

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Mestrado em Engenharia Elétrica

MARCELO PASCHOAL DIAS

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE UM PRÉ-REGULADOR BOOST DE  
BAIXA FREQUÊNCIA NO ACIONAMENTO DE LEDS DE  
ILUMINAÇÃO**

Juiz de Fora

2012

MARCELO PASCHOAL DIAS

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE UM PRÉ-REGULADOR BOOST DE  
BAIXA FREQUÊNCIA NO ACIONAMENTO DE LEDS DE  
ILUMINAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, área de concentração: Sistemas Eletrônicos (Eletrônica de Potência), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Henrique Antônio Carvalho Braga, Dr.Eng.

Juiz de Fora

2012

Dias, Marcelo Paschoal.

Avaliação do emprego de um pré-regulador boost de baixa frequência no acionamento de leds de iluminação / Marcelo Paschoal Dias. – 2012.

94 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

1. Energia elétrica. 2. Economia. 3. Diodos. I. Título.

CDU 620.9

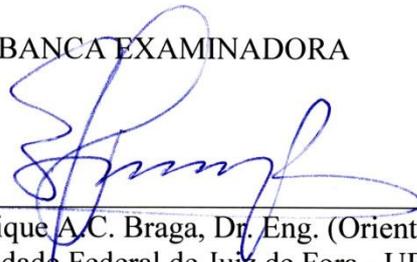
Marcelo Paschoal Dias

**Avaliação do Emprego de um Pré-Regulador Boost de Baixa Frequência no  
Acionamento de LEDs de Iluminação**

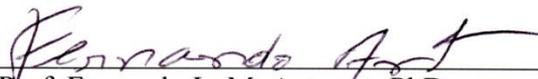
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Sistemas Eletrônicos, da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Aprovada em 29 de agosto de 2012.

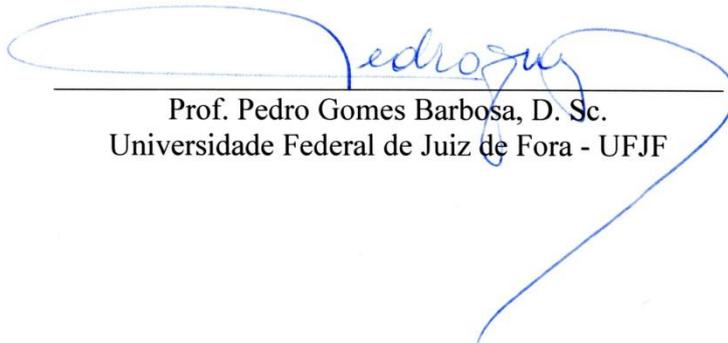
BANCA EXAMINADORA



Prof. Henrique A.C. Braga, Dr. Eng. (Orientador)  
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF



Prof. Fernando L. M. Antunes, PhD  
Universidade Federal do Ceará - UFC



Prof. Pedro Gomes Barbosa, D. Sc.  
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais pelo apoio, carinho, amor, compreensão e paciência. A minha noiva Tânia, companheira nos momentos de alegria e tristeza, sempre me apoiando a alcançar meus objetivos. Aos companheiros do LEENER e do NIMO pela ajuda nas horas de dúvidas e dificuldades na realização deste trabalho.

Agradeço também ao Prof. Henrique A. C. Braga, pela ajuda e apoio no desenvolvimento deste trabalho e pela disponibilidade de me atender até nos momentos mais incômodos.

## RESUMO

Esta dissertação tem como foco principal a avaliação do emprego de um conversor de baixo custo, operando em baixa frequência, para o acionamento de diodos emissores de luz (LEDs) usados em luminárias de baixa potência. A proposta considera inicialmente um conversor CA-CC conhecido como pré-regulador *boost* de alto fator de potência operando em baixa frequência, ou seja, um único acionamento liga-desliga para cada semiciclo da rede elétrica. Um protótipo experimental com potência de saída de 11 W foi implementado e comprova a possibilidade de emprego do conversor pretendido. Neste caso, foi observada por meio de avaliação fotométrica uma redução de 11% na eficácia luminosa do conjunto luminoso, em comparação com operação CC ideal, algo que se atribui à natureza descontínua da corrente nos LEDs. O pré-regulador apresentou um fator de potência de 0,97 e uma eficiência de 59%, em especial devido ao uso de um transformador abaixador de baixa frequência sobredimensionado. Pelo fato de impor à lâmpada uma corrente descontínua, o conversor proposto não emprega capacitores eletrolíticos, característica que contribui para uma elevada vida útil do circuito de acionamento. Um circuito similar, orientado à iluminação pública e que dispensa o uso de transformadores abaixadores, também é avaliado com apoio de simulação computacional. Neste caso, pode ser esperada uma eficiência global muito mais elevada. Outro pré-regulador baseado no mesmo princípio, porém empregando uma topologia tipo *Ćuk*, também é avaliado por meio de simulações, permitindo-se antever uma proposta de baixo custo, acionamento simplificado, elevada eficiência global, elevada eficácia luminosa e elevada vida útil. Finalmente, um estudo complementar desta dissertação considera a influência do posicionamento geométrico dos LEDs para a distribuição luminosa no plano de trabalho. Uma análise matemática e experimental é conduzida neste sentido e contribuiu para a alocação das unidades luminosas ao longo da barra de suporte da luminária de baixa potência implementada.

Palavras-chaves: Diodos emissores de luz, Conversor CA-CC, Pré-regulador *boost* de baixa frequência, Arranjos de LEDs, Eficiência energética.

## ABSTRACT

This work is mainly focused on the evaluation of the use of a low-frequency and low-cost converter intended to drive light emitting diodes employed in low power lighting fixtures. The proposal considers at first a high power factor *boost* pre-regulator converter featuring a low frequency switching of the main power device, which is driven twice each electric mains cycle. An experimental prototype with output power of 11 W is implemented and proves the concept feasibility. In this case, photometry studies show a reduction of 11% in the LEDs luminous efficacy, as compared to an ideal DC operation, which is due to the discontinuous nature of the output current. The *boost* pre-regulator presented a power factor of 0.97 and a global efficiency of 59%, something that can be imputed to the use of an underrated low frequency transformer. Despite some disadvantages, the discontinuous nature of LEDs current allows the converter to avoid using electrolytic capacitors, what confers an extended lifetime to the proposed driver. A similar circuit, which does not need transformers at all and is devised to be employed in street lighting, is also evaluated by means of numerical simulation. Moreover, another low frequency pre-regulator based on the Ćuk converter is evaluated with the aid of computer simulation, and the results show that it could be attained in practice a high global efficiency, high luminous efficacy and extended driver lifetime. Finally, a complementary study accomplished during this dissertation evaluates the influence of the geometric positioning of the LEDs for the luminous distribution over a given plane to be lit. Mathematical and experimental analysis have been developed contributing for the right allocation of lighting unities along the heatsink bar which bears the lighting fixture prototype.

Keywords: Light-emitting diodes, Converter CA-CC, Low-frequency *boost* pre-regulator, Arrangement of LEDs, Energy Efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do Fluxo Luminoso (AVANT, 2012).....	5
Figura 2 - Representação da Iluminância (AVANT, 2012).....	5
Figura 3 - Temperatura de cor de diferentes lâmpadas. ....	7
Figura 4 - Representação do comportamento físico de um LED. ....	9
Figura 5 - (a) LED indicador, (b) LED de alto brilho e (c) LED de potência. ....	10
Figura 6 - Luminária com painéis de OLED. ....	11
Figura 7 - Evolução da eficácia luminosa: LEDs vs. fontes de luz branca convencionais. ....	12
Figura 8 - Obtenção da luz branca através do LED azul com camada de fósforo amarelo (GORDON, 2007). ....	14
Figura 9 - LED ultravioleta recoberto por uma camada de fósforo RGB (GORDON, 2007)..	15
Figura 10 - Formação da luz branca através da combinação RGB (GORDON, 2007).....	16
Figura 11 - Estrutura do LED de potência.....	17
Figura 12 - Dois LEDs operando com temperaturas da junção diferentes.....	18
Figura 13 - Modelo elétrico do LED .....	20
Figura 14 - Diferentes arranjos de LEDs: (a) linear, (b) circular e (c) quadrangular. ....	22
Figura 15 - Distribuição da iluminação para dois LEDs: (esquerda) distribuição uniforme; (direita) distribuição não uniforme (WHANG et al., 2009). ....	25
Figura 16 - Arranjo circular de LEDs com distribuição luminosa uniforme sobre o painel (WHANG et al., 2009). ....	26
Figura 17 - Arranjo linear de LEDs.....	27
Figura 18 - Arranjo quadrangular de LEDs.....	28
Figura 19 - Lente sobre um arranjo de LEDs. ....	29
Figura 20 - Lente incorporada no próprio encapsulamento do LED (CHEN et al., 2009).....	30
Figura 21 - Módulo de LEDs da luminária HEXALED modelo HEXA LUM BL1 de 35 W. ....	31
Figura 22 - Distribuição da iluminação para o módulo sem a lente sobre os LEDs. ....	31
Figura 23 - Distribuição da iluminação para o módulo com a lente sobre os LEDs. ....	32
Figura 24 - Dois LEDs de alto brilho com separação entre eles igual a $d_{max}$ .....	33
Figura 25 - Dois LEDs de alto brilho com separação entre eles maior que $d_{max}$ .....	33
Figura 26 - Dois LEDs de potência com separação entre eles igual a $d_{max}$ . ....	33
Figura 27 - Dois LEDs de potência com separação entre eles maior que $d_{max}$ .....	33
Figura 28 - Conversor CA-CC tipo <i>boost</i> .....	37

Figura 29 – (a) Tensão de entrada (vermelho), corrente de entrada (azul) e sinal de disparo da chave (verde). (b) corrente na saída.....	37
Figura 30 - Circuito da 1ª etapa de operação.....	38
Figura 31 - Circuito da 2ª etapa de operação.....	39
Figura 32 - Formas de onda normalizadas da corrente no LED em função de $q$ . ....	43
Figura 33 - Formas de onda da corrente de entrada para diferentes valores de $T_{on}$ e $L$ .....	44
Figura 34 - Circuito do conversor simulado no PSIM.....	45
Figura 35 - Resultado da simulação do conversor. Tensão (vermelho) e corrente (azul, x30) na entrada; tensão (verde) e corrente (laranja, x30) na saída. ....	46
Figura 36 - Fluxo luminoso de uma luminária LED e de uma luminária com lâmpada convencional.....	48
Figura 37 - Comportamento de $T_f$ para diferentes $T_{on}$ . ....	50
Figura 38 - Corrente média na saída em função da variação de $\tau$ e $T_{on}$ . ....	51
Figura 39 - Layout da distribuição linear dos LEDs. ....	53
Figura 40 - LEDs montados sobre a barra de alumínio.....	53
Figura 41 - Distribuição do fluxo luminoso do conjunto linear de LEDs. ....	53
Figura 42 - Circuito de disparo do MOSFET.....	54
Figura 43 - Senoide de entrada (vermelho), sinal na saída do comparador (azul) e sinal na saída do CI555.....	55
Figura 44 - Lâminas EI padronizadas.....	56
Figura 45 - Núcleo formado por lâminas de ferro-silício.....	56
Figura 46 - Indutor projetado para o Conversor CA-CC.....	60
Figura 47 - Circuito do conversor CA-CC tipo <i>boost</i> construído em laboratório. ....	61
Figura 48 - Protótipo do conversor construído em laboratório. ....	61
Figura 49 - Tensão no secundário (azul) e corrente na entrada da ponte retificadora (vermelho). ....	63
Figura 50 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) no conjunto de LEDs.....	63
Figura 51 - Sinal de disparo do MOSFET (azul) e corrente nos LEDs (vermelho). ....	63
Figura 52 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) na entrada do transformador.....	64
Figura 53 - Resultados espectrais obtidos da análise com a esfera integradora. (a) Imposição de corrente CC ideal; (b) Corrente pulsada (pré-regulador <i>boost</i> de baixa frequência).....	65
Figura 54 - Espectros do arranjo de LEDs para duas situações diferentes de acionamento.....	66
Figura 55 - Conjunto de LEDs iluminando uma mesa de leitura. ....	66

Figura 56 - Circuito do pré-regulador <i>boost</i> de baixa frequência para iluminação pública. ....	69
Figura 57 - Simulação do pré-regulador CA-CC <i>boost</i> para iluminação pública. Tensão (vermelho) e corrente (azul, x150) de entrada; Corrente nos LEDs (verde). .....	69
Figura 58 - Pré-regulador <i>Ćuk</i> de baixa frequência com circuito de acionamento de LEDs. ..	70
Figura 59 - Simulação conversor <i>Ćuk</i> . Tensão (vermelho) e corrente (azul, x200) de entrada; Corrente nos LEDs (verde).....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Índice de reprodução de cor para diferentes fontes de luz. ....	6
Tabela 2 - LEDs de alto brilho modelo LUW503F43. ....	32
Tabela 3 - LEDs de potência: Everlight modelo EHP-AX08EL/GT01H-P01. ....	32
Tabela 4 - Valores obtidos por simulação e equacionamento teórico. ....	46
Tabela 5 - Parâmetros do LED Everlight EHP-AX08EL 3W. ....	50
Tabela 6 - Parâmetros da luminária LED. ....	52
Tabela 7 - Parâmetros para o espaçamento dos LEDs. ....	53
Tabela 8 - Parâmetros do projeto do indutor. ....	59
Tabela 9 - Principais componentes utilizados na construção da luminária. ....	60
Tabela 10 - Parâmetros medidos no protótipo da luminária LED. ....	64

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1 DIODOS EMISSORES DE LUZ E CONCEITOS LUMINOTÉCNICOS .....</b>	<b>3</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	3
1.2 ALGUNS CONCEITOS DE ILUMINAÇÃO.....	4
1.2.1 FLUXO LUMINOSO .....	4
1.2.2 ILUMINÂNCIA .....	5
1.2.3 EFICÁCIA LUMINOSA .....	6
1.2.4 ÍNDICE DE REPRODUÇÃO DE COR (IRC).....	6
1.2.5 TEMPERATURA DE COR .....	7
1.3 LEDS NA ILUMINAÇÃO .....	8
1.3.1 DIODOS EMISSORES DE LUZ .....	8
1.3.2 DIODO ORGÂNICO EMISSOR DE LUZ .....	10
1.3.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	11
1.4 FORMAS DE OBTENÇÃO DA LUZ BRANCA NOS LEDS.....	13
1.4.1 LED AZUL COM CAMADA DE FÓSFORO AMARELO .....	14
1.4.2 LED ULTRAVIOLETA COM FÓSFORO RGB (RED, GREEN E BLUE).....	14
1.4.3 COMBINAÇÃO DE LEDS DE DIFERENTES CORES.....	15
1.5 OS LEDS DE POTÊNCIA .....	16
1.5.1 MODELO ELÉTRICO DOS LEDS .....	18
1.6 CONCLUSÕES PARCIAIS .....	20
<b>CAPÍTULO 2 AVALIAÇÃO DA GEOMETRIA DE ARRANJO DE LEDS PARA A EFICIÊNCIA DA ILUMINAÇÃO .....</b>	<b>21</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	21
2.2 GEOMETRIAS DE ARRANJO DE LEDS.....	22

2.3 MODELO ÓPTICO DO LED .....	22
2.4 ARRANJO LINEAR COM DOIS LEDS .....	24
2.5 ARRANJO CIRCULAR DE LEDS .....	25
2.6 ARRANJO LINEAR DE LEDS .....	26
2.7 ARRANJO QUADRANGULAR DE LEDS .....	27
2.8 LENTES COLIMADORAS EM LUMINÁRIAS DE LEDS .....	28
2.9 EXPERIMENTOS COM LENTES COLIMADORAS E ARRANJOS DE LEDS .....	30
2.10 CONCLUSÕES PARCIAIS .....	34
<b>CAPÍTULO 3    CONVERSOR CA-CC TIPO BOOST OPERANDO EM BAIXA FREQUÊNCIA . .....</b>	<b>35</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	35
3.2 CONVERSOR CA-CC DE BAIXA FREQUÊNCIA.....	36
3.3 MODELAGEM DO CONVERSOR CA-CC DE BAIXA FREQUÊNCIA.....	38
3.3.1 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA (FP), DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE CORRENTE E RENDIMENTO DO CONVERSOR .....	41
3.3.2 NORMALIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DA CORRENTE DE SAÍDA .....	43
3.3.3 COMPORTAMENTO DA FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE ENTRADA	44
3.4 SIMULAÇÃO.....	45
3.5 CONCLUSÕES PARCIAIS .....	46
<b>CAPÍTULO 4    PROJETO DA LUMINÁRIA LED DE MESA DE 11 W DE BAIXO CUSTO .....</b>	<b>48</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	48
4.2 METODOLOGIA DE PROJETO .....	49
4.3 ARRANJO DE LEDS PARA A LUMINÁRIA DE MESA.....	52
4.4 CIRCUITO DE DISPARO DO MOSFET.....	54
4.5 PROJETO DO INDUTOR BOOST .....	55
4.5.1 METODOLOGIA DO PROJETO DO INDUTOR .....	57

4.5.2 INDUTOR PARA O CONVERSOR CA-CC .....	59
4.6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	60
4.7 DESEMPENHO FOTOMÉTRICO .....	64
4.8 CONCLUSÕES PARCIAIS .....	67
<b>CAPÍTULO 5 ALTERNATIVAS DE CIRCUITOS DE ACIONAMENTO EM BAIXA FREQUÊNCIA ORIENTADO A ILUMINAÇÃO PÚBLICA.....</b>	<b>68</b>
5.1 INTRODUÇÃO .....	68
5.2 AVALIAÇÃO DO EMPREGO DO PRÉ-REGULADOR <i>BOOST</i> COMUTADO EM BAIXA FREQUÊNCIA SEM A UTILIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR.....	68
5.3 AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE UM CONVERSOR <i>ĆUK</i> COMUTADO EM BAIXA FREQUÊNCIA PARA ALIMENTAR LEDS DE POTÊNCIA. ....	70
5.4 CONCLUSÕES PARCIAIS .....	71
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE A PUBLICAÇÕES ORIUNDAS DO TEMA DA DISSERTAÇÃO .....</b>	<b>80</b>

## INTRODUÇÃO

A proposta deste trabalho surgiu do interesse em pesquisar sobre a utilização dos LEDs na iluminação em geral.

A motivação principal desta pesquisa foi desenvolver uma luminária de mesa, que utilizasse diodos emissores de luz em substituição às lâmpadas convencionais, demonstrando, assim, que com uma luminária LED é possível obter uma iluminação de qualidade com um menor gasto de energia.

Sendo assim, o Capítulo 1 traz um breve histórico da iluminação; apresenta alguns conceitos básicos que são importantes para compreender as características de cada tipo de fonte de luz; e traz uma abordagem conceitual geral sobre os LEDs, onde serão apresentados suas principais características, a forma como ele funciona e os principais modelos de LEDs existentes no mercado.

Hoje há uma grande variedade de luminárias LEDs no mercado, no entanto é preciso garantir que elas forneçam uma iluminação de qualidade. Logo, o Capítulo 2 explicita as diferentes formas de arranjos dos LEDs, sendo elas: linear, quadrangular e circular. E em cada tipo de arranjo é mostrado como dever ser feito o espaçamento entre os LEDs para que a iluminação do conjunto seja uniforme no local onde será aplicado, evitando assim o aparecimento de “zebramento”.

O Capítulo 3 apresenta as principais características dos circuitos de acionamento utilizados para LEDs. Propõe a utilização de um conversor CA-CC tipo *boost* de baixa frequência que não utiliza capacitores eletrolíticos para alimentar um conjunto de LEDs. Eliminando este componente é possível elevar a vida útil do circuito. Para tanto, são exibidas as características do conversor, a forma como ele funciona e o equacionamento matemático de cada etapa de operação do circuito.

No Capítulo 4 serão expostas as etapas do projeto de construção da luminária com LEDs. Serão apresentadas as características, a potência e o arranjo de LEDs adotado para a estruturação da luminária. Neste capítulo também foram determinados os parâmetros do conversor e os resultados experimentais obtidos com o protótipo.

No Capítulo 5 serão exibidos dois circuitos alternativos para acionamento de LEDs em iluminação pública, são eles o conversor CA-CC de baixa frequência e o conversor *Ćuk*. O fato de se trabalhar com potências mais elevadas na iluminação pública faz com que a tensão

total sobre o conjunto de LEDs seja próxima à tensão da rede. Desta forma é possível eliminar a utilização do transformador abaixador, como ocorre no caso da luminária desenvolvida neste trabalho.

Atualmente, estudos relativos às aplicações deste tipo de tecnologia mostram que os LEDs são mais eficientes do que as lâmpadas convencionais e por esse motivo eles vêm ganhando espaço no mercado e sendo empregados cada vez mais na iluminação de ambientes, na iluminação pública e na decoração arquitetônica.

# **CAPÍTULO 1 DIODOS EMISSORES DE LUZ E CONCEITOS LUMINOTÉCNICOS**

## **1.1 INTRODUÇÃO**

A primeira fonte de luz artificial utilizada pelo homem foi o fogo. Após a criação do fogo como fonte de luz, o homem começou a desenvolver novas fontes de luz artificial passando pela vela, pela lâmpada a óleo, pelo lampião com camisa e pela lâmpada incandescente inventada em 1879 por Thomas Alva Edison. Mais tarde, em 1933, foram desenvolvidas as lâmpadas de descarga, como a fluorescente, que apresentava uma eficiência maior que a incandescente e que viria a substituí-la na maioria dos lares. Com o surgimento da iluminação artificial o homem passou a estender seu período de trabalho para a noite, o que antes não era possível devido à falta de luz, provocando mudanças em seu hábito (DA COSTA, 2006).

A lâmpada criada por Edison usava um filamento de carbono que ao ser percorrido pela corrente elétrica se tornava incandescente emitindo assim luz. No entanto, ela apresentava uma eficiência luminosa muito baixa, que foi melhorada quando William David Coolidge trafilou o tungstênio, que apresentava características adequadas para ser utilizado na lâmpada incandescente. Como vantagem, esse tipo de lâmpada apresenta um alto índice de reprodução de cores, reproduzindo de forma fiel as cores dos objetos quando iluminados, além de proporcionar um melhor conforto visual. Esta lâmpada apresenta uma vida útil média em torno de 1.000h, que é muito baixa comparada com as lâmpadas de descarga existentes atualmente. A emissão de luz através do aquecimento de um filamento faz com que 92% da energia consumida da rede elétrica seja convertida em calor e apenas 8% seja convertida em luz visível o que demonstra a baixa eficiência deste tipo de lâmpada principalmente se comparada aos novos modelos de lâmpadas (PINTO, 2008).

O processo de emissão de luz da lâmpada fluorescente difere do processo da lâmpada incandescente. Na lâmpada fluorescente, a radiação ultravioleta é transformada em luz visível através da camada fluorescente presente nas paredes internas do bulbo da lâmpada, não havendo produção de calor excessivo como acontece nas incandescentes. Além da baixa

produção de calor, as fluorescentes apresentam vantagens como uma alta eficiência luminosa e uma vida útil bem superior, em torno de 8.000h a 10.000h (MOREIRA, 1999).

Com o crescente aumento do consumo de energia tem-se buscado o desenvolvimento de novas tecnologias que sejam mais eficientes, objetivando a redução desse consumo. Atualmente, aproximadamente 20% de toda a energia gerada no mundo é consumida na iluminação, o que representa uma parcela importante do gasto com energia (LI et al., 2009; VIEIRA, 2009).

Por apresentar uma tecnologia mais eficiente que a das lâmpadas tradicionais, a iluminação utilizando diodos emissores de luz (LEDs) vem crescendo a cada ano. Estudos evidenciam que se as lâmpadas tradicionais forem substituídas pelos LEDs, o consumo de energia com iluminação poderia reduzir pela metade (DIAS et al., 2009). Outra vantagem dos LEDs é o fato de não utilizarem gases tóxicos em sua composição, como os presentes nas lâmpadas de descarga (fluorescentes), o que faz com que sejam menos agressivos ao meio ambiente. Também apresentam uma vida útil elevada, contribuindo desta forma para a redução dos gastos com manutenção em grande parte das aplicações em que forem empregados (SÁ JUNIOR et al., 2007a).

## **1.2 ALGUNS CONCEITOS DE ILUMINAÇÃO**

Para o melhor entendimento sobre iluminação é necessário compreender alguns conceitos técnicos que são utilizados nos projetos de luminotécnica. Conhecendo bem estes conceitos pode-se analisar melhor o comportamento das fontes de luz artificial e dessa forma saber quais as características apresentadas por cada tipo.

### **1.2.1 FLUXO LUMINOSO**

O fluxo luminoso representa a radiação total emitida por uma fonte de luz em todas as direções. A unidade que representa esta grandeza é o lúmen (lm).

A Figura 1 mostra uma representação do fluxo luminoso de uma lâmpada.

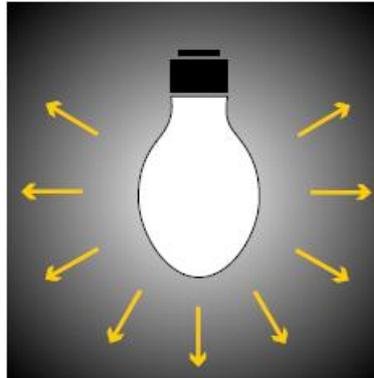


Figura 1- Representação do Fluxo Luminoso (AVANT, 2012).

### 1.2.2 ILUMINÂNCIA

É o fluxo luminoso incidente numa superfície por unidade de área, sendo sua unidade o lux (lx). O lux representa a iluminância de uma superfície plana de um metro quadrado de área, sobre a qual incide perpendicularmente um fluxo luminoso de um lúmen (DA COSTA, 2006). A iluminância também é utilizada para expressar a quantidade de luz necessária em um ambiente para se realizar uma tarefa visual. Deste modo, pode-se dizer que cada ambiente, em função das tarefas que nele são realizadas, tem uma iluminância específica necessária. No Brasil os valores de iluminância para cada ambiente são especificados pela norma NBR 5413. A Figura 2 mostra uma representação da iluminância.

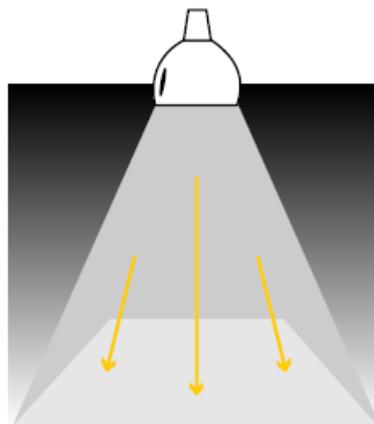


Figura 2 - Representação da Iluminância (AVANT, 2012).

### 1.2.3 EFICÁCIA LUMINOSA

A eficácia luminosa de uma fonte de luz representa a quantidade de luz produzida em função da potência consumida. Ou seja, é a razão entre o fluxo luminoso e a potência consumida, sendo sua unidade o lúmen por Watt (lm/Watt). Quanto maior a eficácia luminosa de uma fonte de luz, maior será a quantidade de luz produzida para uma mesma potência consumida.

### 1.2.4 ÍNDICE DE REPRODUÇÃO DE COR (IRC)

O índice de reprodução de cor mede quanto a luz artificial se aproxima da natural e quantifica a fidelidade com que as cores são reproduzidas sob uma determinada fonte de luz. A luz do sol apresenta um IRC igual a 100% por conseguir reproduzir perfeitamente as cores dos objetos iluminados. Quanto mais próximo o IRC de uma lâmpada estiver do IRC da luz do sol, mais perfeitamente a luz da lâmpada reproduzirá a cor de um objeto iluminado. Assim deve-se utilizar nos ambientes lâmpadas com IRC que proporcione um nível de reprodução das cores de acordo com as tarefas que neles serão desenvolvidas. Por exemplo, em um escritório é necessário uma boa reprodução das cores dos objetos. Já em uma rua, não há a necessidade de uma reprodução muito precisa das cores dos objetos.

Na Tabela 1 é apresentado o IRC das principais fontes de luz utilizadas hoje, além dos LEDs (PINTO, 2008).

Tabela 1 - Índice de reprodução de cor para diferentes fontes de luz.

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

### 1.2.5 TEMPERATURA DE COR

A cor da luz emitida por uma lâmpada representa sua temperatura de cor, que varia para cada tipo de lâmpada. Lâmpadas que apresentam uma baixa temperatura de cor (3.000K ou menos) emitem uma luz de cor amarelada e são usualmente chamadas de “luz quente”. Já as lâmpadas que possuem uma alta temperatura de cor (6.000K ou mais), apresentam uma luz mais branca e são denominadas “luz fria”. A luz emitida pelo sol em céu aberto ao meio dia representa a “luz branca natural” que apresenta temperatura de cor de 5.800K (RODRIGUES, 2002).

A Figura 3 mostra a escala da temperatura de cor para diferentes tipos de lâmpadas (PRADO et al., 2009).

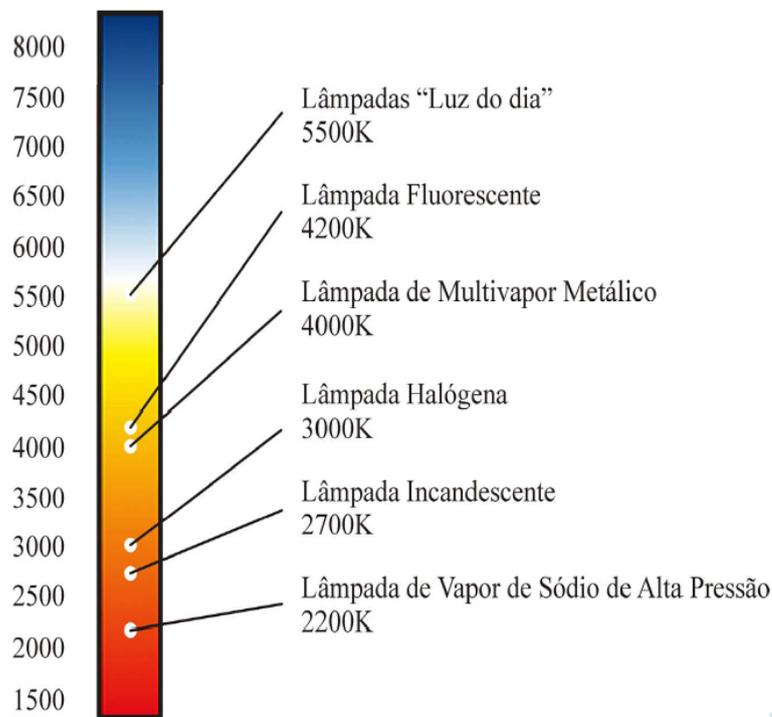


Figura 3 - Temperatura de cor de diferentes lâmpadas.

### 1.3 LEDS NA ILUMINAÇÃO

Com a crescente busca por novas tecnologias para o setor da iluminação, muitas pesquisas têm sido realizadas visando à criação de novas fontes de luz mais eficientes. Neste contexto, é crescente a utilização dos LEDs nas mais diversas áreas da iluminação com o objetivo de substituir as lâmpadas convencionais.

Em 1962 a General Electric desenvolveu o diodo emissor de luz (LED). Desde então, muito tempo e dinheiro têm sido gastos para criar LEDs mais eficientes capazes de competir com as fontes de luz existentes no mercado como as incandescentes e as fluorescentes.

O primeiro LED emitia uma luz vermelha. Na década de 90 surgiram os LEDs azuis e a partir destes foram desenvolvidos os LEDs que imitem luz branca. Já a partir do ano 2000 iniciou a produção dos LEDs com chips de alta potência chamados Power LEDs capazes de operarem com níveis elevados de corrente. Com o desenvolvimento dos chips de alta potência os LEDs começaram a ser mais atrativos para diversas aplicações em iluminação (KUCKMANN, 2006).

O LED inicialmente era usado apenas para indicar se equipamentos eletrônicos, tais como televisores, aparelhos de som e videogames, estavam ligados à rede elétrica ou não (função indicadora). Atualmente, porém, eles vêm sendo utilizados na iluminação de ambientes e na decoração arquitetônica.

A alta eficácia luminosa, o baixo consumo, a longa vida útil, a maior resistência mecânica, o fácil controle sobre a intensidade luminosa e a capacidade de emissão de luz branca, são os fatores que contribuíram para o desenvolvimento da nova geração de LEDs na iluminação em geral (BALDO et al., 2007; MAWAKDIYE, 2008).

#### 1.3.1 DIODOS EMISSORES DE LUZ

Os LEDs (diodos emissores de luz) são semicondutores constituídos por dois materiais diferentes que formam uma junção PN, a qual permite o fluxo de corrente em apenas uma direção. Se a junção PN é polarizada diretamente, as lacunas na camada P e os elétrons da

camada N movem-se em direção à região de depleção (área de transição entre os materiais P e N). Perto desta região, a recombinação de elétrons e lacunas gera energia que é liberada sob a forma de fótons de luz (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2009; BULLOUGH, 2003).

A Figura 4 mostra uma representação simplificada da estrutura física e do processo de emissão de luz em um LED (VIEIRA, 2009).

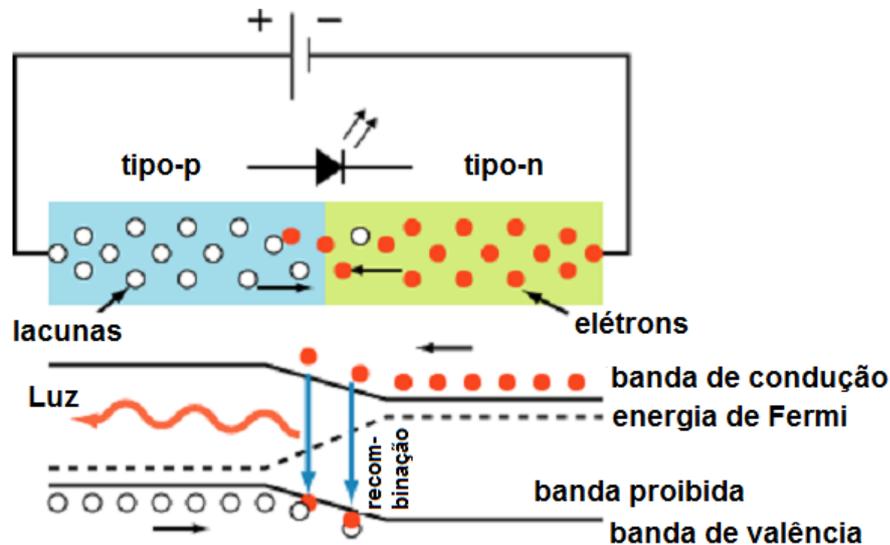


Figura 4 - Representação do comportamento físico de um LED.

Os LEDs emitem luz monocromática que depende do tipo de material utilizado em sua composição, assim é possível variar o comprimento de onda emitido em uma ampla faixa do espectro luminoso obtendo dessa forma qualquer cor dentro do espectro. Os compostos mais utilizados na estrutura química dos LEDs são: o InGaN responsável pela emissão de luz nas tonalidades verdes e azuis; e o AlInGaP responsável pela emissão de feixes de luz amarelo, alaranjado e vermelho. Essa variedade de opções de cores dos LEDs faz com que seu campo de aplicações seja muito vasto principalmente para iluminação arquitetônica (PINTO, 2010).

Os LEDs estão divididos em três categorias que são: LEDs indicativos, LEDs de alto brilho e LEDs de potência. Os LEDs indicativos são os mais antigos presentes no mercado e frequentemente usados nos aparelhos eletrônicos para sinalizar se está ligado ou desligado. Eles possuem um invólucro colorido que tem a função de filtro óptico, ou seja, a cor do invólucro corresponde à cor da luz emitida pelo LED.

Os LEDs de alto brilho também conhecidos como HB-LEDs apresentam um fluxo luminoso e uma eficácia maior que a dos LEDs indicadores. Possuem um invólucro transparente, ou seja, não precisam de um filtro óptico devido ao fato de emitirem a luz com

um comprimento de onda específico da cor desejada. São empregados em sinalização semafórica, letreiros de ônibus dentre outras possibilidades, substituindo as convencionais lâmpadas incandescentes.

Já os LEDs de potência trabalham com correntes superiores à dos LEDs indicadores e de alto brilho além de suportarem potências iguais ou superiores a 1W o que torna necessária a utilização de um dissipador de calor. Apresentam um alto fluxo luminoso que contribui para a sua utilização em iluminação de interiores e decoração arquitetônica entre outras aplicações.

A Figura 5 mostra as três categorias de LEDs descritas anteriormente.

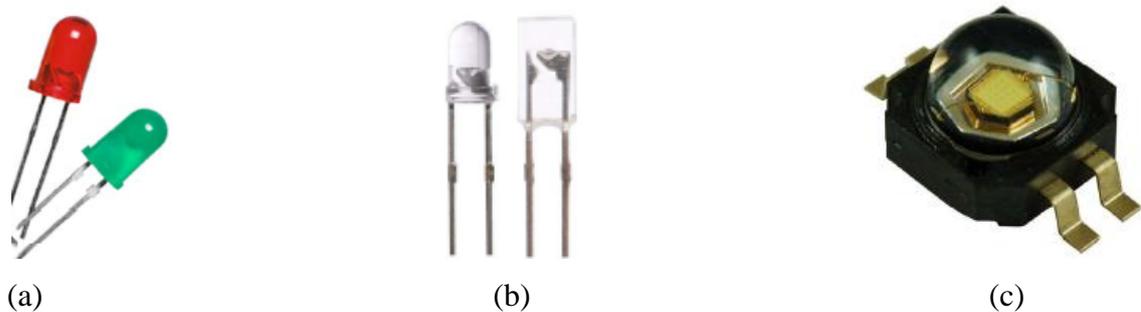


Figura 5 - (a) LED indicador, (b) LED de alto brilho e (c) LED de potência.

### 1.3.2 DIODO ORGÂNICO EMISSOR DE LUZ

Em 1980, a Kodak desenvolveu uma tecnologia que vem ganhando espaço no mercado, que é o Diodo Orgânico Emissor de Luz (OLED).

Os OLEDs são formados por moléculas de carbono confinadas entre dois eletrodos planares que ao serem percorridos por corrente elétrica emitem luz. Eles têm sido aplicados com sucesso em displays de celulares, tela de televisores entre outros. Comparados com as atuais telas de LCD, os OLEDs apresentam baixo consumo, vida útil elevada, e alto contraste de imagem. No entanto, na iluminação os OLEDs ainda encontram alguns obstáculos, como o alto custo de produção e a baixa eficácia luminosa. (VIEIRA, 2009; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2011).

A Figura 6 mostra o protótipo de uma luminária constituída com painéis de OLED.



Figura 6 - Luminária com painéis de OLED.

### 1.3.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Uma característica do LED é o fato dele operar com baixos valores de tensão e corrente, não havendo a necessidade do uso de um ignitor para o seu acionamento como no caso das lâmpadas fluorescentes. Isso faz com que os circuitos utilizados para o acionamento dos LEDs sejam mais simples e faz com que eles possam ser alimentados através de baterias (OLIVEIRA, 2007).

Outra especificidade do LED é a possibilidade do controle da intensidade luminosa (dimerização) que pode ser implementada através de sistemas simples. Desta forma, a luminosidade do LED pode se ajustada de acordo com a intensidade luminosa requerida para iluminar um determinado ambiente ou de acordo com o tipo de atividade que será realizada.

A eficácia luminosa do LED é mais uma propriedade para se destacar nas aplicações de iluminação em geral. Nos últimos anos, com as intensas pesquisas realizadas nessa área, a eficácia luminosa do LED tem aumentado consideravelmente. A eficácia luminosa do LED já superou a de algumas lâmpadas comuns (CRAFORD, 2007). Como apresentado por Pinto (2008), os LEDs brancos modernos atingiram a marca de 100 lm/W, o que é um resultado superior ao obtido com lâmpadas incandescentes (15 lm/W) ou mesmo fluorescentes (80 lm/W).

A Figura 7 mostra uma representação gráfica da evolução da eficácia luminosa de várias fontes de luz artificial, incluindo os LEDs modernos (U.S. DEPARTMENT OS ENERGY, 2011).

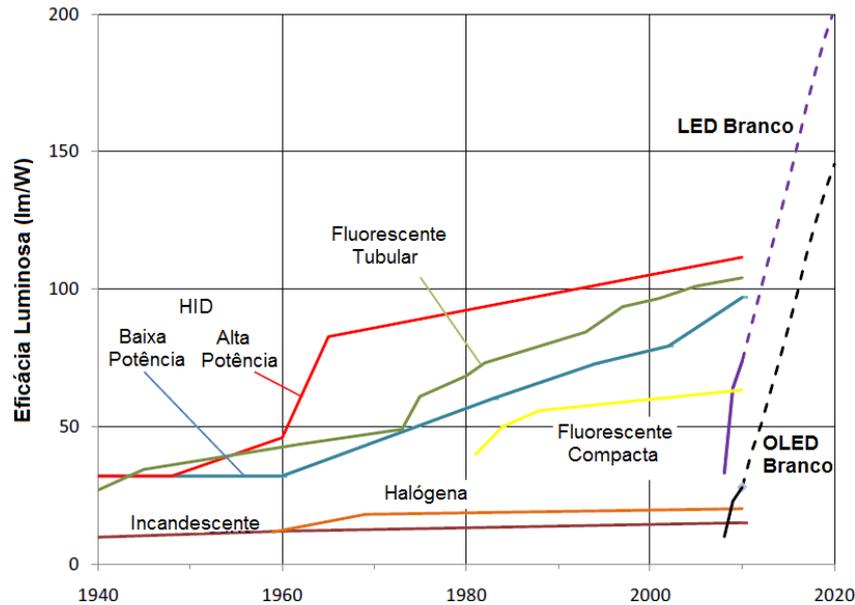


Figura 7 - Evolução da eficácia luminosa: LEDs vs. fontes de luz branca convencionais.

O fluxo luminoso dos LEDs é direcional, não sendo irradiado em todas as direções como ocorre nas lâmpadas convencionais. Isso se deve ao fato de apresentarem um ângulo de abertura estreito para a emissão do fluxo luminoso. Com um ângulo mais estreito, os LEDs proporcionam um melhor aproveitamento do fluxo luminoso, reduzindo as perdas e não necessitando da utilização de calhas refletoras como nas lâmpadas convencionais. Esse ângulo varia de  $20^\circ$  a  $30^\circ$  para os LEDs de alto brilho. Já para os LEDs de potência este valor é de aproximadamente  $150^\circ$  (PINTO, 2010).

Outra particularidade dos LEDs refere-se a sua vida útil, que é superior à das lâmpadas incandescentes e fluorescentes, o que colabora para a redução dos custos de manutenção. A vida útil dos LEDs está em torno de 50.000h a 100.000h, enquanto que as lâmpadas fluorescentes têm uma vida útil de 10.000h a 25.000h e as lâmpadas incandescentes têm uma vida útil de 1.000h (KITSINELIS, 2011).

Segundo Albertini (2010), a determinação da vida útil dos LEDs é feita com base no tempo em que seu fluxo luminoso atinge 70% do fluxo inicial, que pode variar para cada tipo de LED em função das características do encapsulamento e das condições em que estiver operando. Para uma luminária de uso residencial obter a certificação Energy Star regulamentada pelo DOE (Department of Energy - USA), o seu fluxo luminoso para 6.000 horas de funcionamento deve ser no mínimo 91,8% do fluxo inicial, para se garantir 25.000 horas de operação (JANG et al., 2011).

A alta longevidade apresentada pelos LEDs está propiciando o seu uso mais difundido na iluminação, principalmente em locais que requerem dispositivos mais robustos devido às condições inóspitas de determinados locais. Também liberam uma quantidade menor de calor para o ambiente por não utilizarem um filamento ou gás em sua estrutura para a geração da luz.

Contudo para a alimentação dos LEDs é necessária a utilização de um sistema de acionamento (ou *driver*) a fim de ajustar os valores de tensão e corrente da rede elétrica para os valores nominais. Através deste circuito também é feito o controle da corrente sobre os LEDs que é proporcional ao fluxo luminoso emitido.

O projeto de um circuito de acionamento dos LEDs deve apresentar uma alta eficiência e uma alta durabilidade. A corrente máxima suportada pelos LEDs varia de acordo com o modelo e a potência. Nos LEDs de alto brilho essa corrente gira em torno de 30 mA a 70 mA e nos LEDs de potência ela pode variar de 350 mA a 1 A. Valores mais altos são esperados, a medida que novos modelos são disponibilizados pelos fabricantes.

#### **1.4 FORMAS DE OBTENÇÃO DA LUZ BRANCA NOS LEDS**

Com o desenvolvimento do LED que emite luz branca, novos campos de aplicações em iluminação têm surgido no mercado. No entanto, os LEDs que emitem luz branca devem oferecer uma alta intensidade luminosa, serem capazes de reproduzir bem as cores dos objetos, além de apresentar um baixo consumo de energia, para assim, poderem competir com as lâmpadas convencionais, que já vêm desempenhando um bom papel há anos. Logo, os LEDs devem apresentar características melhores do que as lâmpadas convencionais, para que, em alguns anos, eles possam substituí-las nas principais aplicações em iluminação.

Existem algumas formas para se obter a luz branca em um LED. A seguir serão descritas as três formas mais utilizadas para sua obtenção (CERVI, 2005; SÁ JUNIOR, 2007b; STEIGERWALD et al., 2002; KITSINELIS, 2011).

### 1.4.1 LED AZUL COM CAMADA DE FÓSFORO AMARELO

Esta é a forma mais simples e a mais utilizada para a obtenção da luz branca. O método utiliza um LED azul recoberto por uma camada de fósforo amarelo. O projeto é feito de modo que uma parte da luz azul atravessa a camada de fósforo gerando o espectro referente ao azul. A outra parte da energia da luz azul é absorvida pela camada de fósforo amarelo sendo convertida na faixa complementar do espectro. O resultado da combinação dessas cores é uma luz branca que apresenta uma baixa temperatura de cor.

A Figura 8 mostra a representação do processo.

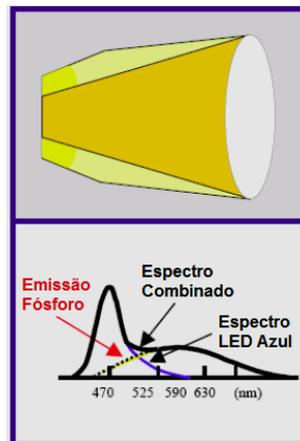


Figura 8 - Obtenção da luz branca através do LED azul com camada de fósforo amarelo (GORDON, 2007).

### 1.4.2 LED ULTRAVIOLETA COM FÓSFORO RGB (RED, GREEN E BLUE)

Neste método, que se assemelha ao da lâmpada fluorescente, é utilizado um LED ultravioleta recoberto por um conjunto de fósforos emissores de luz vermelha (red), verde (green) e azul (blue) (RGB). A radiação ultravioleta é absorvida pelo fósforo que a converte nas cores primárias RGB formando assim a luz branca. A luz branca gerada neste processo apresenta um índice de reprodução de cores semelhante ao da lâmpada fluorescente tubular, devido ao método de conversão da radiação ultravioleta em luz visível ser o mesmo. A

vantagem deste processo é o alto índice de reprodução de cores e o fato de sofrer menos influência com a elevação da temperatura da junção.

A Figura 9 mostra como ocorre a combinação do espectro do LED ultravioleta com o conjunto de fósforo RGB.

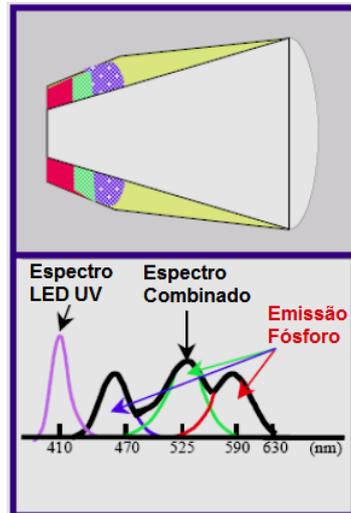


Figura 9 - LED ultravioleta recoberto por uma camada de fósforo RGB (GORDON, 2007).

### 1.4.3 COMBINAÇÃO DE LEDS DE DIFERENTES CORES

Com a combinação de LEDs de diferentes cores é possível obter a luz branca como também outros tipos de cores. A cor emitida vai depender da relação entre os comprimentos de onda emitidos por cada LED utilizado. Combinando a cor vermelha, verde e azul (RGB) com o controle da intensidade luminosa dos feixes emitidos por cada cor, consegue-se obter qualquer cor dentro do plano formado por essas cores. Para que a luz branca seja satisfatória é necessário utilizar uma combinação otimizada do número de LEDs de cada cor, visto que cada cor apresenta propriedades diferentes entre elas, o que pode acarretar alteração da cor desejada. Esta técnica para a obtenção da luz branca é a mais eficiente, além de possibilitar a criação de outras cores. No entanto, o circuito utilizado para controlar a intensidade de cada cor é mais complexo, o que torna o custo deste tipo de sistema mais caro.

A Figura 10 mostra a combinação RGB para formação da luz branca.

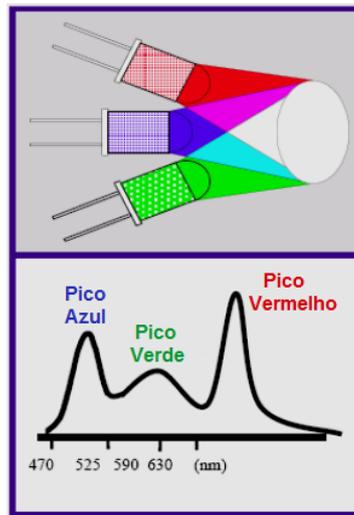


Figura 10 - Formação da luz branca através da combinação RGB (GORDON, 2007).

## 1.5 OS LEDS DE POTÊNCIA

Os primeiros modelos de LEDs possuíam um fluxo luminoso muito baixo sendo aplicados principalmente em aparelhos eletrônicos com função de sinalização. Com o avanço das pesquisas começaram a surgir LEDs com um fluxo luminoso maior, o que possibilitou a ampliação do seu campo de aplicação. Dentre os novos modelos de LEDs desenvolvidos nos últimos anos destacam-se os que operam com potência igual ou superior a 1 W, sendo esta potência muito superior à apresentada pelos outros modelos de LEDs como os indicadores e os de alto brilho.

A Figura 11 mostra a estrutura típica de um LED de potência, onde são apresentadas suas estruturas principais (PRADO et al., 2009).

Em função da maior potência desses LEDs, eles apresentam um elevado fluxo luminoso com um ângulo de abertura maior, possibilitando uma dispersão maior deste fluxo. O alto fluxo luminoso dos LEDs de potência está permitindo a sua utilização em aplicações de iluminação que antes não era possível devido ao baixo fluxo. Agora eles estão sendo aplicados em locais onde apenas lâmpadas convencionais eram utilizadas, como em iluminação de interiores, decoração arquitetônica, sinalização semafórica, entre outras.

No entanto, os LEDs de potência enfrentam alguns problemas que influenciam em suas características. Um deles refere-se ao aumento da temperatura da junção que altera suas características ópticas e elétricas, logo o projeto térmico para os LEDs de potência é imprescindível (JUNIOR, 2008; WANG et al., 2010).

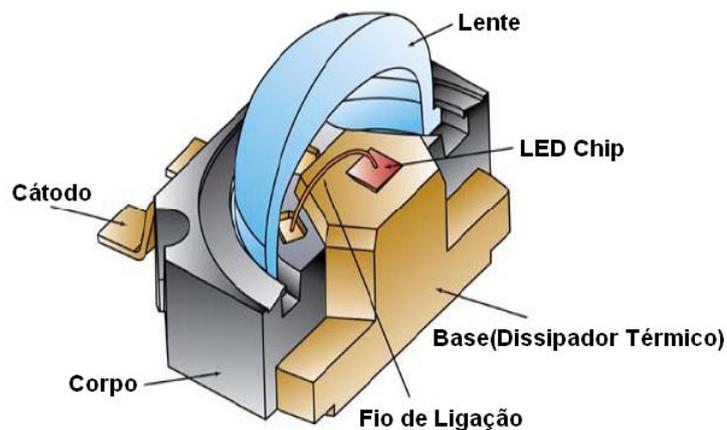


Figura 11 - Estrutura do LED de potência.

Diversos trabalhos tem mostrado que as principais falhas ocorridas nos LEDs são devido à operação com temperaturas elevadas o que reduz drasticamente sua vida útil (NARENDRAN et al., 2005; WU et al., 2009; SU et al., 2010).

A elevação excessiva da temperatura da junção acarreta os seguintes problemas para os LEDs:

- Redução do seu tempo de uso em função da acelerada depreciação do fluxo luminoso;
- Provoca o decréscimo da sua tensão direta, que pode gerar desequilíbrio de corrente quando os LEDs estiverem ligados em paralelo;
- Causa o deslocamento do pico de comprimento de onda.

Os fatores que interferem na temperatura da junção dos LEDs são a temperatura ambiente, a corrente e o caminho térmico. Por isso, esses fatores devem ser levados em conta na hora de dimensionar um sistema de iluminação com LEDs, a fim de que a qualidade da iluminação não seja alterada durante seu funcionamento (KITSINELIS, 2011).

Melhorar a extração do calor da junção e diminuir o estresse termomecânico são fatores importantes para o advento dos LEDs na iluminação. Logo, o encapsulamento dos

LEDs de potência precisa ser bem projetado para permitir uma alta condutividade térmica através da redução da resistência térmica. É indispensável o uso de dissipadores que apresentem boa condutividade térmica na hora de se projetar um sistema de iluminação com LEDs de potência (WANG et al., 2010).

A Figura 12 mostra a curva do fluxo luminoso em função do tempo de uso de dois LEDs idênticos operando com uma diferença de 11°C na temperatura da junção (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2009).

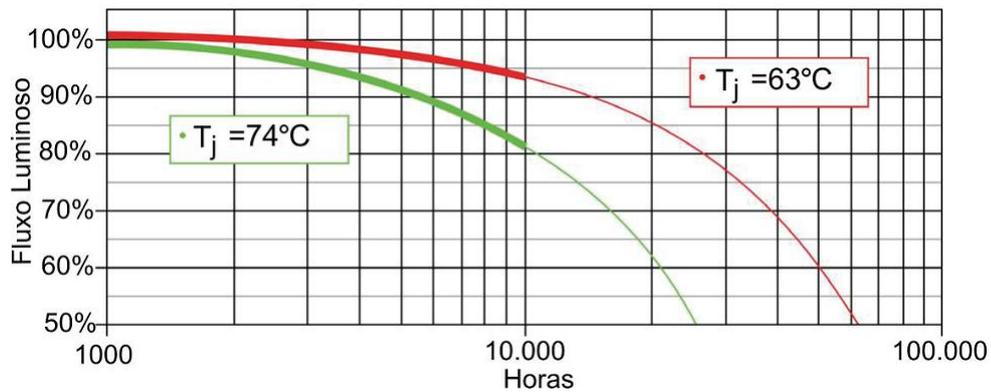


Figura 12 - Dois LEDs operando com temperaturas da junção diferentes.

Analisando a curva, pode-se perceber como a elevação da temperatura da junção reduz o fluxo luminoso, acarretando na redução da vida útil dos LEDs e a diminuição do fluxo luminoso varia com intensidades diferentes para cada tipo de LEDs.

Os LEDs brancos atuais convertem entre 15% e 25% da sua potência em luz visível, emitindo baixos níveis de infravermelho e de ultravioleta (ou não emitem) e o restante é convertido em calor, que deve ser conduzido da junção para o ambiente com a utilização de dissipadores de calor. O objetivo, neste caso, é evitar a elevação excessiva da temperatura da junção (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2009; SÁ JUNIOR, 2009).

### 1.5.1 MODELO ELÉTRICO DOS LEDS

Como os diodos os LEDs são formados por uma junção P-N que permite a circulação de corrente somente em uma direção. Para que os LEDs entrem em funcionamento é

necessário que a tensão aplicada entre anodo e catodo seja igual ou superior à sua tensão de corte. Ou seja, para tensões inferiores à tensão de corte não há circulação de corrente através dele. A tensão de corte varia para cada tipo de LED e seu valor depende do material e da energia do gap. A curva  $V_{LED} \times I_{LED}$  difere das curvas dos diodos convencionais devido aos LEDs apresentarem resistências parasitas que causam elevadas perdas ôhmicas quando flui corrente através da junção P-N (SÁ JUNIOR, 2009).

A principal resistência parasita dos LEDs que se deve adotar em seu modelo elétrico é a resistência série  $R_s$ . Ela determina a inclinação da curva quando são aplicadas tensões acima da tensão de corte, além de ser um parâmetro crítico para os LEDs de potência em função de estabelecer a densidade de potência que o mesmo opera (VIEIRA, 2009).

O modelo elétrico do LED pode ser obtido através da equação de Shockley modificada (1), onde é levada em conta a sua resistência parasita série  $R_s$  (SCHUBERT, 2006).

$$V_{LED} = \frac{n \cdot K \cdot T}{q} \cdot \ln \left( \frac{I_{LED}}{I_S} \right) + R_s \cdot I_{LED} \quad (1)$$

Onde:

$V_{LED}$  - Tensão direta do LED (V).

$n$  - Fator de idealidade.

$K$  - Constante de Boltzmann,  $1,3805 \times 10^{-23}$  (J/°K).

$T$  - Temperatura em Kelvin (°K).

$q$  - Carga do elétron,  $1,602 \times 10^{-19}$  Coulomb (C).

$I_{LED}$  - Corrente direta do LED (A).

$I_S$  - Corrente de saturação reversa (A).

Para um ponto de operação fixo, temperatura constante e corrente próxima da nominal, a equação (1) pode ser simplificada para a equação (2), onde  $V_0$  representa a fonte de tensão interna do modelo do LED (algumas vezes denominada tensão de joelho).

$$V_{LED} = V_0 + R_s \cdot I_{LED} \quad (2)$$

A partir da interpretação da equação (2), o modelo elétrico do LED é representado por um diodo ideal em série com uma fonte de tensão constante ( $V_0$ ) e uma resistência ( $R_s$ ) como é mostrado na Figura 13.

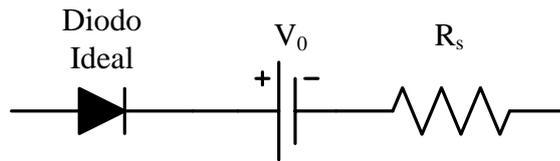


Figura 13 - Modelo elétrico do LED

Este modelo é geralmente utilizado em programas de simulação de circuitos eletrônicos para análise de circuitos de acionamento de LEDs, onde apresenta resultados satisfatórios.

Para encontrar os parâmetros do modelo é necessário obter experimentalmente a curva  $V_{LED} \times I_{LED}$  para uma mesma temperatura da junção, logo, é preciso que as medidas sejam feitas de forma rápida. Através da regressão linear da curva são obtidos os parâmetros, onde o coeficiente angular é  $R_s$  e o coeficiente linear é  $V_0$ .

## 1.6 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo foi apresentado um breve histórico sobre iluminação, além dos conceitos luminotécnicos utilizados para caracterizar cada tipo de fonte de luz.

Também foram descritas as características dos diodos emissores de luz e suas principais vantagens em relação às lâmpadas convencionais.

No próximo capítulo será apresentado um estudo sobre o uso de lentes colimadoras e geometria de arranjo de LEDs nas luminárias com o objetivo de alcançar uma iluminação uniforme, eficiente e de qualidade.

## **CAPÍTULO 2 AVALIAÇÃO DA GEOMETRIA DE ARRANJO DE LEDS PARA A EFICIÊNCIA DA ILUMINAÇÃO**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

O desenvolvimento de dispositivos que consomem menos energia elétrica vem aumentando a cada dia, impulsionado pela maior preocupação atual com a conservação da energia elétrica e com o meio ambiente. Além de consumir menos energia, esses novos dispositivos também são criados de forma a causar menos impactos ambientais.

Atualmente existem no mercado inúmeros tipos de luminárias LEDs para as mais diversas aplicações. No entanto, elas devem ser capazes de fornecer uma boa densidade luminosa no local em que forem utilizadas.

Para que as luminárias à base de LEDs forneçam uma distribuição uniforme da luz sobre o ponto que se deseja iluminar, é necessário que, ao projetar a luminária, o arranjo dos LEDs seja feito de forma adequada. Lentes adaptadas também podem ser colocadas sobre os LEDs de forma a alterar o ângulo de emissão do feixe de luz para que se obtenha uniformidade na iluminação (WHANG et al, 2009).

Com um melhor arranjo dos LEDs sobre a superfície da luminária, além de se obter uma iluminação mais uniforme, aumenta-se a eficiência luminosa do sistema, garantindo melhor qualidade da luz emitida.

Neste capítulo foi realizada uma análise das diferentes configurações de arranjos de LEDs de forma a se obter uma iluminação mais uniforme e mais eficiente. Foram descritos os três métodos mais utilizados de arranjos de LEDs e a influência das lentes colimadoras sobre a eficiência luminosa da luminária.

## 2.2 GEOMETRIAS DE ARRANJO DE LEDS

O projeto bem elaborado de uma luminária LED é importante para que ela seja capaz de proporcionar uma iluminação uniforme no local onde será utilizada. Uma das formas de se obter isso é através da maneira como os LEDs são distribuídos na superfície da luminária (WHANG et al., 2009; MORENO et al., 2006; MORENO et al., 2007; ZHU et al., 2011).

As luminárias LEDs são constituídas de inúmeros LEDs que são ligados entre si em série ou paralelo, a fim de se obter um alto fluxo luminoso total. Geralmente, são utilizados LEDs que apresentam as mesmas características como: fluxo luminoso, ângulo de emissão do feixe de luz, tensão e corrente de funcionamento.

Diferentes configurações de LEDs como linear, circular, quadrangular e esférica podem ser usadas para se obter uma distribuição luminosa mais uniforme, através da otimização do espaçamento entre eles (WHANG et al., 2009), (MORENO et al., 2006), (MORENO et al., 2007). A Figura 14 mostra alguns dos arranjos de LEDs mais utilizados.

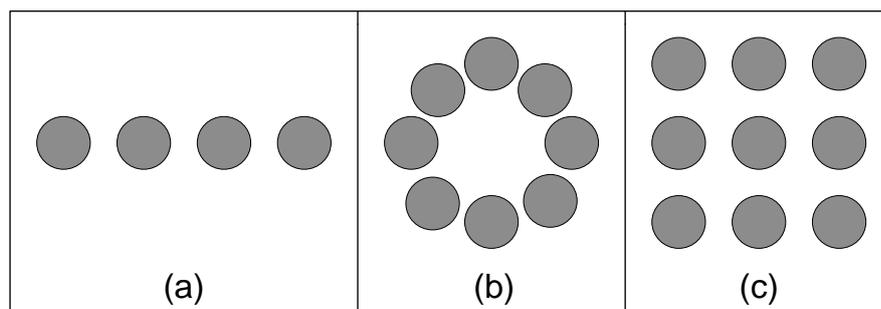


Figura 14 - Diferentes arranjos de LEDs: (a) linear, (b) circular e (c) quadrangular.

## 2.3 MODELO ÓPTICO DO LED

Para o estudo de um único LED foi considerada apenas a radiação visível emitida por ele. Sabe-se que idealmente o LED é um emissor lambertiano, o que significa que a distribuição de radiação também é uma função do cosseno do ângulo de visão (ZHU et al., 2011). Na prática, essa dependência torna-se uma lei de energia que depende do

encapsulamento e do formato da região do semicondutor. A distribuição de irradiância ( $W/m^2$ ) e dada pela expressão (3).

$$E(r, \theta) = E_0(r) \cos^m \theta. \quad (3)$$

Onde  $\theta$  é o ângulo de visão,  $E_0(r)$  é a irradiância no eixo a uma distância  $r$  do LED. O valor de  $m$  depende da posição relativa da região de emissão do LED a partir do centro de curvatura do encapsulamento esférico. No caso da posição do chip coincidir com o centro de curvatura, então  $m = 1$  e a fonte é praticamente um lambertiano perfeito. Na prática os LEDs apresentam  $m > 1$  e a queda de intensidade com o ângulo é pronunciada. O número  $m$  é dado pelo ângulo  $\theta_{1/2}$  (um valor normalmente fornecido pelo fabricante, definido como o ângulo de visão quando a irradiância é metade do valor em  $0^\circ$ ). O valor de  $m$  pode ser calculado através da equação (4) (ZHU et al., 2011).

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \theta_{1/2})} \quad (4)$$

A irradiância sobre cada ponto  $(x, y)$  em uma superfície plana a uma distância  $z$  da matriz de LEDs pode então ser expressa através da equação (5).

$$E(x, y, z) = \frac{z^m I_{LED}}{[a + b + c]^{(m+2)/2}} \quad (5)$$

Onde  $a + b + c = (x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 + z^2$ ;  $E$  é a distribuição de irradiância ( $W/m^2$ );  $I_{LED}$  é a intensidade do LED em ( $W/sr$ );  $z$  é a distância entre o LED e a superfície onde a luz está incidindo.

Na prática, a não homogeneidade e irregularidades do formato do encapsulamento produzido com materiais de baixa qualidade também prejudicam a distribuição da irradiância dos LEDs. Porém, as irregularidades na distribuição da radiação são causadas principalmente pelo pequeno espelho situado atrás do chip, utilizado para aumentar o fluxo.

LEDs de alto brilho modernos à base de fósforo apresentam encapsulamentos de alta qualidade e a camada de fósforo evita as imperfeições devidas ao espelho (MORENO et al., 2006).

Nas próximas seções será discutido como se obter uma iluminação uniforme a partir de diferentes geometrias de arranjos de LEDs de acordo com os métodos abordados em Whang et al. (2009), Moreno et al. (2006) e Moreno et al. (2007).

## 2.4 ARRANJO LINEAR COM DOIS LEDS

Quando dois LEDs são utilizados para se obter uma iluminação uniforme, a irradiância total  $E$  é obtida através da soma da irradiância para os dois LEDs. Para o caso de dois LEDs a irradiância é dada pela equação (6), onde  $d$  é a separação entre os LEDs.

$$E(x, y, z) = z^m I_{LED} \left\{ \left[ \left( x - \frac{d}{2} \right)^2 + y^2 + z^2 \right]^{-(m+2)/2} + \left[ \left( x + \frac{d}{2} \right)^2 + y^2 + z^2 \right]^{-(m+2)/2} \right\} \quad (6)$$

A distribuição uniforme da irradiância sobre uma região maior do que a iluminada por um único LED pode ser obtida ajustando a distância  $d$ . A ideia é separar os dois padrões de irradiância, de modo a eliminar o mínimo entre os máximos dos dois padrões. Essa ideia é semelhante ao critério de Sparrow's, usado na resolução de imagem, que é dado pela condição maximamente plana. Logo, diferenciando (6) duas vezes e fazendo  $d^2E/dx^2 = 0$ ,  $x = 0$  e  $y = 0$  chega-se à condição plana máxima, equação (7).

$$d_{\max} = \sqrt{\frac{4}{m+3}} \cdot z \quad (7)$$

Onde  $d$  representa a distância máxima entre os LEDs que garante uma distribuição luminosa uniforme e  $z$  é a distância entre os LEDs e a região que se está iluminando. Se  $d$  for maior que  $d_{\max}$ , pode gerar uma não uniformidade na distribuição luminosa. A Figura 15 mostra um exemplo da distribuição da iluminação para dois LEDs, onde, no painel da esquerda tem-se uma distribuição uniforme da iluminação e no da direita uma distribuição não uniforme.

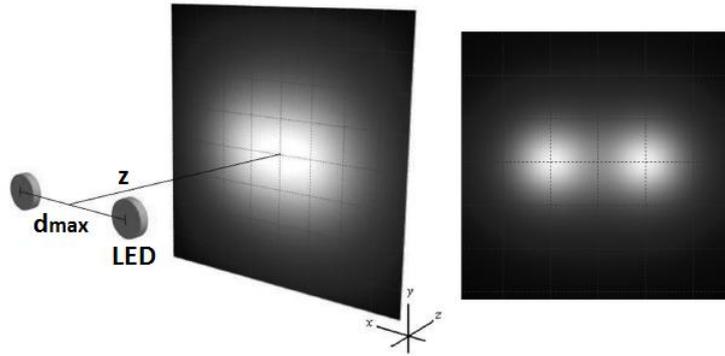


Figura 15 - Distribuição da iluminação para dois LEDs: (esquerda) distribuição uniforme; (direita) distribuição não uniforme (WHANG et al., 2009).

## 2.5 ARRANJO CIRCULAR DE LEDS

Considerando que os LEDs são distribuídos de modo a formar um círculo de raio  $\rho$ , a irradiância total  $E$  é dada pela soma da irradiância de cada LED que compõe o círculo. No entanto, o círculo deve ser formado por  $N \geq 4$  LEDs. Logo, o cálculo da irradiância é dado por (8).

$$E(x, y, z) = z^m I_{LED} \sum_{n=1}^N \left[ \left( x - \rho \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right)^2 + \left( y - \rho \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right)^2 + z^2 \right]^{-(m+2)/2} \quad (8)$$

Para obter a equação que mostra qual o máximo raio do círculo para que a distribuição luminosa seja uniforme, deve-se aplicar o critério de Sparrow's. Logo, diferenciando (8) duas vezes e fazendo  $d^2E/dx^2 = 0$ ,  $x = 0$  e  $y = 0$  chega-se à equação (9).

$$\rho_{\max} = \sqrt{\frac{2}{m+2}} \cdot z \quad (9)$$

De acordo com (9), o valor de  $\rho_{\max}$  não é influenciado pelo número de LEDs que formam o círculo.

A Figura 16 mostra um exemplo da distribuição luminosa de um círculo de LEDs, onde se observa a distribuição luminosa uniforme.

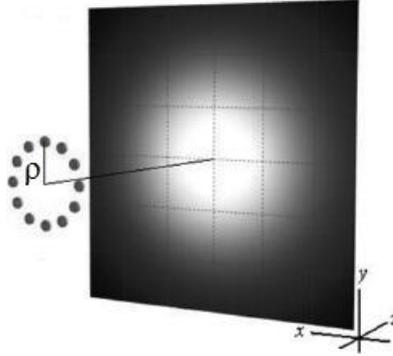


Figura 16 - Arranjo circular de LEDs com distribuição luminosa uniforme sobre o painel (WHANG et al., 2009).

## 2.6 ARRANJO LINEAR DE LEDs

O arranjo linear de LEDs é o mais popular em iluminação. Para se obter uma iluminação uniforme, deve-se determinar a máxima separação entre os LEDs. Como nos outros casos, a irradiância total é dada pela soma das irradiâncias dos LEDs. Porém, o cálculo da irradiância para um número ímpar de LEDs é feito de forma diferente do que para um número par de LEDs.

No caso de um número ( $N$ ) ímpar de LEDs, a irradiância  $E$  é dada por:

$$E(x, y, z) = z^m I_{LED} \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \left[ (x - nd)^2 + y^2 + z^2 \right]^{-(m+2)/2} . \quad (10)$$

E para quando o número de LEDs for par,  $E$  é dada por

$$E(x, y, z) = z^m I_{LED} \sum_{n=-(N-2)/2}^{N/2} \left[ \left( x - (2n-1) \frac{d}{n} \right)^2 + y^2 + z^2 \right]^{-(m+2)/2} . \quad (11)$$

A separação máxima entre os LEDs  $d_{max}$  para os dois casos é obtida fazendo  $d^2 E/dx^2 = 0$ ,  $x = 0$  e  $y = 0$  em (12) e (13). Então,  $d_{max}$  para um número  $N$  ímpar de LEDs e para  $m \geq 10$  é dada por

$$d_{\max} = \sqrt{\frac{4}{m+3}} \left(1,495N^{-0,438} e^{-0,0014N}\right) z \quad (12)$$

Já para um número par  $N$  de LEDs e  $m \geq 10$  o cálculo de  $d_{\max}$  é dado por

$$d_{\max} = \left[ \sqrt{\frac{4}{m+3}} - 0,77868m^{-0,4} e^{-0,00009928} \times (1 - 1,373e^{-161N}) \right] z \quad (13)$$

A Figura 17 mostra um arranjo linear com cinco LEDs onde é indicada a separação  $d$  entre eles.

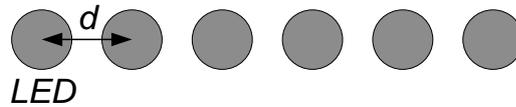


Figura 17 - Arranjo linear de LEDs.

## 2.7 ARRANJO QUADRANGULAR DE LEDS

De todos os arranjos já mostrados este é o mais complicado para se obter um sistema de iluminação uniforme. A irradiância total do arranjo é dada pela soma das irradiâncias da matriz  $N \times M$  de LEDs. Também para este caso há uma diferenciação entre uma matriz formada por um número par de LEDs e a formada por um número ímpar de LEDs para a realização do cálculo da irradiância  $E$ .

Quando a matriz é formada por  $N$  e  $M$  ímpares de LEDs, a irradiância total é calculada pela seguinte expressão:

$$E(x, y, z) = z^m I_{LED} \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \sum_{l=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \left[ (x-nd)^2 + (y-l d)^2 + z^2 \right]^{-(m+2)/2} \quad (14)$$

Em relação a uma matriz formada por números  $N$  e  $M$  pares de LEDs, a irradiância é dada pela equação (15).

$$E(x, y, z) = z^m I_{LED} \sum_{n=-(N-1)/2}^{N/2} \left[ \left( x - (2n-1) \frac{d}{2} \right)^2 + y^2 + z^2 \right]^{-(m+2)/2} \quad (15)$$

Devido à complexidade deste caso é necessário utilizar uma solução numérica para se obter a condição maximamente plana da distribuição luminosa. Para matrizes  $\leq 4 \times 4$  a solução se aproxima da apresentada para o arranjo circular de LEDs (considerando um círculo com 4 LEDs). Logo, a separação máxima entre os LED pode ser calculada pela equação (16).

$$d_{\max} = \sqrt{\frac{4}{m+2}} \cdot z \quad (16)$$

A Figura 18 mostra um arranjo quadrangular de LEDs com a indicação da separação  $d$  entre eles.

Com a adoção dos diferentes métodos de arranjo de LED é possível projetar luminárias com alta eficiência luminosa através de uma iluminação mais uniforme.

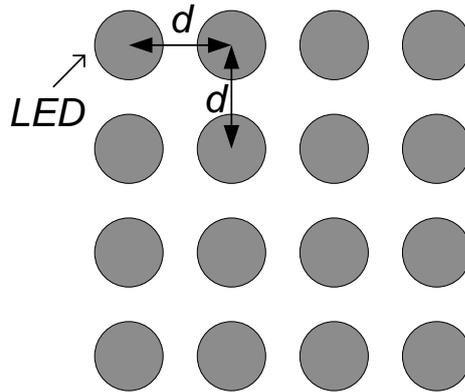


Figura 18 - Arranjo quadrangular de LEDs.

## 2.8 LENTES COLIMADORAS EM LUMINÁRIAS DE LEDS

Com o aumento da utilização dos LEDs na iluminação, o estudo da óptica dos LEDs de potência tornou-se também um fator importante para o aumento da eficiência luminosa e

da qualidade da luz. Assim, com o LED possuindo uma óptica apropriada, consegue-se extrair o maior número possível de fótons gerados na região ativa da junção (JUNIOR, 2008).

Inicialmente, os LEDs apresentavam um ângulo de abertura de aproximadamente 20° a 30°, mas com o surgimento dos LEDs de potência esse valor passou a ser em torno de 150° (PINTO, 2008). Isso tornou possível a iluminação de superfícies maiores do que as iluminadas pelos primeiros LEDs.

Os LEDs atuais vêm de fábrica com um ângulo de emissão fixo. Esse ângulo é determinado durante o processo de fabricação, sendo conhecido como óptica primária. No entanto, dependendo da aplicação, o ângulo de emissão requerido pode ser diferente dos ângulos de emissão dos LEDs disponíveis, o que torna necessário a utilização de uma óptica secundária através das lentes externas.

Dessa forma, é possível obter o ângulo de emissão desejado para determinada aplicação através do projeto de uma lente que faça com que o feixe de luz seja emitido com a angulação desejada (JUNTUNEN, 2010; WHANG et al., 2009).

As lentes podem ser projetadas para serem usadas em um único LED ou com um conjunto de LEDs. Elas também proporcionam uma maior distribuição uniforme da iluminação. A Figura 19 mostra uma lente usada sobre um arranjo de LEDs.



Figura 19 - Lente sobre um arranjo de LEDs.

O aumento da preocupação com a distribuição da luz emitida pelo LED propiciou avanços na óptica dos LEDs de potência. Eles já apresentam uma lente hemisférica que já vem incorporada no encapsulamento. No entanto, modelos mais modernos desses LEDs possuem lentes mais avançadas como a mostrada na Figura 20. Esse tipo de lente também apresenta um desempenho melhor do que as lentes externas ou secundárias que são colocadas

sobre eles, pois proporcionam maior eficiência da luz emitida, além do tamanho reduzido (CHEN et al.,2009). No entanto, os LEDs com a lente incorporada têm um custo maior.

Independente do tipo de lente a ser utilizada (primária ou secundária), elas são uma peça importante na hora de se projetar uma luminária a base de LEDs, de forma que esta seja capaz de proporcionar uma iluminação mais uniforme além, de iluminarem superfícies maiores.



Figura 20 - Lente incorporada no próprio encapsulamento do LED (CHEN et al., 2009).

## 2.9 EXPERIMENTOS COM LENTES COLIMADORAS E ARRANJOS DE LEDS

Foi realizada a análise de uma luminária a fim de verificar o seu comportamento com e sem a utilização da lente sobre os LEDs. A luminária modelo HEXA LUM BL1 de 35 W da HEXALED foi utilizada nos testes. A Figura 21 mostra o módulo de LEDs da luminária HEXALED e a lente colimadora utilizada sobre os LEDs.

O ensaio foi realizado em uma sala totalmente escura e o módulo de LEDs foi colocado de frente para uma parede, que serviu de anteparo para a luz projetada. Primeiramente foi verificada a distribuição da iluminação para o módulo de LEDs sem a lente e depois para o módulo incorporando a lente colimadora.

As figuras 22 e 23 mostram a distribuição da iluminação sobre a parede para os dois casos.

Conforme observado nestas figuras, sem a utilização da lente a distribuição da iluminação não é uniforme, apresentando formato circular. Já com o uso da lente, a iluminação teve uma forma retangular mais aberta, sendo que a distribuição da luz foi mais

uniforme, além de se iluminar mais alguns pontos laterais da parede que não haviam sido iluminados no caso anterior.



Figura 21 - Módulo de LEDs da luminária HEXALED modelo HEXA LUM BL1 de 35 W.

Além disso, percebeu-se que sem a lente a iluminação ficou mais concentrada no centro, porém, com o seu uso, a iluminação foi distribuída também nas laterais. Logo, o uso das lentes no módulo permitiu ampliar a área iluminada.

Com relação ao estudo de arranjo de LEDs, foram projetados dois sistemas de iluminação, um utilizando LEDs de alto brilho e outro LEDs de potência. Nos dois casos foram utilizados dois LEDs conectados em série. O objetivo era projetar o fluxo luminoso dos LEDs sobre um anteparo a uma distância de 15 cm dos LEDs de forma a poder analisar a distribuição da luminosidade.

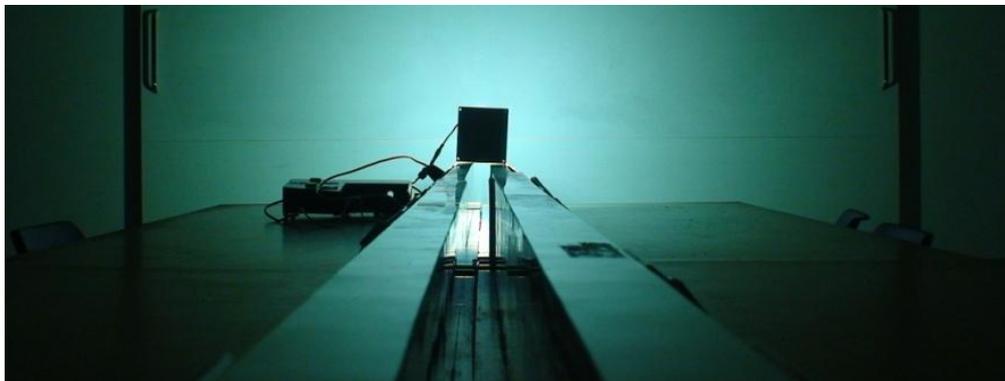


Figura 22 - Distribuição da iluminação para o módulo sem a lente sobre os LEDs.

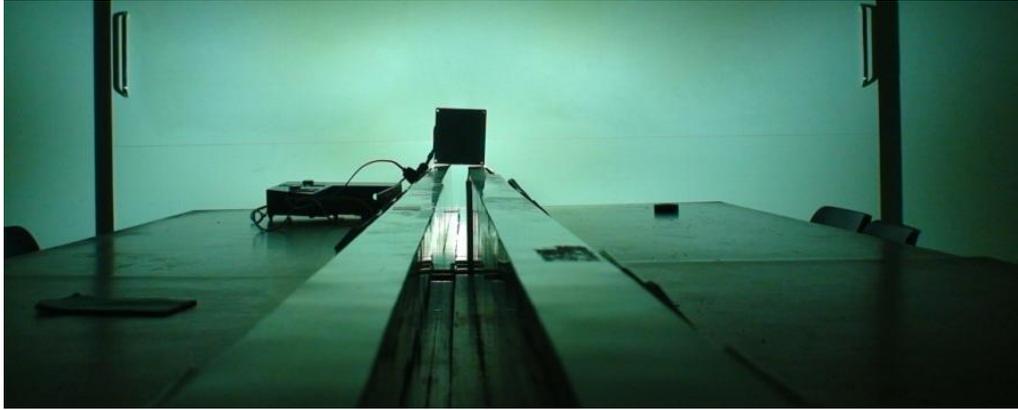


Figura 23 - Distribuição da iluminação para o módulo com a lente sobre os LEDs.

Para determinarmos a distância entre os LEDs foram utilizadas as equações (4) e (7). As tabelas 2 e 3 mostram os modelos dos LEDs empregados e os valores dos parâmetros calculados.

As figuras 24 e 25 evidenciam a distribuição do fluxo luminoso sobre o anteparo para os LEDs de alto brilho considerando a separação entre eles igual à  $d_{max}$  e para um valor maior que  $d_{max}$ . Já as figuras 26 e 27 apresentam a distribuição do fluxo luminoso para os LEDs de potência com separação entre eles igual a  $d_{max}$  e para um valor maior que  $d_{max}$ .

Tabela 2 - LEDs de alto brilho modelo LUW503F43.

Parâmetros	Valores
$\theta_{1/2}$	15°
<b>m</b>	20
$d_{max}$	6,25 cm

Tabela 3 - LEDs de potência: Everlight modelo EHP-AX08EL/GT01H-P01.

Parâmetros	Valores
$\theta_{1/2}$	75°
<b>m</b>	0,512
$d_{max}$	16 cm

De acordo com as figuras apresentadas é possível perceber que quando a separação entre os LEDs é igual à  $d_{max}$ , o conjunto apresenta uma distribuição luminosa mais uniforme. Entretanto, quando a distância entre os LEDs é maior que o limite calculado  $d_{max}$ , o sistema

apresenta uma não uniformidade na distribuição luminosa como também o aparecimento do efeito de zebração, ou seja, sombra entre os LEDs.



Figura 24 - Dois LEDs de alto brilho com separação entre eles igual a  $d_{max}$ .



Figura 25 - Dois LEDs de alto brilho com separação entre eles maior que  $d_{max}$ .

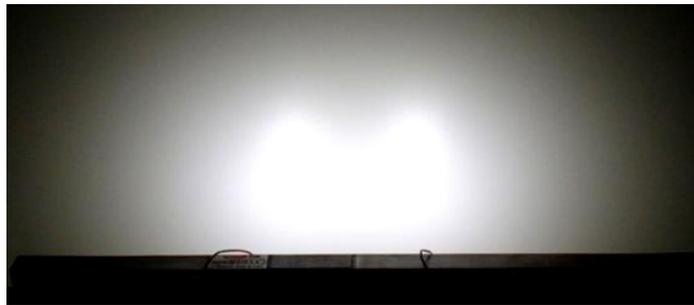


Figura 26 - Dois LEDs de potência com separação entre eles igual a  $d_{max}$ .



Figura 27 - Dois LEDs de potência com separação entre eles maior que  $d_{max}$ .

## 2.10 CONCLUSÕES PARCIAIS

Este capítulo apresentou uma compilação sobre a importância da adequada distribuição geométrica dos LEDs em luminárias, bem como os efeitos das lentes colimadoras na eficiência e qualidade luminosa.

Foram apresentadas algumas geometrias de arranjos de LEDs, através das quais é possível determinar a separação entre eles de forma a se obter uma distribuição uniforme da iluminação. Com este método, também é possível alcançar a uniformidade usando um número menor de LEDs, o que proporciona a redução no custo de um sistema de iluminação com LED, e conseqüentemente se obtém a eficiência energética do conjunto.

Conforme mostrado nos testes, o uso das lentes é um fator importante em um sistema de iluminação com LEDs, por proporcionar uma distribuição mais uniforme e ampla da iluminação. As lentes colimadoras também permitem que o ângulo de emissão dos LEDs seja alterado de acordo com a aplicação a que se destina a luminária.

Com a utilização desses métodos em um projeto de iluminação com LEDs, é possível obter maior eficiência da iluminação, além de se aumentar a qualidade luminosa do projeto.

O próximo capítulo (Capítulo 3) descreve a proposta de um circuito de acionamento de LEDs baseado no conversor *boost*, visando baixo custo e aplicação em baixas potências. Tal circuito será empregado na implementação de uma luminária de LEDs arranjados de forma linear (Capítulo 4), de modo que a geometria do conjunto será definida com base na teoria descrita no presente capítulo.

## **CAPÍTULO 3    CONVERSOR CA-CC TIPO BOOST OPERANDO EM BAIXA FREQUÊNCIA**

### **3.1 INTRODUÇÃO**

A utilização dos LEDs na iluminação está crescendo e o avanço das pesquisas está contribuindo para o aumento da sua eficiência e do seu fluxo luminoso. Em algumas aplicações eles já estão substituindo as lâmpadas incandescentes e fluorescentes, apresentando benefícios como a redução do consumo de energia, redução nos custos de manutenção, alto fluxo luminoso e maior durabilidade.

Contudo o sistema de iluminação com LEDs necessita de um circuito para a sua alimentação. O circuito de acionamento dos LEDs deve ser projetado para ter uma vida útil elevada e um baixo consumo de energia. Este tipo de circuito, conhecido como “driver”, deve utilizar poucos componentes para obter um baixo custo. Em um sistema de iluminação com LEDs o circuito de acionamento é considerado a parte mais fraca do sistema e as falhas são geralmente causadas em função das altas temperaturas (TARASHIOON et al., 2011).

O circuito de acionamento dos LEDs é responsável por fornecer a corrente nominal necessária para o seu funcionamento e o fluxo luminoso emitido por eles é proporcional à corrente, ou seja, variações na corrente acarretarão em variações no fluxo luminoso.

Mudanças nas tensões diretas dos LEDs causam significativas mudanças na corrente, fazendo com que a eficiência luminosa seja afetada. Assim, os circuitos utilizados na alimentação dos LEDs de potência devem garantir uma corrente média constante através dos LEDs, independente das variações em sua tensão direta. Como os LEDs de potência têm uma corrente de operação que é muito superior à dos LEDs tradicionais, o uso de um resistor em série como limitador de corrente torna-se ineficiente devido às perdas consideráveis de potência.

Grande parte dos circuitos de acionamento utilizam capacitores eletrolíticos que, por sua vez, contribuem para reduzir a vida útil de tais circuitos. Os capacitores eletrolíticos de alta qualidade apresentam uma vida útil em torno de 10.000 horas em 105°C e para cada 10°C de aumento na temperatura de operação sua vida útil cai pela metade. Assim, mesmo

empregando esses elementos, a vida útil do circuito pode vir a ser muito inferior à vida útil dos LEDs (CHEN et al., 2012).

De acordo com YU et al. (2009) quanto maior a ondulação da corrente, menor é a vida útil do capacitor eletrolítico. Logo, a eliminação deste componente colabora para a elevação da vida útil dos circuitos de acionamento. Assim, estão sendo desenvolvidos circuitos que não necessitam desse tipo de capacitor ou que utilizam outros tipos como o de poliéster.

Dois tipos de circuitos têm sido propostos na literatura para alimentar LEDs. Os modelos ativos são os mais utilizados porque permitem controlar a corrente que flui através dos LEDs. No entanto, são mais complexos para serem projetados. Já os modelos passivos são mais simples para serem projetados, pois não utilizam chaves controladas eliminando o circuito de controle. Contudo, não possibilitam o controle da corrente através dos LEDs.

### 3.2 CONVERSOR CA-CC DE BAIXA FREQUÊNCIA

Os conversores chaveados utilizados em luminárias LEDs geralmente operam em alta frequência, o que faz com que seu volume seja reduzido. Por outro lado, este tipo de operação ocasiona o surgimento de EMI (Interferência Eletromagnética) e pode exigir um circuito para correção do fator de potência integrado, o que aumenta a complexidade do sistema.

O conversor CA-CC tipo *boost* operando em baixa frequência tem a capacidade de proporcionar um fator de potência naturalmente elevado, o que é consequência da corrente de entrada CA com conteúdo harmônico reduzido (SUGA et al., 1993; MARTINS, 2002).

A Figura 28 ilustra a aplicação do conversor CA-CC tipo *boost* operando em baixa frequência como um circuito de acionamento de LEDs. Nesta figura,  $v_s$  é a tensão na entrada do conversor,  $L$  é a indutância do *boost*,  $D$  é o diodo e  $Q$  é a chave semicondutora (MOSFET). A chave  $Q$  é acionada uma vez no início de cada semiciclo da tensão de entrada, sendo a frequência de chaveamento de 120 Hz (assumindo que a frequência de  $v_s$  é de 60 Hz).

Para a análise do conversor, o conjunto de LEDs é modelado como uma “resistência ( $R_s$ ) em série com uma queda de tensão ( $V_0$ )”. Os demais componentes são considerados ideais para a análise. Com uma seleção adequada do valor da indutância e da largura do pulso, as formas de ondas típicas de interesse para esse conversor são apresentadas na Figura 29.

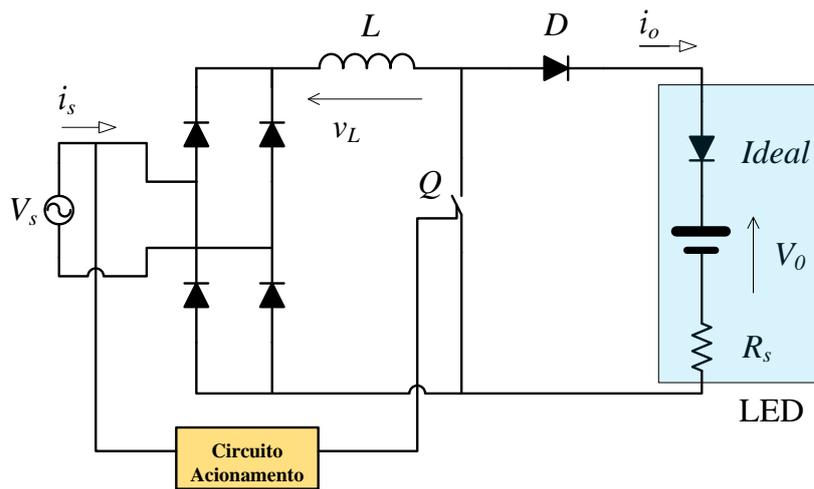


Figura 28 - Conversor CA-CC tipo *boost*.

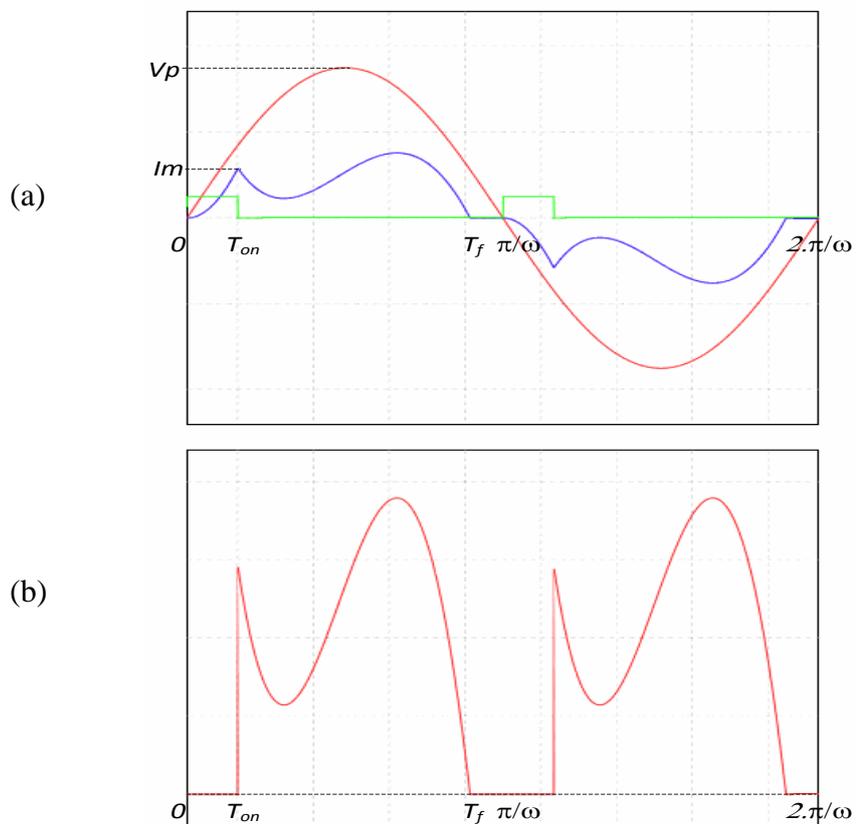


Figura 29 – (a) Tensão de entrada (vermelho), corrente de entrada (azul) e sinal de disparo da chave (verde).  
(b) corrente na saída.

### 3.3 MODELAGEM DO CONVERSOR CA-CC DE BAIXA FREQUÊNCIA

Assumindo que o pico da tensão de entrada seja  $V_p$ , é possível obter a expressão analítica da corrente AC, considerando duas etapas de operação do conversor em cada semiciclo da tensão. A Figura 29 mostra as duas etapas de operação, onde  $T_{on}$  é o tempo no qual a chave  $Q$  permanece ligada e  $T_f$  é o instante em que a corrente de entrada atinge o valor zero.

**Etapa 1:**  $0 \leq t \leq T_{on}$

A etapa 1 representa o instante em que a chave  $Q$  é acionada, o que faz com que a tensão de entrada seja aplicada sobre o indutor  $L$ , ocasionando a polarização reversa do diodo  $D$ , que permanece bloqueado durante esta etapa como é mostrado na Figura 30. Durante este instante ocorre o carregamento da indutância  $L$ .

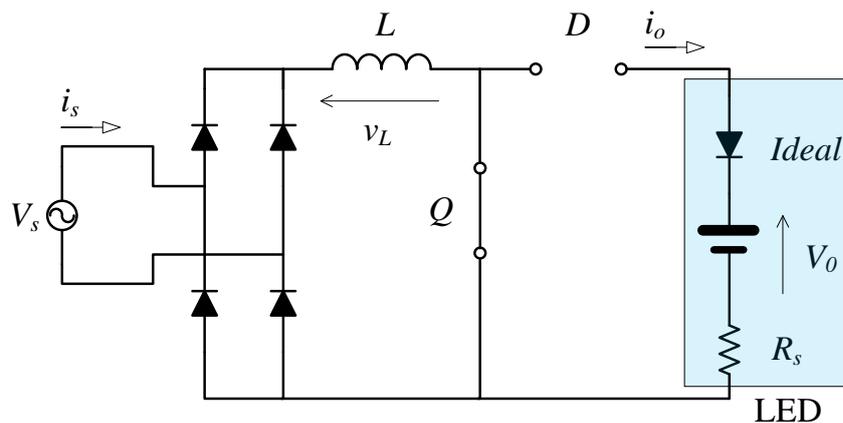


Figura 30 - Circuito da 1ª etapa de operação.

Assim, esta etapa pode ser descrita a partir das seguintes expressões:

$$v_L(t) = v_s(t) = L \frac{di_s}{dt} = V_p \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (17)$$

$$di_s = \frac{V_p}{L} \text{sen}(\omega t) dt \quad (18)$$

$$i_s(t) = \int_0^t \frac{V_p}{\omega L} \text{sen}(\omega t) d(\omega t) \quad (19)$$

$$i_{s1}(t) = \frac{V_p}{\omega L} (1 - \cos(\omega t)) \quad (20)$$

Nas equações acima,  $i_{s1}$  corresponde a corrente de entrada da primeira etapa de operação do conversor,  $v_L$  a tensão na indutância e  $V_p$  o valor de pico da tensão de entrada.

A partir de (20), pode ser determinado o pico de corrente ( $I_m$ ) no final do período, que é dado por:

$$I_m = \frac{V_p}{\omega L} (1 - \cos(\omega T_{on})) \quad (21)$$

**Etapa 2:**  $T_{on} \leq t \leq T_f$

Durante esta etapa a chave  $Q$  está desligada e a indutância descarrega sua energia para a carga através do diodo  $D$  que permanece polarizado diretamente neste intervalo. O circuito que representa esta etapa é mostrado na Figura 31.

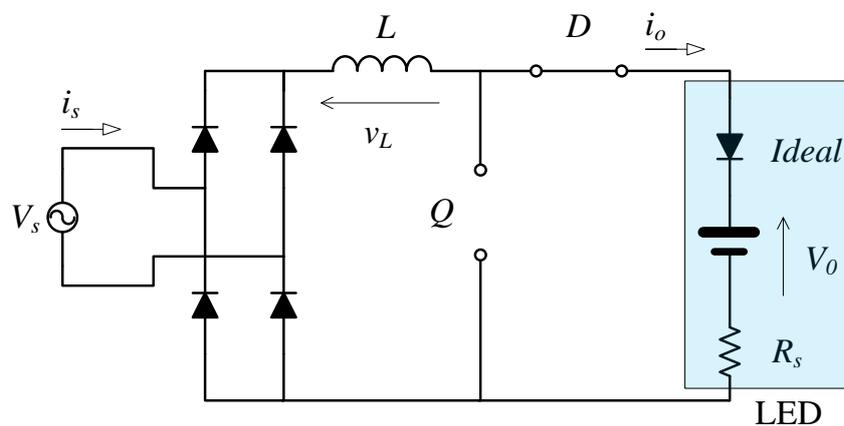


Figura 31 - Circuito da 2ª etapa de operação.

Analisando o circuito tem-se:

$$v_s = v_L + v_{R_s} + V_0 \quad (22)$$

Onde  $v_{R_s}$  representa a tensão sobre a resistência série do LED.

$$V_p \cdot \text{sen}(\omega t) = L \frac{di_s}{dt} + R_s \cdot i_s + V_0 \quad (23)$$

Deslocando a origem dos tempos para  $T_{on}$  temos:

$$t' = t - T_{on} \rightarrow t = t' + T_{on} \quad (24)$$

$$L \frac{di_s}{dt} + R_s \cdot i_s = V_p \cdot \text{sen}(\omega(t' + T_{on})) - V_0 \quad (25)$$

Resolvendo a equação diferencial (25) e substituindo  $t'$  por  $(t - T_{on})$  chegamos a seguinte expressão para a corrente de entrada:

$$i_{s2}(t - T_{on}) = a e^{\frac{-(t-t_1)}{\tau}} - b \quad (26)$$

onde

$$a = \frac{V_0}{R_s} + \frac{V_p}{\omega L} - \frac{V_p R_s^2}{\omega L Z^2} [\cos(\omega T_{on}) + \omega \tau \text{sen}(\omega T_{on})] \quad (27)$$

$$b = \frac{V_0}{R_s} + \frac{V_p R_s}{Z^2} [\omega \tau \cos(\omega t) - \sin(\omega t)] \quad (28)$$

com  $\tau = L/R_s$  e  $Z^2 = [(\omega L)^2 + R_s^2]$ .

É interessante notar que o segundo estágio da corrente de entrada  $i_{s2}$  é exatamente a mesma corrente que passa através do conjunto de LEDs.

O valor de  $T_f$  pode ser encontrado igualando (26) a zero. No entanto, esta solução não pode ser colocada em uma forma fechada. Assim, métodos numéricos devem ser empregados para determinar  $T_f$  para um dado conjunto de parâmetros.

Com o valor de  $T_f$  a corrente eficaz de entrada pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$I_{s \text{ eficaz}} = \sqrt{\frac{\omega}{\pi} \left( \int_0^{T_{on}} [i_{s1}(t)]^2 dt + \int_{T_{on}}^{T_f} [i_{s2}(t)]^2 dt \right)} \quad (29)$$

A corrente média e eficaz de saída são dadas por (30) e (31).

$$I_{o \text{ médio}} = \frac{\omega}{\pi} \int_{T_{on}}^{T_f} i_{s2}(t) dt \quad (30)$$

$$I_{o \text{ eficaz}} = \sqrt{\frac{\omega}{\pi} \int_{T_{on}}^{T_f} [i_{s2}(t)]^2} \quad (31)$$

A partir da análise do conversor é possível concluir que os principais parâmetros a serem escolhidos são  $L$  e  $T_{on}$ . Assim, estabelecendo valores para  $V_p$ ,  $V_o$  e  $R_s$ , os valores de  $L$  e  $T_{on}$  devem ser escolhidos de forma que a corrente atinja um valor desejado. Além disso, não é difícil concluir que estes parâmetros são responsáveis pelo formato da onda da corrente de entrada.

### 3.3.1 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA (FP), DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE CORRENTE E RENDIMENTO DO CONVERSOR

Uma das formas de se avaliar a qualidade do conversor consiste em analisar seu fator de potência, a distorção harmônica total da corrente de entrada (*THD*, do inglês “total harmonic distortion”) e o seu rendimento.

O *THD* é o índice que mede a distorção da forma de onda da corrente de entrada e ela é determinada a partir da seguinte expressão:

$$THD = \frac{\sqrt{I_{s \text{ eficaz}}^2 - I_1^2}}{I_1} \quad (32)$$

Na equação (32)  $I_1$  representa a componente fundamental eficaz da corrente de entrada que é calculada através da análise por série de Fourier.

$$I_1 = \frac{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}{\sqrt{2}} \quad (33)$$

Sendo:

$$a_1 = \frac{2\omega}{\pi} \left[ \int_0^{T_{on}} (I_{s1}(t)) \cdot \cos(\omega t) dt + \int_{T_{on}}^{T_f} (I_{s2}(t)) \cdot \cos(\omega t) dt \right] \quad (34)$$

$$b_1 = \frac{2\omega}{\pi} \left[ \int_0^{T_{on}} (I_{s1}(t)) \cdot \text{sen}(\omega t) dt + \int_{T_{on}}^{T_f} (I_{s2}(t)) \cdot \text{sen}(\omega t) dt \right] \quad (35)$$

O ângulo do fator de potência de deslocamento é dado por:

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left( \frac{-a_1}{b_1} \right) \quad (36)$$

Determinado o *THD* podemos encontrar o fator de potência do conversor através da expressão (37).

$$FP = \frac{\cos(\phi_1)}{\sqrt{1+THD^2}} \quad (37)$$

O cálculo do rendimento do conversor é feito com base nas suas potências de saída e entrada. Logo, as potências de entrada e saída são determinadas através das expressões (38) e (39).

$$P_{in} = \frac{\omega}{\pi} \left[ \int_0^{T_{on}} (I_{s1}(t)) \cdot V_p \cdot \text{sen}(\omega t) dt + \int_{T_{on}}^{T_f} (I_{s2}(t)) \cdot V_p \cdot \text{sen}(\omega t) dt \right] \quad (38)$$

$$P_{out} = \frac{\omega}{\pi} \left[ \int_{T_{on}}^{T_f} (I_{s2}(t)) \cdot V_0 dt + \int_{T_{on}}^{T_f} (I_{s2}(t))^2 \cdot R_s dt \right] \quad (39)$$

A partir de (38) e (39) podemos encontrar o rendimento do conversor que é dado por:

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 \quad (40)$$

### 3.3.2 NORMALIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DA CORRENTE DE SAÍDA

A corrente através dos LEDs definida por (26), (27) e (28), depende de vários parâmetros do conversor, logo, colocá-la em uma forma normalizada ajuda a simplificar o projeto do conversor. Manipulando estas equações e dividindo elas por  $V_p/(\omega L)$  é obtido:

$$i_n(t-T_{on}) = a_n e^{\frac{-(t-T_{on})}{\tau}} - b_n \quad (41)$$

onde

$$a_n = \frac{a}{V_p/(\omega L)} = q\omega\tau + 1 - \frac{1}{1+(\omega\tau)^2} [\cos(\omega T_{on}) + \omega\tau \sin(\omega T_{on})] \quad (42)$$

$$b_n = \frac{b}{V_p/(\omega L)} = q\omega\tau + \frac{\omega\tau}{1+(\omega\tau)^2} [\omega\tau \cos(\omega t) - \sin(\omega t)] \quad (43)$$

sendo  $q = V_o/V_p$ .

A Figura 32 mostra as formas de onda normalizadas da corrente para diferentes valores de  $q$ . Nas curvas foram adotados  $\omega = 377$  rad/s,  $\tau = 1,9$  ms e  $T_{on} = 2$  ms.

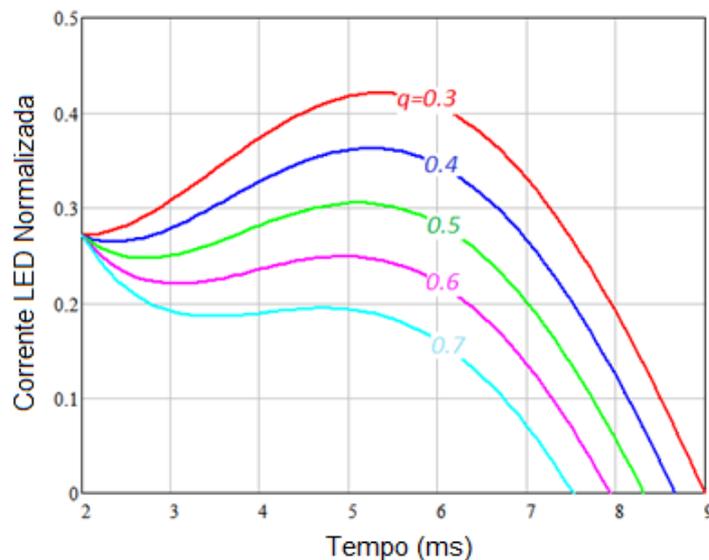


Figura 32 - Formas de onda normalizadas da corrente no LED em função de  $q$ .

A Figura 32 revela que à medida que  $q$  decresce a ondulação da forma de onda fica mais eminente. No entanto, o aumento deste parâmetro ocasiona a redução do valor de pico e

a redução de  $T_f$ . Em ambos os casos o conteúdo harmônico da corrente na entrada e na saída pode tornar-se indesejado. Também é possível observar que baixos valores de  $q$  fazem com que a corrente não chegue à zero antes do final do semiciclo, o que poderia resultar em um alto  $THD$  e baixo fator de potência.

### 3.3.3 COMPORTAMENTO DA FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE ENTRADA

O formato da onda da corrente de entrada sofre grande influência dos parâmetros  $T_{on}$  e  $L$ , o que torna a determinação deles um fator importante na hora de projetar o conversor.

Na Figura 33 são apresentadas duas formas de onda da corrente de entrada para diferentes valores de  $T_{on}$  e  $L$ .

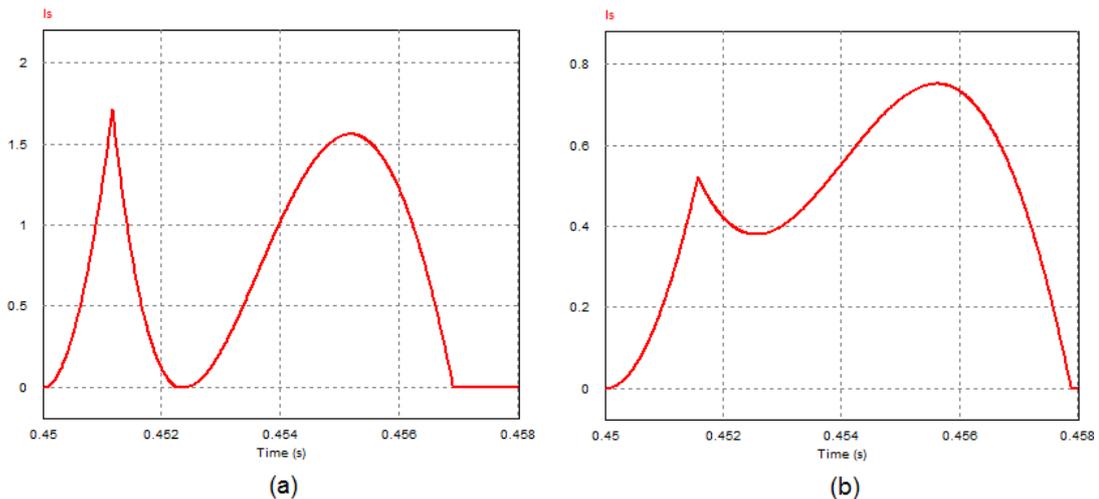


Figura 33 - Formas de onda da corrente de entrada para diferentes valores de  $T_{on}$  e  $L$ .

Observando a curva da Figura 33 (a), nota-se que ocorre uma descontinuidade na corrente entre  $T_{on}$  e  $T_f$  o que não ocorre na curva da Figura 33 (b). A situação da Figura 33 (a) deve ser evitada, pois, este tipo de forma de onda submete os componentes do circuito a um esforço de corrente provocado pelo valor de pico, além de um indesejado aumento do conteúdo harmônico que ocasiona a redução do fator de potência (MARTINS, 2002).

O valor de  $T_{on}$  deve ser maior que um valor mínimo para evitar uma descontinuidade adicional na corrente de entrada. A determinação do valor mínimo de  $T_{on}$  é feita através da

análise do comportamento de  $T_f$  para diferentes valores de  $T_{on}$ , o que é apresentado na seção do projeto da luminária. Os valores de  $T_{on}$  e  $L$  a serem escolhidos vão depender do nível médio de corrente desejado na saída do circuito.

### 3.4 SIMULAÇÃO

A fim de se verificar a validade do modelo do conversor apresentado neste Capítulo, foi realizada a simulação do circuito no PSIM. A simulação foi feita considerando  $V_p = 40$  V,  $V_0 = 24,3$  V,  $R_s = 16,2$   $\Omega$ ,  $f = 120$  Hz  $T_{on} = 1,4$  ms e  $L = 30$  mH.

Na simulação não foi utilizado o diodo *boost*, devido à natureza unidirecional da corrente de saída proporcionada pelos diodos retificadores da ponte. Além disso, não há elemento capacitivo em paralelo com os LEDs.

Desta forma, o circuito simulado é exibido na Figura 34.

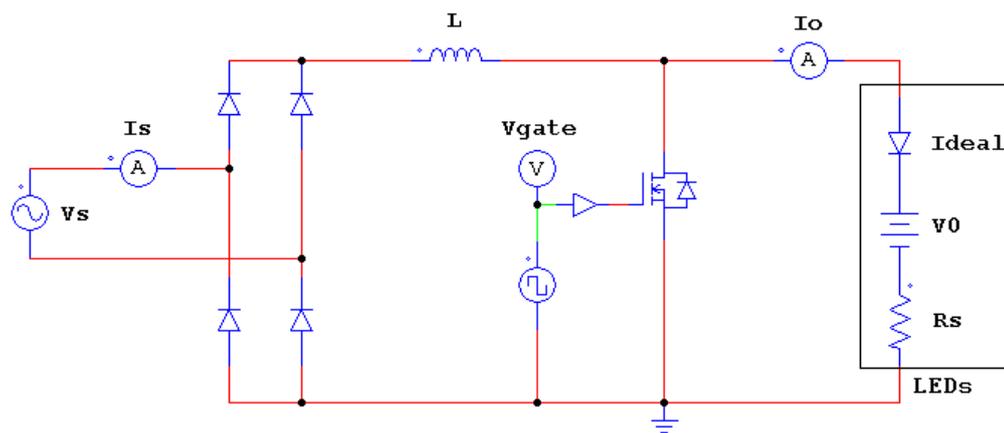


Figura 34 - Circuito do conversor simulado no PSIM.

A Figura 35 apresentam as formas de onda da tensão e corrente na entrada e saída do conversor.

A Tabela 4 mostra os valores de tensão e corrente obtidos na simulação do conversor e os valores teóricos calculados. Conforme observado, há uma boa concordância entre teoria e simulação, o que qualifica o modelo teórico para o projeto de um conversor experimental (Capítulo 4).

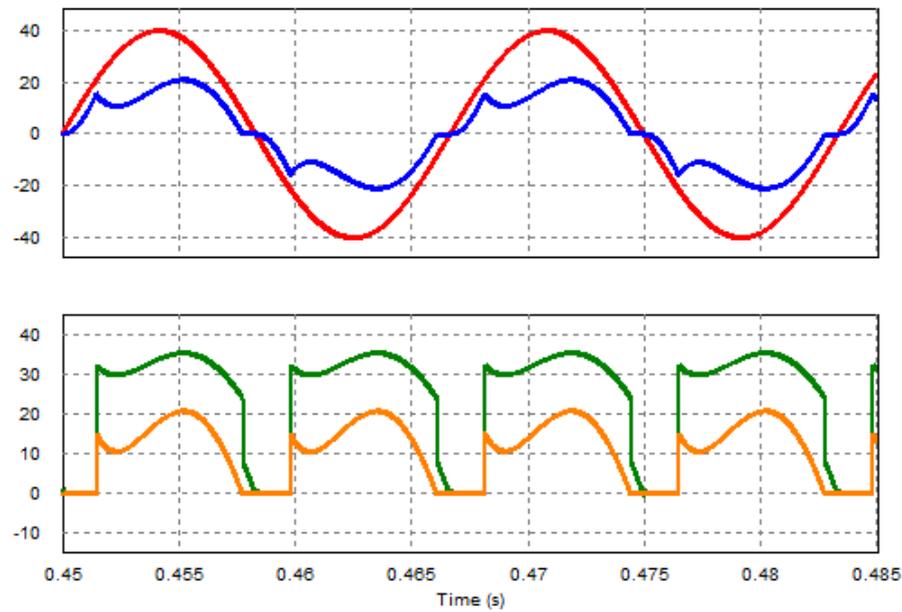


Figura 35 - Resultado da simulação do conversor. Tensão (vermelho) e corrente (azul, x30) na entrada; tensão (verde) e corrente (laranja, x30) na saída.

Tabela 4 - Valores obtidos por simulação e equacionamento teórico.

Parâmetros	Simulação	Teórico
$I_s$ (rms)	504,12 mA	486,43
$I_o$ (médio)	409,59 mA	396,45
$T_f$	7,88 ms	7,86 ms
$FP$	0,97	0,96
$THD$	22,15 %	20,28 %

### 3.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo foram apresentadas as etapas de funcionamento do circuito do conversor CA-CC tipo *boost* operando em baixa frequência, além do equacionamento referente a cada etapa. Através destas equações é possível projetar um conversor para uma determinada aplicação.

Foi demonstrado também, que os principais parâmetros a serem escolhidos no projeto do conversor são os valores de  $L$  e  $T_{on}$ , pois influenciam no formato da onda da corrente. Uma

sugestão de procedimentos para a determinação destes parâmetros é considerada no próximo capítulo.

Uma simulação foi realizada para verificar o comportamento do conversor quando alimentando um conjunto de LEDs. As formas de ondas obtidas na simulação comprovam a validade do modelo do conversor CA-CC tipo *boost* apresentado neste capítulo.

No próximo capítulo, a teoria desenvolvida neste Capítulo 3 será empregada no projeto de uma luminária linear a LEDs de 11W.

## CAPÍTULO 4 PROJETO DA LUMINÁRIA LED DE MESA DE 11 W DE BAIXO CUSTO

### 4.1 INTRODUÇÃO

O conversor CA-CC *boost* de baixa frequência implantado neste projeto tem por objetivo alimentar uma luminária LED de mesa de baixa potência. O protótipo desse conversor foi projetado sem utilizar capacitores eletrolíticos, possibilitando assim que tenha uma vida útil mais elevada.

A luminária proposta é formada por nove LEDs de potência, conectados em série e percorridos pela mesma corrente elétrica, obtendo, desta forma, fluxos luminosos bem parecidos. Ao construir uma luminária utilizando diodos emissores de luz pretende-se apresentar melhor eficácia luminosa, além de um fluxo luminoso direcional o que dispensa a utilização de calhas refletoras.

Na Figura 36 podemos observar que o fluxo luminoso de uma luminária LED é direcional e o de uma luminária com lâmpada convencional é difuso.

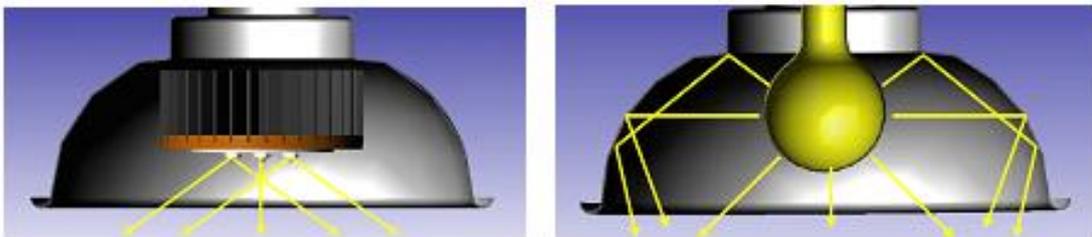


Figura 36 - Fluxo luminoso de uma luminária LED e de uma luminária com lâmpada convencional.

A seguir, serão apresentados os passos do projeto da luminária LED e os resultados experimentais obtidos do protótipo construído em laboratório, com o propósito de validar o modelo apresentado.

## 4.2 METODOLOGIA DE PROJETO

O projeto da luminária de mesa de baixa potência começa com a escolha da potência de saída e com a especificação do fluxo luminoso.

A maioria das luminárias de mesas comerciais utilizam lâmpadas fluorescentes com potências entre 10 W e 15 W. Supondo que uma lâmpada de LED pode fazer o trabalho com uma eficiência 30% maior (devido à sua melhor eficácia luminosa e uma distribuição mais objetiva da iluminação sobre a área pretendida), a potência do conjunto de LEDs poderia ser de cerca de 11 W. Estabelecida esta potência de 11 W almeja-se uma eficiência energética comparada com os modelos das fluorescentes, mas com uma vida útil superior à dessas lâmpadas.

Como os LEDs serão ligados em série, a tensão em seus terminais pode atingir baixos valores (menores que 40 V, assumindo LEDs 1 W / 3 W que apresentam tensão direta menores que 4 V entre seus terminais). Neste caso, se a tensão de entrada for 110 V ou 220 V,  $q$  pode ser menor que 0,2, resultando em distorção na forma de onda da corrente, atingindo um fator de crista indesejado. Para evitar que isso ocorra será necessário empregar um transformador abaixador, que terá por finalidade reduzir a tensão de entrada a um valor razoável próximo da tensão do conjunto de LEDs.

Assumindo nove LEDs associados em série, operando com 1,2 W cada, tensão direta de aproximadamente 3,5 V, será requerida uma corrente de 340 mA. Em caso de uma corrente descontínua como a da Figura 29 (a), a corrente média de saída precisará ser um pouco maior, 380 mA.

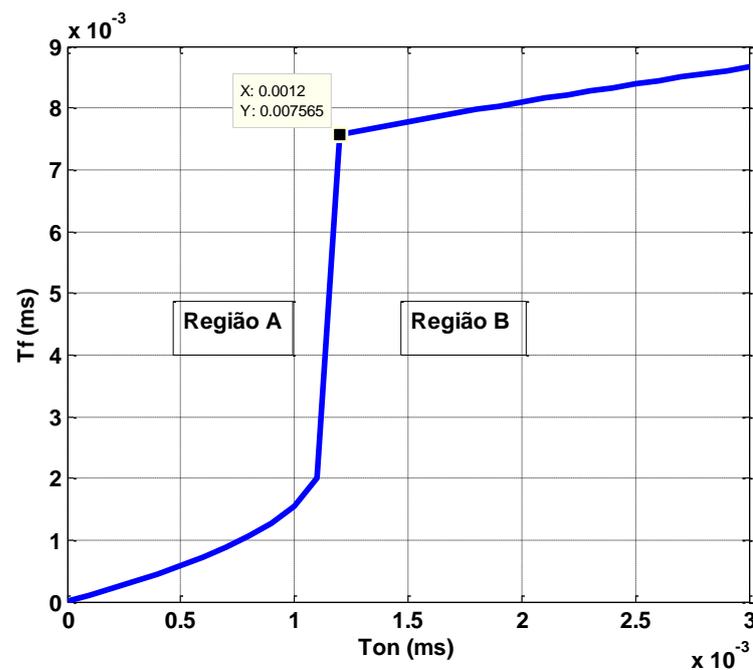
Para essa corrente média, o valor de pico pode ser maior que 700 mA através dos LEDs se o pré-regulador *boost* de baixa frequência for adotado. Embora a corrente média de 380 mA possa ser tolerada por alguns LEDs de 1 W, eles teriam que operar acima da corrente limite de pico. Assim, neste caso, a potência do LED deve ser de 2 W ou 3 W. Logo, para a implementação da luminária foi escolhido utilizar o LED Everlight EPH-AX08EL/LM01H-P03/3035/Y/N1. Na Tabela 5 são exibidos seus principais parâmetros.

Utilizando os dados da Tabela 5, foram obtidas uma queda de tensão ( $V_o$ ) de 24,3 V e uma resistência equivalente ( $R_s$ ) de 16,2  $\Omega$  para o conjunto de 9 LEDs. Assim, seria esperada uma tensão direta de 29,2 V. Neste caso, seria recomendado utilizar um transformador com tensão no secundário de 30 V<sub>rms</sub>.

Tabela 5 - Parâmetros do LED Everlight EHP-AX08EL 3W.

Parâmetro	Valor
<b>Máxima Potência de Operação</b>	3 W
<b>Tensão de Joelho</b>	2,7 V
<b>Resistência Equivalente</b>	1,8 $\Omega$
<b>Temperatura de Cor</b>	3250 K
<b>Ângulo de Visão</b>	140°
<b>Eficiência Óptica</b>	55 lm/W
<b>Fluxo Luminoso</b>	75 lm @ 300 mA
<b>Máxima Corrente de Operação</b>	700 mA
<b>Corrente Pulsada (0,25 duty cycle)</b>	1000 mA
<b>Índice de Reprodução de Cores</b>	75

O problema da escolha do valor de  $T_{on}$  pode ser explicado com a ajuda do gráfico da Figura 37.

Figura 37 - Comportamento de  $T_f$  para diferentes  $T_{on}$ .

Este gráfico exibe o comportamento de  $T_f$  em função da variação de  $T_{on}$  para valores típicos. Como pode ser visto, valores de  $T_{on}$  inferiores a 1,2 ms resultam em uma forma de

onda indesejada como a da Figura 33 (a). O gráfico da Figura 37 foi plotado para diversos valores de  $T_{on}$  (0,6 ms a 12 ms) e um comportamento similar foi observado. No entanto, o exato valor de  $T_{on}$  irá depende de  $\tau$  e da corrente média desejada na saída dada por (44).

$$I_o = \left( \frac{\omega}{\pi} \int_{T_{on}}^{T_f} i_n(t - T_{on}) dt \right) \frac{V_p}{\omega \tau R_s} \quad (44)$$

com  $i_n(t - T_{on})$  dado por (41).

Como já notado,  $T_f$  é encontrado através de métodos numéricos. Programas matemáticos como (Mathcad, Matlab etc.) podem ser utilizados para determinar as curvas parametrizadas como as da Figura 38, que representam a corrente média nos LEDs para diversos valores de  $\tau$  e  $T_{on}$ . Para este caso,  $q = 0.68$ ,  $\omega = 377$  rad/s,  $V_p = 36$  V,  $V_o = 24.3$  V e  $R_s = 16.2 \Omega$ .

As curvas da Figura 38 podem ser usadas para ajudar a determinar o valor de  $T_{on}$  e da indutância  $L$ . Por exemplo, se uma corrente média de saída de 380 mA for desejada, pode ser selecionado  $T_{on} = 2$ ms, que determina um  $\tau$  de aproximadamente 2 ms e consequentemente um valor de indutância de 32,4 mH. No entanto, outros pares de  $(T_{on} - \tau)$ , podem satisfazer o valor de corrente especificado, mas sempre lembrando o valor mínimo de  $T_{on}$  indicado na Figura 37.

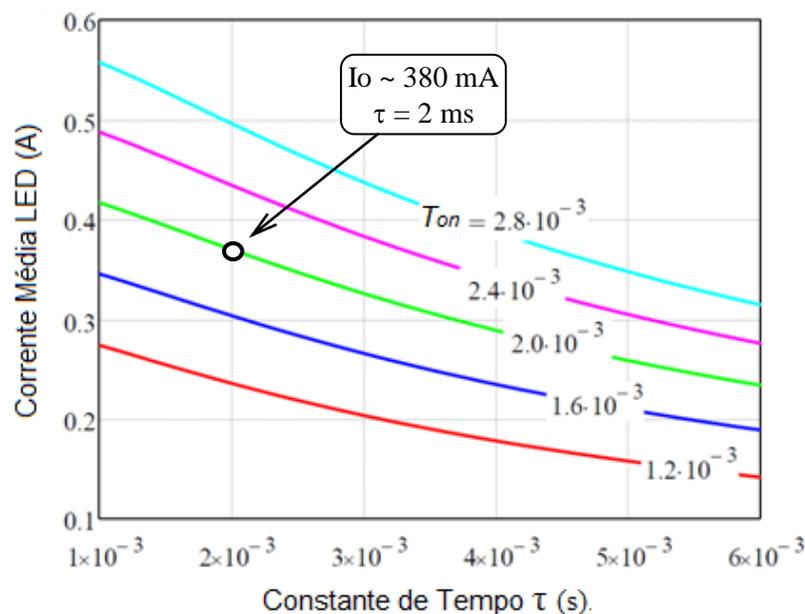


Figura 38 - Corrente média na saída em função da variação de  $\tau$  e  $T_{on}$ .

A Tabela 6 mostra os valores dos principais parâmetros utilizados para implementação do protótipo proposto.

Tabela 6 - Parâmetros da luminária LED.

Parâmetro	Valor
<b>Potência na saída</b>	11 W
<b>Tensão de pico no secundário</b>	36 V
<b>Corrente média no conjunto de LEDs</b>	380 mA
$T_{on}$	2 ms
<b>Indutância</b>	32 mH

#### 4.3 ARRANJO DE LEDS PARA A LUMINÁRIA DE MESA

Para a construção da luminária, os diodos emissores de luz foram distribuídos linearmente sobre uma barra de alumínio que tem a função de suporte e também de dissipar o calor gerado na junção dos LEDs.

Para que o fluxo luminoso total dos LEDs seja uniforme sobre o local que se deseja iluminar é necessário que os LEDs sejam arranjados de forma correta sobre a barra de alumínio. Com uma distribuição correta dos LEDs a iluminação se torna uniforme eliminando o aparecimento de zebramento.

A determinação do espaçamento entre os LEDs foi feita com base na teoria apresentada no Capítulo 2. Neste caso, foi adotado o arranjo linear para os LEDs sendo o espaçamento calculado através de (10). Para o cálculo foi considerada uma altura de 40 cm entre os LEDs e o anteparo, que é a altura típica das luminárias de mesas.

A Tabela 7 apresenta os parâmetros dos LEDs e a distância máxima ( $d_{max}$ ) entre eles calculada.

Na Figura 39 é indicado um layout do espaçamento entre os LEDs para um arranjo linear. O espaçamento adotado neste projeto foi de 3,15 cm para que a luminária não ficasse com um comprimento muito grande.

Tabela 7 - Parâmetros para o espaçamento dos LEDs.

Parâmetros	Valores
$\theta_{1/2}$	75°
$m$	0.513
$d_{max}$	24 cm

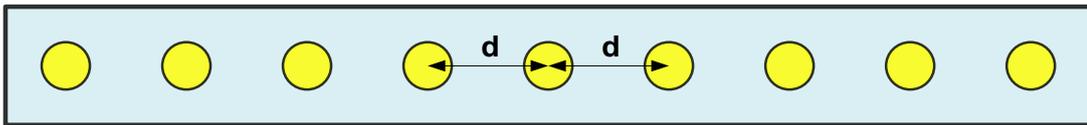


Figura 39 - Layout da distribuição linear dos LEDs.

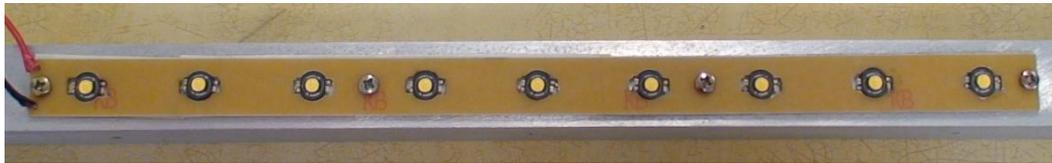


Figura 40 - LEDs montados sobre a barra de alumínio.

A fim de verificar se o conjunto de LEDs emitia um fluxo uniforme foi utilizada uma fonte CC para alimentar os LEDs com corrente nominal. A barra de alumínio foi colocada a 40 cm de um anteparo para verificar a distribuição do fluxo luminoso do conjunto de LEDs sobre a superfície, o que pode ser notado na Figura 41.

Observando a figura pode-se notar que a distribuição do fluxo luminoso sobre o anteparo é uniforme, o que demonstra que os LEDs foram espaçados de forma correta. Assim, a luminária é capaz de fornecer uma iluminação de qualidade.

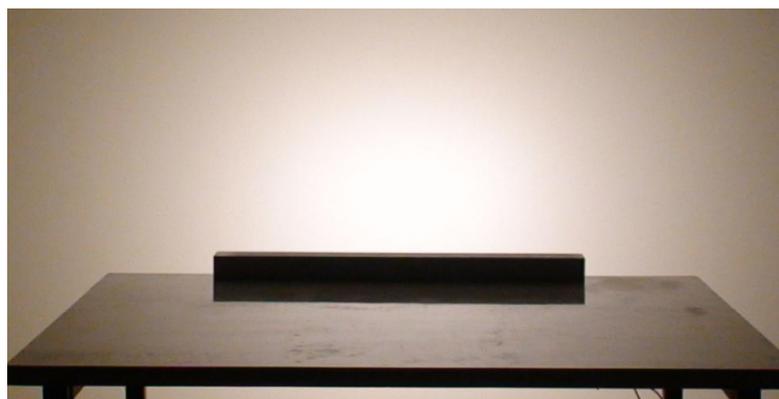


Figura 41 - Distribuição do fluxo luminoso do conjunto linear de LEDs.

#### 4.4 CIRCUITO DE DISPARO DO MOSFET

O disparo do MOSFET do conversor CA-CC tipo *boost* é feito através de um circuito formado por um comparador e um CI 555. O circuito é simples e de baixo custo se comparado com os CIs dedicados existentes no mercado. O pulso na saída do circuito é gerado sempre que a senoide passa por zero sendo o MOSFET acionado a cada semiciclo. Na Figura 42 é apresentado o circuito de disparo.

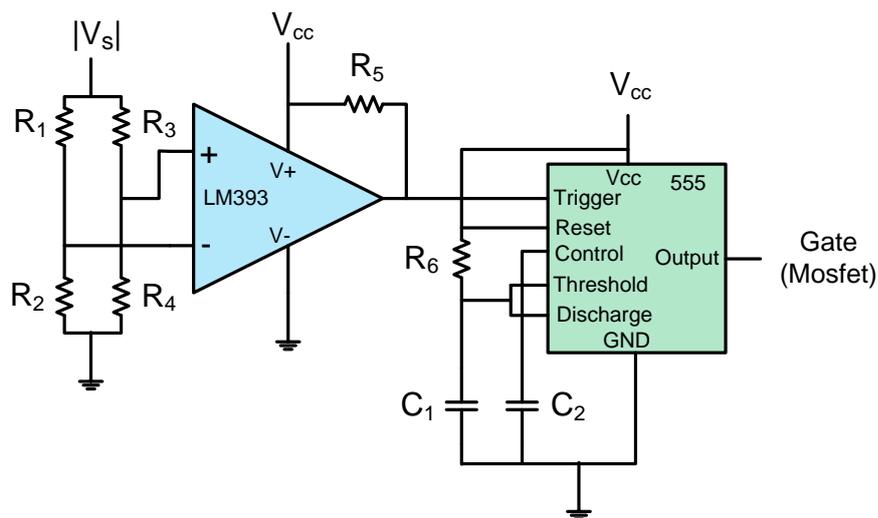


Figura 42 - Circuito de disparo do MOSFET.

No circuito da Figura 42, o comparador LM394 é utilizado para detectar a passagem por zero da senoide de entrada. Na entrada (+) é feita a leitura da senoide e na entrada (-) é feita a leitura de um sinal muito pequeno com valor próximo de zero. Quando o sinal de (+) é inferior ao de (-) significa que a senoide passou por zero fazendo a saída do comparador ir para nível lógico baixo.

Como o CI555 está na configuração monoestável, é gerado um pulso com uma largura determinada através da configuração de  $R_6$  e  $C_1$ . A determinação do valor de  $R_6$  e  $C_1$  é feita através da equação (45), onde  $T_{on}$  (tempo em que o MOSFET permanece acionado) é calculado de acordo com o projeto do conversor. Logo, adota-se um valor para um dos parâmetros e o outro é calculado através da equação.

$$T_{on} = 1.1 \cdot R_6 \cdot C_1 \quad (45)$$

Na Figura 43 são apresentadas as formas de onda da senoide e dos sinais na saída do comparador e na saída do CI555 para um caso genérico.

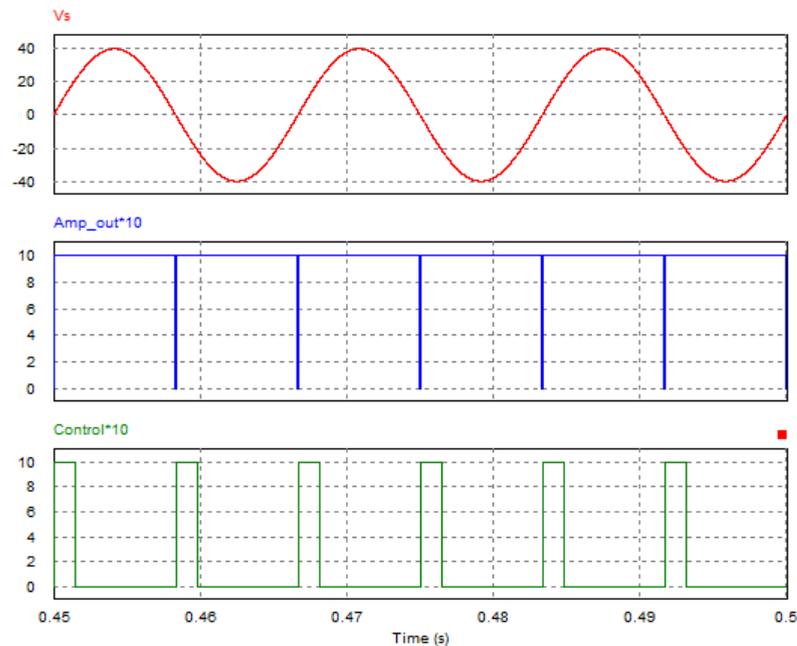


Figura 43 - Senoide de entrada (vermelho), sinal na saída do comparador (azul) e sinal na saída do CI555 (verde).

## 4.5 PROJETO DO INDUTOR BOOST

Um dos elementos fundamentais do conversor CA-CC tipo *boost* é o seu indutor. Este é responsável por fornecer energia para a saída durante o instante em que a chave permanece aberta. Logo, o projeto adequado do elemento magnético é de fundamental importância para o correto funcionamento do conversor.

Os materiais mais comuns utilizados na fabricação de núcleos magnéticos são o ferrite e as lâminas de ferro-silício. Cada tipo apresenta sua particularidade para determinada aplicação, sendo as lâminas de ferro-silício indicadas para operações em baixas frequências, pois em altas frequências ocorre o aumento das perdas por histerese e elevação da temperatura. No caso de operação em altas frequências são utilizados núcleos de ferrite por apresentarem perdas mais baixas (BARBI et al., 2002; MCLYMAN, 2004).

Neste projeto foram utilizadas lâminas de ferro-silício para a construção do núcleo do indutor, em função do conversor CA-CC tipo *boost* operar em baixa frequência. As lâminas empregadas foram as do tipo EI padronizadas, onde suas dimensões são em função da largura do tronco central.

A Figura 44 mostra o formato de uma lâmina EI e suas dimensões.

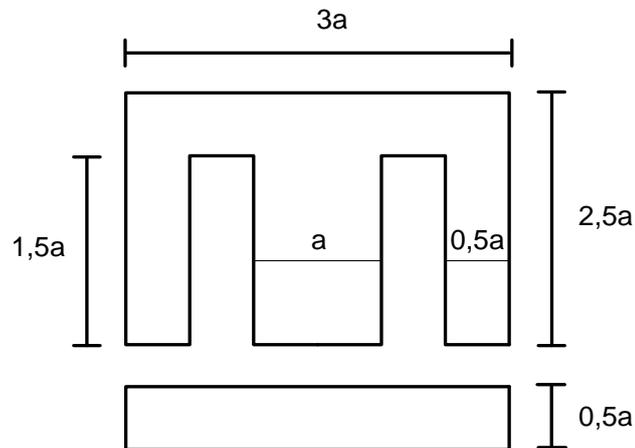


Figura 44 - Lâminas EI padronizadas

Na Figura 45 temos a imagem de um núcleo formado a partir da união de várias lâminas de ferro-silício. O tamanho e o número de lâminas utilizadas são determinados através do projeto do indutor, podendo variar.

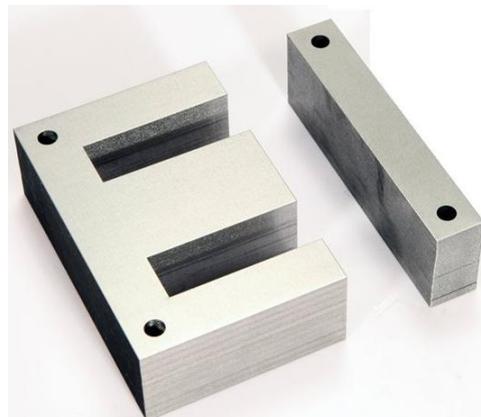


Figura 45 - Núcleo formado por lâminas de ferro-silício.

#### 4.5.1 METODOLOGIA DO PROJETO DO INDUTOR

Para projetar o indutor com núcleo laminado EI é necessário determinar alguns parâmetros de acordo com os passos a seguir (MARTIGNONI, 1991):

##### **i – Determinação da reatância**

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L \quad (46)$$

Onde  $f$  é a frequência de chaveamento e  $L$  o valor da indutância desejada.

##### **ii – Cálculo da queda de tensão**

$$\Delta V = X_L \cdot I_L \quad (47)$$

Onde  $I_L$  é a corrente através do indutor.

##### **iii – Determinação da potência**

$$W_L = \frac{\Delta V \cdot I_L}{2} \quad (48)$$

##### **iv – Cálculo da seção geométrica do núcleo**

$$S_g = a \cdot b \quad (49)$$

Onde  $a$  é a largura do tronco central e  $b$  é o comprimento do pacote laminado.

##### **v – Cálculo da seção magnética do núcleo**

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_L}{f}} \quad (50)$$

$$S_m = \frac{S_g}{1,1} \quad (51)$$

#### vi – Determinação do número de espiras

$$N_{exp} = \frac{\Delta V \cdot 10^8}{4,44 \cdot B_M \cdot S_m \cdot f} \quad (52)$$

Onde  $B_M$  é a indução máxima no ferro, que para lâminas de ferro silício com resfriamento natural é aproximadamente 11.300 gauss.

#### vii – Cálculo da seção do condutor do indutor

$$S_{fio} = \frac{I_L}{d} \quad (53)$$

Onde  $d$  representa a densidade de corrente que é de 3 A/mm<sup>2</sup>.

#### viii – Cálculo da espessura do entreferro

O comprimento do circuito magnético no ferro é dado por:

$$l_{ferro} = 5,6 \cdot a \quad (54)$$

Também sabemos que

$$N_{espiras} \cdot I_M = N_{espiras} \cdot I_L \cdot \sqrt{2} \quad (55)$$

Onde  $I_M$  é a corrente de magnetização.

As Ampère-espiras máximas para a magnetização do núcleo é:

$$A_{eF} = 5,6 \cdot I_F \quad (56)$$

O valor das Ampère-espiras máximas destinadas ao entreferro é dado por:

$$A_{eE} = N_{\text{espiras}} \cdot I_M - A_{eF} \quad (57)$$

Com os dados acima é possível calcular o valor da espessura do entreferro através da seguinte expressão:

$$l_E = \frac{A_{eE}}{0,8 \cdot B_M \cdot 2} \quad (58)$$

#### 4.5.2 INDUTOR PARA O CONVERSOR CA-CC

O valor da indutância adotado para o conversor será de 32 mH. Com este valor serão utilizadas as expressões acima para determinar os parâmetros do projeto do indutor. Os cálculos serão realizados para uma corrente eficaz no indutor de 450 mA. No projeto foi utilizado o núcleo de um pequeno transformador.

Na Tabela 8 estão apresentados os dados do projeto do indutor.

Tabela 8 - Parâmetros do projeto do indutor.

Parâmetros	Valor
<b>Largura do tronco central (a)</b>	0,951 cm
<b>Número de lâminas</b>	20
<b>Espessura do núcleo (b)</b>	0,8939 cm
<b>Número de espiras</b>	221
<b>Fio esmaltado</b>	27 AWG
<b>Espessura do entreferro</b>	0,2 mm
<b>R<sub>L</sub></b>	3,85 Ω

Na Figura 46 temos a imagem do indutor construído.

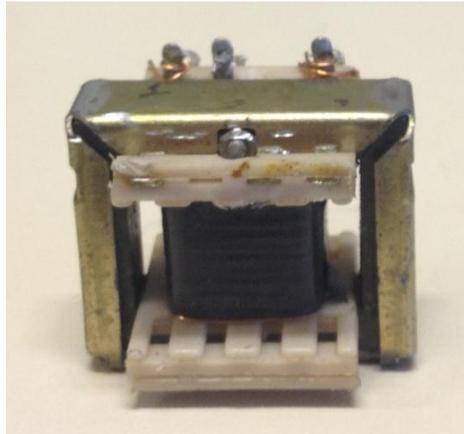


Figura 46 - Indutor projetado para o Conversor CA-CC.

#### 4.6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O conversor CA-CC tipo *boost* de baixa frequência para alimentar uma luminária LED foi implementado em laboratório e seus parâmetros e componentes adotados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Principais componentes utilizados na construção da luminária.

Parâmetros	Valor
<b>Transistor (Chave)</b>	IRF740
<b>Diodos</b>	1N4001
<b>Transformador</b>	127 – 15 + 15, 60 Hz
<b>Indutor <i>Boost</i></b>	Núcleo laminado EI, 32 mH
<b>CI de Chaveamento</b>	LM 555
<b>Deteção de Zero</b>	LM 393
<b>Dissipador de Calor</b>	Alumínio, 30 cm

Na Figura 47 temos o circuito do conversor e na Figura 48 é exibido o protótipo construído em laboratório.

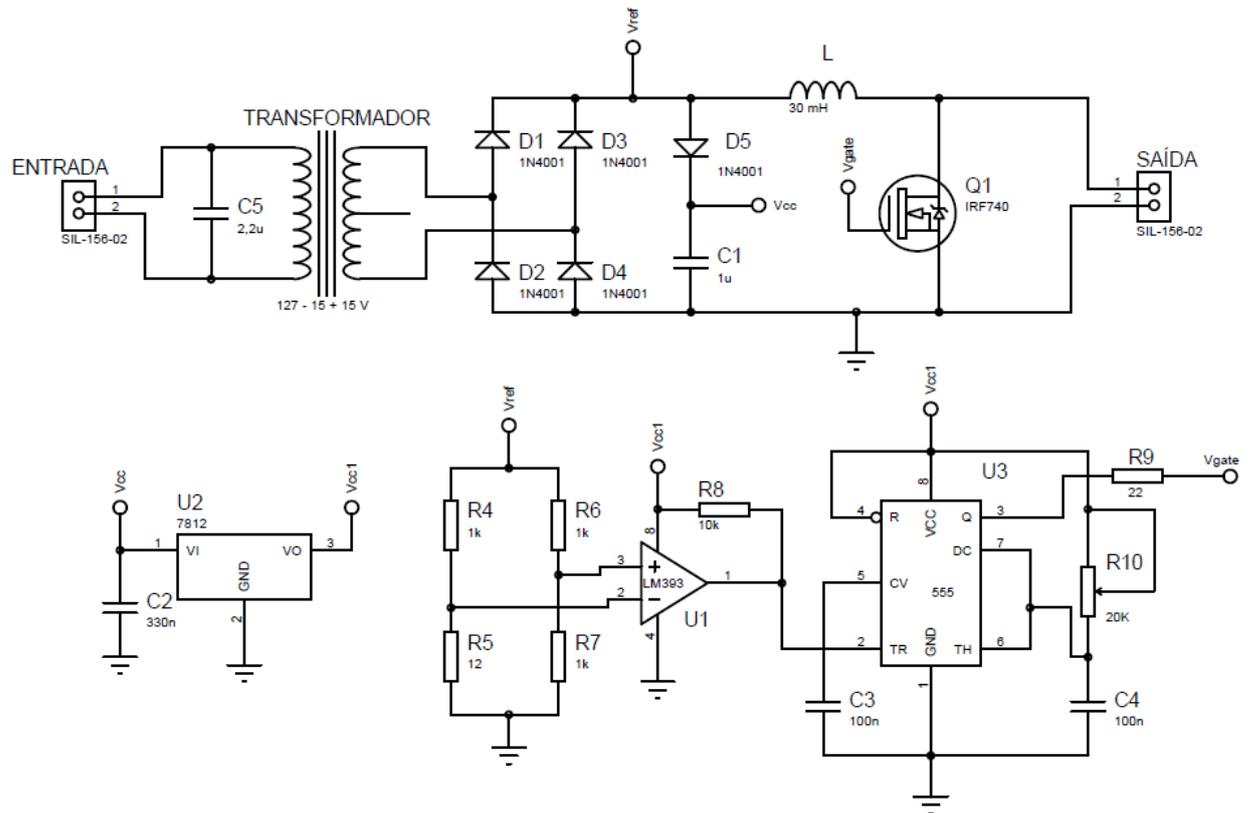


Figura 47 - Circuito do conversor CA-CC tipo *boost* construído em laboratório.

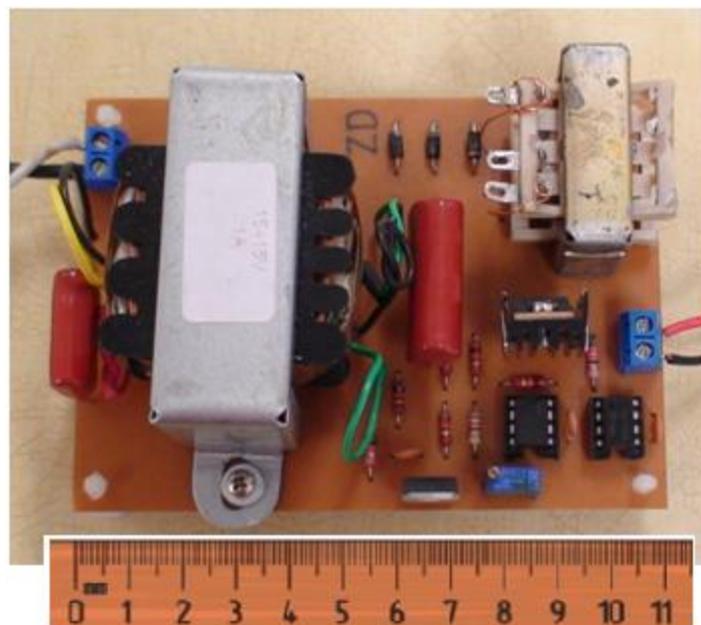


Figura 48 - Protótipo do conversor construído em laboratório.

Como pode ser observado na Figura 48 o circuito é constituído de poucos componentes, o que permite ter um tamanho reduzido. Um inconveniente deste protótipo é a

presença do transformador na entrada do circuito, que ocasiona o aumento do peso do protótipo, além de ser responsável por uma redução no rendimento global do conversor. Essa redução na eficiência do conversor devido ao transformador também já foi relatada em Alonso et al. (2011).

A Figura 49 mostra a tensão e corrente na entrada do conversor, como visto nos terminais da ponte de diodos da Figura 47 (secundário do transformador). Um alto fator de potência de 0,98 foi alcançado.

Na Figura 50 é mostrada a tensão e corrente nos terminais dos LEDs e na Figura 51 o sinal de disparo do MOSFET.

Como pode ser observado, a corrente média nos LEDs é aproximadamente 350 mA, enquanto o valor de pico é de 800 mA. Ambos os valores estão em conformidades com os parâmetros do LED escolhido, apresentados na Tabela 5. Além disso, essas grandezas se aproximam dos valores teóricos e simulados apresentados anteriormente.

O valor de  $T_{on}$  gerado pelo circuito de disparo foi de 2 ms, obtido através do ajuste dos elementos externos associados ao circuito integrado LM 555. A potência total do conjunto de LEDs foi de 10,7 W, sendo próxima do valor desejado.

Devido ao fato de o conversor operar em malha aberta, eventuais flutuações na tensão de entrada podem gerar alterações nos parâmetros de saída do circuito. Um controlador em malha fechada poderia ser usado para se evitar essas alterações. No entanto, esse não é o objetivo do presente trabalho.

A Figura 52 mostra a tensão e a corrente no primário do transformador. Devido à indutância de magnetização, o formato de onda da corrente difere da obtida no secundário. Outro efeito relevante é a presença de um ângulo de atraso na corrente, que pode reduzir o fator de potência. Para minimizar esse problema, foi conectado um pequeno capacitor nos terminais do primário do transformador. Com este procedimento, o fator de potência medido foi de 0,97. Os limites de harmônicos não foram avaliados para este conversor, sendo esse assunto delegado a um futuro trabalho.

Foi utilizado o Digital Power Meter WT230 da Yokogawa para medir as potências na entrada e na saída do circuito e conseqüentemente o rendimento do conjunto. Os valores medidos estão representados na Tabela 10.

De acordo com a Tabela 10, pode-se notar que o transformador é responsável pela redução do rendimento global do conjunto, gerando aproximadamente 20% de perdas.

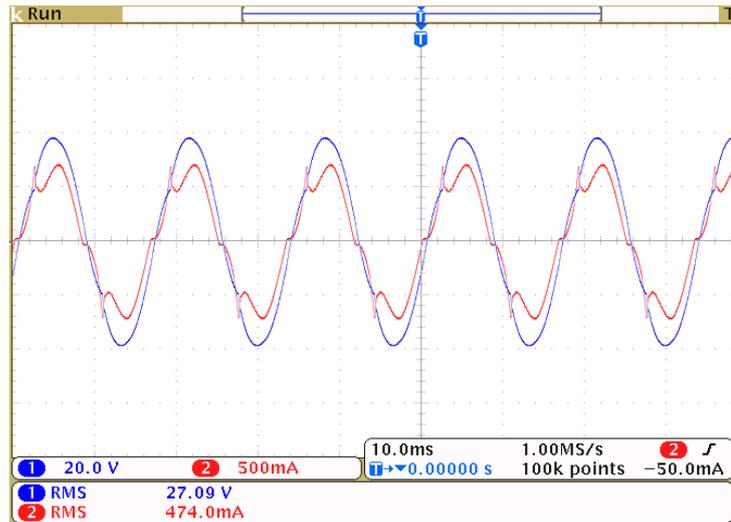


Figura 49 - Tensão no secundário (azul) e corrente na entrada da ponte retificadora (vermelho).

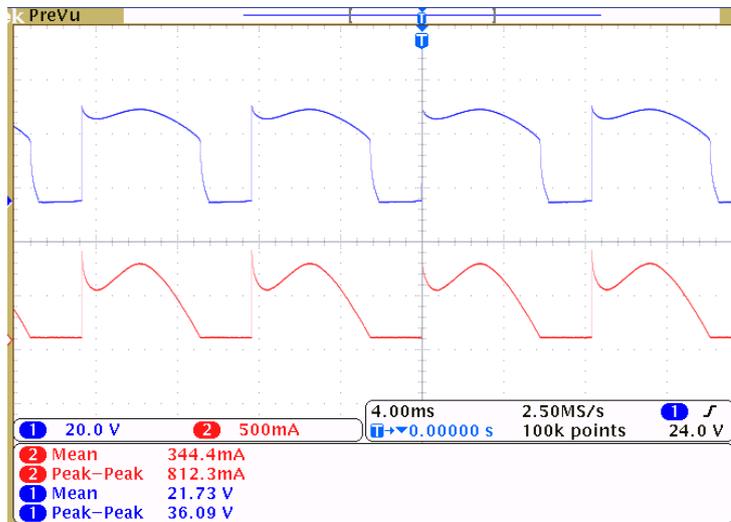


Figura 50 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) no conjunto de LEDs.

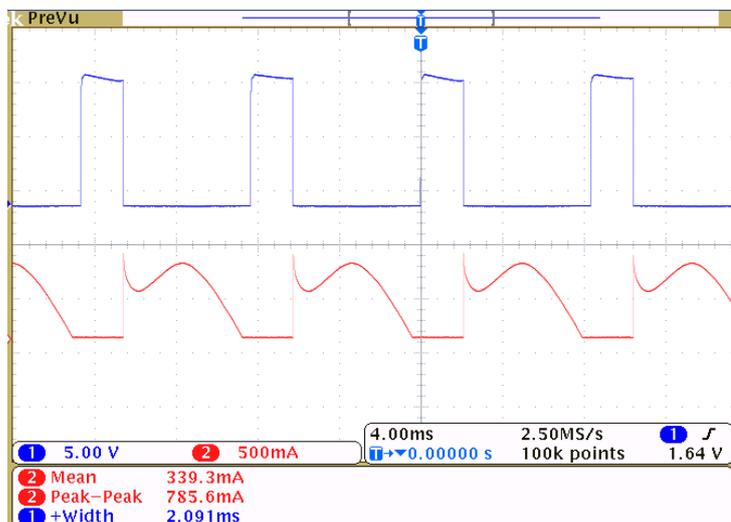


Figura 51 - Sinal de disparo do MOSFET (azul) e corrente nos LEDs (vermelho).

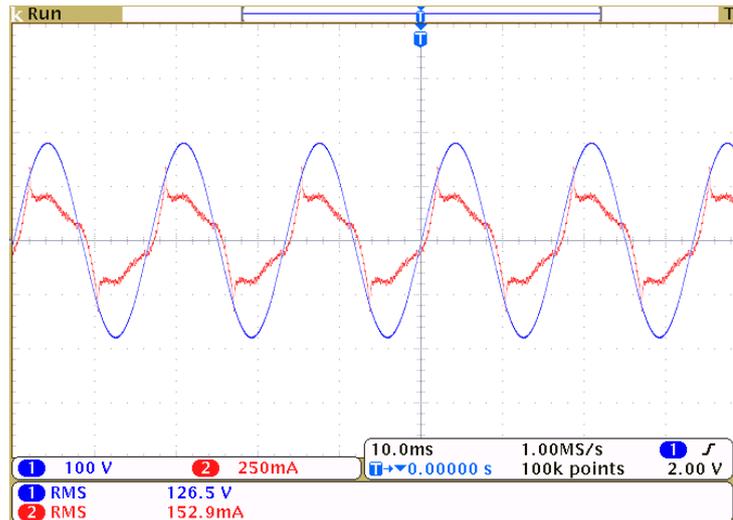


Figura 52 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) na entrada do transformador.

Tabela 10 - Parâmetros medidos no protótipo da luminária LED.

Parâmetro	Valor
Potência de Entrada (primário)	17,93 W
Potência de Saída (LEDs)	10,58 W
Rendimento	59,01 %
Potência de Entrada (secundário)	13,909 W
Potência de Saída (LEDs)	10,748 W
Rendimento	79,58 %

#### 4.7 DESEMPENHO FOTOMÉTRICO

A fim de se avaliar o desempenho fotométrico do arranjo de LEDs, os mesmos foram submetidos a testes em uma esfera integradora. Os testes foram realizados para duas situações distintas:

- Acionando os LEDs através de uma fonte CC ideal (corrente CC ideal)
- Acionando os LEDs através do Conversor CA-CC tipo *boost* (corrente pulsada)

No teste foi utilizado uma esfera integradora LSM 400 Labsphere de 40 polegadas de diâmetro e para as duas situações foi aplicada uma corrente de 344 mA.

A Figura 53 mostra as informações espectrais obtidas com auxílio do utilitário computacional de comunicação com a esfera integradora.

Conforme indicado pela área em fundo amarelo, e considerando a mesma corrente média nos LEDs para as duas análises, há uma redução no fluxo luminoso (no caso da corrente pulsada) de 10,5% em comparação com a condição ideal de corrente constante. Uma avaliação similar, do ponto de vista das coordenadas cromáticas (área em vermelho), atesta desvios pouco relevantes em comparação com a situação CC ideal. Nota-se, ainda, que a mudança observada na temperatura de cor dos LEDs (área demarcada em azul) é de apenas 1%.

Também foram obtidas as curvas de densidades espectrais de potência dos LEDs para as duas situações. As curvas são mostradas na Figura 54 onde é possível notar uma redução da densidade de potência dos LEDs quando alimentados pela corrente pulsada do conversor CA-CC tipo *boost*.

Name	Value	Unit	Pass/Fail	Name	Value	Unit	Pass/Fail
$\Phi$	9.477E-01	Watts	N/A	$\Phi$	8.529E-01	Watts	N/A
$\Phi(v)$	3.109E02	lumens	N/A	$\Phi(v)$	2.782E02	lumens	N/A
$\Phi(v')$	3.731E02	lm'	N/A	$\Phi(v')$	3.338E02	lm'	N/A
Chrom x	0.4388		N/A	Chrom x	0.4380		N/A
Chrom y	0.4095		N/A	Chrom y	0.4073		N/A
Chrom u	0.2495		N/A	Chrom u	0.2499		N/A
Chrom v	0.3492		N/A	Chrom v	0.3485		N/A
Duv	0.0018		N/A	Duv	0.0010		N/A
Chrom u'	0.2495		N/A	Chrom u'	0.2499		N/A
Chrom v'	0.5238		N/A	Chrom v'	0.5228		N/A
$\lambda$ (peak)	598.6	nm	N/A	$\lambda$ (peak)	598.2	nm	N/A
$\lambda$ (center)	593.4	nm	N/A	$\lambda$ (center)	593.6	nm	N/A
$\lambda$ (centroid)	587.0	nm	N/A	$\lambda$ (centroid)	586.6	nm	N/A
$\lambda$ (dom)	582.1	nm	N/A	$\lambda$ (dom)	582.4	nm	N/A
FWHM	138.2	nm	N/A	FWHM	138.0	nm	N/A
Purity	54.6	%	N/A	Purity	53.7	%	N/A
CCT	3010.1	°K	N/A	CCT	3007.0	°K	N/A
Correlation	0.0054		N/A	Correlation	0.0054		N/A
Corr. Coef.	0.0019		N/A	Corr. Coef.	0.0012		N/A
RA	75.2		N/A	RA	75.2		N/A
R1	72.8		N/A	R1	72.9		N/A
R2	81.8		N/A	R2	81.7		N/A
R3	88.9		N/A	R3	88.6		N/A

(a)

(b)

Figura 53 - Resultados espectrais obtidos da análise com a esfera integradora. (a) Imposição de corrente CC ideal; (b) Corrente pulsada (pré-regulador *boost* de baixa frequência).

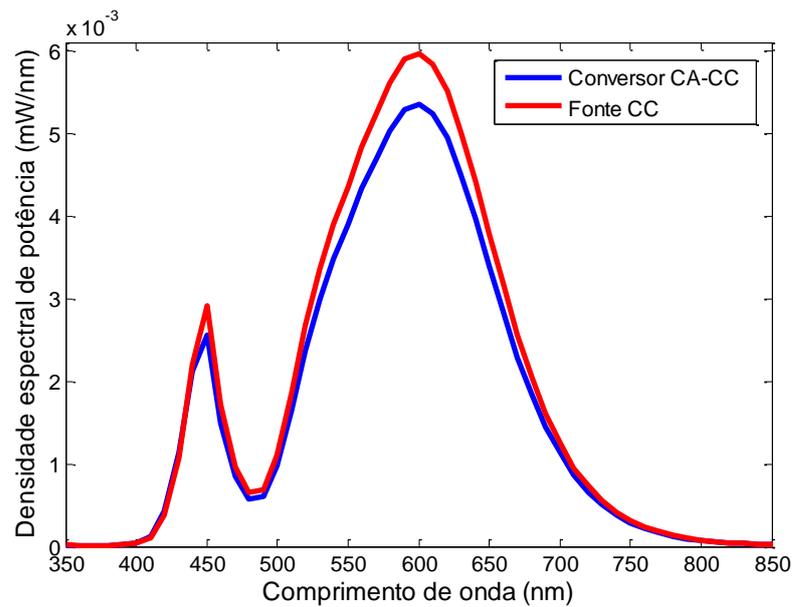


Figura 54 - Espectros do arranjo de LEDs para duas situações diferentes de acionamento.

Para avaliar a iluminância média do conjunto de LEDs foi utilizada uma câmara escura como descrito em Dias et al. (2009). As medições foram realizadas com a fonte de luz a 60 cm do sensor do luxímetro para quatro posições diferentes. Assim, foi obtida uma iluminância média de 331 lx para o conjunto de LEDs.

Na Figura 55 temos o conjunto de LEDs iluminando uma mesa de leitura, onde é possível notar uma iluminação uniforme.

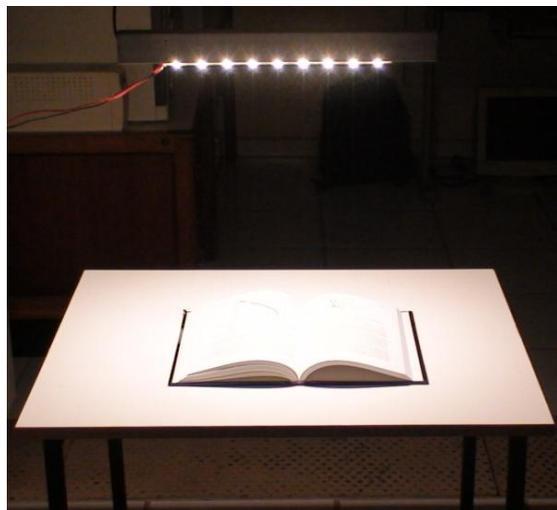


Figura 55 - Conjunto de LEDs iluminando uma mesa de leitura.

## 4.8 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo foi apresentado o projeto da luminária de mesa de baixa potência. Foram mostrados todos os passos do projeto e os resultados experimentais obtidos com o protótipo construído em laboratório. Também foram realizados testes para avaliar o desempenho do protótipo tanto elétrico quanto fotométrico.

Durante os testes foi observado que a baixa eficiência apresentada pelo protótipo se deve ao transformador empregado para reduzir a tensão da rede elétrica. Ele é responsável por 20 % das perdas, o que gera um grande impacto no rendimento global do conjunto. Essa perda se deve, em grande parte, ao fato do transformador operar abaixo da sua potência nominal o que provoca a redução da sua eficiência. Isso acontece em virtude dele estar superdimensionado para o circuito. Além disso, as componentes harmônicas de alta frequência na corrente de entrada também contribuem para aumentar as perdas neste elemento.

Os testes fotométricos mostraram que ocorreu uma pequena redução no fluxo luminoso dos LEDs, em torno de 10,5%, quando alimentados pela corrente pulsada do conversor. Em relação à cromaticidade, ocorreram desvios poucos relevantes que não provocaram mudanças significativas na cor dos LEDs. Também, notou-se que o conjunto é capaz de fornecer uma iluminação uniforme como a obtida nos testes fotométricos.

O capítulo seguinte apresentará uma aplicação do conversor CA-CC tipo *boost* na iluminação pública. Como é requerida uma quantidade de LEDs maior do que para uma luminária de mesa, os níveis de tensão na saída serão próximos ao da entrada, dispensando a necessidade de se utilizar um transformador abaixador. Também será exibida uma solução empregando o conversor *Ćuk* operando em baixa frequência.

## **CAPÍTULO 5 ALTERNATIVAS DE CIRCUITOS DE ACIONAMENTO EM BAIXA FREQUÊNCIA ORIENTADO A ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

Como apresentado no capítulo anterior, o uso do transformador abaixador na composição do circuito de acionamento dos LEDs provocou uma redução significativa na eficiência do circuito. Logo, presume-se que aplicações que dispensem este componente podem resultar na elevação do rendimento global do circuito. Em tais aplicações, portanto, supõe-se que a tensão de saída será significativamente mais alta (tensão terminal no arranjo de LEDs) de modo que o transformador se torne desnecessário.

Neste contexto, optou-se por utilizar o pré-regulador *boost* para alimentar um conjunto de LEDs destinados à iluminação pública. Como os níveis de potência são bem superiores ao de uma luminária de mesa, necessita-se utilizar uma maior quantidade de LEDs. Assim, admitindo-se um arranjo em série de elementos luminosos, a tensão requerida na saída do conversor é próxima do valor da tensão da rede elétrica, o que permite dispensar o transformador na entrada do circuito.

Neste capítulo, também é apresentada uma solução para iluminação pública utilizando o conversor Ćuk operando em baixa frequência para acionar um conjunto de LEDs.

### **5.2 AVALIAÇÃO DO EMPREGO DO PRÉ-REGULADOR *BOOST* COMUTADO EM BAIXA FREQUÊNCIA SEM A UTILIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR**

O conversor aqui apresentado é idêntico ao da luminária de mesa, no entanto sem utilizar o transformador, o que pode melhorar a eficiência do circuito.

A Figura 56 mostra o circuito do pré-regulador *boost* analisado para uma possível aplicação em iluminação pública.

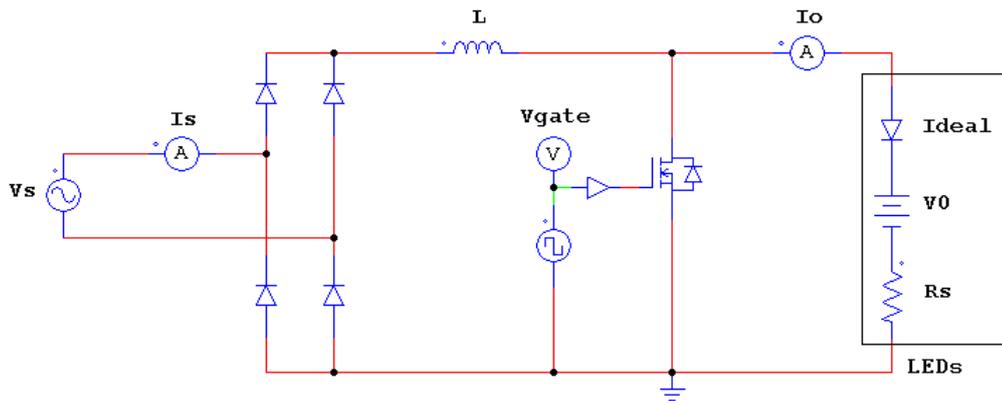


Figura 56 - Circuito do pré-regulador *boost* de baixa frequência para iluminação pública.

Para este estudo foi adotada uma tensão de entrada de 220 Vrms (que é típica para iluminação pública),  $L = 180 \text{ mH}$ ,  $R_s = 1,8 \Omega$ ,  $V_0 = 2,7 \text{ V}$  e  $T_{on} = 1,5 \text{ ms}$ . Foram associados 70 LEDs conectados em série, totalizando uma potência de 120 W (também típica para luminárias LED utilizadas em iluminação pública), com uma tensão do conjunto de LEDs de 270 V.

O resultado da simulação é apresentado na Figura 57.

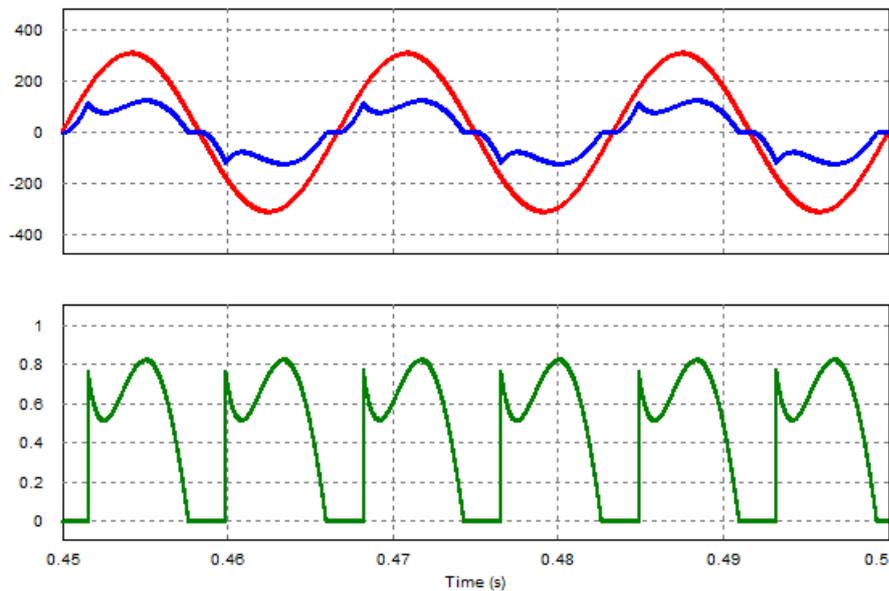


Figura 57 - Simulação do pré-regulador CA-CC *boost* para iluminação pública. Tensão (vermelho) e corrente (azul, x150) de entrada; Corrente nos LEDs (verde).

É possível concluir pela análise dos dados simulados que o fator de potência alcançado foi de 0,98, com uma distorção de corrente,  $THD_i$ , de 20 %. Como já mencionado, o fato de o circuito acionador dispensar um transformador abaixador, é possível esperar uma

eficiência global muito acima daquela observada na aplicação da luminária de mesa (Capítulo 4). Uma verificação experimental desta informação não é, contudo, objeto da presente dissertação.

### 5.3 AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE UM CONVERSOR CUK COMUTADO EM BAIXA FREQUÊNCIA PARA ALIMENTAR LEDS DE POTÊNCIA.

Seguindo a mesma sistemática do pré-regulador *boost* operando em baixa frequência, foi realizada uma avaliação de uma estrutura CA-CC baseada no conversor Cuk, conforme ilustrado na Figura 58.

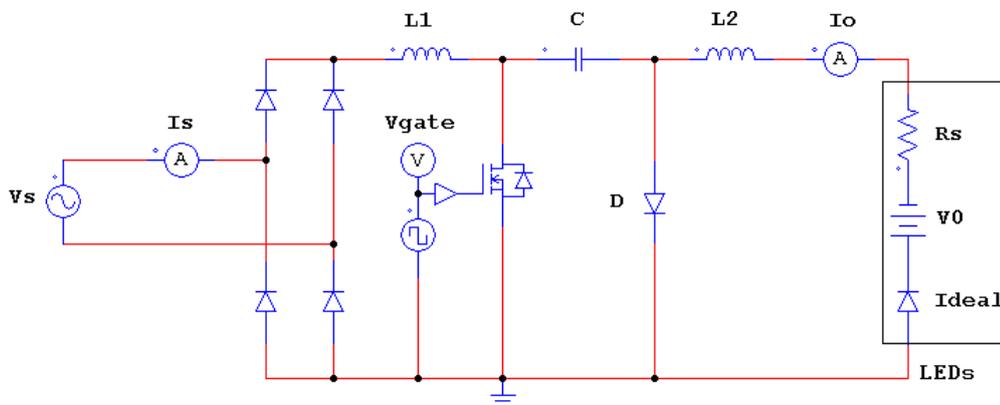


Figura 58 - Pré-regulador Cuk de baixa frequência com circuito de acionamento de LEDs.

Para esse estudo, foram adotadas uma tensão de entrada 127 Vrms, indutância na entrada ( $L_1$ ) de 550 mH e na saída ( $L_2$ ) de 330 mH. O capacitor empregado foi de 27  $\mu$ F, sendo relativamente simples de encontrá-lo em uma versão não-eletrolítica (capacitores de filme). O pulso de chaveamento foi de aproximadamente 2,4 ms. Neste caso, é um pouco difícil conceber uma aplicação utilizando baixas indutâncias ou alta tensão do conjunto de LEDs.

Para a simulação foi utilizada uma associação de 15 LEDs conectados em série, totalizando uma potência de 28 W e uma tensão de joelho de aproximadamente 55 V. A Figura 59 mostra o resultado da simulação para um conversor Cuk, onde um fator de potência de 0,99 foi alcançado.

As indutâncias do conversor  $\acute{C}$ uk podem parecer muito altas. No entanto, estes valores não são incomuns em circuitos de acionamentos de baixa frequência. Por exemplo, em Hui et al. (2010) é proposto um filtro na saída com uma indutância maior que 2 H.

Outro ponto que pode ser observado se refere ao alto *ripple* (ondulaao) presente na corrente de saída. Apesar de ser de natureza unidirecional, esta corrente apresenta um valor de *ripple* (pico a pico) de cerca de 200 % em relaao à corrente média. No entanto, foi mostrado em Almeida et al. (2011), que a diminuiao do fluxo luminoso nesta condiao não é superior a 5 %, com desvio de cor insignificante.

Implementaoes experimentais e um melhor domínio do comportamento teórico e orientaoes de projeto para este circuito de acionamento serão objeto de futuros trabalhos.

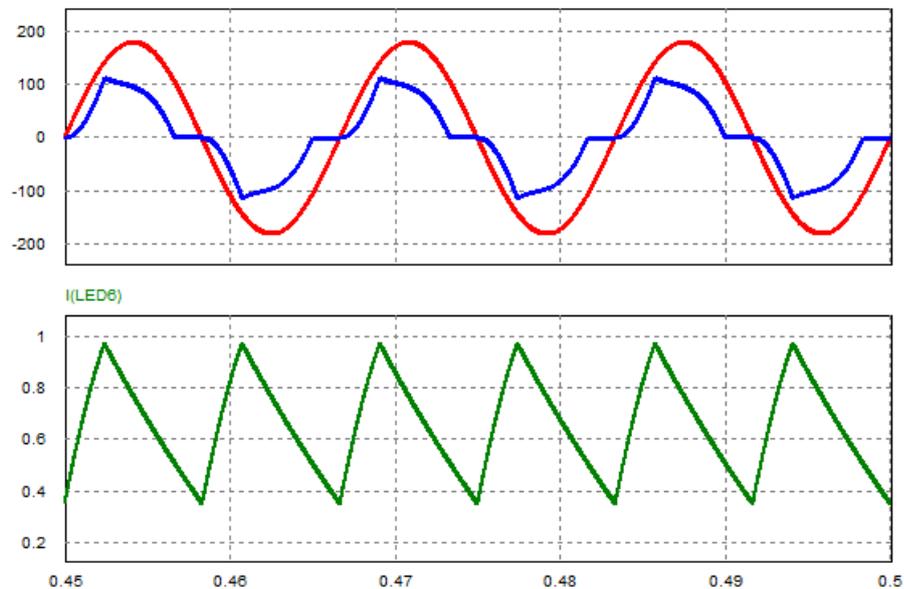


Figura 59 - Simulaao conversor  $\acute{C}$ uk. Tensão (vermelho) e corrente (azul, x200) de entrada; Corrente nos LEDs (verde).

## 5.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Este capítulo apresentou dois circuitos que podem ser utilizados para acionar um conjunto de LEDs em iluminaao pública. Os resultados de simulaao indicam que estas alternativas (baseadas no conversor *boost* e  $\acute{C}$ uk operando em baixa frequência) são muito promissoras para determinadas aplicaoes, além de dispensarem a necessidade de um

transformador abaixador na entrada. É possível inferir, ainda, que aplicações reais apresentarão um rendimento superior ao da luminária de mesa descrita no Capítulo 4.

Os circuitos exibidos poderão futuramente ser implementados em laboratório a fim de se avaliar seus desempenhos em uma situação real.

## CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo sobre a aplicação dos diodos emissores de luz (LEDs) na iluminação. Também foram exibidas as principais características destes elementos visando um melhor entendimento dessa fonte de luz, que vem sendo cada vez mais empregada na iluminação em geral.

Para avaliar a utilização dos LEDs na iluminação, foi construída uma luminária de mesa usando esses dispositivos, sendo alimentada por um conversor CA-CC tipo *boost* operando em baixa frequência. Este conversor foi escolhido em função de possuir uma topologia de fácil entendimento e utilizar poucos componentes, tornando sua construção simples e de baixo custo.

No Capítulo 2 foi feita uma compilação sobre a importância da adequada distribuição geométrica dos LEDs em luminárias, bem como os efeitos das lentes colimadoras na eficiência e qualidade da iluminação. Desta forma é possível alcançar uma iluminação uniforme, utilizando uma quantidade menor de LEDs, o que proporciona a redução no custo total da luminária, além de garantir uma iluminação de melhor qualidade.

Foi demonstrado um estudo de caso experimental, envolvendo lentes colimadoras sobre um módulo de LEDs empregado em iluminação pública. Ficou evidente que o uso das lentes colimadoras resulta em melhor distribuição da luz no campo de trabalho, ampliando o feixe luminoso no sentido horizontal, o que permite um maior espaçamento entre os pontos de luz e a mitigação do efeito de sombras (zebramento).

No Capítulo 3 foi apresentado o conversor proposto neste trabalho. Foram descritas as etapas de seu funcionamento com o respectivo equacionamento. Na pesquisa foi utilizado um conversor CA-CC denominado pré-regulador *boost* de alto fator de potência que opera em baixa frequência e que apresenta um único acionamento liga-desliga para cada semiciclo da rede elétrica.

No capítulo 4 foi construído um protótipo experimental com potência de saída de 11 W para alimentar o conjunto de 9 LEDs da luminária de mesa. O pré-regulador *boost* apresentou um fator de potência de 0,97 e uma eficiência de 59%, que pode ser considerada baixa em razão do emprego de um transformador abaixador sobredimensionado. Além disso, as componentes harmônicas de alta frequência na corrente de entrada também contribuíram para aumentar as perdas neste elemento.

A topologia conversora proposta, além de ser simples e de fácil construção, dispensa o uso de capacitores eletrolíticos em função da corrente descontínua na saída. Essa característica contribui para uma elevada vida útil do circuito de acionamento.

Uma avaliação fotométrica dos LEDs da luminária mostrou uma redução de 11% na eficácia luminosa do conjunto, em comparação com a operação CC ideal, algo que se atribui à natureza descontínua da corrente nos LEDs fornecida pelo pré-regulador CA-CC *boost*.

No capítulo 5 foi apresentado um circuito similar (baseado no pré-regulador *boost* em baixa frequência), que dispensa o uso de transformadores abaixadores. O circuito apresentou um desempenho simulado muito satisfatório (elevado FP e baixa distorção harmônica de corrente de entrada), podendo futuramente ser construído para uma análise experimental. Outro conversor, porém empregando uma topologia tipo *Ćuk*, também foi avaliado por meio de simulações, para uma futura implementação prática.

Futuramente, pretende-se estudar mais a fundo os conversores exibidos no Capítulo 5 e construí-los em laboratório para avaliar o desempenho dos mesmos. Como estes circuitos não dependem de um transformador na entrada espera-se alcançar uma alta eficiência do conjunto.

Também, almeja-se empregar controladores digitais nesses circuitos para garantir o controle da corrente nos LEDs. É possível ainda estudar diferentes geometrias de arranjos de LEDs e avaliar comparativamente uma a uma, para saber qual modelo apresenta melhor eficiência e qualidade na iluminação.

## REFERÊNCIAS

ALBERTINI, A.; MASI, M. G.; MAZZANTI, G.; PERETTO, L.; TINARELLI, R. A Test Set for LEDs Life Model Estimation. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2010.

ALMEIDA, P. S. **Conversor Integrado Sepic Buck-Boost Aplicado ao Acionamento de Leds de Potência Em Iluminação Pública**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

ALMEIDA, P. S.; GUEDES, L. F. A.; NOGUEIRA, F. J.; Braga, H. A. C. **An Experimental Study on the Photometrical Impacts of Several Current Waveforms on Power White LEDs**. 11th COBEP. Natal, RN, 2011.

ALONSO, J. M.; GACIO, D.; CALLEJA, A. J.; RIBAS, J.; LÓPEZ, E. A Study on LED Retrofit Solutions for Low-Voltage Halogen Cycle Lamps. Industry Applications. **IEEE Transactions**, 2011.

AVANT. **Compêndio Técnico: Conceito Básicos de Iluminação**. Disponível em: <<http://www.avantsp.com.br/pt/compendio-tecnico>>. Acesso em 20 de jan. 2012.

BALDO, P.; SILVEIRA Jr., L. **LED – Aplicações em Luminotécnica**. XI INIC - Encontro Latino Americano de Iniciação Científica. VII EPG - Encontro Latino Americano de Pós-Graduação. I INIC JR. - Encontro Latino Americano de Iniciação Científica Júnior. UNIVAP. São José dos Campos – SP, Brazil, 18 - 19 October, 2007.

BARBI, I; FONT, C. H.; ALVES, R. L. **Projeto Físico de Indutores e Transformadores**. INEP, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

BULLOUGH, J. D. Light Emitting Diode Lighting Systems. **NLPIP - Lighting Answers**. v. 7. Issue 3. May, 2003.

CERVI, M. **Rede de Iluminação Semicondutora para Aplicação Automotiva**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

CHEN, F.; WANG, K.; LIU, Z.; LUO, X.; LIU, S. **Freeform Lens for Application-Specific LED Packaging**. Electronic Packaging Technology & High Density Packaging. 2009.

CHEN, W.; HUI, S. Y. R. 2012. Elimination of an Electrolytic Capacitor in AC/DC Light-Emitting Diode (LED) Driver With High Input Power Factor and Constant Output Current. **IEEE Transactions On Power Electronics**. v. 27. n. 3, 2012.

CRAFORD, M. G. **Current State of the art in high brightness LEDs**. American Physical Society Meeting, March 2007.

DA COSTA, G. J. C. **Iluminação Econômica Cálculo e Avaliação**. 4. ed. Porto Alegre: Edipucrs, 2006.

DIAS, M. P.; PINTO, D. P.; BRAGA, H. A. C. **A Simplified Technique of Lighting Performance evaluation Applied to LED-based modern luminaries**. 10th. Bonito, MS, 2009.

EVERLIGHT, EPH-AX08EL/LM01H-P03/3035/Y/N12 High Power LED. Datasheet, 2009.

GORDON, K. **LED Evaluation and Application**. APEM Spring Forum. Eugene – Oregon, 2007

HUI, S. Y. (RON); LI, S. N.; TAO, X. H.; CHEN, W. A. Novel Passive Offline LED Driver With Long Lifetime. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 25, n.1, pp. 2665 – 2672. 2010.

JANG, J. W.; CHOI, S. Y.; SON, J. K. **Degradation Model of LED Based on Accelerated Life Test**. 18th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA). 2011.

JUNIOR, E. A. **Estudo e Implementação de Uma Estrutura Para a Alimentação de LEDs de Potência Com o Controle da Cor e da Intensidade Luminosa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

JUNTUNEN, E.; KERANEN, A.; PAAKKINEN, M.; VUORINEN, V.; TETRI, E.; HALONEN, L.; HEIKKINEN, V. **Injection Moulded Lens Array for High Power LED Modules**. 3rd Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC). 2010.

KITSINELIS, S. **Light Sources Technologies and Applications**. 1. ed. CRC Press, 2011.

KUCKMANN, O. High Power LED Arrays Special Requirements on Packaging Technology, **SPIE**, v. 6134. 2006.

LI, F.; CHEN, D.; SONG, X.; CHEN, Y. **LEDs: a Promising Energy-Saving Light Source for Road Lighting**. Power and Energy Engineering Conference. 2009.

MARTIGNONI, A. **Transformadores**. 8. ed. São Paulo: Globo, 1991.

MARTINS, E. S. **Retificadores Monofásicos com Alto Fator de Potência e Comutação em Baixa Frequência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

MAWAKDIYE, A. A Revolução dos LEDs, **IPESI Magazine**, 157. ed. September/October 2008.

MCLYMAN, C. WM. T. **Transformer And Inductor Design Handbook..** 3 ed. New York: Marcel Dekker, 2004.

MOREIRA, V. de A. 1999. **Iluminação Elétrica.** 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

MORENO I.; MUÑOZ, J.; IVANOV, R. Uniform Illumination of Distant Targets Using a Spherical Light-Emitting Diode Array. **Optical Engineering**, v. 46, no. 3, 2007.

MORENO I.; AVENDAÑO-ALEJO, M.; TZONCHEV, R. I. Designing Light-Emitting Diode Arrays for Uniform Near-Feld Irradiance. **Applied Optics**, v. 45, n. 10, 2006.

NARENDRAN, N.; GU, Y. Life of LED-Based White Light Sources. **Ieee/Osa Journal Of Display Technology**, v. 1, n. 1, 2005.

OLIVEIRA, A. A. M. **Sistema de Iluminação Distribuída Utilizando LEDs Acionados Por Dois Conversores Flyback Integrados**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

PINTO, R. A. **Projeto e Implementação de Sistemas de Iluminação Para Interiores Empregando LEDs de Alta Intensidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

PINTO, R. A. **Sistemas Eletrônicos Para Iluminação de Exteriores Empregando Diodos Emissores de Luz (LEDs)**. Exame de Qualificação. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

PRADO, N. R.; Campos, A.; Seidel, A. R.; Pinto, R. A. **Sistemas Eletrônicos Para Iluminação**. GEDRE. 10 th COBEP. Bonito, MS, 2009.

RODRIGUES, P. **Manual de iluminação eficiente.** 1. ed. PROCEL. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, 2002.

SÁ JUNIOR, E. M.; ANTUNES, F. L. M.; PERIN, A. J. **LEDs Para Iluminação: Características e Normas.** II CBEE. Vitória, ES, 2007a.

SÁ JUNIOR, E. M. **Estudo de Novas Estruturas de Reatores Eletrônicos Para LEDs de Iluminação.** Projeto de Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007b.

SÁ JUNIOR, E. M. **Estudo de Novas Estruturas de Reatores Eletrônicos Para LEDs de Iluminação**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina), Florianópolis, 2009.

SCHUBERT, E. F. 2006. **Light-Emitting Diodes**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

STEIGERWALD, D. A.; BHAT, J. C. ; COLLINS, D. ; FLETCHER, R. M. ; HOLCOMB, M. O. ; LUDOWISE, M. J. ; MARTIN, P. S. ; RUDAZ, S. L. Illumination With Solid State Lighting Technology. **IEEE journal on Selected Topics in Quantum Eletrincs**, v. 8, n.2, March/April 2002.

SU, YEN-FU; YANG, S.-Y.; CHI, W.-H.; CHIANG, K.-N. **Light Degradation Prediction of High-power Light-emitting Diode Lighting Modules**. 11th. Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems. EuroSimE, 2010.

SUGA, I.; KIMATA, M.; OHNISHI, Y.; UCHIDA, R. 1993. **New Switching Method for Single-phase AC to DC Converter**. Power Conversion Conference, Yokohama, Japan, 1993.

TARASHIOON, S.; KOH, S.W.; VAN DRIEL, W. D.; ZHANG, G.Q. **Temperature Dependency in Performance of Solid State Lighting Drivers**. 12th International Conference on Thermal Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. EUROSIME, 2011.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Solid-State Lighting Research and Development: Multi Year Program Plan**, March 2011.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Energy Efficiency and Renewable Energy**. Thermal Management of White LEDs. November 2009.

VIEIRA, I. C. **Projeto de um Conversor Flyback Cuto-Oscilante de Baixo Custo Para LED's de Potência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

WANG, J.; PAN, K.; LIU, J.; ZHU, W. 2012. **Numerical Study on Thermal-Mechanical Analysis of LED Lighting System by Using Ceramic Materials**. 11th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging. IEEE, 2010.

WENRUN OPTOELECTRONIC. **Specifications for Standard LED Lamps - LUW503F43**. Datasheet, 2006

WHANG, A. J.-W.; CHEN, Y.-Y.; TENG, Y.-T. Designing Uniform Illumination Systems by Surface-Tailored Lens and Configurations of LED Arrays. **Journal of Display Technology**, v. 5, n. 3, 2009.

WU, F.; ZHAO, W.; YANG, S.; ZHANG, C. **Failure Modes and Failure Analysis of White LEDs**. The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments. IEEE, 2009.

YU, L.; YANG, J. **The Topologies of White LED Lamps Power Drivers**. 3th International Conference on Power Electronics System and Applications, 2009.

ZHU, ZHEN-MIN; QU, X.-h.; JIA, GUO-XIN; OUYANG, JIAN-FEI. Uniform Illumination Design by Configuration of LED Array and Diffuse Reflection Surface for Color Vision Application. **Journal of Display Technology**, v. 7, n. 2, 2011

## **APÊNDICE A PUBLICAÇÕES ORIUNDAS DO TEMA DA DISSERTAÇÃO**

[1] DIAS, M. P.; PINTO, D. P.; BRAGA, H.A.C. 2009. **A Simplified Technique of Lighting Performance evaluation Applied to LED-based modern luminaries.** Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, COBEP. Bonito-MS.

[2] DIAS, M. P.; PINTO, D. P.; BRAGA, H.A.C. 2009. **Uma Avaliação da Economia de Energia de Lâmpadas à Base de LEDs de Potência.** Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, CBEE. Belém – PA.

[3] DIAS, M. P.; CASAGRANDE, C. G. ; BRAGA, H.A.C. 2011. **Avaliação da Geometria de Arranjo de LEDs e do Uso das Lentes Colimadoras Para a Eficiência da Iluminação.** IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética. Juiz de Fora-MG, Brasil. Anais do CBEE 2011. Editora da ABEE, 2011. v. 1. p. 1-7.

[4] DIAS, M. P.; ALMEIDA, P. S.; BRAGA, H. A. C. 2012. **On The Use of a Low Frequency Boost Rectifier as a High Power Factor Led Driver.** IEEE Induscon. Fortaleza-CE.

[5] NOGUEIRA, F. J.; SILVA, E. S., DIAS, M. P.; RODRIGUES, C. R. B. S., BRAGA, H. A. C.; PINTO, D. P. 2012. **Avaliação de Luminárias LED para Iluminação Pública de Acordo com a NBR 16026 E NBR IEC 61347-2-13.** IEEE Induscon. Fortaleza-CE, Brasil.