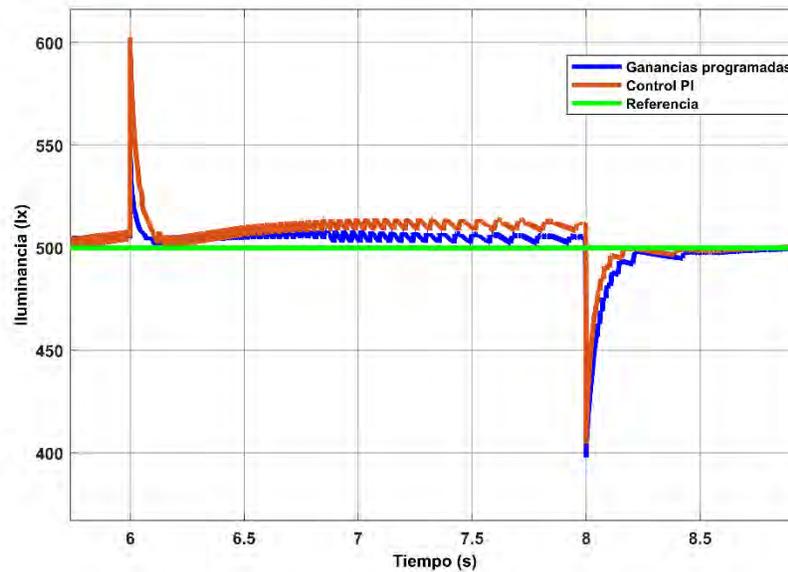


Figura 4.29. Comparación de la iluminancia total con perturbación

Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se ha presentado el diseño y simulación de un controlador LED para una aplicación en específico, la cual requiere que la lámpara LED sea capaz de trabajar en un amplio rango de operación, por lo que es necesario una fuente de alimentación capaz de soportar las variaciones requeridas, así como un esquema de control para mantener una buena precisión. Debido a esto, en este capítulo se abordan las conclusiones obtenidas con base en el desarrollo del presente trabajo. Se abordan también los posibles trabajos futuros, con la finalidad de complementar y enriquecer el trabajo desarrollado.

5.1 Conclusiones generales

En la actualidad el uso de la tecnología LED se extiende rápidamente, incorporándose cada vez más en un mayor número de aplicaciones, como se pone de manifiesto en la revisión del estado del arte, por lo que se vuelve un reto el adaptar el controlador LED a las necesidades de cada aplicación.

El caso de estudio seleccionado comprende el uso de las lámparas de protección ocular, con el fin de prevenir padecimientos oculares como la miopía. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, es recomendable tener niveles de iluminancia de 500 lx en las áreas de estudio o trabajo, con variaciones máximas de ± 10 lx. Con estas recomendaciones, se realizó el diseño de un convertidor Buck como fuente de alimentación de la lámpara LED, y la sintonización de un esquema de control PI clásico y un control de ganancias programadas.

Si bien con ambos esquemas de control se logra la regulación de la intensidad luminosa en un amplio rango de operación, el control por ganancias programadas presenta un mejor desempeño en comparación con el control PI, dado que exhibe menores porcentajes de error en los diferentes puntos de operación y, en consecuencia, ofrece mejores índices de desempeño con base en los criterios ISE e IAE.

Debido a lo anterior, el control por ganancias programadas resulta una mejor opción para el caso de estudio seleccionado, puesto que permite garantizar los niveles de iluminancia requeridos, y que de esta manera sea posible contribuir a la prevención de padecimientos oculares.

Aunque no se realizaron pruebas físicas, mediante la simulación se logra el objetivo general de controlar la intensidad luminosa de una lámpara LED en un amplio rango de operación, puesto que el caso de estudio seleccionado condiciona estos requerimientos, y se logra variar la iluminancia proporcionada por la lámpara al regular la corriente a través del convertidor CD-CD.

Por su parte, las especificaciones de diseño del convertidor permiten que la corriente en la carga no oscile entre valores muy grandes a una frecuencia visible al ojo humano. Esto aminora sustancialmente el *flicker*, lo que también permite contribuir a la prevención de los padecimientos oculares.

5.2 Trabajos futuros

El trabajo desarrollado no se presenta como una solución general para los controladores LED, si no como una opción más a considerar dentro del abanico de posibilidades de esta tecnología, dado que la misma Agencia Internacional de la Energía recomienda seguir realizando investigaciones en este ámbito para buscar mejorarla aún más. En ese contexto, existen posibles trabajos futuros que pueden complementar y enriquecer el presente trabajo, y así seguir contribuyendo a las mejoras de la tecnología LED en diferentes aplicaciones.

Como principal trabajo futuro se recomienda realizar la implementación física del sistema, dado que existen condiciones que deben ser consideradas al momento de desarrollar el sistema en un contexto real, lo cual enriquecería bastante los resultados obtenidos.

Por su parte, se pueden mejorar las ganancias de los esquemas de control obteniendo una función de transferencia que relacione la iluminancia producida por la lámpara con el ciclo de trabajo del convertidor, o bien, utilizar una función de transferencia en donde se involucre el modelo del LED y no una aproximación resistiva. Además, es posible que con otro método de sintonización se obtengan ganancias que permitan obtener un mejor desempeño de los esquemas de control.

Con respecto al convertidor diseñado, es viable mejorar su desempeño agregando circuitos de ayuda a la conmutación en los dispositivos semiconductores, disminuyendo las pérdidas en éstos y permitiendo tener una buena eficiencia. También es posible optimizar su dinámica cambiando algunas especificaciones de diseño, como el aumentar la frecuencia de conmutación, sin embargo, esto involucraría rediseñar el convertidor.

Adicionalmente, se recomienda realizar pruebas con otras topologías de convertidores CD-CD, con la finalidad de estudiar las ventajas que estos puedan presentar, además de ampliar el número de aplicaciones de los LEDs y seguir contribuyendo al desarrollo de esta tecnología como lo recomienda la Agencia Internacional de la Energía.

Referencias

- [1] M. C. Gutiérrez Hernández, “Iluminación LED. Ahorro, Eficiencia e Innovación. Proyecto de mejora de la iluminación de un hotel”, Tesis de Grado, Universidad de la Laguna, San Cristóbal de la Laguna, 2015.
- [2] E. Saavedra, F. J. Rey, y J. Luyo, “Sistemas De Iluminación, Situación Actual Y Perspectivas”, *Revista Científica TECNIA*, vol. 26, núm. 2, p. 44, 2016, doi: 10.21754/tecnia.v26i2.57.
- [3] IEA, “Lighting Analysis”, IEA, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/lighting> (consultado mar. 23, 2023).
- [4] IEA, “Targeting 100% LED lighting sales by 2025”, IEA, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/targeting-100-led-lighting-sales-by-2025> (consultado mar. 23, 2023).
- [5] C. Trujillo, G. Henao, J. Castro, y A. Narvaez, “Design and development of a LED Driver prototype with a Single-Stage PFC and low current harmonic distortion”, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, núm. 8, pp. 1368–1375, 2017, doi: 10.1109/TLA.2017.7994781.
- [6] D. G. Lamar, M. Arias, I. Castro, y M. M. H. J. Sebastián, “Propuesta de una fuente de alimentación CA / CC para lámparas LED de sustitución basada en la conexión de una resistencia libre de pérdidas en serie con la entrada”, *XXII Seminario anual de automática, electrónica industrial e instrumentación*, 2015.
- [7] N. Pai y S. G. Kini, “Design and Prototyping of Dimmable LED Driver for General Lighting Application”, *Proceedings of the 2nd International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, ICECA 2018*, núm. ICECA, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/ICECA.2018.8474548.
- [8] O. Regalón Anias, V. Rodríguez Diez, M. Diez Rodríguez, y R. Báez Prieto, “Aplicación de algoritmos de control clásico, adaptable y robusto a sistemas dinámicos de parámetros variables”, *Ingeniería Energética*, vol. XXXIII, núm. 3, pp. 184–195, 2012.
- [9] B. C. Kuo, “Análisis de sistemas de control en el dominio del tiempo”, en *Sistemas de Control Automático*, 7a ed., P. Hall, Ed. 1996, pp. 361–386.
- [10] J. A. Brizuela Mendoza, A. Zavala Río, y C. M. Astorga Zaragoza, “Controlador de ganancias programadas aplicado a la estabilización de una bicicleta sin conductor”, *Congreso Nacional de Control Automático 2013*, pp. 36-41, 2013.
- [11] M. Lara Ortiz, J. Garrido Jurado, M. L. Ruz Ruiz, y F. Vázquez Serrano, “Control PI adaptativo por ganancia programada del nivel de un tanque de sección trapezoidal”, en *XXXIX Jornadas de Automática*, 2020, pp. 444–451, doi: 10.17979/spudc.9788497497565.0444.

- [12] V. Blanca Giménez, N. Castilla Cabanes, A. Martínez Antón, y R. M. Pastor Villa, “Luminotecnia: Magnitudes fotométricas básicas. Unidades de medida.”, Valencia, España, 2013. [En línea]. Disponible en: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12732/L%20U%20M%20I%20N%20O%20T%20E%20C%20N%20I%20A.pdf?sequence=1#:~:text=Las%20magnitudes%20fundamentales%20de%20la%20Luminotecnia%20son%20las%20siguientes%3A,es%20el%20lux%20\(lx\)](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12732/L%20U%20M%20I%20N%20O%20T%20E%20C%20N%20I%20A.pdf?sequence=1#:~:text=Las%20magnitudes%20fundamentales%20de%20la%20Luminotecnia%20son%20las%20siguientes%3A,es%20el%20lux%20(lx).). (consultado feb. 17, 2022).
- [13] M. Giobergia, C. A. Zonco Menghini, y M. Yuño, “Evaluación de resultados productivos en pollos de engorde utilizando diferentes intensidades de luz”, Tesina de Grado, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Tandil, 2018.
- [14] V. H. Fillipo Rugeles, H. B. Cano Garzón, y J. A. Chaves Osorio, “Aplicaciones de iluminación con leds”, *Scientia Et Technica*, vol. XVI, núm. 45, pp. 13–18, 2010, doi: 10.22517/23447214.297.
- [15] D. Acebo González y A. T. Hernández García, “Los métodos turbidimétricos y sus aplicaciones en las ciencias de la vida”, *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, vol. 44, núm. 1, pp. 1–18, 2013.
- [16] A. A. Gubina, M. M. Romanovich, A. E. Degterev, I. A. Lamkin, y S. A. Tarasov, “Development of Phytolamp and Study the Influence of LED Radiation on Tomatoes Growth”, *2021 IEEE Conference of Russian Young Researches in Electrical and Electronic Engineering*, núm. 1, pp. 1310–1313, 2021.
- [17] M. M. Romanovich, I. A. Lamkin, A. E. Degterev, y S. A. Tarasov, “Development of the Multi-wavelength LED Lamp to Improve Plant Growth”, *2021 IEEE Conference of Russian Young Researches in Electrical and Electronic Engineering*, pp. 1332–1335, 2021.
- [18] D. Y. Donskoy, A. D. Lukyanov, E. P. Kluchka, y M. Petkovic, “Research of the effect of discrete light sources on seeds of vegetable and green cultures and the possibility of their approximation to modified sunlight”, *2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/EWDTS.2019.8884391.
- [19] Y. Ramos Gonzalías y E. Ramírez Lasso, “Desarrollo de un sistema de iluminación artificial para cultivos en interiores - Vertical Farming (VF)”, *Informador Técnico*, vol. 80, pp. 111–120, 2016.
- [20] W. Yanhui y J. Xiaofei, “The design of greenhouse lighting control system”, en *IEEE Proceedings of the 2015 27th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2015*, 2015, pp. 2613–2617, doi: 10.1109/CCDC.2015.7162363.
- [21] P. Martín Ramos *et al.*, “Diodos emisores de luz para la irradiación de plantas”, *Universidad de Valladolid*, p. 17, 2010, [En línea]. Disponible en: http://oa.upm.es/7044/2/INVE_MEM_2010_76665.pdf.

- [22] S. Bures, M. U. Gavilán, y S. Kotiranta, “Iluminación artificial en agricultura”, *Biblioteca Horticultura*, vol. 1, pp. 3–45, 2018, [En línea]. Disponible en: <http://www.bibliotecahorticultura.com>.
- [23] R. Pérez, J. Pérez, M. Betancur, y J. Bustamante, “Método Alternativo De Control De Intensidad Lumínica Para Pulsioximetría En Tiempo Real”, *Revista Ingeniería Biomédica*, vol. 9, núm. 17, pp. 35–43, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.14508/rbme.2015.9.17.35-43>.
- [24] D. T. Phan *et al.*, “Development of a LED light therapy device with power density control using a Fuzzy logic controller”, *Medical Engineering and Physics*, vol. 86, pp. 71–77, 2020, doi: [10.1016/j.medengphy.2020.09.008](https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2020.09.008).
- [25] E. I. Flores Solis, “Diseño de una fuente de fototerapia LED”, Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Mérida, Mérida, 2015.
- [26] V. Vázquez Chacón y C. Elizalde Nava, “Fototerapia De Rayos Ultravioleta Con Led’s Para Tratamiento De Ictericia Neonatal”, en *VI Congreso Nacional de Tecnología Aplicada a Ciencias de la Salud*, 2015, pp. 3–6.
- [27] M. Jeffrey Maisels y A. F. McDonagh, “Fototerapia para la ictericia neonatal.”, *Revista del Hospital Materno Infantil Ramón Sardá*, vol. 27, núm. 3, pp. 100–111, 2008.
- [28] A. Trigos Díaz y V. E. Trujillo Condes, “Uso del diodo emisor de luz como terapia dermatológica”, *Revista Medicina e Investigación UAEM*, vol. 7, pp. 66–73, 2019.
- [29] M. A. Juárez, P. R. Martínez, G. Vazquez, J. M. Sosa, X. Prieto, y R. Martínez, “Analysis of buck converter control for automobile LED headlights application”, *2014 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, ROPEC 2014*, pp. 12–15, 2014, doi: [10.1109/ROPEC.2014.7036298](https://doi.org/10.1109/ROPEC.2014.7036298).
- [30] X. He, C. Huang, Y. Li, H. Wang, D. Lei, y M. Yao, “An Adaptive Dimming System of High-Power LED Based on Fuzzy PID Control Algorithm for Machine Vision Lighting”, *Proceedings of 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, ITNEC 2020*, núm. Itnec, pp. 2198–2202, 2020, doi: [10.1109/ITNEC48623.2020.9084741](https://doi.org/10.1109/ITNEC48623.2020.9084741).
- [31] X. He, H. Wang, J. Cao, y D. Lei, “Design of High-power LED Automatic Dimming System for Light Source of On-line Detection System”, *Proceedings of 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference, ITOEC 2020*, núm. Itoec, pp. 1487–1491, 2020, doi: [10.1109/ITOEC49072.2020.9141898](https://doi.org/10.1109/ITOEC49072.2020.9141898).
- [32] D. Mideros, D. Lopez, y M. Moya, “Design and implementation of a prototype intelligent lamp”, en *IEEE Proceedings - 2017 International Conference on Information Systems and Computer Science, INCISCOS 2017*, 2017, vol. 2017-Novem, pp. 49–55, doi: [10.1109/INCISCOS.2017.48](https://doi.org/10.1109/INCISCOS.2017.48).

- [33] Y. Xiaogang, W. Wang, y L. Fenna, “Design and Simulation of intelligent dimmer based on Fuzzy PID”, *Proceedings - 2020 International Conference on Intelligent Design, ICID 2020*, núm. ICID, pp. 86–89, 2020, doi: 10.1109/ICID52250.2020.00025.
- [34] M. G. Shafer, E. Saputra, K. A. Bakar, y F. Ramadhani, “Modeling of fuzzy logic control system for controlling homogeneity of light intensity from Light Emitting Diode”, *IEEE, 3rd International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation, ISMS 2012*, pp. 71–75, 2012, doi: 10.1109/ISMS.2012.90.
- [35] T. Maharani, M. Abdurohman, y A. G. Putrada, “Smart Lighting in Corridor Using Particle Swarm Optimization”, en *IEEE Proceedings of 2019 4th International Conference on Informatics and Computing, ICIC 2019*, 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICIC47613.2019.8985858.
- [36] N. K. Kandasamy, G. Karunagaran, C. Spanos, K. J. Tseng, y B. H. Soong, “Smart lighting system using ANN-IMC for personalized lighting control and daylight harvesting”, *ELSEVIER Building and Environment*, vol. 139, núm. April, pp. 170–180, 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.05.005.
- [37] R. Gil Bernal y D. F. Díaz Caro, “Driver de potencia dimerizable para un arreglo de LEDS”, Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, 2017.
- [38] F. Bento y 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, núm. 2, pp. 21-36, 2021.
- [39] Secretaría de Energía, “Norma oficial Mexicana NOM-030-ENER-2016, Eficacia luminosa de lámparas de diodos emisores de luz (led) integradas para iluminacion general. Límites y métodos de prueba.”, 2017, [En línea]. Disponible en <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/242715/NOM-021-ENER-SCFI-2017.pdf>.
- [40] Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica, “Especificación sello FIDE No.71 Luminarios y lámparas integradas con LEDS de uso interior”, p. 4, 2017.
- [41] N. D. Paniagua Peñaloza, “Diseño de un convertidor CA/CD para alimentación LED”, Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Tecnológico Nacional de México, Cuernavaca, 2021.
- [42] J. Sreedhar y B. Basavaraju, “Design and Analysis of Synchronous Buck converter for UPS Application”, *2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB). IEEE*, pp. 573–579, 2016, doi: 10.1109/AEEICB.2016.7538356.

- [43] A. López Rodenas y M. Sánchez Estrada, “Estudio, Simulación e Implementación de Estructuras Power Gytrators, su Control y su Aplicación en Procesado de Energía”, Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universitat Politècnica de Catalunya, 2013.
- [44] S. B. I. Halis, M. K. A. Ahamed Khan, S. N. B. B. Zawawi, R. B. M. Ghazali, y I. Elamvazuthi, “Analysis of load current ripples in a four level Buck Converter”, *2014 IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation, IEEE-ROMA2014*, núm. November, pp. 22–26, 2015, doi: 10.1109/ROMA.2014.7295856.
- [45] H. A. C. Braga, M. P. Dias, y P. S. Almeida, “On the use of a low frequency boost rectifier as a high power factor LED driver”, *2012 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2012*, vol. 2, núm. 1, pp. 1–7, 2012, doi: 10.1109/INDUSCON.2012.6453176.
- [46] J. M. Alonso, A. J. Calleja, D. Gacio, J. Cardesín, y E. López, “A long-life high-power-factor HPS-lamp LED retrofit converter based on the integrated buck-boost buck topology”, *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, pp. 2860–2865, 2011, doi: 10.1109/IECON.2011.6119766.
- [47] R. L. Lin, Y. C. Chang, y C. C. Lee, “Optimal design of LED array for single-loop ccm buck-boost LED driver”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, núm. 2, pp. 761–768, 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2243091.
- [48] C. N. Onwchekwa y A. Kwasinski, “Analysis of boundary control for boost and buck-boost converters in distributed power architectures with constant-power loads”, *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, pp. 1816–1823, 2011, doi: 10.1109/APEC.2011.5744843.
- [49] G. Gatto, A. Lai, I. Marongiu, y A. Serpi, “Circuitual and Mathematical Modelling of Flyback Converters”, *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drivers, Automation and Motion*, vol. 0, pp. 906–911, 2016.
- [50] M. Ponce Silva *et al.*, “Flyback converter for solid-state lighting applications with partial energy processing”, *Electronics*, vol. 10, núm. 1, pp. 1–18, 2021, doi: 10.3390/electronics10010060.
- [51] M. Ali, M. Orabi, M. E. Ahmed, y A. El-Aroudi, “A single stage SEPIC PFC converter for LED stage lighting applications”, *PECon2010 - 2010 IEEE International Conference on Power and Energy*, pp. 501–506, 2010, doi: 10.1109/PECON.2010.5697634.
- [52] Z. Ye, F. Greenfeld, y Z. Liang, “Design considerations of a high power factor SEPIC converter for high brightness white LED lighting applications”, *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, pp. 2657–2663, 2008, doi: 10.1109/PESC.2008.4592343.

- [53] M. A. Perez, A. Perez Hidalgo, y P. B. Elisa, “Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo”, Universidad de San Juan, San Juan, Argentina, 2008.
- [54] K. Ogata, “Introducción a los sistemas de control”, en *Ingeniería de Control Moderna*, 5a ed., P. Education, Ed. Madrid, España, 2010, pp. 1–10.
- [55] Z. Abidin, A. G. R. Mahendra, D. F. Mahendra, M. R. N. Imami, y W. M. H. Mehanny, “Performance analysis of LED driver for transmitter of visible light communication using pulse width modulation”, *EECCIS 2020 - 2020 10th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls, and Informatics Seminar*, pp. 178–182, 2020, doi: 10.1109/EECCIS49483.2020.9263424.
- [56] M. Leško, H. Wachta, K. Baran, y A. Różowicz, “Adaptive luminaire with variable luminous intensity distribution”, *IEEE Energies*, vol. 13, núm. 3, pp. 1–4, 2018, doi: 10.3390/en13030721.
- [57] B. C. Kuo, “Sistemas de control en lazo abierto y lazo cerrado”, en *Sistemas de Control Automático*, 7a ed., P. Hall, Ed. 1996, pp. 9–11.
- [58] J. E. Giles Vieyra, “Evaluación de técnicas de control para un convertidor bidireccional en un sistema de almacenamiento de energía”, Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Tecnológico Nacional de México, Cuernavaca, 2020.
- [59] S. Iturriaga Medina, P. R. Martínez Rodríguez, M. Juárez Balderas, J. M. Sosa, y C. A. Limónes, “A buck converter controller design in an electronic drive for LED lighting applications”, *2015 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, ROPEC 2015*, vol. 2, 2016, doi: 10.1109/ROPEC.2015.7395105.
- [60] M. B. D’Amico, N. Guerin, A. Oliva, y E. E. Paolini, “Dynamics of a buck converter with a digital PI controller”, *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, vol. 4, núm. 3, pp. 126–131, 2007, doi: 10.1016/s1697-7912(07)70232-7.
- [61] S. González de León, “Control PID con Sintonización Difusa y Control Difuso”, Tesis de Grado, Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional, México, 2013.
- [62] S. Afzali, S. Mosharafian, M. W. Van Iersel, y J. M. Velni, “Optimal Lighting Control in Greenhouses Equipped with High-intensity Discharge Lamps Using Reinforcement Learning”, *IEEE Proceedings of the American Control Conference*, vol. 2021-May, pp. 1414–1419, 2021, doi: 10.23919/ACC50511.2021.9482964.
- [63] S. A. Castaño Giraldo, “Error en estado estacionario”, *Control automático educación*, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/error-en-estado-estacionario/>. (consultado may. 17, 2023).

- [64] D. Perera, “Cómo afecta la iluminación a tu salud visual”, *Centro Oftalmológico Perera*, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://centrooftalmologicoperera.com/iluminacion-salud-visual/#:~:text=El ojo es muy sensible,se origen otras alteraciones físicas.> (consultado abr. 23, 2023).
- [65] Procuraduría Federal del Consumidor, “Ojo con tu salud visual”, *Procuraduría Federal del Consumidor*, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/profecoco/documentos/ojo-con-tu-salud-visual?state=published>. (consultado abr. 23, 2023).
- [66] Organización Mundial de la Salud, “La OMS presenta el primer informe mundial sobre la visión”, *OMS*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news/item/08-10-2019-who-launches-first-world-report-on-vision> (consultado nov. 03, 2022).
- [67] B. A. Holden *et al.*, “Global Prevalence of Myopia and High Myopia and Temporal Trends from 2000 through 2050”, *American Academy of Ophthalmology*, vol. 123, núm. 5, pp. 1036–1042, 2016, doi: 10.1016/j.opthta.2016.01.006.
- [68] A. R. Muralidharan *et al.*, “Light and myopia: from epidemiological studies to neurobiological mechanisms”, *Therapeutic Advances in Ophthalmology*, vol. 13, núm. D, pp. 1-45, 2021, doi: 10.1177/25158414211059246.
- [69] T. T. Norton y J. T. Siegwart, “Light levels, refractive development, and myopia - A speculative review”, *Experimental Eye Research*, vol. 114, pp. 48–57, 2013, doi: 10.1016/j.exer.2013.05.004.
- [70] J. Lu, L. Ran, L. Zhang, y Y. He, “The Influence of Reading and Writing Table Lamp Illumination Parameters on Visual Fatigue”, *Advances in Ergonomics in Design. AHFE 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1203, pp. 131–136, 2020, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-51038-1_19.
- [71] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, “Datos Estación Cuernavaca”, 2019, [En línea]. Disponible en: <https://sinaica.inecc.gob.mx/>. (consultado oct. 15, 2022).
- [72] S. Keeping, “Caracterización y miniaturización del parpadeo del LED en aplicaciones de iluminación”, *DigiKey*, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.digikey.com.mx/es/articles/characterizing-and-minimizing-led-flicker-in-lighting-applications>. (consultado nov. 03, 2022).
- [73] Steren, “Lámpara LED para escritorio LAM-088”, *Steren*, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://descargas.steren.com.mx/LAM-088-instr.pdf>. (consultado feb. 02, 2020).
- [74] R. A. Gamboa López, “Asistente para el Diseño y Simulación de Convertidores CD-CD en Lazo Cerrado”, Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Tecnológico Nacional de México, Cuernavaca, 2018.

- [75] S. Ang y O. Alejandro, “Basic Switching Converter Topologies: Buck Converter”, en *Power Switching Converters*, 2nd edition., Taylor & Francis Group, Ed. USA: Taylor & Francis Group, 2005, pp. 18–30.
- [76] V. Gupta, “Dimming DC-DC LED drivers: Power losses, luminous efficiency & best-in-class”, Georgia, 2021.
- [77] Z. Dong, C. K. Tse, y S. Y. R. Hui, “Circuit Theoretic Considerations of LED Driving: Voltage-Source Versus Current-Source Driving”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, núm. 5, pp. 4689–4702, 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2861914.
- [78] J. Pérez Ramírez y J. A. Beristáin Jiménez, “Modelado de convertidores cd-cd sin aislamiento: convertidor reductor”, en *Electrónica de potencia: modelado y control de convertidores cd-cd*, 1a edición., México: Pearson Educación de México, 2016, pp. 15–20.
- [79] B. C. Kuo, “Diseño con el controlador PI”, en *Sistemas de Control Automático*, 7a ed., P. Hall, Ed. 1996, pp. 691–708.
- [80] I. E. Vargas Morales, A. J. Pérez Venzor, y J. D. D. Cota Ruiz, “Control de un convertidor CD-CD tipo buck por medio del microcontrolador ATMEGA328”, *CULCyT/Sistemas*, vol. 1, núm. 55, p. 12, 2015.
- [81] Mathworks, “PID Tuner”, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/control/ref/pidtuner-app.html>. (consultado feb. 07, 2023).
- [82] D. Salazar Pérez, M. Ponce Silva, J. A. Aqui Tapia, J. García Guzmán, y J. H. Pérez Cruz, “Effects of the LED modelling on the output capacitance of power converters”, *IET Power Electronics*, vol. 13, núm. 15, pp. 3467–3474, 2020, doi: 10.1049/iet-pel.2020.0181.

Anexo A Caracterización de la lámpara LED

Tabla A.1 Datos de la caracterización de la lámpara LED

Tensión (V)	Corriente (A)	Iluminancia (lx)
11.3	0.113	518
11.2	0.099	459
11.1	0.086	401
11	0.073	346
10.9	0.062	292
10.8	0.051	241
10.7	0.04	194
10.6	0.031	150
10.5	0.023	111
10.4	0.016	78
10.3	0.011	51
10.2	0.007	31
10.1	0.004	17
10	0.002	10
9.9	0.002	7
9.8	0.001	5
9.7	0.001	4
9.6	0.001	3
9.5	0.001	1
9.4	0.001	0
9.3	0.001	0
9.2	0.001	0
9.1	0.001	0
9	0	0

Anexo B Análisis para la obtención de las ecuaciones de diseño del convertidor seleccionado

Para el diseño de cualquier convertidor, primero se debe entender su principio de funcionamiento. En este caso, se realiza el análisis del convertidor Buck dado que corresponde a la topología utilizada en este trabajo.

Los convertidores conmutados se basan en el encendido y apagado de un interruptor con un determinado ciclo de trabajo. En el caso del convertidor Buck, cuando el interruptor se encuentra encendido el diodo se polariza en inversa por lo que éste no conduce, permitiendo el flujo de corriente a través del inductor. Por otro lado, cuando el interruptor se abre, el diodo se polariza en directa por lo que la corriente fluye a través de él. Este principio de funcionamiento se muestra en la Figura B.1.

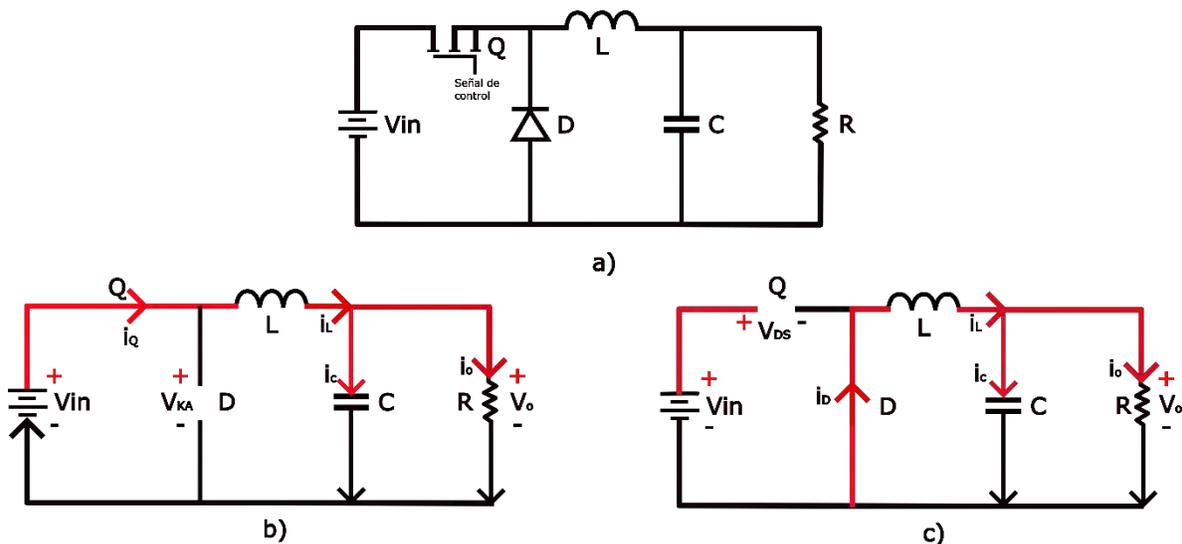


Figura B.1. Principio de funcionamiento del convertidor Buck. a) Topología del convertidor. b) Funcionamiento en el tiempo de encendido. c) Funcionamiento en el tiempo de apagado.

Analizando por las leyes de tensión y corriente de Kirchhoff los circuitos equivalentes tanto en el tiempo de encendido como en el de apagado, es posible obtener las formas de onda características de este convertidor, mostradas en la Figura B.2.

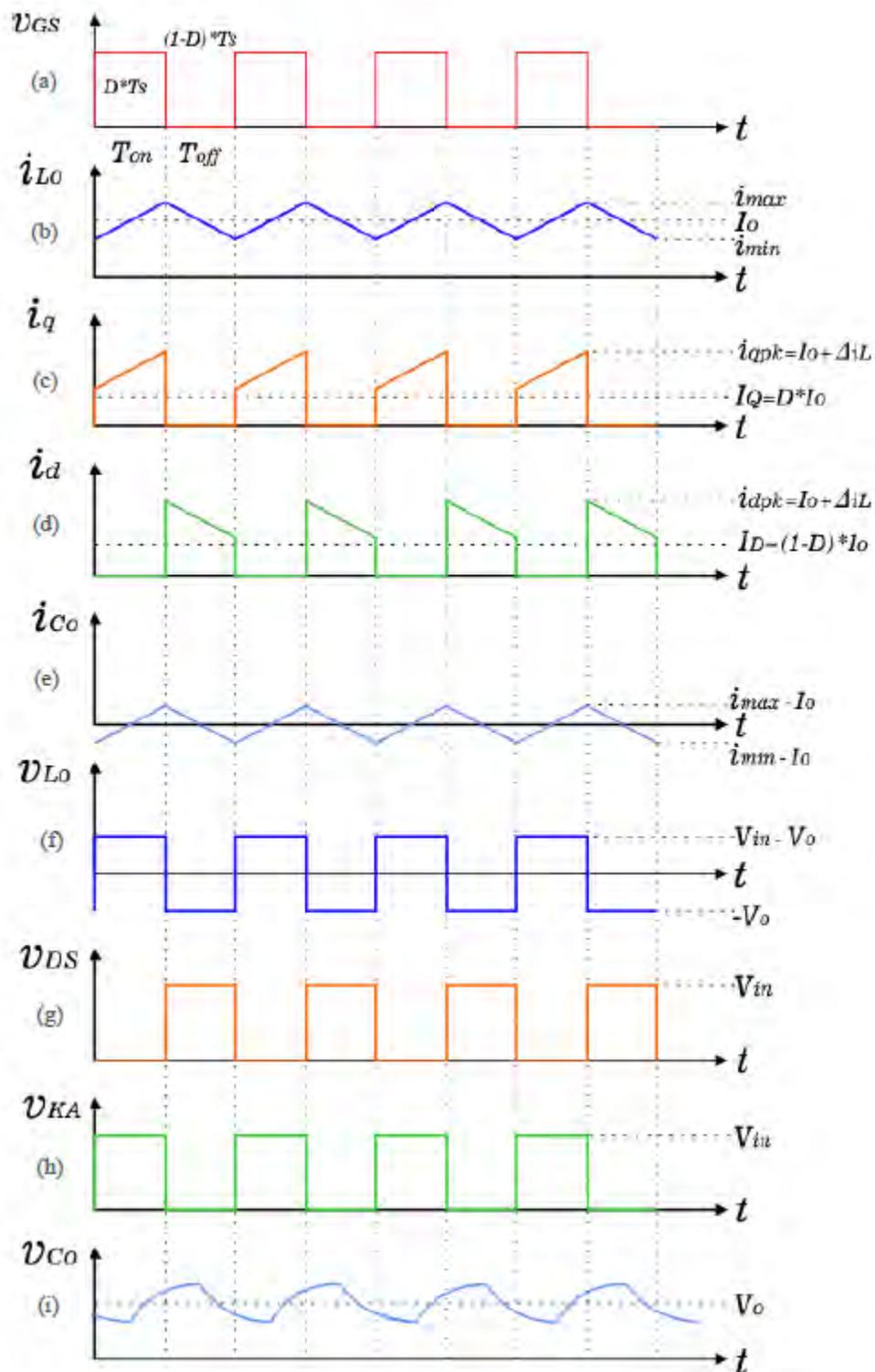


Figura B.2. Formas de onda del convertidor Buck en MCC. a) Disparo del interruptor, b) Corriente en el inductor, c) Corriente en el interruptor, d) Corriente en el diodo, e) Corriente en el capacitor, f) Tensión en el inductor, g) Tensión en el interruptor, h) Tensión en el diodo, i) Tensión en el capacitor [65]

Estas formas de onda, así como los circuitos equivalentes son útiles para la obtención de las ecuaciones. Primeramente, se observa que la tensión en el inductor es $V_{in} - V_o$ en el tiempo de encendido (t_{on}), mientras que en el tiempo de apagado (t_{off}) es igual a V_o . Entonces, considerando que en el inductor se debe cumplir un balance de energía, es decir, que en estado estable la tensión en el inductor durante un periodo de conmutación es cero, se tiene la igualdad de la ecuación (B.1).

$$(V_{in} - V_o)DT_s = (1 - D)T_s V_o \quad (B.1)$$

Donde:

V_{in} y V_o corresponden a la tensión de entrada y tensión de salida respectivamente.

D es el ciclo de trabajo

T_s es el periodo de la señal de conmutación

Entonces, despejando es posible obtener la relación entre la tensión de salida y la tensión de entrada, obteniéndose la ganancia de CD del convertidor

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = D \quad (B.2)$$

Ahora bien, se sabe que la tensión en un inductor está definida por la ecuación (B.3), en donde la derivada de la corriente puede entenderse como un incremento de corriente a través del tiempo. Además, se sabe que en el tiempo de encendido la tensión en el inductor del convertidor es $V_{in} - V_o$, por lo que al sustituir se obtiene la ecuación (B.4).

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (B.3)$$

$$V_{Lo} = L \frac{\Delta i_{Lo}}{DT_s} = V_{in} - V_o \quad (B.4)$$

Entonces, despejando L_o se obtiene la ecuación (B.5) , con la que es posible realizar el cálculo del inductor.

$$L_o = \frac{(V_{in} - V_o)D}{\Delta i_{L_o} f_s} \quad (B.5)$$

Además, se sabe que en promedio la corriente del capacitor es cero, por lo que la corriente promedio del inductor es igual a la corriente de salida, como se muestra en la ecuación (B.6).

$$I_{L_o} = I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{V_o}{R_o} \quad (B.6)$$

Por su parte, se sabe que la corriente en un capacitor está definida por la ecuación (B.7). Integrando ambos miembros de la ecuación en un intervalo de 0 a $T_s/2$ se obtiene la ecuación (B.8).

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt} \quad (B.7)$$

$$\int_0^{T_s/2} i_c dt = C[v_c]_0^{T_s/2} \quad (B.8)$$

Sabiendo que una integral definida es el área bajo la curva, y tomando como base la Figura B.2e, es posible resolver la integral, obteniéndose la ecuación (B.9)

$$\frac{1}{2} \frac{T_s}{2} \frac{\Delta i_{L_o}}{2} = C \Delta v_c \quad (B.9)$$

Entonces, sustituyendo y despejando con respecto a C, se obtiene la ecuación (B.10), con la que es posible hacer el cálculo del capacitor.

$$C = \frac{(V_{in} - V_o)D}{8 \Delta v_c L f_s^2} \quad (B.10)$$

Por otro lado, analizando la corriente del interruptor con base en la Figura B.2c, se observa que la corriente pico estaría definida como se muestra en la ecuación (B.11).

$$i_{qpk} = I_o + \frac{\Delta i_{Lo}}{2} \quad (B.11)$$

Por lo que, sustituyendo, se obtiene la ecuación (B.12), con la que es posible calcular el esfuerzo pico de corriente en el interruptor, mientras que resolviendo la ecuación (B.13) que representa la corriente promedio del interruptor, se obtiene la ecuación (B.14).

$$i_{qpk} = I_o + \frac{(V_{in} - V_o)D}{2Lf_s} \quad (B.12)$$

$$I_Q = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_Q(t) dt \quad (B.13)$$

$$I_Q = DI_o \quad (B.14)$$

Para el diodo se aplica un análisis similar, pero en el tiempo de apagado dado que es el tiempo en el que el diodo conduce, obteniéndose la ecuación (B.15) para la corriente pico del diodo, y la ecuación (B.16) para la corriente promedio.

$$i_{dpk} = I_o + \frac{V_o(1-D)}{2Lf_s} \quad (B.15)$$

$$I_D = (1-D)I_o \quad (B.16)$$

Por su parte, los esfuerzos de tensión tanto en el diodo como en el interruptor es posible obtenerlos mediante un análisis de mallas, en el tiempo de encendido y en el tiempo de apagado respectivamente, obteniéndose la ecuación (B.17) para la tensión en el diodo y la ecuación (B.18) para la tensión en el interruptor.

$$V_{KA} = V_{in} \quad (B.17)$$

$$V_{DS} = V_{in} \quad (B.18)$$

En la Tabla B.1 se muestra un resumen de las ecuaciones de diseño del convertidor Buck.

Tabla B.1. Ecuaciones de diseño del convertidor Buck

Parámetro	Ecuación
Inductor	$L_o = \frac{(V_{in} - V_o)D}{\Delta i_{L_o} f_s}$
Capacitor	$C = \frac{(V_{in} - V_o)D}{8\Delta v_c L f_s^2}$
Corriente pico en el interruptor	$i_{qpk} = I_o + \frac{(V_{in} - V_o)D}{2L f_s}$
Corriente promedio en el interruptor	$I_Q = DI_o$
Esfuerzo de tensión en el interruptor	$V_{DS} = V_{in}$
Corriente pico en el diodo	$i_{dpk} = I_o + \frac{V_o(1-D)}{2L f_s}$
Corriente promedio en el diodo	$I_D = (1-D)I_o$
Esfuerzo de tensión en el diodo	$V_{KA} = V_{in}$

Anexo C Método generalizado de variables de estado promediado

La técnica de análisis dinámico denominada variables de estado promediado permite aproximar el comportamiento de un convertidor conmutado, obteniendo como resultado un modelo matemático que permite calcular corriente, tensión, funciones de transferencia, etc.

El procedimiento de análisis es el siguiente:

1. Identificar los circuitos equivalentes del convertidor sobre un ciclo de conmutación
2. Identificar las variables de estado del convertidor y establecer las ecuaciones utilizando las leyes de tensión y corriente de Kirchhoff
3. Realizar el promediado de las variables de estado, considerando el ciclo de trabajo como factor dominante

Entonces, aplicando el análisis por variables de estado promediado al convertidor Buck, primeramente, se obtienen los circuitos equivalentes mostrados en la Figura C.1

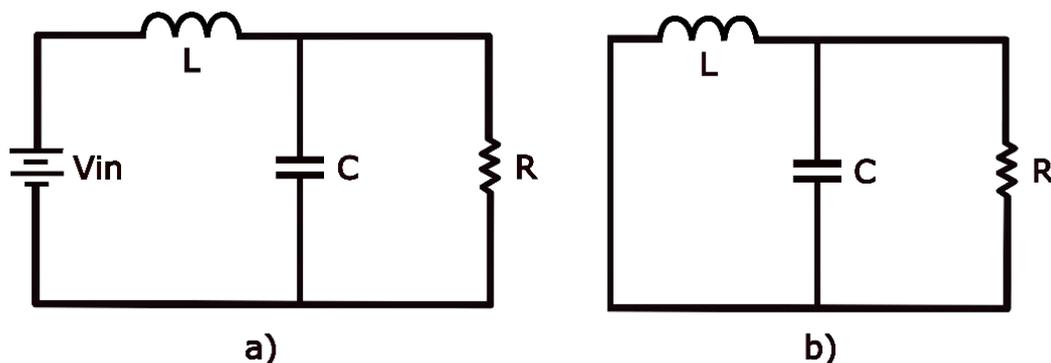


Figura C.1. Circuitos equivalentes del convertidor Buck en un ciclo de conmutación. a) Tiempo de encendido, b) Tiempo de apagado

Ahora bien, es común que en los convertidores conmutados se asignen como variables de estado la corriente y la tensión en los elementos almacenadores de energía, en este caso se tiene:

$$i_L = x_1 \quad (C.1)$$

$$v_c = x_2 \quad (C.2)$$

Entonces, analizando por la LVK el circuito equivalente en el tiempo de encendido, se tiene:

$$-V_{in} + L \frac{di_L}{dt} + v_c = 0 \quad (C.3)$$

Sustituyendo las variables de estado se obtiene:

$$-V_{in} + L\dot{x}_1 + x_2 = 0 \quad (C.4)$$

Despejando,

$$\dot{x}_1 = \frac{V_{in}}{L} - \frac{x_2}{L} \quad (C.5)$$

Ahora bien, aplicando LCK en el circuito equivalente del tiempo de encendido, se tiene:

$$i_L = i_c + i_o = C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R} \quad (C.6)$$

Sustituyendo las variables de estado,

$$x_1 = C\dot{x}_2 + \frac{x_2}{R} \quad (C.7)$$

Despejando se obtiene:

$$\dot{x}_2 = \frac{x_1}{C} - \frac{x_2}{RC} \quad (C.8)$$

Por su parte, analizando ahora el circuito equivalente en el tiempo de apagado, por LVK se obtiene:

$$L \frac{di_L}{dt} + v_c = 0 \quad (\text{C.9})$$

Sustituyendo las variables de estado y despejando, se tiene:

$$\dot{x}_1 = -\frac{x_2}{L} \quad (\text{C.10})$$

Ahora bien, aplicando LCK en el circuito equivalente en el tiempo de apagado, se tiene:

$$i_L = C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R} \quad (\text{C.11})$$

Sustituyendo las variables de estado y despejando,

$$\dot{x}_2 = \frac{x_1}{C} - \frac{x_2}{RC} \quad (\text{C.12})$$

Las ecuaciones (C.5), (C.8), (C.10) y (C.12) se conocen como ecuaciones de estado. El siguiente paso es promediarlas, definiendo matrices que contengan los coeficientes de las variables de estado en los dos tiempos de conmutación. La representación del sistema debe tener la forma:

$$\dot{x} = [A_1 d + A_2 (1-d)]x + [B_1 d + B_2 (1-d)]u \quad (\text{C.13})$$

En donde,

\dot{x} es el vector de derivadas

A_1 es la matriz de variables de estado en el tiempo de encendido

A_2 es la matriz de variables de estado en el tiempo de apagado

B_1 es la matriz de las fuentes en el tiempo de encendido

B_2 es la matriz de las fuentes en el tiempo de apagado

u es la fuente

Entonces, obteniendo las matrices correspondientes se obtiene:

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & -1/L \\ 1/C & -1/RC \end{bmatrix} & B_1 &= \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} \\ A_2 &= \begin{bmatrix} 0 & -1/L \\ 1/C & -1/RC \end{bmatrix} & B_2 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{C.14})$$

Promediando las matrices de variables de estado se obtiene:

$$A = A_1 d + A_2 (1-d) = \begin{bmatrix} 0 & -1/L \\ 1/C & -1/RC \end{bmatrix} \quad (\text{C.15})$$

Mientras que al promediar las matrices de la fuente se tiene:

$$B = B_1 d + B_2 (1-d) = \begin{bmatrix} d/L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{C.16})$$

Por lo tanto, el modelo matemático que representa al convertidor Buck es:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/L \\ 1/C & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d/L \\ 0 \end{bmatrix} V_{in} \quad (\text{C.17})$$

Ahora bien, el método generalizado es una técnica que se utiliza para el análisis de los convertidores conmutados una vez que se tienen sus variables de estado promediado. Se caracteriza por su simplicidad dado que con las variables de estado se procede a resolver una serie de ecuaciones que representan cada una de las funciones de transferencia [74].

La ganancia en CD se define como:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = M = -C^T A^{-1} B \quad (\text{C.18})$$

Donde:

C^T es la matriz promediada de la variable de salida del convertidor

A es la matriz promediada de las variables de estado

B es la matriz promediada de las fuentes

Por su parte, la función de transferencia entrada-salida se define como:

$$\frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_{in}} = C^T (sI - A)^{-1} B \quad (\text{C.19})$$

Donde:

C^T es la matriz promediada de la variable de salida del convertidor

s es la variable compleja

I es la matriz identidad

A es la matriz promediada de las variables de estado

B es la matriz promediada de las fuentes

Mientras tanto, la función de transferencia control-salida está definida como:

$$\frac{y(s)}{\hat{d}(s)} = (C_1^T - C_2^T) X + C^T (sI - A)^{-1} [(A_1 - A_2) X + (B_1 - B_2) u] \quad (\text{C.20})$$

Donde:

$$X = -A^{-1} Bu \quad (\text{C.21})$$

C^T es la matriz promediada de la variable de salida del convertidor

s es la variable compleja

I es la matriz identidad

A es la matriz promediada de las variables de estado

B es la matriz promediada de las fuentes

Esta función de transferencia es la de interés para realizar el control del convertidor Buck. En este caso, se desea controlar la corriente del inductor, por lo que se tiene que:

$$C_1^T = [1 \ 0] = C_2^T \quad (\text{C.22})$$

Por lo tanto, resolviendo la ecuación (C.20) se obtiene la función de transferencia control-salida mostrada en la ecuación (C.23), en donde la salida es la corriente del inductor.

$$\frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} = \frac{\frac{1}{L} \left(s + \frac{1}{RC} \right) V_{in}}{s^2 + \frac{1}{RC} s + \frac{1}{LC}} \quad (\text{C.23})$$