

Ing. Armando Herrera Velázquez: *Controlador de sistema de alimentación conmutado para iluminación con diodos emisores de luz* , Tesis de maestría en ciencias en ingeniería electrónica desarrollada en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X , © Noviembre 2014

COMITÉ TUTORIAL:

M.C. Gerardo Marx Chávez Campos

Dr. Javier Correa Gómez

Dra. Adriana del Carmen Téllez Anguiano

Dr. Enrique Reyes Archundia

LUGAR:

Morelia, Michoacán, México

FECHA:

Noviembre 2014

## RESUMEN

---

En muchas ciudades de México, el crecimiento de la población ha provocado un alto grado de urbanización sin evidentes programas de planificación. El alumbrado público, combinado con una amplia red de energías alternativas, forman parte de las soluciones que se necesitan para ampliar la cobertura de servicios desde las manchas urbanas hasta los lugares más alejados.

A pesar de que la iluminación con tecnología LED ha superado los niveles mínimos de eficacia establecidos por normas nacionales, aun existe mucho trabajo por realizar para mejorar el control y la eficiencia en la conversión de la energía por medio de los sistemas de alimentación conmutados.

En México no existe la plataforma tecnológica para implementar y perfeccionar el diseño de sistemas de alimentación conmutados. No obstante, el modelado y las herramientas de simulación que si están al alcance de los centros de investigación, permitirán anticipar los problemas y retos necesarios para que los sistemas de iluminación con LED de potencia logren consolidarse como una opción viable para cubrir las necesidades de alumbrado y crecimiento de la población.

Debido a lo anterior, la investigación realizada en esta tesis, se enfoca al estudio de una de las topologías elementales de sistemas de alimentación conmutados, el convertidor CD-CD Boost y su implementación experimental para que así, se sienten las bases de análisis y diseño de nuevas topologías tomando en cuenta el modelado matemático del convertidor, así como todos los elementos parásitos asociados a la construcción de los elementos pasivos que pueden afectar su funcionamiento. Además, sin dejar de lado los compromisos del comportamiento dinámico de los LED, para lo cual se caracteriza el comportamiento eléctrico del dispositivo a fin de obtener un modelo de simulación predictivo al comportamiento real y que sea aplicable a nuevas configuraciones de sistemas de iluminación.

# ÍNDICE GENERAL

---

Índice de figuras	xv
Índice de tablas	xix
Códigos	xx
Acrónimos	xxi
<b>i ANTECEDENTES</b>	<b>3</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
1.1 Regulación energética . . . . .	5
1.2 Sistemas de iluminación y las energías renovables . . . . .	7
1.2.1 Uso de energías renovables . . . . .	8
1.2.2 Sistema de iluminación de estado sólido . . . . .	8
1.2.3 Retos tecnológicos de los sistemas de iluminación . . . . .	9
1.3 Diseño de sistemas de alimentación conmutados . . . . .	12
1.3.1 Fuentes conmutadas de corriente constante . . . . .	12
1.3.2 Principales topologías de convertidor Corriente Directa (CD)- CD . . . . .	13
1.3.3 Control del convertidor en lazo abierto . . . . .	14
1.3.4 Control del convertidor en lazo cerrado . . . . .	14
1.3.5 Circuitos de control . . . . .	15
1.3.6 Simulación del convertidor . . . . .	15
1.4 Semblanza del problema a resolver . . . . .	16
1.5 Objetivos . . . . .	17
1.5.1 Objetivo general . . . . .	17
1.5.2 Objetivos particulares . . . . .	17
1.6 Hipótesis . . . . .	17
1.7 Justificación . . . . .	18
<b>ii ESTADO DEL ARTE</b>	<b>19</b>
<b>2 MARCO TEÓRICO</b>	<b>21</b>
2.1 Convertidores CD-CD . . . . .	21
2.1.1 Estructura básica de los convertidores CD-CD . . . . .	21
2.1.2 Métodos de análisis de convertidores CD-CD . . . . .	22
2.1.3 Principio de análisis de un convertidor en estado estable . . . . .	22
2.1.4 Convertidor Boost . . . . .	24
2.2 Modelado del convertidor CD-CD . . . . .	29
2.2.1 Espacios de estado promediados . . . . .	30
2.2.2 Modelo elemental del convertidor CD-CD Boost . . . . .	34

2.3	Teoría básica de lazos de control . . . . .	37
2.4	Funciones de transferencia . . . . .	37
2.4.1	Expresión de Funciones de Transferencia . . . . .	38
2.4.2	Respuesta transitoria y raíces . . . . .	40
2.5	Control analógico de convertidores conmutados . . . . .	40
2.5.1	Retroalimentación negativa usando técnicas clásicas de control . . . . .	40
2.5.2	Retroalimentación completa de estados . . . . .	43
2.5.3	Esquemas de retroalimentación . . . . .	45
2.6	Esquemas de control de convertidores conmutados . . . . .	46
2.6.1	Modulación por ancho de pulso . . . . .	46
2.7	Soluciones de control en circuito integrado . . . . .	48
2.7.1	Disponibilidad de un circuito de control . . . . .	48
2.7.2	Sistemas de alimentación controlados por microcontrolador . . . . .	48
2.8	Simulación del convertidor . . . . .	49
2.8.1	Disponibilidad de un simulador adecuado . . . . .	49
2.8.2	Disponibilidad de los modelos para los componentes del circuito . . . . .	50
2.8.3	Disponibilidad de parámetros de los modelos de los componentes . . . . .	51
2.9	Diodo . . . . .	52
2.9.1	Diodo de pequeña señal . . . . .	52
2.9.2	Diodo emisor de luz . . . . .	53
2.9.3	Modelos eléctricos del LED de potencia . . . . .	55
<b>iii</b>	<b>DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN</b>	<b>59</b>
<b>3</b>	<b>DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL SAC</b>	<b>61</b>
3.1	Parámetros de diseño . . . . .	61
3.1.1	Requerimientos funcionales . . . . .	62
3.2	División del diseño en componentes <i>hardware</i> y <i>software</i> . . . . .	63
3.2.1	Características del <i>software</i> . . . . .	63
3.2.2	Características del <i>hardware</i> . . . . .	64
3.2.3	Herramientas de desarrollo . . . . .	69
3.3	Iteración y refinamiento . . . . .	70
3.3.1	Hardware . . . . .	70
3.3.2	Software del MCU . . . . .	73
3.4	Implementación de <i>hardware</i> y <i>software</i> . . . . .	75
3.4.1	Implementación de <i>Hardware</i> . . . . .	76
3.4.2	Implementación de Software del MCU . . . . .	81
3.5	Integración de componentes <i>hardware</i> y <i>software</i> . . . . .	86
3.5.1	Diseño . . . . .	86
3.5.2	Módulo de evaluación en circuito impreso . . . . .	86

3.5.3	Implementación del convertidor . . . . .	86
<b>iv</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>91</b>
<b>4</b>	<b>SIMULACIÓN</b>	<b>93</b>
4.1	Simulación . . . . .	93
4.2	Metodología de pruebas . . . . .	93
4.3	Protocolo de simulación . . . . .	94
4.4	Obtención de las señales características del convertidor . . . . .	95
4.4.1	Simulación en Programa de Simulación con Énfasis en Circuitos Integrados ( <i>Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis</i> ) ( <b>SPICE</b> ) del Diodo Emisor de Luz ( <i>Light Emitting Diode</i> ) ( <b>LED</b> ) de potencia . . . . .	97
4.4.2	Simulación en <b>SPICE</b> del arreglo de 9 <b>LED</b> de potencia . . . . .	98
4.4.3	Simulación del convertidor Boost en <b>SPICE</b> . . . . .	99
4.4.4	Simulación del convertidor Boost en Laboratorio de Matrices ( <i>Matrix Laboratory</i> ) ( <b>MATLAB</b> ) . . . . .	105
<b>5</b>	<b>PRUEBAS Y RESULTADOS</b>	<b>115</b>
5.1	Esquema general del banco de pruebas . . . . .	115
5.2	Protocolo de pruebas . . . . .	116
5.3	Resultados experimentales . . . . .	116
5.3.1	Respuesta dinámica ante cambios en resistencia parásita del inductor . . . . .	116
5.3.2	Respuesta dinámica ante cambios en resistencia parásita del Capacitor . . . . .	117
5.3.3	Respuesta en frecuencia del voltaje de salida . . . . .	117
5.3.4	Prueba en lazo cerrado . . . . .	118
<b>v</b>	<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES</b>	<b>125</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>127</b>
6.1	Conclusión general . . . . .	127
6.2	Conclusiones particulares . . . . .	127
6.2.1	Modelado del convertidor Boost . . . . .	127
6.2.2	Modelado del LED de potencia . . . . .	128
6.2.3	Simulación en <b>SPICE</b> . . . . .	128
6.2.4	Simulación en <b>MATLAB</b> . . . . .	128
6.2.5	Implementación del controlador digital . . . . .	129
6.2.6	Resultados obtenidos . . . . .	129
6.3	Trabajo futuro . . . . .	129
<b>vi</b>	<b>APÉNDICES</b>	<b>131</b>
<b>A</b>	<b>FIRMWARE DEL MICROCONTROLADOR</b>	<b>133</b>
A.1	Inicialización del MCU . . . . .	133

A.2	Archivo principal del microcontrolador . . . . .	135
A.3	Aplicación de controlador digital en lazo cerrado . . . . .	138
A.4	Aplicación del convertidor en lazo abierto . . . . .	141
A.5	Configuración del ADC . . . . .	142
B	DISEÑO MAGNÉTICO . . . . .	145
B.1	Parámetros de diseño de inductancia . . . . .	145
B.2	Dimensiones del núcleo . . . . .	145
B.3	Procedimiento simplificado de diseño . . . . .	147
B.3.1	Determinar tamaño de núcleo . . . . .	147
B.3.2	Calcular la longitud del Entrehierro . . . . .	147
B.3.3	Calcular el número de vueltas . . . . .	148
B.3.4	Calcular el calibre del conductor . . . . .	148
B.4	Procedimiento 2, modelo experimental . . . . .	148
B.4.1	Definición del factor $A_L$ . . . . .	148
	BIBLIOGRAFÍA . . . . .	149