

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE LÂMPADAS  
PARA ILUMINAÇÃO DE INTERIORES EMPREGANDO  
DIODOS EMISSORES DE LUZ (LEDS)**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Rafael Adaime Pinto**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2008**

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE LÂMPADAS PARA  
ILUMINAÇÃO DE INTERIORES EMPREGANDO  
DIODOS EMISSORES DE LUZ (LEDS)**

**por**

**Rafael Adaime Pinto**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia: Eletrônica de Potência, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica.**

**Orientador: Prof. Dr. Ricardo Nederson do Prado**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2008**

---

© 2008

Todos os direitos autorais reservados a Rafael Adaime Pinto. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua dos Andradas, n. 1304, apto 03, Bairro Centro, Santa Maria, RS, 97010-030  
Fone (0xx)55 91027353; End. Eletr: [pintosma@gmail.com](mailto:pintosma@gmail.com)

---

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE LÂMPADAS PARA  
ILUMINAÇÃO DE INTERIORES EMPREGANDO  
DIODOS EMISSORES DE LUZ (LEDS)**

elaborada por  
**Rafael Adaime Pinto**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Elétrica**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Ricardo Nederson do Prado, Dr.**  
(Presidente/Orientador)

---

**Alexandre Campos, Dr. (UFSM)**  
(Co-Orientador)

---

**Henrique Antônio Carvalho Braga, Dr. (UFJF)**

---

**Tiago Bandeira Marchesan, Dr. (UNIJUÍ)**

Santa Maria, 31 de outubro de 2008.

*Aos meus pais,  
Ubirajara e Vera,  
meus eternos professores,  
pelo apoio, carinho e amor.*

*À Monique, meu grande amor,  
pela companhia, compreensão e  
alegria proporcionada a cada dia.*

*À minha irmã Lauren,  
pela amizade, afeto e confiança  
em todos os momentos.*

*À minha tia e madrinha Martha,  
pelo carinho e exemplo de  
dedicação e sabedoria.*



## **AGRADECIMENTOS**

Meus sinceros agradecimentos:

Ao Professor Ricardo Nederson do Prado pela orientação e amizade. Por dedicar seu tempo em função do meu aprendizado desde o primeiro semestre da minha graduação.

Ao Professor Alexandre Campos, pela co-orientação e pelo auxílio no desenvolvimento das idéias propostas.

Aos professores da Graduação e da Pós-Graduação pelo conhecimento técnico transmitido e pela importante contribuição na formação profissional dos alunos.

Aos colegas Engenheiros Alessandro de Oliveira, Carlos Barriquello, Cleber Corrêa, Fabio Tomm, Gustavo Denardin, Joni Madruga, Juliano Lopes, Marcelo Freitas, Mauro Moreira, Murilo Cervi, Rafael Costa, Tiago Marchesan, Alexandre Vargas, Álysson Seidel, Douglas Pappis, Fabio Bisogno, Fabrício Egert, Marco Dalla Costa, Rafael Paiva, Tiago Muraro, Cristiane Gastaldini, Guilherme Oliveira, Jackson Piazza, Lucas Oliveira, Mariano Machado, Vinícius Guarienti e a todos os demais que individualmente, ou em grupo, auxiliaram na criação e desenvolvimento deste trabalho, além da amizade e convivência diária que fazem do GEDRE um local de trabalho agradável.

Ao Engenheiro Rafael Costa, que desde o Ensino Médio tem sido meu colega e principalmente amigo. Agradeço não só pela importante contribuição dada a este trabalho, mas também pela motivação e pelas risadas proporcionadas ao longo destes dez anos de convivência.

Aos acadêmicos de iniciação científica, que são essenciais para o desenvolvimento de qualquer projeto dentro do grupo GEDRE. Em especial aos que trabalharam mais diretamente comigo. Ao colega Marcelo Cosetin, que se empenhou de forma incontestável a este trabalho.

Ao GEDRE que me acolheu e me proporcionou todas as ferramentas e oportunidades fundamentais para meu crescimento profissional.

Aos funcionários do NUPEDEE, Fernando, Anacleto e Zulmar pelo suporte técnico e amizade adquirida ao longo do curso.

A Cleonice, Arthur e Carlo, funcionários da secretária da PPGEE, que contribuíram de forma significativa em toda a documentação necessária para a publicação deste trabalho.

Meus agradecimentos aos professores que aceitaram fazer parte da banca pelas contribuições dadas ao trabalho.

A Universidade Federal de Santa Maria que forneceu uma estrutura adequada para a minha formação como Engenheiro Eletricista e durante o curso de Pós-graduação.

A CAPES pelo suporte financeiro durante o curso de mestrado, e pela confiança no meu trabalho.

Que todos nós sejamos cada vez mais...  
iluminados quanto uma HPS,  
saudáveis e fortes quanto um LED,  
reconhecidos quanto uma fluorescente  
e eficientes quanto nossos reatores.....

## **RESUMO**

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Santa Maria

### **PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE LÂMPADAS PARA ILUMINAÇÃO DE INTERIORES EMPREGANDO DIODOS EMISSORES DE LUZ (LEDS)**

AUTOR: RAFAEL ADAIME PINTO

ORIENTADOR: RICARDO NEDERSON DO PRADO

DATA E LOCAL DA DEFESA: SANTA MARIA, 31 DE OUTUBRO DE 2008.

Este trabalho apresenta um sistema de iluminação eficiente empregando diodos emissores de luz (LEDs) de alta intensidade. O objetivo é desenvolver um circuito eletrônico, compacto e de baixo custo, para acionamento e controle da corrente dos LEDs contidos em um único invólucro. A proposta visa a racionalização no uso da energia elétrica através de uma elevada eficácia luminosa e longa vida útil na substituição dos sistemas de iluminação tradicionais, como lâmpadas dicróicas, incandescentes ou fluorescentes compactas, por LEDs sem qualquer alteração na instalação elétrica. Além disso, é proposto um sistema de iluminação de emergência integrado a esta lâmpada, permitindo a utilização de um único equipamento para iluminação convencional, alimentada pela rede elétrica, e sob uma possível falha no fornecimento de energia. Para alimentar os LEDs, através da rede elétrica, com tensão de entrada universal e ainda carregar a bateria, um conversor *Buck* é empregado. Para alimentar os LEDs em corrente contínua através da bateria, um conversor *Boost* é utilizado. Os conversores operam em alta frequência e controlam a corrente nos LEDs de forma independente. A bateria pode ser composta por três pilhas recarregáveis de Ni-MH (1,2 V) ou por uma bateria de Li-Ion (3,6 V). O projeto atende às exigências da norma brasileira (NBR 10898) e da norma internacional (IEEE Std 446-1995) para sistemas de iluminação de emergência. Para analisar a idéia proposta, os circuitos são projetados e implementados. Os resultados experimentais são apresentados de forma a comprovar o comportamento satisfatório das lâmpadas.

Palavras-chave: lâmpada compacta, lâmpada a LED, iluminação de emergência, conversores CC/CC, controle de corrente e LEDs como fonte de luz.

## **ABSTRACT**

Master Thesis

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Santa Maria

### **PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE LÂMPADAS PARA ILUMINAÇÃO DE INTERIORES EMPREGANDO DIODOS EMISSORES DE LUZ (LEDS)**

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF INTERIOR  
LIGHTING SYSTEMS USING LIGHT EMITTING DIODES (LEDS)

AUTHOR: RAFAEL ADAIME PINTO

ADVISOR: RICARDO NEDERSON DO PRADO

PLACE AND DATE: SANTA MARIA, OCTOBER 31, 2008.

This work presents an efficient lighting system using high intensity light emitting diodes (LEDs). The goal is to develop a compact and low cost electronic circuit to drive and control the current of LEDs disposed in a single enclosure. The proposal aims energy saving, high luminous efficacy and high useful life when replacing traditional lighting systems, as dichroic, incandescent or compact fluorescent lamps by LEDs without any change in electrical system installation. Furthermore, an emergency lighting system integrated into the lamp is proposed, allowing the use of the same equipment in the daily activities, supplied by mains, and under a possible break in the electrical network. To supply the LEDs through the mains with universal input voltage and charge the battery, a *Buck* converter was employed. To supply the LEDs with a continuous current through the battery, a *Boost* converter was used. The converters operate at high frequency and control the current through the LEDs independently. The battery can be composed of three rechargeable Ni-MH batteries (1,2 V) or a Li-ion battery (3,6 V). The design attends the Brazilian standard and international standard for emergency lighting systems. To validate the proposed idea, the circuits were designed and implemented. The experimental results are shown with the intention to prove the satisfactory behavior of the lamps.

Keywords: compact lamp, LED lamp, emergency lighting, DC/DC converters, current control and LEDs as light source.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Classificação dos LEDs .....	24
Figura 1.2 – Aplicação dos LEDs.....	25
Figura 1.3 – Processo de emissão de luz de um LED. ....	26
Figura 1.4 - Espectro de radiação e as cores correspondentes ao comprimento de onda.....	27
Figura 1.5 – Diferentes modelos de LEDs e seus respectivos comprimentos de onda. ....	27
Figura 1.6 – Intensidade luminosa de um LED de potência em relação ao ângulo de emissão .....	28
Figura 1.7 – Temperatura de cor de diferentes fontes de luz. ....	31
Figura 1.8 - Iluminação com lâmpada fluorescente e iluminação empregando LEDs.....	37
Figura 1.9 – Índice de reflexão de alguns objetos e materiais.....	38
Figura 1.10 – Sugestão de uma possível disposição dos LEDs para uma iluminação mais uniforme. ....	38
Figura 1.11 – Exemplo de projetos e produtos empregando LEDs.....	40
Figura 1.12 – Lâmpadas compostas por LEDs e com formato semelhante às incandescentes e fluorescentes.....	41
Figura 1.13 – Lâmpadas comerciais com formato semelhante às incandescentes e fluorescentes.....	41
Figura 1.14 – OLEDs, produtos empregando esta nova tecnologia.....	43
Figura 2.1 – Principais formas de onda de corrente aplicadas na alimentação de LEDs.....	45
Figura 2.2 – Limitação da corrente por um resistor série.....	47
Figura 2.3 – Limitação da corrente por um resistor série em corrente alternada.....	48
Figura 2.4 – Limitação da corrente por um capacitor série.....	49
Figura 2.5 – Conversores lineares empregados para limitação de corrente nos LEDs.....	49
Figura 2.6 – Conversor linear com variação da intensidade luminosa do LED aplicado ao LM317 .....	50
Figura 2.7 – Conversores lineares para alimentação de LEDs sem utilizar circuitos integrados com a função de dimerização e sem a função de dimerização.....	51
Figura 2.8 – Conversor <i>Buck</i> .....	52
Figura 2.9 – Conversor <i>Boost</i> .....	53

Figura 2.10 – Conversor <i>Buck-Boost</i> .....	54
Figura 2.11 – Conversor <i>Buck</i> quadrático.....	54
Figura 2.12 – Conversores <i>Ćuk</i> , <i>SEPIC</i> e <i>Zeta</i> .....	56
Figura 2.13 – Conversor <i>Flyback</i> .....	57
Figura 2.14 – Conversores CC-CC básicos com controle da corrente de saída por um resistor série.....	58
Figura 2.15 – Conversor <i>Flyback</i> com controle da corrente de saída por um resistor série.....	59
Figura 2.16 – Conversores <i>Buck</i> , <i>Boost</i> e <i>Flyback</i> com controle da corrente de saída por um resistor em série com o interruptor principal.....	60
Figura 2.17 – Conversor ressonante alimentando LEDs com característica de fonte de corrente.....	61
Figura 2.18 – Comando de interruptores com circuito de controle integrado.....	62
Figura 2.19 – Exemplos de circuitos dedicados com controlador e interruptor internos.....	63
Figura 2.20 – Exemplos de controle da tensão de saída sem a utilização de optoacopladores.....	64
Figura 2.21 – Estudo sobre o desequilíbrio da corrente nos LEDs conectados em paralelo.....	66
Figura 2.22 - Desequilíbrio da corrente nos LEDs conectados em paralelo considerando a queima de um deles.....	68
Figura 2.23 – Controle da corrente nos LEDs conectados em paralelo empregando o circuito integrado LM317L.....	69
Figura 2.24 – Utilização de Diacs em paralelo com os LEDs para proteção contra a falha do dispositivo.....	70
Figura 3.1 - Sistemas de iluminação de emergência tradicionais.....	73
Figura 3.2 – Diagrama de blocos de um sistema de iluminação de emergência utilizando lâmpada fluorescente.....	74
Figura 3.3 – Sistema de iluminação de emergência permanente empregando LEDs.....	75
Figura 3.4 – Conversor <i>Boost</i> alimentando LEDs num sistema de iluminação de emergência permanente.....	76
Figura 3.5 – Conversor <i>Flyback</i> alimentando LEDs num sistema de iluminação de emergência permanente.....	77
Figura 3.6 – Conversor <i>Flyback</i> integrado aplicado a um sistema de iluminação de emergência distribuído.....	78
Figura 3.7 – Conversor <i>Flyback</i> integrado carregando a bateria.....	78
Figura 3.8 – Conversor <i>Flyback</i> integrado alimentando os LEDs através da bateria.....	78

Figura 3.9 – Baterias empregadas nos sistemas de iluminação tradicionais .....	81
Figura 3.10 – Baterias de Ni-Cd e Ni-MH normalmente empregadas em equipamentos portáteis. ....	82
Figura 3.11 – Baterias de Li-Ion e suas características. ....	83
Figura 4.1 - Circuito proposto para a lâmpada compacta empregando LEDs de alto-brilho... ..	86
Figura 4.2 – Forma de onda da corrente no indutor operando no modo de condução descontínua. ....	89
Figura 4.3 – Gráfico relacionando a tensão de saída com os possíveis valores de indutância para o projeto. ....	92
Figura 4.4 – Conversor <i>Buck</i> e carregador da bateria.....	95
Figura 4.5 – Conversor <i>Boost</i> alimentando os LEDs através da bateria. ....	96
Figura 4.6 – Circuito proposto.....	99
Figura 4.7 – Gráfico relacionando a razão cíclica e os possíveis valores de tensão de entrada .....	100
Figura 4.8 – Gráfico relacionando a ondulação da corrente e os possíveis valores de tensão de entrada .....	101
Figura 5.1 – Tensão no resistor $R_{SENSE}$ para 49 LEDs .....	104
Figura 5.2 – Tensão e corrente aplicada aos 49 LEDs. ....	104
Figura 5.3 – Tensão e corrente no interruptor do NCP1013. ....	104
Figura 5.4 – Tensão no resistor $R_{SENSE}$ para 35 LEDs (2 Diacs em funcionamento).....	105
Figura 5.5 – Tensão e corrente aplicado aos 35 LEDs (2 Diacs em funcionamento) .....	105
Figura 5.6 – Tensão no resistor $R_{SENSE}$ para 36 LEDs .....	105
Figura 5.7 – Tensão e corrente aplicado aos 36 LEDs .....	106
Figura 5.8 – Protótipo do circuito.....	106
Figura 5.9 – Protótipo da lâmpada com 49 LEDs. ....	106
Figura 5.10 – Protótipo da lâmpada com 36 LEDs. ....	107
Figura 5.11 – Corrente aplicada aos LEDs.....	108
Figura 5.12 – Tensão no barramento e corrente no interruptor do <i>Buck</i> .....	108
Figura 5.13 – Corrente no indutor do <i>Buck</i> . ....	109
Figura 5.14 – Tensão e corrente no interruptor do <i>Boost</i> .....	109
Figura 5.15 – Tensão e corrente na bateria durante a carga .....	109

Figura 5.16 – Tensão no barramento para 90 V <sub>CA</sub> a 240 V <sub>CA</sub> e corrente nos LEDs.....	110
Figura 5.17 – Tensão na bateria (de 3,6 V até 3 V) e corrente nos LEDs .....	110
Figura 5.18 – Tensão e corrente nos LEDs alimentados pela rede.....	110
Figura 5.19 – Protótipo da lâmpada.....	111
Figura 5.20 – Exemplos de lâmpadas compactas empregando LEDs de alto-brilho .....	114
Figura 5.21 – Forma de onda da tensão e corrente de entrada do sistema de iluminação.....	117
Figura 5.22 – Forma de onda da tensão e corrente de entrada do sistema de iluminação proposto sem utilizar o capacitor de barramento.....	117
Figura 5.23 – Forma de onda da tensão e corrente nos LEDs para o sistema de iluminação proposto sem utilizar o capacitor de barramento.....	117



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Comparativo entre algumas fontes de luz.....	33
Tabela 1.2 – Índice de reprodução de cores adequado para cada ambiente .....	33
Tabela 1.3 – Comparativo entre algumas fontes de luz e sua eficácia luminosa .....	34
Tabela 1.4 – Comparativo entre algumas fontes de luz e sua vida média.....	35
Tabela 1.5 – Taxa de conversão de energia por watt para algumas fontes de luz branca .....	36
Tabela 1.6 – Iluminância adequada para cada grupo de tarefas visuais.....	39
Tabela 4.1 – Componentes utilizados e características do sistema .....	93
Tabela 4.2 – Componentes utilizados e características do sistema .....	102
Tabela 5.1 – Comparativo entre potência e iluminância das lâmpadas analisadas .....	112
Tabela 5.2 – Custo dos componentes para uma lâmpada compacta com 49 LEDs de alto-brilho.....	115

# SUMÁRIO

---

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	19
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>ILUMINAÇÃO SEMICONDUTORA</b> .....	24
<b>1.1 Diodos Emissores de Luz</b> .....	24
1.1.1 Princípio de Funcionamento dos LEDs .....	25
1.1.2 Características Construtivas dos LEDs .....	26
1.1.3 Características Elétricas.....	30
<b>1.2 Conceitos de Iluminação</b> .....	31
<b>1.3 Sistemas de Iluminação Empregando LEDs</b> .....	40
<b>1.4 OLED – O brilho do futuro</b> .....	43
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>ACIONAMENTO DE LEDS</b> .....	44
<b>2.1 Formas de Onda Aplicadas à LED</b> .....	44
<b>2.2 Circuitos para Acionamento de LEDs</b> .....	46
2.2.1 Resistor Série.....	47
2.2.2 Capacitor Série .....	48
2.2.3 Conversores Lineares .....	49
2.2.4 Conversores CC-CC .....	51
2.2.4.1 Conversor <i>Buck</i> .....	51
2.2.4.2 Conversor <i>Boost</i> .....	52
2.2.4.3 Conversor <i>Buck-Boost</i> .....	53
2.2.4.4 Conversor <i>Buck</i> Quadrático .....	54
2.2.4.5 Conversores <i>Ćuk</i> , <i>SEPIC</i> e <i>Zeta</i> .....	55
2.2.4.6 Conversor <i>Flyback</i> .....	57
<b>2.3 Métodos de Controle da Corrente</b> .....	57
<b>2.4 Conexão dos LEDs</b> .....	65

2.4.1 Sistema de Proteção Contra a Falha do LED em Ligação Série .....	70
--	----

### **CAPÍTULO 3**

<b>SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO DE EMERGÊNCIA</b> .....	72
<b>3.1 Sistemas de Iluminação de Emergência Tradicionais</b> .....	72
<b>3.2 Sistemas de Iluminação de Emergência Empregando LEDs</b> .....	74
<b>3.3 Requisitos Exigidos pelas Normas</b> .....	79
3.3.1 Exigências da Norma Brasileira (NBR 10898) .....	79
3.3.2 Internacional IEEE (IEEE Std 446-1995) .....	80
3.3.3 Considerações de Projeto .....	81
<b>3.4 Características das Baterias Aplicadas a Sistemas de Iluminação de Emergência</b>	81

### **CAPÍTULO 4**

<b>SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PROPOSTOS</b> .....	84
<b>4.1 Lâmpada Compacta Empregando LEDs de Alto-Brilho</b> .....	84
<b>4.2 Lâmpada Compacta Empregando LEDs de Potência com Sistema de Iluminação de Emergência Integrado</b> .....	94

### **CAPÍTULO 5**

<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b> .....	103
<b>5.1 Lâmpada Compacta Empregando LEDs de Alto-Brilho</b> .....	103
<b>5.2 Lâmpada Compacta Empregando LEDs de Potência com Sistema de Iluminação de Emergência Integrado</b> .....	107
<b>5.3 Avaliação da Idéia Proposta</b> .....	111

<b>CONCLUSÃO</b> .....	119
------------------------	-----

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	122
---	-----

<b>APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES ORIUNDAS DO TEMA DA DISSERTAÇÃO</b> .....	128
---	-----

<b>ANEXO - FOLHAS DE ESPECIFICAÇÃO</b> .....	130
--	-----

## INTRODUÇÃO

---

A luz é um item primordial para a vida dos seres humanos. Os hábitos adquiridos pelo homem estão ligados à iluminação, seja ela proporcionada pelo sol ou pela iluminação artificial.

O fogo é considerado como a primeira fonte de luz artificial, criado pelo homem ainda na Era Pré-Histórica. Até este momento, o período de trabalho era limitado à luz solar. Desde então, o homem busca desenvolver novas fontes de iluminação, visando a melhoria da eficiência e qualidade. Entretanto, na época do Império Romano, a evolução destas fontes ainda era restrita ao processo de queima, seja ela com combustíveis (lâmpada a óleo) ou parafinas (velas) (Dalla Costa, 2004b; Bowers, 1980). Dando seqüência a esta evolução, em 1874, Amié Argand desenvolveu um sistema mais eficiente e com maior luminosidade que os anteriores, conhecido como lampião (Costa, 2005).

Porém, no início do século XVIII, pesquisas evidenciaram o uso da energia elétrica para geração de luz, através de uma máquina de descarga incandescente em um vácuo imperfeito. E, em 1879, foi criada a primeira lâmpada elétrica considerada comercialmente viável. Esta lâmpada, desenvolvida por Thomas Edison nos Estados Unidos e por Swan na Inglaterra, emite luz através do aquecimento de um filamento de carbono. Baseada neste princípio surge a lâmpada incandescente, utilizando filamento de tungstênio, permitindo uma potência luminosa superior à de Thomas Edison (Harris, 1993).

Desfrutando destas novas descobertas, o homem pode estender seu período produtivo e aumentar seu tempo de lazer após o pôr-do-sol, o qual colaborou com o desenvolvimento da economia, da cultura e do conhecimento científico da sociedade (Costa, 2005). Seja para proporcionar conforto, auxiliar na decoração ou estimular a atividade física, a iluminação artificial está presente em todos os locais, tanto em ambientes internos como residências, salas comerciais e indústrias; quanto externos, como parques, estacionamentos e rodovias.

Esta dependência do homem pela luz tornou os sistemas de iluminação de emergência elementos importantes, podendo ser considerados itens de segurança e atualmente, são obrigatórios em muitos ambientes. Estes equipamentos são instalados principalmente em corredores e escadarias, garagens, elevadores, restaurantes, empresas e demais ambientes públicos garantindo a iluminação durante a falta de energia elétrica. Portanto, com o aumento

das aplicações, a iluminação artificial passou a ocupar uma parcela considerável da energia elétrica gerada atualmente. Aproximadamente 17 % do consumo total de energia elétrica do país é destinado ao uso da iluminação (Costa, 2005). Este fator, juntamente com o aumento do consumo em outros segmentos, tornou o desenvolvimento de sistemas de iluminação eficientes cada vez mais importante.

As primeiras lâmpadas comercializadas foram as incandescentes. O princípio de funcionamento destas lâmpadas é baseado no aquecimento de um filamento de tungstênio através da passagem de corrente elétrica. Enquanto houver corrente elétrica circulando pelos terminais da lâmpada, este filamento se mantém aquecido tornando-se incandescente. Devido ao fato de emitir luz através do aquecimento, semelhante ao processo realizado pelo sol, a lâmpada incandescente apresenta algumas vantagens como alto índice de reprodução de cores, ou seja, reproduz de forma fiel as cores dos objetos iluminados, assim como acontece na iluminação natural. Também apresenta baixa temperatura de cor (possui uma luz com tonalidade amarelada) que para algumas aplicações pode ser mais atrativa por proporcionar um maior conforto ambiental (em dormitórios, sala de estar, etc.).

Estas lâmpadas foram utilizadas durante muitos anos principalmente em iluminação de interiores. No entanto, este é um método pouco eficaz, pois a maior parte da energia elétrica consumida é convertida em calor (aproximadamente 90%), e apenas uma reduzida parcela (8%) é convertida em luz visível (INEE, 2008). Este fato faz com que a comercialização destas lâmpadas esteja sendo abolida em alguns países (Philips, 2008). Pelo mesmo motivo, novos produtos foram sendo introduzidos no mercado. Entre eles estão as lâmpadas fluorescentes, que apresentam rendimento superior às lâmpadas incandescentes e por isso tornaram-se populares na iluminação residencial.

A lâmpada fluorescente possui um princípio de funcionamento diferente das lâmpadas incandescentes. Ela é classificada entre as lâmpadas de descarga. Nas lâmpadas de descarga, a luz é produzida pela passagem da corrente elétrica em um gás ou mistura de gases contidos em um tubo. Isto acontece quando uma tensão elevada é aplicada em seus eletrodos, vencendo a rigidez dielétrica do meio gasoso, este processo é conhecido como ignição da lâmpada. Essas lâmpadas são classificadas em função da pressão interna do bulbo, sendo as fluorescentes classificadas como lâmpadas de descarga em baixa pressão.

Comparadas às incandescentes, as fluorescentes apresentam vida útil e eficácia luminosa superiores. Não produzem calor excessivo (por isso são chamadas também de lâmpadas frias) e sua temperatura de cor geralmente é elevada (apresentam luz branca), o que estimula a atividade física, sendo uma vantagem para aplicações em ambientes como

escritórios, cozinhas, oficinas, etc. Porém, estas lâmpadas apresentam gases em sua composição que são prejudiciais ao meio ambiente quando descartadas de forma inadequada. Também necessitam de um circuito externo para acionamento, o reator, que contribui com o aumento do custo do sistema.

As lâmpadas fluorescentes tubulares possuem grande comprimento, prejudicando muitas vezes a decoração do ambiente, além disso, a necessidade de um reator externo para seu acionamento exige uma atenção especial na instalação. Isto provoca algumas críticas por arquitetos que preferem utilizar sistemas de iluminação cada vez mais discretos. Buscando solucionar este problema, foram criadas as lâmpadas fluorescentes compactas (LFC).

Por apresentarem um tamanho reduzido, reator integrado e soquete igual ao utilizado nas lâmpadas incandescentes, as fluorescentes compactas facilitaram a substituição das lâmpadas tradicionais (incandescentes) por sistemas de iluminação mais eficientes. Em 2001, após a crise energética que abalou o país, o governo federal estimulou o uso das LFC e estas conquistaram uma parcela considerável do mercado, principalmente na iluminação residencial. No entanto, o que seria uma alternativa para reduzir o consumo de energia elétrica do país tem ocasionado outro problema. A imensa procura por LFC fez com que produtos de baixa qualidade invadissem o mercado. Assim, desde o final de 2007, o governo decidiu fiscalizar os produtos, determinando que estes sejam aprovados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial (Inmetro) e pelo Selo Nacional de Conservação de Energia (ENCE) antes de serem comercializados (Ellert, 2008).

Em ambientes pequenos que necessitem de um consumo de energia reduzido, aconselha-se o uso das lâmpadas fluorescentes, principalmente em aplicações residenciais ou demais ambientes internos, substituindo as lâmpadas incandescentes. No entanto, em ambientes externos como parques, rodovias, estacionamentos e iluminação pública, o mais indicado é o uso de lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão (*High-Pressure Sodium*, HPS).

A lâmpada HPS é a mais eficiente dentre as lâmpadas de descarga em alta pressão, e sua vida útil é superior à das lâmpadas incandescentes e fluorescentes. Possuem alta eficácia luminosa (150 lm/W) e seu tempo médio de uso pode atingir até 32.000 horas em alguns modelos. Para seu acionamento, também é necessário um reator específico. Sua principal desvantagem está no baixo índice de reprodução de cores, ou seja, as cores dos objetos iluminados passam a ter um aspecto distorcido, diferentes do real. Porém, para aplicações onde a reprodução fiel das cores não é tão importante quanto o baixo consumo de energia e a quantidade de luz emitida, o uso deste tipo de lâmpada é aceitável. Além disso, sua elevada

vida útil reduz consideravelmente o custo de manutenção em um sistema de iluminação pública de uma cidade (Pinto, 2007).

No início dos anos 60, surgiram os Diodos Emissores de Luz (*Light Emitting Diode*, LED). O LED é um dispositivo semicondutor que tem como princípio de funcionamento a eletroluminescência, emitindo luz através da combinação de elétrons e lacunas em um material sólido (Sá Junior, 2007a). Possuem a característica de emitir luz em uma faixa específica do espectro visível, principalmente nas cores azul, verde, vermelho e branco e suas combinações. Também são encontrados LEDs operando na faixa de ultravioleta e infravermelho.

Primeiramente, eram utilizados em iluminação indicativa (indicando quando os equipamentos elétricos e eletrônicos estavam ligados), mas o desenvolvimento de LEDs mais potentes e com maior luminosidade tornou possível sua utilização em outras aplicações como semáforos, iluminação de emergência, lanternas e iluminação de ambientes (Bullough, 2003). Atualmente, estes dispositivos apresentam maior eficácia luminosa agregada à longa vida útil comparados às lâmpadas fluorescentes (Cervi, 2005a). Além disso, o índice de reprodução de cores e a temperatura de cor são satisfatórios para o uso em iluminação de interiores. Sua discricção é outra vantagem na arquitetura por serem dispositivos de tamanho reduzido.

Os LEDs, no entanto, não podem ser ligados diretamente à rede elétrica, pois operam com níveis de tensão diferentes dos sinais fornecidos pela rede. Assim, é necessário desenvolver um circuito para prover o funcionamento adequado destes dispositivos. O projeto deste conversor deve resultar ainda em um produto que seja compacto, eficiente e de baixo custo, para que as vantagens oferecidas pelos LEDs não sejam limitadas pelo uso de um circuito de baixa qualidade.

Os LEDs normalmente são alimentados em corrente contínua, possuem tensão de condução baixa, e não necessitam de ignição, diferente das lâmpadas fluorescentes. Estas características tornam-se vantajosas quando se deseja alimentá-los através de uma bateria. Além disso, a alta eficácia luminosa permite a utilização de baterias pequenas e/ou uma maior autonomia do sistema. Devido a estes fatores, a utilização de LEDs torna-se um atrativo para a aplicação em iluminação de emergência.

Para que os sistemas de iluminação utilizando LEDs possam ser difundidos e empregados principalmente na iluminação residencial é fundamental que não haja grandes alterações na instalação elétrica existente. Desta forma, o objetivo deste trabalho consiste em desenvolver um sistema de iluminação compacto que permita substituir diretamente as lâmpadas incandescentes e fluorescentes compactas por LEDs. O uso do soquete E-27 (o

mesmo utilizado nas lâmpadas incandescentes tradicionais), facilita ao usuário a substituição pela lâmpada a LED sem qualquer modificação na instalação elétrica.

Além disso, é proposto um sistema de iluminação de emergência integrado a esta lâmpada, permitindo a utilização do mesmo equipamento nas atividades diárias, alimentada pela rede elétrica, e sob uma possível falta no fornecimento de energia, além da vantagem de fácil instalação. Para tanto, esta dissertação é organizada da seguinte forma:

- O Capítulo 1 faz uma abordagem a respeito dos LEDs apresentando sua classificação, princípio de funcionamento, características construtivas, aspectos físicos e elétricos. São mostradas algumas aplicações e produtos existentes no mercado empregando estes dispositivos. Finalmente, são apresentados alguns conceitos e considerações sobre projetos luminotécnicos essenciais para o entendimento do sistema proposto.

- No Capítulo 2 é realizado um estudo sobre alguns circuitos eletrônicos empregados em iluminação, enfatizando a iluminação à LED, existentes na literatura. São analisadas suas principais características e aplicações, funcionamento, volume e número de componentes. Também são descritas algumas formas de onda empregadas na alimentação de LEDs e sua influência na eficiência luminosa destes dispositivos, os métodos de controle de corrente e os tipos de conexões utilizadas no acionamento de um conjunto de LEDs. Por fim, é proposta uma solução para o principal problema da ligação em série de um grupo de LEDs.

- O Capítulo 3 aborda os sistemas de iluminação de emergência. São apresentados alguns exemplos e circuitos empregando LEDs. São analisadas algumas características, aplicações, vantagens e desvantagens de cada topologia. Posteriormente, são citadas as especificações mínimas necessárias para o sistema proposto atender à norma brasileira e internacional referente a estes equipamentos e as características das baterias possíveis de ser empregadas.

- O Capítulo 4 descreve os circuitos propostos e o projeto dos componentes. Baseado na revisão bibliográfica feita e nos estudos abordados nos capítulos anteriores são apresentadas três lâmpadas compactas empregando LEDs, uma delas com um sistema de iluminação de emergência integrado. São mencionadas as características dos circuitos, bem como detalhes dos projetos.

- O Capítulo 5 apresenta os resultados experimentais e as considerações finais sobre o trabalho. Os circuitos propostos foram implementados e a luminosidade emitida pelas lâmpadas foi medida. Um comparativo com as lâmpadas incandescentes e fluorescentes é apresentado. Também são analisadas algumas características como custo, vantagens e desvantagens dos circuitos desenvolvidos, comparados com os existentes no mercado.



## CAPÍTULO 1

# ILUMINAÇÃO SEMICONDUTORA

A constante busca por sistemas de iluminação mais discretos e eficientes levou ao desenvolvimento de novas fontes de luz. Os semicondutores, que durante anos foram utilizados em sistemas eletrônicos para acionamento e controle de lâmpadas, tornaram-se fontes luminosas capazes de substituí-las em muitas aplicações. Por serem dispositivos pequenos e eficientes, a iluminação semicondutora tem atraído pesquisadores e fabricantes para o desenvolvimento de novos produtos empregando esta tecnologia.

Neste capítulo são apresentados o princípio de funcionamento do diodo emissor de luz e suas características físicas, elétricas e construtivas. Também é realizado um comparativo entre os LEDs e outras fontes de luz. Em função disto, alguns conceitos luminotécnicos são descritos para facilitar o entendimento das grandezas e características salientadas. Por fim, são mostrados alguns exemplos de produtos e aplicações empregando estes dispositivos.

### 1.1 Diodos Emissores de Luz

Os Diodos Emissores de Luz (LEDs) são dispositivos semicondutores que surgiram por volta da década de 60 (Bullough, 2003). Assim como os diodos tradicionais, o LED permite a passagem de corrente elétrica em apenas um sentido. Esta polarização direta resulta na emissão de luz. Os LEDs podem ser classificados em três categorias: indicativos, de alto brilho e de potência. A Figura 1.1 mostra um exemplo de cada grupo.



Figura 1.1 - Classificação dos LEDs. Adaptação das fotos fornecidas em (Open Stock Photography, 2008).

Esta classificação se fez devido à evolução dos LEDs e sua área de aplicação. No início, estes dispositivos eram utilizados somente em iluminação indicativa, principalmente em equipamentos elétricos e eletrônicos sinalizando se certas funções destes produtos estavam ativadas ou desativadas. Atualmente, eles continuam sendo utilizados para este fim, no entanto, o desenvolvimento desta tecnologia expandiu sua aplicação para iluminação de pequenas áreas, como painéis de automóveis, visores de rádios, etc.

O avanço das pesquisas resultou em LEDs mais potentes e com maior eficácia luminosa tornando possível sua utilização em sinalizadores e iluminação decorativa. Desde então, os LEDs têm sido empregados principalmente em semáforos, sistemas de iluminação de emergência, lanternas, iluminação de jardins e fachadas. O constante aumento do fluxo luminoso emitido por estes dispositivos, aliado à descoberta da tecnologia para a emissão de luz branca, já na década de 90 (Bullough, 2003), permitiu sua utilização em iluminação de ambientes. A Figura 1.2 mostra alguns produtos empregando LEDs.



Figura 1.2 – Aplicação dos LEDs. Adaptação de fotos fornecidas em Stock.xchng (Stock.xchng, 2008).

### 1.1.1 Princípio de Funcionamento dos LEDs

O LED é composto por dois materiais distintos formando uma junção P-N, como acontece em alguns dispositivos semicondutores. Nesta junção, o lado P contém essencialmente lacunas (ou falta de elétrons) enquanto o lado N contém essencialmente cargas negativas (excesso de elétrons). Quando polarizado diretamente, os elétrons e lacunas se movimentam em direção ao mesmo ponto. Assim, a combinação entre estes elementos resulta na emissão de fótons (Bullough, 2003). A Figura 1.3 mostra um diagrama do processo.

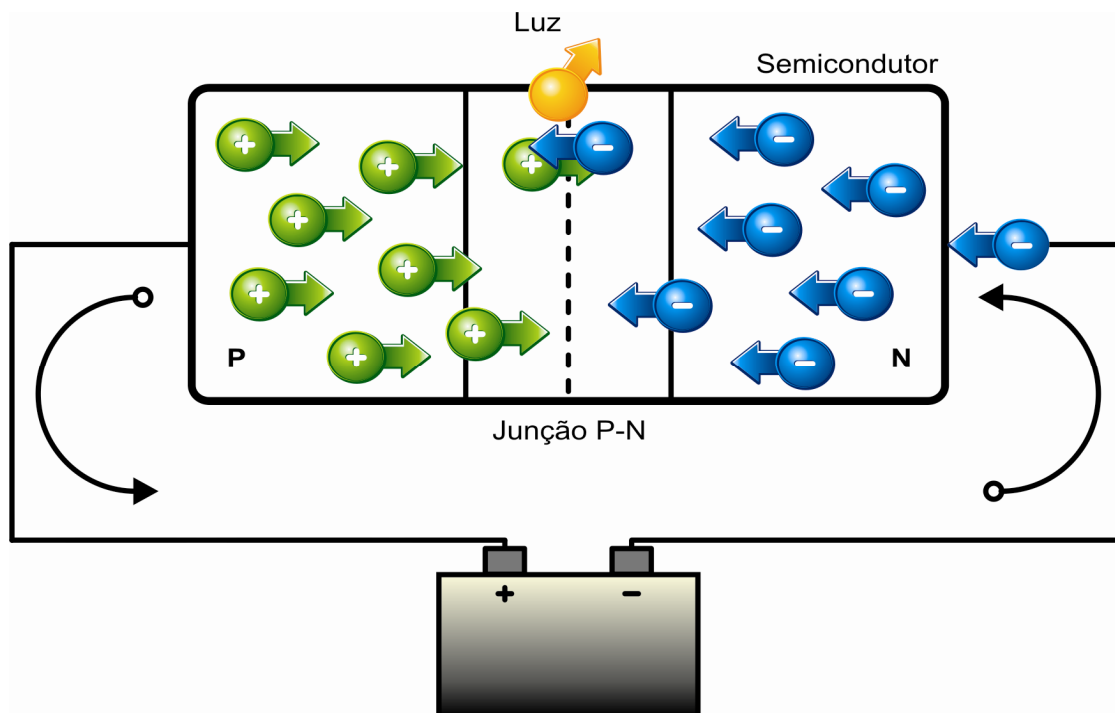


Figura 1.3 – Processo de emissão de luz de um LED.

### 1.1.2 Características Construtivas dos LEDs

Um dos grandes desafios da arquitetura atual é proporcionar uma iluminação de qualidade sem chamar a atenção para a fonte de luz. Assim, os profissionais de arquitetura têm demonstrado interesse na utilização do LED principalmente pelo fato de ele ser um dispositivo pequeno, comparado às lâmpadas tradicionais. Além disso, é possível obter uma iluminação colorida sem a necessidade de vidros ou lentes complementares que comprometem a eficiência do sistema.

A luz emitida pelo LED é monocromática e o comprimento de onda está relacionado ao tipo de material utilizado na composição do semicondutor. A dopagem do cristal pode ser feita com gálio, alumínio, arsênio, fósforo, índio e nitrogênio. Esta variedade de elementos químicos e a combinação deles permitem a emissão de luz em uma ampla faixa do espectro (Cervi, 2005b; Bullough, 2003). A Figura 1.4 mostra o espectro de radiação e as cores correspondentes. A Figura 1.5 mostra a característica dos diferentes modelos de LEDs quanto ao comprimento de onda emitido (Luxeon, 2008).

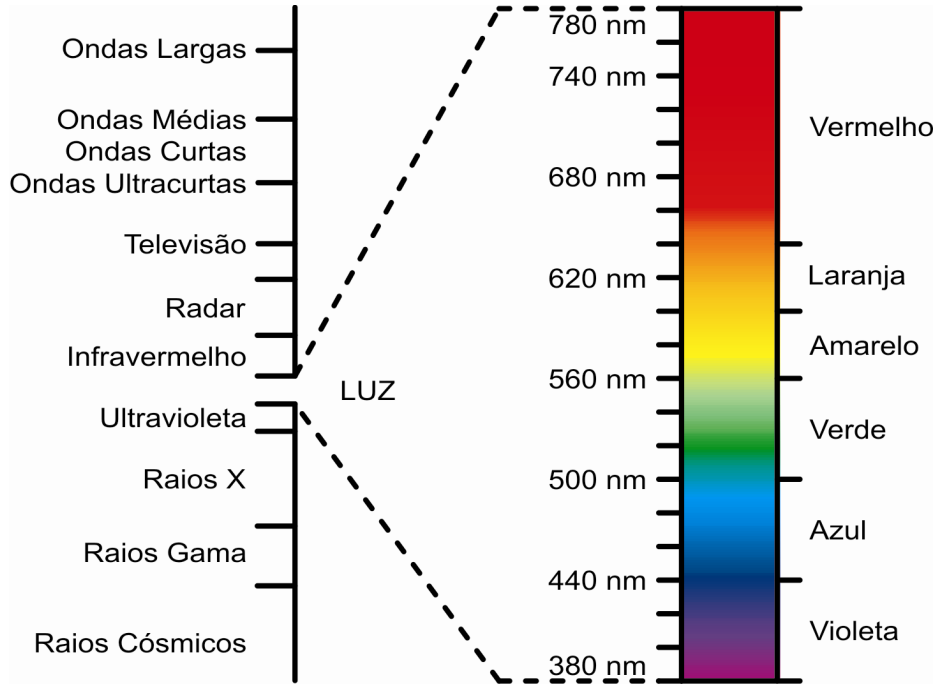


Figura 1.4 - Espectro de radiação e as cores correspondentes em relação ao comprimento de onda.

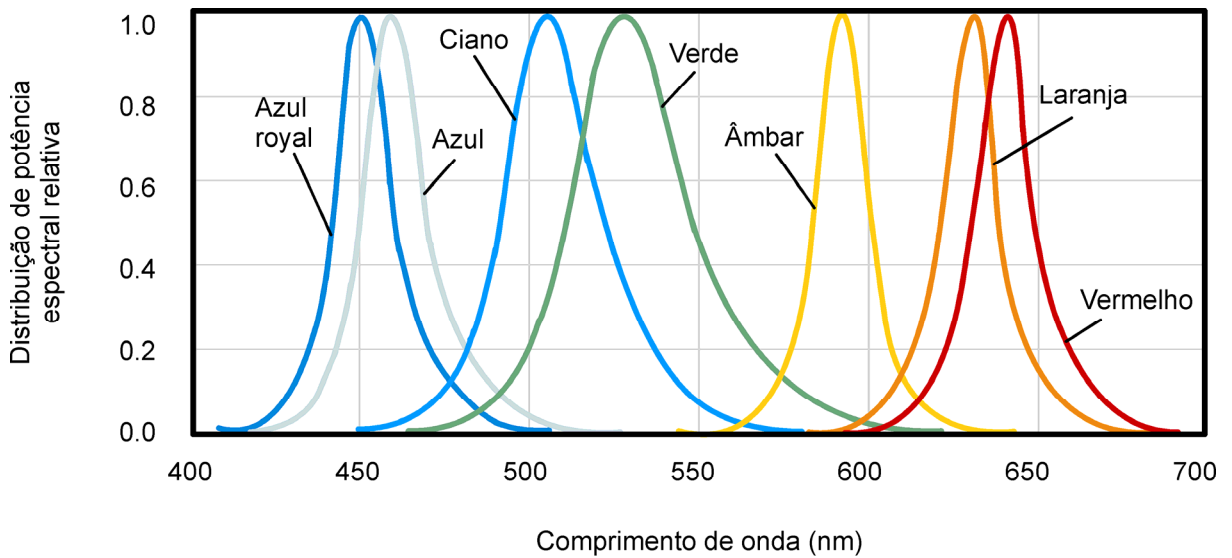


Figura 1.5 – Diferentes modelos de LEDs e seus respectivos comprimentos de onda.

Os modelos de LEDs mais conhecidos utilizam os compostos AlGaInP (*Aluminum Gallium Indium Phosphide*), formado por alumínio, gálio, índio e fósforo, e InGaN (*Indium Gallium Nitride*), formado por índio, gálio e nitrogênio. O primeiro composto é responsável pela emissão de luz vermelha, laranja e amarela e o segundo pelas tonalidades verdes e azuis (Bullough, 2003).

A luz branca pode ser obtida de várias maneiras (Cervi, 2005b). O método mais simples para isso é a utilização de uma camada de fósforo na superfície de um LED azul. Assim, a luz azul quando atravessada pela camada de fósforo torna-se amarela. O restante da luminosidade azulada é combinado com a luz amarela resultando em luz branca (Cervi, 2005b; Bullough, 2003).

Outra maneira é através da mistura de alguns LEDs coloridos. A combinação das cores vermelha, verde e azul resulta na cor branca. Assim, com utilização de três LEDs coloridos, ou apenas um LED RGB (do inglês *Red*, *Green* e *Blue*), é possível obter um feixe luminoso branco ou de qualquer tonalidade de cor intermediária a estas três simplesmente alterando a intensidade luminosa de cada LED (Cervi, 2005b; Bullough, 2003). Esta característica faz dos LEDs elementos importantes na decoração de ambientes.

Outra característica que contribui para isto é seu feixe de luz direcionado, semelhante às lâmpadas dicróicas. O ângulo de abertura da lente de um LED pode variar bastante. Os LEDs de alto-brilho normalmente têm um ângulo de abertura de aproximadamente  $20^\circ$  a  $30^\circ$ , enquanto nos LEDs de potência este valor é em torno de  $150^\circ$ . A Figura 1.6 mostra a intensidade luminosa de um LED de potência em relação ao ângulo de emissão (Luxeon, 2008).

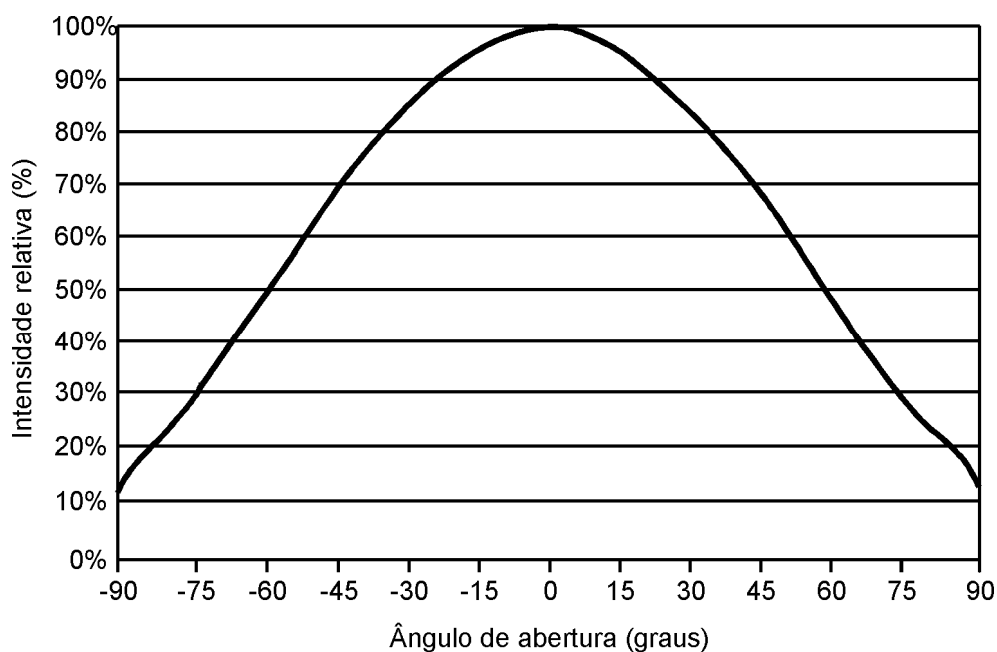


Figura 1.6 – Intensidade luminosa de um LED de potência em relação ao ângulo de emissão (Luxeon, 2008).

No centro do LED a intensidade luminosa é máxima, porém, ela decresce rapidamente quando o medidor é deslocado para os lados. A característica da iluminação direcional foi implantada no LED devido às suas aplicações iniciais. A luz era focada com uma cápsula de epóxi, e este era o projeto óptico mais eficaz para os LEDs indicadores. Porém, essa não é uma característica inerente ao semicondutor, que poderia ser fabricado para emitir luz em várias direções (Bullough, 2003).

No entanto, o fluxo luminoso dirigido proveniente de um LED pode representar um maior aproveitamento da energia dependendo da aplicação considerada. Por isso, a maioria dos LEDs de alto-brilho é especificada pela sua intensidade luminosa. Esta grandeza, medida em candelas (cd), depende do ângulo de emissão da luz. Já LEDs de potência, por possuírem um ângulo de abertura superior, são especificados através de seu fluxo luminoso, em lúmens (lm), da mesma forma que as lâmpadas tradicionais, que emitem luz em todas as direções.

Dentre as diversas vantagens da utilização de LEDs em sistemas de iluminação estão sua alta eficácia luminosa e elevada vida útil. Atualmente, esta eficácia atinge 100 lm/W, sendo superior às lâmpadas incandescentes (15 lm/W) e fluorescentes (80 lm/W) (OSRAM, 2007). Devido à constante pesquisa em fontes de iluminação semicondutoras e o crescente interesse por parte dos profissionais na utilização de LEDs espera-se que esta eficácia aumente ainda mais.

Em 2002, pesquisadores estimaram a eficácia luminosa de um LED branco para 2007 em 75 lm/W e para 2012 em 150 lm/W (Zorpette, 2002). Porém, o avanço desta tecnologia evoluiu rapidamente e atualmente a eficácia luminosa do LED já está muito próxima de ultrapassar os valores estimados para 2012. A empresa Cree, fabricante de dispositivos semicondutores, divulgou uma eficácia luminosa de 131 lm/W em seu produto (Cree, 2006; LEDs Magazine, 2006). Outra fabricante de LEDs, a Nichia Corporation, afirma ter alcançado 138 lm/W (Narukawa, 2006). Estes valores são próximos à eficácia luminosa apresentada pelas lâmpadas HPS. Por isso, a possibilidade de empregar LEDs inclusive em iluminação pública já é considerada. No entanto, existe um limite para este avanço, o valor teórico máximo para a eficácia luminosa de um LED branco é definido entre 300 lm/W e 400 lm/W (Zorpette, 2002). Além disso, a potência máxima em um único LED ainda não é alta o suficiente para substituir de forma direta as lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão.

Outra característica importante não só para iluminação pública como para qualquer sistema de iluminação é o tempo de uso da lâmpada ou fonte luminosa. A vida útil de um LED pode atingir até 50.000 horas (Luxeon, 2008). Este valor é muito superior se comparado ao das lâmpadas incandescentes e fluorescentes compactas, que alcançam 1.000 horas e 8.000

horas de uso, respectivamente (OSRAM, 2007). Portanto, esta característica contribui para a redução do custo de manutenção do sistema de iluminação.

O material utilizado no revestimento do LED o torna mais resistente a choques e vibrações, diferentemente das lâmpadas incandescentes e fluorescentes que são protegidas apenas por bulbos ou tubos de vidros de fina espessura. Além disso, os LEDs não possuem gás ou filamentos em seu interior e não necessitam de pulso de tensão elevado para ignição.

Pelo contrário, os LEDs permitem um acionamento suave, com potência abaixo da nominal. Isto não é possível em sistemas de iluminação empregando lâmpadas de descarga, onde a redução da intensidade luminosa (dimerização) só pode ser feita depois de ocorrida a ignição na potência máxima da lâmpada (Cervi, 2005b). Esta característica é prejudicial em alguns casos como, por exemplo, na iluminação interna de um ônibus. Nesta aplicação, é comum o uso de lâmpadas fluorescentes que normalmente são acionadas, à noite, quando o veículo se aproxima de seu destino. Assim, os passageiros são acordados e submetidos à luminosidade máxima da lâmpada. Isto causa um desconforto ao olho humano e o aumento gradativo da intensidade luminosa seria mais indicado para esta situação.

### 1.1.3 Características Elétricas

Outra característica importante que reforça a utilização do LED em sistemas embarcados, ou qualquer outro equipamento alimentado por baterias, é o fato de ele apresentar baixa tensão de condução, entre 2,5 V e 4 V, além de operar com corrente contínua. A intensidade luminosa do dispositivo é diretamente proporcional à sua corrente de polarização direta. Portanto, o controle da intensidade luminosa do LED pode ser feito através do controle da corrente.

A temperatura de operação do LED influencia no seu funcionamento. Este semicondutor apresenta uma resistência com coeficiente de temperatura negativo. Assim, o aumento da temperatura resulta em um decréscimo da resistência e, conseqüentemente, um aumento da corrente. Esta, por sua vez, provoca o aquecimento do LED. Por isso, a corrente deve ser controlada para que este ciclo tenha um limite.

Portanto, os LEDs não podem ser ligados diretamente à rede elétrica, pois os sinais de tensão e corrente de operação são diferentes dos sinais fornecidos pela concessionária de energia elétrica. Então, se faz necessário o uso de um circuito auxiliar para adequar esses sinais e limitar a corrente aplicada aos LEDs. Este circuito é conhecido como *driver*.

## 1.2 Conceitos de Iluminação

Um sistema de iluminação de qualidade deve empregar a lâmpada correta levando em consideração a aplicação, o ambiente a ser iluminado e a atividade a ser desenvolvida nele. A uniformidade da luz, a temperatura de cor e o índice de reprodução de cores também são características importantes no projeto luminotécnico do ambiente.

A temperatura de cor de uma lâmpada é a grandeza que expressa a aparência da cor da luz emitida (Rodrigues, 2002). A luz branca natural, produzida pelo sol a céu aberto ao meio-dia possui uma temperatura de cor próxima de 5800 K. Lâmpadas com temperatura de cor abaixo deste valor apresentam uma luz amarelada, como as incandescentes. Para valores acima, a luz emitida apresenta uma tonalidade azulada, como acontece em algumas lâmpadas de descarga. A Figura 1.7 mostra a escala da temperatura de cor relacionando exemplos de lâmpadas comerciais (OSRAM, 2007).

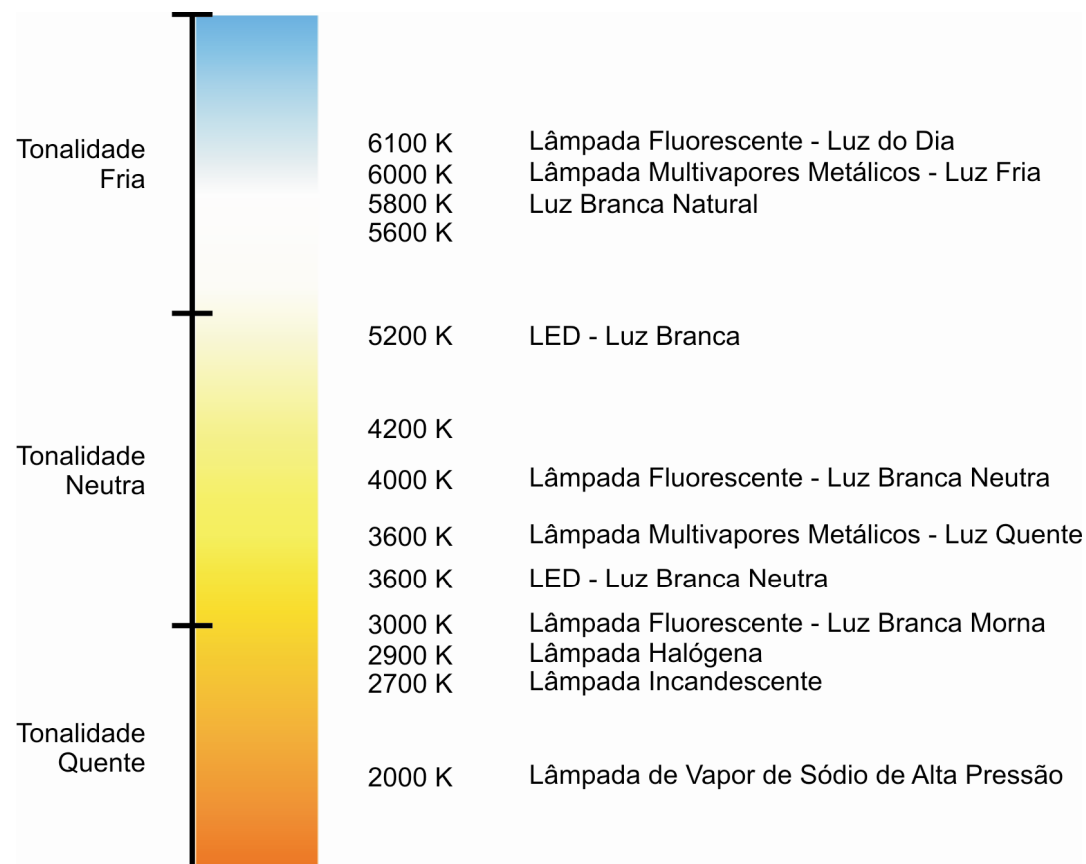


Figura 1.7 – Temperatura de cor de diferentes fontes de luz.



A cromaticidade da luz afeta o corpo humano de diversas formas, ressaltando sensações como fome, sono, ansiedade, etc. A iluminação com cores de tonalidade fria induz a produtividade do ambiente. Isto porque a luz branca desperta o ser humano. Por este motivo, as lâmpadas frias são aconselháveis para locais de trabalho como cozinha, academia, escritórios e fábricas. Em lugares onde se deseja proporcionar conforto, como dormitórios, sala de jantar e sala de espera, a iluminação com tonalidade quente é mais aconselhável. Pois a luz amarelada relaxa e torna o ambiente mais agradável (Silva, 2002; ASSIST, 2007).

Muitos restaurantes e lojas aproveitam este recurso como forma de manter o cliente por mais tempo no recinto e com isso oferecer seus serviços com melhor qualidade. Também, alguns tratamentos médicos têm sido realizados através das cores. A iluminação colorida pode ser utilizada em clínicas e hospitais para auxiliar na recuperação de pacientes.

Por isso, a escolha da lâmpada adequada depende do ambiente a ser iluminado. Uma vantagem do LED com relação às demais fontes de luz é o fato de ele possuir diferentes modelos com uma larga faixa de temperatura de cor (de 2.670 K até 10.000 K) (Luxeon, 2008). Esta característica estende sua aplicação para diversos ambientes. O mesmo não acontece com algumas lâmpadas, que emitem luz com uma tonalidade estreita da escala, ou ainda apresentam outras características que limitam seu uso a determinados lugares. A lâmpada de vapor de sódio em alta pressão, por exemplo, apesar de possuir uma luz amarelada, não é aconselhada para ambientes internos como dormitórios, restaurantes ou lojas. Isto porque o índice de reprodução de cores destas lâmpadas é baixo.

O índice de reprodução de cores (IRC) é a relação entre a cor real do objeto e a cor aparente quando submetido a uma fonte de luz artificial (Rodrigues, 2002). A referência adotada para este conceito é algo muito próximo à luz produzida pelo sol em um dia claro de verão ao meio-dia (Silva, 2002). Portanto, quanto mais próximo de 100% for o IRC de uma lâmpada, mais próximo sua luz estará da referência, reproduzindo de forma fiel as cores do objeto iluminado. A Tabela 1.1 mostra o IRC de algumas fontes luminosas (Rodrigues, 2002; Luxeon, 2006).

Tabela 1.1 – Comparativo entre algumas fontes de luz e seus índices de reprodução de cores

<b>Fonte de Luz</b>	<b>IRC (%)</b>
Incandescente	100
Halógenas	100
Fluorescente Compacta	80
Vapor Metálico	70
Mista	50
Mercúrio	40
Sódio	25
LED Branco	70 - 90

Fonte: Rodrigues, 2002; Luxeon, 2006.

Através dos dados citados é possível perceber que o IRC independe da temperatura de cor, pois tanto a lâmpada de vapor de sódio quanto a incandescente, apresentam temperatura de cor semelhante, no entanto os índices de reprodução de cores são bem diferentes. Isto torna o foco de aplicação destas lâmpadas bem distinto. A Tabela 1.2 mostra alguns níveis de IRC ideais para cada ambiente (Silva, 2002).

Tabela 1.2 – Índice de reprodução de cores adequado para cada ambiente

<b>Classificação</b>	<b>Qualificação</b>	<b>IRC (%)</b>	<b>Ambiente / Aplicação</b>
Nível I	Excelente	90 – 100	Testes de cor, escritórios, residências, lojas, floriculturas
	Muito Bom	80 – 89	
Nível II	Bom	70 – 79	Áreas de circulação, escadas, oficinas, ginásios esportivos
	Razoável	60 – 69	
Nível III	Regular	40 – 49	Depósitos, postos de gasolina, pátios industriais
Nível IV	Insuficiente	20 - 39	Vias de tráfego, canteiros de obras, estacionamentos

Fonte: Silva, 2002.

O fato de possuir um baixo IRC não diminui a importância dos sistemas de iluminação empregando lâmpadas HPS. Isto porque estas lâmpadas apresentam uma elevada eficácia luminosa, característica muito importante principalmente para iluminação pública (Marchesan, 2007).

A eficácia luminosa de uma lâmpada representa a capacidade de emissão do fluxo luminoso com relação à potência necessária para realizar este processo (Costa, 2005). O fluxo luminoso representa a potência fornecida por uma fonte de luminosa, por segundo, em todas as direções sob forma de luz (Rodrigues, 2002). Sua unidade é o lúmen. Portanto, a eficácia luminosa medida é dada em lúmens por watt (lm/W). A Tabela 1.3 mostra a eficácia luminosa de algumas fontes luminosas.

Tabela 1.3 – Comparativo entre algumas fontes de luz e sua eficácia luminosa

<b>Fonte Luminosa</b>	<b>Eficácia Luminosa (lm/W)</b>
Incandescente	10 – 15
Halógenas	15 – 25
Mista	20 – 35
Vapor de Mercúrio	45 – 55
Fluorescente Tubular	55 – 75
Fluorescente Compacta	50 – 80
Vapor Metálico	65 – 90
Vapor de Sódio	80 – 140
LEDs	40 - 130

A eficácia luminosa dos LEDs de potência normalmente é fornecida pelo fabricante em lúmens por watt, como ocorre com as demais lâmpadas. Porém, LEDs de alto-brilho, por emitirem um feixe luminoso em um ângulo de abertura pequeno, são especificados através da sua intensidade luminosa, medida normalmente em candelas (cd). Esta grandeza é a intensidade do fluxo luminoso de uma fonte de luz projetado em uma determinada área.

Contudo, o acúmulo de poeira sobre a superfície da lâmpada ou do refletor, ou ainda a própria depreciação do fluxo luminoso da fonte de luz pode causar uma redução na luminosidade do ambiente. Assim, o projeto luminotécnico deve prever a depreciação do fluxo luminoso do sistema de iluminação durante sua utilização.

O tempo de uso de uma fonte de luz é classificado de três maneiras diferentes (Silva, 2002): vida útil, vida mediana e vida média. A vida útil é a mais utilizada pelos fabricantes e considera o número de horas que a fonte operou até que a luminosidade seja reduzida a 70 % do valor inicial, considerando o efeito das respectivas falhas ocorridas neste período. A vida mediana considera o tempo de funcionamento de uma quantidade significativa de lâmpadas até que 50 % delas permaneçam acesas. Já a vida média calcula a média aritmética do tempo de duração de cada lâmpada ensaiada. Todas as grandezas são medidas em horas. A Tabela 1.4 mostra a vida média de algumas fontes de luz (Silva, 2002; OSRAM, 2007).

Tabela 1.4 – Comparativo entre algumas fontes de luz e sua vida média

<b>Fonte Luminosa</b>	<b>Vida Média (horas)</b>
LEDs	50000
Vapor de Sódio	32000
Fluorescente Trifósforo T5	16000
Vapor Metálico	15000
Mercúrio	15000
Mista	10000
Fluorescente Compacta	8000
Halógena	2000
Incandescente	1000

Fonte: Silva, 2002; OSRAM, 2007.

Os LEDs possuem uma vida útil elevada, porém esta característica pode ser drasticamente reduzida se a instalação ou a luminária não for adequada. A qualidade da luz bem como a vida útil é afetada principalmente pelo calor (ASSIST, 2007). A área de dissipação de um LED é relativamente baixa comparada à potência do dispositivo e por isso a concentração de calor é considerável. Por este motivo, a luminária deve prever o uso de dissipadores para transferir o calor ao ambiente evitando o superaquecimento do LED. A Tabela 1.5 mostra um comparativo entre algumas fontes de luz branca e sua taxa de conversão de energia por unidade de watt (U. S. Department of Energy, 2008).

Tabela 1.5 – Taxa de conversão de energia por watt para algumas fontes de luz branca

		<b>Incandescente</b>	<b>Fluorescente</b>	<b>Vapor Metálico</b>	<b>LEDs</b>
Energia Radiada	Luz Visível	8 %	21 %	27 %	15-25 %
	Infravermelho	73 %	37 %	17 %	0 %
	Ultravioleta	0 %	~0 %	19 %	~0 %
Total de Energia Radiada		81 %	58 %	63 %	15-25 %
Emissão de Calor		19 %	42 %	37 %	75-85 %
Total		100 %	100 %	100 %	100 %

Fonte: U. S. Department of Energy, 2008.

A energia fornecida a uma fonte de luz é convertida em calor e radiação, esta última nem sempre visível. A lâmpada incandescente converte apenas 8 % da energia radiada em luz visível e 73 % em raios infravermelhos. No entanto, o raio infravermelho também provoca aquecimento. Assim, aproximadamente 92 % do total de energia consumido pela lâmpada incandescente são convertidos em calor e uma pequena parcela em luz.

As lâmpadas fluorescentes e de vapor metálico também emitem raios infravermelhos e aquecem, porém aproveitam melhor a energia consumida para emissão de luz visível. A lâmpada de vapor metálico ainda emite 19 % da energia radiada na forma de raios ultravioleta, já para a fluorescente esta quantidade é aproximadamente zero. Os LEDs emitem uma quantidade muito reduzida, ou quase nula, de raios infravermelhos e ultravioletas. Entretanto, a porcentagem de calor é alta. Porém, como estes dispositivos são de baixa potência, a quantidade de calor emitida é baixa comparada às demais fontes de luz. Contudo, devido ao seu tamanho reduzido, o aquecimento se torna perceptível.

O calor excessivo no LED provoca, além da redução da vida útil, alteração na tonalidade de cor emitida e diminuição da potência luminosa. O aumento da durabilidade dos LEDs submetidos a altas temperaturas é um desafio constante para os fabricantes. No entanto, enquanto a alta temperatura influenciar nas características deste dispositivo é aconselhável que sua operação seja feita em uma temperatura adequada.

Os refrigeradores de supermercados normalmente utilizam lâmpadas fluorescentes em seu interior. Para esta aplicação este tipo de lâmpada não é ideal. As lâmpadas de descarga, quando operadas em baixas temperaturas, apresentam uma redução da sua luminosidade de até 25 %. Isto não acontece com os LEDs, pelo contrário, sua eficiência apresenta melhores resultados em ambientes frios (abaixo de 20° C) (Sauerländer, 2006). A Figura 1.8 mostra um refrigerador iluminado com fluorescente e outro com LEDs.



Figura 1.8 - Iluminação com lâmpada fluorescente, à esquerda e iluminação empregando LEDs, à direita (ASSIST, 2008).

Neste exemplo, a iluminação é mais uniforme com a utilização de LEDs, mostrado à direita na Figura 1.8. Com a lâmpada fluorescente, a luminosidade fica concentrada nas laterais do refrigerador deixando o centro mais escuro. Isto porque as lâmpadas fluorescentes irradiam sua luz em todas as direções, diferentemente dos LEDs, que iluminam somente o interior do refrigerador e direcionado aos produtos. Portanto, a iluminação empregando LEDs proporciona uma melhor visibilidade dos produtos além da redução do consumo de energia elétrica comparada com a iluminação empregando lâmpadas fluorescentes.

Algo semelhante acontece na iluminação de ambientes. O fluxo luminoso das lâmpadas atinge o teto, as paredes e o piso do recinto. No entanto, o principal ponto a ser iluminado normalmente se encontra abaixo da fonte de luz. Por isso, a emissão de luz ao teto não é importante e pode ser considerada um desperdício de energia. Assim, refletores são bastante utilizados para direcionar o feixe luminoso para a área de maior interesse.

O LED, apesar de apresentar uma luz direcionada, não possui um ângulo de abertura suficiente para iluminar a mesma área considerada. Portanto, o aumento do ângulo de emissão pode ser obtido também através de refletores ou lentes, tornando a luz mais difusa.

Contudo, tanto o uso destas lentes quanto a própria reflexão da parede reduz a intensidade luminosa. Isto porque os materiais possuem um coeficiente de reflexão, que é definido como a relação entre o fluxo luminoso refletido e o fluxo luminoso incidente em uma superfície, um valor sempre inferior a 100 %. Caso contrário, estes objetos seriam

considerados fontes de luz. A Figura 1.9 mostra o índice de reflexão do teto, da parede e do piso com relação à cor apresentada pela superfície, e o índice de reflexão de alguns materiais (Compendio Técnico, 2005).

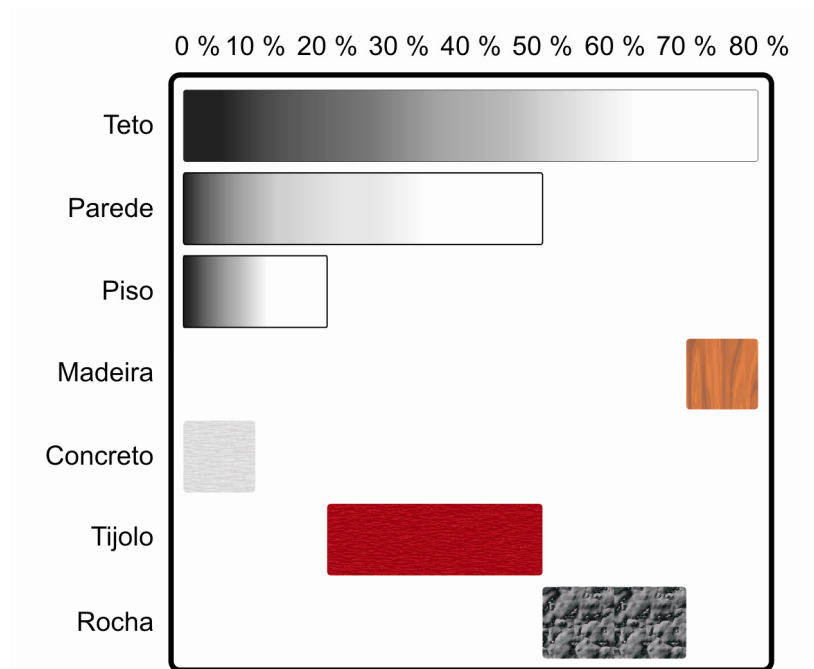


Figura 1.9 – Índice de reflexão de alguns objetos e materiais. Adaptado de Compendio Técnico (2005).

Então, uma maneira eficaz de se obter uma iluminação uniforme é posicionar os LEDs de tal forma que a luz emitida seja destinada apenas à região de interesse, como sugerido na Figura 1.10, sem a necessidade de lentes ou reflexão do teto.

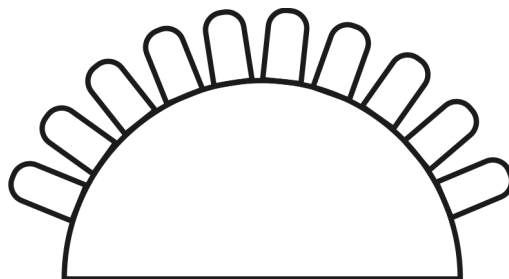


Figura 1.10 – Sugestão de uma possível disposição dos LEDs para uma iluminação mais uniforme.

O nível de iluminação do ambiente também é conhecido como iluminância, e indica o fluxo luminoso de uma fonte de luz (lm) que incide sobre uma superfície ( $m^2$ ) situada a certa distância desta fonte (m). Esta grandeza é dada em lux e pode ser medida através de um luxímetro (Rodrigues, 2002).

Segundo a Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), o nível de iluminação recomendado para cômodos destinados ao entretenimento, descanso, circulação ou sala de jantar deve atingir de 30 a 50 lux, medido no piso. Já para ambientes aonde seja exigido maior atenção da pessoa, como a cozinha, é recomendado 110 lux na altura do plano de trabalho (ASSIST, 2007).

As normas brasileiras para iluminação de interiores (NBR 5413) são mais exigentes a respeito da iluminância necessária para cada ambiente ou atividade. Na iluminação residencial estes valores variam de 200 a 500 lux para ambientes de trabalho ou leitura, e de 100 a 200 lux para os demais cômodos (ABNT, 1992). Esta variação está relacionada às seguintes características da tarefa e do observador: idade, velocidade e precisão; refletância do fundo da tarefa. A Tabela 1.6 mostra a iluminância necessária para cada ambiente de acordo com as atividades desenvolvidas nele.

Tabela 1.6 – Iluminância adequada para cada grupo de tarefas visuais

<b>Classificação</b>	<b>Tipo de Ambiente / Atividade</b>	<b>Iluminância (lux)</b>
Classe A (áreas de uso contínuo ou execução de tarefas)	Vias públicas e estacionamentos	20 – 30 – 50
	Ambientes de pouca permanência	50 – 75 – 100
	Sala de estar, escadas e dormitórios	100 – 150 – 200
Classe B (áreas de trabalho)	Sala de leitura, cozinha, garagem	200 – 300 – 500
	Escritórios e fábricas	500 – 750 – 1000
	Trabalhos especiais e indústrias	1000 – 1500 - 2000
Classe C (áreas com tarefas visuais minuciosas)	Trabalho contínuo e exato: eletrônica	2000 – 3000 – 5000
	Trabalho que exige muita exatidão	5000 – 7500 – 10000
	Trabalho minucioso especial: cirurgia	10000 – 15000 - 20000

Fonte: ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Para a iluminação residencial, a temperatura de cor adequada está na faixa de 2800 K a 3500 K e o índice de reprodução de cores acima de 70. Uma iluminação uniforme é







Figura 1.12 – Lâmpadas compostas por LEDs e com formato semelhante às incandescentes e fluorescentes (Rivas, 2006).

Muitos produtos utilizando esta mesma idéia têm surgido no mercado, como mostra a Figura 1.13. Recentemente a empresa Luxeon desenvolveu uma lâmpada empregando LEDs de alto-brilho do mesmo tamanho de uma fluorescente tubular modelo T8. Ela também foi projetada para utilizar o mesmo reator da fluorescente substituída. Porém, apesar da facilidade de instalação, o preço deste produto é muito elevado, mas o fabricante garante a alta eficiência luminosa e vida útil da lâmpada (Luxeon Star, 2008).



Figura 1.13 – Lâmpadas comerciais com formato semelhante às incandescentes e fluorescentes.

Em 1998, o Instituto Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial (Inmetro) realizou um ensaio sobre o comportamento das lâmpadas fluorescentes compactas existentes no mercado brasileiro com relação às suas principais características elétricas e fotométricas (potência e fluxo luminoso) e sua vida útil (Inmetro, 1998). Foram analisadas, durante 2.000 horas, dez unidades de cada marca produzidas por diferentes fabricantes. Somente uma marca analisada atendeu a todos os requisitos verificados.

Com exceção desta marca, todas as demais não respeitaram o requisito de manutenção do fluxo luminoso ao longo da vida útil. Algumas delas tiveram seu fluxo luminoso reduzido a menos de 70 %. O número de lâmpadas danificadas foi elevado, sendo que para algumas marcas somente uma atingiu as 2.000 horas de funcionamento. Este valor é muito inferior ao determinado nas embalagens (5.000 horas). Quanto à potência consumida pelas lâmpadas analisadas, o resultado mostrou que todas estavam de acordo com os valores especificados no rótulo do produto.

No entanto, após a realização deste ensaio, fabricantes de todos os países introduziram novos produtos no mercado brasileiro, principalmente após a crise energética ocorrida em 2001. A maior parte deles visando apenas à popularização da LFC com redução do custo, sem demonstrar preocupação com a qualidade de energia e eficiência energética. Assim, em 2007, o governo decidiu fiscalizar estes produtos exigindo a aprovação do Inmetro e do Selo Nacional de Conservação de Energia (ENCE) (Ellert, 2008).

O mesmo resultado tem acontecido atualmente com as lâmpadas empregando LEDs. Apesar da alta eficácia luminosa dos LEDs, os circuitos utilizados para seu acionamento nem sempre apresentam elevado rendimento ou proporcionam as condições necessárias para permitir a longa vida útil do sistema. Estes fatores, juntamente com a participação considerável dos sistemas de iluminação no consumo de energia elétrica do país, justificam a constante pesquisa e aprimoramento não só das fontes de luz, mas também dos seus circuitos de acionamento.

Atualmente, um dos fatores que limitam o uso de LEDs em diversas aplicações é o custo elevado comparado a outras fontes de luz. No entanto, pesquisadores desenvolveram recentemente uma técnica que substitui a safira, cristal utilizado na composição do LED e principal responsável pelo custo elevado, por silício, material de baixo custo e bastante utilizado na indústria eletrônica. Este elemento ainda permite uma melhor dissipação do calor, resultando em um aumento da eficiência e vida útil dos LEDs (Inovação Tecnológica, 2008).

## 1.4 OLED – O brilho do futuro

Na metade da década de 80, alguns pesquisadores descobriram que um composto de materiais orgânicos também poderia formar um LED e emitir luz com uma eficiência elevada. Estes dispositivos ficaram então conhecidos como OLEDs (*Organic Light Emitting Diode*). Suas características são semelhantes à do LED, com tensão de operação reduzida, alto brilho e luz monocromática. No entanto, são maleáveis e muito mais leves (Ficke, 2004).

Isto permite o desenvolvimento de telas mais finas e flexíveis para aplicação em telefones celulares, câmeras fotográficas, monitores e televisores. Apesar de ser uma tecnologia recente, sua evolução é rápida. Alguns projetos têm aplicado OLED em iluminação de ambientes. Isto porque a eficácia luminosa destes dispositivos já se encontra em aproximadamente 100 lm/W (Newstin, 2008). A idéia é colocar as camadas que formam o OLED diretamente no teto do ambiente, substituindo a fonte de luz por uma espécie de pintura. O mesmo pode ser aplicado também a outros objetos. A Figura 1.14 mostra alguns exemplos de OLEDs e suas aplicações.

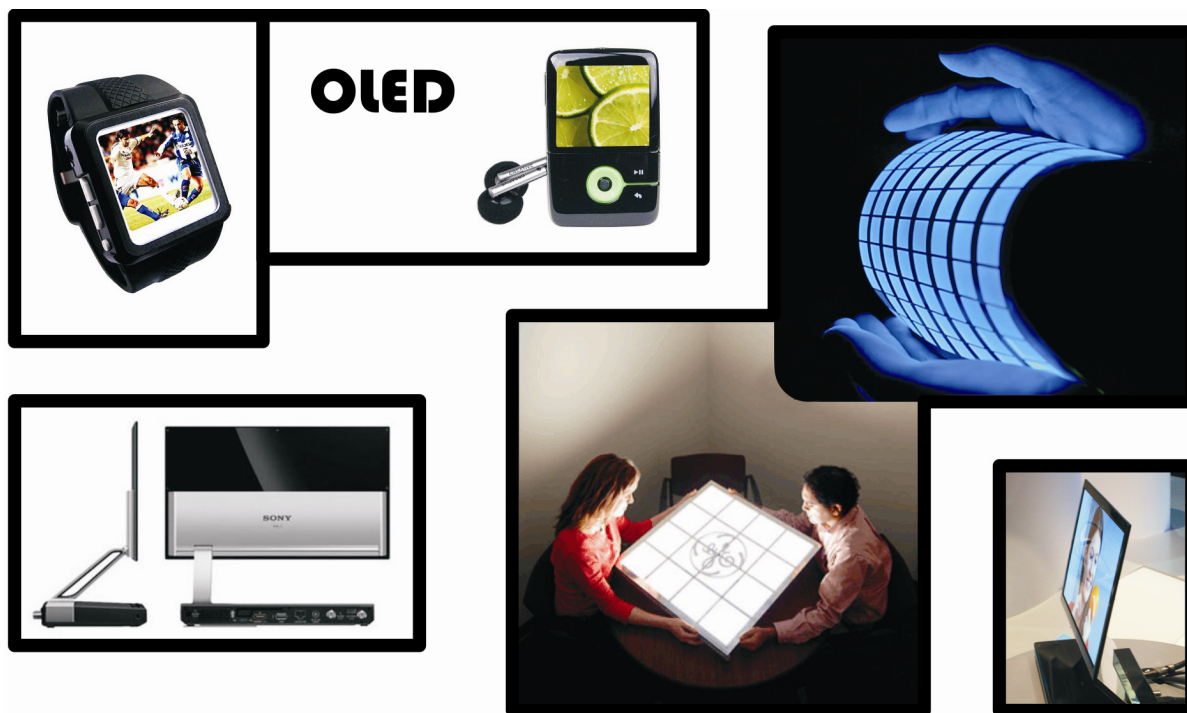


Figura 1.14 – OLEDs, produtos empregando esta nova tecnologia.

## CAPÍTULO 2

# ACIONAMENTO DE LEDS

Os LEDs, assim como as lâmpadas de descargas não podem ser ligados diretamente à rede elétrica. Assim, conversores operando em alta frequência são amplamente utilizados em sistemas de iluminação devido às vantagens apresentadas, entre elas, o alto rendimento, redução do volume dos componentes magnéticos e ausência de ruído audível (Campos et al, 2004). Estes circuitos são conhecidos como reatores eletrônicos.

O LED é ainda considerado uma tecnologia emergente. Portanto, muitas pesquisas têm sido feitas não só com relação à evolução do próprio dispositivo, mas também com relação às formas de acionamento. Assim, não há uma conclusão sobre a melhor maneira de alimentar o LED.

### 2.1 Formas de Onda Aplicadas ao LED

O acionamento dos diodos emissores de luz é realizado por meio do controle da corrente que circula por este dispositivo. Alguns estudos analisaram a eficiência luminosa dos LEDs submetidos a cinco formas de onda de corrente diferentes (Schmid et al, 2007; Sauerländer, 2006).

A primeira análise alimenta o LED com uma forma de onda de corrente contínua, como mostra a Figura 2.1 (a), com 100 % do valor nominal e 40 % do valor nominal da corrente do LED. Esta forma de onda pode ser obtida através do uso de bateria ou de um conversor CC-CC com um filtro de saída. O segundo caso alimenta o LED com uma corrente modulada por largura de pulso (PWM – *Pulse-Width Modulation*), apresentada na Figura 2.1 (b). A modulação PWM é muito utilizada na alimentação de LEDs principalmente quando a variação da intensidade luminosa é desejada (*dimmer*).

Obter uma forma de onda contínua com valor constante exige um circuito preciso, que muitas vezes acarreta em um custo elevado. Normalmente, o projeto de um circuito é feito considerando uma baixa ondulação na corrente de saída, tornando o equipamento economicamente viável. Assim, uma forma de onda com uma ondulação de aproximadamente 42 % do valor médio, Figura 2.1 (c), também foi analisada.

Outra possibilidade para alimentar o LED é aplicar uma forma de onda dente de serra, Figura 2.1 (d), que pode ser obtida através de conversores CC-CC sem capacitores no filtro de saída. Esta forma de onda juntamente com uma forma de onda senoidal com retificação em ponte completa, mostrada na Figura 2.1 (e), também foi analisada.

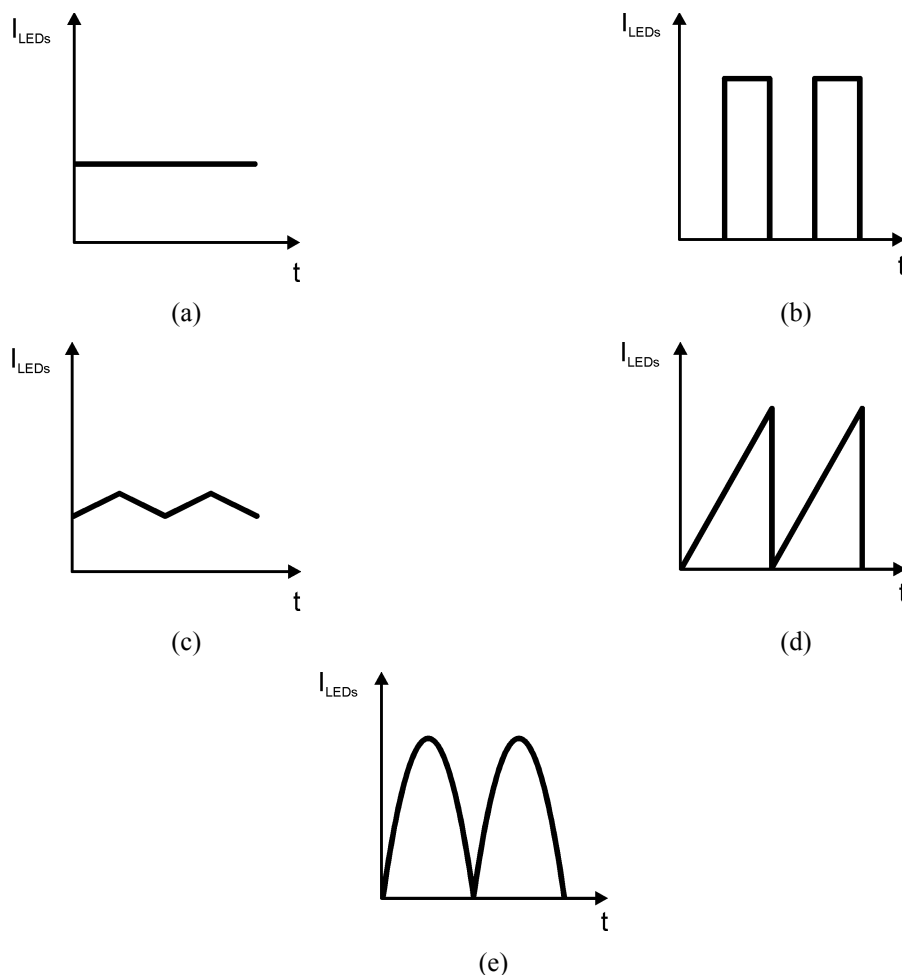


Figura 2.1 – Principais formas de onda de corrente aplicadas na alimentação de LEDs.

Os resultados mostram que para o nível máximo de luminosidade do LED, as diferentes formas de onda não apresentam grandes diferenças na eficiência luminosa. No entanto, foi observado que esta eficiência aumenta quando a luminosidade é reduzida. Porém, para níveis extremamente baixos isso não acontece.

A variação da luminosidade implementada por PWM apresenta perdas significativas comparadas à modulação por amplitude (AM – *Amplitude Modulation*). Entretanto, apesar de as perdas serem maiores, utilizando PWM a eficiência luminosa permanece a mesma para todos os níveis.

Porém, a modulação por amplitude não pode ser aplicada a todos os casos. Para determinados modelos, o fabricante não garante o funcionamento correto dos LEDs com valores de corrente abaixo do nominal. Além disso, foi constatado de forma experimental que devido a características construtivas, um grupo de LEDs conectados em série e, portanto submetidos à mesma corrente, pode apresentar variações significativas na luminosidade ou até mesmo não acender se alimentado com corrente contínua inferior à nominal. Já com o uso da modulação por largura de pulso o mesmo não acontece, pois é possível atingir o valor nominal e ainda assim obter uma corrente média reduzida. Segundo o fabricante, a variação da luminosidade dos LEDs pode alcançar níveis muito baixos se alimentados por PWM. Isto justifica o seu uso para tal finalidade.

A avaliação feita com as formas de onda senoidal retificada e dente de serra apresentaram resultados semelhantes. Porém, para manter a corrente nominal do LED, e com isso sua luminosidade máxima, o pico de corrente destas formas de onda deve ser elevado. Este pico de corrente muitas vezes é superior ao valor máximo garantido pelo fabricante tornando sua implementação inviável. Além disso, se os LEDs estiverem afastados do conversor, as harmônicas geradas pela corrente pulsada podem causar problemas de interferência eletromagnética. Assim, alimentar os LED com corrente contínua apresenta algumas vantagens com relação às demais formas de onda. Também foi constatado que uma ondulação de até 40 % não provoca maiores alterações nos resultados. Esta ondulação é suficiente para o desenvolvimento de um projeto simples, compacto e com baixo custo.

A temperatura do LED também influencia na sua eficiência. A operação em 110° C apresenta melhores resultados comparada à operação em 60° C. No entanto esta relação não é linear. A baixa temperatura do LED durante seu funcionamento (aproximadamente 20° C) também apresentou resultados satisfatórios com relação à eficiência luminosa do dispositivo. Esta característica faz com que o uso de LEDs seja um atrativo para aplicação em lugares muito frios, como em determinados países e até mesmo em câmaras frigoríficas ou geladeiras de supermercado (ASSIST, 2008).

## **2.2 Circuitos para Acionamento de LEDs**

Cada fonte de luz necessita de um circuito específico para seu correto funcionamento. Geralmente, os reatores eletrônicos possuem um estágio de retificação transformando a tensão alternada em contínua, alimentando um conversor CC-CC a partir da rede elétrica. Estes

conversores operando em alta frequência têm por objetivo adequar os níveis de tensão e controlar a corrente na saída, podendo ser circuitos redutores ou elevadores de tensão, com ou sem isolamento. Quando se deseja alimentar a lâmpada com uma forma de onda alternada, normalmente são empregados indutores e capacitores na saída destes conversores formando o filtro de saída. Para lâmpadas de descarga, um circuito ignitor deve ser adicionado para fornecer um pulso de tensão elevado e iniciar o processo de acionamento.

Segundo a norma brasileira, sistemas de iluminação com potência superior a 60 W, devem possuir correção do fator de potência (FP), atendendo os limites impostos pela norma internacional IEC 61000-3-2 Classe C (Dalla Costa et al., 2004a). Assim, estes reatores eletrônicos com esta característica devem possuir mais um estágio composto pelo circuito para correção do fator de potência, que pode ser implementado de diversas formas (Dalla Costa, 2004b; Silva, 2000).

Os LEDs diferentemente das lâmpadas de descarga não necessitam de um estágio de ignição, uma vez que não possuem gás em sua composição. No entanto, por operar com sinais de tensão e corrente diferentes do fornecido pela rede elétrica, também necessitam de um circuito para seu acionamento, conhecido também como *driver*. Estes circuitos podem ser implementados de diversas maneiras, através de conversores CC-CC operando em alta frequência, conversores lineares, circuitos ressonantes ou outros limitadores de corrente.

### 2.2.1 Resistor Série

Os LEDs possuem uma resistência série intrínseca, porém de valor muito baixo (Sá Junior, 2007b). Isto não é suficiente para limitar a corrente quando ligado a uma fonte de tensão. Por isso, necessitam de um *driver* para estabilizar a corrente.

A maneira mais simples para alimentar um LED é através de uma fonte de tensão contínua e um resistor conectado em série com este dispositivo, conforme mostra a Figura 2.2. Assim, a corrente que circula pelo LED terá o mesmo valor da corrente que circula pelo resistor. Este valor é limitado pela tensão aplicada ao resistor.

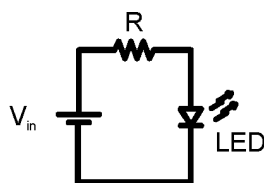


Figura 2.2 – Limitação da corrente por um resistor série.



O mesmo pode ser aplicado em uma fonte de tensão alternada, conforme mostra a Figura 2.3. Neste caso, dois LEDs são conectados em antiparalelo de forma a aproveitar a condução de corrente nos dois sentidos.

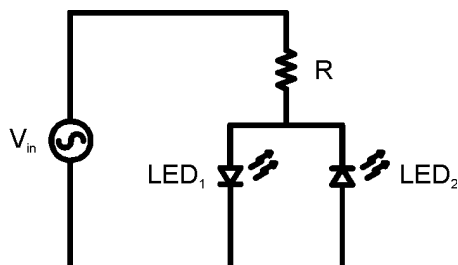


Figura 2.3 – Limitação da corrente por um resistor série em corrente alternada.

O LED<sub>1</sub> conduz quando a tensão é positiva e o LED<sub>2</sub> conduz quando a fonte inverte sua polaridade. A luminosidade emitida apresenta uma inércia. Assim, se a frequência do sinal de tensão for elevada, o olho humano não será capaz de identificar quando um dos LEDs estiver apagado.

Este é um circuito simples. No entanto, qualquer oscilação na fonte de tensão provoca uma alteração na tensão aplicada ao resistor. Além disso, a tensão de condução do LED pode variar devido a características construtivas do dispositivo. Desta maneira, a corrente que circula pelo resistor e conseqüentemente a corrente no LED não será constante. Isto causa uma alteração na luminosidade emitida e dependendo da situação pode vir a danificar o semicondutor.

Outra desvantagem apresentada por este sistema é sua baixa eficiência quando submetidos a tensões elevadas ou para alimentar LEDs de potência. Isto porque a potência dissipada no resistor se torna elevada, podendo muitas vezes ultrapassar a do próprio LED. Portanto, esta não é uma alternativa interessante para um sistema de iluminação que deve sempre visar a qualidade da luz emitida e o uso racional da energia elétrica.

### 2.2.2 Capacitor Série

Uma topologia semelhante à anterior é proposta para alimentar os LEDs através de uma fonte de tensão alternada (Badella, 2004). Os LEDs também são conectados em antiparalelo e o circuito opera em alta frequência. No entanto, o resistor é substituído por um

capacitor com o objetivo de regular a corrente nos LEDs através da sua impedância, como mostra a Figura 2.4.

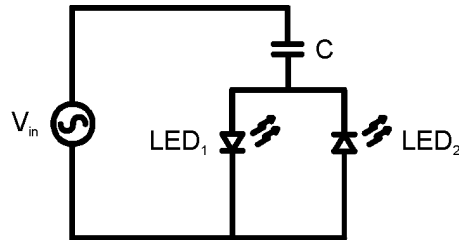


Figura 2.4 – Limitação da corrente por um capacitor série.

Esta alternativa, apesar de possuir baixo custo, apresenta uma grande desvantagem. A corrente de pico nos LEDs deve ser elevada para que seja possível manter a corrente nominal nestes dispositivos. Porém, na maioria das vezes o valor da corrente de pico é tão alto que ultrapassa o limite dos LEDs e não permite a implementação do circuito.

### 2.2.3 Conversores Lineares

Os conversores lineares são bastante utilizados para limitar a corrente nos LEDs devido à sua simplicidade e baixo custo. Existem diversos circuitos integrados (CI) no mercado que podem ser aplicados aos LEDs, entre eles estão o LM317 e o NUD4001, apresentados na Figura 2.5.

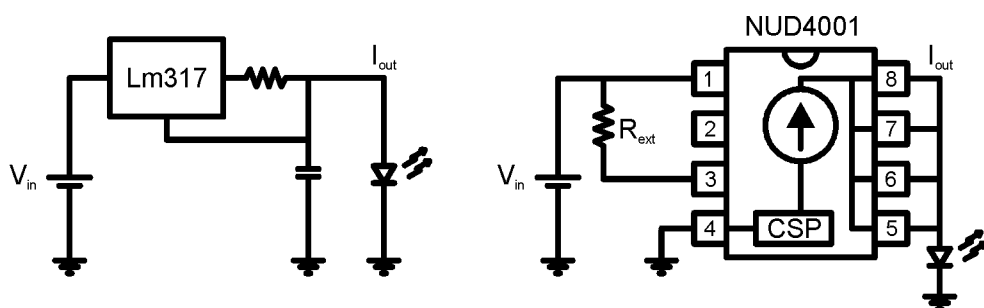


Figura 2.5 – Conversores lineares empregados para limitação de corrente nos LEDs.

Estes dispositivos têm a função de gerar uma tensão de referência para um resistor conectado em série com os LEDs. Esta tensão normalmente possui um valor baixo, para que a potência dissipada no resistor não seja significativa. A alimentação é feita diretamente de uma

fonte de tensão, que deve ser superior à de saída, pois ela também será responsável pela alimentação dos LEDs.

A dimerização por modulação PWM em conversores lineares também é possível. A Figura 2.6 mostra o circuito para alimentação de LEDs de 1 W com variação da intensidade luminosa aplicado ao LM317 (Sá Junior, 2007b).

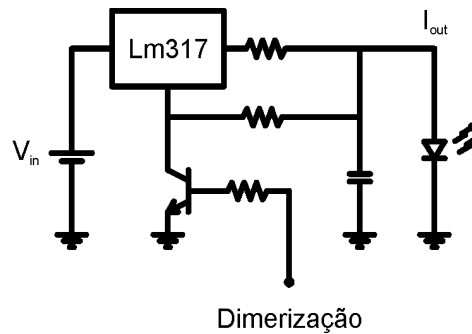


Figura 2.6 – Conversor linear com variação da intensidade luminosa do LED aplicado ao LM317 (Sá Junior, 2007b).

Este circuito funciona basicamente habilitando e desabilitando o sinal de referência do resistor. Para isto, o sinal PWM é inserido na base de um transistor conectado ao pino de referência do CI. Quando polarizado, este transistor mantém a tensão de referência, mas desvia o caminho da corrente. Nesta situação, os LEDs não são polarizados. Quando o transistor é bloqueado, a tensão de referência volta a ser aplicada ao resistor e conseqüentemente a corrente nominal volta a circular nos LEDs.

Os CI são bastante práticos para alimentar grupos de LEDs em paralelo, uma vez que a corrente deve ser controlada em cada braço. Porém, apesar da facilidade de implementação, sua eficiência é baixa, principalmente se a diferença entre a tensão de entrada e saída for elevada. Existem outros circuitos encontrados na literatura utilizados para regular a corrente nos LEDs sem o uso de CI, permitindo também a dimerização. Entre eles está o circuito proposto por Cervi (2005b) e que posteriormente foi adaptado por Oliveira (Oliveira, 2007). Estes circuitos são mostrados na Figura 2.7.

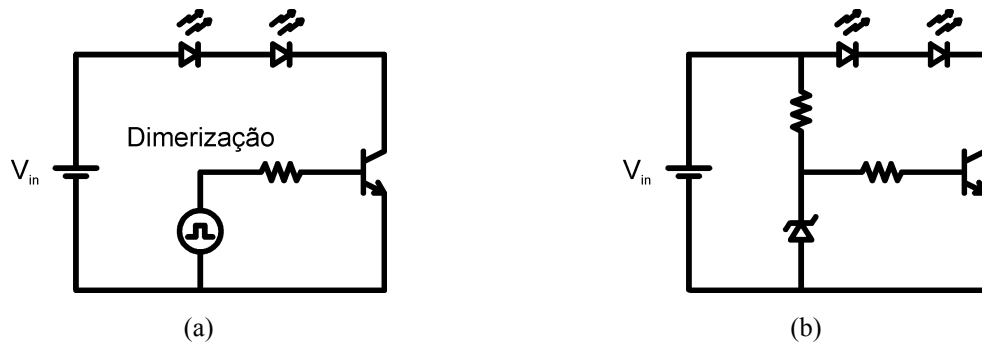


Figura 2.7 – Conversores lineares para alimentação de LEDs sem utilizar circuitos integrados (a) com a função de dimerização e (b) sem a função de dimerização.

Na Figura 2.7 (a), um transistor operando na região linear é ligado em série com os LEDs. O sinal PWM conectado à base deste transistor controla o tempo de condução e bloqueio da corrente que circula pelos LEDs, alterando o valor médio desta corrente (Cervi, 2005b). No circuito da Figura 2.7 (b), o diodo zener gera uma tensão de referência que polariza o transistor com uma corrente constante. Assim, mesmo que a tensão de entrada ou a tensão de condução dos LEDs sofra qualquer alteração, a corrente permanece constante (Oliveira, 2007).

#### 2.2.4 Conversores CC-CC

Os conversores operando em alta frequência apresentam diversas vantagens, entre elas está o rendimento superior aos conversores lineares e por isso são amplamente aplicados em circuitos eletrônicos. Existem diferentes conversores que podem ser aplicados para alimentar LEDs, cada um com características distintas. A seguir são apresentadas algumas topologias básicas, analisando as vantagens e desvantagens para cada aplicação (Sá Junior, 2007b; Pomilio, 2007).

##### 2.2.4.1 Conversor *Buck*

O conversor *Buck* é um circuito simples, pequeno e de baixo custo devido ao número reduzido de componentes empregados para seu funcionamento. A Figura 2.8 mostra um exemplo do conversor.

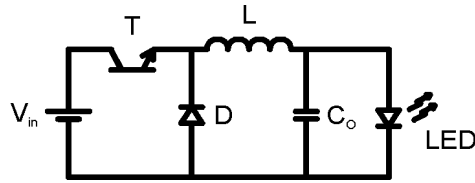


Figura 2.8 – Conversor *Buck*.

A característica principal deste circuito é alimentar a carga com uma tensão de saída inferior à tensão de entrada, sem isolamento entre elas. O conjunto L-C é usado como um filtro passa-baixas. O indutor limita a ondulação de corrente e o capacitor reduz a ondulação de tensão na carga. Se o valor da indutância for elevado, a ondulação da corrente será reduzida, e o capacitor de saída poderá ser retirado. Assim, o circuito pode ser utilizado para alimentar os LEDs com característica de uma fonte de corrente. Esta configuração apresenta a vantagem de reduzir ainda mais o número de componentes do circuito. Além disso, a vida útil de um capacitor eletrolítico é inferior à dos LEDs, e pode ser um fator limitante da vida útil do sistema.

O projeto do conversor *Buck* pode ser feito para operar em modo de condução contínua (MCC) ou descontínua (MCD). Quando operado em MCC, a relação entre a tensão de entrada e saída é determinada de forma direta através do tempo de condução do interruptor (razão cíclica). Isto facilita o projeto e o controle da tensão de saída, pois retira a dependência da resistência equivalente da carga na relação de transformação.

Nesta situação, a corrente de pico do interruptor é menor comparada à operação em MCD para as mesmas especificações de corrente média na carga. O interruptor, assim como o diodo, é submetido à tensão de entrada enquanto estiver bloqueado.

Uma desvantagem deste conversor é o fato de não poder compartilhar a mesma referência entre a fonte de entrada, a carga e o interruptor ao mesmo tempo. Isso dificulta a implementação do circuito de comando e de controle da variável de saída (tensão ou corrente).

#### 2.2.4.2 Conversor *Boost*

O conversor *Boost* é apresentado na Figura 2.9. Este conversor possui característica de alimentar a carga com uma tensão de saída superior à tensão de entrada. Assim como o

conversor *Buck*, é considerado um circuito simples e de baixo custo, sem isolação entre a fonte e a carga.

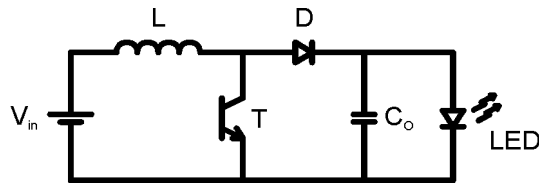


Figura 2.9 – Conversor *Boost*.

O princípio de funcionamento do conversor é armazenar energia no indutor, enquanto o interruptor permanecer conduzindo, e posteriormente transferir esta energia para a carga, enquanto o interruptor estiver em bloqueio. A tensão de saída é superior à de entrada pelo fato de o indutor operar como uma fonte de corrente em série com a fonte de entrada. Para operação em MCC, o ganho estático (relação entre a tensão de entrada e a de saída) também é dado pela razão cíclica, assim como no conversor *Buck*.

Tanto para o modo de condução contínua quanto descontínua, a corrente que circula pelo diodo é sempre descontínua. Assim, para alimentar a carga com uma corrente contínua é necessário utilizar o capacitor de saída. A tensão máxima aplicada ao interruptor será a mesma de saída e, portanto, o maior valor de tensão existente no circuito.

A corrente de entrada do conversor *Boost* não é interrompida como no conversor *Buck*. Esta é uma característica importante que permite empregá-lo na correção do fator de potência (FP) de outros circuitos com grande eficiência. Outra vantagem deste conversor é o fato de ele compartilhar a mesma referência entre a carga, a fonte de entrada e o interruptor, simplificando o circuito de comando. Esta topologia também é muito utilizada para alimentar LEDs através de baterias.

#### 2.2.4.3 Conversor *Buck-Boost*

O conversor *Buck-Boost*, apresentado na Figura 2.10, permite tanto uma tensão de saída inferior quanto superior à de entrada. Entretanto, a polaridade entre estes sinais é contrária.

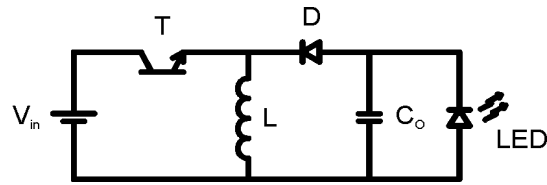


Figura 2.10 – Conversor *Buck-Boost*.

Na primeira etapa de operação, a tensão de entrada é aplicada ao indutor, que armazena energia. O diodo impede que a corrente circule pela carga durante este período. Quando o interruptor é bloqueado, a energia armazenada no indutor é transferida para a carga. O diodo determina o sentido da condução da corrente.

O indutor pode operar em modo de condução contínua ou descontínua. Porém, para alimentar a carga com uma corrente contínua também se faz necessário o uso do capacitor. Este conversor é bastante utilizado para alimentar um LED através de uma bateria regulando a tensão de saída em função da variação da tensão entrada.

#### 2.2.4.4 Conversor *Buck* Quadrático

Os conversores apresentados até o momento são considerados topologias básicas e podem dar origem a outras através de modificações ou combinações de um mesmo conversor ou entre diferentes tipos deles.

Um exemplo é o conversor *Buck* Quadrático, apresentado na Figura 2.11, resultado da conexão em série de dois conversores *Buck*. A principal característica deste circuito é propiciar uma tensão de saída menor que a de entrada, como no *Buck*, porém com uma relação exponencial entre elas. Esta relação exponencial é dada pela razão cíclica ao quadrado.

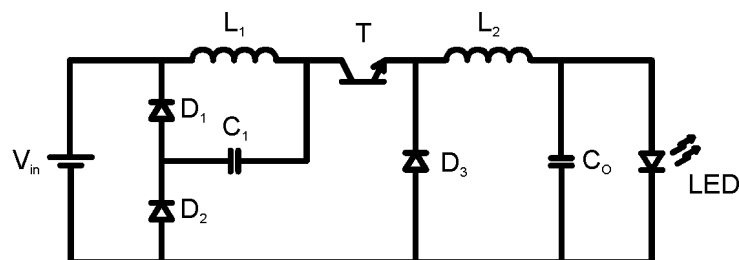


Figura 2.11 – Conversor *Buck* quadrático.

Na primeira etapa de operação, o interruptor conduz juntamente com o diodo  $D_2$ . Assim, a corrente no indutor  $L_2$  é dada pela soma da corrente de entrada com a corrente proveniente do capacitor  $C_1$ . Num segundo instante, este capacitor é carregado e o indutor  $L_2$  mantém a corrente na carga. A tensão de entrada é reduzida e aplicada ao capacitor conforme o valor da razão cíclica, como ocorre no conversor *Buck*. Este capacitor, por sua vez, é empregado como uma fonte de tensão de entrada do segundo conversor *Buck* reduzindo ainda mais a tensão para o valor aplicado à carga.

Uma vantagem desta topologia é o fato de integrar dois conversores utilizando apenas um interruptor. Outra vantagem é a possibilidade de obter uma tensão de saída extremamente baixa em relação ao valor de entrada, com uma razão cíclica aceitável. Já para o conversor *Buck* utilizando as mesmas especificações de tensão de entrada e saída, a razão cíclica seria extremamente baixa. Esta situação dificulta o controle da tensão de saída, pois não permite uma faixa larga de valores para serem alterados.

#### 2.2.4.5 Conversores *Cúk*, *SEPIC* e *Zeta*

Outras topologias amplamente conhecidas, originadas da combinação dos conversores básicos, são o *Cúk*, o *SEPIC* e o *Zeta*, mostrados na Figura 2.12.

O conversor *Cúk* é formado por um conversor *Boost* em série com um conversor *Buck*. O capacitor  $C_1$  opera como carga para o *Boost*. Assim, a tensão neste componente será superior à tensão de entrada. Em um segundo instante, o capacitor atua como fonte de entrada para o *Buck*, e a tensão é reduzida para a saída. Quando o capacitor é descarregado, o sentido da corrente inverte a polaridade da carga com relação à fonte de entrada do circuito. A vantagem desta topologia é o fato de permitir que, tanto a corrente de entrada quanto a de saída sejam contínuas. Para alimentação de LEDs o capacitor de saída pode ser retirado do circuito da mesma maneira proposta para o conversor *Buck* apresentado anteriormente.

O conversor *SEPIC* é composto por um *Boost* e um *Buck-Boost* conectados em série. A vantagem deste circuito em relação ao *Buck-Boost* é que a corrente de entrada pode ser contínua e a tensão de saída não possui polaridade invertida. A desvantagem para a alimentação de LEDs é a necessidade de um capacitor de saída para fornecer uma corrente constante.



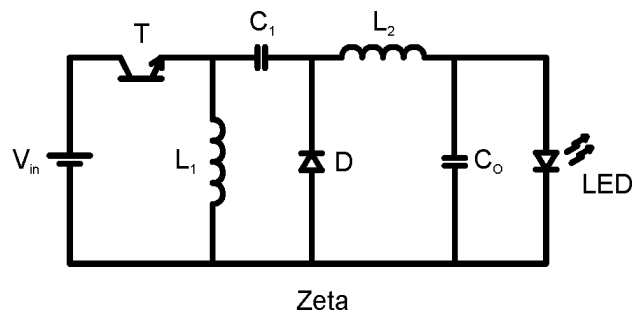
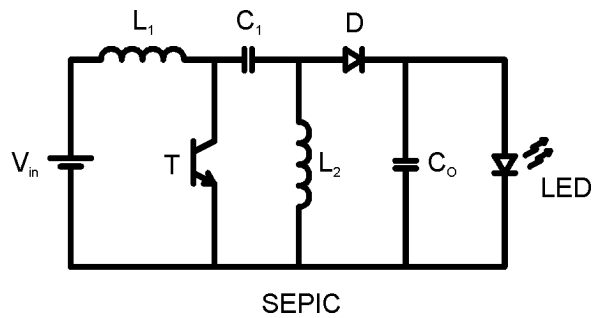
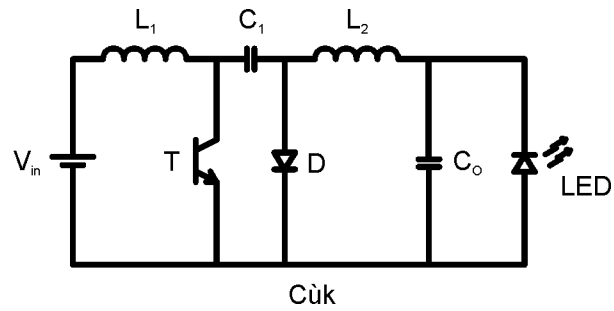


Figura 2.12 – Conversores Ćuk, SEPIC e Zeta.

O conversor *Zeta* é formado por um *Buck-Boost* e um conversor *Buck* conectado em série. Assim, a tensão de saída poderá ser superior ou inferior à de entrada. Porém, diferente do conversor *Buck-Boost*, ambas possuem a mesma polaridade. Além disso, por possuir um *Buck* em série, o capacitor de saída pode ser retirado e ainda assim é possível alimentar um LED com corrente contínua.

Esta topologia, assim como as demais, apresenta apenas um interruptor compartilhado entre os conversores. O número de componentes é o mesmo, a diferença está apenas na posição onde estão ligados nos circuitos.

#### 2.2.4.6 Conversor *Flyback*

O conversor *Flyback* tem a mesma característica do *Buck-Boost*, ou seja, ambos fornecem uma tensão de saída maior ou menor que a entrada. A diferença entre as duas topologias está na isolação entre a fonte de entrada e a carga. Para isso, um enrolamento secundário é introduzido ao indutor do *Buck-Boost*. Este circuito é mostrado na Figura 2.13.

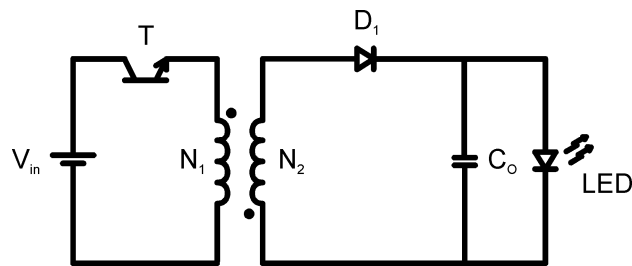


Figura 2.13 – Conversor *Flyback*.

Quando o interruptor conduz, o indutor acoplado armazena energia devido à corrente que circula pelo enrolamento primário. O diodo impede que esta energia seja transferida instantaneamente para a carga, como acontece com um transformador. Somente quando o interruptor é bloqueado, a energia acumulada no indutor acoplado é transferida para a carga através do caminho dado pelo diodo.

Esta topologia é amplamente aplicada em circuitos eletrônicos de baixa potência devido à simplicidade do circuito e à capacidade de isolação. O circuito ainda permite aumentar o número de saídas apenas com o acréscimo de novos enrolamentos.

### 2.3 Métodos de Controle da Corrente

Os conversores *Buck*, *Boost*, *Buck-Boost* e *Flyback* são bastante conhecidos na literatura e amplamente utilizados em fontes de tensão controladas. No entanto, para aplicação em sistemas de iluminação empregando LEDs, é necessário que se tenha o controle da corrente de saída, e não da tensão. Assim, conversores operando com característica de fonte de corrente são desejáveis. Entretanto, existem diferentes formas de controlar a corrente de saída de uma fonte de tensão regulada com poucas modificações no circuito.

Uma alternativa simples é utilizar um resistor em série (resistor *shunt*) com a carga. Então, a corrente nos LEDs pode ser controlada através da tensão aplicada a este resistor, da mesma maneira utilizada nos conversores lineares apresentados anteriormente.

Para isso, o circuito de controle deve monitorar a tensão neste resistor e comparar com uma referência. Dependendo do resultado, a razão cíclica do conversor será alterada de forma a manter a tensão no resistor o mais próximo possível do valor de referência. A Figura 2.14 mostra como este método pode ser implementado nos conversores básicos apresentados anteriormente (Van der Broeck, 2007).

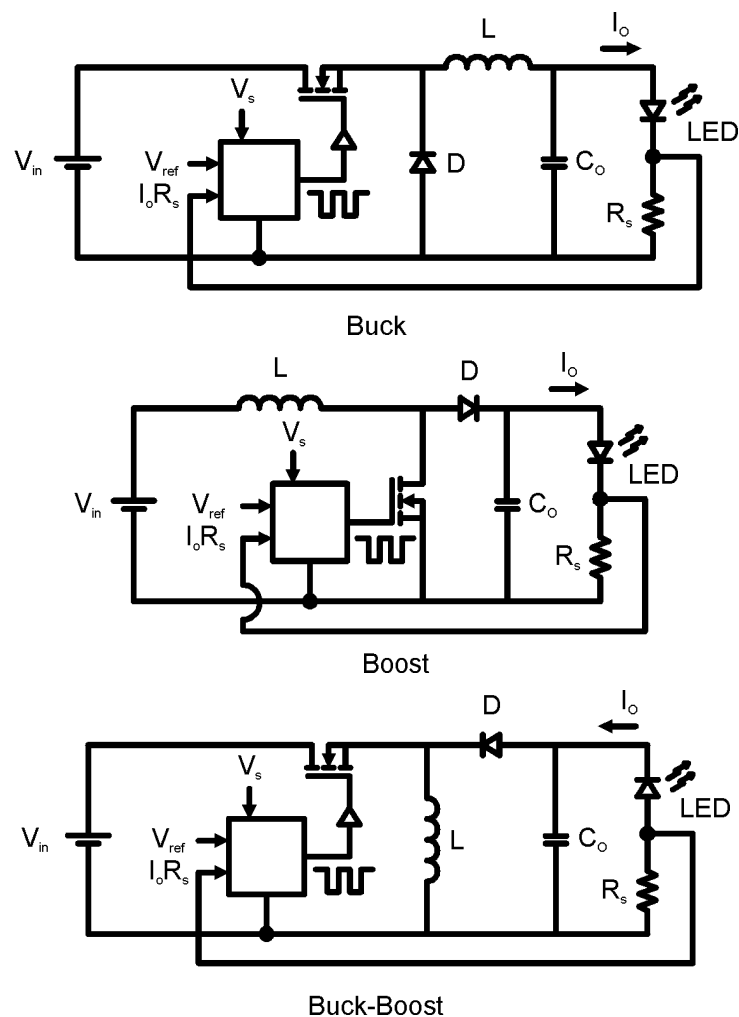


Figura 2.14 – Conversores CC-CC básicos com controle da corrente de saída por um resistor série (Van der Broeck, 2007).

Para o conversor *Boost*, a referência do circuito de controle é a mesma do resistor e do interruptor. No entanto, para os conversores *Buck* e *Buck-Boost*, o resistor e o interruptor não

compartilham da mesma referência. Isto exige um circuito de comando mais complexo, com isolamento entre as partes.

O uso de conversores isolados como o *Flyback* não soluciona este problema de forma direta. Isto porque o interruptor é conectado ao primário, enquanto o resistor é conectado ao secundário. Então, se faz necessário o uso de um optoacoplador para interligar os dois sinais e manter a isolamento, como mostra a Figura 2.15.

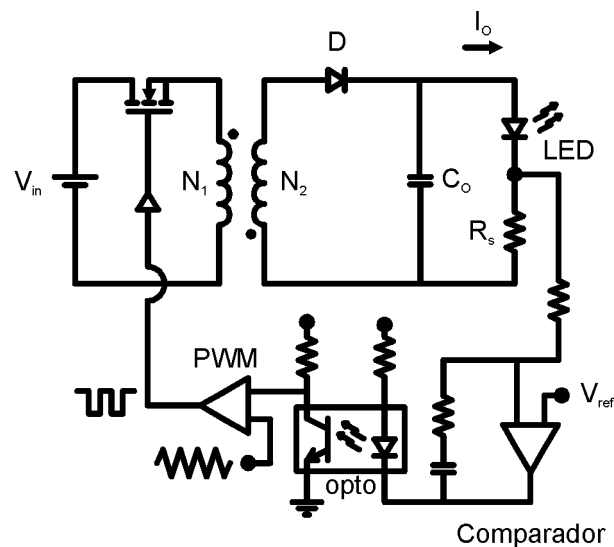


Figura 2.15 – Conversor *Flyback* com controle da corrente de saída por um resistor série.

No entanto, os amplificadores operacionais de baixo custo normalmente utilizam uma tensão de referência de 2,5 V. Assim, a tensão no resistor deverá ser mantida neste valor. Como a corrente que circula por um LED de potência pode chegar até 1 A (para LEDs de 3 W), a potência dissipada neste resistor seria de 2,5 W.

Entre as vantagens apresentadas pelos conversores que operam em alta frequência está a elevada eficiência. Portanto, a potência dissipada no resistor *shunt* deve ser a menor possível, uma vez que o objetivo é converter a energia elétrica em luz e não calor como ocorre nestes componentes.

Em algumas aplicações, o resistor *shunt* pode ser utilizado em série com o interruptor do conversor. Assim, a corrente de pico neste semicondutor é limitada e com isso a corrente média de saída do conversor. A Figura 2.16 mostra este método de controle aplicado aos conversores *Buck*, *Boost* e *Flyback* (Van der Broeck, 2007).

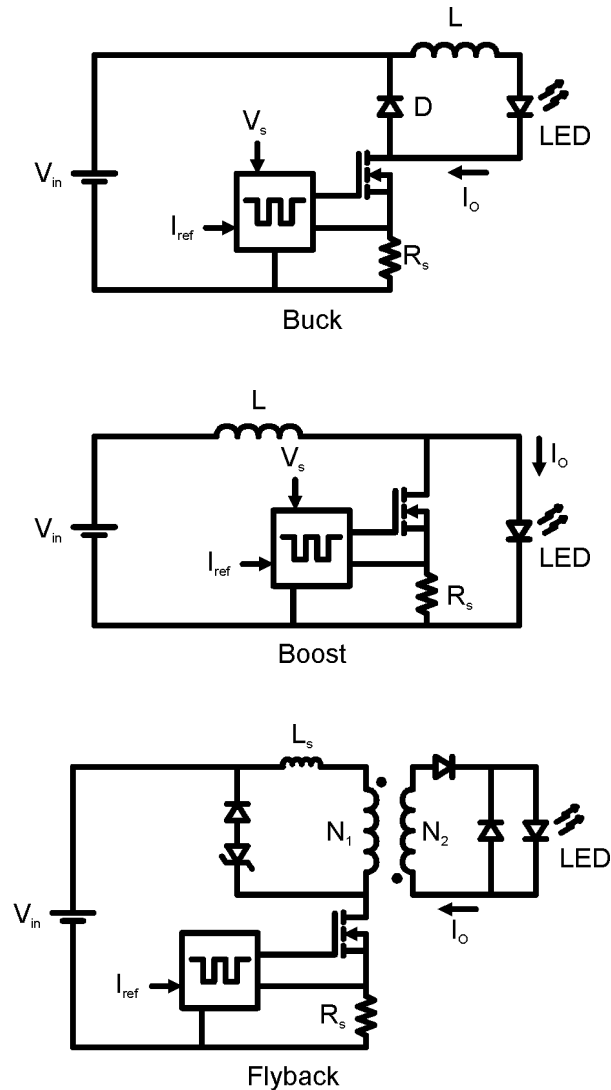


Figura 2.16 – Conversores *Buck*, *Boost* e *Flyback* com controle da corrente de saída por um resistor em série com o interruptor principal.

Esta alternativa de controle pode ser utilizada quando o capacitor de saída é retirado do circuito e os LEDs são alimentados com uma forma de onda quadrada ou triangular (Van der Broeck, 2007). No entanto, para o conversor *Flyback* o valor da tensão de saída afeta a corrente na carga e, portanto será dependente do número de LEDs utilizados. Além disso, a indutância de dispersão no componente magnético exige um circuito de auxílio à comutação (*snubber*) resultando em perdas adicionais. A utilização do diodo em antiparalelo com o LED é aconselhada de forma a evitar que uma tensão reversa elevada seja aplicada ao LED.

Outra topologia analisada também pelo mesmo autor emprega um circuito ressonante para alimentar os LEDs, operando como um conversor de tensão para corrente. A Figura 2.17 mostra o *driver* analisado.

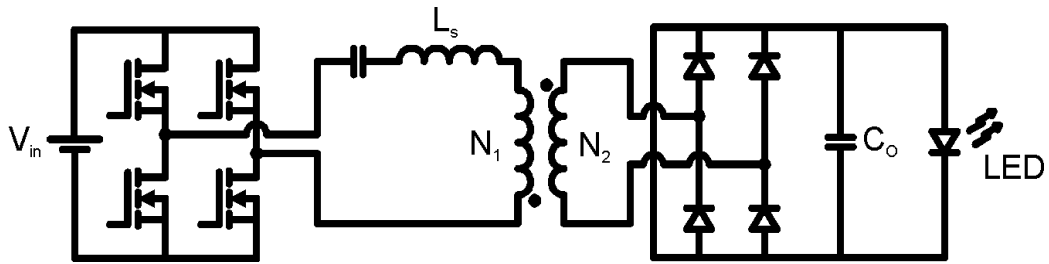


Figura 2.17 – Conversor ressonante alimentando LEDs com característica de fonte de corrente.

O uso deste circuito é justificado pelo fato de não necessitar um sensor adicional para o controle da corrente de saída além de apresentar menores perdas de comutação. Para alimentar os LEDs com uma corrente contínua, são utilizados quatro diodos que operam como uma ponte retificadora na saída do conversor. Além disso, são empregados um capacitor e um transformador, responsáveis pela ressonância, e quatro interruptores para realizar a comutação. O elevado número de semicondutores e circuitos de comando aumenta o custo e a complexidade deste circuito comparado ao conversor *Flyback*.

Alguns fabricantes têm investido no desenvolvimento de componentes eletrônicos para comando de interruptores com circuitos de controle integrado. Estes circuitos têm sido bastante utilizados para alimentação de LEDs, entre eles estão o HV9910, o IRS2541 e o NCP1200, apresentados na Figura 2.18.

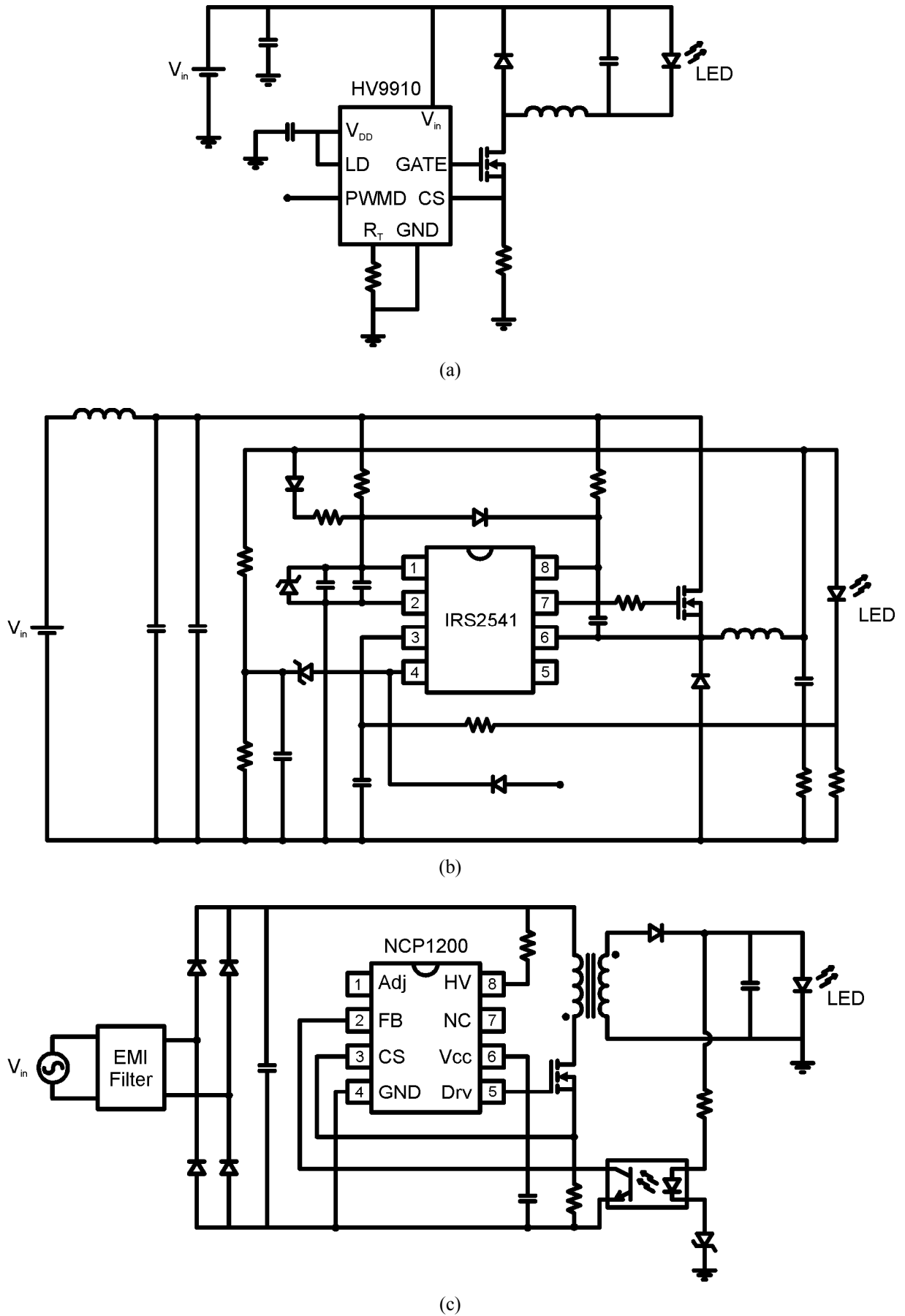


Figura 2.18 – Comando de interruptores com circuito de controle integrado (folha de especificação em anexo).

Alguns modelos destinados a sistemas eletrônicos de baixa potência apresentam também um MOSFET (*Metal–Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor*) integrado ao CI. Como os sistemas de iluminação empregando LEDs normalmente apresentam níveis de potência reduzidos, estes dispositivos são uma alternativa interessante para a implementação, pois contribuem para a compactação do circuito. Alguns deles como o LinkSwitch-TN, da empresa Power Integrations, e o NCP101x, da empresa On Semiconductor, possuem ainda um circuito interno para alimentação do CI bastante prático, reduzindo o número de componentes externos. Estes modelos são apresentados na Figura 2.19 aplicados aos conversores *Buck* e *Flyback*, respectivamente.

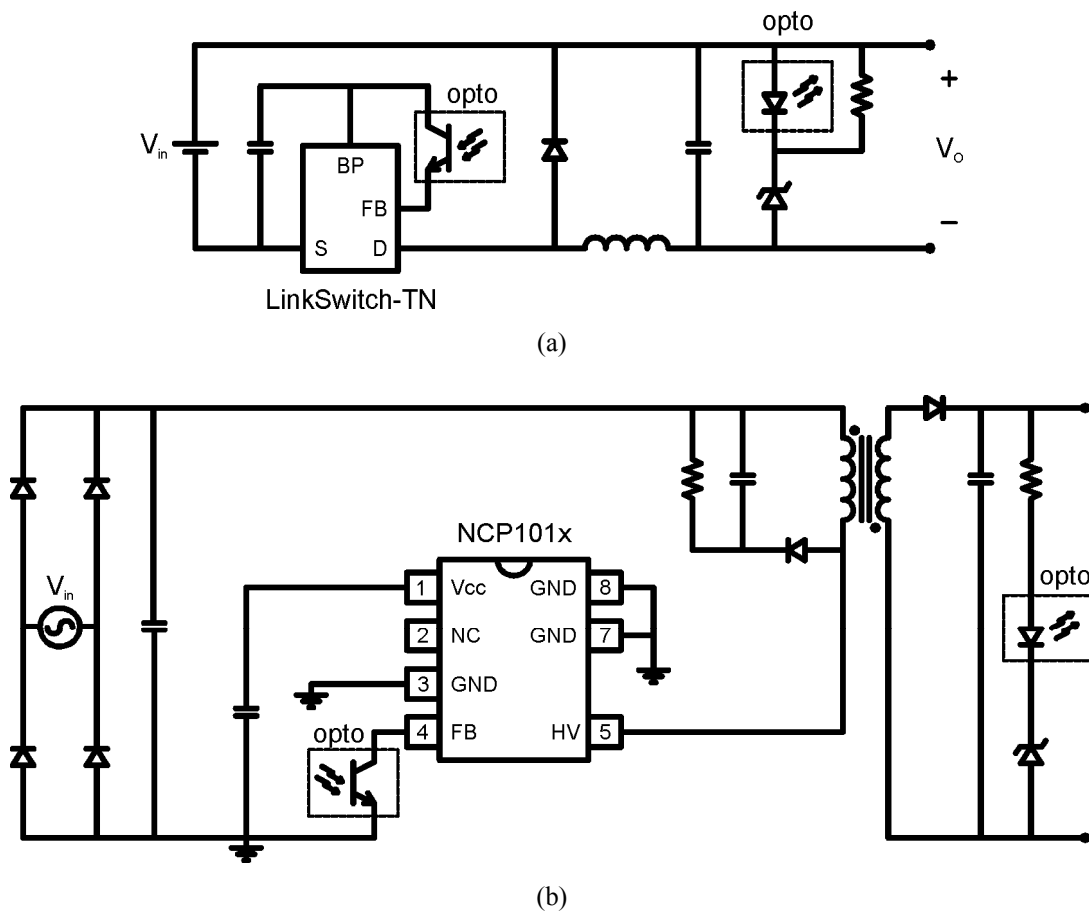


Figura 2.19 – Exemplos de circuitos dedicados com controlador e interruptor internos.

Segundo os fabricantes, estes circuitos requerem baixo consumo e apresentam proteções para o caso de sobretensão e sobre corrente no interruptor e ainda curto-circuito na carga (Power Integration, 2006; On Semiconductor, 2007). Ambos operam em alta frequência, evitando ruído audível e possuem baixo custo. Para a alimentação é necessário apenas um capacitor. Existem diferentes maneiras de controlar a potência de saída do



conversor utilizando estes CIs. Estas informações são disponibilizadas pelos fabricantes para que possam ser facilmente aplicadas.

A Figura 2.19 mostra a maneira mais simples para controlar a tensão de saída do conversor, utilizando um opto acoplador. Quando a tensão de saída atinge o valor da tensão de avalanche do diodo zener este se torna condutor. Neste momento, a corrente circula também pelo diodo do optoacoplador que altera a tensão no pino de realimentação. Assim, sempre que o diodo do optoacoplador entrar em condução, a razão cíclica será reduzida, diminuindo o valor da tensão de saída. Portanto, a tensão de referência do controle será a tensão de avalanche do diodo zener somada à queda de tensão do diodo do optoacoplador.

No entanto, a utilização de um optoacoplador pode aumentar o custo do sistema de maneira significativa. Por isso, muitos projetistas buscam substituir este componente por dispositivos de baixo custo como capacitores e diodos. A Figura 2.20 mostra algumas formas de controlar a tensão de saída sem utilizar optoacopladores empregando o NCP101x (On Semiconductor, 2003b).

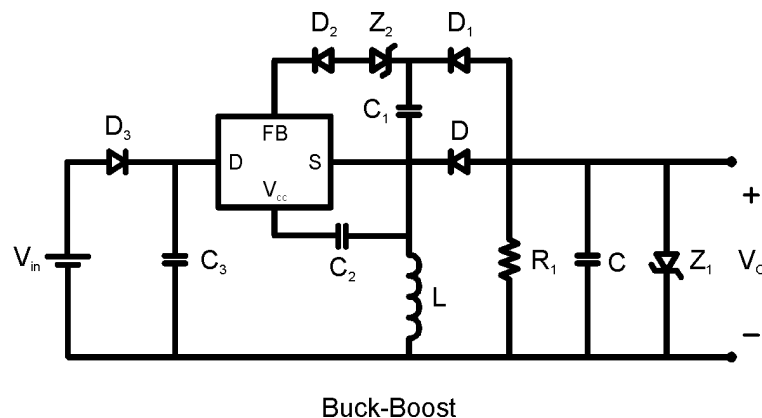
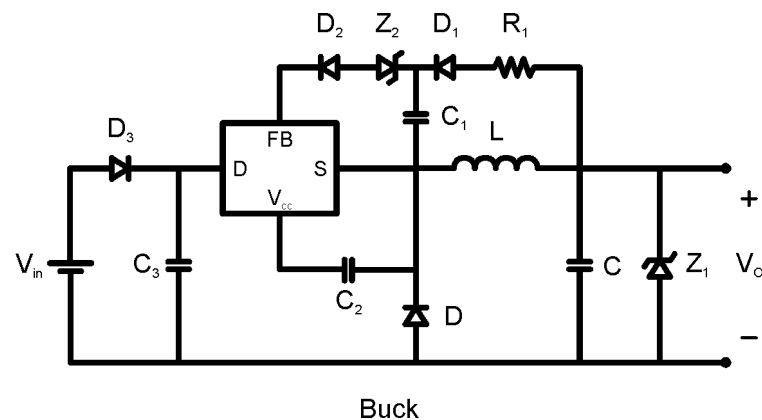


Figura 2.20 – Exemplos de controle da tensão de saída sem a utilização de optoacopladores.

O princípio de funcionamento destes controladores é monitorar a tensão do indutor. Isto porque este elemento possui a mesma tensão da saída enquanto estiver transferindo energia para carga. Neste momento, o capacitor é conectado em paralelo e carregado também com este valor. O diodo zener  $Z_2$  é empregado como referência. Quando o capacitor atingir o valor de disparo de  $Z_2$ , este passa a conduzir e a corrente que circula pelo pino de realimentação FB altera a razão cíclica do conversor.

Para alimentação de LEDs este método não traz benefícios, pois regula somente a tensão de saída e não pode ser aplicado para o controle da corrente, mesmo com a utilização de um resistor *shunt* em série com os LEDs.

## 2.4 Conexão dos LEDs

A luminosidade emitida por um único LED ainda não alcançou valores suficientes para que este possa ser aplicado em iluminação de ambientes, substituindo diretamente uma lâmpada incandescente ou fluorescente compacta. Porém, com a utilização de vários LEDs operando simultaneamente é possível atingir e até ultrapassar este valor. Portanto, a tendência é que os sistemas de iluminação utilizem arranjos de LEDs. Os LEDs podem ser conectados em um circuito de três maneiras diferentes: conexão série, conexão paralela ou série-paralela.

Na conexão em série todos os LEDs estão submetidos à mesma corrente. Como a luminosidade emitida é proporcional à corrente de polarização direta, este tipo de ligação apresenta a vantagem de manter o mesmo brilho em todos os dispositivos. Além disso, a tensão resultante é maior comparada às outras conexões, o que é desejável em algumas aplicações. Porém, em aplicações onde é necessário um nível baixo de tensão, como em circuitos alimentados por baterias, a ligação em série muitas vezes não pode ser utilizada e se dá preferência a ligação em paralelo.

Na conexão paralela todos os LEDs são submetidos à mesma diferença de potencial. Porém, a tensão de condução de cada LED pode variar entre 2,5 V e 4 V dependendo do modelo. Assim, torna-se mais difícil manter o equilíbrio entre os braços e controlar a corrente aplicada a cada dispositivo com este tipo de conexão. Então, a corrente que circula em um braço pode ser muito superior à de outro. Como consequência, surgiria uma diferença na intensidade luminosa de cada LED.

Na conexão série-paralela, alguns LEDs são ligados em série e estes braços de LEDs em série, por sua vez, são ligados em paralelo uns com os outros. Considerando a mesma

quantidade de LEDs empregados no circuito, a tensão aplicada neste tipo de conexão não é tão alta quando na conexão em série ou tão baixa quanto na paralela. Porém, a complexidade do controle da tensão e corrente nos dispositivos continua sendo a mesma da conexão paralela, causando um desequilíbrio entre os braços.

Algumas pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de analisar o comportamento dos LEDs para os diferentes tipos de conexões e outras têm buscado a melhor maneira de controlar a corrente em braços de LEDs em paralelo. Uma das maiores fabricantes de lâmpadas e sistemas de iluminação, a OSRAM, realizou um estudo sobre o desequilíbrio da corrente em grupos de LEDs submetidos à conexão paralela (OSRAM, 2004). As topologias utilizadas são apresentadas na Figura 2.21.

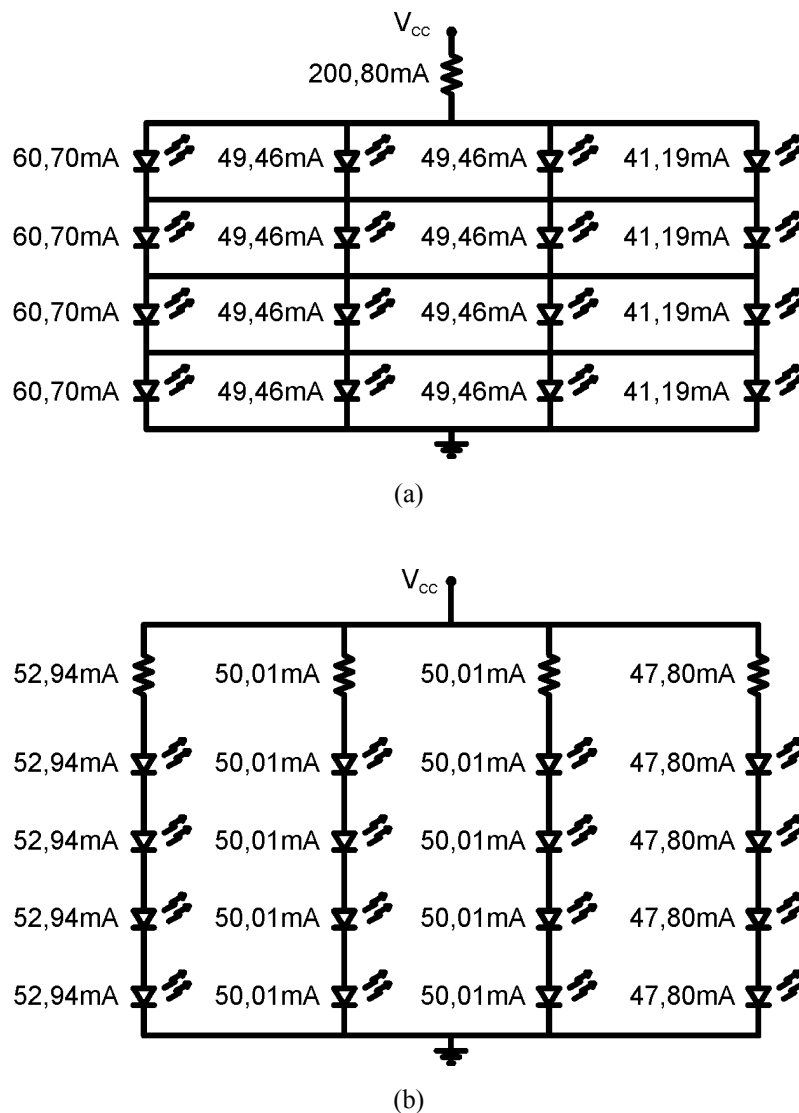
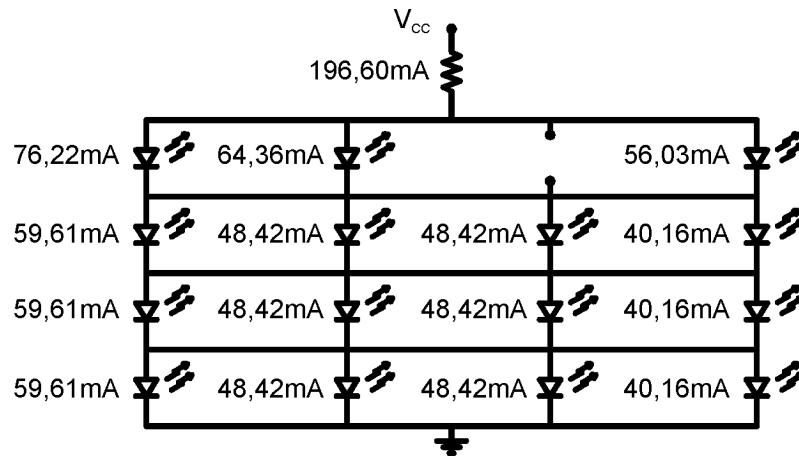


Figura 2.21 – Estudo sobre o desequilíbrio da corrente nos LEDs conectados em paralelo:  
 (a) matriz com todos os LEDs conectados em série e em paralelo simultaneamente;  
 (b) conexão série-paralela com um resistor em cada braço.

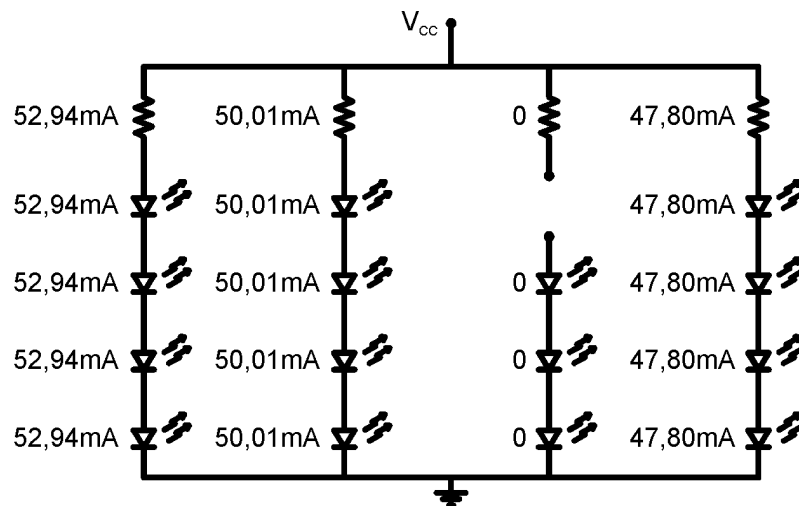
A Figura 2.21 (a) utiliza uma matriz com todos os LEDs conectados em série e em paralelo simultaneamente, e um único resistor para controlar a corrente total do circuito. A Figura 2.21 (b) utiliza a conexão série-paralela com um resistor em cada braço para realizar o controle da corrente separadamente. As topologias foram simuladas considerando a variação da tensão de polarização direta existente em cada LED. Para isso, estes dispositivos foram divididos em quatro grupos conforme o valor da tensão.

O resultado mostra que para as duas topologias a corrente que circula em cada LED apresenta uma diferença de 5 % a 20%, o que provoca uma alteração na luminosidade perceptível ao olho humano. Além disso, a tensão de condução do LED possui um coeficiente de temperatura negativo, ou seja, quanto maior a temperatura, menor é a tensão entre os terminais do dispositivo. O aumento da corrente provoca uma elevação da temperatura. Então, o braço que apresentar a maior corrente, irá aquecer mais rápido e a tensão irá diminuir. Como consequência, a corrente irá aumentar ainda mais, intensificando o desequilíbrio da corrente, podendo inclusive danificar algum LED.

A falha de um LED pode resultar em um circuito aberto ou em um curto-circuito entre os terminais deste dispositivo. Neste mesmo estudo, foram simuladas as mesmas topologias considerando a falha de um LED no caso de um circuito-aberto. A Figura 2.22 mostra o resultado da pesquisa.



(a)



(b)

Figura 2.22 - Desequilíbrio da corrente nos LEDs conectados em paralelo considerando a queima de um deles:  
 (a) matriz com todos os LEDs conectados em série e em paralelo simultaneamente;  
 (b) conexão série-paralela com um resistor em cada braço.

Para a primeira topologia, a falha do LED não impede o caminho da corrente para os demais, que permanecem acesos. Porém, analisando os resultados apresentados, é possível notar que a queima do dispositivo provoca o aumento da corrente nos demais LEDs conectados em paralelo. Este aumento levaria à queima destes semicondutores e como consequência, todos os demais ficariam apagados.

A segunda topologia apresenta melhores resultados para o equilíbrio da corrente, uma vez que a falha do LED não influencia nos outros braços. A desvantagem, no entanto, é que o dispositivo queimado impede o caminho da corrente e mantém os demais LEDs em série apagados.

Uma topologia empregando o circuito integrado LM317L para realizar o controle da corrente de LEDs conectados em paralelo é proposta na literatura (On Semiconductor, 2003a). Esta topologia é mostrada na Figura 2.23.

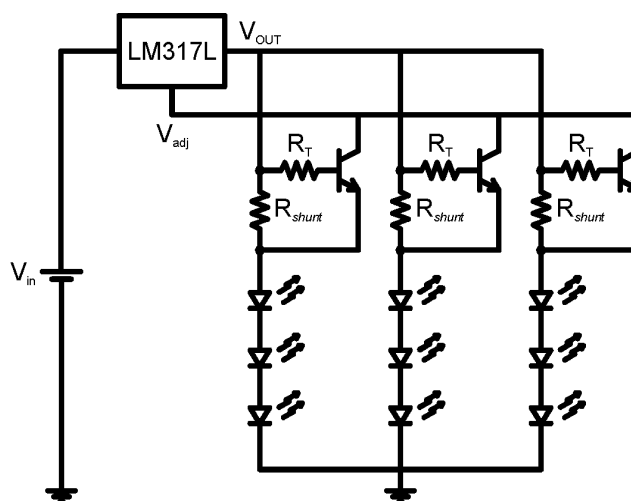


Figura 2.23 – Controle da corrente nos LEDs conectados em paralelo empregando o circuito integrado LM317L.

Este CI mantém uma tensão fixa de 1,25 V entre os pinos  $V_{out}$  e  $V_{adj}$ . O transistor é acionado através da corrente que circula em direção aos LEDs pelo resistor  $R_T$ , e opera na região de saturação. Assim, enquanto o transistor estiver saturado, a tensão de referência é aplicada ao resistor *shunt* que mantém a corrente nominal nos LEDs.

A vantagem apresentada pelo autor é o fato de regular a corrente nos braços mesmo com a falha de algum LED. Isto porque no caso de um LED queimar, e impedir o caminho da corrente, o transistor é bloqueado e o controle deste braço é desabilitado, sem afetar os demais. No entanto, o autor não considerou o fato de o LED, ao queimar, tornar-se um curto-circuito. Caso esta situação aconteça, a tensão neste braço reduz e conseqüentemente a tensão aplicada aos outros braços em paralelo também reduzirá. Portanto, apenas o braço que contém o LED queimado permanece em funcionamento, pois o valor da tensão aplicada aos outros braços não será suficiente para manter os demais LEDs conduzindo. Para verificar esta afirmação, a topologia foi simulada e os resultados comprovaram o fato.

Outra técnica para controlar a corrente dos LEDs conectados em paralelo é conhecida como espelho de corrente. As topologias que empregam esta técnica fazem uso de interruptores controlados em série com os LEDs, equalizando a corrente dos braços (Sá Junior, 2007b; Corrêa, 2008). No entanto, o uso de interruptores, juntamente com os seus circuitos adicionais para acionamento, aumenta o custo e o tamanho do sistema e não são atrativos para algumas aplicações.

Então, analisando as três alternativas citadas, aquela que apresenta as melhores vantagens para aplicação em uma lâmpada compacta empregando LEDs é a conexão série. Isto porque a realimentação da saída é feita em apenas um braço, simplificando o circuito, e o controle da corrente garante a mesma intensidade luminosa em todos os LEDs. Além disso, o conversor opera com tensão de saída maior, o que facilita o projeto do equipamento quando alimentado a partir da rede elétrica.

A única desvantagem é a questão da falha de um LED resultar em um circuito aberto, pois para a conexão em série, o curto-circuito em seus terminais não apresenta maiores problemas além do não acendimento deste dispositivo, uma vez que os demais continuam em operação. No entanto, no caso de um circuito aberto, os LEDs restantes são desativados, pois o caminho da corrente é interrompido. Esta é a principal desvantagem deste tipo de conexão e que leva muitos autores a não utilizá-la (OSRAM, 2004).

#### 2.4.1 Sistema de Proteção Contra a Falha do LED em Ligação Série

A idéia proposta para solucionar o problema da falha de um LED é a introdução de Diacs em paralelo com alguns LEDs formando grupos. Assim, caso ocorra a falha de um dispositivo e este se torne um circuito aberto, a tensão de saída do conversor é aplicada aos terminais do Diac em paralelo com o grupo deste LED. Quando a tensão de disparo do Diac é alcançada, este dispositivo conduz mantendo o caminho para a corrente nos demais grupos de LEDs. A Figura 2.24 mostra a topologia proposta funcionando para as duas situações, em curto-circuito e em circuito aberto.

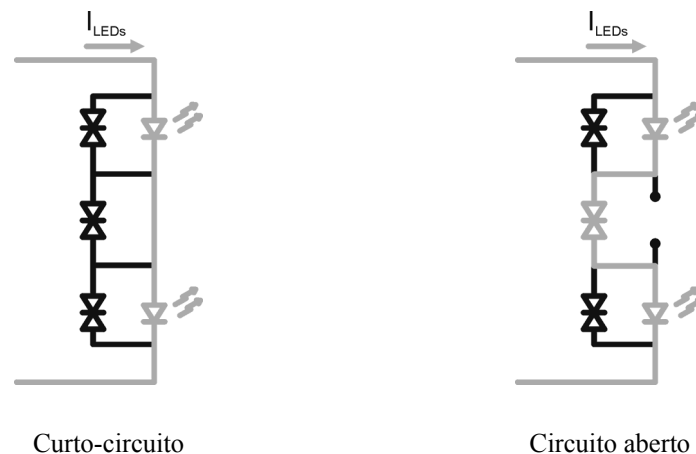


Figura 2.24 – Utilização de Diacs em paralelo com os LEDs para proteção contra a falha do dispositivo.

Então, mesmo com a danificação de alguns LEDs, os demais continuam em funcionamento. Esta é uma alternativa simples e de baixo custo que garante a iluminação do ambiente até que o LED defeituoso seja substituído, sob pena de redução da intensidade luminosa total, que é proporcional ao número de LEDs desativados.

Esta característica evita o descarte imediato da lâmpada, como acontece com as LFC e ainda permite a manutenção do sistema através da substituição do dispositivo danificado, uma vez que o custo de um LED é baixo comparado ao valor total do equipamento. Além disso, o descarte inadequado de LFC traz prejuízo ao meio ambiente, visto que o mercúrio presente nestas lâmpadas pode causar graves doenças em pessoas e animais que entrarem em contato com esta substância, e por isto deve ser evitado.

Apesar de ser um dispositivo de baixo custo, a utilização de Diacs em paralelo com cada um dos LED poderia aumentar o custo do circuito de forma significativa. Por este motivo é aconselhado utilizar os Diacs com grupos de LEDs, desde que a tensão de condução neste grupo seja inferior à tensão de disparo do Diac, e que a redução da luminosidade da lâmpada não seja significativa.



## CAPÍTULO 3

# **SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO DE EMERGÊNCIA**

Há muitos anos o homem tornou-se dependente da luz. Na maior parte do tempo, a iluminação auxilia ou se faz necessária para o desenvolvimento de qualquer atividade. A interrupção da luz de forma instantânea pode provocar danos materiais e até acidentes dentro de um local de trabalho. Por isso, os sistemas de iluminação de emergência tornaram-se elementos importantes, e são obrigatórios em muitos ambientes. Estes equipamentos são instalados principalmente em corredores e escadarias, garagens, elevadores, restaurantes, empresas e demais ambientes públicos garantindo a iluminação mesmo com a falta de energia elétrica.

Em alguns casos, estes equipamentos são aplicados também como iluminação suplementar para sistemas empregando lâmpadas de descarga. Isto porque as lâmpadas de descarga como a de mercúrio ou HPS, necessitam de um tempo para resfriamento do bulbo antes de serem acionadas novamente. Além disso, o tempo requerido para atingir a luminosidade máxima após a ocorrência de uma interrupção momentânea varia de 1 minuto para a HPS até 20 minutos para a lâmpada de vapor de mercúrio ou halógenas (IEEE, 1995).

Estes equipamentos podem operar como um sistema de iluminação permanente ou não-permanente. Nos sistemas de iluminação permanente, a lâmpada é alimentada pela rede elétrica, sendo comutada automaticamente para a fonte de alimentação de energia alternativa, como uma bateria, em caso de falta e/ou falha da fonte de energia normal. Já nos sistemas de iluminação não-permanente, a lâmpada não é alimentada pela rede elétrica da concessionária e, só em caso de falta de energia pela fonte normal, é que passa a ser alimentada automaticamente pela fonte de energia alternativa.

### **3.1 Sistemas de Iluminação de Emergência Tradicionais**

Os sistemas de iluminação de emergência tradicionais normalmente utilizam lâmpadas de descarga como fluorescentes alimentadas por baterias, com mostra a Figura 3.1. Estes equipamentos exigem baterias com uma capacidade de energia considerável que possuem peso e volume elevados. Isto, na maioria das vezes, prejudica a decoração do ambiente.



Figura 3.1 - Sistemas de iluminação de emergência tradicionais.

Para reduzir o tamanho do equipamento, os sistemas de iluminação de emergência têm-se utilizado lâmpadas fluorescentes tubulares de tamanho reduzido ou ainda lâmpadas fluorescentes compactas. A autonomia normalmente é de duas horas para a operação com duas lâmpadas e de quatro horas para a operação com uma lâmpada apenas.

Entretanto, como as lâmpadas fluorescentes operam com sinais de tensão e corrente alternados e exigem um nível de tensão elevado para sua ignição, diferente do fornecido pelas baterias, é necessário um circuito que eleve esta tensão e ainda transforme o sinal contínuo da fonte em alternado. Além disso, necessitam também de um circuito para carregar a bateria através da energia fornecida pela rede e outro circuito para monitoramento do sinal de entrada. A Figura 3.2 mostra o diagrama de blocos de um circuito de iluminação de emergência utilizando lâmpadas fluorescentes.

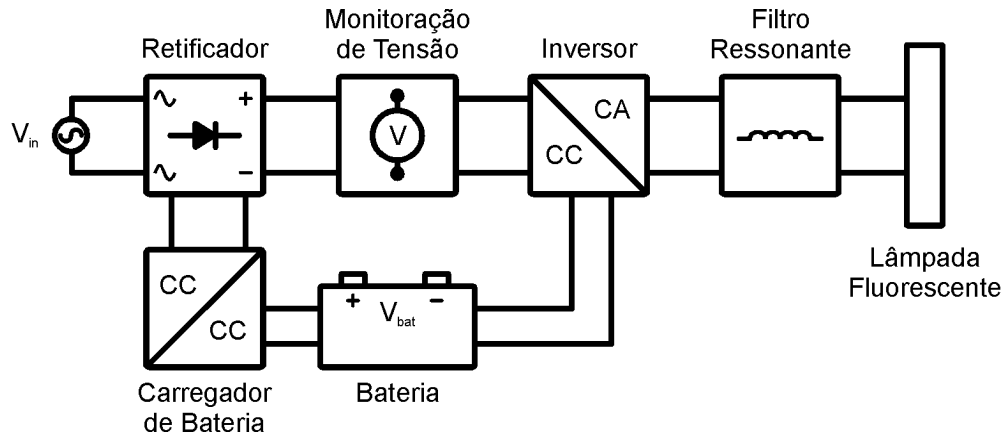


Figura 3.2 – Diagrama de blocos de um sistema de iluminação de emergência utilizando lâmpada fluorescente.

### 3.2 Sistemas de Iluminação de Emergência Empregando LEDs

A utilização de LEDs em sistemas de iluminação de emergência torna-se um atrativo devido à sua alta eficácia luminosa (100 lm/W) (OSRAM, 2007), o qual permite a utilização de baterias pequenas e/ou uma maior autonomia do sistema. Além disso, apresentam peso e tamanho reduzidos, possibilitando a aplicação em sistemas de iluminação compactos (Oliveira, 2007). Outra grande vantagem destes dispositivos é a sua elevada vida útil (50.000 horas) (Luxeon, 2008), que é consideravelmente superior a das lâmpadas fluorescentes (8.000 horas) (OSRAM, 2007).

Os LEDs são alimentados com corrente contínua, possuem uma baixa tensão de condução e não necessitam de ignição, diferentemente das lâmpadas fluorescentes. Estas características tornam-se vantajosas quando se deseja alimentá-los através de uma bateria.

Alguns sistemas de iluminação de emergência permanente empregando LEDs foram desenvolvidos para aplicação em sinalizadores (Rico-Secades, 2005). O objetivo do projeto é a substituição da lâmpada fluorescente por LEDs utilizando a mesma luminária do sistema tradicional. São empregadas quatro baterias de 1,2 V conectadas em série, permitindo uma autonomia de uma hora. A Figura 3.3 mostra as topologias utilizadas no projeto.

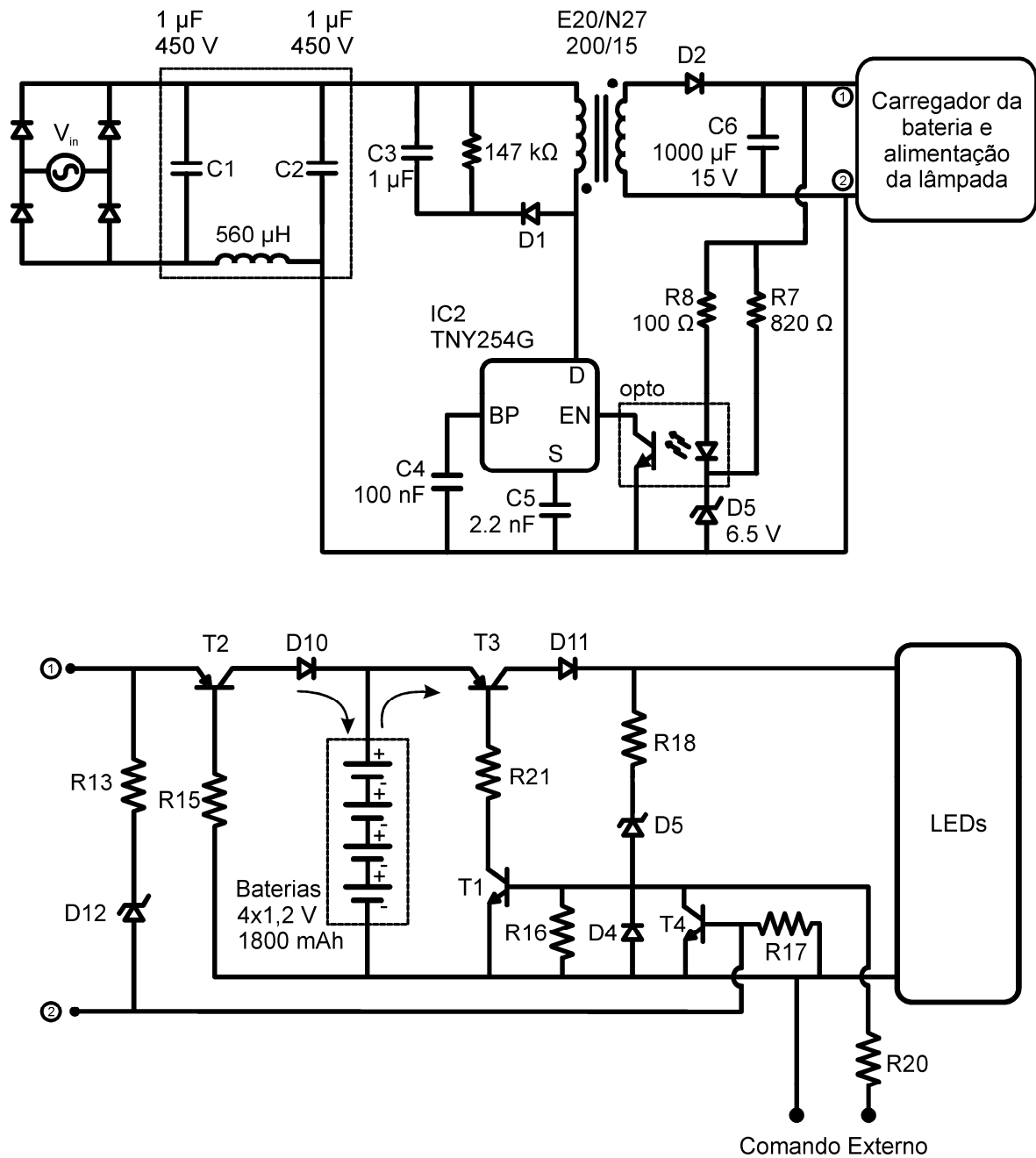


Figura 3.3 – Sistema de iluminação de emergência permanente empregando LEDs (Rico-Secades, 2005).

Esta topologia utiliza um conversor *Flyback* para reduzir a tensão da rede e carregar a bateria. O circuito integrado TNY254G foi utilizado como interruptor e ainda realiza a função de controlar a tensão de saída. Para manter a isolamento entre a fonte de entrada e a carga, um optoacoplador foi empregado.

O circuito adicional utiliza um transistor operando na região de saturação para permitir a carga da bateria quando necessário. A tensão da rede é monitorada através de um diodo zener (D<sub>12</sub>) e um transistor (T<sub>2</sub>). Caso haja alguma interrupção no fornecimento de energia da

rede, a tensão de saída é reduzida e o sistema detecta a falha. A partir deste instante, a bateria alimenta os LEDs. Neste circuito foram utilizadas quatro pilhas AA com tensão nominal de 1,2 V conectadas em série e um módulo contendo três LEDs conectados em paralelo e um resistor *shunt* em cada braço para limitar a corrente.

Dando seqüência a esta idéia, os mesmos autores fizeram algumas modificações na topologia permitindo o controle da corrente nos LEDs quando alimentados pela bateria. Além disso, o número de LEDs aumentou de três para quatro (Calleja, 2004).

Para carregar a bateria, um conversor *Flyback* foi utilizado, exatamente da mesma maneira utilizada anteriormente. No entanto, durante a falha da energia elétrica, os LEDs são alimentados pela bateria através de um conversor *Boost*, como mostra a Figura 3.4. A corrente de saída deste conversor é monitorada e controlada através de um resistor *shunt* conectado em série com o interruptor.

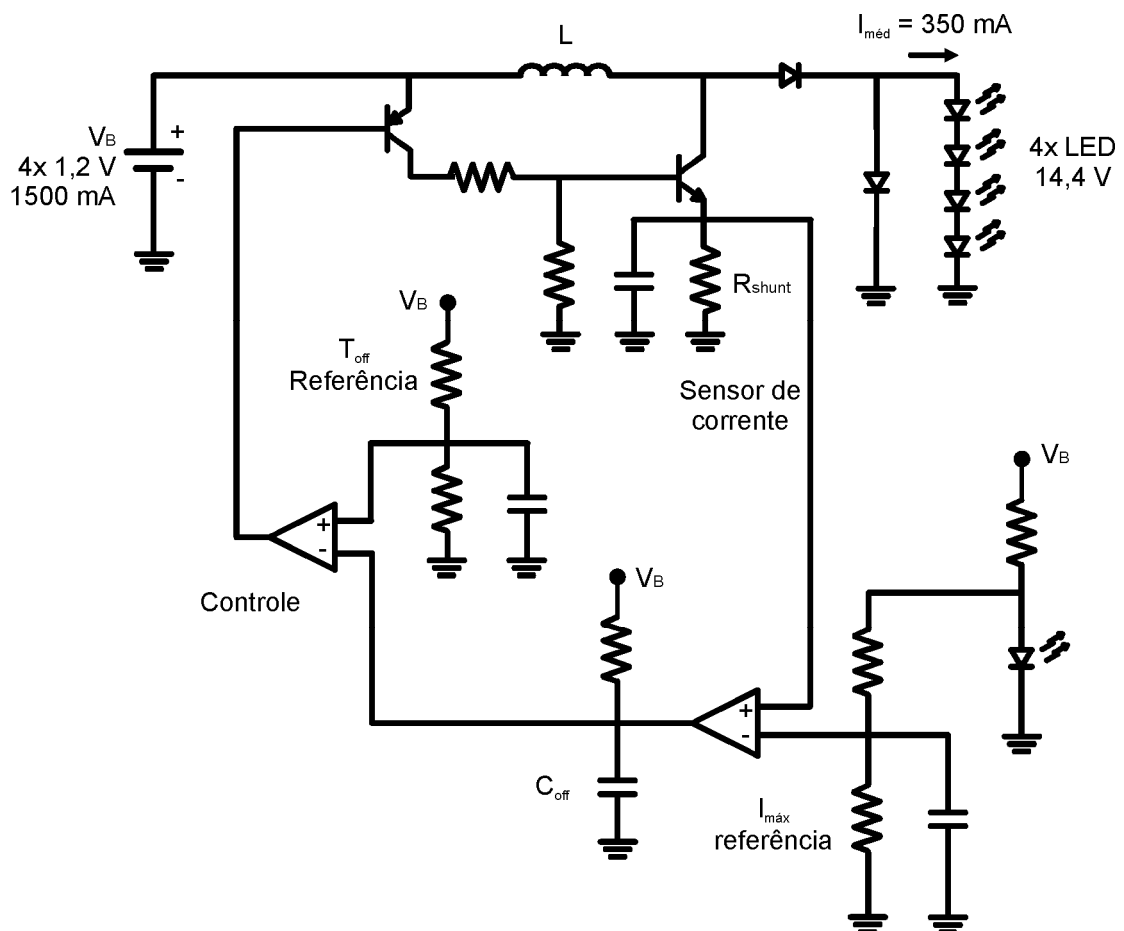


Figura 3.4 – Conversor *Boost* alimentando LEDs num sistema de iluminação de emergência permanente (Calleja, 2004).

Uma terceira topologia ainda foi proposta pelo mesmo grupo de autores (Rico-Secades, 2004). Desta vez, outro conversor *Flyback* foi empregado para alimentar os LEDs pela bateria, como mostra a Figura 3.5. O número de LEDs aumentou de quatro para cinco e o número de pilhas foi reduzido para três. Segundo os autores, esta topologia resolveu algumas limitações apresentadas pelas topologias anteriores e ainda apresentou elevada eficiência.

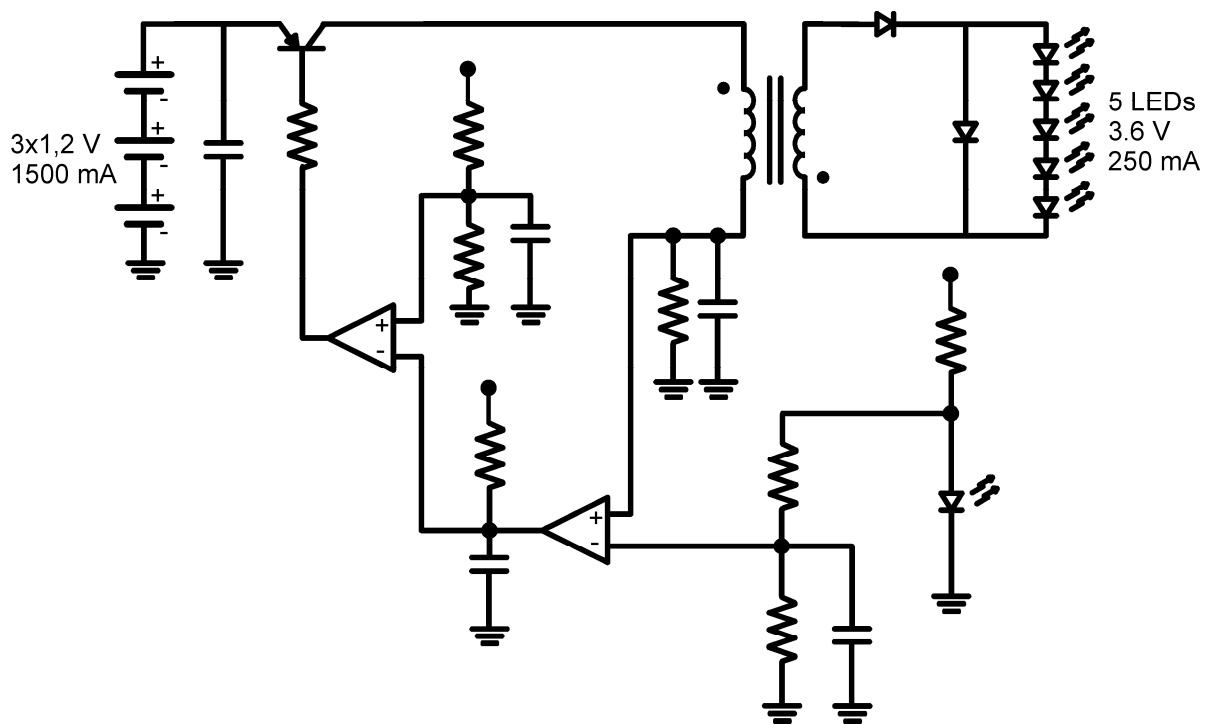


Figura 3.5 – Conversor *Flyback* alimentando LEDs num sistema de iluminação de emergência permanente (Rico-Secades, 2004).

Em 2007, Oliveira desenvolveu um sistema de iluminação distribuída (Oliveira, 2007). A idéia deste sistema é fixar somente o LED às calhas do sistema tradicional utilizando lâmpadas fluorescentes sem a necessidade de manter a bateria e os demais circuitos de acionamento próximos à fonte de luz. A grande vantagem é o fato de a iluminação de emergência não ficar concentrada em um único ponto do ambiente, mantendo uma luminosidade semelhante à fornecida no estado normal. A topologia desenvolvida é apresentada na Figura 3.6.

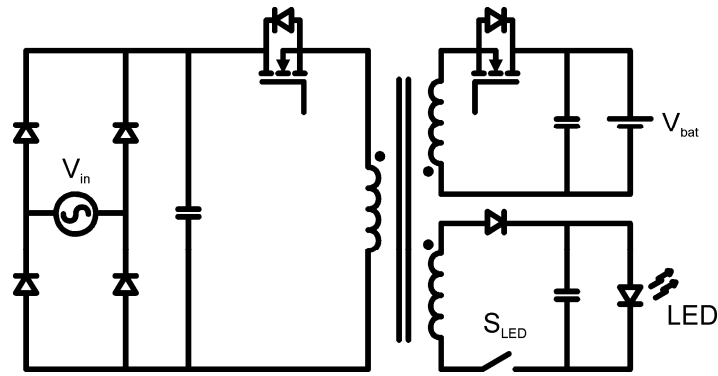


Figura 3.6 – Conversor *Flyback* integrado aplicado a um sistema de iluminação de emergência distribuído (Oliveira, 2007).

Neste circuito são utilizados dois conversores *Flyback* integrados operando separadamente. Em um primeiro instante, o conversor carrega a bateria através da rede, como mostra a Figura 3.7.

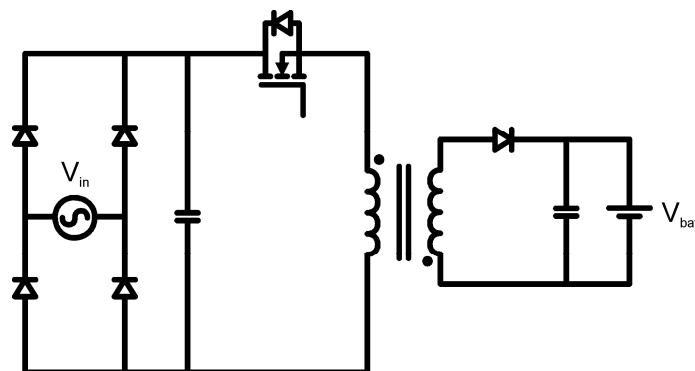


Figura 3.7 – Conversor *Flyback* integrado carregando a bateria (Oliveira, 2007).

Em um segundo momento, a bateria passa a operar como fonte de energia e os LEDs como carga do conversor, como mostra a Figura 3.8. Assim, a integração dos conversores está no fato de o enrolamento ligado à bateria funcionar ora como secundário, ora como primário, fazendo parte de um mesmo núcleo magnético.

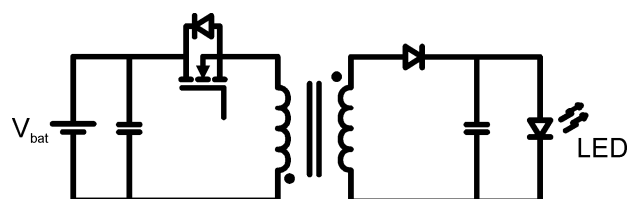


Figura 3.8 – Conversor *Flyback* integrado alimentando os LEDs através da bateria (Oliveira, 2007).

Os LEDs são conectados em série-paralelo na saída do conversor. Cada calha forma um braço permitindo o uso de um ou mais LEDs conectados em série. Para controlar a corrente em cada braço é utilizado o circuito integrado NUD4001.

A tensão da rede é monitorada através de um microcontrolador. Quando houver uma falha no fornecimento de energia, o microcontrolador aciona um relé ( $S_{LED}$ ) conectando os LEDs ao enrolamento secundário do *Flyback* alimentado pela bateria. Os interruptores utilizados no conversor são do tipo MOSFET e o circuito de comando é implementado também pelo microcontrolador.

A saída do conversor forma então um barramento único que será distribuído entre as calhas para a ligação dos LEDs. Isto permite que os circuitos, juntamente com a bateria, estejam concentrados numa central em um ponto específico da casa e somente os LEDs sejam distribuídos pelos cômodos da residência. Portanto, esta topologia é muito interessante para alimentar um sistema de iluminação de emergência com potências maiores. Exigindo, porém, uma bateria com capacidade de energia elevada e conseqüentemente um tamanho maior. Para esta aplicação isto não é problema, pois a bateria não precisa estar fixada com a calha.

### 3.3 Requisitos Exigidos pelas Normas

A instalação dos sistemas de iluminação de emergência é regida por normas. No Brasil, quem determina os requisitos mínimos que estes sistemas devem obedecer é a NBR 10898:1999 (ABNT, 1999). Considerando as exigências internacionais, a norma IEEE Standard 446-1995 (IEEE, 1995) dita estas especificações mínimas. Apesar de estas normas serem direcionadas para a instalação dos equipamentos, ambas foram analisadas de forma a obter as especificações que o sistema de iluminação de emergência deve atender e incluí-las no projeto.

#### 3.3.1 Exigências da Norma Brasileira (NBR 10898)

Segundo a norma brasileira NBR 10898:1999, os sistemas de iluminação podem ser classificados da seguinte maneira:

- Iluminação de balizamento ou sinalização: normalmente composta por símbolos ou letras que indicam um caminho.



- Sinalização especial para aviação comercial: destinada a sinalizar a pista de vôo.
- Iluminação permanente: a iluminação está sempre em funcionamento com ou sem a energia da rede elétrica.
- Iluminação não-permanente: a iluminação entra em funcionamento somente quando houver falta ou falha na alimentação pela rede elétrica.

A idéia proposta neste trabalho, de desenvolver uma lâmpada compacta com iluminação de emergência integrada, apresenta características de um sistema de iluminação permanente e não-permanente e, portanto deve atender às exigências estabelecidas pela norma. Além disso, o sistema é considerado um bloco autônomo, ou seja, apresenta em um mesmo invólucro a fonte de luz (LEDs), a bateria e os demais circuitos necessários para seu funcionamento.

A iluminação de emergência deve garantir um nível mínimo de iluminamento no piso de 5 lux em locais com desníveis, como escadas ou passagens com obstáculos, e 3 lux em locais planos, como corredores e áreas de refúgio. Já para a realização de atividades ou leitura, a iluminação deve estar entre 50 e 500 lux (Lumileds, 2008). Portanto, a luminosidade da lâmpada pode ser alterada para um nível alto enquanto estiver operando através da rede elétrica e para um nível baixo enquanto estiver operando através da bateria.

No entanto, um dos itens exigidos pela norma brasileira é que esta variação da intensidade luminosa não seja superior à relação de 1:20 entre os dois estados. Outra exigência feita é que o sistema não poderá ter uma autonomia inferior a 1 hora de funcionamento com uma perda maior que 10% da luminosidade inicial (ABNT, 1999).

### 3.3.2 Internacional IEEE (IEEE Std 446-1995)

Considerando a norma internacional IEEE Std 446-1995, o nível mínimo de iluminamento no piso deve ser de 6 lux (IEEE, 1995). Este valor é superior ao exigido pela norma brasileira assim como a autonomia do sistema. Para a norma internacional, a autonomia do sistema deve ser de 1,5 horas com uma luminosidade mínima de 0,6 lux ao final deste período (IEEE, 1995).

No entanto, esta norma é menos exigente no que diz respeito à variação da luminosidade durante a transição do estado de iluminação normal para o estado de iluminação de emergência. Esta taxa de variação é de 1:40.

### 3.3.3 Considerações de Projeto

Como a luminosidade emitida pelo LED é proporcional à corrente que circula pelo dispositivo, é possível definir alguns parâmetros de projeto para atender às exigências das normas. Uma delas é a especificação da corrente nos LEDs quando estes são alimentados pela energia da rede ou pela energia da bateria. Esta relação não poderá ser superior a 20:1 para atender ambas as normas.

Outro parâmetro que pode ser definido é o modelo e a quantidade de LEDs a serem utilizados para obtermos o nível de iluminamento exigido, além da escolha da bateria adequada para garantir a autonomia mínima de 1,5 horas.

### 3.4 Características das Baterias Aplicadas nos Sistemas de Iluminação de Emergência

As baterias mais empregadas nos sistemas de iluminação tradicionais são as de Chumbo-Ácido. Existem diversos modelos com características de tensão e corrente diferentes. A Figura 3.9 mostra alguns modelos disponíveis no mercado.



Figura 3.9 – Baterias empregadas nos sistemas de iluminação tradicionais.

Estas baterias permitem utilizar até 80% de sua capacidade total por centenas ou até milhares de vezes (Lazzarin, 2006). Elas também são empregadas em empilhadeiras elétricas e possuem capacidade de energia e tamanho inferior as baterias automotivas.

A evolução das pesquisas nesta área levou ao desenvolvimento de modelos empregando outros elementos químicos. O resultado permitiu a criação de baterias menores e com capacidade de energia suficiente para muitas aplicações, principalmente para equipamentos portáteis como câmeras digitais, rádios e controles remotos. As baterias de Níquel-Metal Hidreto (Ni-MH) são bastante conhecidas atualmente e podem ser consideradas como uma evolução das baterias de Níquel-Cádmio (Ni-Cd). Isto porque as de Ni-MH apesar de possuir um ciclo de vida inferior as de Ni-Cd, apresentam diversas vantagens que compensam seu uso como capacidade de energia até 40 % mais alta, baixo custo, não apresentam metais pesados, e por isso são consideradas ecologicamente corretas, além da redução do efeito memória. A Figura 3.10 mostra alguns modelos encontrados no mercado e suas características.



Figura 3.10 – Baterias de Ni-Cd e Ni-MH normalmente empregadas em equipamentos portáteis.

O efeito memória das baterias acontece ao longo da vida útil quando a carga ou a descarga não é completa. Assim, carregar a bateria por um tempo inferior ao necessário ou sem descarregá-la por completo previamente, provoca a redução da sua capacidade de energia. Em produtos eletrônicos como celulares, computadores portáteis e sistemas de iluminação de emergência, exigir que a bateria seja descarregada completamente antes da

recarga, não é desejável, pois são equipamentos que estão em uso constante. Assim, o efeito memória é considerado um problema que pode limitar a aplicação de determinadas baterias.

No entanto, baterias de Lítio-Íon (Li-Ion) apresentam uma densidade de energia superior as de Ni-MH e não possuem efeito memória. Pelo contrário, é recomendado que a bateria não seja descarregada completamente (Galysh, 2004). Isto faz com que estes modelos sejam as mais utilizadas em telefones sem-fio, celulares e computadores portáteis. A Figura 3.11 mostra alguns exemplos destas baterias e suas características (Battery Space, 2008).



Figura 3.11 – Baterias de Li-Ion e suas características.

Novas pesquisas têm sido feitas e acredita-se que evolução das baterias estará no uso de células de combustível compostas por hidrogênio ou metanol. A vida útil será extremamente longa e a carga será realizada através de um refil com o combustível, recarregando de forma instantânea e sem a necessidade de carregadores.

## CAPÍTULO 4

# SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PROPOSTOS

Um dos principais motivos que faz com que as lâmpadas incandescentes e fluorescentes compactas sejam amplamente empregadas na iluminação residencial é a facilidade de instalação. A substituição destas lâmpadas pela iluminação semicondutora traz diversas vantagens, entre elas o baixo consumo de energia, aumento da vida útil e redução do descarte de elementos químicos nocivos ao meio-ambiente. Estas características têm atraído a atenção de pesquisadores e projetistas para o desenvolvimento de novos sistemas de iluminação empregando LEDs.

No entanto, assim como as lâmpadas de descarga, os LEDs não podem ser ligados diretamente à rede elétrica, necessitando de um circuito para seu acionamento. Para que a substituição do sistema tradicional por LEDs seja viável, o circuito deve possuir baixo custo e manter a característica de fácil instalação. Além disso, não pode ser volumoso ou pesado para permitir sua sustentação nas luminárias usuais. O uso do soquete E-27 (o mesmo utilizado nas lâmpadas incandescentes e fluorescentes compactas), facilita a substituição pela lâmpada a LED sem qualquer alteração na instalação elétrica.

Assim, neste capítulo é proposto um circuito que atende estas características. A mesma topologia pode ser utilizada com LEDs de alto-brilho ou LEDs de potência. Além disso, é proposto também um sistema de iluminação de emergência compacto e integrado à mesma lâmpada, mantendo a luminosidade do ambiente mesmo sob possível falha no fornecimento de energia elétrica.

### 4.1 Lâmpada Compacta Empregando LEDs de Alto-Brilho

Os conversores *Buck*, *Boost*, *Buck-Boost* e *Flyback* são bastante conhecidos na literatura e amplamente utilizados para alimentar LEDs (Van der Broeck, 2007). Entre os conversores estudados e abordados no capítulo 2, o que apresentou as características desejáveis para a aplicação proposta foi o conversor *Buck*. Este conversor foi escolhido principalmente por fornecer uma tensão de saída menor que a de entrada, além da simplicidade e baixo custo da topologia.

Os conversores *Buck-Boost*, *Ćuk*, *SEPIC* e *Zeta* também podem proporcionar uma tensão de saída inferior à de entrada. No entanto, possuem um número elevado de componentes comparado ao conversor *Buck*. Já o conversor *Flyback* permite uma tensão de saída inferior à de entrada utilizando um número reduzido de componentes. Porém, por se tratar de uma lâmpada compacta, onde o circuito permanece protegido no interior do suporte, sem ponto de conexão externo, não há necessidade de isolamento e, portanto, a utilização de um *Flyback* ao invés do *Buck* aumentaria o tamanho e o custo da lâmpada, sem acrescentar maiores vantagens a esta aplicação.

Entre as diversas formas de onda de corrente utilizadas para alimentar LEDs, apresentadas no capítulo 2, aquela que propicia maiores vantagens é a corrente contínua (Schmid et al, 2007; Sauerländer, 2006). Com ela é possível atingir a corrente nominal sem que o valor de pico ultrapasse os limites do dispositivo, como acontece com as formas de onda senoidal e dente de serra. Além disso, não causa problemas de interferência eletromagnética em função das harmônicas geradas pela corrente pulsada.

A intensidade luminosa emitida pela lâmpada é proporcional ao número de LEDs empregados. A luz emitida por um único LED de alto-brilho não é suficiente para iluminar um ambiente da mesma forma que uma lâmpada incandescente. Por isso, é necessário que se utilize um grupo com vários LEDs operando simultaneamente. Dentre as três maneiras distintas de conexão de um grupo de LEDs, como abordado no capítulo 2, a que apresenta maiores vantagens é a conexão em série, principalmente por garantir a mesma intensidade luminosa em todos os dispositivos e ainda proporcionar uma tensão elevada na saída do conversor.

Então, o circuito foi projetado para alimentar os LEDs conectados em série e com uma corrente contínua de 23 mA. A carga do conversor pode ser composta de 36 a 52 LEDs de alto-brilho de 5 mm, dando maior flexibilidade na implementação de lâmpadas com diferentes níveis de luminosidade. A tensão eficaz de entrada foi especificada em 220 V<sub>RMS</sub>, nível de tensão fornecido pela concessionária de energia local, e a tensão de saída do conversor especificada para valores entre 90 V e 187 V. A Figura 4.1 apresenta a topologia proposta para a lâmpada compacta alimentando 49 LEDs de alto-brilho. Devido à quantidade de dispositivos empregados neste circuito, foram utilizados sete Diacs, cada um conectado em paralelo com grupos compostos de sete LEDs em série.

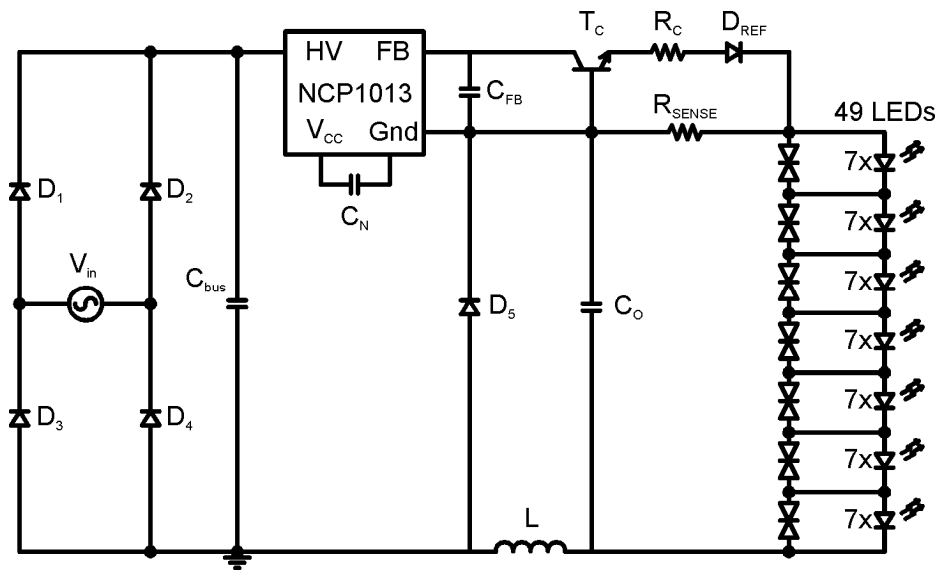


Figura 4.1 - Circuito proposto para a lâmpada compacta empregando LEDs de alto-brilho.

Neste circuito, a tensão da rede ( $V_{in}$ ) é retificada pelos diodos ( $D_1$ - $D_4$ ) e filtrada pelo capacitor de barramento ( $C_{bus}$ ). O interruptor é implementado através de um circuito integrado da família NCP101x (folha de especificação em anexo). Este CI foi escolhido devido à sua versatilidade de operar como interruptor sem a necessidade de um circuito de comando externo. Além disso, possui um terminal específico para a realimentação da tensão de saída do conversor, que pode ser utilizado para realizar o controle da corrente nos LEDs. O NCP1013 possui dimensões reduzidas, opera em alta frequência (100 kHz), evitando ruído audível, possui baixo consumo e custo reduzido. Sua alimentação é feita através de um circuito interno, necessitando apenas de um capacitor auxiliar ( $C_N$ ) (On Semiconductor, 2007).

Quando o interruptor está conduzindo, a corrente circula entre os terminais HV e GND do NCP1013. Assim, a rede transmite energia ao indutor ( $L$ ), ao capacitor ( $C_o$ ) e ainda alimenta a carga. Quando o interruptor está em bloqueio, o diodo  $D_5$  conduz e a energia armazenada em  $L$  é entregue ao capacitor  $C_o$  e à carga. A tensão máxima aplicada no interruptor e no diodo é igual à tensão do capacitor de barramento ( $V_{C_{bus}}$ ).

O controle da corrente de saída do conversor é feito através de um resistor *shunt* ( $R_{SENSE}$ ) conectado em série com os LEDs. Considerando que a queda de tensão nos LEDs varia no decorrer de sua vida útil, qualquer alteração instantânea da tensão de saída do conversor irá se refletir ao resistor *shunt*, provocando uma alteração na sua corrente. Assim, o objetivo do controlador é manter a tensão neste resistor em um valor fixo para que a corrente neste, e nos demais dispositivos em série, permaneça constante.

Para isso, o controlador interno do NCP1013 monitora a tensão no resistor *shunt* e modifica a razão cíclica da comutação quando necessário, de forma a manter a tensão neste dispositivo igual à referência. Entretanto, para que a potência dissipada no resistor não seja significativa prejudicando o rendimento do circuito, esta tensão de referência deve ser a menor possível.

A tensão de referência é dada pela tensão de condução do diodo ( $V_{DREF}$ ) mais a tensão base-emissor do transistor ( $V_{TBE}$ ), aproximadamente 1,3 V. Assim, quando a tensão em  $R_{SENSE}$  aumentar até atingir 1,3 V, o transistor entra em condução e altera a tensão no pino FB do NCP1013. Esta variação de tensão no pino FB altera a razão cíclica da comutação. O capacitor  $C_{FB}$  é recomendado pelo fabricante do CI para reduzir um possível ruído neste pino. O resistor  $R_C$  limita a corrente que circula por  $T_C$ . Então, se a corrente nos LEDs é projetada para 23 mA e a tensão de referência é 1,3 V, o valor de  $R_{SENSE}$  é igual a 56  $\Omega$ , determinado pela Equação (1). A potência dissipada no resistor é somente 30 mW. E a potência total nos LEDs é aproximadamente 3,6 W.

$$R_{SENSE} = \frac{V_{DREF} + V_{TBE}}{I_{LEDs}} \quad (1)$$

Onde:

$R_{SENSE}$  - Resistor para controle da corrente  $I_{LEDs}$ .

$V_{DREF}$  - Tensão de condução do diodo  $D_{REF}$ .

$V_{TBE}$  - Tensão base-emissor do transistor  $T_C$ .

$I_{LEDs}$  - Corrente de saída aplicada aos LEDs.

O circuito de proteção contra a falha de algum LED foi implementado empregando um Diac do modelo DB3 em paralelo com cada um dos sete grupos. A tensão máxima do LED utilizado pode chegar a 3,6 V e, portanto o grupo terá uma tensão máxima de 25,2 V. Este valor é inferior à tensão de disparo mínima do Diac (28 V). Assim, é descartada a possibilidade de o DB3 disparar enquanto os LEDs em paralelo estiverem operando normalmente.

O projeto adequado do conversor deve considerar os limites de variação da tensão de entrada devido à ondulação do capacitor  $C_{bus}$  e uma possível flutuação da tensão da rede. O valor da tensão de entrada mínima ( $E_{min}$ ) utilizado no projeto foi de 215 V, resultado da



tensão mínima do barramento, considerando a ondulação do capacitor de 10 % e uma flutuação da tensão da rede de 25 % abaixo do valor nominal. O valor da tensão de entrada máxima ( $E_{m\acute{a}x}$ ) foi especificado em 389 V, sendo 25 % acima do valor nominal da tensão da rede ( $V_{in}$ ). Estimando um rendimento de 80 % é possível obter a potência de entrada em função da potência de saída, e calcular o valor do capacitor de barramento pela Equação (2) (Unitrode Power Supply Designer Seminar, 1994).

$$C_{bus} = \frac{P_{ent}}{f_{rede} \times (V_{pk\acute{m}in}^2 - E_{min}^2)} \quad (2)$$

Onde:

$C_{bus}$  - Capacitor de barramento.

$P_{ent}$  - Potência de entrada estimada.

$f_{rede}$  - Frequência do sinal de entrada (rede).

$V_{pk\acute{m}in}$  - Tensão mínima da rede (25 % abaixo da nominal).

$E_{min}$  - Tensão de entrada mínima (ou tensão mínima do barramento).

Para o modelo de LED empregado, a tensão de condução em cada dispositivo pode variar entre 2,5 V e 3,6 V. Como a carga também pode ser composta por 36 a 52 LEDs, a tensão de saída do conversor deverá ser especificada para valores entre 90 V e 187 V mais 1,3 V da tensão de referência.

A corrente de pico que circula pelo MOSFET interno do NCP1013 não deve ser inferior a 25 % do seu valor nominal. Caso contrário o CI entra no modo de espera. Esta característica reduz o consumo do NCP1013, no entanto causa um ruído audível no indutor, devido ao desligamento repetitivo do CI em baixa frequência, o que não é desejável. Portanto, o conversor *Buck* deve ser projetado para operar no modo de condução descontínuo, resultando em uma corrente média na saída baixa (23 mA) mas com um pico de corrente suficiente para evitar que o CI entre no modo de espera.

O valor nominal da corrente no interruptor é 350 mA. Porém, o fabricante reconhece que este valor pode sofrer uma pequena alteração, atingindo um valor mínimo de até 315 mA. Assim, para garantir o funcionamento adequado em todos os casos, a corrente de pico mínima no interruptor é especificada em 79 mA (25 % do valor nominal mínimo). A frequência de

comutação é 100 kHz e a razão cíclica será a variável a ser ajustada pelo controlador interno do NCP1013.

Para garantir a operação do conversor *Buck* no modo de condução descontínua, a corrente média no indutor ( $I_L$ ) deve ser inferior à sua ondulação de corrente ( $\Delta I_L$ ). Como mostra a Figura 4.2.

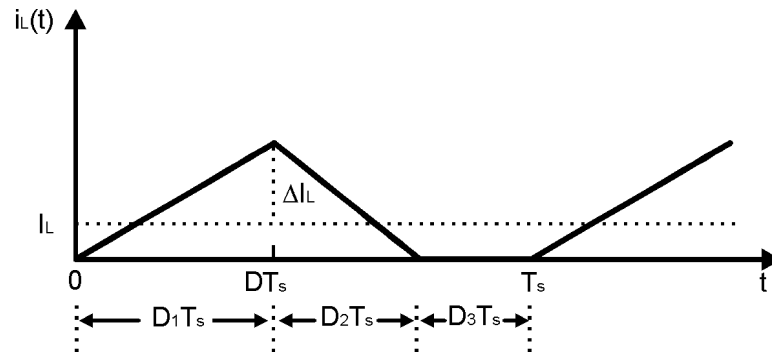


Figura 4.2 – Forma de onda da corrente no indutor operando no modo de condução descontínua.

Para isso, o parâmetro adimensional  $K$  deve ser inferior a um valor crítico,  $K_{\text{crítico}}$ , conforme a Equação (3). Esta condição determina o limite entre a operação no modo de condução contínua e descontínua. Para o conversor *Buck* o valor crítico é dado em função da razão cíclica do conversor considerando a operação no modo de condução contínua ( $D_{\text{MCC}}$ ). O parâmetro  $K$  é dado em função da indutância ( $L$ ), da frequência de comutação ( $f_s$ ) e da resistência equivalente da carga ( $R_{\text{carga}}$ ). Assim, a condição da Equação (3) pode ser reescrita, resultando na Equação (4) (Erickson, 2000).

$$K < K_{\text{crítico}} \quad (3)$$

$$\left( \frac{2 \times L \times f_s}{R_{\text{carga}}} \right) < (1 - D_{\text{MCC}}) \quad (4)$$

A possibilidade de alterar o número de LEDs conectados ao circuito torna a resistência equivalente de carga uma variável adicional ao projeto. Assim, considerando a variação da tensão na saída do conversor ( $V_{\text{Omin}}$  e  $V_{\text{Omáx}}$ ) a resistência equivalente dos LEDs apresenta dois valores extremos ( $R_{\text{min}}$  e  $R_{\text{máx}}$ ). A razão cíclica do conversor *Buck* para o modo de condução contínuo é a relação direta entre a tensão de saída pela tensão de entrada. Assim, o

pior caso para a condição limite entre os dois modos de operação acontece quando  $D_{MCC}$  possui valor máximo, ou seja, quando a tensão de saída é máxima e a tensão de entrada é mínima. Substituindo estas variáveis e remanejando a Equação (4), é possível estabelecer um limite de valores para a indutância de forma a garantir a operação no modo de condução descontínuo, como mostra a Equação (5).

$$L < \left( 1 - \frac{V_{O\text{máx}}}{E_{\text{mín}}} \right) \times \frac{R_{\text{mín}}}{2 \times f_s} \quad (5)$$

Como conclusão, para este projeto a indutância não pode ser superior a 2,3 mH. Neste conversor, quem limita a corrente na carga e no interruptor é o indutor (L). Então, este dispositivo magnético deve ser projetado para manter a corrente no NCP1013 entre o valor mínimo e máximo especificados. O valor da indutância pode ser determinado através da Equação (6) (Erickson, 2000).

$$L = \frac{E - V_O}{I_{\text{pk}}} \times \frac{D}{f_s} \quad (6)$$

Onde:

- E - Tensão de entrada do conversor ( $V_{C\text{bus}}$ ).
- $V_O$  - Tensão de saída do conversor.
- D - Razão cíclica de operação.
- $I_{\text{pk}}$  - Corrente de pico no indutor.
- $f_s$  - Frequência de comutação.

A relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada para este modo de operação não é obtida em função da razão cíclica apenas, como acontece no modo de condução contínua. Ela depende também do valor da carga, da indutância e da frequência de comutação, como mostra a Equação (7) (Erickson, 2000).

$$\frac{V_o}{E} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4 \times \left( \frac{2 \times L \times f_s}{R_{\text{carga}}} \right)}{D^2}}} \quad (7)$$

No entanto, a possível oscilação na tensão de entrada ( $E_{\text{mín}}$  e  $E_{\text{máx}}$ ) e os limites mínimos e máximos para a corrente no interruptor ( $I_{\text{pkmín}}$  e  $I_{\text{pkmáx}}$ ) resultam em variáveis que devem ser respeitadas durante o projeto. Portanto, o pior caso deve ser considerado para que o circuito funcione corretamente em todas as outras situações.

A razão cíclica do conversor é outra variável do sistema, determinada pelo NCP1013. Entretanto, isolando esta variável na Equação (6) e substituindo na Equação (7), é possível determinar a relação de transformação do conversor independentemente do valor da razão cíclica, conforme é apresentado na Equação (8).

$$\frac{V_o}{E} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4 \times \left( \frac{2 \times L \times f_s}{R_{\text{carga}}} \right)}{\left( \frac{I_{\text{pk}} \times L \times f_s}{V_g - V_o} \right)^2}}} \quad (8)$$

Analisando a Equação (6), percebe-se que a corrente de pico mínima ocorre quando a tensão de saída é máxima e a tensão de entrada é mínima. Assim, a Equação (8) pode ser reescrita na Equação (9) considerando o pior caso.

$$V_o = \frac{2 \times E_{\text{mín}}}{1 + \sqrt{1 + \frac{4 \times \left( \frac{2 \times L \times f_s}{R_{\text{máx}}} \right)}{\left( \frac{I_{\text{pkmín}} \times L \times f_s}{E_{\text{mín}} - V_{0\text{máx}}} \right)^2}}} \quad (9)$$

Fazendo uso da Equação (9) e de algum aplicativo matemático é possível construir um gráfico com todos os valores possíveis para a indutância e obter a tensão de saída ( $V_o$ ) em

função deste parâmetro. Considerando o pior caso, o resultado de  $V_O$  deve ser igual ao valor da tensão de saída máxima ( $V_{O_{m\acute{a}x}}$ ). Então, o ponto do gráfico que atingir este valor, trará como resposta o valor de indutância desejado. A Figura 4.3 mostra o gráfico com os valores utilizados neste projeto.

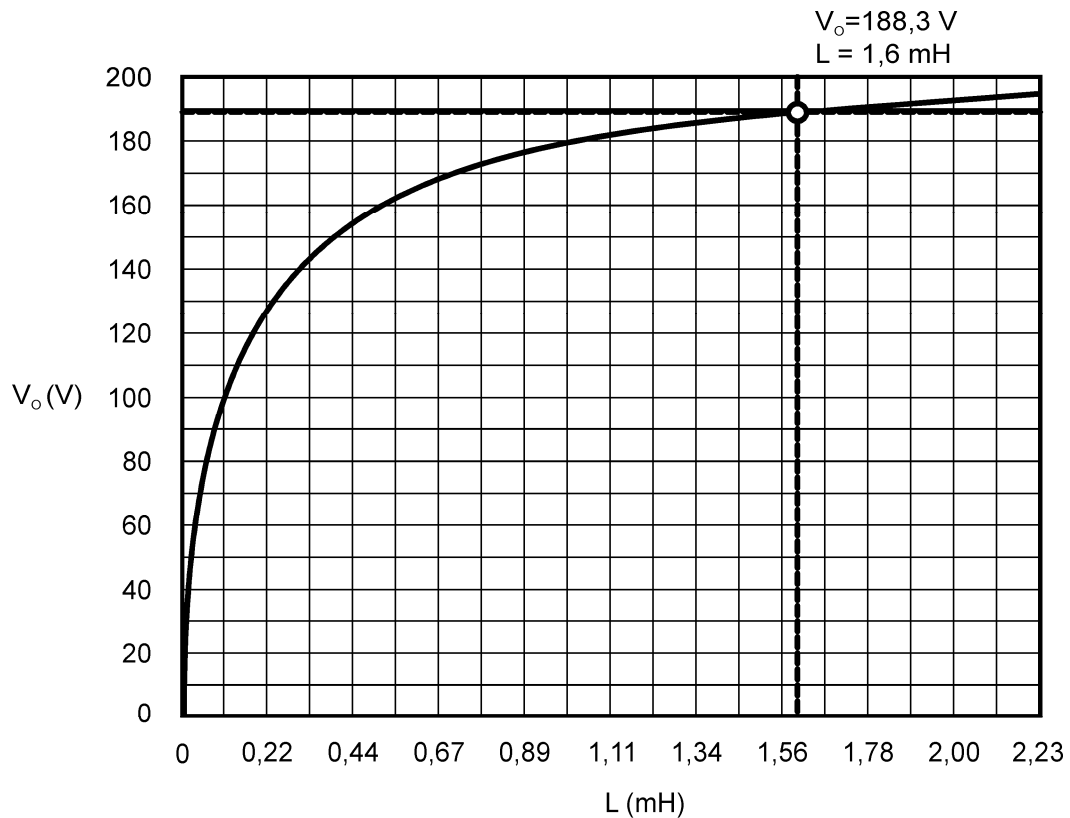


Figura 4.3 – Gráfico relacionando a tensão de saída com os possíveis valores de indutância para o projeto.

Determinado o valor da indutância, a razão cíclica máxima do conversor pode ser obtida através da Equação (10). Este valor deve ser inferior ao máximo suportado pelo NCP1013 (72 %).

$$D_{m\acute{a}x} = \frac{I_{pkmin} \times L \times f_s}{E_{min} - V_{0m\acute{a}x}} \quad (10)$$

O capacitor  $C_O$  é projetado para limitar a ondulação da tensão, sem comprometer o tamanho do circuito. O valor é determinado pela Equação (11) (Erickson, 2000). A ondulação da tensão de saída ( $\Delta V$ ) foi especificada em 350 mV. O valor de  $C_O$  utilizado no projeto é de 2,2  $\mu$ F.

$$C_O = \frac{V_{0\text{máx}} \times (1 - D_{\text{máx}})}{8 \times \Delta V \times L \times f_s^2} \quad (11)$$

A mesma topologia também pode ser aplicada para operar como bivolt, detectando automaticamente a tensão de entrada (110 V<sub>AC</sub> ou 220 V<sub>AC</sub>) se forem utilizados 28 LEDs. Este número é determinado pela tensão de saída do conversor *Buck* que deve ser compatível com os limites mínimo e máximo da razão cíclica do NCP1013 (0 a 72%). Para isto, é necessário apenas modificar o valor do indutor. Outra vantagem deste circuito é que sua implementação não está restrita a um fabricante específico, visto que existem circuitos semelhantes ao NCP1013 comercializados também por outras empresas. Os componentes utilizados no circuito bem como as características do sistema são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Componentes utilizados e características do sistema

<b>Características do Sistema Proposto</b>	
Tensão de Entrada	220 V <sub>CA</sub>
Tensão de Saída	90 V <sub>CC</sub> – 187 V <sub>CC</sub>
Número de LEDs	36 - 52
Frequência de Operação	100 kHz
<b>Componentes Utilizados no Projeto</b>	
D <sub>1</sub> -D <sub>4</sub> (ponte retificadora)	W08M (1,5 A)
C <sub>bus</sub> , C <sub>N</sub>	10 μF
C <sub>FB</sub>	1 nF
D <sub>5</sub>	UF4007
L	1,6 mH
C <sub>O</sub>	2,2 μF
Interruptor	NCP1013
R <sub>SENSE</sub>	56 Ω
T <sub>C</sub>	2N3904
R <sub>C</sub>	1 kΩ
D <sub>REF</sub>	1N4148
Diacs	DB3
LEDs	25000 mcd

## 4.2 Lâmpada Compacta Empregando LEDs de Potência com Sistema de Iluminação de Emergência Integrado

Para este projeto são utilizados LEDs do modelo Luxeon Rebel LXML-PWN1-0080 da Philips, escolhido principalmente por apresentar um elevado fluxo luminoso (80 lm) (Luxeon, 2008). Entretanto, o projeto do circuito não está restrito a este modelo, permitindo a utilização de outros modelos de diferentes fabricantes. Estes dispositivos são alimentados com uma corrente contínua de 300 mA quando operados no modo normal (estado em que a rede fornece energia ao equipamento) e com 50 mA no modo emergência (quando a bateria alimenta o equipamento).

A bateria escolhida foi a Li-Ion 16340 (3,6 V, 880 mAh) pelo fato de apresentar uma densidade de energia e um nível de tensão superior às baterias de Ni-MH (1,2 V), resultando em maior autonomia do sistema sem prejudicar a compactação do equipamento. Porém, atualmente, as baterias de Ni-MH possuem um custo inferior às de Li-Ion. Assim, o conversor foi projetado para uma tensão de alimentação de 3,6 V, permitindo também o uso de três baterias de Ni-MH conectadas em série sem qualquer alteração no circuito. A autonomia pode ser estendida simplesmente substituindo a bateria por outra de maior capacidade como a Li-Ion 18500 (3,6 V, 1400 mAh).

O circuito, quando alimentado pela rede elétrica, foi projetado para operar sob tensão de entrada universal ( $90 V_{CA} - 240 V_{CA}$ ), facilitando a aplicação da lâmpada em qualquer sistema elétrico. A carga é formada por cinco LEDs conectados em série resultando em uma tensão de saída máxima no conversor de 20 V.

Assim, enquanto a lâmpada estiver operando no modo normal, o conversor deve reduzir a tensão de entrada e realizar o controle da corrente nos LEDs. Para isto, foi utilizada a mesma topologia proposta para a lâmpada compacta empregando LEDs de alto-brilho. No entanto, neste circuito a operação se dá no modo de condução contínua, uma vez que a corrente que circula pelo interruptor é superior a 25 % do seu valor nominal, evitando que o CI entre no modo de espera. A vantagem deste modo de operação é a possibilidade de alimentar a carga com uma corrente contínua sem a necessidade de um capacitor na saída. Para carregar a bateria através da rede elétrica, foi adicionado apenas um braço em paralelo com os LEDs. O circuito proposto é apresentado na Figura 4.4.

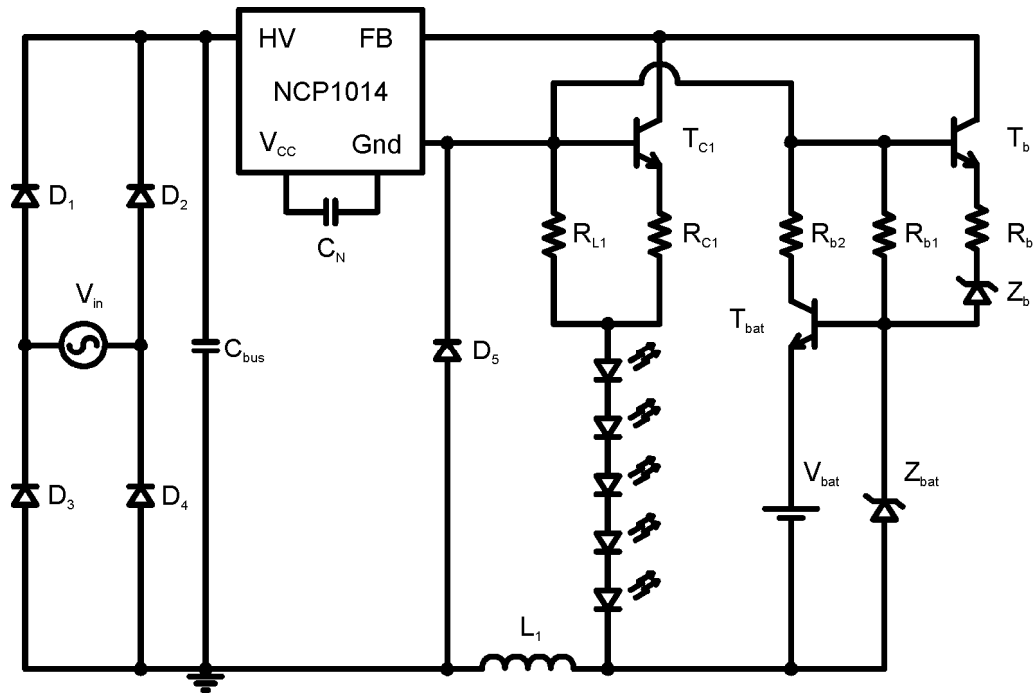


Figura 4.4 – Conversor *Buck* e carregador da bateria.

A corrente que circula pelos LEDs de potência é superior à dos LEDs de alto-brilho. Assim, para que as perdas no resistor de controle ( $R_{L1}$ ) não sejam significativas, a tensão de referência foi reduzida para aproximadamente 0,7 V, determinado pela queda de tensão do transistor  $T_{C1}$  apenas, sem a contribuição do diodo  $D_{REF}$  utilizado anteriormente.

O controle da corrente de carga da bateria é feito pelo mesmo princípio utilizado para os LEDs, através de resistores *shunt* ( $R_{b1}$  e  $R_{b2}$ ) limitando a corrente que circula pela bateria. O circuito integrado monitora a tensão do resistor e altera a razão cíclica do circuito de forma a limitar esta tensão ao valor da referência, mantendo a corrente constante no braço.

A tensão da bateria é monitorada através do diodo zener  $Z_{bat}$  e do transistor  $T_{bat}$ . A tensão zener deve ser igual ao valor da tensão nominal da bateria (3,6 V) mais a tensão base-emissor de  $T_{bat}$  (0,7 V). Assim, enquanto a tensão da bateria estiver em seu valor nominal, o diodo zener conduz a corrente que circula por  $R_{b1}$ , evitando que o transistor  $T_{bat}$  seja polarizado e entre em condução, mantendo a bateria desconectada do carregador. A corrente que circula pelo zener é limitada por  $R_{b1}$  e deve ser baixa para que a potência dissipada não seja significativa. Por outro lado, enquanto a tensão da bateria estiver abaixo do seu valor nominal o diodo zener não conduz e o resistor  $R_{b1}$  polariza  $T_{bat}$ , que entra em condução. Neste momento, o resistor  $R_{b2}$  é conectado em paralelo com  $R_{b1}$  e ambos limitam a corrente que circula pela bateria.



Esta topologia é composta por duas cargas (os LEDs e a bateria) que devem ter o valor das suas correntes controlado por um único CI. No entanto, o NCP101x irá controlar a corrente de apenas uma das cargas, aquela que atingir a tensão de referência mais rapidamente. A outra terá a corrente limitada pela tensão de saída aplicada aos braços em paralelo. Portanto, a prioridade é controlar a corrente nos LEDs, carga principal do circuito. Para esta carga, o controlador do NCP101x estará atuando constantemente. Enquanto os LEDs estiverem conduzindo, a tensão aplicada ao resistor de controle da corrente na bateria será inferior ao valor de referência e a corrente estará abaixo do valor máximo projetado. Então, o controlador da corrente da bateria irá atuar somente enquanto os LEDs estiverem desabilitados ou danificados.

A tensão de referência para os resistores  $R_{b1}$  e  $R_{b2}$  é de 20,7 V ( $V_{Zb} + V_{Tb-be}$ ). O resistor  $R_{b1}$  foi especificado em 39 k $\Omega$  limitando a corrente no zener em aproximadamente 530  $\mu$ A. A corrente de carga da bateria deve ser compatível com a sua capacidade. O recomendado é que a corrente nominal de carga esteja entre 5 % e 25 % da capacidade nominal da bateria. Portanto, o resistor  $R_{b2}$  é especificado em 220  $\Omega$ . Assim, o valor da resistência equivalente do paralelo de  $R_{b1}$  e  $R_{b2}$  será de aproximadamente 218  $\Omega$ , o que resulta em uma corrente de carga na bateria de no máximo 95 mA, aproximadamente 11% do seu valor nominal.

Quando a lâmpada entrar no modo emergência, um conversor *Boost* inicia seu funcionamento, elevando a tensão da bateria (3,6 V) para a tensão da carga (20 V). Este circuito é apresentado na Figura 4.5.

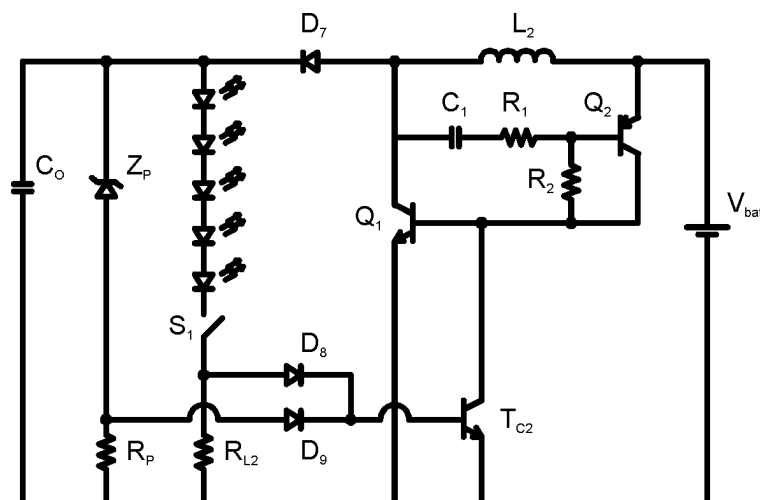


Figura 4.5 – Conversor *Boost* alimentando os LEDs através da bateria.

O circuito é projetado para fornecer uma corrente contínua nos LEDs de 50 mA. A comutação é feita pelo transistor  $Q_1$ . Quando o interruptor está conduzindo, a bateria transmite energia ao indutor  $L_2$ . Quando o interruptor está em bloqueio, o diodo  $D_7$  conduz, e a energia armazenada em  $L_2$  é transmitida à carga. Assim, o indutor opera como uma fonte auxiliar em série com a bateria, alimentando os LEDs com tensão superior à de entrada.

O circuito de comando é realizado através de um oscilador formado por  $C_1$ ,  $R_1$  e  $R_2$ . Este circuito é proposto em Wuchinich (2007) para alimentar um LED de alto brilho (3,6 V, 20 mA) através de uma bateria de Ni-MH (1,2 V). Circuitos osciladores são conhecidos na literatura e foram bastante utilizados para alimentar lâmpadas incandescentes provocando o efeito de *flash* (Wuchinich, 1978 e Rodgers, 1970).

Seu funcionamento é baseado na carga e descarga do capacitor  $C_1$ . O resistor  $R_2$  fornece um caminho inicial para a corrente através dos transistores  $Q_2$  e  $Q_1$ , que passam a conduzir. Neste momento, o capacitor é carregado através de  $Q_2$ ,  $R_1$  e  $Q_1$ . Enquanto carrega, a tensão no capacitor aumenta até causar o bloqueio do transistor  $Q_2$ , e conseqüentemente o bloqueio de  $Q_1$ . O tempo de carga do capacitor é o tempo de condução do interruptor  $Q_1$ . Com o interruptor em bloqueio, o capacitor é descarregado através dos resistores  $R_1$  e  $R_2$  sob o caminho dado pela junção base-coletor de  $Q_1$ . Os transistores permanecerão sem conduzir até que o capacitor descarregue e a diferença de potencial em  $Q_2$  seja suficiente para que este volte a entrar em condução. A partir deste momento,  $Q_1$  é habilitado novamente através de  $Q_2$  e  $R_2$ .

A frequência e a razão cíclica são, portanto, determinadas pelo tempo de carga e descarga do capacitor. Para o conversor *Boost* em MCD, a razão cíclica é dada pela Equação (12).

$$D = \frac{V_O - V_{bat}}{V_O} \quad (12)$$

Onde:

$V_{bat}$  - Tensão de entrada do conversor (bateria).

$V_O$  - Tensão de saída do conversor.

$D$  - Razão cíclica da comutação.

Para projetar o conversor deve-se levar em conta que a tensão da bateria diminui ao longo do tempo quando esta começa a descarregar. Assim, a tensão de entrada mínima será de

3 V. No conversor *Boost*, a tensão de saída é proporcional à de entrada. Assim, a diminuição da tensão de entrada causará uma redução na tensão de saída. No entanto, a corrente nos LEDs não poderá ser reduzida significativamente. Para isso, um controle de corrente foi implementado através de um resistor *shunt* ( $R_{L2}$ ) em série com os LEDs. O objetivo deste controle é manter a tensão em  $R_{L2}$  constante no valor de referência, obtendo assim uma corrente constante no resistor e nos LEDs.

Quando a tensão no resistor  $R_{L2}$  ultrapassar a tensão de condução do diodo  $D_8$  mais a tensão base-emissor do transistor  $T_{C2}$  (tensão de referência), estes entram em condução e desabilitam  $Q_1$ . Assim, a tensão de saída do conversor diminui e assim também a tensão em  $R_{L2}$ . Porém, a razão cíclica do conversor é especificada em um valor tal que a tensão em  $R_{L2}$  seja sempre maior que a referência, obrigando o controle a atuar. Desta forma, a iluminação é mantida constante durante todo o funcionamento da lâmpada no modo emergência.

Caso o interruptor da instalação elétrica seja desabilitado, a lâmpada é desligada. No entanto, a bateria não será carregada uma vez que o circuito está desconectado da rede. Assim, o interruptor  $S_1$  é empregado para desabilitar os LEDs caso o ambiente não necessite de iluminação no instante em que ocorra a falha no fornecimento de energia elétrica pela rede, por exemplo, durante o dia. Isto permite que a lâmpada seja utilizada somente quando houver necessidade. Além disso, se o interruptor da instalação elétrica permanecer sempre acionado a bateria poderá ser carregada em qualquer momento.

Porém, devido à característica de fonte de corrente, o conversor *Boost* não pode operar sem carga. Assim, um circuito de proteção foi acrescentado. No momento que  $S_1$  desconectar a carga, a tensão de saída do circuito aumenta. Quando esta tensão atingir a tensão de disparo do zener  $Z_P$  (27 V) este entra em condução e atua como carga. O resistor  $R_P$  é conectado em série com o zener para limitar a corrente em um valor baixo, de forma que a potência dissipada no dispositivo seja insignificante. O controle da corrente no zener é realizado pelo diodo  $D_9$  e pelo transistor  $T_{C2}$ , operando da mesma forma que o controle para o resistor  $R_{L2}$ .

A corrente nos LEDs é projetada para 50 mA. A tensão de referência é 1,2 V. Assim, o valor de  $R_{L2}$  é igual a 24  $\Omega$ , determinado pela Equação (13).

$$R_{L2} = \frac{V_{D8} + V_{TC2BE}}{I_{LEDs}} \quad (13)$$

Para o resistor  $R_P$  a corrente é de 460  $\mu A$ . Como a tensão de referência é também de 1,2 V, o valor de  $R_P$  é igual a 2.8 k $\Omega$ .

A Figura 4.6 mostra o circuito completo formado pelo conversor redutor de tensão, o carregador de bateria, o conversor elevador de tensão e os circuitos de acionamento e proteções. Para saber se a lâmpada irá operar no modo normal ou modo emergência, a energia da rede deve ser monitorada. Enquanto houver tensão na rede para alimentar a lâmpada, haverá tensão na saída do conversor *Buck*. Enquanto isto acontecer, o resistor  $R_M$  satura o transistor  $T_{C2}$  que impede o chaveamento de  $Q_1$ , desabilitando a operação do conversor *Boost*. Caso haja algum problema na alimentação pela rede,  $T_{C2}$  sai da saturação e permite o chaveamento de  $Q_1$ , habilitando o conversor *Boost* alimentando os LEDs através da bateria.

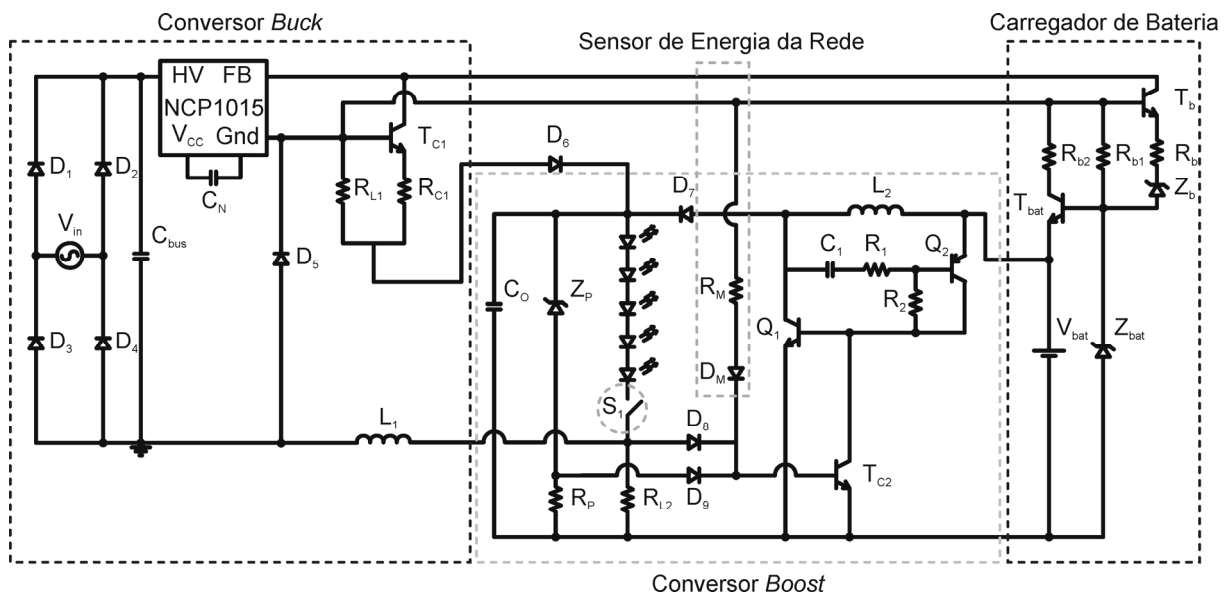


Figura 4.6 – Circuito proposto.

O valor do resistor  $R_{L1}$  determina a intensidade da corrente nos LEDs quando alimentados pela rede elétrica. Se este elemento for substituído por um resistor variável, será possível alterar o valor da corrente nos LEDs e conseqüentemente proporcionar a variação da intensidade luminosa da lâmpada.

Outra modificação simples que permite aumentar o campo de aplicação desta topologia é a substituição do soquete E-27 por um suporte adequado para conexão direta em uma tomada. Com isso, sua instalação pode ser feita em qualquer ambiente.

A relação de transformação para o conversor *Buck* operando no modo de condução contínuo é dada pela Equação (14). Como o circuito é projetado para tensão de entrada universal, a razão cíclica deve variar de forma a manter a tensão de saída no conversor.

$$\frac{V_o}{E} = D \quad (14)$$

O NCP101x permite uma variação da razão cíclica de 0 a 72 %. Para analisar o comportamento do CI, um gráfico foi construído com os possíveis valores para tensão de entrada e a razão cíclica necessária para manter a tensão de saída mínima no conversor. Este gráfico é mostrado na Figura 4.7.

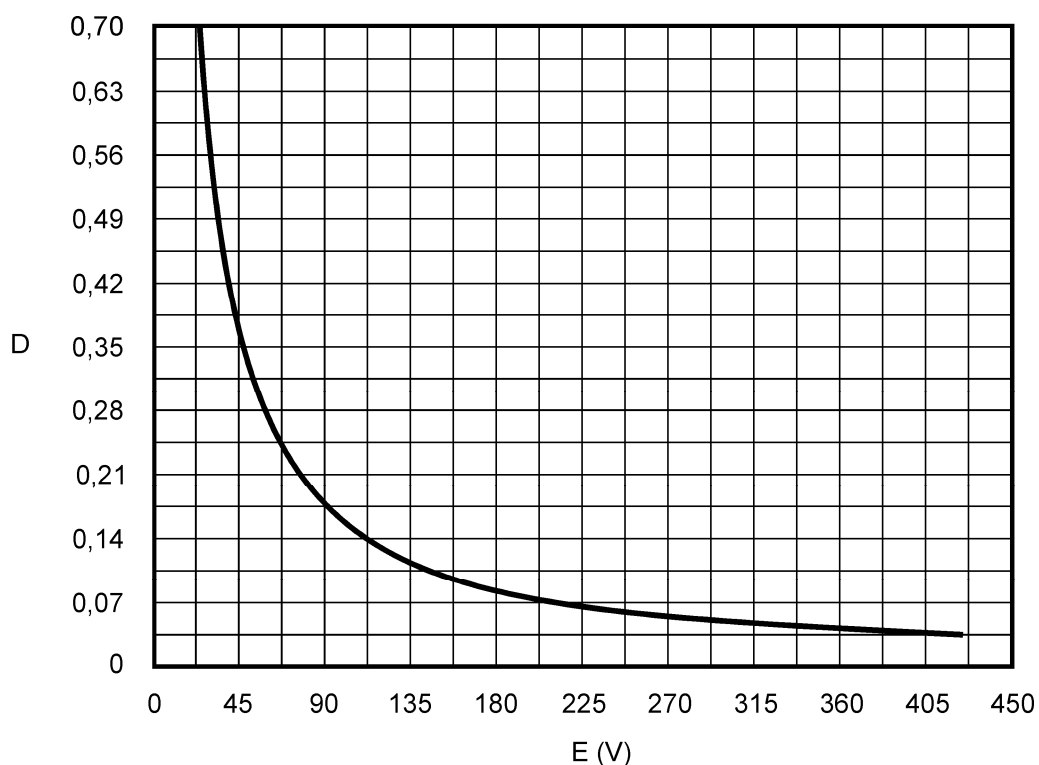


Figura 4.7 – Gráfico relacionando a razão cíclica (D) e a tensão no barramento CC (E).

O indutor é projetado para limitar a variação da corrente na carga dentro de uma margem pré-estabelecida. A maior ondulação acontece quando a tensão de entrada é máxima e a tensão de saída é mínima, conforme mostra a Equação (15).

$$\Delta I_L = \frac{E_{\text{máx}} - V_{\text{Omin}}}{2 \times L} \times \frac{D}{f_s} \quad (15)$$

Onde:

$\Delta I_L$  - Ondulação da corrente no indutor e na carga.

$E_{m\acute{a}x}$  - Tensão de entrada máxima.

$V_{Omin}$  - Tensão de saída mínima do conversor.

$D$  - Razão cíclica de operação.

$L$  Indutância.

A corrente do interruptor especificada no projeto é 395 mA (300 mA dos LEDs mais 95 mA da bateria). A corrente máxima suportada pelo NCP1015 é 450 mA. A ondulação de corrente considerada é de 6,4 mA (aproximadamente 1,6 % do valor da corrente média de saída). Com o auxílio de um aplicativo matemático, é possível estipular um valor para a indutância de forma a manter a ondulação de corrente sempre inferior ao limite máximo especificado, considerando a variação da tensão de entrada e conseqüentemente a variação da razão cíclica, conforme mostra o gráfico da Figura 4.8. O valor de indutância que satisfaz as especificações de projeto para todas as situações é 12 mH. Os demais componentes utilizados no projeto bem como as características do sistema proposto são mostrados na Tabela 4.2.

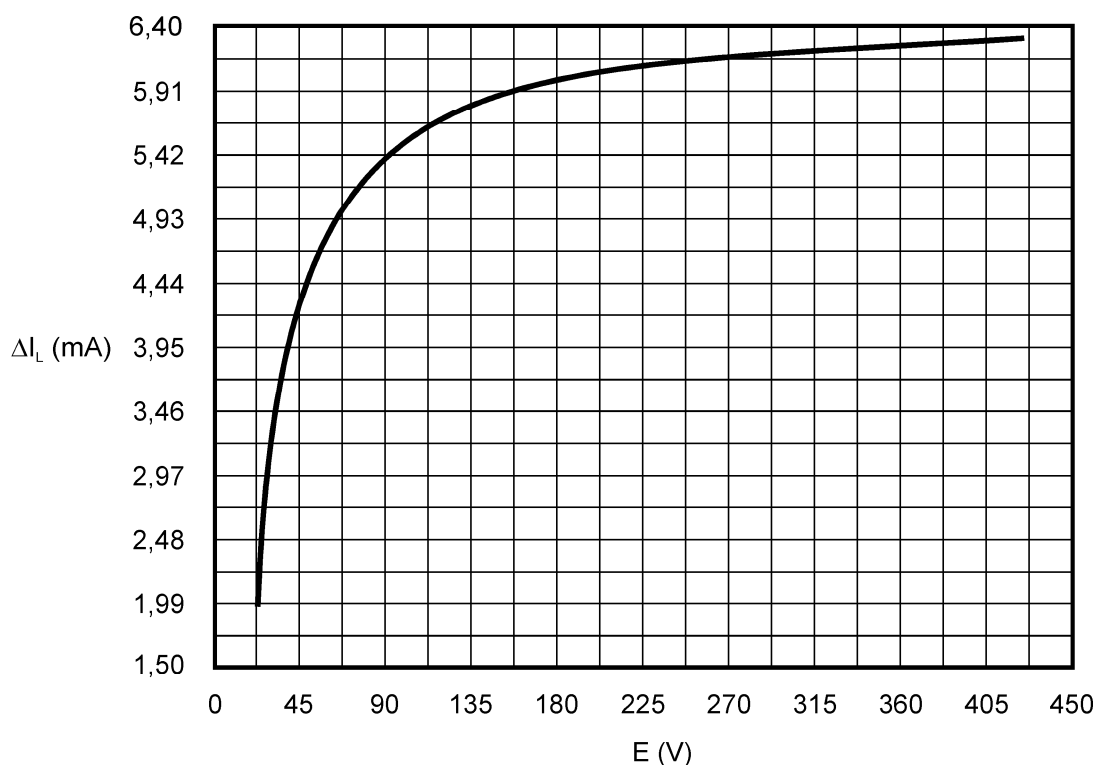


Figura 4.8 – Gráfico relacionando a ondulação da corrente ( $\Delta I_L$ ) e a tensão no barramento CC ( $E$ ).

Tabela 4.2 – Componentes utilizados e características do sistema

<b>Características do Sistema Proposto</b>	
Tensão de Entrada	$90 V_{CA} - 240 V_{CA}$
Tensão da Bateria	3 V – 3,6 V (Li-Ion)
Tensão de Saída	$15 V_{CC} - 20 V_{CC}$
Número de LEDs	5
Frequência de Operação do Buck	100 kHz
Frequência de Operação do Boost	125 kHz
<b>Componentes Utilizados no Projeto</b>	
$D_1$ - $D_4$ , $D_6$	1N4005
$C_{bus}$ , $C_N$	10 $\mu$ F
Interruptor <i>Buck</i>	NCP1014
$D_5$	UF4005
$R_{L1}$	2,2 $\Omega$
$T_{C1}$ , $T_{C2}$ , $T_{bat}$ , $T_b$	2N3904
$L_1$	12 mH
$D_7$ , $D_8$ , $D_9$ , $D_M$	1N4148
$C_O$	3,3 $\mu$ F
$Z_P$	27 V
$R_P$	2,8 k $\Omega$
$R_{L2}$	24 $\Omega$
$R_M$	4,7 k $\Omega$
$L_2$	800 $\mu$ H
$Q_1$	PN2222A
$C_1$	47 pF
$R_1$ , $R_2$	5,6 k $\Omega$
$Q_2$	2N3905
$R_{b1}$	39 k $\Omega$
$R_{b2}$ , $R_{C1}$	220 $\Omega$
$R_b$	1k $\Omega$
$Z_b$	20 V
$Z_{bat}$	4,3 V
LEDs	LXML-PWN1-0080

## CAPÍTULO 5

# RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 5.1 Lâmpada Compacta Empregando LEDs de Alto-Brilho

Para validar a idéia proposta e analisar a qualidade do projeto realizado, dois protótipos foram desenvolvidos. Para uma iluminação uniforme com características semelhantes às lâmpadas incandescentes e LFC, um circuito com 49 LEDs de alta intensidade foi implementado em uma superfície hemisférica. A forma de onda da tensão no resistor  $R_{SENSE}$  é apresentada na Figura 5.1, a qual mostra que o controle atua corretamente, seguindo a tensão de referência. Conseqüentemente, como pode ser visto na Figura 5.2, a corrente nos LEDs permanece constante e praticamente igual ao valor projetado (22,46 mA).

As formas de onda da tensão e corrente no interruptor são mostradas na Figura 5.3. A comutação é realizada com uma razão cíclica de aproximadamente 16%, resultando em uma tensão de saída de 160,5 V. A corrente de pico no interruptor atinge 144 mA evitando que o NCP1013 entre em modo de espera. O valor médio desta corrente (12 mA) pode ser utilizado para calcular a potência de entrada do circuito. O consumo da lâmpada foi de 3,8W. O rendimento do conversor foi de aproximadamente 95 %.

Com o objetivo de simular a falha de LEDs, dois desses dispositivos foram removidos do circuito. Assim, os Diacs conectados em paralelo com o grupo que continham os dispositivos removidos tornaram-se um curto-circuito e a tensão em  $R_{SENSE}$ , e conseqüentemente a corrente nos LEDs (35 LEDs), permaneceram constantes como mostram a Figura 5.4 e a Figura 5.5, respectivamente.

Para analisar o comportamento da lâmpada com a carga mínima, um circuito com 36 LEDs foi implementado, em uma superfície plana, resultando em uma iluminação direcional, similar as lâmpadas dicróicas. A Figura 5.6 mostra a forma de onda da tensão em  $R_{SENSE}$  e a Figura 5.7 a tensão e corrente nos LEDs. A tensão no resistor seguiu a referência, limitando a corrente nos LEDs em 20 mA.

A lâmpada com 49 LEDs foi testada e atingiu 60 lux a um metro de distância do luxímetro, aproximadamente o mesmo valor encontrado para uma lâmpada fluorescente compacta de 8 W, e 900 lux para o circuito de 36 LEDs com iluminação direcional.



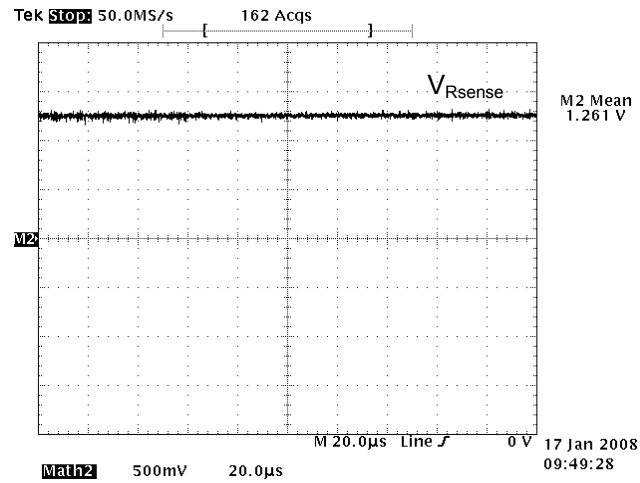


Figura 5.1 – Tensão no resistor  $R_{SENSE}$  para 49 LEDs (500mV/div, 20µs/div).

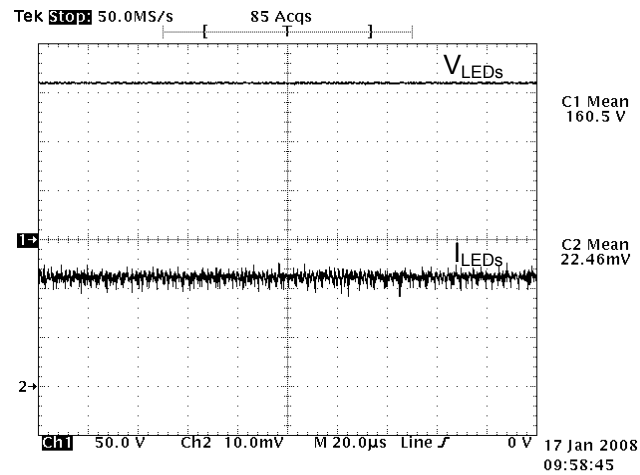


Figura 5.2 – Tensão e corrente aplicada aos 49 LEDs (50 V/div, 10 mA/div, 20 µs/div).

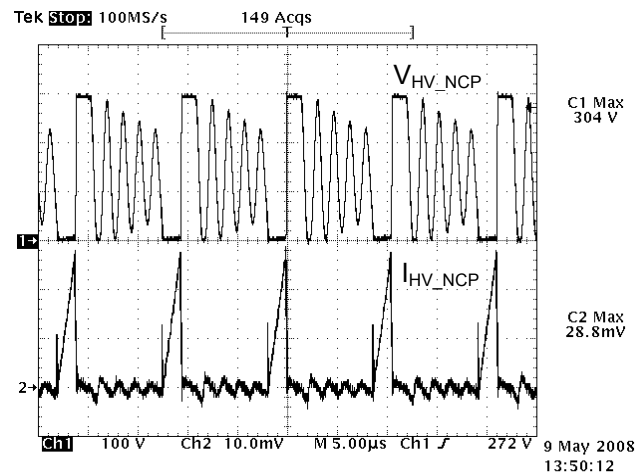


Figura 5.3 – Tensão e corrente no interruptor do NCP1013 (100 V/div, 50 mA/div, 5 µs/div).

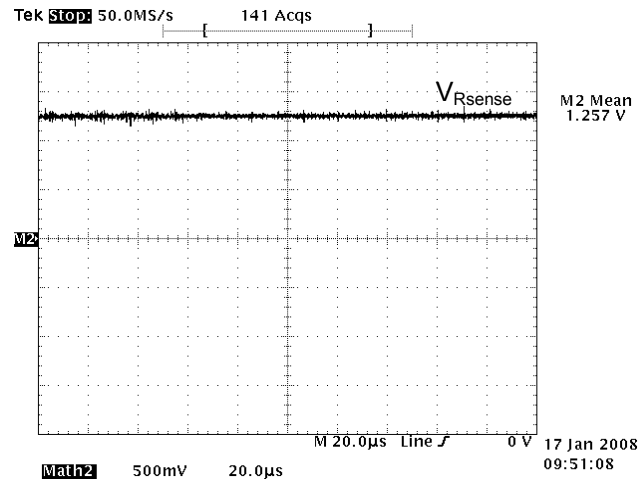


Figura 5.4 – Tensão no resistor  $R_{SENSE}$  para 35 LEDs (2 Diacs em funcionamento) (500 mV/div, 20  $\mu$ s/div).

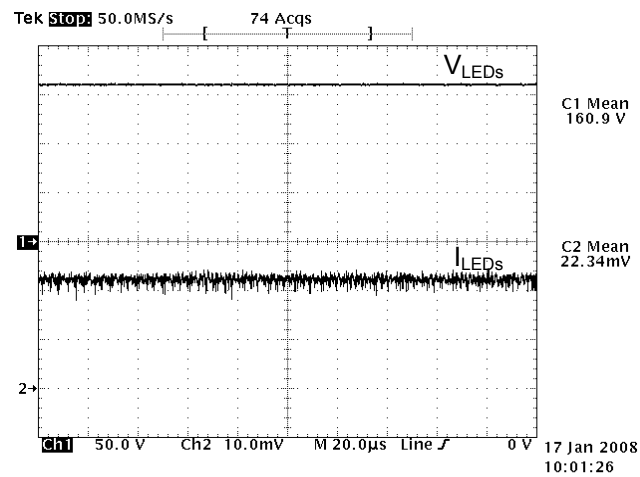


Figura 5.5 – Tensão e corrente aplicado aos 35 LEDs (2 Diacs em funcionamento) (50 V/div, 10 mA/div, 20  $\mu$ s/div).

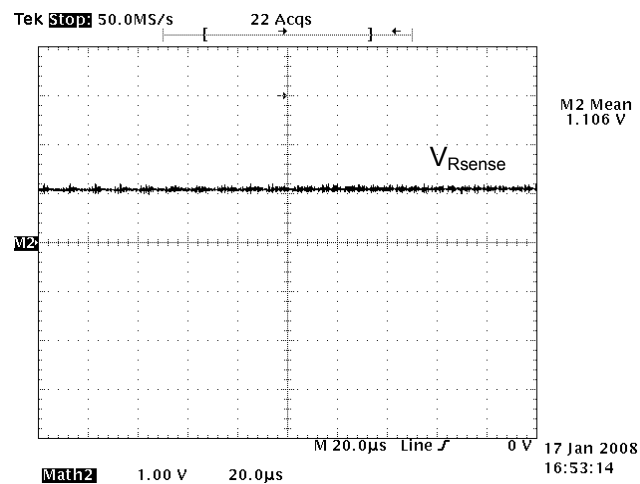


Figura 5.6 – Tensão no resistor  $R_{SENSE}$  para 36 LEDs (1 V/div, 20  $\mu$ s/div).

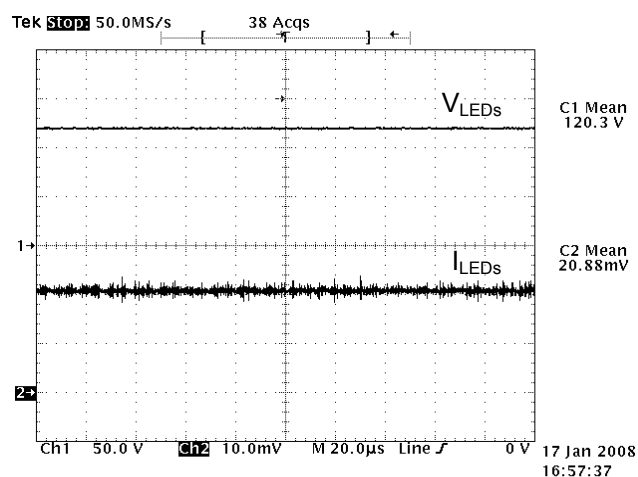


Figura 5.7 – Tensão e corrente aplicado aos 36 LEDs (50 V/div, 10 mA/div, 20  $\mu$ s/div).

A Figura 5.8 mostra a foto do protótipo do circuito proposto. A Figura 5.9 mostra a foto da lâmpada empregando 49 LEDs e a Figura 5.10 a foto do protótipo empregando 36 LEDs.

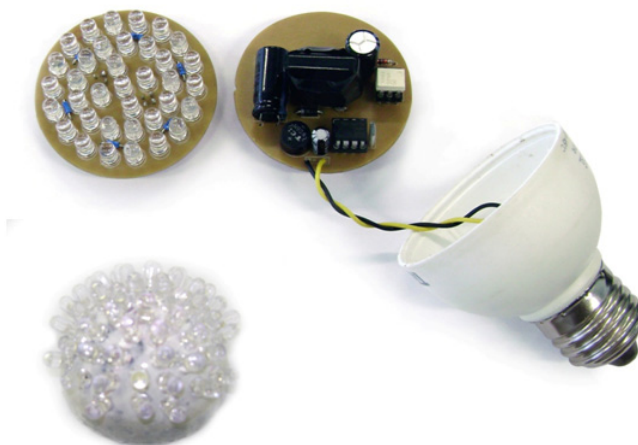


Figura 5.8 – Protótipo do circuito.



Figura 5.9 – Protótipo da lâmpada com 49 LEDs.



Figura 5.10 – Protótipo da lâmpada com 36 LEDs.

## 5.2 Lâmpada Compacta Empregando LEDs de Potência com Sistema de Iluminação de Emergência Integrado

O circuito completo foi implementado para analisar o funcionamento da idéia proposta. Para representar a falha no fornecimento da energia elétrica, o circuito foi desconectado da rede através de um interruptor. A Figura 5.11 mostra o resultado experimental para a corrente nos LEDs durante a transição entre o modo normal e o modo emergência.

O circuito é alimentado pela rede fornecendo aos LEDs uma corrente de 280 mA. No momento em que a rede é desconectada, o conversor *Boost* entra em funcionamento alimentando os LEDs com uma corrente de 50 mA. A tensão no barramento CC e a corrente no interruptor do *Buck* (NCP1014) são mostradas na Figura 5.12. A corrente no indutor  $L_1$  é mostrada na Figura 5.13. Devido à baixa ondulação no indutor do *Buck*, a corrente nos LEDs é mantida constante sem a necessidade de um capacitor de saída no conversor.

A Figura 5.14 mostra a tensão e corrente no interruptor principal do *Boost* ( $Q_1$ ). A corrente em ambos os interruptores possui um valor baixo. O NCP1014 suporta uma tensão de até 700 V e  $Q_1$  está submetido a uma tensão máxima de 35 V. Portanto, o circuito pode ser implementado com interruptores de baixo custo. O conversor *Buck* opera com frequência de 100 kHz e o *Boost* com 125 kHz. A Figura 5.15 mostra a tensão e corrente na bateria durante a carga. Quando a tensão da bateria ultrapassa 3,6 V, a corrente de carga é nula. Neste instante o diodo zener  $Z_{bat}$  entra em condução e desconecta a bateria do carregador.

Para analisar o funcionamento do circuito sob entrada universal (90 V<sub>CA</sub> a 240 V<sub>CA</sub>), a tensão de barramento ( $V_{Cbus}$ ) e a corrente nos LEDs são mostradas na Figura 5.16. O funcionamento do conversor *Boost* para a tensão da bateria variando de 3,6 V a 3 V é

apresentado na Figura 5.17. O NCP1014 mantém a comutação e a corrente nos LEDs (300 mA) mesmo com a variação da tensão de entrada. Assim como no conversor *Boost*, onde a corrente nos LEDs permanece em aproximadamente 50 mA mesmo com a variação da tensão na bateria. A Figura 5.18 mostra a tensão e corrente nos LEDs quando o circuito está operando em modo normal. Através da Figura 5.12 e da Figura 5.18 é possível calcular a potência de entrada e saída do circuito. O rendimento encontrado foi aproximadamente 90 % para a operação no modo normal. A Figura 5.19 mostra as fotos do protótipo desenvolvido.

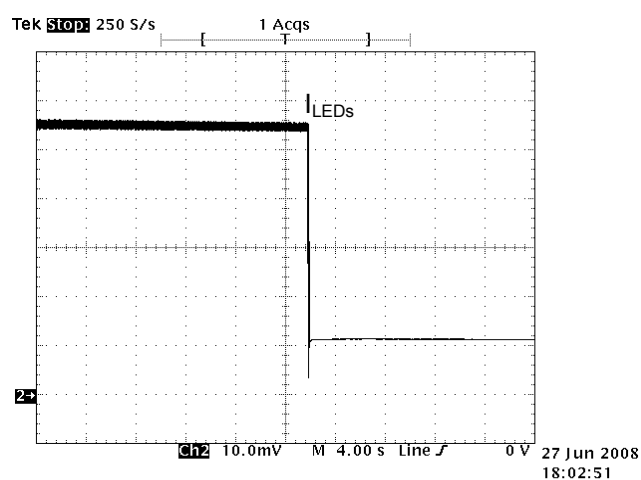


Figura 5.11 – Corrente aplicada aos LEDs (50 mA/div, 4 s/div).

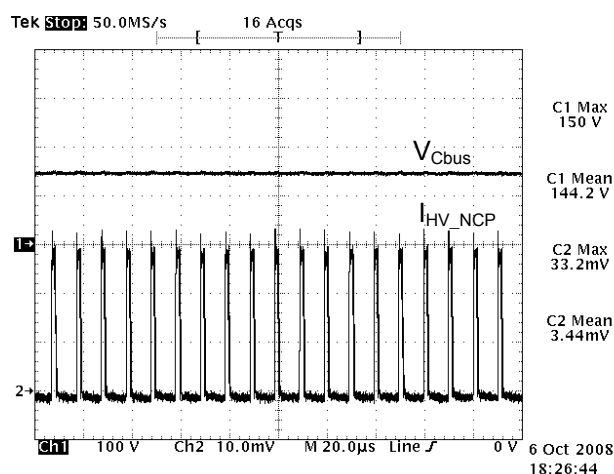


Figura 5.12 – Tensão no barramento e corrente no interruptor do *Buck* (100 V/div, 100 mA/div, 20 µs/div).

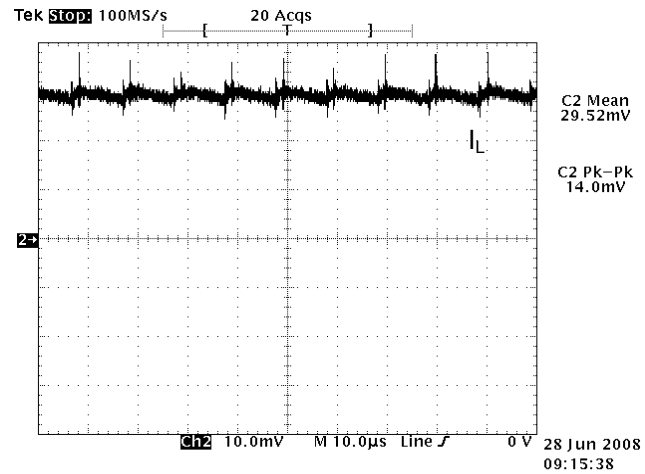


Figura 5.13 – Corrente no indutor do *Buck* (100 mA/div, 10 µs/div).

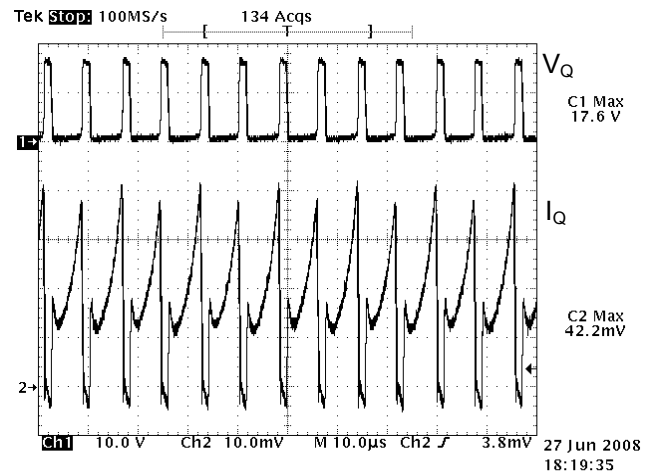


Figura 5.14 – Tensão e corrente no interruptor do *Boost* (10 V/div, 200 mA/div, 10 µs/div).

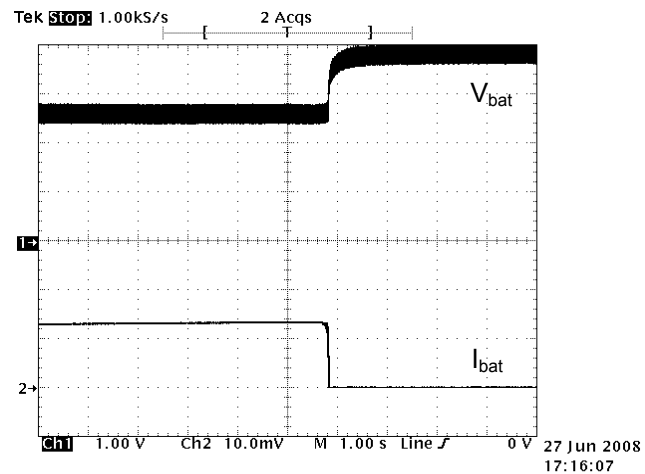


Figura 5.15 – Tensão e corrente na bateria durante a carga (1 V/div, 50 mA/div, 1 s/div).

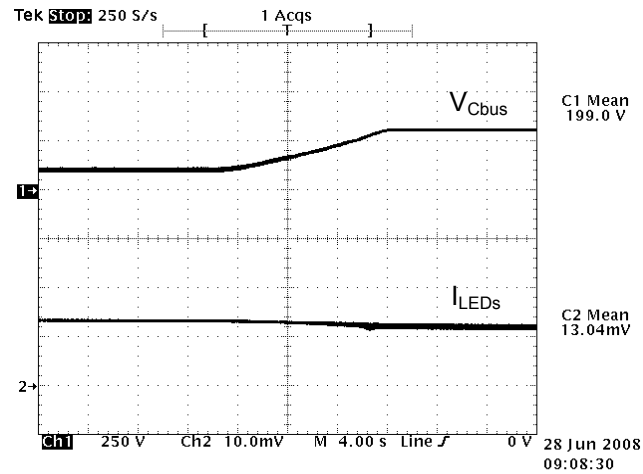


Figura 5.16 – Tensão no barramento para 90 V<sub>CA</sub> a 240 V<sub>CA</sub> e corrente nos LEDs (250 V/div, 200 mA/div, 4 s/div).

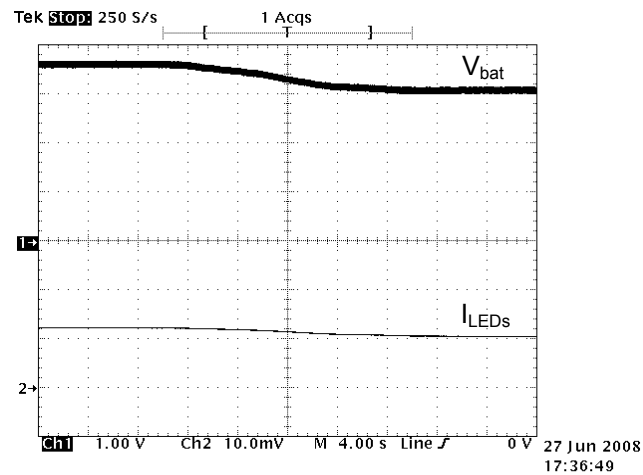


Figura 5.17 – Tensão na bateria (de 3,6 V até 3 V) e corrente nos LEDs (1 V/div, 50 mA/div, 4 s/div).

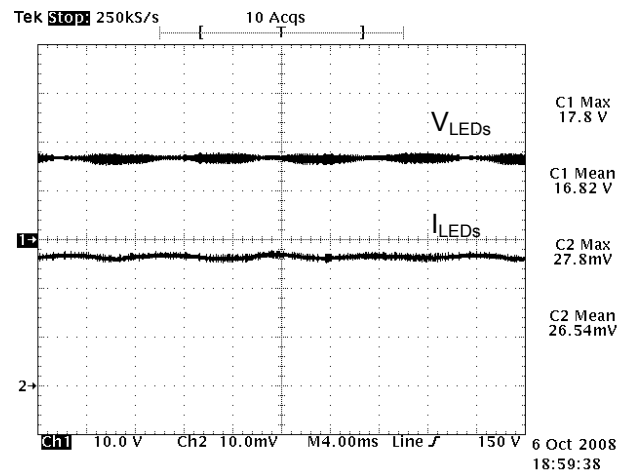


Figura 5.18 – Tensão e corrente nos LEDs alimentados pela rede (10 V/div, 100 mA/div, 4 ms/div).



Figura 5.19 – Protótipo da lâmpada.

### 5.3 Avaliação da Idéia Proposta

Para avaliar as contribuições da idéia proposta, os sistemas de iluminação implementados foram analisados e comparados com os sistemas semelhantes existentes no mercado, como lâmpadas incandescentes, fluorescentes compactas e lâmpadas dicróicas. As características consideradas nesta análise foram iluminância emitida, potência do equipamento, custo, vantagens e desvantagens.

O nível de iluminância das lâmpadas foi obtido através de um luxímetro fixado a um metro de distância da extremidade da fonte de luz. Para que a luminosidade do ambiente não interfira nos valores obtidos, a medição foi realizada em um compartimento fechado e escuro, evitando também a influência da luminosidade refletida pelas paredes deste compartimento. As lâmpadas foram posicionadas de duas maneiras diferentes em relação ao luxímetro de forma a medir a iluminância emitida pela parte frontal e lateral das fontes de luz. A Tabela 5.1 mostra os resultados obtidos juntamente com a potência de cada equipamento.



Tabela 5.1 – Comparativo entre potência e iluminância das lâmpadas analisadas

<b>Resultados de medição (luxímetro a um metro de distância)</b>		
<b>Lâmpada</b>	<b>Potência</b>	<b>Iluminância</b>
Incandescente	100 W	Frontal – 110 lux Lateral – 110 lux
	60 W	Frontal – 67 lux Lateral – 73 lux
	25 W	Frontal – 17 lux Lateral – 15 lux
	20 W	Frontal – 56 lux Lateral – 130 lux
	14 W	Frontal – 41 lux Lateral – 110 lux
	8 W	Frontal – 35 lux Lateral – 66 lux
Lâmpada com 49 LEDs de alto-brilho (Radial)	3,8 W	Frontal – 60 lux Lateral – 60 lux
Lâmpada com 5 LEDs de Potência (300 mA)	5 W	Frontal – 75 lux Lateral – 30 lux
Lâmpada com 5 LEDs de Potência (50 mA)		Frontal – 10 lux
Halógena Dicroica <sup>1</sup>	20 W	Frontal – 600 lux
Lâmpada comercial com 18 LEDs (Plana)	1,2 W	Frontal – 267 lux
Lâmpada com 36 LEDs de alto-brilho (Plana)	2,7 W	Frontal – 900 lux

Fonte: <sup>1</sup> Cervi, 2005b.

Através dos valores apresentados na Tabela 5.1 percebe-se que a lâmpada incandescente possui luminosidade uniforme, pois a iluminância medida na parte frontal é semelhante à iluminância medida na parte lateral. Já para a lâmpada fluorescente compacta o mesmo não acontece. Devido ao fato de sua estrutura apresentar uma curva na extremidade, a luminosidade emitida pela parte frontal é inferior à emitida pelas laterais da lâmpada. Esta característica é prejudicial para algumas aplicações, como na iluminação residencial. Isto porque o equipamento é normalmente instalado na superfície mais alta do ambiente, e com sua parte frontal direcionada para os objetos a serem iluminados. Assim, o ponto que apresenta a maior intensidade luminosa, a lateral da lâmpada, é direcionado para as paredes do ambiente e não para os objetos.

A lâmpada compacta empregando 49 LEDs de alto-brilho, proposta neste trabalho, apresentou uma luminosidade uniforme, semelhante à lâmpada incandescente. Isto devido à disposição dos LEDs em uma superfície radial. A iluminância medida na lateral deste equipamento atingiu valores próximos aos da lâmpada fluorescente compacta de 8 W. No entanto, a luminosidade emitida pela parte frontal foi superior. Além disso, a potência necessária para o funcionamento desta lâmpada foi significativamente menor.

Segundo o fabricante, a lâmpada fluorescente compacta de 14 W é equivalente à lâmpada incandescente de 60 W. O sistema de iluminação de emergência proposto operando no modo normal, alimentando os LEDs com uma corrente de 300 mA, apresentou uma iluminância na sua parte frontal superior à da lâmpada incandescente de 60 W. Para o modo emergência a iluminância atingiu aproximadamente 10 lux, o que é suficiente para aplicações em ambientes pequenos.

A lâmpada compacta proposta, empregando 36 LEDs de alto-brilho, foi comparada a uma lâmpada dicróica devido à semelhança de apresentar uma iluminação direcional. O mesmo equipamento também foi comparado a uma lâmpada comercial empregando 18 LEDs de alto-brilho. Embora a quantidade de LEDs seja diferente, a relação entre a iluminância e potência foi superior para o sistema proposto.

A Figura 5.20 (a) mostra a lâmpada comercial analisada. O circuito empregado nesta lâmpada limita a corrente nos LEDs através de um capacitor em série com a rede. A Figura 5.20 (b) mostra o exemplo de uma lâmpada empregando resistores em série com os LEDs.

A utilização de um resistor em série com os LEDs conectados diretamente ao barramento é a maneira mais simples e que apresenta o menor custo para a fabricação de uma lâmpada a LED. No entanto, se a diferença entre o valor da tensão de entrada e o valor da tensão de condução dos LEDs for elevada, a energia dissipada neste resistor será significativa e a eficiência do sistema será baixa. Para que a eficiência não seja prejudicada, o ideal é aumentar o número de LEDs empregados, aumentando a tensão de condução destes dispositivos e reduzindo a energia dissipada no resistor. Porém, projetar o circuito para que a tensão no resistor seja baixa também apresenta desvantagens. Isto porque a variação da tensão da rede, assim como a variação da tensão de condução dos LEDs provoca uma alteração na tensão do resistor. Se a tensão no resistor for superior à projetada, a corrente do circuito será maior, resultando na queima dos LEDs. Se a tensão no resistor for inferior ao projetado, a lâmpada pode reduzir sua intensidade luminosa ou até não acender. A utilização de um conversor linear, como o circuito integrado LM317 ou transistor, também apresentam as mesmas desvantagens apresentadas anteriormente.



(a)



(b)

Figura 5.20 – Exemplos de lâmpadas compactas empregando LEDs de alto-brilho;  
 (a) lâmpada compacta empregando capacitor em série com os LEDs;  
 (b) lâmpada compacta empregando resistor em série com os LEDs;

A utilização de um capacitor em série com os LEDs, em substituição ao resistor, aumenta a eficiência do circuito. No entanto, a corrente aplicada aos LEDs não é contínua e possui um valor de pico superior ao nominal. Esta característica reduz a eficiência luminosa do LED. Assim, o uso de um conversor adequado que regule a corrente nos LEDs, evite a queima do dispositivo e proporcione uma iluminação eficiente e com qualidade é justificado.

Atualmente, as lâmpadas existentes no mercado nacional empregando LEDs, apresentam valores entre vinte e cinco e quarenta reais, e são constituídas de 12 a 36 LEDs.

Para verificar a viabilidade econômica dos sistemas de iluminação propostos, foi realizada uma pesquisa com relação ao custo dos componentes eletrônicos empregados. A Tabela 5.2 mostra os valores dos componentes necessários para a lâmpada compacta empregando 49 LEDs. Nesta tabela são apresentados os preços de cada dispositivo individualmente, o custo do circuito eletrônico e o custo total do sistema. Nesta análise não foram considerados aspectos como mão de obra, encargos financeiros, custo do suporte ou soquete.

Tabela 5.2 – Custo dos componentes para uma lâmpada compacta com 49 LEDs de alto-brilho

<b>Componentes</b>	<b>Modelo</b>	<b>Custo individual para a compra de 1000 unidades</b>
Ponte retificadora	1N4006 (x4)	R\$ 0,12
Capacitor de barramento	4,5 $\mu$ F/450 V	R\$ 0,93
Capacitor de alimentação do NCP	10 $\mu$ F/16V	R\$ 0,05
Capacitor do terminal FB	1 nF/50 V	R\$ 0,02
Capacitor de saída do conversor	4,7 $\mu$ F/450 V	R\$ 0,93
Diodo ultra-rápido	UF4004	R\$ 0,17
Interruptor - NCP101x	NCP1014	R\$ 0,85
Resistor controle	150 $\Omega$ (1/8 W)	R\$ 0,02
Resistor zener	1 k $\Omega$ (0,1 W)	R\$ 0,01
Diodo zener	1N5223B-TR (2,7 V)	R\$ 0,05
Transistor de controle	BC846BLT1G	R\$ 0,06
Indutor 1,6 mH, $I_{méd} = 30$ mA	RFB0807 (1,5 mH; $I_{RMS} = 0,21$ A)	R\$ 0,60
<b>Custo do circuito eletrônico</b>		<b>R\$ 3,81</b>
Díac	DB3 (x7)	R\$ 1,68
LEDs <sup>1</sup>	5 mm 25000 mcd (x49)	R\$ 7,70
<b>TOTAL</b>		<b>R\$ 13,19</b>

Referência: Farnell ([www.farnell.com.br](http://www.farnell.com.br)), 23/10/2007; <sup>1</sup>Ebay ([www.ebay.co.uk](http://www.ebay.co.uk)), 09/09/2008

O custo do sistema de iluminação proposto apresenta um valor aceitável para sua comercialização, considerando que o LED ainda é uma tecnologia emergente. A tendência é que o preço deste dispositivo diminua com o aumento no número de aplicações. Além disso, a produção em larga escala reduziria ainda mais o valor do produto.

Embora a vida útil do LED seja elevada, o circuito eletrônico utilizado para o seu acionamento pode não acompanhar esta característica. Um dos principais elementos que limitam a vida útil de um circuito eletrônico é o capacitor eletrolítico. A vida útil deste componente está relacionada às suas condições de operação e pode ser reduzida se os esforços de tensão aplicados aos terminais deste elemento forem elevados. O sistema de iluminação de emergência proposto permite a alimentação dos LEDs sem a necessidade de um capacitor na saída do conversor, no entanto, seria vantajoso retirar também o capacitor de barramento, uma vez que este elemento, além de volumoso, apresenta o maior custo do circuito.

A ausência do capacitor de barramento faz com que a tensão de entrada aplicada ao conversor CC-CC varie de 0 a 311 V. O conversor proposto foi projetado para operar com tensão de entrada universal, entretanto, o controlador mantém a corrente nos LEDs constante para uma tensão de entrada mínima de até 40 V. Para valores abaixo de 40 V o NCP101x é desligado e a corrente no LED decresce até zero. No entanto, a frequência em que isto ocorre é 120 Hz e a redução da luminosidade não é perceptível ao olho humano. Então, o capacitor de barramento poderia ser retirado do circuito. Entretanto, o efeito estroboscópico pode ser prejudicial em ambientes aonde se encontram máquinas motrizes, distorcendo a percepção dos movimentos.

Para as lâmpadas compactas empregando LEDs de alto-brilho, os capacitores são necessários devido ao fato de o conversor Buck operar no modo de condução descontínua. Porém, se o circuito integrado utilizado for o modelo NCP1010, o conversor pode ser projetado para operar no modo de condução contínua sem que o CI entre no modo de espera, uma vez que a corrente dos LEDs será superior à 25 % do valor nominal do interruptor do NCP1010. Assim, os capacitores de barramento e de saída poderiam ser retirados e o custo do circuito, mostrado na Tabela 5.2, reduziria para menos de dois reais.

O capacitor de barramento ainda contribui para a redução do fator de potência, pois a corrente de entrada é drenada da fonte sob forma de picos. Estes picos provocam uma distorção na forma de onda desta corrente, conforme mostra a Figura 5.21. Por outro lado, se o capacitor for retirado do circuito, a corrente de entrada será drenada da rede por um período de tempo maior e o pico de corrente não existirá. A Figura 5.22 mostra a forma de onda da tensão e corrente de entrada para o circuito proposto operando sem o capacitor de barramento. A Figura 5.23 mostra a tensão e corrente nos LEDs para a mesma situação. Então, além da redução do custo, volume e aumento da vida útil do circuito, a ausência do capacitor de barramento ainda proporciona a redução da taxa de distorção harmônica da corrente de entrada.

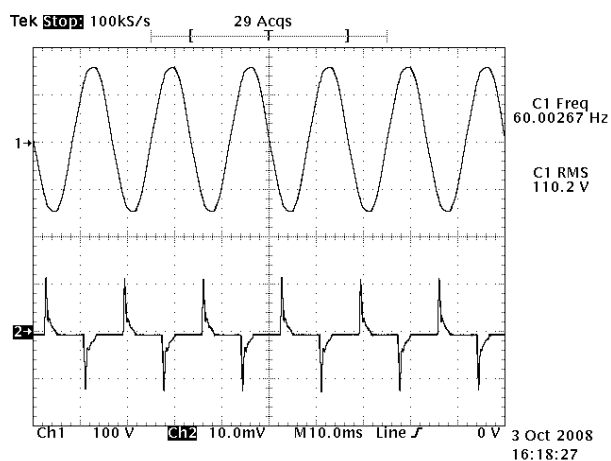


Figura 5.21 – Forma de onda da tensão e corrente de entrada do sistema de iluminação proposto utilizando capacitor de barramento (100 V/div, 500 mA/div, 10 ms/div).

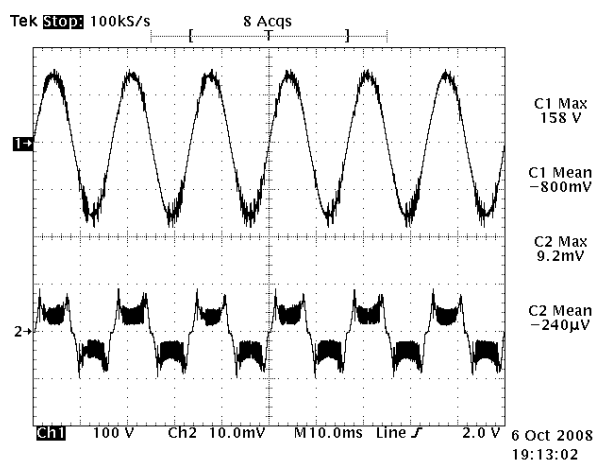


Figura 5.22 – Forma de onda da tensão e corrente de entrada do sistema de iluminação proposto sem utilizar o capacitor de barramento (100 V/div, 200 mA/div, 10 ms/div).

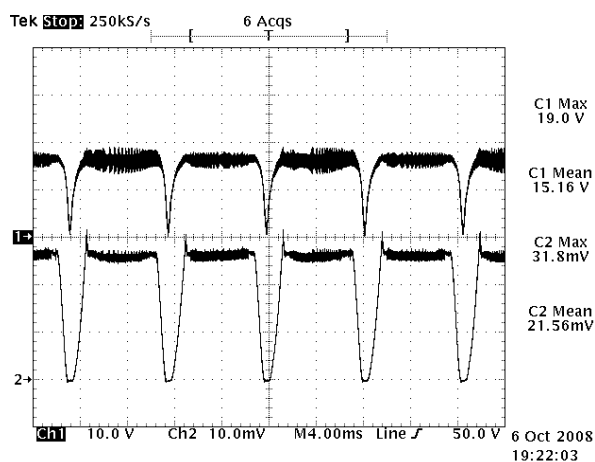


Figura 5.23 – Forma de onda da tensão e corrente nos LEDs para o sistema de iluminação proposto sem utilizar o capacitor de barramento (10 V/div, 100 mA/div, 4 ms/div).

A utilização dos Diacs no sistema proposto permite estender o uso da lâmpada mesmo com a possível falha de algum LED. Entretanto, a principal aplicação do Diac é sob operação em corrente pulsada e não em corrente contínua como empregada neste trabalho. Isto porque a potência deste dispositivo é baixa (150 mW).

Durante seu funcionamento no sistema de proteção contra a falha de algum LED, a corrente que circula por este elemento é aproximadamente 20 mA e, portanto, a potência aplicada é superior à permitida. Assim, a operação sob estas condições reduz a vida útil do componente. No entanto, segundo o fabricante, a falha deste componente resulta sempre em um curto-circuito, o que não traz prejuízos a esta aplicação. Para verificar se esta afirmação é verdadeira e validar o sistema de proteção proposto, foram realizados alguns testes.

O primeiro deles aplicou ao dispositivo uma corrente contínua de 20 mA durante 30 dias ininterruptos. O Diac manteve seu funcionamento durante todo o período e sua temperatura estabilizou após algumas horas do início do teste. Nos demais testes foram aplicados ao dispositivo uma corrente contínua com valores entre 350 mA e 2,2 A. Após uma hora de funcionamento o Diac tornou-se um curto-circuito. Então, o sistema de proteção contra a falha de algum LED é válido mesmo com a possível falha do Diac.

## CONCLUSÃO

A iluminação artificial representa uma parcela considerável da energia elétrica gerada atualmente. Portanto o desenvolvimento de sistemas de iluminação que façam uso dos recursos energéticos de forma racional é de extrema importância.

Além disso, a iluminação tem auxiliado o homem no exercício de suas atividades durante muitos anos e a ausência da luz em alguns ambientes provoca a sensação de insegurança, além de causar diversos transtornos em um estabelecimento comercial ou industrial.

Os sistemas de iluminação de emergência tradicionais apresentam peso e volume elevados. Assim, o uso destas luminárias muitas vezes prejudica a decoração do ambiente. O custo do produto e sua instalação não são economicamente viáveis, em alguns casos, considerando que o equipamento será utilizado eventualmente.

Então, neste trabalho foi apresentado um sistema de iluminação eficiente empregando diodos emissores de luz (LEDs). A lâmpada compacta implementada visa à redução do consumo de energia elétrica, alta eficácia luminosa e longa vida útil na substituição das lâmpadas incandescentes ou fluorescentes compactas, amplamente utilizadas em ambientes internos, por LEDs, sem qualquer alteração na instalação elétrica. Além disso, um sistema de iluminação de emergência integrado a esta lâmpada foi desenvolvido, permitindo a utilização de um único equipamento nas atividades diárias, alimentada pela rede elétrica, e sob uma possível falha no fornecimento de energia.

Para isso, foram utilizados circuitos eletrônicos operando em alta frequência. Os conversores propostos são simples, de baixo custo e consumo, características essenciais para sua comercialização. Dentre outras vantagens, pode-se citar também a facilidade de instalação e alimentação com tensão de entrada universal. O projeto atende às exigências da norma brasileira (NBR 10898) e da norma internacional (IEEE Std 446-1995) para sistemas de iluminação de emergência.

O primeiro projeto permite alimentar de 36 a 52 LEDs de alto-brilho conectados em série. Assim, o número de LEDs utilizados irá determinar o nível de luminosidade da lâmpada. O segundo projeto utiliza 5 LEDs de potência também conectados em série devido às diversas vantagens apresentadas por este tipo de conexão. Os resultados experimentais mostram que as lâmpadas funcionam de forma satisfatória, atendendo às especificações de



projeto. Os sistemas propostos foram comparados a produtos encontrados no mercado brasileiro e apresentaram vantagens importantes, em determinados casos.

O uso de LEDs contribui para a maior eficiência e longa vida útil do sistema, além de não depositar elementos químicos nocivos no meio ambiente, comparado às lâmpadas fluorescentes. Além disso, o sistema garante a operação do circuito mesmo com a falha de alguns LEDs, mantendo a iluminação do ambiente, o que não acontece com as demais lâmpadas caso a fonte de luz esteja danificada. Outra vantagem é a possibilidade de substituir apenas o LED defeituoso, reduzindo o custo de manutenção e evitando o descarte desnecessário do sistema completo.

Outra importante contribuição deste trabalho é o fato de utilizar o circuito integrado NCP101x aplicado ao controle de corrente empregando um transistor de baixa potência, uma vez que o fabricante propõe o uso destes circuitos para controle de tensão de saída, e com a utilização de opto acopladores ou enrolamentos auxiliares de transformadores. Também é apresentada uma solução para o principal problema encontrado na utilização de LEDs em série e proposto um circuito eletrônico para acionamento e controle da corrente nos LEDs sem utilizar capacitores eletrolíticos, reduzindo o custo, volume e aumentando a vida útil do sistema.

De um modo geral, o trabalho descreve algumas características dos LEDs comparadas à outras fontes de luz, juntamente com os conceitos luminotécnicos aplicados à iluminação de interiores. Foram analisadas algumas topologias para acionamento e controle da corrente do LED e escolhidas àquelas que apresentaram as melhores vantagens com relação às demais. O projeto e funcionamento dos circuitos propostos foram abordados e, por fim, realizada uma análise com relação à viabilidade dos sistemas implementados.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são citadas algumas sugestões para trabalhos futuros, de modo a complementar e aperfeiçoar o trabalho proposto.

### **Interruptor dedicado ao acionamento da lâmpada**

Para funcionamento correto da lâmpada compacta com sistema de iluminação de emergência integrado, o interruptor da instalação elétrica deve estar sempre acionado, permitindo a carga da bateria e também a monitoração da energia da rede. Assim, para acionar ou não os LEDs quando desejado, sem interromper a corrente de carga da bateria, o sistema proposto possui um interruptor em série com os LEDs.

Para aplicações em luminárias, esta alternativa não apresenta problemas. No entanto, quando a lâmpada é instalada em lugares de difícil acesso, como locais muito altos, o interruptor integrado a lâmpada dificulta seu acionamento. Então, o desenvolvimento de um novo interruptor dedicado ao acionamento da lâmpada que pudesse ser instalado separadamente sem maiores alterações na instalação elétrica seria interessante. Uma sugestão seria o uso de um controle remoto.

### **Funções adicionais**

Algumas funções adicionais como variação da intensidade luminosa e variação da tonalidade da cor da luz emitida podem ser implementadas na mesma lâmpada. Para variar a intensidade luminosa, um resistor variável poderia ser empregado em substituição ao resistor *shunt* utilizado no controle da corrente nos LEDs. Para variação das cores, os LEDs brancos poderiam ser substituídos por LEDs de outras cores, sem qualquer alteração no circuito. Também poderiam ser empregados LEDs RGB. Para isso o circuito deveria ser adaptado de forma a realizar o controle das cores.

### **Controle Remoto**

O acionamento remoto traria comodidade ao usuário através do acionamento da lâmpada em qualquer lugar do ambiente ou até mesmo da casa, sem qualquer alteração na instalação elétrica. As demais funções propostas acima poderiam ser habilitadas através do mesmo controle remoto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR-10898**: norma brasileira para sistema de iluminação de emergência, 1999.
- [2] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR-5413**: norma brasileira para iluminância de interiores. 1992.
- [3] ASSIST – Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies. **How to select residential LED directional lighting**. Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute. Vol. 7, Issue 2, 2007.
- [4] ASSIST – Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies. **Lighting supermarket freezers with LEDs**. Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute. Disponível em: <[http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/cr\\_freezers.asp](http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/cr_freezers.asp)>. Acesso em: 24 set. 2008.
- [5] BADELLA, S. M.; ZINGER, D. S. **Parallel connected LEDs operated at high frequency to improve current sharing**. In: Conference Records of Industry Applications Society Annual Meeting, 2004.
- [6] BATTERY SPACE. Disponível em: < <http://www.batteryspace.com/> >. Acesso em: 25 set. 2008.
- [7] BOWERS, B. **Historical review of artificial light sources**. IEE Proceedings, vol. 127, n. 3, April 1980.
- [8] BULLOUGH, J. D. **Lighting answers: LED Lighting Systems**. National Lighting Product Information Program, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute. Vol. 7, Issue 3, 2003.
- [9] CALLEJA, A. J. et al. **Evaluation of a high efficiency Boost stage to supply a permanent LED emergency lighting system**. In: Conference Records of Industry Applications Society Annual Meeting, v. 2, p. 1390-1395, 2004.
- [10] CAMPOS, A. et al. **Fixed frequency self-oscillating electronic ballast to supply multiple lamps**. In: Annual Power Electronics Specialists Conference, 2004.
- [11] CERVI, M. et al. **A semiconductor lighting system controlled through a LIN network to automotive application**. In: Conference Records of Industry Applications Society Annual Meeting, v. 3, p. 1603-1608, 2005a.
- [12] CERVI, M. **Rede de iluminação semicondutora para aplicação automotiva**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005b.
- [13] COMPÊNDIO TÉCNICO. **Conceitos básicos de luminotécnica**. 2005.

- [14] CORRÊA, C. et al. **Aplicação de espelhos de corrente no acionamento de LEDs de potência.** In: Congresso Brasileiro de Automática, 2008.
- [15] COSTA, G. J. C. da. **Iluminação econômica: cálculo e avaliação.** EDIPUCRS, 2005, 561 p.
- [16] CREE. **Cree demonstrates 131 lumens per watt white LED.** 20 jun. 2006. Disponível em: < [http://www.cree.com/press/press\\_detail.asp?i=1150834953712](http://www.cree.com/press/press_detail.asp?i=1150834953712) >. Acesso em: 21 jul. 2008.
- [17] DALLA COSTA et al. **Reator eletrônico auto-oscilante com alto fator de potência para alimentação de quatro lâmpadas fluorescentes independentes.** In: Congresso Brasileiro de Automática, 2004a.
- [18] DALLA COSTA, M. A. **Reator eletrônico auto-oscilante com alto fator de potência para alimentação de quatro lâmpadas fluorescentes independentes.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004b.
- [19] ELLERT, M. **A troca das lâmpadas e o desperdício de energia.** 18 jun. 2008. Empreendedor, revista eletrônica UOL. Disponível em:< <http://empreendedor.uol.com.br> >. Acesso em: 29 jul. 2008.
- [20] ERICKSON, R. W. **Fundamentals of power electronics.** Norwell: MA Kluwer Academic Publishers, 2. ed., 2000.
- [21] FICKE, L.; CAHAY, M. **The bright future of organic LEDs.** In: Potentials, IEEE, v. 22, Issue: 5, p. 31-34, dez. 2003- jan. 2004.
- [22] GALYSH, I.; DUTCHOVER, G. **Sony 18650 Li-ion battery test results. 15 jan. 2004.** Disponível em: < [http://www.stensat.org/Docs/battery\\_test\\_results.pdf](http://www.stensat.org/Docs/battery_test_results.pdf) >. Acesso em: 25 set. 2008.
- [23] HARRIS, J. B. **Electric lamps, past and present.** IEE Engineering Science and Education Journal, p. 161-170, Agosto 1993.
- [24] IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers. **IEEE Std 446-1995: recommended practice for emergency and standby power systems for industrial and commercial applications.** 1995.
- [25] INEE - Instituto Nacional De Eficiência Energética - eficiência energética - por que desperdiçar energia? Disponível em: < <http://www.inee.org.br> >. Acesso em: 23 set.. 2008.
- [26] INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Ensaio de lâmpadas fluorescentes compactas.** 1998. Disponível em: < <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/fluorescentes.asp> >. Acesso em: 30 abr. 2008.

- [27] INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **LEDs mais baratos:** eliminado componente mais caro em sua fabricação. 25 jul. 2008. Revista Eletrônica. Disponível em: < <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=leds-mais-baratos--eliminado-componente-mais-carro-em-sua-fabricacao&id=010110080725> >. Acesso em: 25 jul. 2008.
- [28] LAZZARIN, T. B. **Estudo e implementação de um carregador de baterias com uma técnica de avaliação de sua vida útil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [29] LEDS MAGAZINE. **Cree reports 131 lm/W from prototype white LED at 20 mA.** 21 jun. 2006. Disponível em: <<http://www.ledsmagazine.com/news/3/6/19>>. Acesso em: 12 jul. 2008.
- [30] LUMILEDS. **Simple steps to solid-state lighting.** Disponível em: < <http://www.philipslumileds.com/pdfs/BR06.pdf> >. Acesso em: 24 set. 2008.
- [31] LUXEON STAR. **EverLED TR – 48” fluorescent replacement LED tube - warm white.** Disponível em: < <http://www.luxeonstar.com/everled-tr--48-fluorescent-replacement-led-tube-warm-white-p-382.php> >. Acesso em: 24 set. 2008.
- [32] LUXEON. **Power light source Luxeon III Emitter: LXHL-PW0x.** Folha de Especificação, 2006. Disponível em: < <http://www.luxeon.com/pdfs/DS45.PDF> >. Acesso em: 17 jun. 2008.
- [33] LUXEON. **Power light source Luxeon Rebel: LXML-PWN1-0080.** Folha de Especificação, 2008. Disponível em: < <http://www.luxeon.com/pdfs/DS56.pdf> >. Acesso em: 27 mar. 2008.
- [34] MARCHESAN, T. B. **Integração de conversores estáticos aplicados a sistemas de iluminação pública.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- [35] NARUKAWA, Y. et al. **Ultra-high efficiency white light emitting diodes.** Japanese Journal of Applied Physics, vol. 45, no. 41, p. L1084-L1086, 2006.
- [36] NEWSTIN. **Universal display corporation's white OLED technology exceeds 100 lm/W - a major milestone for...** 17 jun. 2008. Newstin – News and People. Disponível em: < <http://www.newstin.co.uk/rel/uk/en-010-003397519> >. Acesso em: 24 set. 2008.
- [37] OLIVEIRA, A. A. M. **Sistema de iluminação distribuída utilizando LED's acionados por dois conversores Flyback integrados.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- [38] ON SEMICONDUCTOR. **LED constant current source scheme: theory of operation.** AND8109-D. Nota de aplicação, 2003a. Disponível em: < [http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/AND8109-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND8109-D.PDF) >. Acesso em: 24 set. 2008.

- [39] ON SEMICONDUCTOR. **Low-cost 100 mA high-voltage Buck and Buck-Boost using NCP1052**. AND8098. Nota de aplicação, 2003b. Disponível em: <[http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/AND8098-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND8098-D.PDF)>. Acesso em: 24 set. 2008.
- [40] ON SEMICONDUCTOR. **Self-supplied monolithic switcher for low standby-power offline SMPS: NCP101x**. Folha de Especificação, 2007. Disponível em: <[http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/NCP1010-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/NCP1010-D.PDF)>. Acesso em: 24 set. 2008.
- [41] OPEN STOCK PHOTOGRAPHY. Banco de imagens gratuito. Disponível em: <<http://www.openstockphotography.org/>>. Acesso em: 22 jul. 2008.
- [42] OSRAM, 2007. Disponível em: <<http://www.osram.com.br>>. Acesso em: 30 set. 2007.
- [43] OSRAM. **Comparison of LED circuits**. Nota de aplicação, 2004. Disponível em: <[http://catalog.osram-os.com/jsp/download.jsp?rootPath=/media/&name=Comparison\\_of\\_LED\\_circuits.pdf&docPath=Graphics/00017076\\_0.pdf&url=/media//\\_en/Graphics/00017076\\_0.pdf](http://catalog.osram-os.com/jsp/download.jsp?rootPath=/media/&name=Comparison_of_LED_circuits.pdf&docPath=Graphics/00017076_0.pdf&url=/media//_en/Graphics/00017076_0.pdf)>. Acesso em: 24 set. 2008.
- [44] PHILIPS - Energia eficiente: incandescente. 31 jan. 2008. Disponível em: <<http://www.energiaeficiente.com.br/tag/incandescente>>. Acesso em: 23 set. 2008.
- [45] PINTO, R. A. et al. **Power control of HPS lamps in a public lighting system with remote management**. In: 9º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, p. 227-232, 2007.
- [46] POMILIO, J. A. **Eletrônica de potência - pós-graduação: topologias básicas de fontes chaveadas**. Apostila do curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, capítulo 5. 2007. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/files/eltpot/cap5.pdf>>. Acesso em: 24 set. 2008.
- [47] POWER INTEGRATION. **Lowest component count, energy-efficient off-line switcher IC: LinkSwitch-TN**. Folha de Especificação, 2006. Disponível em: <[http://www.powerint.com/sites/default/files/product-docs/lnk302\\_304-306.pdf](http://www.powerint.com/sites/default/files/product-docs/lnk302_304-306.pdf)>. Acesso em: 24 set. 2008.
- [48] RICO-SECADES, M. et al. **Driver for high efficiency LED based on Flyback stage with current mode control for emergency lighting system**. In: Conference Records of Industry Applications Society Annual Meeting, v. 3, p. 1655-1659, 2004.
- [49] RICO-SECADES, M. et al. **Evaluation of a low-cost permanent emergency lighting system based on high-efficiency LEDs**. In: Industry Applications, IEEE Transactions on v. 41, Issue: 5, p. 1386-1390, 2005.
- [50] RIVAS, N. et al. **LED lighting apparatus**. Patente. US 7114834, 23 set. 2003, 3 out. 2006.

- [51] RODGERS, G. H. **Low-voltage transistorized electric light flasher circuit for barricade lights**. Patente. US 3018473, 16 set. 1958, mar. 1970.
- [52] RODRIGUES, P. **Manual de iluminação eficiente**. PROCEL, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, 1º edição, 2002.
- [53] SÁ JUNIOR, E. M. **Design of an electronic driver for LEDs**. In: 9º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, p. 341-345, 2007a.
- [54] SÁ JUNIOR, E. M. **Estudo de novas estruturas de reatores eletrônicos para LEDs de iluminação**. Exame de Qualificação (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007b.
- [55] SAUERLÄNDER, G., et al. **Driver electronics for LEDs**. In: Conference Records of Industry Applications Society Annual Meeting, v. 5, p. 2621-2626, 2006.
- [56] SCHMID, M. et al. **Evaluation on the efficiency of power LEDs driven with currents typical to switch mode power supplies**. In: Conference Records of Industry Applications Society Annual Meeting, 2007
- [57] SILVA, M. F. **Contribuição ao estudo de sistemas eletrônicos de baixo custo com alto fator de potência para acionamento de lâmpada fluorescente compacta**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.
- [58] SILVA, M. L. **Luz, lâmpadas e iluminação**. Porto Alegre: Gráfica e Editora Palloti, 2002.
- [59] STOCK.XCHNG. Banco de imagens gratuito. Disponível em: <<http://www.sxc.hu/index.phtml>>. Acesso em: 23 jul. 2008.
- [60] U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. Energy Efficiency and Renewable Energy. Building Technologies Program. **Thermal management of white LEDs**. Disponível em: <[http://www.netl.doe.gov/ssl/PDFs/ThermalLED\\_Feb07\\_2.pdf](http://www.netl.doe.gov/ssl/PDFs/ThermalLED_Feb07_2.pdf)>. Acesso em: 16 mai. 2008.
- [61] UNITRODE POWER SUPPLY DESIGN SEMINAR. **Line input AC to DC conversion and input filter capacitor selection**. Sem-1000, p. I1-1 to I1-6, 1994.
- [62] VAN DER BROECK, H., SAÜERLANDER, G., WENDT, M. **Power driver topologies and control schemes for LEDs**. Applied Power Electronics Conference, p. 1319-1325, 2007.
- [63] WUCHINICH, D. **Flasher circuit with low power drain**. Patente. US 4068149, 28 out. 1975, 10 jan. 1978.

- [64] WUCHINICH, D. **White-LED driver operates down to 1.2v supply voltage.** Modal Mechanics, Yonkers, NY, 2007. Disponível em: < <http://www.edn.com/index.asp?layout=article&articleid=CA6470830> >. Acesso em: 25 set. 2008.
- [65] ZORPETTE, G. **Let there be light**, Spectrum, IEEE, Vol. 39, Issue: 9, p. 70-74, 2002.



## APÊNDICE A – Publicações Oriundas do Tema da Dissertação

### PUBLICAÇÕES ORIUNDAS DO TEMA DA DISSERTAÇÃO

#### Trabalhos Publicados e Apresentados em Eventos Internacionais

- [1] PINTO, R. A.; COSETIN, M. R.; MARCHESAN, T. B.; CAMPOS, A.; PRADO, R. N. do. **Compact lamp using high-brightness LEDs.** In: Conference Records of Industry Applications Society Annual Meeting, IAS, Canadá, 2008.
- [2] PINTO, R. A.; COSETIN, M. R.; MARCHESAN, T. B.; CAMPOS, A.; PRADO, R. N. do. **LED lamp for residential lighting.** In: Conferência Internacional em Aplicações Industriais, INDUSCON, Poços de Caldas, MG, 2008.
- [3] PINTO, R. A.; COSETIN, M. R.; CAMPOS, A.; PRADO, R. N. do. **Emergency lighting system integrated into a compact lamp using power LEDs.** In: Conferência Internacional em Aplicações Industriais, INDUSCON, Poços de Caldas, MG, 2008.

#### Trabalhos Publicados e Apresentados em Evento Nacional

- [4] PINTO, R. A.; COSETIN, M. R.; MARCHESAN, T. B.; CAMPOS, A.; PRADO, R. N. do. **Lâmpada compacta empregando LEDs de alto-brilho.** In: Congresso Brasileiro de Automática, CBA, Juíz de Fora, MG, 2008.
- [5] PINTO, R. A.; COSETIN, M. R.; CAMPOS, A.; PRADO, R. N. do. **Sistema de iluminação de emergência integrado a uma lâmpada compacta utilizando LEDs de potência** In: Congresso Brasileiro de Automática, CBA, Juíz de Fora, MG, 2008.

#### Matéria Publicada em Revista

- [6] Contribuição na elaboração da matéria **“Lâmpadas: a busca pela tecnologia ideal”** realizada pela jornalista Tatiane Lopes de Souza e publicada na revista **CREA – Conselho em Revista**, Edição n. 46, 2008, do Conselho Regional de Engenharia e Arquitetura do Rio Grande do Sul, CREA-RS. Disponível em: <<http://www.crea-rs.org.br/crea/pags/revista/46/>>. Acesso em: 29 set. 2008.

### Artigo Aceito para Publicação

- [7] PINTO, R. A.; COSETIN, M. R.; MARCHESAN, T. B.; CAMPOS, A.; PRADO, R. N. do. **Compact lamp using high-brightness LEDs**. In: IEEE 39<sup>o</sup> Power Electronics Specialists Conference, PESC, Grécia, 2008.
- [8] PINTO, R. A.; COSETIN, M. R.; MARCHESAN, T. B.; CAMPOS, A.; PRADO, R. N. do. **Residential lighting with compact LED lamp**. In: 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON, EUA, 2008.

### Artigos Enviados para Publicação em Revista

- [9] PINTO, R. A.; COSETIN, M. R.; MARCHESAN, T. B.; CAMPOS, A.; PRADO, R. N. do. **Lâmpada compacta empregando LEDs**. In: Revista Eletrônica de Potência da SOBRAEP, 2008.

### Premiação

- [10] Trabalho Destaque da Sessão S25 – Eng. Elétrica.  
Premiação concedida pelo trabalho **“Lâmpada Compacta Empregando LEDs de Iluminação”** apresentado no XXII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia.

## **ANEXOS**

### **FOLHA DE ESPECIFICAÇÃO**

---

## Universal High Brightness LED Driver

### Features

- ▶ >90% Efficiency
- ▶ 8V to 450V input range
- ▶ Constant-current LED driver
- ▶ Applications from a few mA to more than 1A Output
- ▶ LED string from one to hundreds of diodes
- ▶ PWM Low-Frequency Dimming via Enable pin
- ▶ Input Voltage Surge ratings up to 450V

### Applications

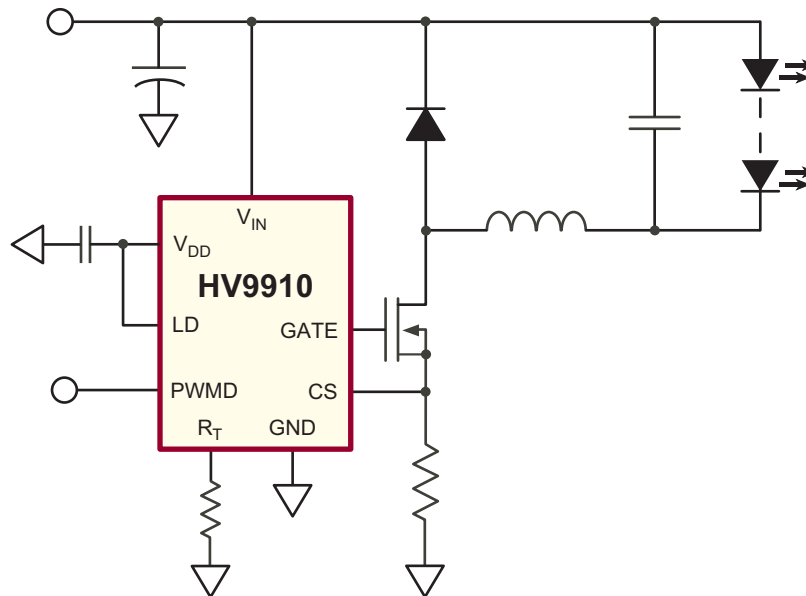
- ▶ DC/DC or AC/DC LED Driver applications
- ▶ RGB Backlighting LED Driver
- ▶ Back Lighting of Flat Panel Displays
- ▶ General purpose constant current source
- ▶ Signage and Decorative LED Lighting
- ▶ Automotive
- ▶ Chargers

### General Description

The HV9910 is a PWM high-efficiency LED driver control IC. It allows efficient operation of High Brightness (HB) LEDs from voltage sources ranging from 8VDC up to 450VDC. The HV9910 controls an external MOSFET at fixed switching frequency up to 300kHz. The frequency can be programmed using a single resistor. The LED string is driven at constant current rather than constant voltage, thus providing constant light output and enhanced reliability. The output current can be programmed between a few milliamps and up to more than 1.0A.

The HV9910 uses a rugged high voltage junction isolated process that can withstand an input voltage surge of up to 450V. Output current to an LED string can be programmed to any value between zero and its maximum value by applying an external control voltage at the linear dimming control input of the HV9910. The HV9910 provides a low-frequency PWM dimming input that can accept an external control signal with a duty ratio of 0-100% and a frequency of up to a few kilohertz.

### Typical Application



# IRS254(0,1)(S)PbF

## LED BUCK REGULATOR CONTROL IC

### Description

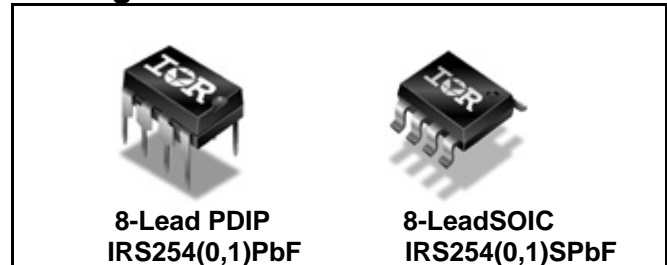
The IRS254(0,1) are high voltage, high frequency buck control ICs for constant LED current regulation. They incorporate a continuous mode time-delayed hysteretic buck regulator to directly control the average load current, using an accurate on-chip bandgap voltage reference.

The application is inherently protected against short circuit conditions, with the ability to easily add open-circuit protection. An external high-side bootstrap circuit drives the buck switching element at high frequencies. A low-side driver is also provided for synchronous rectifier designs. All functions are realized within a simple 8 pin DIP or SOIC package.

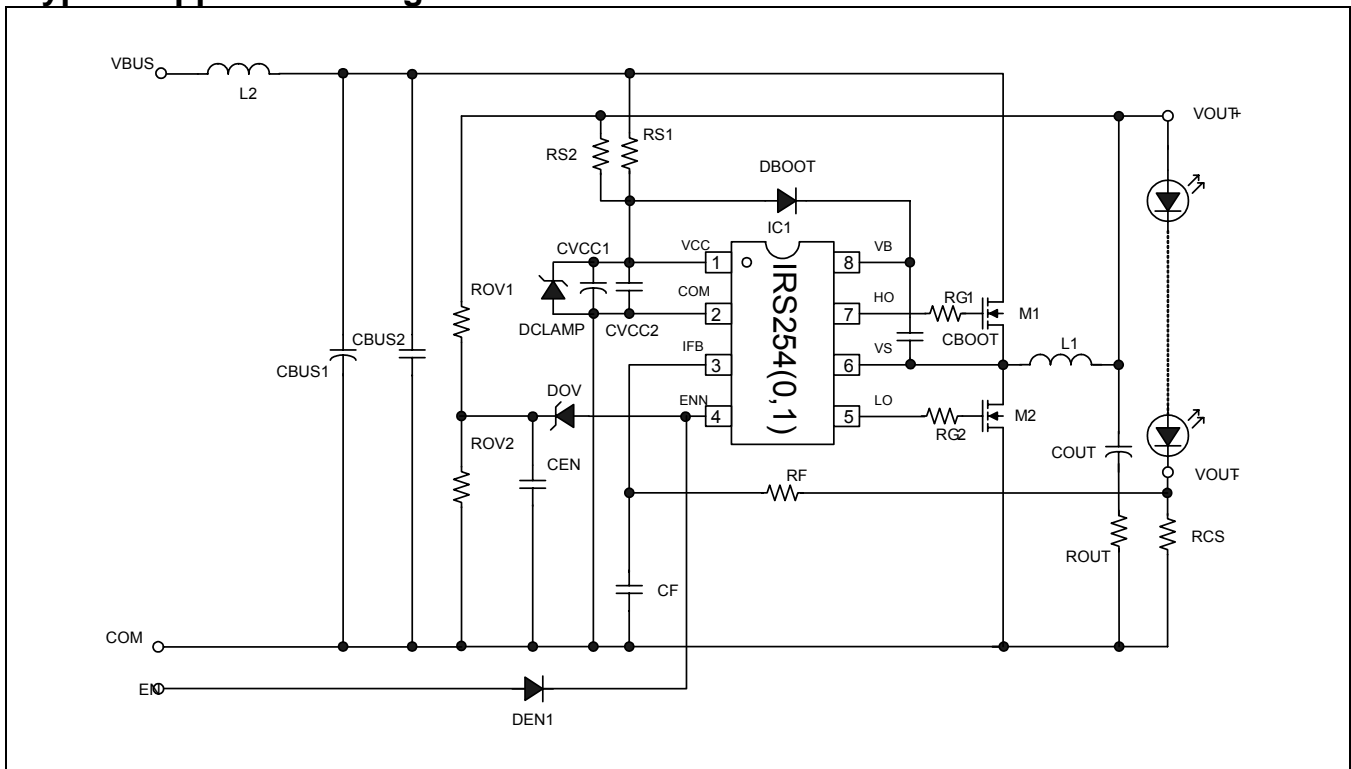
### Features

- 200 V (IRS2540) and 600 V (IRS2541) half bridge driver
- Micropower startup (<500  $\mu$ A)
- $\pm 2\%$  voltage reference
- 140 ns deadtime
- 15.6 V zener clamp on  $V_{CC}$
- Frequency up to 500 kHz
- Auto restart, non-latched shutdown
- PWM dimmable
- Small 8-Lead DIP/8-Lead SOIC packages

### Packages



### Typical Application Diagram



# NCP1200

## PWM Current-Mode Controller for Low-Power Universal Off-Line Supplies

Housed in SOIC-8 or PDIP-8 package, the NCP1200 represents a major leap toward ultra-compact Switchmode Power Supplies. Due to a novel concept, the circuit allows the implementation of a complete offline battery charger or a standby SMPS with few external components. Furthermore, an integrated output short-circuit protection lets the designer build an extremely low-cost AC-DC wall adapter associated with a simplified feedback scheme.

With an internal structure operating at a fixed 40 kHz, 60 kHz or 100 kHz, the controller drives low gate-charge switching devices like an IGBT or a MOSFET thus requiring a very small operating power. Due to current-mode control, the NCP1200 drastically simplifies the design of reliable and cheap offline converters with extremely low acoustic generation and inherent pulse-by-pulse control.

When the current setpoint falls below a given value, e.g. the output power demand diminishes, the IC automatically enters the skip cycle mode and provides excellent efficiency at light loads. Because this occurs at low peak current, no acoustic noise takes place.

Finally, the IC is self-supplied from the DC rail, eliminating the need of an auxiliary winding. This feature ensures operation in presence of low output voltage or shorts.

### Features

- No Auxiliary Winding Operation
- Internal Output Short-Circuit Protection
- Extremely Low No-Load Standby Power
- Current-Mode with Skip-Cycle Capability
- Internal Leading Edge Blanking
- 250 mA Peak Current Source/Sink Capability
- Internally Fixed Frequency at 40 kHz, 60 kHz and 100 kHz
- Direct Optocoupler Connection
- Built-in Frequency Jittering for Lower EMI
- SPICE Models Available for TRANSient and AC Analysis
- Internal Temperature Shutdown
- Pb-Free Packages are Available

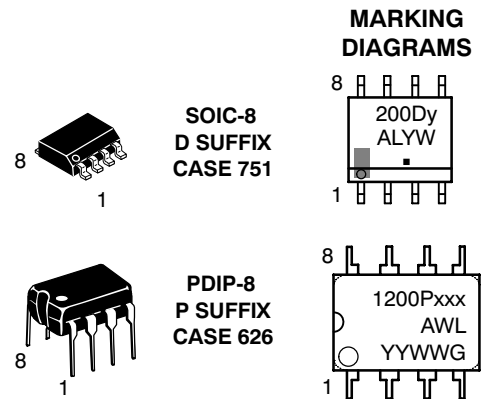
### Typical Applications

- AC-DC Adapters
- Offline Battery Chargers
- Auxiliary/Ancillary Power Supplies (USB, Appliances, TVs, etc.)



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

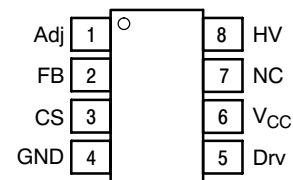


SOIC-8  
D SUFFIX  
CASE 751

PDIP-8  
P SUFFIX  
CASE 626

xxx = Device Code: 40, 60 or 100  
y = Device Code:  
4 for 40  
6 for 60  
1 for 100  
A = Assembly Location  
L = Wafer Lot  
Y, YY = Year  
W, WW = Work Week  
G, ■ = Pb-Free Package

### PIN CONNECTIONS



(Top View)

### ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 14 of this data sheet.

# NCP1010, NCP1011, NCP1012, NCP1013, NCP1014

## Self-Supplied Monolithic Switcher for Low Standby- Power Offline SMPS

The NCP101X series integrates a fixed-frequency current-mode controller and a 700 V MOSFET. Housed in a PDIP-7, PDIP-7 Gull Wing, or SOT-223 package, the NCP101X offers everything needed to build a rugged and low-cost power supply, including soft-start, frequency jittering, short-circuit protection, skip-cycle, a maximum peak current setpoint and a Dynamic Self-Supply (no need for an auxiliary winding).

Unlike other monolithic solutions, the NCP101X is quiet by nature: during nominal load operation, the part switches at one of the available frequencies (65 – 100 – 130 kHz). When the current setpoint falls below a given value, e.g. the output power demand diminishes, the IC automatically enters the so-called skip-cycle mode and provides excellent efficiency at light loads. Because this occurs at typically 1/4 of the maximum peak value, no acoustic noise takes place. As a result, standby power is reduced to the minimum without acoustic noise generation.

Short-circuit detection takes place when the feedback signal fades away, e.g. in true short-circuit conditions or in broken Optocoupler cases. External disabling is easily done either simply by pulling the feedback pin down or latching it to ground through an inexpensive SCR for complete latched-off. Finally soft-start and frequency jittering further ease the designer task to quickly develop low-cost and robust offline power supplies.

For improved standby performance, the connection of an auxiliary winding stops the DSS operation and helps to consume less than 100 mW at high line. In this mode, a built-in latched overvoltage protection prevents from lethal voltage runaways in case the Optocoupler would brake. These devices are available in economical 8-pin dual-in-line and 4-pin SOT-223 packages.

### Features

- Built-in 700 V MOSFET with Typical  $R_{DSon}$  of 11  $\Omega$  and 22  $\Omega$
- Large Creepage Distance Between High-Voltage Pins
- Current-Mode Fixed Frequency Operation:  
65 kHz – 100 kHz – 130 kHz
- Skip-Cycle Operation at Low Peak Currents Only:  
No Acoustic Noise!
- Dynamic Self-Supply, No Need for an Auxiliary Winding
- Internal 1.0 ms Soft-Start
- Latched Overvoltage Protection with Auxiliary Winding Operation
- Frequency Jittering for Better EMI Signature

- Auto-Recovery Internal Output Short-Circuit Protection
- Below 100 mW Standby Power if Auxiliary Winding is Used
- Internal Temperature Shutdown
- Direct Optocoupler Connection
- SPICE Models Available for TRANsient Analysis
- Pb-Free Packages are Available

### Typical Applications

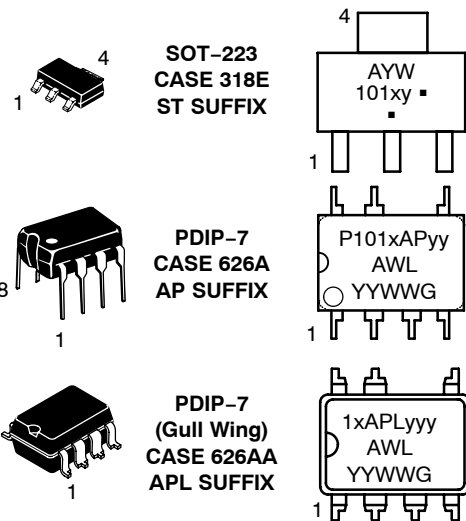
- Low Power AC/DC Adapters for Chargers
- Auxiliary Power Supplies (USB, Appliances, TVs, etc.)



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

### MARKING DIAGRAMS



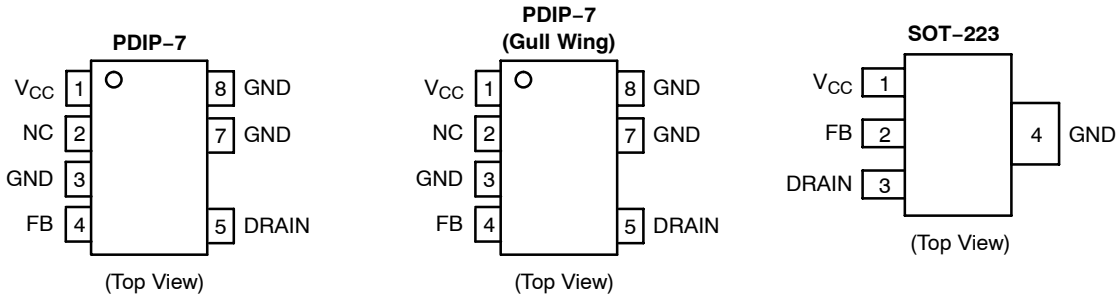
- x = Current Limit (0, 1, 2, 3, 4)
  - y = Oscillator Frequency  
A (65 kHz), B (100 kHz), C (130 kHz)
  - yy = 06 (65 kHz), 10 (100 kHz), 13 (130 kHz)
  - yyy = 065, 100, 130
  - A = Assembly Location
  - WL, L = Wafer Lot
  - YY, Y = Year
  - WW, W = Work Week
  - or G = Pb-Free Package
- (Note: Microdot may be in either location)

### ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 21 of this data sheet.

# NCP1010, NCP1011, NCP1012, NCP1013, NCP1014

## PIN CONNECTIONS



### Indicative Maximum Output Power from NCP1014

R <sub>DSon</sub> - I <sub>p</sub>	230 Vac	100 - 250 Vac
11 Ω - 450 mA DSS	14 W	6.0 W
11 Ω - 450 mA Auxiliary Winding	19 W	8.0 W

1. Informative values only, with: T<sub>amb</sub> = 50°C, F<sub>switching</sub> = 65 kHz, circuit mounted on minimum copper area as recommended.

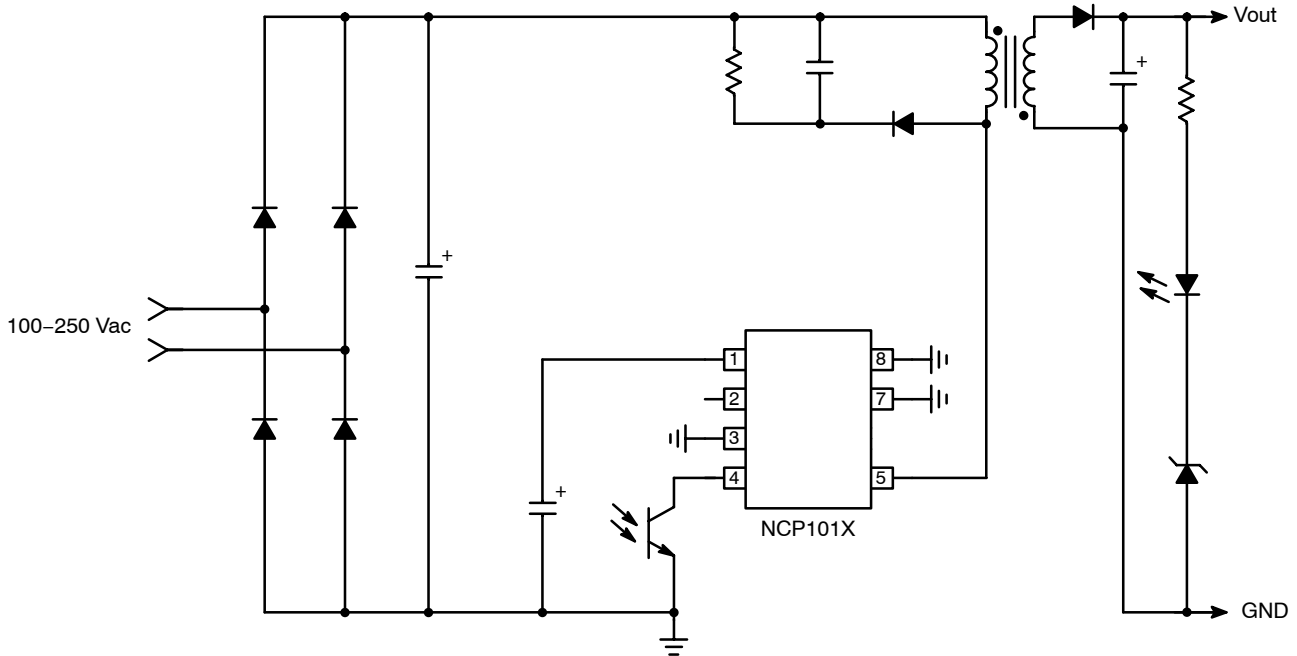


Figure 1. Typical Application Example

### Quick Selection Table

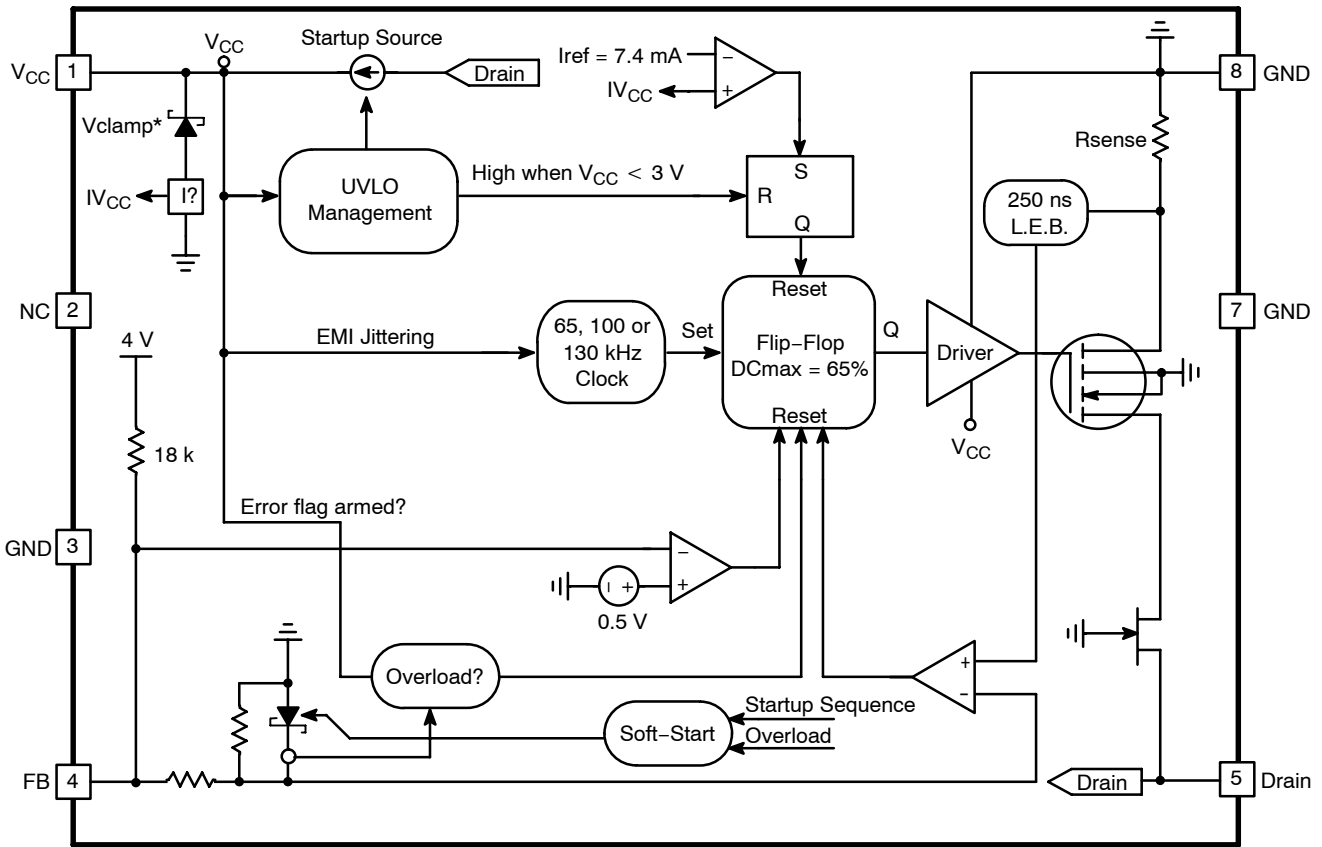
	NCP1010			NCP1011			NCP1012			NCP1013			NCP1014	
R <sub>DSon</sub> [Ω]	22						11							
I <sub>peak</sub> [mA]	100			250			250			350			450	
Freq [kHz]	65	100	130	65	100	130	65	100	130	65	100	130	65	100



# NCP1010, NCP1011, NCP1012, NCP1013, NCP1014

## PIN FUNCTION DESCRIPTION

Pin No. (SOT-223)	Pin No. (PDIP-7, PDIP-7/Gull Wing)	Pin Name	Function	Description
1	1	V <sub>CC</sub>	Powers the Internal Circuitry	This pin is connected to an external capacitor of typically 10 μF. The natural ripple superimposed on the V <sub>CC</sub> participates to the frequency jittering. For improved standby performance, an auxiliary V <sub>CC</sub> can be connected to Pin 1. The V <sub>CC</sub> also includes an active shunt which serves as an opto fail-safe protection.
-	2	NC	-	-
-	3	GND	The IC Ground	-
2	4	FB	Feedback Signal Input	By connecting an optocoupler to this pin, the peak current setpoint is adjusted accordingly to the output power demand.
3	5	Drain	Drain Connection	The internal drain MOSFET connection.
-	-	-	-	-
-	7	GND	The IC Ground	-
4	8	GND	The IC Ground	-



\*V<sub>clamp</sub> = V<sub>CCOFF</sub> + 200 mV (8.7 V Typical)

**Figure 2. Simplified Internal Circuit Architecture**

# NCP1015

## Self-Supplied Monolithic Switcher for Low Standby-Power Offline SMPS

The NCP1015 integrates a fixed-frequency current-mode controller and a 700 V voltage MOSFET. Housed in a PDIP-7 or SOT-223 package, the NCP1015 offers everything needed to build a rugged and low-cost power supply, including soft-start, frequency jittering, short-circuit protection, skip-cycle, a maximum peak current set-point and a Dynamic Self-Supply (no need for an auxiliary winding).

Unlike other monolithic solutions, the NCP1015 is quiet by nature: during nominal load operation, the part switches at one of the available frequencies (65–100 kHz). When the current set-point falls below a given value, e.g. the output power demand diminishes, the IC automatically enters the so-called skip cycle mode and provides excellent efficiency at light loads. Because this occurs at typically 0.25 of the maximum peak value, no acoustic noise takes place. As a result, standby power is reduced to the minimum without acoustic noise generation.

Short-circuit detection takes place when the feedback signal fades away e.g. un-true short-circuit or is broken optocoupler cases. Finally soft-start and frequency jittering further ease the designer task to quickly develop low-cost and robust offline power supplies.

For improved standby performance, the connection of an auxiliary winding stops the DSS operation and helps to consume less than 100 mW at high line.

### Features

- Built-in 700 V MOSFET with typical  $R_{DS(on)}$  of 11  $\Omega$
- Large Creepage Distance between High-voltage Pins
- Current-mode Fixed Frequency Operation: 65 kHz - 100 kHz
- Skip-cycle Operation at Low Peak Currents Only: No Acoustic Noise!
- Dynamic Self-Supply, No Need for an Auxiliary Winding
- Internal 1 ms Soft-start
- Auto-recovery Internal Output Short-circuit Protection
- Frequency Jittering for Better EMI Signature
- Below 100 mW Standby Power if Auxiliary Winding is Used
- Internal Temperature Shutdown
- Direct Optocoupler Connection
- SPICE Models Available for TRANSient and AC Analysis
- This is a Pb-Free Device

### Typical Applications

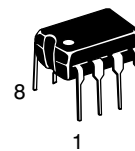
- Low Power ac-dc Adapters for Chargers
- Auxiliary Power Supplies (USB, Appliances, TVs, etc.)



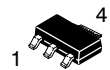
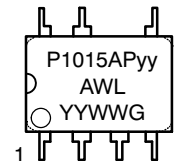
ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

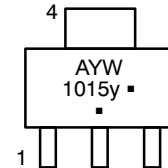
### MARKING DIAGRAMS



PDIP-7  
CASE 626A  
AP SUFFIX



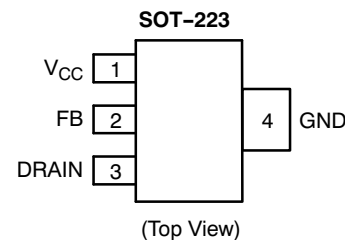
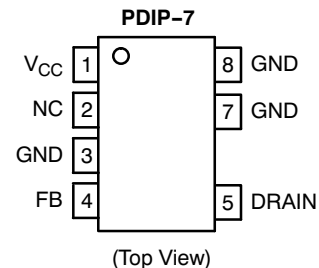
SOT-223  
CASE 318E  
ST SUFFIX



yy = 06 (65 kHz), 10 (100 kHz)  
y = A (65 kHz), B (100 kHz)  
A = Assembly Location  
WL = Wafer Lot  
YY = Year  
WW = Work Week  
G or ■ = Pb-Free Package

(Note: Microdot may be in either location)

### PIN CONNECTIONS



### ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 20 of this data sheet.