

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**GUILHERME MARCIO SOARES**

**DRIVER DE LONGA VIDA E ALTA EFICIÊNCIA PARA  
ACIONAMENTO DE LEDS EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

Juiz de Fora  
2012



GUILHERME MARCIO SOARES

**DRIVER DE LONGA VIDA E ALTA EFICIÊNCIA PARA  
ACIONAMENTO DE LEDS EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

Monografia submetida ao corpo docente do Curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

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

Juiz de Fora  
2012

GUILHERME MARCIO SOARES

**DRIVER DE LONGA VIDA E ALTA EFICIÊNCIA PARA  
ACIONAMENTO DE LEDS EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

Monografia submetida ao corpo docente do Curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em ???????????

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Henrique Antônio Carvalho Braga, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Juiz de Fora  
Orientador

---

---

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho é fruto da contribuição de diversas pessoas, e sem a participação delas, o mesmo não seria desenvolvido da maneira como foi. Devido a isto, é preciso fazer um breve agradecimento.

Primeiramente agradeço a Deus, que juntamente com de seu filho, foram meus primeiros grandes professores.

Aos meus pais, pois foram minhas principais bases de sustentação nos momentos mais difíceis. Agradeço também a minha irmã, pelo companheirismo durante todos estes anos.

A todos os professores do curso de engenharia elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, que compartilharam seu conhecimento e ajudaram no meu crescimento profissional. Agradeço em especial o professor Henrique Braga, meu orientador, pela oportunidade de poder pesquisar e fazer ciência, ao professor Danilo Pinto, que sempre esteve presente no meu acompanhamento.

Aos colegas do Núcleo de Iluminação Moderna, pois este trabalho foi construído com o suor de cada um deles.

Aos meus amigos, por estarem presentes nos momentos difíceis.

À Eletrobras S.A., que financiou este projeto. Agradeço também às empresas que cederam equipamentos e materiais para o desenvolvimento do trabalho.

Por fim, à minha namorada Camila, pelo carinho e compreensão durante todos estes anos.

*"A sabedoria é resplandecente, não murcha, mostra-se facilmente àqueles que a amam. Ela deixa-se encontrar por aqueles que a buscam."*

**Livro da Sabedoria 6,12**

## Resumo

Neste trabalho é feito um estudo acerca da aplicação de LEDs em iluminação pública. Neste âmbito, o trabalho propõe uma topologia para acionamento destes dispositivos nesta aplicação. Para tanto, são analisadas as peculiaridades e exigências da aplicação a fim de formular uma metodologia de projeto que contemple todas as especificidades necessárias para o bom desempenho do sistema. Uma análise econômica é feita a fim de mostrar a atratividade da tecnologia bem como as características desejáveis para o conversor eletrônico proposto. Ainda serão mostrados estudos acerca das relações entre as grandezas elétricas e luminotécnicas nos LEDs. Também serão relevadas questões sobre qualidade de energia em sistemas de iluminação pública. Por fim é mostrado o desenvolvimento teórico completo da topologia proposta, bem como a exibição de resultados experimentais para validação da metodologia de projeto proposta.

Palavras-chave: Diodos emissores de luz, Correção ativa do fator de potência, Drivers eletrônicos para LEDs de potência, Eliminação de capacitores eletrolíticos, *Ripple* de corrente em LEDs de potência, Conversor Ćuk, eletrônica de potência.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolução paralela da eficiência luminosa de diversas tecnologias de iluminação (CRAFORD, 2007) .....	5
Figura 2. Evolução das tecnologias de iluminação pública nos parques nacionais (ELETROBRÁS, 2011) .....	6
Figura 3. Principais estruturas do olho humano .....	7
Figura 4. Distribuição das células fotosensíveis na córnea_(SCHREUDER, 2008) .....	8
Figura 5. Resposta do olho para diferentes condições de luminância_(ALMEIDA, <i>et al.</i> , 2011a) .....	9
Figura 6. Diagrama de densidade espectral de potência típico de uma lâmpada de (a) Vapor de Sódio; (b) Multivapores metálicos; (c) Vapor de mercúrio; (d) LEDs ....	10
Figura 7. Foto de uma via iluminada com LED (à esquerda) e VSAP (à direita). (TECNOWATT/SIMON LIGHTING).....	12
Figura 8. Vida útil estimada de capacitores eletrolíticos. Adaptado de (CHUNG, <i>et al.</i> , 2007) .....	14
Figura 9. Fluxo de caixa para um sistema de iluminação.....	15
Figura 10. Variação de $D(t)$ com a vida útil e a TMA.....	18
Figura 11. Funcionamento de um LED.....	21
Figura 12. Funcionamento PC-LEDs (SHUR; ZUKAUSKAS, 2005).....	22
Figura 13. Curva de densidade espectral de potência de um PC-LED (SCHUBERT, 2003) .....	23
Figura 14. LED HP à esquerda e HB à direita.....	23
Figura 15. Encapsulamento dos LEDs (a) HB e (b) HP.....	24
Figura 16. Luminárias comerciais que empregam (a) LEDs HP (b) LEDs HB.....	25
Figura 17. Potência Espectral relativa dos LEDs HP(RODRIGUES, ET. AL., 2011).27	
Figura 18. Potência Espectral relativa dos LEDs HB(RODRIGUES, ET. AL., 2011).28	
Figura 19. Eficiência luminosa dos LEDs HP perante a variação de corrente direta(RODRIGUES, ET. AL., 2011) .....	29
Figura 20. Eficiência luminosa dos LEDs HB perante a variação de corrente direta(RODRIGUES, ET. AL., 2011) .....	29
Figura 21. Arranjo de LEDs utilizado para os experimentos.....	30
Figura 22. Arranjo experimental para medição das relações entre os parâmetros fotométricos do LED e o ripple de corrente que circula por este .....	31
Figura 23. Fluxo e eficiência normalizados para diversos valores de <i>ripple</i> de corrente .....	32
Figura 24. Deslocamento das coordenadas cromáticas com o aumento do ripple de corrente .....	32

Figura 25. Modelo do linear do LED .....	34
Figura 26. Comparação entre os modelos Schottky e linear, bem como os pontos levantados experimentalmente.....	34
Figura 27. Exemplo de um sistema de potência sob influência de correntes harmônicas.....	38
Figura 28. (a) Correntes de entrada dos reatores A, B e C de cima para baixo respectivamente (500 mA/div;10 ms/div); Comparação do conteúdo harmônico das correntes de entrada dos reatores A (b), B(c) e C(d) e a norma IEC 61000-3-2. (ref Power cbee) .....	41
Figura 29. Conteúdo harmônico da corrente de entrada das luminárias LED analisadas (ref Power cbee).....	42
Figura 30. Parâmetros de entrada das luminárias (a) D [Corrente-CH2(500 mA/div), Tensão-CH1 (100 V/div); Escala de tempo:10 ms/div] e (b) E [Corrente-CH2(5 A/div), Tensão-CH1 (100 V/div); Escala de tempo: 4 ms/div].....	43
Figura 31. Driver passivo para acionamento de LEDs. (HUI, <i>et al.</i> , 2010) .....	46
Figura 32. Formas de onda medidas da tensão de entrada $V_s$ , da corrente de entrada $I_{in}$ e da corrente no indutor de entrada $I_s$ . [Escala: $I_s$ : 0.5 A/div., $V_s$ : 250 V/Div., and $I_{in}$ 0.2 A/Div]. (HUI, <i>et al.</i> , 2010) .....	46
Figura 33. Formas de onda da tensão $V_3$ e da corrente $I_o$ . [Escala: $V_3$ : 50 V/div. and $I_o$ : 0.1 A/div]. (HUI, <i>et al.</i> , 2010) .....	47
Figura 34. Driver para LEDs baseado em um reator eletromagnético para lâmpadas fluorescentes. (LEE, KIM; RIM, 2011) .....	47
Figura 35. Driver para LEDs operando em CCM.....	48
(b) Figura 36. (a) Circuito experimental SEPIC CCM; (b) Formas de onda de entrada .....	49
Figura 37. Conversor da família Buck-Boost operando em DCM.....	49
Figura 38. (a) Conversor Buck (b) Corrente e tensão de entrada do conversor Buck .....	50
Figura 39. (a) Conversor Boost (b) Corrente e tensão de entrada do conversor Boost .....	51
Figura 40. (a) Conversor Buck-Boost (b) Corrente e tensão de entrada do conversor Buck-Boost.....	52
Figura 41. Conversores Boost e Buck cascadeados .....	53
Figura 42. Conversores Boost e Flyback cascadeados .....	54
Figura 43. Conversores Buck-Boost e Flyback cascadeados .....	54
Figura 44. Topologia Buck Flyback (GACIO, <i>et al.</i> , 2011).....	54
Figura 45. Topologia Buck-Boost quadrático (ALONSO, <i>et al.</i> , 2012).....	55
Figura 46. Topologias de quarta ordem (a) Sepic (b) Zeta (c) Ćuk .....	56
Figura 47. Conversor Ćuk .....	60

Figura 48. Estágios de funcionamento do conversor Ćuk operando em DCM .....	60
Figura 49. Formas de onda teóricas: (a) baixa frequência (b) alta frequência .....	61
Figura 50. Circuito equivalente de grandes sinais e baixa frequência.....	64
Figura 51. Modelo de simulação do conversor Ćuk .....	69
Figura 52. Formas de onda obtidas em simulação. (a) Tensão e corrente (300 x) de entrada; (b) Tensão no capacitor $C_1$ ; (c) Corrente e tensão (0.005 x) na saída; (d) Corrente no indutor $L_1$ ; (e) Corrente no indutor $L_2$ .....	70
Figura 53. Formas de onda de tensão (a) e corrente (b) no MOSFET; Formas de onda de (c) tensão e (d) corrente no diodo. ....	71
Figura 54. Protótipo do conversor apresentado neste trabalho.....	73
Figura 55. Tensão (CH1 - 100V/div) e corrente (CH2 - 250 mA/div) de entrada. Escala de tempo : 4 ms/div. ....	74
Figura 56. Comparação do conteúdo harmônico do conversor proposto e os limites impostos pela norma IEC 6100-3-2.....	74
Figura 57. Tensão (CH1 - 50V/div) e corrente (CH2 - 250 mA/div) de saída. Escala de tempo: 10 ms/div. ....	75
Figura 58. Forma de onda da corrente no indutor $L_1$ (100 mA/div). Escala de tempo: 20 $\mu$ s/div.....	76
Figura 59. Forma de onda da corrente no indutor $L_2$ (500 mA/div). Escala de tempo: 10 $\mu$ s/div.....	76
Figura 60. Tensão(CH1 - 250V/div) e corrente (CH2 - 1A/div) no MOSFET. Escala de tempo: 10 $\mu$ s/div.....	77
Figura 61. Protótipo em funcionamento.....	77

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. LEDS EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA: CONTEXTO GERAL .....</b>	<b>4</b>
2.1. ESTADO ATUAL DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA .....	4
2.2. ILUMINAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO: UMA NOVA FILOSOFIA .....	7
2.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE A ATRATIVIDADE ECONÔMICA DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO COM LEDS .....	12
2.4. CONCLUSÃO PARCIAL .....	19
<b>3. ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DO DIODOS EMISSORES DE LUZ .....</b>	<b>21</b>
3.1. LEDS COMO FONTES DE LUZ .....	21
3.2. INFLUÊNCIA DA FORMA DE ONDA DE CORRENTE SOBRE A FOTOMETRIA DO LED .....	24
3.2.1. Estudo acerca da variação do fluxo luminoso do LED mediante a variação do nível de corrente.....	25
3.2.2. Estudo acerca da variação do fluxo luminoso do LED mediante a variação do <i>ripple</i> de corrente .....	30
3.3. MODELO ELÉTRICO DA CARGA .....	33
3.4. CONCLUSÃO PARCIAL .....	35
<b>4. QUALIDADE DE ENERGIA EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA.....</b>	<b>37</b>
4.1. INJEÇÃO DE CORRENTE HARMÔNICA NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DEVIDO A SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO .....	38
4.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O FATOR DE POTÊNCIA DO EQUIPAMENTO E VARIAÇÕES NA TENSÃO DA REDE .....	43
4.3. CONCLUSÃO PARCIAL .....	44
<b>5. SOLUÇÕES PARA ACIONAMENTO DE LEDS EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA....</b>	<b>45</b>
5.1. DRIVERS PASSIVOS COM CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA.....	45
5.2. DRIVERS ATIVOS COM CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA OPERANDO EM CCM.....	48

5.3. DRIVERS ATIVOS COM CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA OPERANDO EM DCM.....	49
5.4. CONCLUSÃO PARCIAL.....	57
<b>6. ANÁLISE E PROJETO DO DRIVER DE LONGA VIDA DE ESTÁGIO ÚNICO BASEADO NA TOPOLOGIA ĆUK .....</b>	<b>59</b>
6.1. ANÁLISE DO CONVERSOR ĆUK OPERANDO EM DCM COMO DRIVER PARA LEDS A PARTIR DA REDE ELÉTRICA .....	60
6.2. PROJETO DO CONVERSOR ĆUK OPERANDO EM DCM APLICADO AO ACIONAMENTO DE LEDS DE POTÊNCIA .....	66
6.3. SIMULAÇÃO DO CONVERSOR ĆUK OPERANDO EM DCM COMO DRIVER PARA LEDS .....	69
6.4. ANÁLISE EXPERIMENTAL DO CONVERSOR ĆUK OPERANDO EM DCM COMO DRIVER DE LEDS .....	72
6.5. CONCLUSÃO PARCIAL .....	78
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>80</b>
6.1 – PRODUÇÃO CIENTÍFICA RESULTANTE DESTE TRABALHO .....	81
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>83</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A evolução da tecnologia em iluminação está estreitamente ligada com a mudança dos costumes e hábitos da sociedade que conhecemos. A revolução dos sistemas de iluminação modernos ocorreu com o advento da primeira lâmpada que utilizava energia elétrica para emissão de luz. Ao serem desenvolvidas e produzidas em escala industrial por Thomas Edison, as lâmpadas incandescentes propiciaram o início de atividades noturnas com mais abundância, fazendo com que este invento se tornasse um dos ícones do desenvolvimento do século XIX.

Com o passar dos anos, a necessidade da criação de técnicas mais eficientes para a produção de luz tornava-se evidente, visto que os sistemas de iluminação representavam uma parcela considerável no consumo mundial de energia elétrica.

A partir do surgimento das lâmpadas de descarga, melhores índices de eficiência luminosa<sup>1</sup> foram atingidos, fazendo com que diversos sistemas de iluminação fossem projetados baseados nestas tecnologias. Porém foram nos sistemas de iluminação pública (IP) que esta tecnologia ganhou destaque, principalmente com a evolução das lâmpadas de descarga em alta pressão.

O surgimento de LEDs baseados em InGaN fez com que fosse possível gerar luz branca a partir destes dispositivos. Com esta descoberta, iniciaram-se estudos acerca do emprego desta tecnologia em iluminação artificial. Como a maioria dos semicondutores, os LEDs apresentam uma evolução muito acentuada, mostrando que os sistemas de iluminação de estado sólido irão se tornar cada vez mais populares.

Portanto, neste trabalho serão apresentados os principais aspectos desta nova filosofia de iluminação, bem como suas vantagens e peculiaridades. Será mostrado também que os conversores eletrônicos para o acionamento destes dispositivos têm papel fundamental na evolução desta tecnologia.

Neste contexto, este trabalho propõe uma topologia para o acionamento de LEDs a partir da rede elétrica, visando a aplicação em iluminação pública. Contudo, para que o projeto deste conversor satisfaça todas as condições necessárias para o

---

<sup>1</sup> Eficiência luminosa é a proporção da energia da luz visível emitida (o fluxo luminoso) em relação à potência elétrica de entrada.

bom desempenho do sistema, é necessário entender todas as especificidades que um sistema de iluminação em estado sólido possui.

Neste sentido, este trabalho foi dividido em 7 capítulos, onde cada capítulo tem importância fundamental na composição do conhecimento necessário para o desenvolvimento de um conversor eletrônico que seja simples o suficiente para possuir grande robustez e baixo custo, mas o mesmo tempo atenda todos os parâmetros exigidos do ponto de vista da carga (i.e. os LEDs) e da fonte (i.e. redes de distribuição).

No capítulo 2 serão mostrados os aspectos gerais dos sistemas atuais de iluminação pública. Ainda neste capítulo, será possível ver como a resposta dinâmica do olho humano influencia diretamente num projeto de um sistema de iluminação. Este capítulo traz ainda uma análise de viabilidade econômica, comparando os principais aspectos da tecnologia que utiliza lâmpadas de vapor de sódio e os sistemas de iluminação de estado sólido.

A partir das análises feitas no capítulo 2, poderão ser estabelecidos os parâmetros da eficiência mínima do driver e será mostrado também que se a vida útil do conversor de acionamento for compatível com a vida útil do LED, a tecnologia possui uma boa viabilidade econômica, mesmo com custos de implantação mais elevados do que o sistema concorrente.

Feita esta análise técnico-econômica, o capítulo 3 irá mostrar um estudo detalhado dos diodos emissores de luz. Neste capítulo será feita uma correlação entre o fluxo luminoso emitido por estes dispositivos com as grandezas de tensão e corrente dos mesmos. Esta correlação será a base da metodologia de projeto da topologia proposta. Será possível mostrar a partir deste estudo que as capacitâncias de filtragem podem ser diminuídas, fazendo com que seja possível a utilização de capacitores de filme ao invés de capacitores eletrolíticos, que são os grandes responsáveis pela diminuição da vida útil do *driver*<sup>1</sup> (RODRIGUEZ; AMARATUNGA, 2008).

No capítulo 4 serão estabelecidas as exigências do ponto de vista da fonte. Serão mostrados alguns problemas referentes a qualidade de energia nos sistemas de distribuição, bem como a influência dos sistemas de iluminação neste quadro. A fim de avaliar a preocupação dos fabricantes de luminárias LED acerca deste

---

<sup>1</sup> Conversor eletrônico

problema, alguns dispositivos comerciais serão avaliados de acordo com a norma IEC 61000-3-2. Comentários sobre a oscilação de tensão nos ramais de distribuição também serão feitos.

No capítulo 5 serão apresentadas algumas soluções para o acionamento de LEDs em iluminação pública com base nas premissas preestabelecidas nos capítulos 2,3 e 4. Neste capítulo será mostrado por que o conversor  $\acute{C}uk$  se mostra atrativo para este tipo de aplicação.

No capítulo 6 será mostrado a análise teórica completa do conversor  $\acute{C}uk$  operando como conversor de acionamento de LEDs a partir da rede elétrica. Será proposta uma metodologia de projeto para este conversor baseada nos estudos fotométricos realizados no capítulo 3. Por fim, resultados experimentais serão mostrados a fim de validar o desenvolvimento teórico proposto.

No capítulo 7 serão mostradas as conclusões do trabalho, bem como a proposta para trabalhos futuros.

## 2. LEDS EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA: CONTEXTO GERAL

O objetivo deste capítulo é fazer uma breve introdução aos sistemas atuais de iluminação pública, bem como mostrar como os LEDs são atrativos para esta aplicação.

Primeiramente será mostrado o quadro atual dos sistemas de iluminação, dando ênfase para os sistemas brasileiros. Após esta apresentação, serão discutidas questões sobre a iluminação em estado sólido, que possui diversos elementos que a diferenciam sistema atual. Ademais, serão mostradas algumas particularidades dos sistemas de iluminação pública e de como os LEDs possuem características que os fazem interessantes para este tipo de aplicação.

Este capítulo conta ainda com uma pequena análise econômica da implantação de sistemas de iluminação em estado sólido, para que assim, não só a viabilidade técnica seja observada, mas também a viabilidade econômica, fundamental para a disseminação da tecnologia.

Por fim, será mostrado por que a qualidade do driver da luminária LED é fundamental para o sucesso da tecnologia, gerando uma base de requisitos para o projeto do conversor que será proposto neste trabalho.

### 2.1. ESTADO ATUAL DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Atualmente, estima-se que existem cerca de 14,7 milhões de pontos de iluminação pública no Brasil (ELETROBRAS, 2008), que representam uma demanda de 2,2 GW e a um consumo de 9,7 bilhões de kWh/ano (ELETROBRAS, 2008). Juntamente com os sistemas de iluminação de interiores, estima-se que 30% da energia elétrica mundial é consumida em sistemas de iluminação artificial (POLONSKII; SEIDEL, 2008).

Este enorme consumo faz com que uma busca constante por fontes de luz mais eficientes seja necessária. A Figura 1 mostra a evolução da eficiência luminosa<sup>1</sup> de algumas fontes comumente utilizadas nos parques de iluminação. Seguindo esta evolução, mais especificamente na área de iluminação pública, alguns programas como o Reluz da Eletrobrás, propõem a substituição de parques

---

<sup>1</sup> Eficiência luminosa é a proporção da energia da luz visível emitida (o fluxo luminoso) em relação à potência elétrica de entrada

inteiros para tecnologias mais eficientes, reduzindo assim a demanda necessária das fontes de iluminação pública.

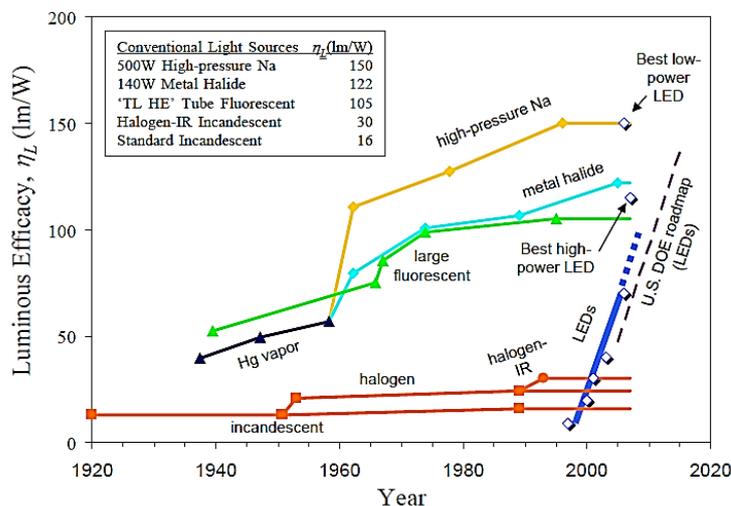


Figura 1. Evolução paralela da eficiência luminosa de diversas tecnologias de iluminação (CRAFORD, 2007)

Outro fator que motiva a modernização dos parques de iluminação pública, é o fato de que a iluminação é ligada em torno das 18 horas, ou seja, dentro do horário de ponta, que é o momento em que a demanda do sistema elétrico brasileiro é a maior. Portanto, projetos de eficiência energética na área de iluminação pública podem diminuir a necessidade da construção de novos empreendimentos para geração de energia elétrica.

Através da Figura 2 é possível ver a evolução das tecnologias nos parques de iluminação pública nacionais. Pode-se ver que atualmente a tecnologia mais empregada é a de vapor de sódio em alta pressão, seguida da lâmpada de vapor de mercúrio.

Este domínio da tecnologia VSAP<sup>1</sup> é justificado por sua eficiência luminosa (em torno de 120 lm/W) e também por sua alta vida útil, que pode chegar a 32.000 horas (OSRAM, 2011). Esta elevada vida útil faz com que os custos de manutenção sejam reduzidos, fazendo com que esta tecnologia seja altamente viável economicamente.

<sup>1</sup> VSAP – Vapor de sódio em alta pressão.

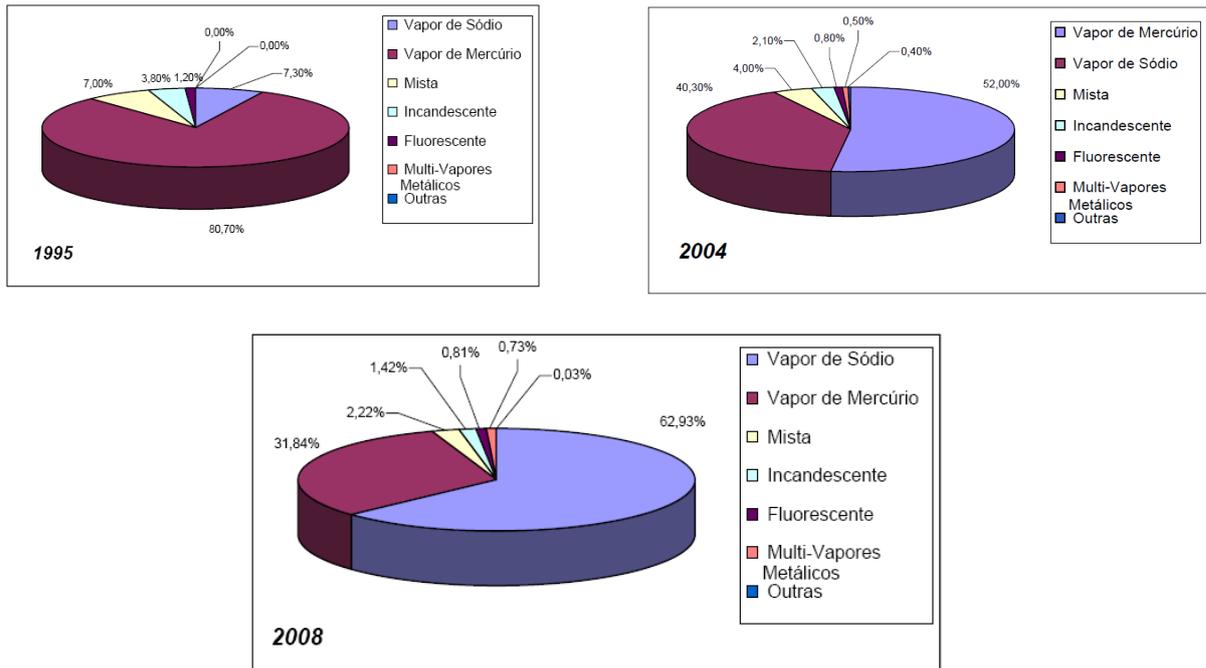


Figura 2. Evolução das tecnologias de iluminação pública nos parques nacionais (ELETROBRAS, 2008)

Uma das grandes desvantagens da tecnologia VSAP é seu baixo IRC<sup>1</sup> (i.e índice de reprodução de cores), que gira em torno de 0,3. Todavia, para a aplicação em iluminação pública, este índice não restringe a aplicação desta tecnologia.

Apesar de ser a lâmpada o principal elemento do sistema de iluminação VSAP, outros elementos como a luminária e o reator, são tão importantes quanto. Portanto, se faz necessário garantir a boa qualidade dos mesmos para que o sistema possua uma elevada eficiência.

Por irradiar em todas as direções, a lâmpada de sódio necessita de uma luminária com um corpo refletor que é responsável por fazer a distribuição espacial do fluxo luminoso<sup>2</sup> emitido pela lâmpada. Todavia, como um elevado percentual da radiação original da lâmpada precisa ser refletido, há uma perda de eficiência do sistema na luminária, uma vez que esta não possui uma refletância ideal. O rendimento ótico típico deste tipo de luminária pode variar entre 70% e 85%. A importância da eficiência de cada elemento do sistema sódio para sua viabilidade técnico-econômica será mostrada mais detalhadamente na seção 2.3.

<sup>1</sup> IRC – índice que mensura a capacidade da fonte luminosa em reproduzir cores.

<sup>2</sup> fluxo luminoso é o somatório da radiação visível emitida por uma fonte luminosa, em todas as direções.

## 2.2. ILUMINAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO: UMA NOVA FILOSOFIA

Todo projeto em engenharia têm objetivos e especificações a serem atingidas. No caso de engenharia de iluminação, o parâmetro a ser estudado e analisado é como os usuários do sistema recebem a radiação, que tipo de radiação é esta e como ela é processada pelo sistema visual humano. Um bom projeto deve se ater a responder estas questões, bem como analisar a viabilidade técnica e econômica do empreendimento.

Para entender melhor como funciona o sistema visual humano, é interessante avaliar seu principal componente, o olho. A Figura 3 mostra a figura de um olho, onde é possível ver a presença das células fotossensíveis: os cones e os bastonetes. Os bastonetes, mais abundantes, são muito mais sensíveis à luz do que os cones, contudo não podem diferenciar as cores. A Figura 4 ilustra a distribuição de cones e bastonetes na córnea.

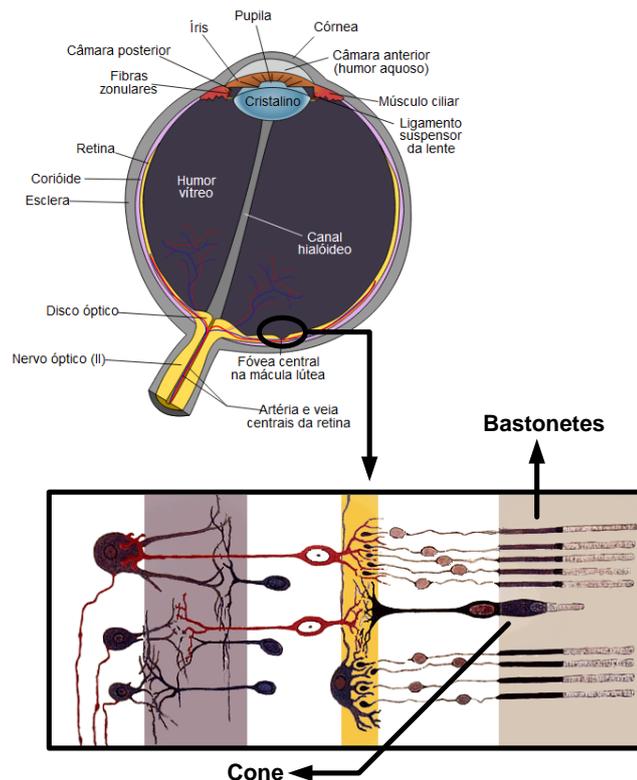


Figura 3. Principais estruturas do olho humano

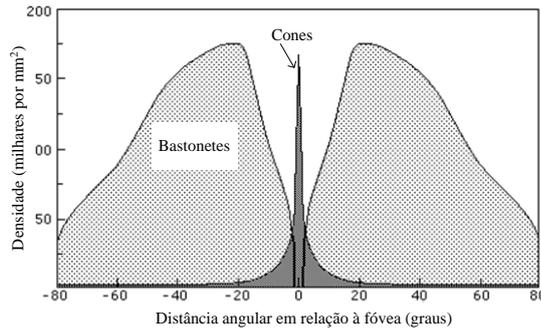


Figura 4. Distribuição das células fotossensíveis na córnea (SCHREUDER, 2008)

Pode-se ver pela Figura 4 que a concentração dos cones e bastonetes ocorre em lugares distintos, enquanto os cones ocupam a região central da córnea, os bastonetes ocupam a região periférica, contudo em maior número.

De acordo com a abertura ou fechamento da pupila, que ocorre devido variação da intensidades da radiação incidente, a luz é direcionada para diferentes regiões do olho, sensibilizando diferentes concentrações de cones e bastonetes. Isto faz com que o olho apresente diversas curvas de sensibilidade à luz. De acordo com o nível de luminância<sup>1</sup> do ambiente, é possível determinar uma curva característica de sensibilidade espectral do olho.

Em Schreuder (2006), foi mostrado que baixos níveis de luminância (i.e menores que 0,01 cd/m<sup>2</sup>) retratam a condição escotópica, a condição fotópica engloba as curvas espectrais para altas luminâncias (i.e maiores que 3,0 cd/m<sup>2</sup>) e a faixa que compreende estas duas regiões é a chamada condição mesópica.

Como já foi dito, para cada condição de luminância é possível obter uma resposta de sensibilidade espectral do olho. No intuito de avaliar a situação de luminância de uma via de urbana com iluminação pública, foi feita uma medição no anel viário da faculdade de engenharia da UFJF, que mostrou um nível de 0,3 cd/m<sup>2</sup>, ou seja, condição mesópica.

As respostas de sensibilidade espectral do olho para diferentes condições de luminância podem ser vistas nas Figura 5. Nesta figura são representadas as curvas de sensibilidade para a resposta fotópica, escotópica e mesópica (i.e na condição medida no anel viário da faculdade de engenharia da UFJF).

<sup>1</sup> Luminância é uma medida da densidade da intensidade de uma luz refletida numa dada direção. Sua unidade é a cd/m<sup>2</sup>.

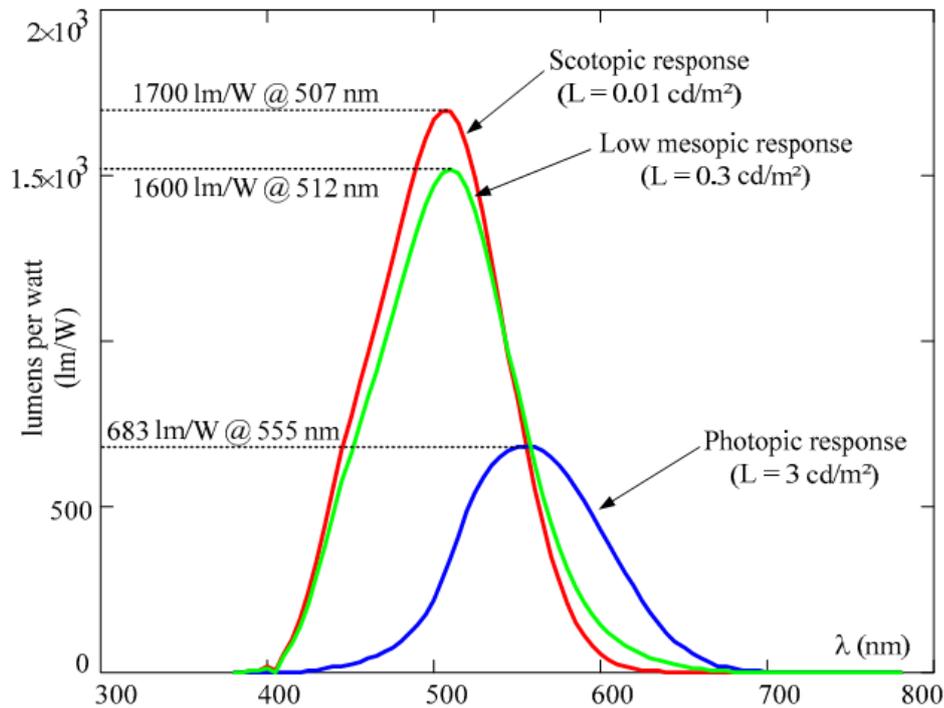


Figura 5. Resposta do olho para diferentes condições de luminância (ALMEIDA, *et al.*, 2011a)

Para entender qual é a influência da resposta do olho no projeto de sistemas de iluminação é necessário entender a definição matemática do fluxo luminoso emitido por uma fonte, que é definido pela expressão (2.1).

$$\Phi = k_n \int_0^{\infty} V_n(\lambda) \cdot J(\lambda) d\lambda \quad (2.1)$$

A constante  $k_n$  e a curva  $V_n(\lambda)$  são respectivamente o pico e a curva de sensibilidade espectral do olho humano, representadas na Figura 5. A curva  $J(\lambda)$  depende apenas da fonte da radiação. Algumas curvas de densidade espectral de potência estão representadas na Figura 6. Note que para cada curva  $V_n(\lambda)$  haverá um fluxo luminoso diferente, mostrando que para cada condição de luminância, a potência luminosa efetiva (i.e sensação de luminosidade) será diferente. Portanto, a expressão (2.1) mostra que as curvas de sensibilidade espectral dos regimes fotópico, escotópico e mesópico ponderam a radiação da fonte luminosa. Devido à isto, uma lâmpada de vapor de sódio (Figura 6-a), tem um fluxo luminoso fotópico (i.e  $V_n(\lambda)$  igual a curva azul da Figura 5) maior do que seu fluxo escotópico (i.e  $V_n(\lambda)$  igual a curva vermelha da Figura 5), já com fontes de radiação branca (e.g. LEDs) ocorre o inverso, ou seja, o fluxo luminoso escotópico é maior que o fotópico,

pois estas lâmpadas possuem uma densidade espectral maior em comprimentos de onda em torno dos 500 nm.

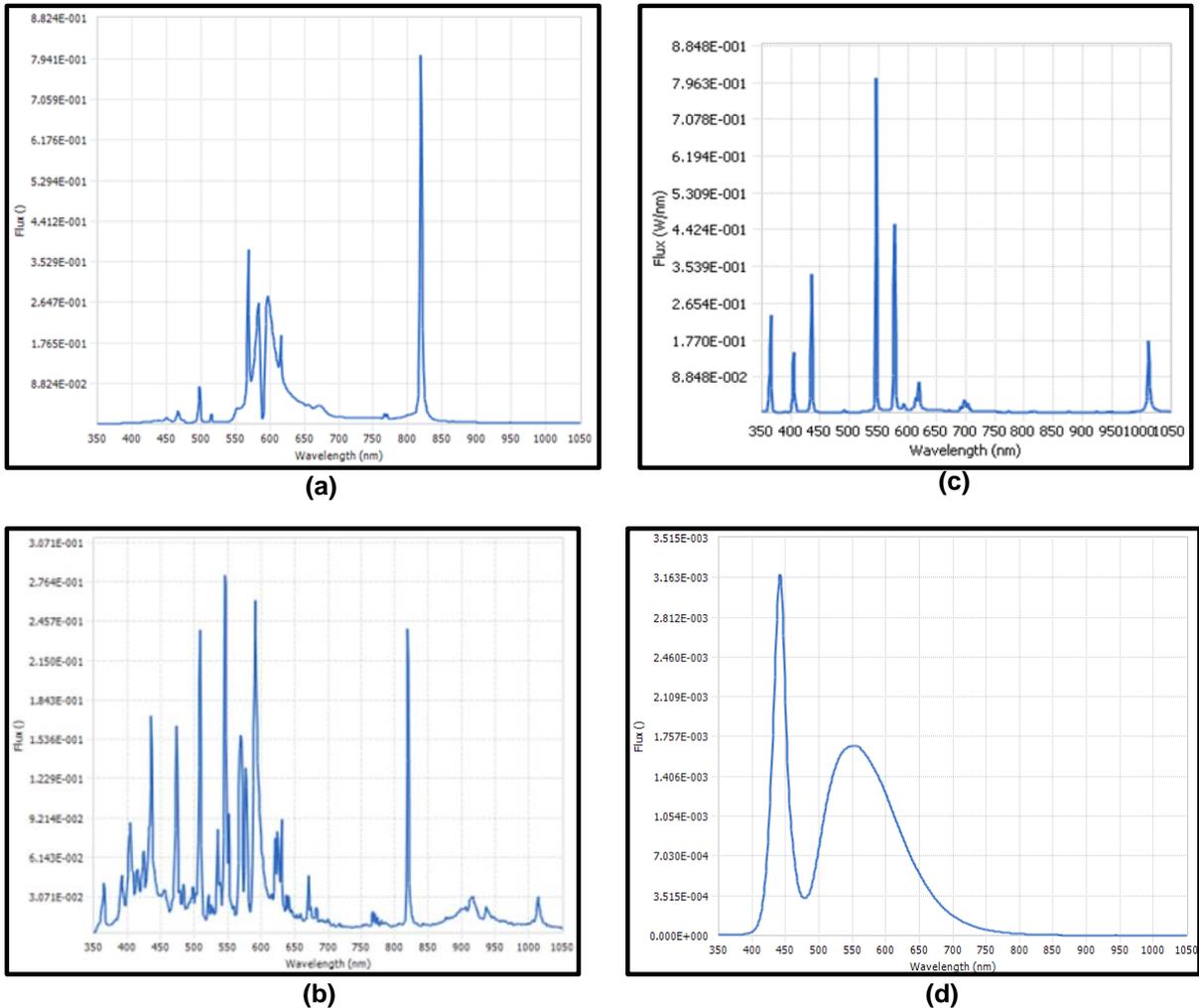


Figura 6. Diagrama de densidade espectral de potência típico de uma lâmpada de (a) Vapor de Sódio; (b) Multivapores metálicos; (c) Vapor de mercúrio; (d) LEDs

A Tabela 1 mostra uma comparação entre as eficiências luminosas de algumas fontes quanto são levadas em consideração curvas diferentes de sensibilidade espectral para a realização do cálculo.

Tabela 1. Valores de fluxo fotópico e escotópico para algumas fontes luminosas (ALMEIDA, *et al.*, 2011a)

Fonte Luminosa	Eficiência Fotópica	Eficiência Escotópica
VSAP 70W	77 lm/w	44,4 lm/w'
MH <sup>1</sup> 70W	60,9 lm/w	107,2 lm/w'
LED de potência@ 350 mA	85,9 lm/w	167,8 lm/w'

<sup>1</sup> MH - do inglês *metal halide* ; lâmpada de vapores metálicos.

A fotometria clássica, empregada na maioria dos equipamentos de medição fotométrica, utiliza curvas fotópicas para o estabelecimento de suas medidas. Para medições em ambientes com alta luminância, a aproximação pela curva fotópica pode ser feita sem que haja uma grande discrepância entre a resposta dos aparelhos e a resposta do olho humano. Contudo, para ambientes noturnos, onde encontram-se baixos níveis de luminância, a curva escotópica apresenta menor erro. Note que a análise das grandezas luminotécnicas seria mais precisa se os aparelhos fossem ajustados para cada condição de luminância. Contudo isto geraria um problema de padronização e dificultaria projetos de iluminação. Todavia, é importante ressaltar que a resposta do olho varia de acordo com os níveis de luminância, alterando a percepção das condições de iluminação do ambiente.

Outra figura importante ao se analisar projetos de iluminação é o índice de reprodução de cores (IRC), que mostra a capacidade que a fonte luminosa tem de reproduzir cores. A Tabela 2 mostra a comparação de algumas fontes quanto a este parâmetro. Note que fontes de luz branca possuem IRC muito melhores do que fontes de luz amarela, como a lâmpada de vapor de sódio. Foi mostrado em (JONES, 1989) que fontes com IRC mais elevado criam uma diferença de cor entre os objetos que estimulam de forma significativa o sistema visual humano, principalmente em condições de baixo contraste.

Tabela 2. Valores típicos de IRC para algumas fontes luminosas

<b>Fonte Luminosa</b>	<b>IRC</b>
VSAP	< 40%
MH	>75 %
Incandescente	100 %
Fluorescente	>70%
Vapor de mercúrio alta pressão	< 50 %
LED de potência	>75 %

Portanto, aliada à questão da resposta do olho humano, o IRC faz com que a sensação de luminosidade de vias públicas iluminadas por fontes de luz branca como o LED seja maior, mesmo com menores níveis de iluminância, que é o parâmetro comumente utilizado para a avaliação da qualidade de iluminação de um ambiente. A Figura 7 mostra uma comparação feita entre uma via iluminada por lâmpadas de vapor de sódio e a mesma via com iluminação LED, que retrata bem esta situação.



Figura 7. Foto de uma via iluminada com LED (à esquerda) e VSAP (à direita). (TECNOWATT/SIMON LIGHTING)

Além das questões luminotécnicas, os sistemas de iluminação com LEDs possuem um melhor arranjo ótico, pois devido às suas características construtivas, a luminária pode ser projetada de forma que uma pequena parte do fluxo emitido pelos dispositivos tenha que ser refletido. Isso faz com que a eficiência ótica da luminária seja muito elevada.

### 2.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE A ATRATIVIDADE ECONÔMICA DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO COM LEDS

Na última seção deste capítulo foram mostradas algumas particularidades dos sistemas de iluminação empregando diodos emissores de luz. Pode-se ver que o mesmo possui diversas características que habilitam sua aplicação em iluminação pública. Contudo, a utilização de LEDs em larga escala no país dependerá também da atratividade econômica desta tecnologia.

Sabe-se que sistemas de iluminação pública possuem algumas peculiaridades que devem ser analisadas para a avaliação econômica da tecnologia.

O primeiro fator a ser analisado é a eficiência luminosa do conjunto de iluminação pública (i.e. lâmpada, *driver* e luminária). É importante destacar que a

informação da eficácia luminosa da fonte não é suficiente para a avaliação da eficiência do sistema. A Tabela 3 mostra uma comparação feita entre duas tecnologias de iluminação pública. É possível ver que, atualmente, a lâmpada de sódio possui uma eficiência luminosa maior que a dos LEDs<sup>1</sup>, contudo a eficiência do sistema LED é melhor.

Tabela 3. Comparação entre a eficiência dos sistemas LED e Sódio (LI, *et al.*, 2009)

<b>Parâmetro</b>	<b>LED (Comercial)</b>	<b>VSAP</b>
Eficiência luminosa da fonte	100 lm/W	110 lm/W
Eficiência térmica	90%	100%
Eficiência elétrica	90%	85%
Eficiência da luminária	90%	75%
Eficiência global do sistema	72,9 lm/W	70,1 lm/W

Pode-se ver que o projeto da luminária e do driver influenciam muito na eficiência global do sistema. Note que o projeto de um driver com eficiência elevada interfere diretamente no resultado da avaliação. Na Tabela 3, caso a eficiência do driver de LEDs fosse 95%, o desempenho do sistema iria subir para aproximadamente 77 lm/W. É importante ressaltar que a eficiência da luminária relevada na Tabela 3 trata do fluxo útil que sai da luminária para todas as direções. Em termos de distribuição espacial da luz, a tecnologia LED também é mais interessante, pois, devido às suas características de emissão (i.e. emissão unidirecional), o fluxo luminoso oriundo da luminária é direcionado para o plano de trabalho quase que em sua totalidade. Já no sistema sódio, ocorre uma maior dispersão da luz emitida, provocando desperdício e poluição visual. Devido à este fato, quando se quer manter um mesmo nível de iluminamento, a luminária LED geralmente necessita de um fluxo efetivo menor.

O segundo fator a ser analisado é a questão da vida útil<sup>2</sup> da tecnologia. Este fator representa grande impacto numa análise de viabilidade econômica pois o preço de uma equipe de manutenção é elevado, além de grandes dificuldades no acesso de algumas estruturas de iluminação pública, como em avenidas movimentadas, bairros distantes, etc.

Atualmente a vida útil da tecnologia VSAP pode chegar a 32.000 horas, o que é elevado em relação à outras tecnologias como vapor metálico e mercúrio.

<sup>1</sup> Comparação feita entre produtos comerciais

<sup>2</sup> Tempo que a lâmpada leva para emitir 70% de seu fluxo original

No caso dos diodos emissores de luz a vida útil pode chegar a 100.000 horas com uma dissipação térmica adequada (PECK, ASHBURNER; SCHRATZ, 2011). Contudo, apesar da vida útil elevada dos LEDs, o tempo de vida das luminárias que empregam esta tecnologia chega apenas a cerca de 50.000 horas atualmente. O motivo desta discrepância é a utilização de capacitores eletrolíticos nos drivers que alimentam os LEDs. Geralmente a utilização destes componentes se torna necessária devido ao fato dos conversores eletrônicos que alimentam os LEDs necessitarem de altas capacitâncias de filtragem. Foi mostrado em (CHUNG, *et al.*, 2007) que capacitores eletrolíticos possuem uma vida útil altamente dependente da temperatura de operação, como é mostrado na Figura 8. Levando em consideração que as luminárias de iluminação operam cerca de 10 horas diárias, pode-se ver que um capacitor eletrolítico de 10.000 hrs@105°C teria uma vida útil de aproximadamente 9,6 anos (35.000 horas), ou seja, muito inferior à dos LEDs. Esta análise mostra que a utilização de capacitores eletrolíticos em drivers para LEDs limitam a vida útil da luminária e que um projeto que evitasse o uso destes componentes iria aumentar a confiabilidade do sistema, bem como sua viabilidade econômica.

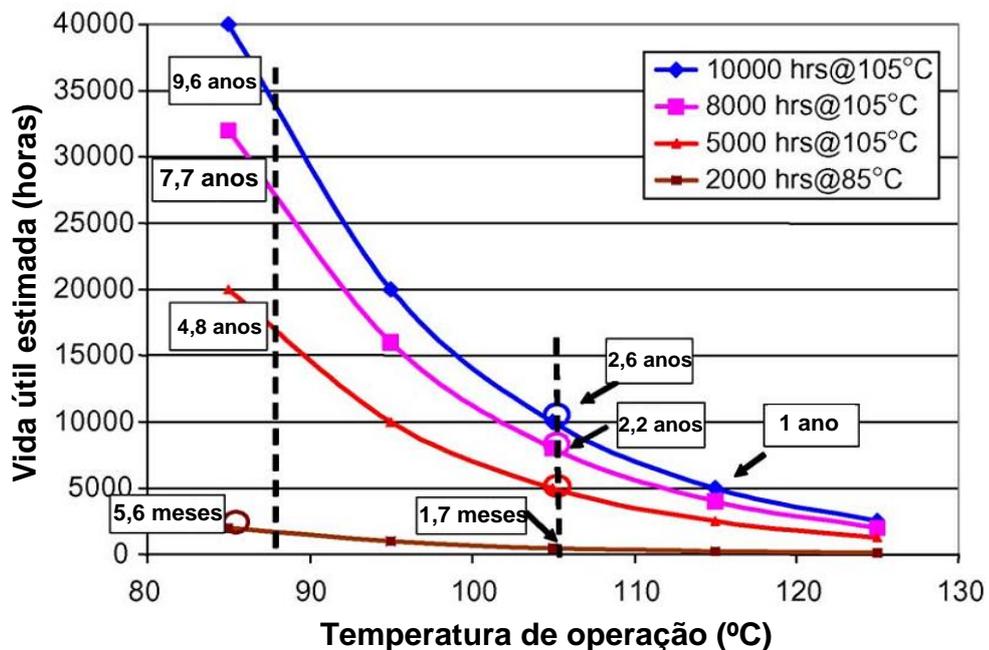


Figura 8. Vida útil estimada de capacitores eletrolíticos. Adaptado de (CHUNG, *et al.*, 2007)

Levantados estes parâmetros importantes na avaliação econômica das tecnologias LED e VSAP, é possível construir um modelo econômico destes sistemas. O método utilizado para análise foi Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE) da tecnologia, que é utilizado em situações onde se quer analisar a substituição de uma tecnologia por outra (CASAROTTO FILHO; HARTMUT KOPITTKKE, 1996). Como o próprio nome já diz, este método analisa o custo equivalente da tecnologia durante sua vida útil, e esta forma de análise é interessante pois leva em consideração a vida útil do equipamento, os custos de instalação e os custos de operação. Para uma análise mais simplificada, os custos de manutenção durante a vida útil não serão considerados (i.e. o equipamento<sup>1</sup> não têm problemas de funcionamento durante sua vida útil e é substituído ao desta é substituído por um novo).

O fluxo de caixa para análise de um sistema de iluminação é então mostrado na Figura 8. Note que o custo de operação foi considerado constante durante a vida útil, ou seja, desprezou-se a variação da tarifa de energia durante o horizonte de planejamento.

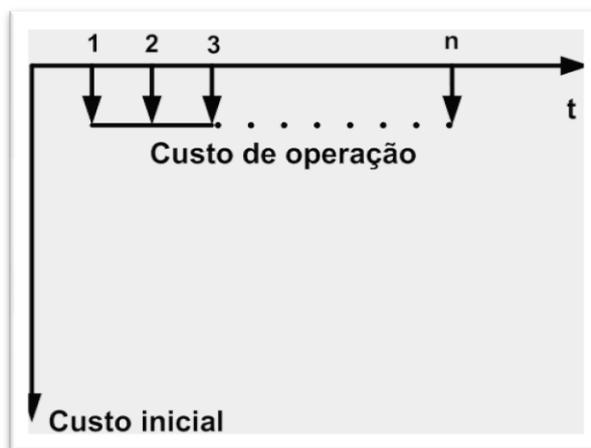


Figura 9. Fluxo de caixa para um sistema de iluminação.

A partir do fluxo de caixa representado na Figura 9 pode-se escrever a equação do CAUE para cada tecnologia. As equações (2.2) e (2.3) representam o CAUE para o sistema de iluminação pública com a tecnologia VSAP e LED respectivamente. A equação (2.4) representa um fator que expande o valor do custo inicial em todo o horizonte de planejamento, que no caso é a vida útil da tecnologia. A descrição dos parâmetros pode ser vista na Tabela 4.

<sup>1</sup> Luminária, lâmpada (ou módulo de LEDs) e reator (ou driver)

$$CAUE_{VSAP} = \overbrace{C_I(\phi_{nom})_{VSAP} \times D(t_{VSAP})}^{\text{Custo de implantação}} + G \frac{\overbrace{H \times \phi_{nom} \times T}^{\text{Custo de operação}}}{\eta_{LS} \eta_{REAT} \eta_{LAMP}} \quad (2.2)$$

$$CAUE_{LED} = \overbrace{C_I(K_{PROJ} \phi_{nom})_{LED} \times D(t_{LED})}^{\text{Custo de implantação}} + G \frac{\overbrace{H \times \phi_{nom} \times K_{PROJ} \times T}^{\text{Custo de operação}}}{\eta_{LL} \eta_{DRIVER} \eta_{LED}} \quad (2.3)$$

Onde:

$$D(t) = \frac{i(1+i)^t}{(1+i)^t - 1} \quad (2.4)$$

Tabela 4. Descrição dos parâmetros utilizados na análise de atratividade econômica

Parâmetro	Descrição	Unidade
$C_I(\Phi_{nom})_{VSAP}$	Custo de implantação do sistema VSAP em função do fluxo requerido	U.M. <sup>1</sup>
$C_I(K_{PROJ} \Phi_{nom})_{LED}$	Custo de implantação do sistema LED em função do fluxo requerido	U.M.
D(t)	Fator de conversão de valor presente para série uniforme equivalente	-
t	tempo	anos
i	Taxa Mínima de Atratividade (T.M.A)	-
$t_{VSAP}$	Vida útil do sistema VSAP	anos
$t_{LED}$	Vida útil do sistema LED	anos
H	Número de horas de funcionamento do sistema por dia	horas/dia
G	Constante de proporcionalidade - G = 0,365	(dia/ano)*(kW/W)
$\phi_{nom}$	Fluxo nominal de projeto do sistema sódio	lumens
T	Tarifa de energia	U.M./kWh
$\eta_{LS}$	Eficiência da luminária VSAP	-
$\eta_{REAT}$	Eficiência do reator	-
$\eta_{LAMP}$	Eficiência luminosa da lâmpada	lm/W
$K_{PROJ}$	Constante de adequação do projeto de distribuição espacial do fluxo da luminária LED com relação à luminária VSAP	-
$\eta_{LL}$	Eficiência da luminária LED	-
$\eta_{DRIVER}$	Eficiência do driver LED	-
$\eta_{LED}$	Eficiência do LED	lm/W

<sup>1</sup> U.M. - Unidade monetária

A comparação entre as duas tecnologias é feita através de um sistema de iluminação que exige um valor de fluxo luminoso  $\phi_{nom}$  para que os níveis de iluminamento desejáveis sejam atingidos. Foi tomada como base a tecnologia VSAP, sendo  $\phi_{nom}$  o fluxo de saída de uma luminária desta tecnologia. No caso da tecnologia LED, o fluxo necessário para atingir os mesmos níveis de iluminamento não é necessariamente o mesmo, pois como já foi dito, luminárias LED geralmente possuem uma melhor distribuição espacial do fluxo, necessitando assim de um menor fluxo total para iluminar a via com a mesma qualidade. Logo, para adequar o projeto luminotécnico da tecnologia VSAP com a tecnologia LED foi criada uma constante  $K_{PROJ}$ , definida por (2.5). Note que, na maioria dos casos, esta expressão será inferior à unidade.

$$K_{PROJ} = \frac{\phi_{LED}}{\phi_{VSAP}} \quad (2.5)$$

Como pode-se ver, as equações de CAUE para ambas tecnologias possuem duas parcelas, uma que depende dos custos de implantação e outra parcela que depende dos custos operacionais. É notável a relação do projeto da luminária, da qualidade dos LEDs e do driver com a parcela dos custos operacionais. Logo, uma melhora em algum destes sistemas irá provocar uma redução dos custos operacionais, melhorando a atratividade econômica do sistema.

A parcela de custo de implantação é composta por dois fatores, a do custo total de implantação da luminária, que é uma função do fluxo luminoso requerido e do fator de conversão  $D(t)$ , que é uma função da vida útil do sistema. A Figura 10 mostra como o fator  $D(t)$  varia em função da vida útil do sistema e da TMA. Como a TMA para a análise comparativa é sempre a mesma, nota-se que quanto maior a vida útil do equipamento, menor o fator de multiplicação do custo de instalação, ou seja, menor sua influência no CAUE.

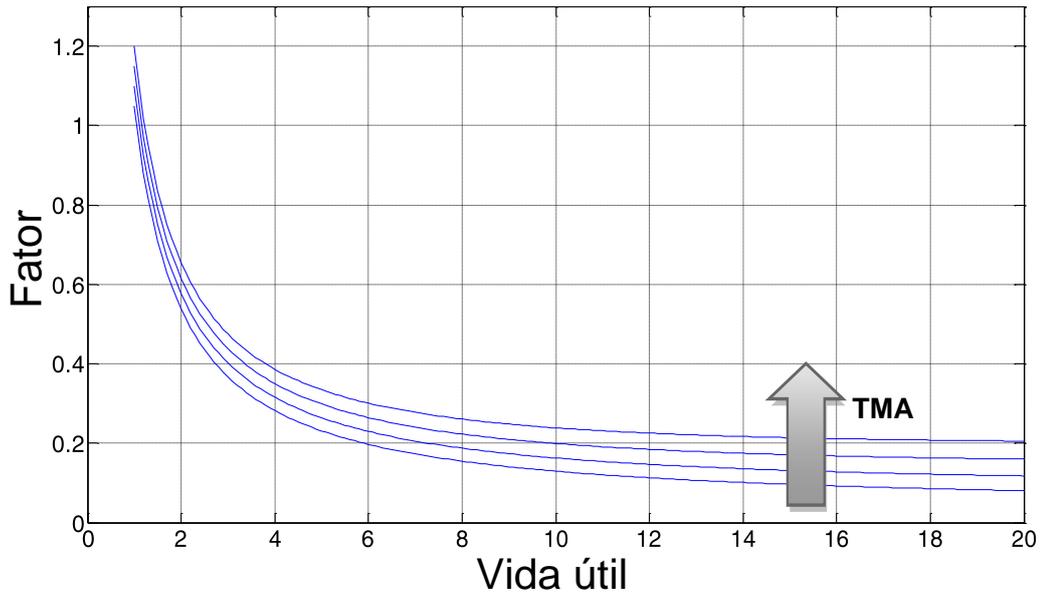


Figura 10. Variação de  $D(t)$  com a vida útil e a TMA

Para que o sistema LED seja mais interessante economicamente que o sistema VSAP, a equação (2.2) deve ser maior que a equação (2.3). Desenvolvendo esta inequação e isolando os termos econômicos dos termos técnicos, chega-se à relação (2.6).

$$\phi_{nom} \left( \frac{1}{\eta_{LS}\eta_{REAT}\eta_{LAMP}} - \frac{K_{PROJ}}{\eta_{LL}\eta_{DRIVER}\eta_{LED}} \right) > \frac{1}{GHT} [C_I (K_{PROJ}\phi_{nom})_{LED} \times D(t_{LED}) - C_I (\phi_{nom})_{VSAP} \times D(t_{VSAP})] \quad (2.6)$$

A partir da expressão (2.6) é possível analisar qualitativamente a influência dos parâmetros de projeto na atratividade econômica da tecnologia. Pode-se ver que o custo inicial de implantação da tecnologia aparece ponderado por um fator que decresce com o aumento da vida útil, isso significa que, um projeto de luminária que aumente a vida útil do sistema pode minimizar o custo inicial da tecnologia. Nota-se também que com o aumento do fluxo de projeto  $\phi_{nom}$  há uma tendência em favor da tecnologia LED, uma vez que a função do custo de implantação cresce de forma mais lenta do que o incremento percentual do fluxo nominal, isso significa que a atratividade econômica da tecnologia LED é potencializada em locais com uma alta potência instalada de VSAP. Como pode ser visto na Figura 1, a eficiência luminosa dos LEDs vêm aumentando significativamente nos últimos anos, aliada a uma modernização dos drivers eletrônicos, que devem se tornar cada vez mais eficientes,

e uma melhora do desempenho ótico da luminária LED. Com isso, a tecnologia tende a ficar cada vez mais atrativa do ponto de vista econômico. Além disso, com o aumento da utilização de LEDs nos parques de iluminação pública, o custo de implantação tende a se reduzir significativamente, ajudando assim a difusão da tecnologia.

## 2.4. CONCLUSÃO PARCIAL

Este capítulo apresentou uma breve introdução aos sistemas de iluminação que são usados atualmente, mostrando algumas de suas características, bem como suas particularidades. Foi mostrado um quadro atual da iluminação pública no Brasil, bem como sua importância no cenário energético nacional.

O leitor também pôde se familiarizar com as questões sobre a resposta dinâmica do olho, e como esta varia devido a diferentes regimes de iluminação. Foram relevadas questões sobre a diferença das condições de um ambiente altamente iluminado para um ambiente com pouca iluminação. Esta análise mostrou que o sistema visual humano é mais sensível à fontes luminosas que emitem radiação branca. Além desta questão, foi mostrado também que o IRC contribui para a diferenciação de objetos, principalmente em condições de baixo contraste.

A seção 2.3 deste capítulo traz uma breve análise de atratividade econômica da tecnologia LED. Foi possível ver através da análise feita que a vida útil da tecnologia possui grande influência sobre a viabilidade econômica do sistema LED. Mostrou-se também a grande relação que a vida útil do sistema tem com o emprego de capacitores eletrolíticos nos drivers da luminária LED, sendo assim, um projeto que elimine a utilização deste tipo de capacitor é altamente desejável para o sucesso da tecnologia.

Foi visto também que a eficiência luminosa da fonte pode ser um parâmetro que esconda a real eficiência do sistema. Uma análise mais criteriosa deve levar em consideração a eficiência da fonte (i.e. da lâmpada de sódio ou módulo de LEDs), da luminária e do sistema de acionamento (i.e. reator ou driver). A análise econômica também mostrou que estes parâmetros possuem relação direta com a atratividade do sistema. No caso mais específico do driver de LEDs, é interessante que o mesmo tenha uma eficiência de no mínimo de 85% (típica de um reator eletromagnético),

pois caso contrário, a comparação do driver de LEDs com a tecnologia sódio nesse quesito favorecerá a tecnologia VSAP.

Além disso, o desempenho da luminária, no que tange a parte da distribuição espacial do fluxo, também é um fator decisivo na escolha da tecnologia economicamente mais viável. Luminárias de lâmpadas de vapor de sódio geralmente têm uma dispersão maior do fluxo luminoso, iluminando lugares indesejáveis e causando poluição visual. Já luminárias que utilizam LED possuem uma dispersão menor, uma vez que é possível concentrar a maior parte do fluxo na via. Isso faz seja a possível a utilização de luminárias LED com menor fluxo luminoso nominal para que se mantenha um mesmo nível de iluminação.

### 3. ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DO DIODOS EMISSORES DE LUZ

#### 3.1. LEDS COMO FONTES DE LUZ

Os diodos emissores de luz são dispositivos formados por duas camadas semicondutoras, uma do tipo P e outra do tipo N. Seu princípio de funcionamento é ilustrado pela Figura 11.

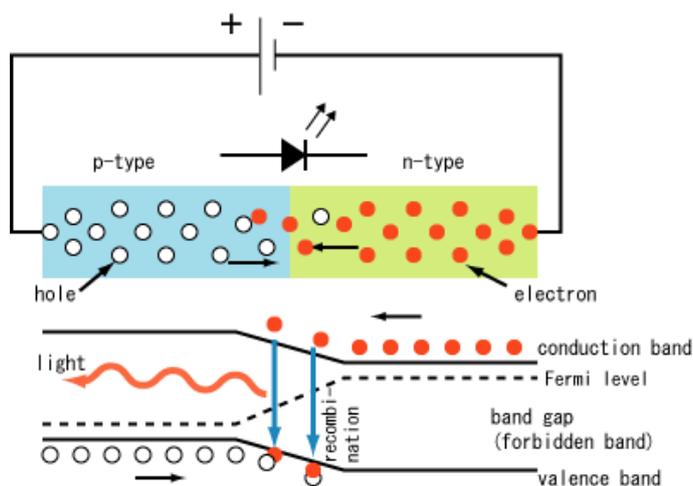


Figura 11. Funcionamento de um LED

Quando a junção P-N é polarizada diretamente, ocorre um fluxo de elétrons e lacunas. Quando o elétron possui energia suficiente para atravessar a junção PN, o mesmo passa da camada de condução para a camada de valência, recombinando-se com uma lacuna. Este fenômeno é conhecido como recombinação. Como há uma diferença de energia entre a camada condução e a camada de valência, este processo libera energia em forma de calor e luz. O comprimento de onda da radiação resultante irá depender dos materiais que foram usados na dopagem do LED, uma vez que estes influenciam na diferença de energia entre as camadas de condução e valência. É possível depreender desta análise que a luz emitida por um LED tem uma relação muito estreita com a corrente que circula pelo mesmo, sendo assim, é possível afirmar que o fluxo produzido por um LED é diretamente proporcional à corrente média que circula pelo mesmo.

Como já foi citado anteriormente, o LED só se tornou viável para aplicações em iluminação quando foi descoberta, em meados da década de 90, a possibilidade de se gerar luz branca a partir deste dispositivo. Existem basicamente duas formas

de se obter luz branca através deste semiconductor: utilizando uma camada de fósforo no invólucro do LED ou utilizando dispositivos *RGB* (Red-Green-Blue).

Nos PC-LEDs (*phosphor-converted LEDs*), são utilizados semicondutores que emitem radiação com um comprimento de onda em torno dos 470 *nm* (i.e. luz azul), com uma cobertura de fósforo em seu invólucro. Quando os fótons passam pela cobertura supracitada, ocorre um deslocamento no comprimento de onda de parte da radiação original, fazendo com que seja gerada luz com comprimentos de onda maiores, gerando uma radiação resultante na cor branca. Este funcionamento é ilustrado na Figura 12. A quantidade de fósforo inserida no invólucro é responsável por determinar características como a temperatura correlata de cor (TCC)<sup>1</sup>, o índice de reprodução de cor (IRC) e a eficiência luminosa (RODRIGUES, ET. AL., 2011).

A Figura 13 mostra a curva de densidade espectral relativa resultante da utilização de um LED que utiliza os fenômenos de eletroluminescência do semiconductor InGaN e de fosforescência do fósforo YAG:Ce.

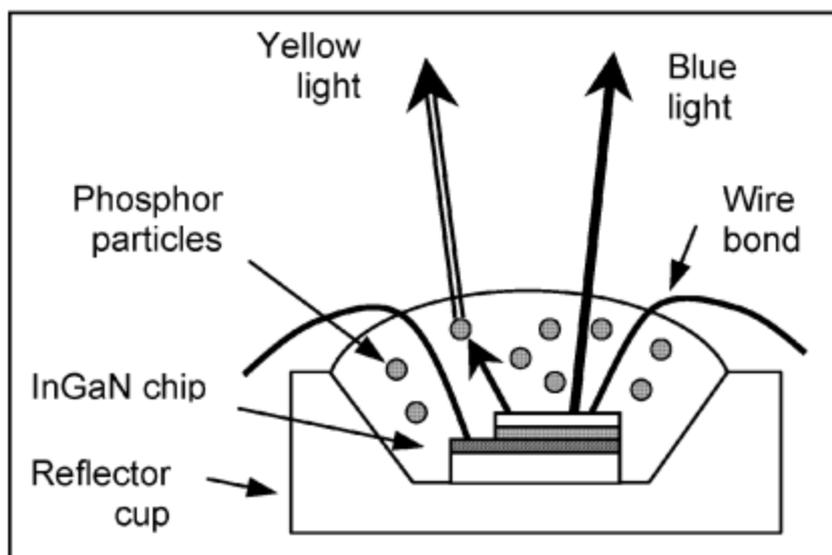


Figura 12. Funcionamento PC-LEDs (SHUR; ZUKAUSKAS, 2005)

<sup>1</sup> Temperatura correlata de cor é a temperatura que um corpo negro ideal deveria atingir para emitir uma radiação similar ao da fonte de luz em análise.

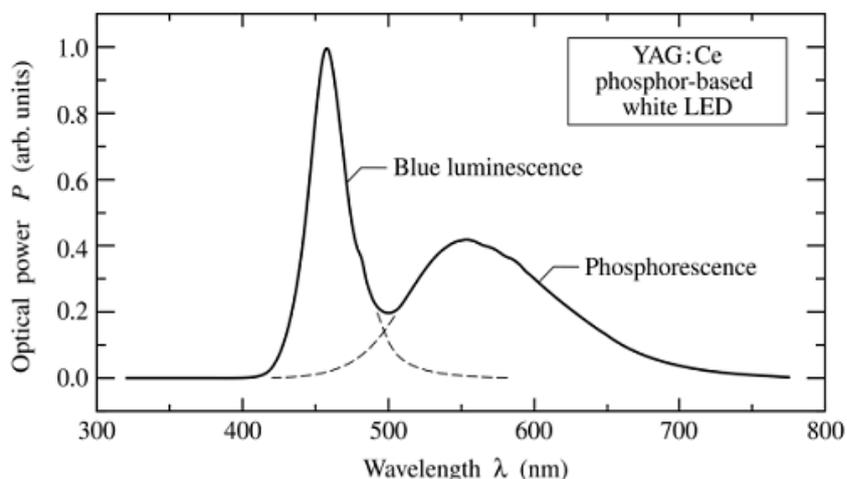


Figura 13. Curva de densidade espectral de potência de um PC-LED (SCHUBERT, 2003)

Outra forma de se obter luz branca a partir do método PC (*phosphor conversion*) é utilizando a técnica BSY+ Red (*blue-shifted yellow plus red*). Assim como a técnica que utiliza LED RGB, os PC-LEDs BSY + Red não serão abordados neste trabalho, visto que estas são tecnologias muito recentes e ainda enfrentam problemas de custo, complexidade e controle. Devido a estes problemas, atualmente a maior parte dos LEDs brancos utiliza a tecnologia PC (SCHUBERT, 2003).

Os LEDs de alto brilho podem ser subdivididos em duas categorias: os que funcionam em níveis elevados de potência (correntes típicas acima de 300 mA) e os de baixa potência (correntes de até 50 mA), estes dispositivos também são conhecidos como LEDs HB e LEDs HP, respectivamente (RODRIGUES, ET. AL., 2011). A Figura 14 apresenta o aspecto físico de dispositivos comerciais destas duas tecnologias.



Figura 14. LED HP à esquerda e HB à direita

O que faz com que os LEDs de potência possam suportar níveis maiores de corrente é o fato dos mesmos possuírem uma estrutura de dissipação muito mais

eficiente do que nos LEDs HB. Normalmente, o encapsulamento dos LEDs HP possui uma resistência térmica de 6-12 K/W, contra os típicos 250 K/W dos dispositivos de baixa potência (RODRIGUES, ET. AL., 2011). A figura mostra as diferenças construtivas destes semicondutores.

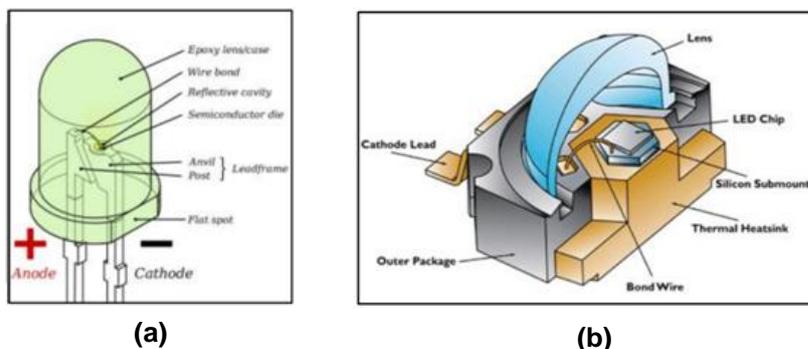


Figura 15. Encapsulamento dos LEDs (a) HB e (b) HP

Devido à estas características, os LEDs HP geralmente possuem uma eficiência luminosa maior, além de gerarem mais fluxo luminoso por dispositivo. Isto faz com que estes dispositivos sejam os mais indicados para a aplicação em iluminação.

### 3.2. INFLUÊNCIA DA FORMA DE ONDA DE CORRENTE SOBRE A FOTOMETRIA DO LED

Como já foi mencionado na seção anterior, o fluxo luminoso emitido por um LED tem relação direta com a corrente que circula por este dispositivo. Devido à isto, um driver para LEDs deve controlar a corrente que flui através destes dispositivos, para que assim seja possível ter controle sob a variável de saída do sistema, que no caso é o fluxo luminoso destes dispositivos.

Portanto, uma investigação minuciosa acerca da correlação entre a corrente circulante no LED e o seu respectivo fluxo luminoso emitido se faz necessária, a fim de que se crie uma base para o projeto do conversor que será proposto neste trabalho.

Primeiramente, será avaliada a performance dos LEDs HB e HP perante a imposição de diferentes níveis de corrente contínua constante sobre estes dispositivos. A seguir, será avaliado o desempenho destes semicondutores quando os mesmos são submetidos a uma corrente que possui um nível CC e uma

componente CA de 120 Hz com diferentes amplitudes. A importância destes estudos será constatada no capítulo 6, onde o leitor verá que o *ripple* de corrente nos LEDs está diretamente associado ao tamanho do maior capacitor do driver que será proposto, logo a metodologia de projeto deste componente terá como base as análises feitas neste capítulo.

Todos os experimentos desta seção foram feitos utilizando a esfera integradora de 40" do fabricante Labsphere e fontes controladas 3001 ix da California Instruments e HI3005E-3 da Politerm. Todos estes equipamentos são pertencentes ao Núcleo de Iluminação Moderna (NIMO) .

### 3.2.1. Estudo acerca da variação do fluxo luminoso do LED mediante a variação do nível de corrente

Em iluminação pública, geralmente são necessários valores de fluxo luminoso elevados. No caso da iluminação com LEDs, há uma necessidade do emprego de diversos dispositivos em uma luminária para que se alcancem níveis razoáveis de radiação visível para a aplicação supracitada. Contudo, como o fluxo luminoso de um LED é proporcional à sua corrente média. Portanto, se estes dispositivos operarem em níveis de corrente mais elevados, o fluxo resultante seria maior e, conseqüentemente, o número de dispositivos por luminária seria menor. Este fato faz com que luminárias que empregam a tecnologia HB necessitem de um número muito mais elevado de dispositivos do que a tecnologia HP. Esta diferença pode ser notada na Figura 16.

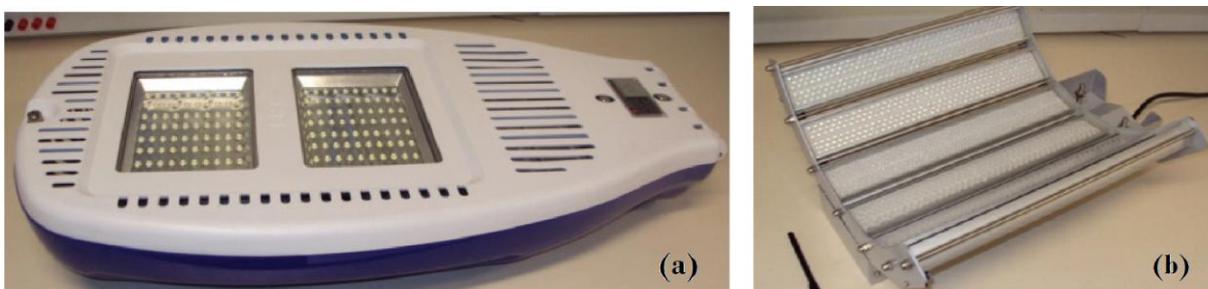


Figura 16. Luminárias comerciais que empregam (a) LEDs HP (160 LEDs) (b) LEDs HB (1728 LEDs)

Se a corrente máxima do dispositivo for respeitada, pode-se trabalhar com diversos níveis de corrente nos LEDs, contudo, alguns parâmetros do mesmo

sofrem grandes alterações devido à esta variação no nível da corrente operacional. O parâmetro que requer mais atenção é a eficiência luminosa, pois este tem grande influência sobre a eficiência geral de um sistema de iluminação, como foi visto no capítulo 2.

A fim de avaliar a alteração deste parâmetro com a variação da corrente média, alguns LEDs de tecnologias distintas foram analisados, para que ao final da análise seja possível identificar qual tipo de tecnologia é mais indicada para o propósito deste trabalho, e ainda, se é viável operar em condições de corrente mais elevada, visando a diminuição no número de LEDs por luminária. A Tabela 5 mostra os dispositivos que serão avaliados neste trabalho.

Tabela 5. LEDs escolhidos para o experimento (RODRIGUES, ET. AL., 2011)

Número do LED	Nome do LED	Fabricante	TCC (K)	Ano de fabricação
<b>HP LEDS</b>				
1	Luxeon III Emitter LXHL-PW09 (PHILIPS, 2006)	Philips LumiLEDs	5.500	2006
2	Apollo XZCW10X106W (SUNLED, 2008)	SunLED	N/I <sup>1</sup>	2008
3	EHP- AX08EL/GT01H- P01 (EVERLIGHT, 2009)	Everlight	5.650	2009
4	EHP- AX08EL/LM01H- P01 (EVERLIGHT, 2009)	Everlight	3.250	2009
5	Golden Dragon Oval Plus LCW W5PM (OSRAM, 2010a)	Osram	3.500	2010
6	Golden Dragon Oval Plus LUW W5PM (OSRAM, 2010b)	Osram	6.500	2010
<b>HB LEDS</b>				
7	LL1503SEWW1- 301 (LEDMAN, 2005)	Ledman	7,800	2005
8	LUW503F43 (WENRUN, 2006)	Wenrun	N/I	2006
9	Marca genérica <sup>2</sup>	N/I	N/I	N/I

O objetivo deste ensaio foi avaliar como o fluxo luminoso dos LEDs testados varia com a variação do nível de corrente imposto à estes. Primeiramente foram

<sup>1</sup> Informação não disponível.

<sup>2</sup> dispositivo facilmente encontrado em lojas de componentes eletrônicos.

obtidos os parâmetros fotométricos alimentando estes dispositivos com corrente nominal. Os dados são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros medidos em corrente nominal (RODRIGUES, ET. AL., 2011)

Número do LED	Fluxo luminoso	CCT(K)	IRC	Temperatura <sup>1</sup>
<b>HP LEDs @ 350 mA</b>				
1	30,22 lm	7.741 K	77.5%	32,0 °C
2	55,37 lm	6.962 K	73.8 %	31,0 °C
3	92,73 lm	6.455 K	75.2 %	33,5 °C
4	54,47 lm	3.061 K	81.7 %	32,0 °C
5	84,05 lm	4.023 K	84.8 %	31,0 °C
6	104,50 lm	5.950 K	71.9%	31,0 °C
<b>HB LEDs<sup>2</sup> @ 20 mA</b>				
7	70,28 lm	5.940 K	79,2%	41,0 °C
8	101,50 lm	6.797 K	77,9%	37,0 °C
9	62,90 lm	63.571 K	82,6%	37,0 °C

As curvas de densidade espectral de potência dos dispositivos em teste em condições nominais são mostradas nas Figuras Figura 17 e Figura 18.

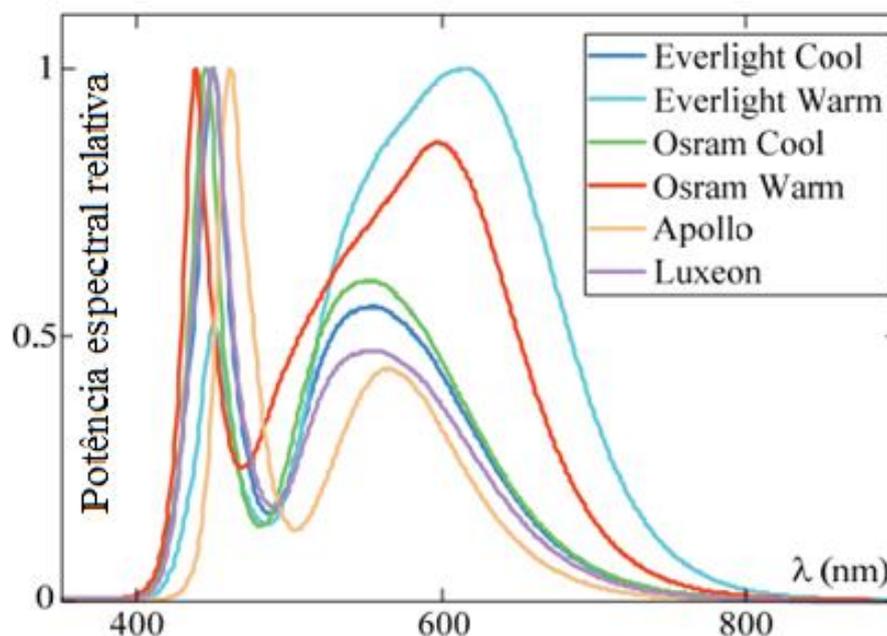


Figura 17. Potência Espectral relativa dos LEDs HP (RODRIGUES, ET. AL., 2011)

<sup>1</sup> Temperatura medida no dissipador dos LEDs do tipo HP e nos terminais dos LEDs tipo HB

<sup>2</sup> Conjunto de 25 dispositivos associados em série

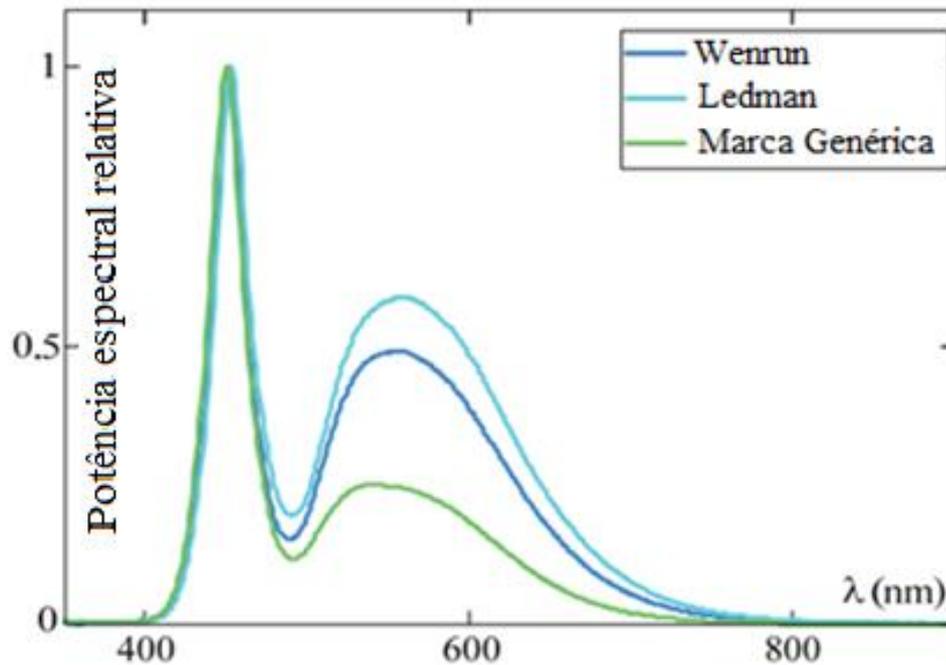


Figura 18. Potência Espectral relativa dos LEDs HB (RODRIGUES, ET. AL., 2011)

Analisando a Tabela 6 e as Figuras Figura 17 e Figura 18, pode-se comprovar o desenvolvimento teórico feito na primeira seção deste capítulo. Nos LEDs denominados "*warm*" (quentes), a cobertura de fósforo é mais densa, isso faz com que a maior parte da radiação azul, original do chip, seja deslocada para comprimentos de onda maiores, dando origem a um LED com menor TCC e melhor índice de reprodução de cores, contudo, para uma mesma corrente, este mesmo dispositivo possui um fluxo luminoso menor, se comparado com um LED do mesmo modelo, porém do tipo "*cool*" (frio). Ainda, é possível comprovar, pelos dados coletados, que os dispositivos de baixa potência operam em uma temperatura mais elevada, pois, apesar de trabalharem em uma corrente menor, os mesmos não possuem uma estrutura adequada de dissipação.

As Figuras Figura 19 e Figura 20 mostram como se comportam os dispositivos analisados perante a variação da corrente média de operação.

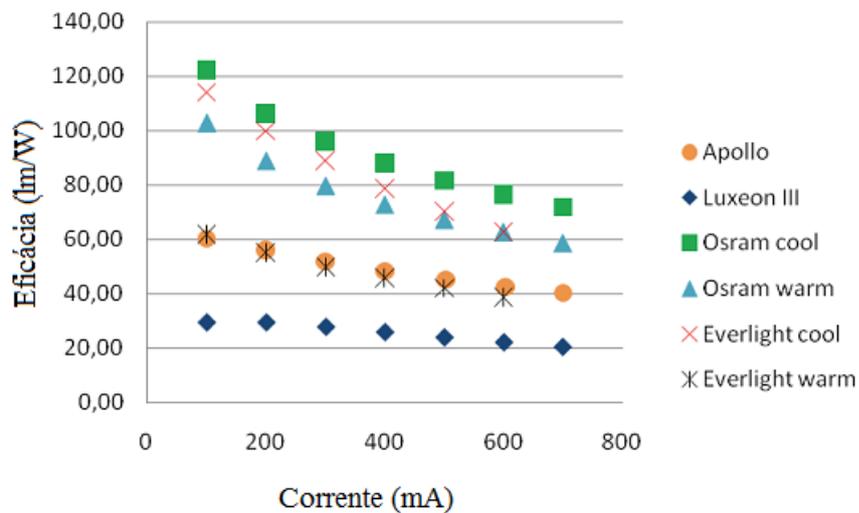


Figura 19. Eficiência luminosa dos LEDs HP perante a variação de corrente direta (RODRIGUES, ET. AL., 2011)

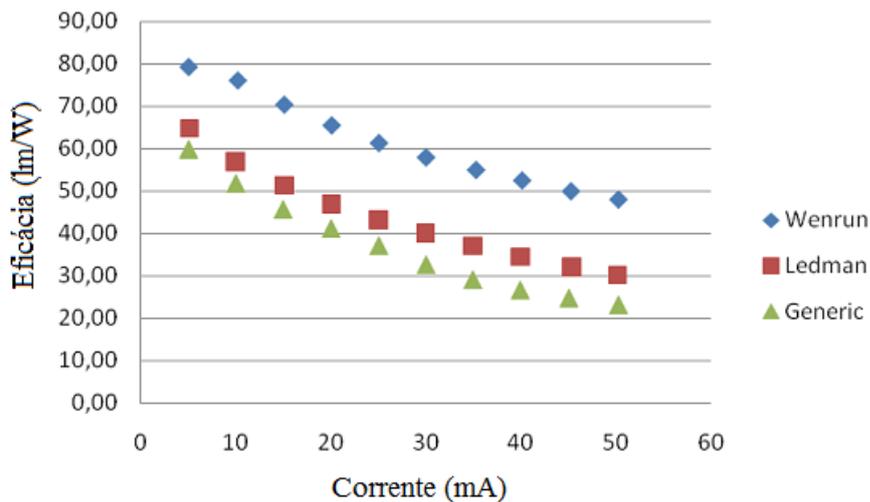


Figura 20. Eficiência luminosa dos LEDs HB perante a variação de corrente direta (RODRIGUES, ET. AL., 2011)

É possível ver, pela análise das Figuras Figura 19 e Figura 20, que quanto maior a corrente direta dos LEDs, menor é sua eficiência luminosa. Este fenômeno, também conhecido como "*droop*", ocorre devido à elevação da temperatura de junção do dispositivo (ALMEIDA, *et al.*, 2011b). Ainda pela análise destas figuras, é possível constatar que, atualmente, os LEDs HP se apresentam como a melhor solução em iluminação de estado sólido, como já foi dito na seção anterior deste capítulo, pois sua eficiência luminosa é maior do que a dos modelos HB, e além disso, o fluxo luminoso emitido por um único dispositivo também é muito superior aos modelos de baixa potência.

### 3.2.2. Estudo acerca da variação do fluxo luminoso do LED mediante a variação do *ripple* de corrente

Na seção anterior deste trabalho, foi mostrado como o valor médio da corrente nos LEDs influencia no fluxo luminoso destes dispositivos. Como será mostrado no capítulo 6, a forma de onda de corrente de saída típica do conversor proposto é uma senóide de 120 Hz com um nível CC. Portanto, uma avaliação do desempenho dos diodos emissores de luz submetidos à este tipo de corrente é altamente necessária e irá compor a base da metodologia de projeto do conversor proposto neste trabalho.

Já foi mostrado por ALMEIDA (2011c), que o fluxo luminoso emitido por um LED não depende apenas do valor médio da corrente que circula por este, a forma de onda de corrente também é responsável por mudanças nas características fotométricas deste dispositivo. Neste trabalho ainda foi mostrado que, formas de onda com variações mais suaves na corrente instantânea implicam em um "*droop*" menos significativo no fluxo luminoso dos LEDs.

Na última subseção foi mostrado que os LEDs de potência são os mais indicados para iluminação, devido a isto, os ensaios propostos nesta parte do trabalho serão realizados apenas neste tipo de dispositivo. O experimento foi realizado com um grupo de 28 LEDs fabricados com chip Epileds, associados em série e montados em um dissipador de alumínio. Este módulo de LEDs pode ser visto na Figura 21. Além disso, por ser um módulo de LEDs utilizado em luminárias de iluminação pública, o mesmo será utilizado para testar a topologia proposta neste trabalho. A Figura 22 mostra o arranjo do experimental.



Figura 21. Arranjo de LEDs utilizado para os experimentos

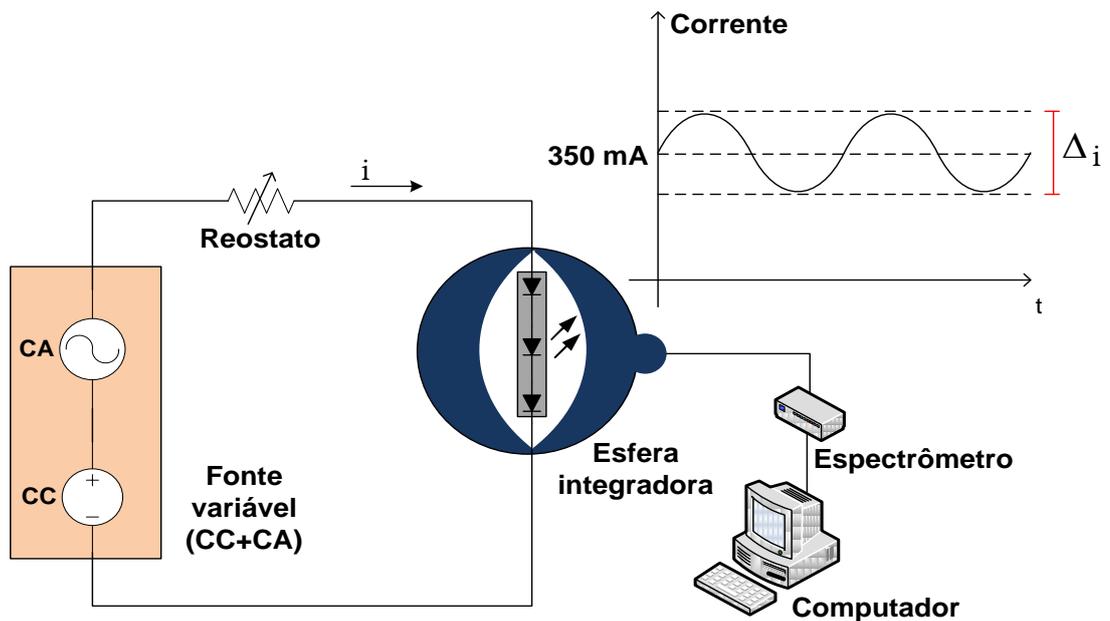


Figura 22. Arranjo experimental para medição das relações entre os parâmetros fotométricos do LED e o ripple de corrente que circula por este

O experimento consistiu em fazer fluir pelos LEDs uma corrente CC com valor médio de 350 mA e uma componente CA de 120 Hz com amplitude variável. Primeiramente, foi feito o ensaio em corrente nominal com *ripple* nulo, a fim de se obter os parâmetros nominais do conjunto de dispositivos que estavam sob teste, a Tabela 7 resume estas características.

Tabela 7. Parâmetros nominais medidos no experimento

Corrente média	Tensão média	Fluxo	Potência	Eficiência (lm/W)
350,4 mA	92 V	1.884,0 lm	32,2368 W	58,44

A Seguir, foram feitas diversas medidas variando o *ripple* de corrente nos LEDs de 0 a 200%, sempre mantendo a mesma corrente média (350 mA). Foram construídas então, duas curvas representando o fluxo e a eficiência luminosa normalizadas com base nos valores da Tabela 7. Ainda neste mesmo ensaio, foi analisada a relação entre a variação do *ripple* de corrente com o desvio de cor nos dispositivos testados.

Os resultados podem ser vistos na Figura 23 e Figura 24.

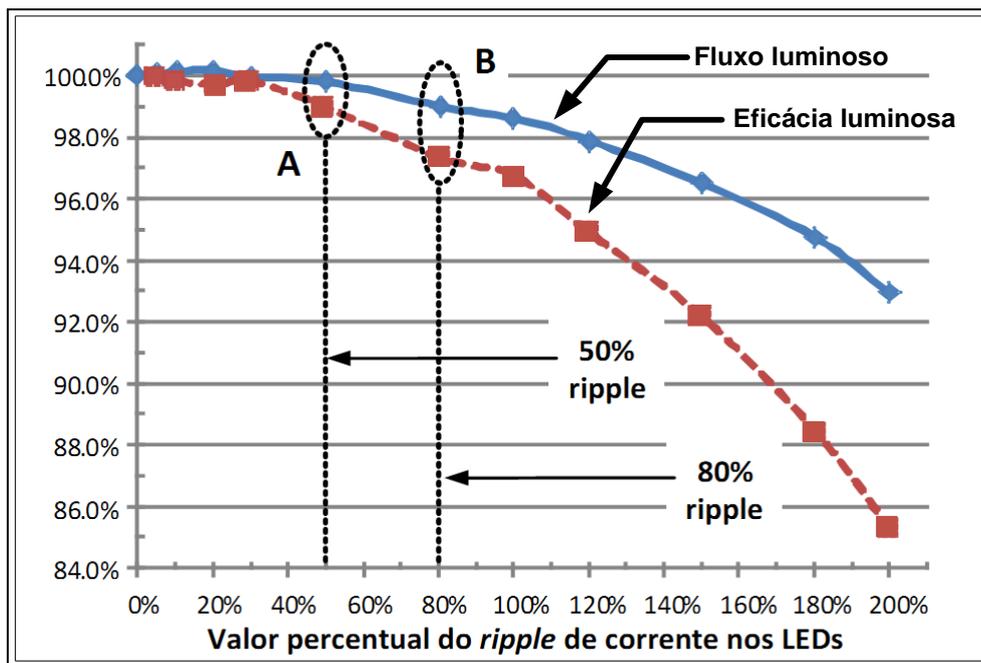


Figura 23. Fluxo e eficiência normalizados para diversos valores de *ripple* de corrente

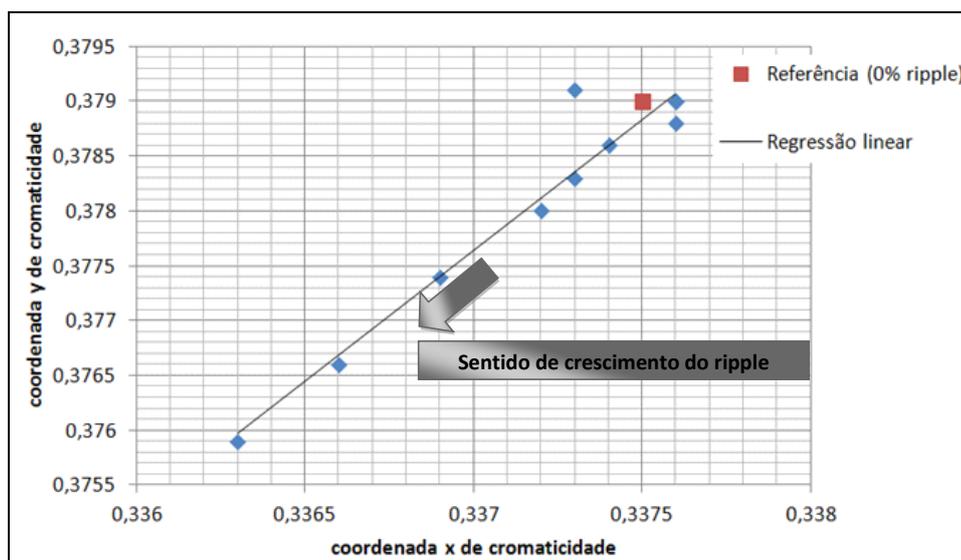


Figura 24. Deslocamento das coordenadas cromáticas com o aumento do ripple de corrente

A curva de fluxo normalizado (Figura 23) pode ser modelada a partir de uma equação polinomial de quarto grau que é mostrada em (3.1).

$$\phi(\Delta i) = -0,0079\Delta i^4 + 0,0269\Delta i^3 - 0,0459\Delta i^2 + 0,012\Delta i + 1 \quad (3.1)$$

Pode-se constatar pela análise da Figura 23 que o fluxo luminoso dos LEDs reduz apenas 1% em relação ao nominal quando se faz fluir por estes dispositivos uma corrente que possui um *ripple* de 80%. Quanto ao desvio de cor, percebe-se que existe uma tendência de deslocamento em direção à cor azul, contudo, para valores abaixo de 80% de ripple, o desvio não é significativo.

Esta análise possibilita afirmar que os LEDs suportam condições de elevados valores de ripple sem sofrerem alterações significativas no fluxo luminoso emitido.

### 3.3. MODELO ELÉTRICO DA CARGA

Já foi mostrado neste capítulo o princípio de funcionamento do diodo emissor de luz e também como a variável de saída deste dispositivo (fluxo luminoso) varia perante alterações em sua corrente de acionamento.

Outra informação importante para o estudo dos conversores eletrônicos aplicados a LEDs é a modelagem elétrica do carga. Esta modelagem será peça fundamental no projeto do driver proposto neste trabalho, pois foi a partir do modelo equivalente mostrado nesta seção que o desenvolvimento teórico da topologia proposta foi feito.

Como foi mostrado em (SCHUBERT, 2003), o diodo emissor de luz pode ser representado pela equação de Shockley modificada, onde se insere um efeito de uma resistência série. A equação pode ser vista em (3.2).

$$V_{LED}(I_{LED}) = \frac{n_i k_B T_j}{q_e} \ln \left( \frac{I_{LED}}{I_s} \right) + R_s I_{LED} \quad (3.2)$$

Na equação (3.2)  $n_i$  representa uma constante de idealidade,  $T_j$  é a temperatura de junção,  $R_s$  é a resistência série do LED e  $I_s$  é a corrente de saturação de polarização reversa. A constante  $k_B$  é a constante de Boltzmann ( $1,3806504 \times 10^{-23}$  J/K) e  $q_e$  é a carga elementar do elétron ( $1,602176487 \times 10^{-19}$  C).

A equação (3.2) representa o modelo elétrico completo do LED. Contudo, é possível linearizar esta equação em torno do ponto de operação, o que resulta em um modelo útil para a análise topológica que será feita no capítulo 6. Este modelo linearizado mostra que o LED pode ser representado por uma bateria em

polarização reversa com um diodo ideal e uma resistência série. A equação (3.3) representa o modelo linearizado das relações de tensão e corrente no LED.

$$V_{LED}(I_{LED}) = V_t + r_d I_{LED} \quad (3.3)$$

Na equação (3.3)  $V_t$  representa a tensão de limiar do dispositivo e  $r_d$  é a resistência dinâmica do LED. A Figura 25 mostra a representação do LED segundo seu modelo simplificado.

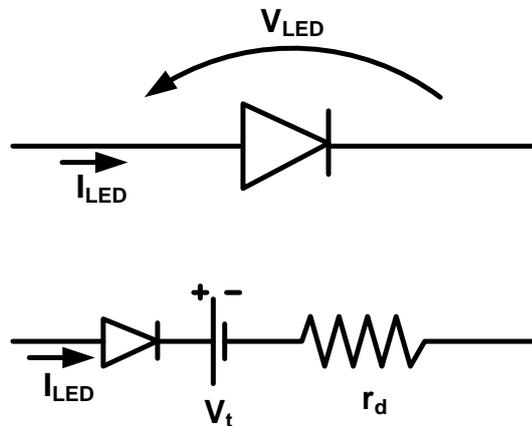


Figura 25. Modelo do linear do LED

A fim de avaliar as características apresentadas nesta seção, um LED OSRAM LUW-W5PM Golden Dragon Plus foi submetido à teste. Para este LED,  $(n_i k_B T_j q_e)^{-1} = 165$  mV,  $I_S = 2,3$  nA e  $R_S = 412$  mΩ (ALMEIDA, ET. AL., 2011c). A Figura 26 mostra as curvas do modelo Schottky modificado, do modelo linear e os pontos obtidos experimentalmente.

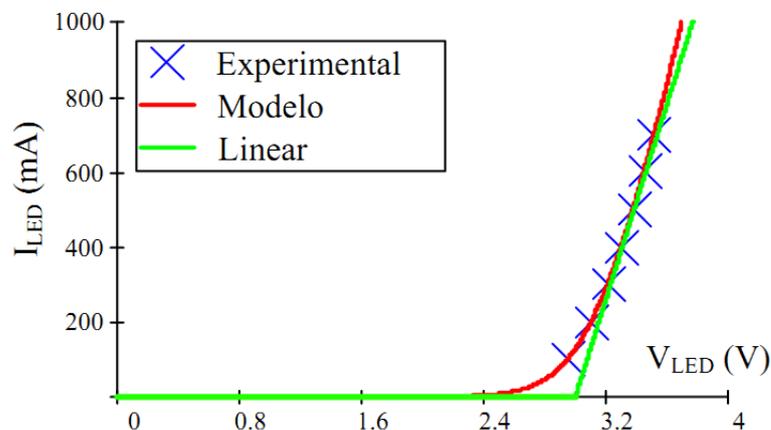


Figura 26. Comparação entre os modelos Schottky e linear, bem como os pontos levantados experimentalmente. (ALMEIDA, 2012)

Os parâmetros do modelo linear levantados experimentalmente para este LED foram  $V_t = 3V$  e  $r_d = 769 \text{ m}\Omega$ . A partir da Figura 26 pode-se ver que para uma operação em torno da corrente nominal (i.e. 350 mA) o modelo linearizado representa uma boa aproximação.

O mesmo experimento foi realizado com os módulos de LEDs que foram utilizados para o projeto do conversor proposto neste trabalho. Os parâmetros obtidos para dois módulos semelhantes ao da Figura 21 foram  $V_t = 145 \text{ V}$  e  $r_d = 98,4 \Omega$ . Estes valores serão utilizados na seção de projeto do conversor, uma vez que foi mostrado que a utilização do modelo linear do LED é precisa para operação ao redor do ponto de operação.

### 3.4. CONCLUSÃO PARCIAL

Neste capítulo foi feito um estudo minucioso sobre as características dos LEDs utilizados em iluminação. O objetivo deste estudo era estabelecer uma relação entre o fluxo luminoso emitido pelos dispositivos com as grandezas de tensão e corrente deste. Esta relação serve como base para o desenvolvimento do projeto do conversor eletrônico proposto neste trabalho.

Primeiramente foram mostradas algumas características físico-químicas dos diodos emissores de luz, bem como seu princípio de funcionamento. A partir da apresentação destas características, foi possível correlacionar a corrente elétrica que circula por estes dispositivos com o fluxo luminoso emitido por estes.

Foi então mostrado como o fluxo varia de acordo com a variação da corrente média dos dispositivos, e foi possível notar que com o aumento da corrente houve uma queda na eficiência luminosa dos dispositivos, mostrando que ocorre uma saturação na curva corrente por fluxo luminoso.

Tendo em vista que o conversor proposto neste trabalho é do tipo PFC<sup>1</sup>, foi realizado um ensaio submetendo os LEDs a correntes com valores de *ripple* de baixa frequência variáveis. Este ensaio teve o intuito de avaliar como o fluxo luminoso destes dispositivos varia de acordo com alteração do *ripple*. Foi mostrado que os LEDs suportam valores elevados de ondulação de corrente em baixa

---

<sup>1</sup> PFC - do inglês *Power Factor Correction*. Conversor com correção do fator de potência.

frequência sem que suas características fotométricas fossem alteradas de forma significativa. Logo, foi levantada uma equação que relaciona o *ripple* de corrente com a degradação do fluxo nos dispositivos. No capítulo 6 será mostrado que a ondulação de corrente de baixa frequência nos LEDs está diretamente relacionado com o tamanho do capacitor de saída do conversor proposto e, com o auxílio da equação proposta neste capítulo, será escolhido um valor de capacitância de modo que capacitor utilizado no protótipo não seja eletrolítico e o fluxo nos LEDs possua uma degradação que não comprometa o desempenho do sistema.

Por fim, na seção 3.3 foi obtido o modelo elétrico equivalente dos dispositivos. Mostrou-se que um modelo linear simplificado que representa a carga de forma satisfatória e este modelo pode ser utilizado para o equacionamento do conversor.

#### 4. QUALIDADE DE ENERGIA EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA

No capítulo anterior deste trabalho foram estudados alguns dos principais aspectos da carga que será acionada pelo driver proposto neste trabalho. Contudo, como é objetivo deste trabalho desenvolver um conversor que acione os LEDs a partir da rede elétrica, além de atender às exigências da carga, o conversor eletrônico necessita estar em conformidade com algumas normatizações que regem as condições dos parâmetros de entrada do mesmo. Geralmente, drivers para LED possuem em seu estágio de entrada diodos ou tiristores, que por natureza, drenam correntes altamente distorcidas da rede elétrica. Portanto, como esta tecnologia emergente pode ser instalada em larga escala nos atuais sistemas de distribuição, uma preocupação acerca das questões que envolvem a qualidade de energia deve ser relevada.

Além das questões levantadas no parágrafo anterior, é importante ter conhecimento das flutuações de tensão no sistema de distribuição ao qual o driver proposto será empregado, para que assim, o mesmo seja projetado de forma a suportar tais variações.

O objetivo deste capítulo será analisar as principais normatizações referentes a qualidade de energia que são aplicáveis a drivers para LED, a fim de ser possível formar um conjunto de especificações para os parâmetros de entrada do driver que será proposto. Será feita ainda, uma análise sobre a poluição harmônica gerada pelos atuais sistemas de iluminação pública sobre a rede de distribuição, e de como este quadro poderá melhorar, ou piorar, com a utilização de iluminação de estado sólido.

No Brasil, ainda não existem normas específicas referentes a qualidade de energia, contudo, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) recomenda a utilização de normas da *International European Commission* (IEC), que são referências mundiais (ABNT, 2006). As principais normas européias referentes a qualidade de energia e aplicáveis a reatores eletrônicos para iluminação são a IEC 61000-3-2 (IEC, 2005a), que é referente aos limites de injeção de corrente harmônica na rede, a IEC 61000-3-3 (IEC, 2005b), referente às flutuações de tensão na rede elétrica, e por fim, a norma IEC 61000-6-3 (IEC, 2007), referente a compatibilidade eletromagnética. Neste trabalho, será abordada apenas a norma referente ao limite de injeção de correntes harmônicas na rede, sendo que a análise

de conformidade com as outras referências normativas supracitadas é proposta para trabalhos futuros.

Apesar de não contemplar a questão dos limites de injeção de corrente harmônica nos sistemas de distribuição, a ANEEL regulamenta alguns parâmetros básicos deste mesmo sistema, tais como o fator de potência e os limites de variação da tensão secundária. Na seção 4.2 serão feitas algumas considerações relevando estas regulamentações.

#### 4.1. INJEÇÃO DE CORRENTE HARMÔNICA NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DEVIDO A SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO

As correntes harmônicas começaram a se tornar uma grande preocupação das entidades gestoras dos sistemas de potência. Como consequência, as tensões nos pontos de acoplamento comum sofrem distorções que podem causar diversos problemas nos equipamentos ligados a estes pontos, tais como aquecimento e redução de torque em motores e geradores, sobretensões em capacitores, além de degradação de equipamentos eletrônicos que não foram projetados considerando a presença de tais distorções. A Figura 27 ilustra o comportamento de um sistema de potência onde uma das cargas apresenta corrente altamente não linear.

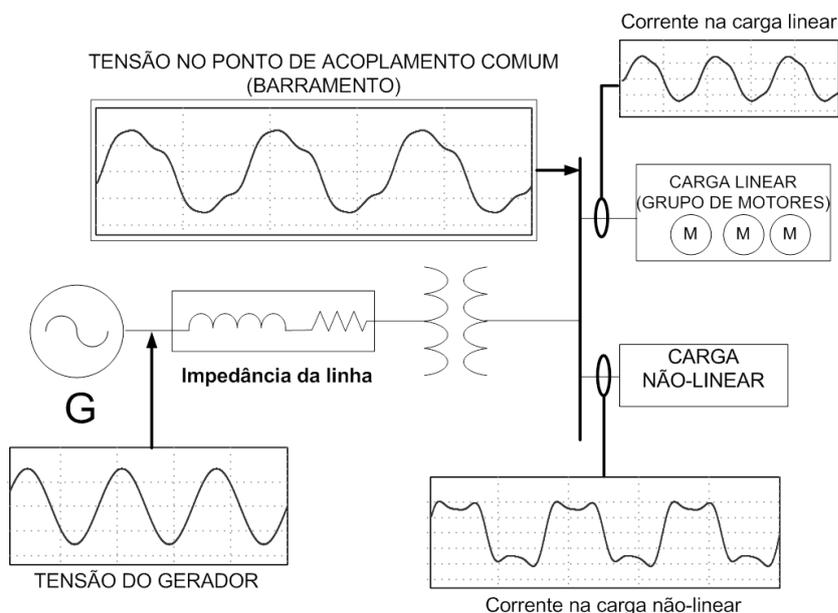


Figura 27. Exemplo de um sistema de potência sob influência de correntes harmônicas

A Figura 27 mostra corrente harmônica consumida pela carga não-linear irá circular pelas linhas de transmissão e irá gerar uma queda de tensão não linear na impedância da linha. Devido a isto, a tensão no barramento do sistema irá apresentar uma distorção de tensão, afetando as cargas lineares acopladas ao mesmo. Pode ainda ser notado na figura que, a corrente consumida por um grupo de motores (carga linear), apresenta também um conteúdo harmônico, e com isso o funcionamento dos mesmos pode ser afetado. Além disso, estas correntes são grandes responsáveis pelas perdas técnicas (perdas por efeito Joule) nos sistemas de distribuição, já que aumentam o valor RMS da corrente de linha. Devido a isto, é necessário limitar a quantidade de harmônicas que as cargas acopladas ao sistema podem injetar na rede.

Neste contexto, foram criadas as normatizações limitando a quantidade de correntes harmônicas que os equipamentos podem injetar na rede. Uma das principais referências é a norma IEC 61000-3-2, que contempla justamente estes limites para diversas classes de equipamentos. Os dispositivos de iluminação com potências superiores a 25 W são enquadrados na classe C.

Para esta classe, os limites de emissão harmônica estão relacionados na Tabela 8.

Tabela 8. Limites de emissão harmônica segundo IEC-61000-3-2 (Classe C)

<b>Ordem</b>	<b>Corrente máxima permitida (normalizado em relação à fundamental)</b>
<b>2</b>	2 %
<b>3</b>	$30 \times \lambda^1$ %
<b>5</b>	10 %
<b>7</b>	7 %
<b>9</b>	5 %
<b><math>11 &lt; n^2 &lt; 39</math></b>	3 %

Para correntes harmônicas com ordem entre 21 e 39, existe ainda uma regra especial, que permite que existam correntes com amplitude superior aos valores da Tabela 8. Contudo, estas correntes não devem possuir um valor individual de amplitude maior que 150% (i. e. 1,5 vezes o valor limite estabelecido na Tabela 8 ) e o POHC do equipamento não deve ultrapassar o valor calculado pela expressão (4.1).

<sup>1</sup>  $\lambda$  é o fator de potência medido

<sup>2</sup> n compreende apenas harmônicas ímpares

$$POHC = \sqrt{\sum_{n=21}^{39} I_n^2} \quad (4.1)$$

Onde:

n é a ordem harmônica

$I_n$  é a corrente harmônica de ordem n

A fim de avaliar a qualidade de energia dos sistemas de iluminação pública, serão avaliadas algumas luminárias empregadas nesta aplicação.

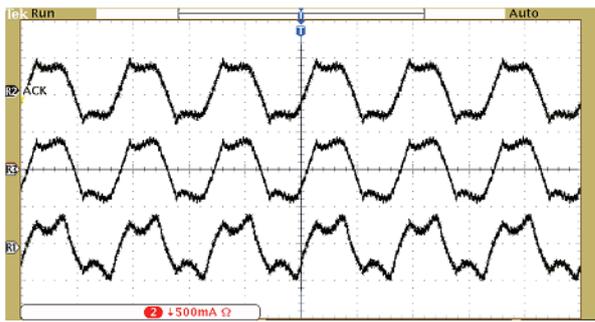
Primeiramente será analisada a poluição harmônica gerada por reatores eletromagnéticos, servindo de referência para avaliação dos sistemas atuais. Feita esta análise, serão analisadas algumas luminárias LED comerciais.

A Tabela 9 mostra as características medidas dos reatores eletromagnéticos que serão submetidos aos testes de conformidade com a IEC-61000-3-2 para equipamentos Classe C. Os reatores são para lâmpadas de 100W e foram alimentados por uma tensão de 220  $V_{rms}$  60 Hz de uma fonte de tensão com baixa distorção harmônica.

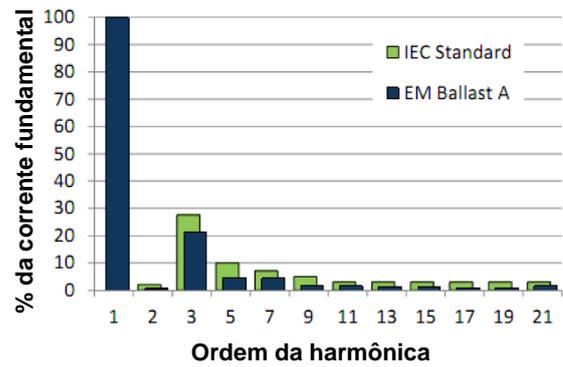
Tabela 9. Parâmetros dos reatores eletromagnéticos (ref Power cbee)

REATOR	POTÊNCIA DE ENTRADA	FATOR DE POTÊNCIA	THD	ÂNGULO DA FUNDAMENTAL
A	121 W	0.955	22,67%	19,7°
B	123 W	0.893	21,88%	27°
C	101 W	0.881	39,65%	32,2°

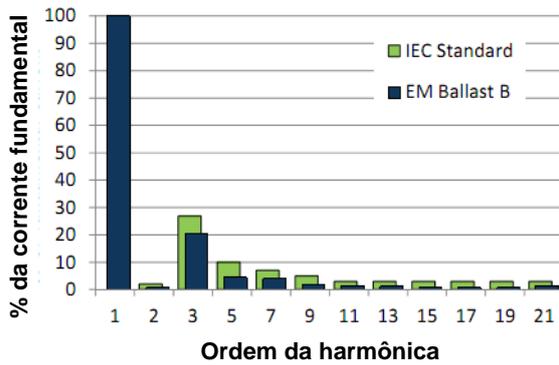
A Figura 28 mostra as formas de onda de corrente de entrada dos três reatores eletromagnéticos, bem como o conteúdo harmônico destas correntes comparado com os limites estabelecidos pela IEC 61000-3-2. É possível ver que os reatores A e B passaram no teste da IEC, contudo o reator C não foi aprovado, pois o mesmo possui uma corrente de 3ª harmônica com amplitude elevada. Portanto, apesar de não ser uma carga eletrônica, os reatores eletromagnéticos possuem uma distorção harmônica considerável.



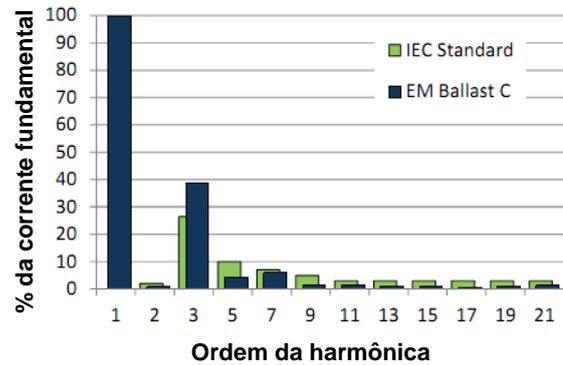
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 28. (a) Correntes de entrada dos reatores A, B e C de cima para baixo respectivamente (500 mA/div;10 ms/div); Comparação do conteúdo harmônico das correntes de entrada dos reatores A (b), B(c) e C(d) e a norma IEC 61000-3-2. (SOARES, *et al.*, 2011)

A Tabela 10 mostra as características das luminárias LED avaliadas. Os nomes dos fabricantes foram mantidos em sigilo para que a análise não prejudique a imagem de nenhuma empresa. Para a medição destas características também foi utilizada uma fonte senoidal com baixa distorção harmônica 220 V<sub>rms</sub> 60 Hz. A Figura 29 mostra o conteúdo harmônico da corrente de entrada destas luminárias. Na mesma figura são também mostrados os limites impostos pela norma IEC para cada corrente harmônica.

Tabela 10. Parâmetros das luminárias LED. (SOARES, *et al.*, 2011)

LUMINÁRIA	POTÊNCIA DE ENTRADA	FATOR DE POTÊNCIA	THD	ÂNGULO DA FUNDAMENTAL
A	100,8 W	0.970	13,76%	17,3°
B	100,5 W	0.963	22,00%	15,7°
C	121,7 W	0.973	12,46%	13,9°
D	159,6 W	0.991	6,52%	7,9°
E	229,9W	0.591	128,97%	53,8°

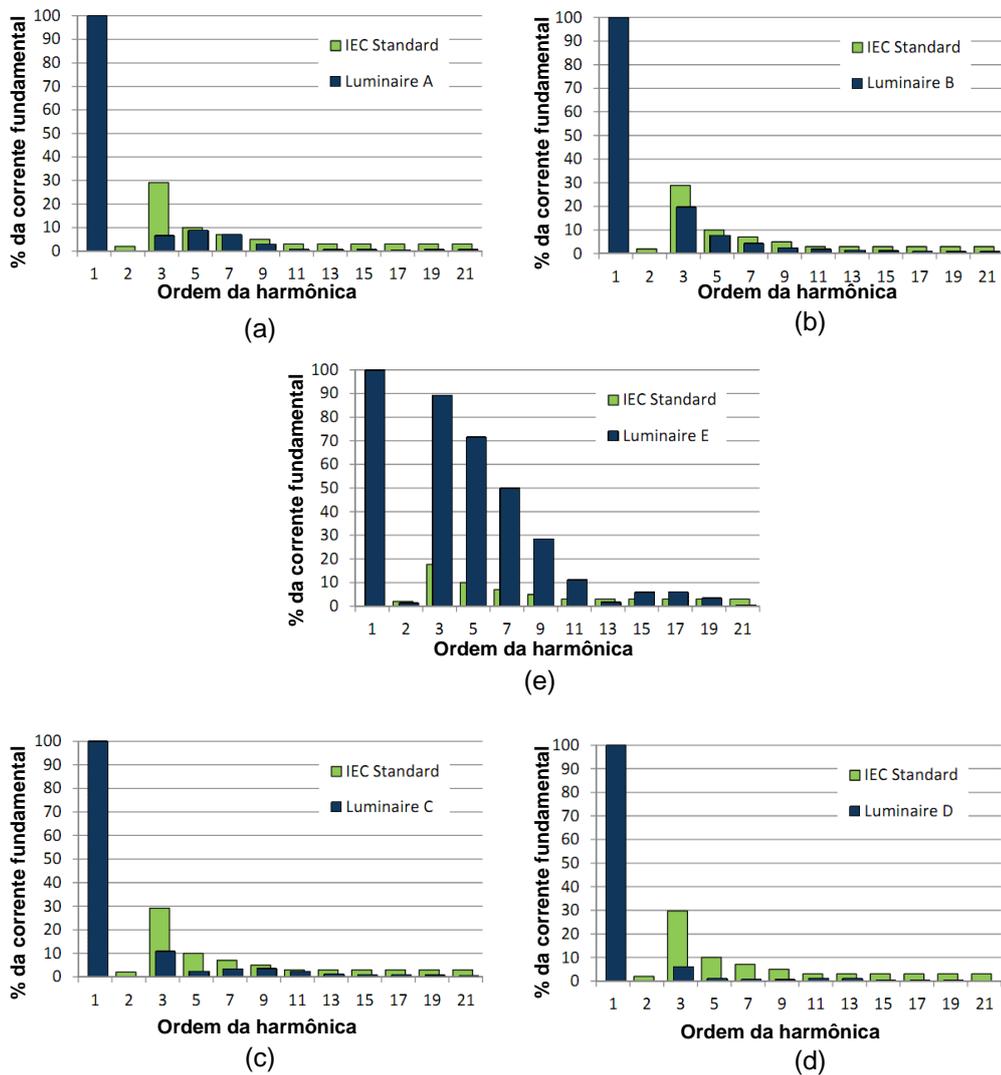


Figura 29. Conteúdo harmônico da corrente de entrada das luminárias LED analisadas. (SOARES, *et al.*, 2011)

Analisando a Figura 29, pode-se notar que todas as luminárias conseguiram aprovação no teste da IEC, excusive a luminária E, que possui um elevado conteúdo harmônico. Isso mostra uma preocupação por parte dos fabricantes com relação à qualidade de energia do sistema elétrico. A Figura 30-a mostra as formas de onda dos parâmetros de entrada da luminária D, que possui a menor distorção harmônica de todo o grupo de equipamentos analisados. Pode-se ver que esta luminária possui um estágio corretor do fator de potência visto que a forma de onda de entrada é praticamente senoidal, como também pode ser visto pela Figura 29-d.

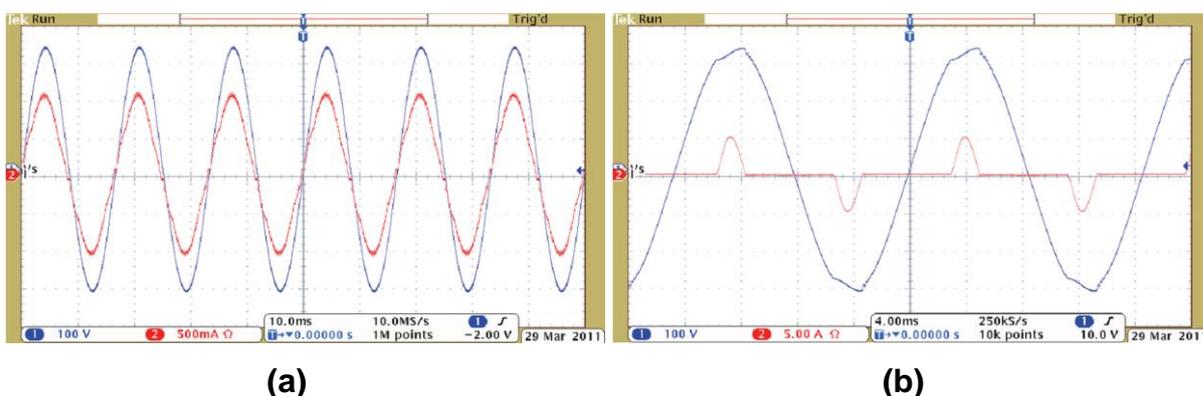


Figura 30. Parâmetros de entrada das luminárias (a) D [Corrente-CH2(500 mA/div), Tensão-CH1 (100 V/div); Escala de tempo:10 ms/div] e (b) E [Corrente-CH2(5 A/div), Tensão-CH1 (100 V/div); Escala de tempo: 4 ms/div]. (SOARES, *et al.*, 2011)

É possível ver através da Figura 30-b que a luminária E não possui estágio corretor do fator de potência, visto que sua forma de onda de corrente de entrada é típica de um retificador com filtro capacitivo (ROSSETTO, TENTI; ZUCCATO, 1999). Através desta figura, também é possível perceber uma distorção harmônica na forma de onda de tensão, que foi provocada pela corrente altamente distorcida da luminária E.

#### 4.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O FATOR DE POTÊNCIA DO EQUIPAMENTO E VARIAÇÕES NA TENSÃO DA REDE

Na última seção deste capítulo foram abordadas as questões sobre poluição harmônica que os sistemas de iluminação podem provocar nas redes de distribuição.

Além desta preocupação, é preciso assegurar que o fator de potência do driver seja superior a 0,92 capacitivo ou indutivo, pois a ANEEL regulamenta este valor em sua resolução 456 (ANEEL, 2000).

As análises feitas neste capítulo até o presente momento foram referentes às exigências da rede com relação ao conversor proposto, todavia, é interessante saber quais são os problemas os quais o driver estará exposto ao ser empregado nos sistemas de distribuição.

Um dos principais problemas que o conversor proposto estará sujeito é a oscilação de tensão nas redes de distribuição elétrica. O módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2011), estabelecido pela ANEEL, obriga as concessionárias a garantir a tensão entre 95% e 105% da tensão nominal. Logo é interessante garantir a boa operação do dispositivo dentro desta faixa de variação de tensão. A fim de garantir o bom funcionamento do dispositivo mesmo em pontos com variações de tensão maior do que o estabelecido pela ANEEL (e.g. final de ramais de distribuição), o conversor proposto será projetado para suportar +/- 10% de variação da tensão nominal de entrada.

#### 4.3. CONCLUSÃO PARCIAL

Neste capítulo foram mostradas, de forma rápida, algumas características desejáveis para o conversor proposto no que se refere aos parâmetros de entrada.

Viu-se que é extremamente necessária a utilização de um estágio corretor do fator de potência, uma vez que a ausência deste estágio fará com que o conversor drene uma corrente altamente distorcida da rede, prejudicando a qualidade de energia desta. Neste contexto foram analisados alguns reatores eletromagnéticos, mostrando o dano que o sistema atual de iluminação pública causa às redes de distribuição. Em seguida foram analisadas algumas luminárias LED comerciais, avaliando assim a preocupação dos fabricantes com relação à qualidade de energia. Pôde-se ver que a maioria das luminárias estudadas possui algum tipo de técnica para correção do fator de potência.

Neste capítulo também foram apresentados os limites estabelecidos pela ANEEL para as oscilações de tensão no sistema de distribuição. Chegou-se a conclusão que o driver deve suportar uma variação de +/- 10% na tensão de entrada para que o mesmo seja robusto o suficiente para a aplicação.

## **5. SOLUÇÕES PARA ACIONAMENTO DE LEDS EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

Nos capítulos anteriores foram abordadas algumas questões referentes aos parâmetros necessários para o acionamento de LEDs.

Primeiramente foram analisadas questões envolvendo a característica da carga, ou seja, como os LEDs podem ser modelados eletricamente, e como a forma de onda de corrente influencia no fluxo luminoso, que é a variável de interesse em um sistema de iluminação.

No capítulo 4 foram mostrados como os parâmetros de entrada (i. e. fator de potência e THD) dos drivers para LED são importantes para a boa qualidade de energia nos sistemas que os mesmos são empregados, e também quais as normatizações devem ser atendidas no projeto do circuito de acionamento destes dispositivos.

A partir deste estudo é possível selecionar algumas topologias para conversores eletrônicos que atenderiam estas premissas de projeto. Logo, o conversor de acionamento deve possuir pelo menos duas características básicas: estágio de correção do fator de potência e corrente de saída controlada.

É necessário, portanto, avaliar algumas soluções para acionamento de LEDs em iluminação pública que atendam as características supracitadas, sendo estas passivas ou ativas.

As soluções passivas buscam atingir baixo custo e boa eficiência, contudo possuem um ponto de operação muito restrito, sendo que pequenas alterações na carga ou na fonte já acarretam o funcionamento incorreto do sistema. Já as soluções ativas buscam realizar um melhor controle de potência na carga e possuem uma maior independência das condições da carga e da fonte.

Neste capítulo serão avaliadas as características de algumas soluções para acionamento de LEDs em iluminação pública.

### **5.1. DRIVERS PASSIVOS COM CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA**

Uma das soluções mais simplificadas e robustas para o acionamento de LEDs são os drivers passivos.

Em Hui, et al., (2010), foi mostrada uma topologia passiva para acionamento de LEDs que emprega a técnica de correção de fator de potência Valley-fill modificada.

A Figura 31 mostra a topologia proposta. É interessante notar que, devido às características do driver passivo proposto no trabalho supracitado, os componentes reativos são projetados para atuar em baixa frequência, o que aumenta significativamente o volume dos mesmos. Além disso, o circuito é muito suscetível a variações da rede e da carga, o que aumenta a probabilidade de alguma falha. Apesar destas características ruins, o circuito passivo apresenta algumas características interessantes, como a alta eficiência e a possibilidade de projeto sem utilização de capacitores eletrolíticos. As Figura 32 e Figura 33 mostram os resultados experimentais obtidos com um protótipo de 50 W.

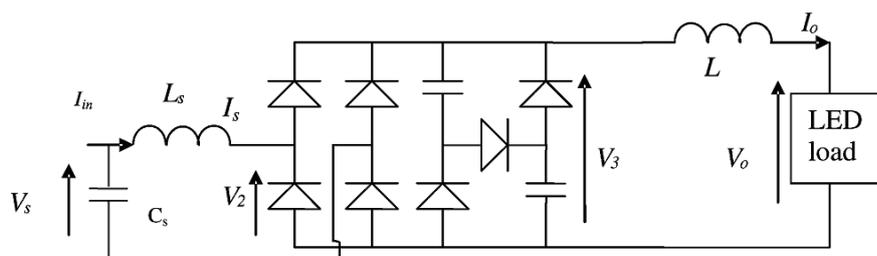


Figura 31. Driver passivo para acionamento de LEDs. (HUI, *et al.*, 2010)

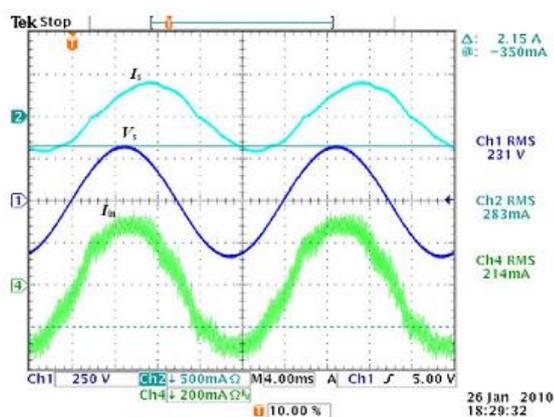


Figura 32. Formas de onda medidas da tensão de entrada  $V_s$ , da corrente de entrada  $I_{in}$  e da corrente no indutor de entrada  $I_s$ . [Escala:  $I_s$ : 0.5 A/div.,  $V_s$ : 250 V/div., and  $I_{in}$  0.2 A/div.]. (HUI, *et al.*, 2010)

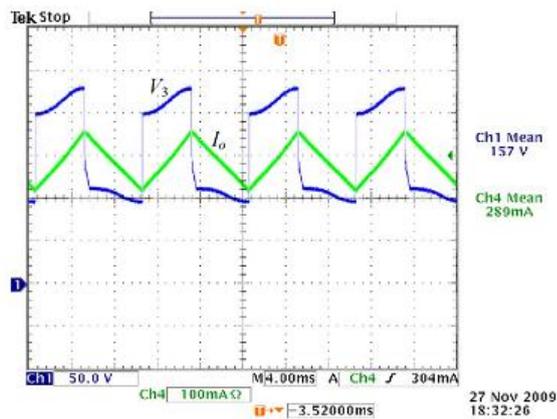


Figura 33. Formas de onda da tensão  $V_3$  e da corrente  $I_o$ . [Escala:  $V_3$ : 50 V/div. and  $I_o$ : 0.1 A/div]. (HUI, *et al.*, 2010)

Em Lee, *et al.*, (2011), foi proposta uma topologia passiva que utiliza o estágio de entrada de um reator eletromagnético para lâmpadas fluorescentes com um circuito ressonante e uma ponte de diodos para acionar os LEDs. A Figura 34 mostra esta topologia.

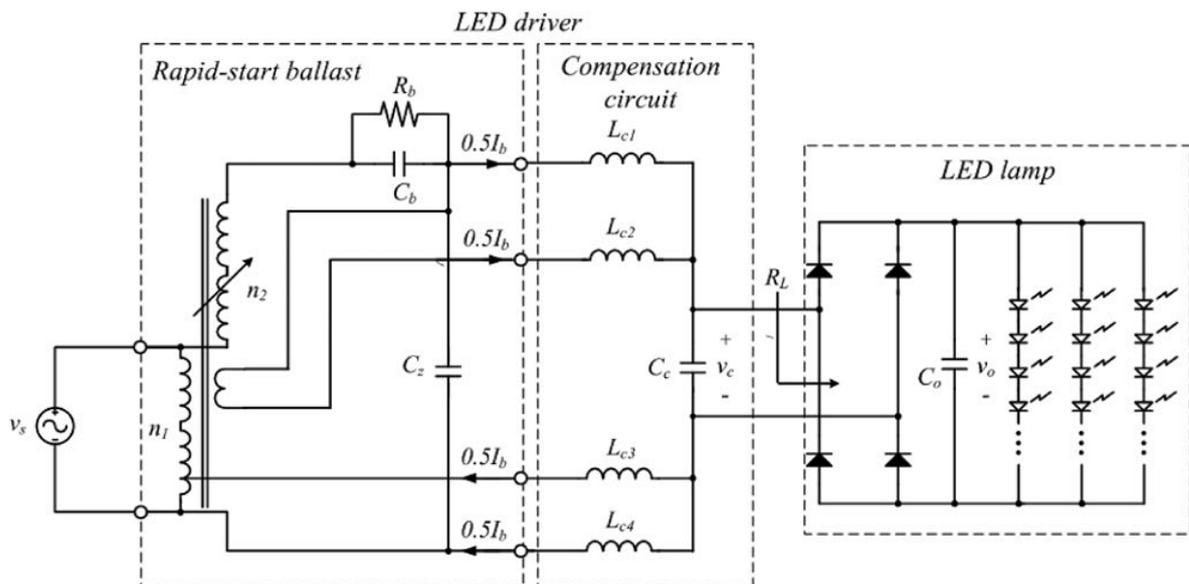


Figura 34. Driver para LEDs baseado em um reator eletromagnético para lâmpadas fluorescentes. (LEE, KIM; RIM, 2011)

## 5.2. DRIVERS ATIVOS COM CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA OPERANDO EM CCM

A Figura 35 mostra o esquema simplificado de um driver para LEDs operando em CCM com controle por corrente média.

É possível observar que são necessárias duas malhas de controle para operação em CCM. A malha interna é responsável pela correção do fator de potência, uma vez que esta tentará zerar o erro entre a forma de onda de tensão de entrada e a forma de onda de corrente de entrada, atingindo assim um elevado fator de potência. Já a malha externa é responsável pelo controle de corrente na carga.

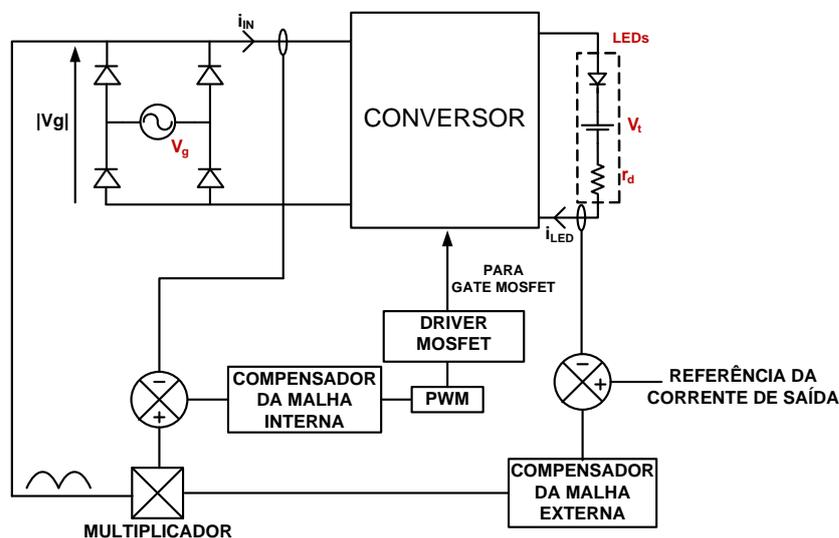
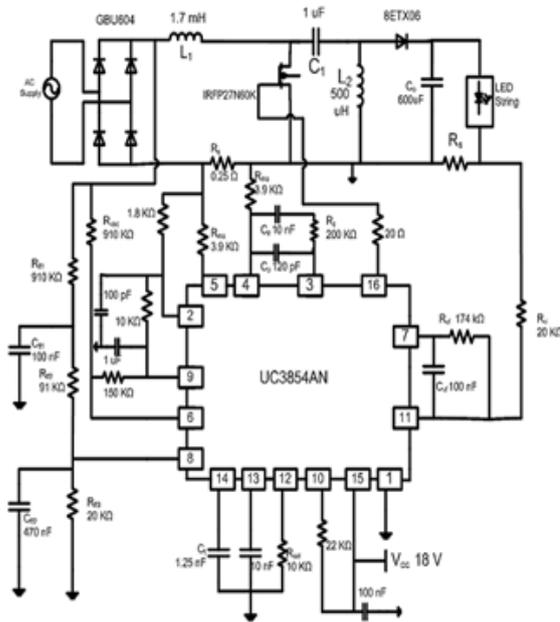


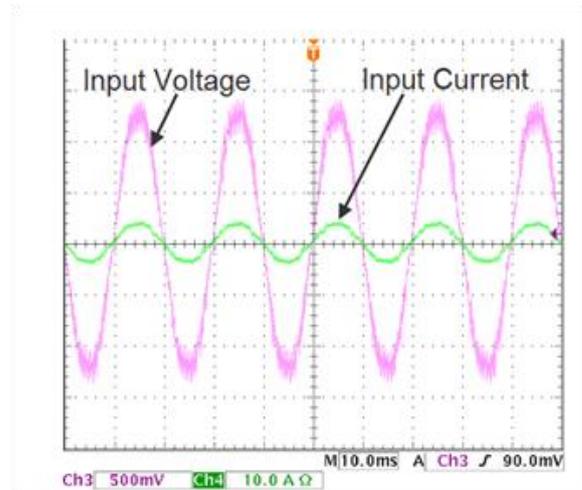
Figura 35. Driver para LEDs operando em CCM

Esta técnica pode ser aplicada em diversas topologias de conversores CC-CC e possui grandes vantagens como menores *ripples* de corrente nos indutores, possibilidade de não utilização de filtro EMI, uma vez que a corrente de entrada é pouco afetada pelas harmônicas de chaveamento, além de ser possível a correção do fator de potência e controle de corrente com um único estágio. A grande desvantagem desta técnica é a complexidade do controle.

Em ALI, *et al.*, (2010) foi proposto um conversor SEPIC operando em CCM. A Figura 36 mostra o circuito proposto e as formas de onda de entrada. Note que é utilizado um CI (UC3854) para o controle do conversor.



(a)



(b)

(b) Figura 36. (a) Circuito experimental SEPIC CCM; (b) Formas de onda de entrada (ALI, *et al.*, 2010)

### 5.3. DRIVERS ATIVOS COM CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA OPERANDO EM DCM

A Figura 37 mostra um diagrama simplificado de um conversor para o acionamento de LEDs operando em DCM. Este conversor pode ser inclusive uma das topologias básicas (Buck, Boost, Buck-Boost, Flyback, Ćuk, Zeta, Sepic).

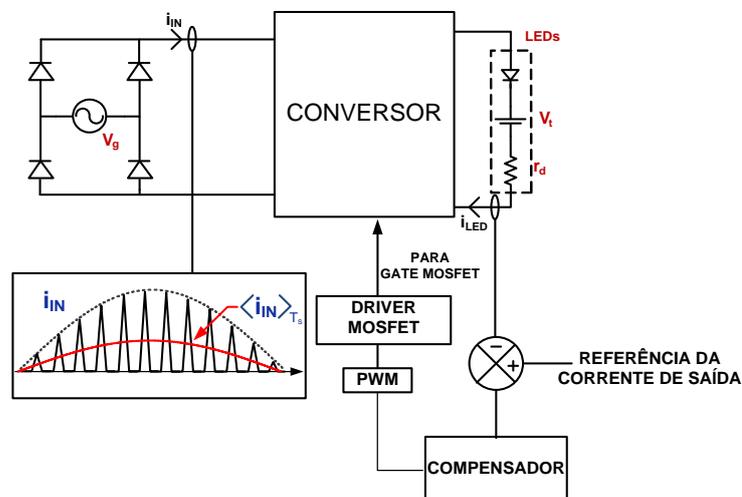


Figura 37. Conversor da família Buck-Boost operando em DCM

Como pode ser visto na Figura 37, o conversor operando em DCM possui a característica de seguidor de tensão, pois o valor médio da corrente de entrada em um período de chaveamento acompanha a tensão da rede. Devido a esta característica, o conversor consegue corrigir o fator de potência. Note que, apesar da corrente média de entrada ser senoidal, a mesma possui um alto *ripple*, que é característico do regime de operação em DCM, com isso é necessário que um filtro EMI seja utilizado para que as harmônicas de chaveamento sejam filtradas. A seguir serão feitas as análises das topologias básicas de conversores CC-CC atuando como PFC DCM.

A Figura 38 mostra a topologia e formas de onda típicas de entrada do conversor Buck.

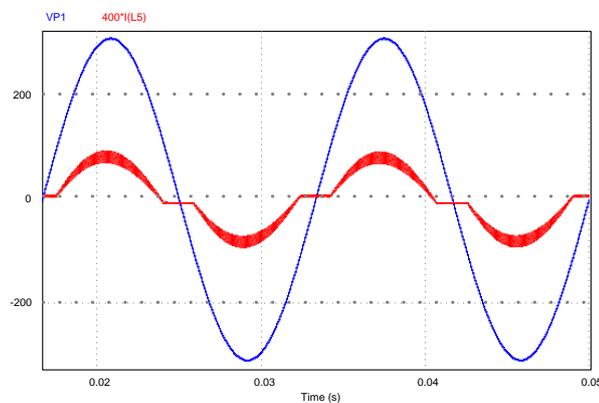
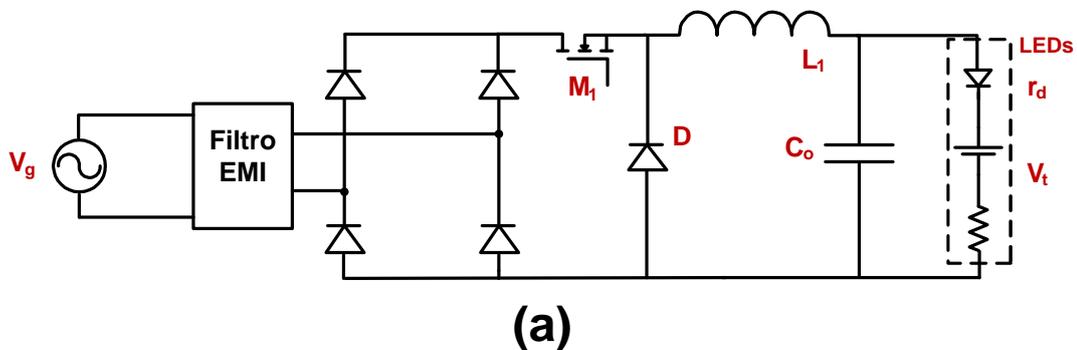


Figura 38. (a) Conversor Buck (b) Corrente e tensão de entrada do conversor Buck

Segundo Wei, et al. (1998), a corrente de entrada do conversor Buck é dada por (5.1).

$$\langle i_{in} \rangle_{T_s} = \frac{D^2 T_s}{2L} (v_{in}(t) - V_{LED}) \quad (5.1)$$

Como se pode ver em (5.1), quanto menor a tensão do arranjo de LEDs, melhor será o fator de potência, já que como o conversor operando em DCM é projetado para operar em razão cíclica constante em um ciclo da rede. Isso limita a utilização do conversor Buck em aplicações de baixa potência para LEDs associados em série. Além disso, é necessário um capacitor grande na saída para limitar o *ripple* de corrente nos dispositivos. As grandes vantagens deste conversor são sua alta confiabilidade e simplicidade, já que este driver utiliza um número reduzido de componentes.

O conversor Boost com suas formas de onda de entrada típicas pode ser visto na Figura 39.

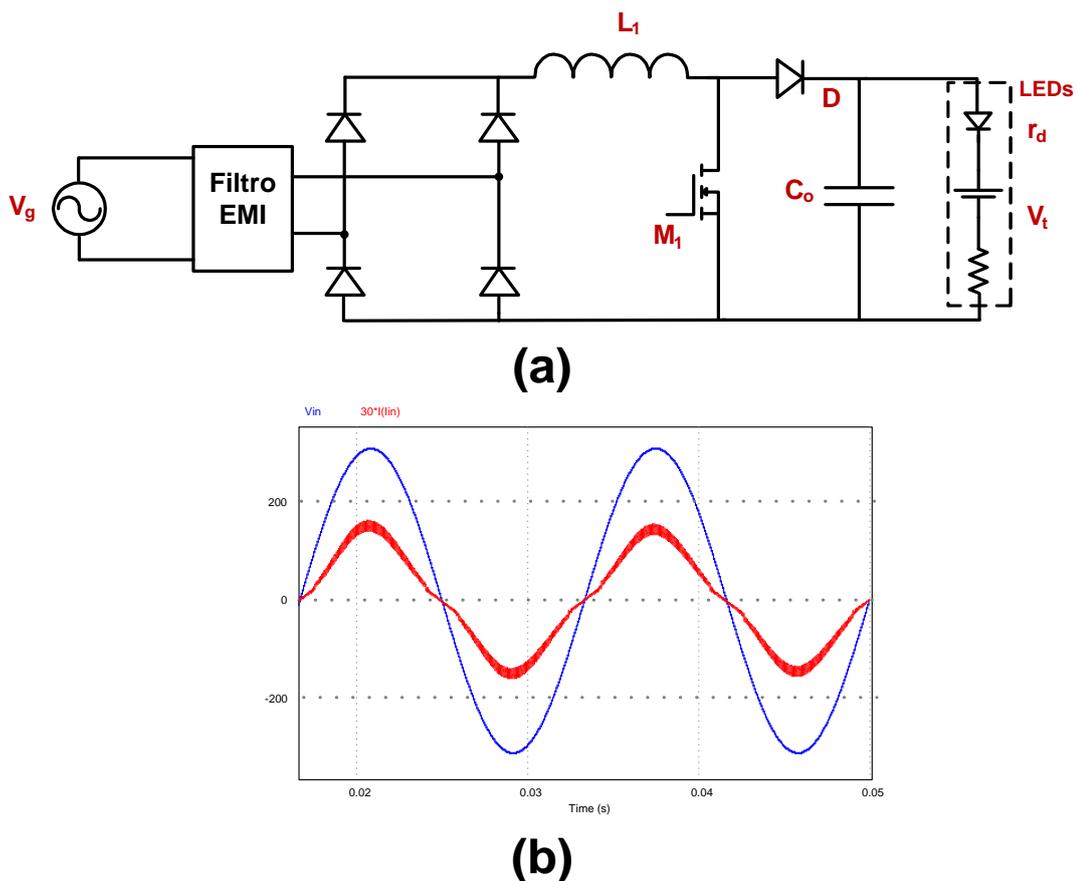


Figura 39. (a) Conversor Boost (b) Corrente e tensão de entrada do conversor Boost

De acordo com Wei, et al. (1998), a corrente de entrada do conversor Boost é dada por (5.2).

$$\langle i_{in} \rangle_{T_s} = \frac{D^2 T_s}{2L} \left( \frac{v_{in}(t) V_{LED}}{V_{LED} - v_{in}(t)} \right) \quad (5.2)$$

Pela análise da equação (5.2) é possível verificar que quanto maior for a tensão no arranjo de LEDs, mais a corrente média na entrada irá se aproximar de uma forma de onda senoidal pura. Geralmente em aplicações de iluminação pública, os conversores são alimentados em 220 VAC, isto faz com que a tensão nos LEDs tenha que ser bem superior a 311 V (i.e. Valor de pico da tensão de entrada) para que um alto fator de potência seja atingido. Com isso, da mesma forma que ocorreu com o conversor Buck, o nicho de aplicações do conversor Boost em topologias de estágio único<sup>1</sup> é reduzido. Pode-se citar como vantagens do conversor Boost o fato do mesmo possuir tanto a chave como a saída referenciadas ao terra do circuito.

A Figura 40 mostra o conversor Buck-Boost e suas formas de onda de entrada quando o mesmo opera em DCM.

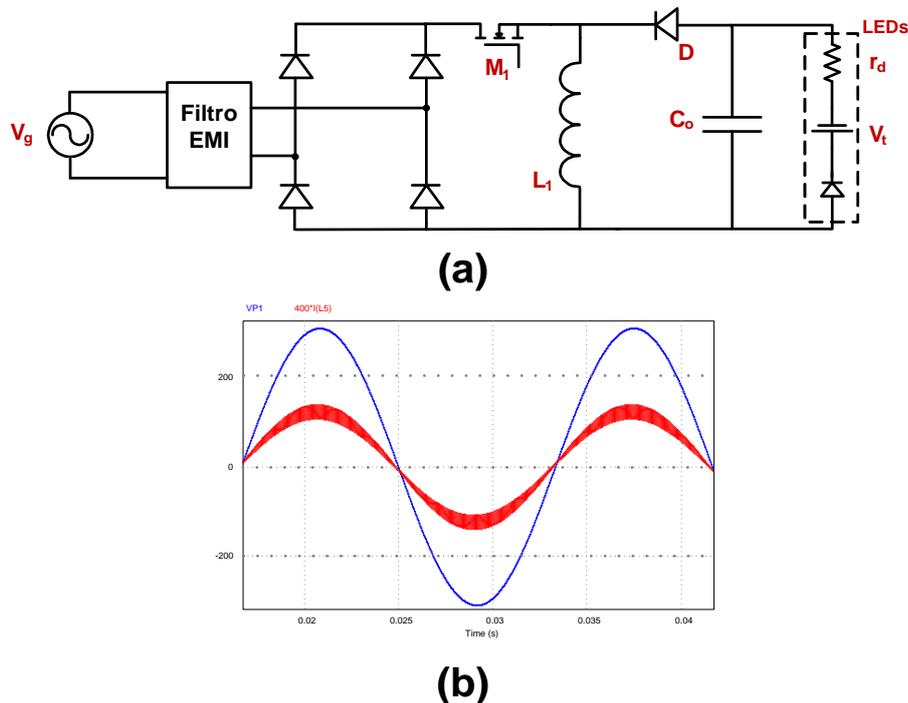


Figura 40. (a) Conversor Buck-Boost (b) Corrente e tensão de entrada do conversor Buck-Boost

<sup>1</sup> São conversores eletrônicos que integram as funções de correção de fator de potência e controle de potência na carga com apenas um estágio de conversão.

Diferentemente dos conversores citados acima, o conversor Buck-Boost não tem limitação com relação à tensão no arranjo de LEDs, pois este conversor apresenta as características tanto *step-up* quanto *step-down*. De acordo com Wei, et al. (1998), a corrente média de entrada do conversor Buck-Boost é dada por (5.3).

$$\langle i_{in} \rangle_{T_s} = \frac{D^2 T_s}{2L} v_{in}(t) \quad (5.3)$$

A equação (5.3) mostra que o conversor Buck-Boost possui uma forma de onda senoidal independente das características da carga. Contudo, como este driver não possui uma filtragem adequada da corrente de saída, pode ser que seja necessária a utilização de um capacitor de valor elevado para que a corrente de saída não possua um *ripple* muito alto. Este problema ocorre devido ao desequilíbrio de potências entre a entrada e saída e ao fato do conversor possuir poucos elementos reativos para manipular este desequilíbrio. Pode-se dizer que este problema é comum de todos os conversores de segunda ordem (Buck, Boost, Buck-Boost, Flyback) e restringe a aplicação destas topologias em muitas aplicações.

Neste contexto, foi analisado o uso de dois conversores eletrônicos cascadeados para o acionamento dos LEDs, onde o estágio de entrada é o responsável pela correção do fator de potência e o estágio de saída é responsável pelo controle de potência na carga.

Em CHENG, et al. (2011) foram apresentadas algumas topologias que utilizam dois estágios de conversão separados. Estas topologias podem ser vistas nas Figura 41, Figura 42 e Figura 43.

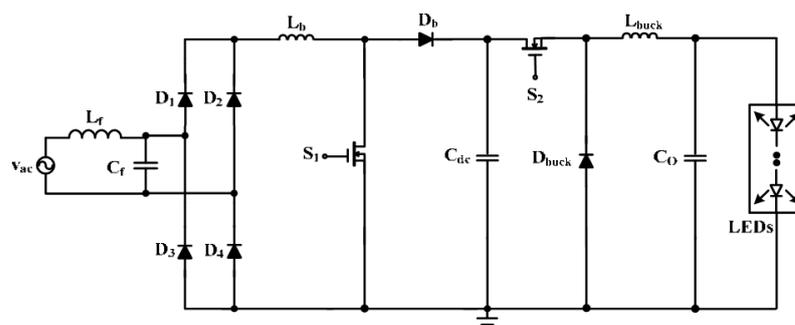


Figura 41. Conversores Boost e Buck cascadeados (CHENG, 2011)

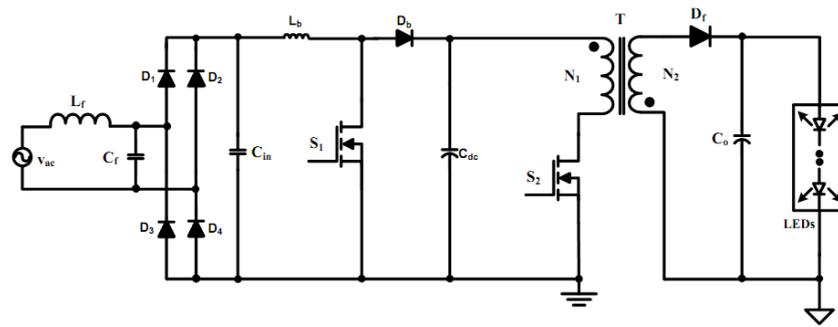


Figura 42. Conversores Boost e Flyback cascateados (CHENG, 2011)

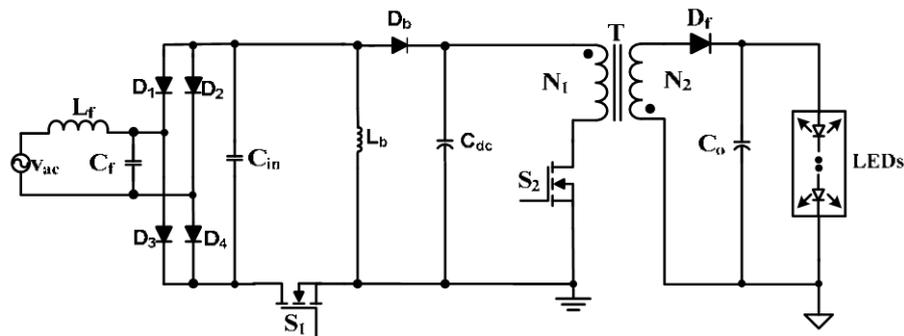


Figura 43. Conversores Buck-Boost e Flyback cascateados (CHENG, 2011)

No entanto, as topologias mostradas acima apresentam um grande número de componentes, pois existem duas chaves ativas (que necessitam circuitos de acionamento independentes). Devido a este fato, foram propostas topologias que utilizam os dois estágios integrados (PFC e controle de potência).

Algumas topologias integradas para acionamento de LEDs de potência podem ser vistas nas Figura 44 e Figura 45.

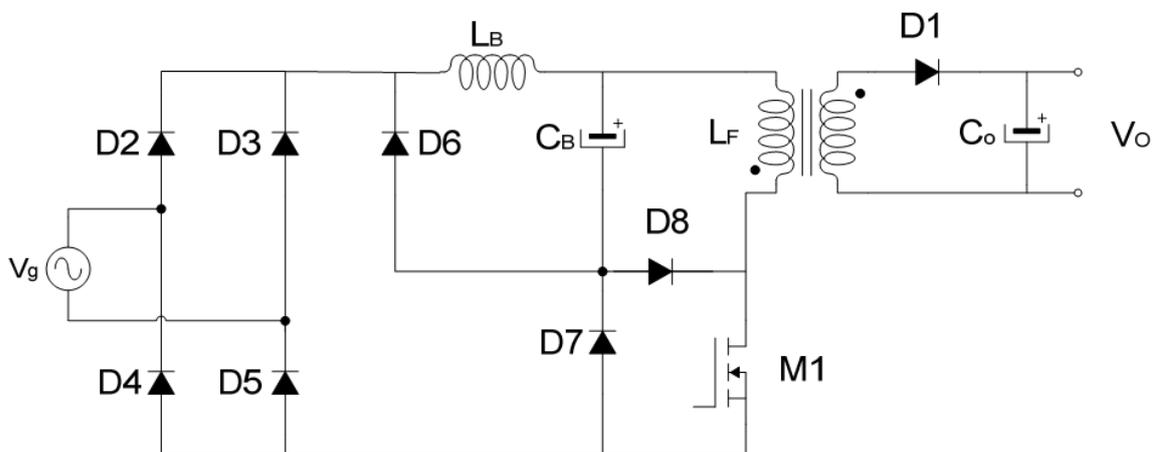


Figura 44. Topologia Buck Flyback (GACIO, *et al.*, 2011)

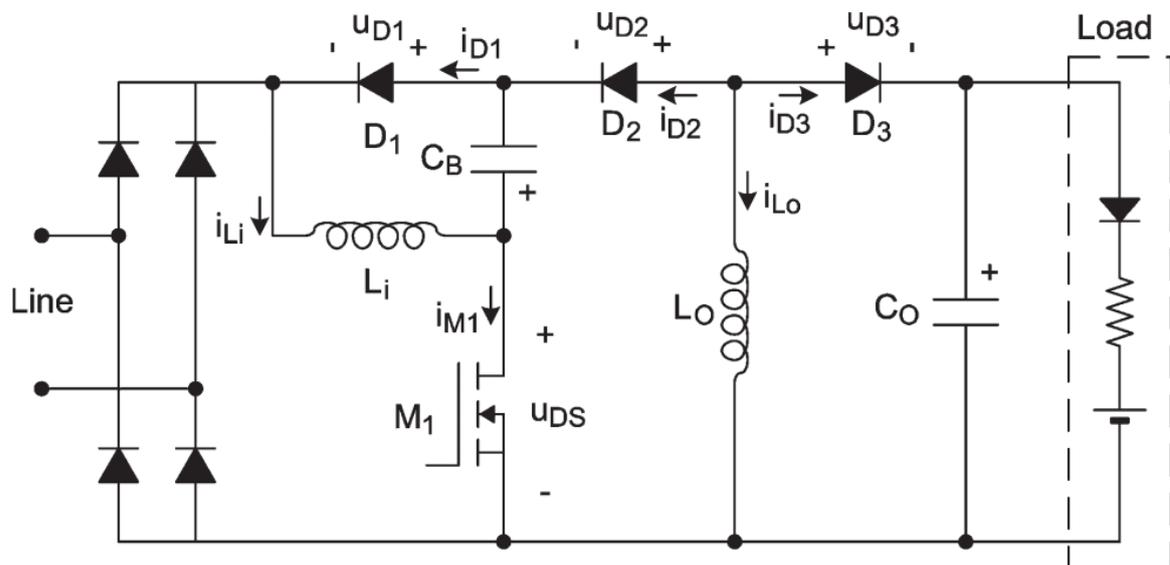
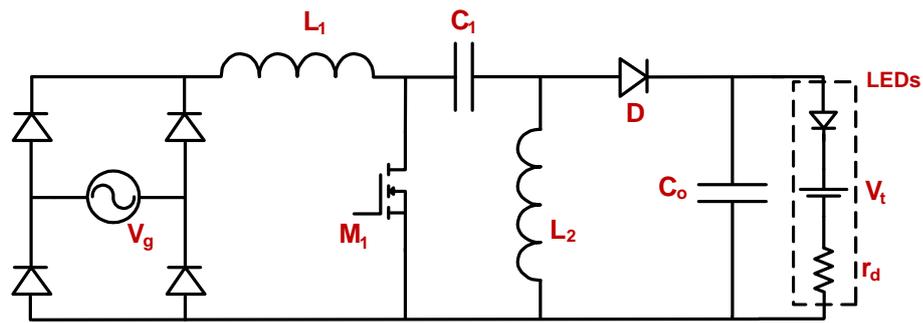


Figura 45. Topologia Buck-Boost quadrático (ALONSO, *et al.*, 2012)

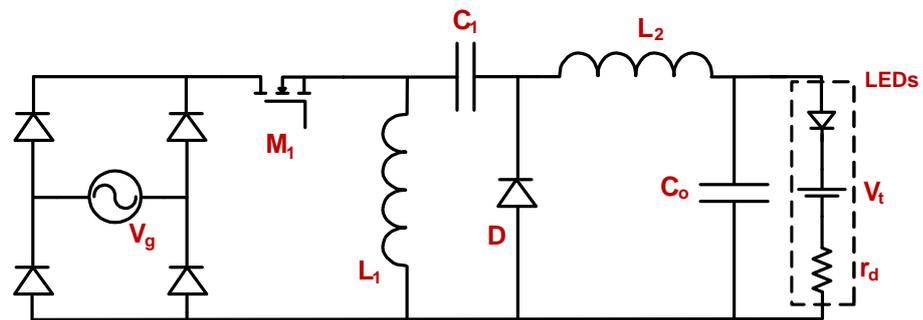
Além da característica de correção do fator de potência e controle da corrente de saída, os conversores integrados podem ser projetados de forma a evitar capacitores eletrolíticos em sua topologia, já que existem dois estágios de processamento de energia, e o desbalanceamento de potência entre entrada e saída pode ser manipulado por estes estágios sem que seja necessária a concentração de uma alta capacidade de armazenamento de energia em um único componente. Contudo, apesar de diversas vantagens, as técnicas de integração fazem com que existam maiores esforços de tensão ou corrente sobre seus componentes (MARCHESAN, 2007).

Uma alternativa a estes conversores é a utilização dos conversores de quarta ordem (Ćuk, Sepic, Zeta) que possuem excelente característica para correção de fator de potência, boa dinâmica e possibilidade de redução das capacitâncias de filtragem.

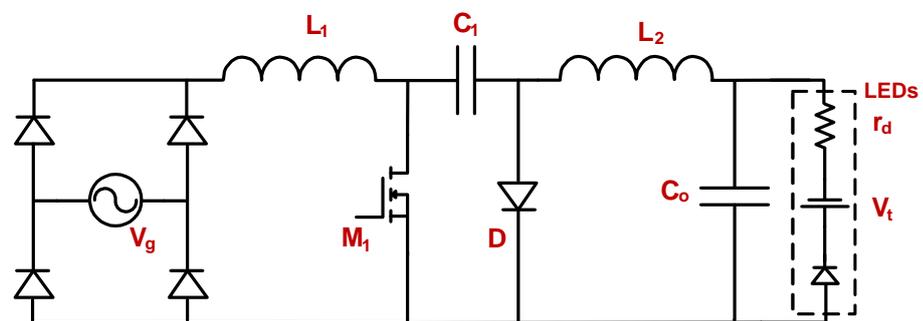
A Figura 46 mostra as topologias de quarta ordem como drivers para LEDs.



(a)



(b)



(c)

Figura 46. Topologias de quarta ordem (a) Sepic (b) Zeta (c) Ćuk

Pode-se ver que todas as topologias apresentadas na Figura 46 possuem semelhanças entre si, mas ao mesmo tempo, peculiaridades que devem ser analisadas levando em conta a aplicação.

A Tabela 11 faz um comparativo básico entre estas topologias.

Tabela 11. Comparação topologias de quarta ordem

Topologia	Corrente de entrada	Corrente de saída	Chave	Características da saída
<b>Sepic</b>	Contínua	Descontínua	Aterrada	Aterrada (não invertida)
<b>Zeta</b>	Descontínua	Contínua	Flutuante	Aterrada (não invertida)
<b>Cuk</b>	Contínua	Contínua	Aterrada	Aterrada (invertida)

Analisando a Tabela 11, pode-se ver que o conversor Sepic apresenta um problema para o acionamento de LEDs, pois o mesmo possui uma corrente descontínua no estágio de saída, isto poderá implicar um aumento no ripple de corrente na saída do conversor, fazendo com que o capacitor de saída tenha um valor mais elevado do que o dos outros dois conversores.

O conversor Zeta aparece como uma boa alternativa para o acionamento dos LEDs, pois sua corrente de saída é contínua devido à presença do indutor  $L_2$ . Contudo, a chave do conversor Zeta não é referenciada ao potencial terra do circuito, exigindo assim um circuito mais complexo para seu acionamento.

Já o conversor Cuk apresenta uma corrente de saída também contínua, além de sua chave ser aterrada, facilitando seu disparo. Estes fatos fazem do conversor Cuk uma boa topologia de estágio único para acionamento de LEDs de potência.

#### 5.4. CONCLUSÃO PARCIAL

Neste capítulo foi possível fazer uma breve revisão a respeito de algumas alternativas para acionamento de LEDs de potência a partir da rede elétrica. Como foi dito anteriormente, esta aplicação possui alguns requisitos como estágio de correção de fator de potência e regulação da corrente nos LEDs.

Foi possível analisar topologias passivas, que possuem uma boa robustez, porém alta dependência do ponto de operação para o qual foram projetadas.

Algumas topologias ativas de estágio único conhecidas na literatura foram mostradas, sendo que foi dada ênfase em topologias operando em DCM, pois neste modo de operação é possível corrigir o fator de potência do circuito sem a necessidade de um circuito de controle mais complexo.

As topologias básicas (Buck, Boost e Buck-Boost) apresentam boa capacidade para correção do fator de potência, contudo, possuem algumas

limitações relativas ao controle da corrente na saída. Devido a este fato, as topologias integradas e as topologias de quarta ordem se apresentam como melhores alternativa para acionamento de LEDs a partir da rede.

As topologias de quarta ordem apresentam boas características para operarem como conversores de estágio único no acionamento de LEDs a partir da rede. Além disso, os semicondutores destes conversores sofrem menos esforços do que em topologias integradas, podendo atingir maiores eficiências.

Dentre os conversores de quarta ordem, o conversor Ćuk se apresenta, a priori, como a melhor alternativa para o acionamento de LEDs a partir da rede elétrica. Sua análise completa poderá ser vista no próximo capítulo.

## 6. ANÁLISE E PROJETO DO DRIVER DE LONGA VIDA DE ESTÁGIO ÚNICO BASEADO NA TOPOLOGIA ĆUK

No capítulo anterior foram apresentadas as características de alguns conversores eletrônicos operando como drivers para LEDs de potência. Pela análise destas características chegou-se a conclusão que o conversor Ćuk é uma excelente alternativa para a alimentação de LEDs a partir da rede elétrica.

O conversor Ćuk operando em DCM para correção de fator de potência já foi bastante explorado na literatura e mostrou-se eficiente para este fim (Brkovic, Ćuk, 1992 ; SIMONETTI, SEBASTIAN, UCEDA, 1997; Ranganathan, Umanand, 1999).

Além disso, a aplicabilidade deste conversor operando em CCM como driver para LEDs em aplicações de baixa potência foi abordada em (DE BRITTO, *et al.*, 2008). No entanto, não há trabalhos utilizando o conversor Ćuk como driver para LEDs de potência em aplicações de elevado fator de potência.

No capítulo 2 foi mostrada a importância da vida útil do driver para o sucesso da tecnologia LED. Em (RODRIGUEZ; AMARATUNGA, 2008) foi mostrado que o capacitor eletrolítico tende a ser o ponto fraco do driver, e devido a isto, é necessário desenvolver uma metodologia de projeto que evite a utilização destes componentes no conversor proposto.

Este capítulo irá mostrar o desenvolvimento matemático do conversor proposto, bem como uma metodologia de projeto do conversor Ćuk que suprime o uso de capacitores eletrolíticos em sua topologia. Este desenvolvimento irá se basear também nos estudos das características elétricas e fotométricas dos diodos emissores de luz, realizados no capítulo 3 deste trabalho.

## 6.1. ANÁLISE DO CONVERSOR ĆUK OPERANDO EM DCM COMO DRIVER PARA LEDS A PARTIR DA REDE ELÉTRICA

As Figura 47 e Figura 48 mostram o conversor Ćuk e seus estágios de funcionamento quando o mesmo opera em DCM, respectivamente.

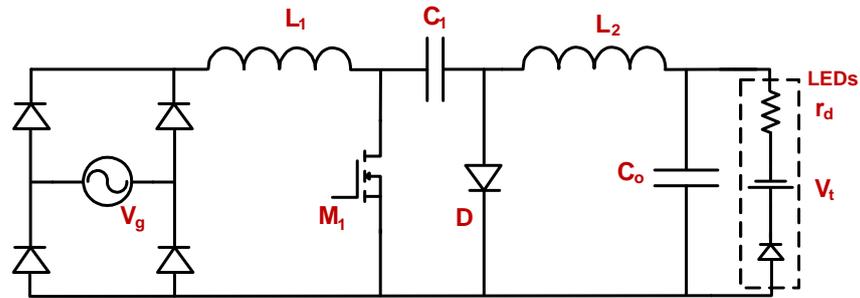
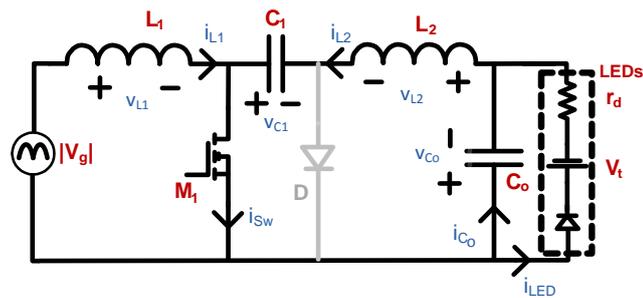
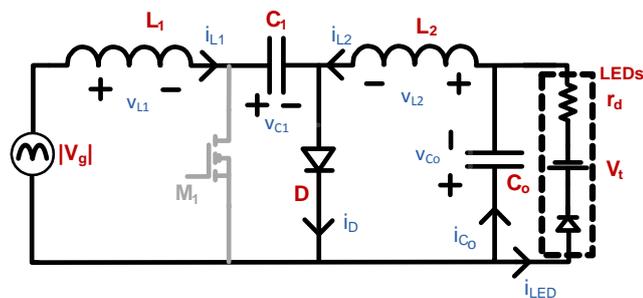


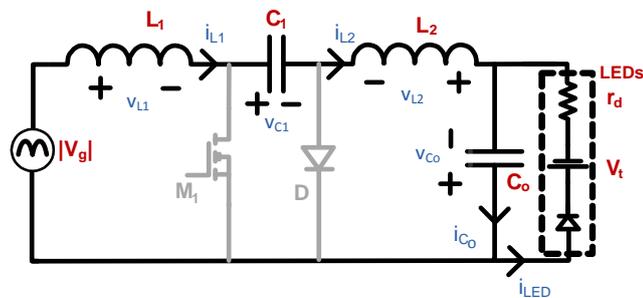
Figura 47. Conversor Ćuk



(a) Intervalo 1:  $0 \leq t \leq D_1 T_s$



(b) Intervalo 2:  $D_1 T_s < t \leq (D_1 + D_2) T_s$



(c) Intervalo 3:  $(D_1 + D_2) T_s < t \leq T_s$

Figura 48. Estágios de funcionamento do conversor Ćuk operando em DCM

Todas as variáveis mostradas na Figura 48 são valores instantâneos. A variável  $D_1$  representa a razão cíclica do MOSFET  $M_1$  e  $D_2$  é um parâmetro adimensional, onde  $D_2 = t_{don}/T_s$  ( $t_{don}$  é o tempo de condução do diodo e  $T_s$  é o período de chaveamento). Os parâmetros do arranjo de LEDs são  $V_t$ , que é a tensão de limiar, e  $r_d$  que é a resistência dinâmica do conjunto de LEDs.

No primeiro estágio de funcionamento, representado pela Figura 48-a, pode-se ver que o indutor  $L_1$  carrega-se através do MOSFET  $M_1$ . Também nesta etapa, o indutor  $L_2$  e o capacitor  $C_o$  recebem energia do capacitor  $C_1$ .

No segundo estágio de funcionamento (Figura 48-b), o diodo entra em condução fazendo com que o capacitor  $C_1$  carregue-se através do indutor  $L_1$  e o indutor  $L_2$  transfira energia para a carga e para o capacitor  $C_o$ .

Na terceira etapa de funcionamento (Figura 48-c), o diodo entra em bloqueio e ocorre livre circulação de corrente no estágio de entrada. Nesta etapa de funcionamento a carga é alimentada pelo capacitor  $C_o$ .

Considerando o ripple de tensão no capacitor  $C_1$  pequeno e utilizando os conceitos da análise dos estágios de funcionamento, as formas de onda teóricas para o conversor Ćuk operando em DCM podem ser representadas graficamente. A Figura 49-a mostra as formas de onda de baixa frequência, juntamente com algumas formas de onda de alta frequência (Figura 49-b).

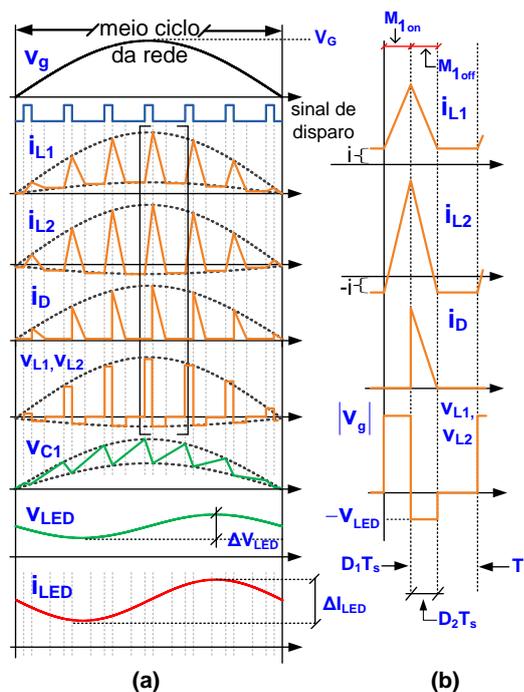


Figura 49. Formas de onda teóricas: (a) baixa frequência (b) alta frequência

Analisando a Figura 49-b, é possível ver que as tensões nos indutores são semelhantes durante um período de chaveamento. Aplicando o balanço volt-segundo em um destes indutores, pode-se encontrar a relação (5.4).

$$\frac{V_{LED}}{|v_G|} = \frac{D_1}{D_2} \quad (5.4)$$

Onde o parâmetro  $V_{LED}$  é dado por (5.5).

$$V_{LED} = r_d I_{LED} + V_t \quad (5.5)$$

Desprezando as perdas no conversor e as oscilações de tensão e corrente na saída é possível estabelecer uma relação entre as correntes médias de entrada e saída do conversor através de (5.6).

$$\frac{\langle i_{L1} \rangle_{T_s}}{\langle i_{L2} \rangle_{T_s}} = \frac{D_1}{D_2} \quad (5.6)$$

Onde  $\langle i_{L1} \rangle_{T_s}$  e  $\langle i_{L2} \rangle_{T_s}$  são as correntes médias nos indutores  $L_1$  e  $L_2$ , respectivamente. Os valores destas correntes podem ser encontrados pelo cálculo do valor médio das formas de onda de corrente dos indutores, apresentadas na Figura 49-b. O resultado pode ser visto nas equações (5.7) e (5.8).

$$\langle i_{L1} \rangle_{T_s} = \frac{|v_G| D_1 T_s}{2L_1} (D_1 + D_2) + i \quad (5.7)$$

$$\langle i_{L2} \rangle_{T_s} = \frac{|v_G| D_1 T_s}{2L_2} (D_1 + D_2) - i \quad (5.8)$$

Onde  $i$  representa o *offset* das correntes dos indutores.

Somando as expressões (5.7) e (5.8), obtém-se (5.9).

$$\langle i_{L1} \rangle_{T_s} + \langle i_{L2} \rangle_{T_s} = \frac{|v_G| D_1 T_s}{2L_{eq}} (D_1 + D_2) \quad (5.9)$$

Onde  $L_{eq}$  é definido por:

$$L_{eq} \triangleq \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad (5.10)$$

A corrente média no indutor  $L_1$ , que é igual à corrente média de entrada do conversor, pode ser obtida substituindo (5.6) em (5.9). Logo:

$$\langle i_{L1} \rangle_{T_s} = \frac{|v_G| D_1^2 T_s}{2L_{eq}} \quad (5.11)$$

A equação (5.11) mostra que se a razão cíclica e o período de chaveamento forem mantidos constantes durante um ciclo da rede, o conversor  $\hat{C}uk$  operando em DCM irá emular uma carga resistiva de resistência  $R_{\hat{C}uk}$ , que é dada por (5.12).

$$R_{\hat{C}uk} = \frac{2L_e}{D_1^2 T_s} \quad (5.12)$$

Sendo assim, o fator de potência teórico do conversor  $\hat{C}uk$  é unitário. É interessante relevar que na prática a corrente de entrada possui um *ripple* de alta frequência. Todavia, efeitos deste *ripple* na distorção da corrente de entrada podem ser mitigados utilizando-se um filtro EMI.

O valor da corrente média no indutor  $L_2$  pode ser encontrado utilizando as equações (5.4), (5.6) e (5.9). Logo  $\langle i_{L2} \rangle_{T_s}$  é dado por:

$$\langle i_{L2} \rangle_{T_s} = \frac{|v_G|^2 D_1^2 T_s}{2L_{eq} V_{LED}} \quad (5.13)$$

A equação (5.13) pode ser reescrita de forma a evidenciar seus valores CC e CA.

$$\begin{aligned} \langle i_{L2} \rangle_{T_s} &= \frac{|v_G|^2 D_1^2 T_s}{2L_{eq} V_{LED}} = \frac{V_G^2 D_1^2 T_s}{2L_{eq} V_{LED}} |\text{sen}^2(\omega_L t)| = \\ &= \frac{V_G^2 D_1^2 T_s}{4L_{eq} V_{LED}} |1 - \cos(2\omega_L t)| = I_{L2} + \tilde{i}_{L2}(t) \end{aligned} \quad (5.14)$$

Onde  $V_G$  é o valor de pico da tensão de entrada e  $\omega_L$  é a frequência angular da rede. É interessante notar que o *ripple* de baixa frequência na corrente do indutor ( $\tilde{i}_{L2}(t)$ ) oscila em duas vezes a frequência da rede.

A partir dos resultados obtidos nas equações (5.11) e (5.14), é possível descrever o conversor Ćuk operando em DCM a partir de um circuito equivalente de grandes sinais e baixa frequência ( $2\omega_L$ ). Este circuito é mostrado na Figura 50.

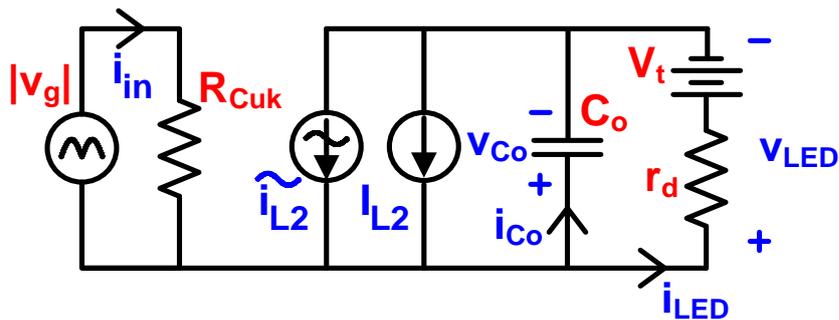


Figura 50. Circuito equivalente de grandes sinais e baixa frequência

Como a corrente média no capacitor de saída deve ser nula, a corrente média no arranjo de LEDs deve ser a própria corrente média do indutor  $L_2$ . Portanto:

$$I_{LED} = \frac{V_G^2 D_1^2 T_s}{4L_{eq} V_{LED}} \quad (5.15)$$

O *ripple* de corrente na saída pode ser obtido equacionando o nó de saída do circuito da Figura 50, desprezando as fontes de tensão e corrente contínua. O resultado deste equacionamento é mostrado em (5.16).

$$\begin{aligned}\Delta i_{LED} &= \frac{1/(j2\omega_L C_o)}{1/(j2\omega_L C_o) + r_d} \times \tilde{i}_{L2} = \\ &= \frac{V_G^2}{R_{Cuk} V_{LED} \sqrt{1 + 4\omega_L^2 C_o^2 r_d^2}}\end{aligned}\quad (5.16)$$

O ganho estático do conversor Ćuk operando em DCM pode ser obtido igualando as expressões da corrente média no indutor  $L_2$  com a corrente média na saída.

$$\frac{V_G D_1^2 T_s}{4L_{eq} V_{LED}} = \frac{V_{LED}}{R_{LED}} \quad (5.17)$$

Onde  $R_{LED}$  é a resistência do arranjo de LEDs, definida por (5.18).

$$R_{LED} = r_d + \frac{V_t}{I_{LED}} \quad (5.18)$$

Logo, o ganho estático  $M$  do conversor Ćuk é dado por (5.19).

$$M \equiv \frac{V_{LED}}{V_G} = \sqrt{\frac{D_1^2 T_s R_{LED}}{4L_{eq}}} = \frac{D_1}{\sqrt{2K_e}} \quad (5.19)$$

Onde  $K_e$  é o parâmetro de condução, definido por (5.20).

$$K_e = \frac{2L_{eq}}{R_{LED} T_s} \quad (5.20)$$

As equações desenvolvidas até o momento admitem que o conversor Ćuk esteja operando em DCM. Contudo, é necessário analisar as condições limítrofes entre o modo de condução contínua e o modo de condução descontínua. Esta análise pode ser feita de forma simplificada utilizando a desigualdade (5.21).

$$D_1 T_s + D_2 T_s < T_s \equiv D_1 + D_2 < 1 \quad (5.21)$$

Utilizando as relações (5.4) e (5.19) é possível obter o valor de  $D_2$ , mostrado em (5.22).

$$D_2 = \sqrt{K_e} \quad (5.22)$$

Logo, o parâmetro crítico de condução  $K_{crit}$ , que determina a condição limítrofe entre operação no modo contínuo de condução e o modo descontínuo, pode ser obtido utilizando as relações (5.19), (5.21) e (5.22).

$$K_{crit} = \frac{1}{2(M+1)^2} \quad (5.23)$$

## 6.2. PROJETO DO CONVERSOR CUK OPERANDO EM DCM APLICADO AO ACIONAMENTO DE LEDS DE POTÊNCIA

Na última seção deste capítulo, foi abordado o desenvolvimento teórico do conversor Cuk operando em DCM. Contudo, o projeto de um protótipo do conversor baseado neste desenvolvimento é necessário para validar a abordagem apresentada.

Primeiramente, é necessário definir qual é o intervalo de variação de tensão de entrada sob o qual o conversor irá operar. Segundo as análises do capítulo 4, pode-se ver que é interessante prever uma variação da tensão de entrada em torno de 10 % a fim de se garantir a robustez do conversor. A Tabela 12 resume os parâmetros de projeto.

Tabela 12. Parâmetros de entrada para o projeto do protótipo

Símbolo	Descrição	Valor
$V_G$	Tensão de pico da rede	311 V +/- 10%
$f_s$	Frequência de chaveamento	50 kHz
$f_L$	Frequência da rede	60 Hz
$I_{LED}$	Corrente média no string de LEDS	350 mA
$V_t$	Tensão de limiar do string de LEDS	145 V
$r_d$	Resistência dinâmica do string de LEDS	98.4 $\Omega$

Definidos os parâmetros de projeto, primeiramente é necessário encontrar o valor do parâmetro de condução crítico.

A tensão  $V_{LED}$  pode ser encontrada substituindo os valores da Tabela 12 na equação (5.5). Logo:

$$V_{LED} = r_d I_{LED} + V_t = 179,44V \quad (5.24)$$

O parâmetro crítico deve ser calculado para o menor valor de entrada ( $V_G = 279,9$  V), já que este valor representa o pior caso, ou seja, menor valor de  $K_{crit}$ . Logo, aplicando-se a equação (5.23) para estas condições pode-se encontrar este parâmetro. O resultado é visto em (5.25).

$$K_{crit} = \frac{1}{2 \left( \frac{179,44}{279,9} + 1 \right)^2} = 0,186 \quad (5.25)$$

O valor do parâmetro de condução escolhido deve ser menor que  $K_{crit}$ . Utilizando  $K_e = 0,12$ , pode-se encontrar a indutância equivalente  $L_e$  através da equação (5.20). Logo:

$$L_e = 6,152 \times 10^{-4} \quad (5.26)$$

A razão cíclica no ponto de trabalho pode ser calculada a partir da aplicação da equação (5.19) com  $K_e = 0,12$ . Logo:

$$D_1 = \sqrt{2K_e} M = 0,283 \quad (5.27)$$

A indutância  $L_1$  pode ser encontrada equacionando o *ripple* de alta frequência da corrente de entrada. Este equacionamento pode ser feito a partir da análise da Figura 49-b. Então:

$$L_1 = \frac{V_G D T_s}{\Delta I_1} \quad (5.28)$$

Onde  $\Delta I_1$  é o ripple de alta frequência da corrente de entrada.

Note que o valor  $\Delta I_1$  deve ser calculado para  $V_G = 311$  V, que é o valor nominal da tensão de entrada no ponto de operação. Sendo assim, escolhendo  $\Delta I_{1\%} = 80\%$ , o valor do indutor  $L_1$  é obtido através de (5.28), resultando em  $L_1 = 5,2$  mH.

Note que o *ripple* de alta frequência da corrente de entrada foi escolhido de forma a minimizar o valor de  $L_1$ . Um valor menor de  $\Delta I_1$  poderia ter sido escolhido a fim de mitigar as distorções na corrente de entrada, contudo, este valor iria acarretar em um indutor de entrada volumoso. Uma maneira mais eficaz de se melhorar o fator de potência de entrada é utilizando um filtro EMI na entrada do conversor.

Aplicando-se (5.10) para os valores de  $L_e$  e  $L_1$  obtidos anteriormente, encontra-se o valor de  $L_2 = 700$   $\mu$ H.

Toda análise teórica realizada na seção anterior deste capítulo foi realizada considerando a tensão do capacitor  $C_1$  aproximadamente constante durante um período de chaveamento. Contudo, foi mostrado em (SIMONETTI, SEBASTIAN; UCEDA, 1997) que o capacitor  $C_1$  deve ser dimensionado de forma que o mesmo possibilite a excursão de sua tensão de acordo com a tensão de entrada. Sendo assim, para que a tensão do capacitor seja compatível com estas duas restrições, pode-se utilizar (5.29) para projetar  $C_1$ .

$$f_L \ll \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C_1}} \ll f_s \quad (5.29)$$

Utilizando  $C_1 = 100$  nF, verifica-se que a restrição (5.29) é satisfeita.

Escolhendo um capacitor de saída de  $45$   $\mu$ F (polipropileno), verifica-se através da equação (5.16) que o ripple de corrente nos LEDs será  $\Delta i_{LED} = 201$  mA (57.4%). De acordo com as análises feitas no capítulo 3, este valor de *ripple* irá diminuir o fluxo luminoso dos dispositivos em cerca de 0,4%. Esta redução não é significativa perante os benefícios da utilização de um capacitor de filme ao invés de um eletrolítico em *drivers* para LEDs, já que este tipo de capacitor aumenta a confiabilidade e vida útil do sistema, esta última podendo chegar a 300.000 horas (BUIATTI, *et al.*, 2009).

### 6.3. SIMULAÇÃO DO CONVERSOR ĆUK OPERANDO EM DCM COMO DRIVER PARA LEDS

A fim de avaliar as características apresentadas no estudo feito nas últimas seções deste capítulo, o circuito proposto foi simulado no software PSIM<sup>®</sup>. O modelo do conversor utilizado na simulação é apresentado na Figura 51.

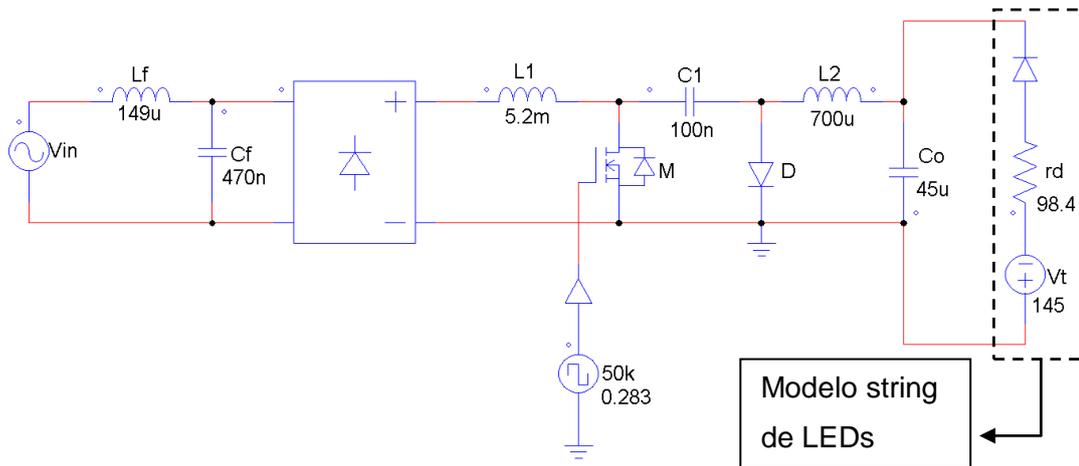


Figura 51. Modelo de simulação do conversor Ćuk

A Tabela 13 resume os parâmetros utilizados em simulação, que são os mesmos calculados na seção anterior deste capítulo. É interessante ressaltar que as chaves semicondutoras (i.e. MOSFET e diodo) utilizadas na simulação são ideais.

Tabela 13. Parâmetros utilizados na simulação

Símbolo	Parâmetro/componente	Valor
$V_G$	Tensão de pico da rede	311 V
$f_L$	Frequência da rede	60 Hz
$f_s$	Frequência de chaveamento	50 kHz
$D$	Razão cíclica	0,283
$L_f$	Indutor do filtro EMI	149 $\mu$ H
$C_f$	Capacitor do filtro EMI	470 nF
$L_1$	Indutor do estágio de entrada do conversor Ćuk	5,2 mH
$L_2$	Indutor do estágio de saída do conversor Ćuk	700 $\mu$ H
$C_1$	Capacitor de transferência de energia entrada-saída	100 nF
$C_o$	Capacitor de saída	45 $\mu$ F
$V_t$	Tensão de limiar do string de LEDs	145 V
$r_d$	Resistência série do string de LEDs	98,4 $\Omega$

A Figura 52 mostra os principais resultados obtidos em simulação. As formas de onda de tensão e corrente de entrada podem ser vistas na Figura 52-a. É possível ver que mesmo com um filtro EMI pouco volumoso, conforme mostrado na

Tabela 13, a corrente de entrada possui um uma baixa distorção de alta frequência, apresentando um formato praticamente senoidal.

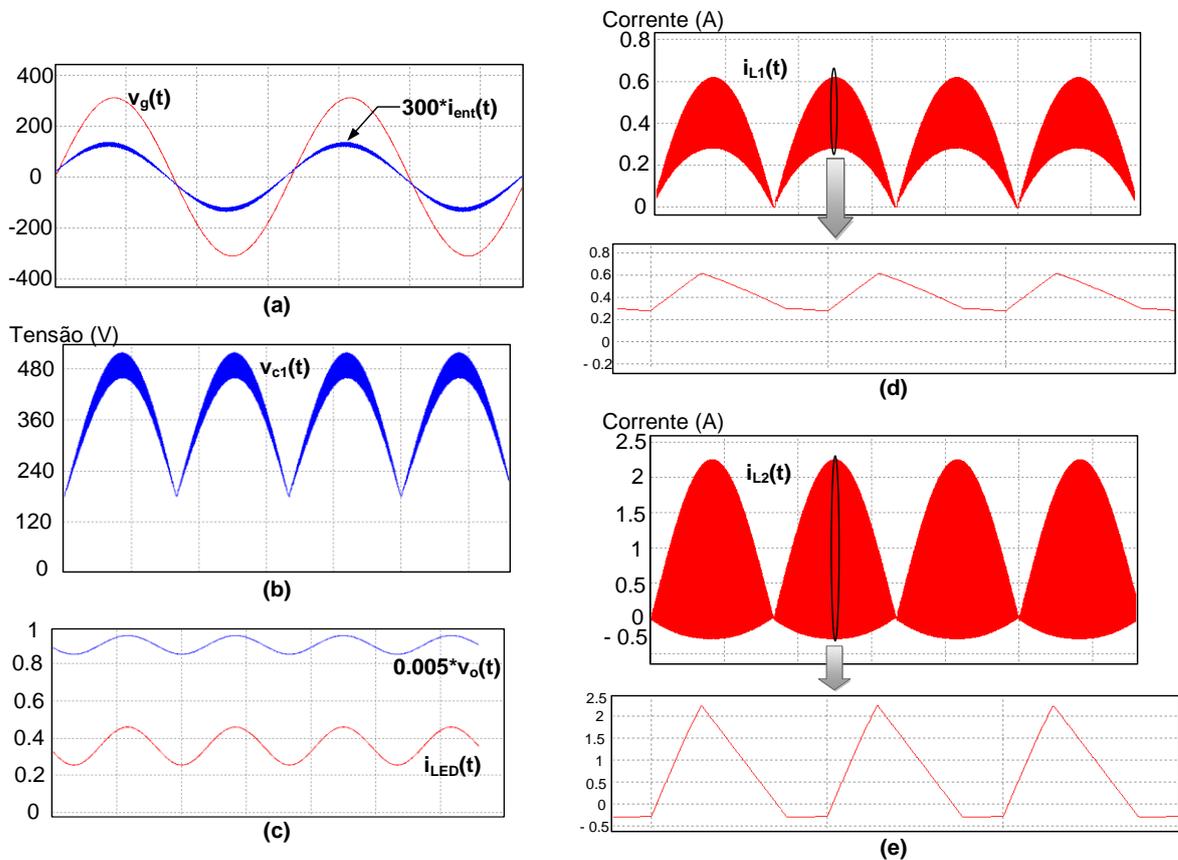


Figura 52. Formas de onda obtidas em simulação. (a) Tensão e corrente (300 x) de entrada; (b) Tensão no capacitor  $C_1$ ; (c) Corrente e tensão (0.005 x) na saída; (d) Corrente no indutor  $L_1$ ; (e) Corrente no indutor  $L_2$

A Figura 52-b mostra a forma de onda de tensão do capacitor  $C_1$ , pode-se ver que o valor médio num período de chaveamento desta tensão é aproximadamente a soma das tensões de entrada e saída, como foi considerado na abordagem teórica.

As formas de onda de tensão e corrente de saída são mostradas na Figura 52-c. Nota-se uma oscilação de baixa frequência em ambas grandezas, contudo não é possível observar oscilação de alta frequência, como foi suposto na abordagem teórica. É importante ressaltar que a tensão de saída do conversor  $\acute{C}uk$  é invertida com relação à entrada, todavia a mesma aparece positiva na figura. Isto se deve ao fato da referência para medição ter sido alterada no intuito de apresentar a tensão direta sobre o arranjo de LEDs. A Tabela 14 mostra uma comparação dos valores

calculados e simulados das grandezas de saída, pode-se ver que a teoria desenvolvida foi comprovada com os valores simulados.

Tabela 14. Comparação entre valores calculados e simulados

Parâmetro	Descrição	Valor calculado	Valor simulado
$I_{LED}$	Corrente média no string de LEDs	350 mA	359 mA
$\Delta i_{LED}$	Ripple de corrente no string de LEDs	201 mA	205 mA
$V_{LED}$	Tensão média de saída	179,4 V	180,3 V

As formas de onda de corrente nos indutor  $L_1$  e  $L_2$  são mostradas na Figura 52-d e na Figura 52-e, respectivamente. Nesta mesma figura, são mostradas tanto as formas de onda de baixa frequência, quanto de alta frequência (próxima ao pico da rede). A operação no modo DCM é comprovada a partir da observação destas figuras.

Nota-se que todas as formas de onda da Figura 52 são muito semelhantes às da Figura 49, comprovando assim que o desenvolvimento teórico do conversor Ćuk está correto.

As formas de onda tensão e corrente nas chaves semicondutoras, simuladas para a maior tensão de entrada (242 V), são mostradas na Figura 53.

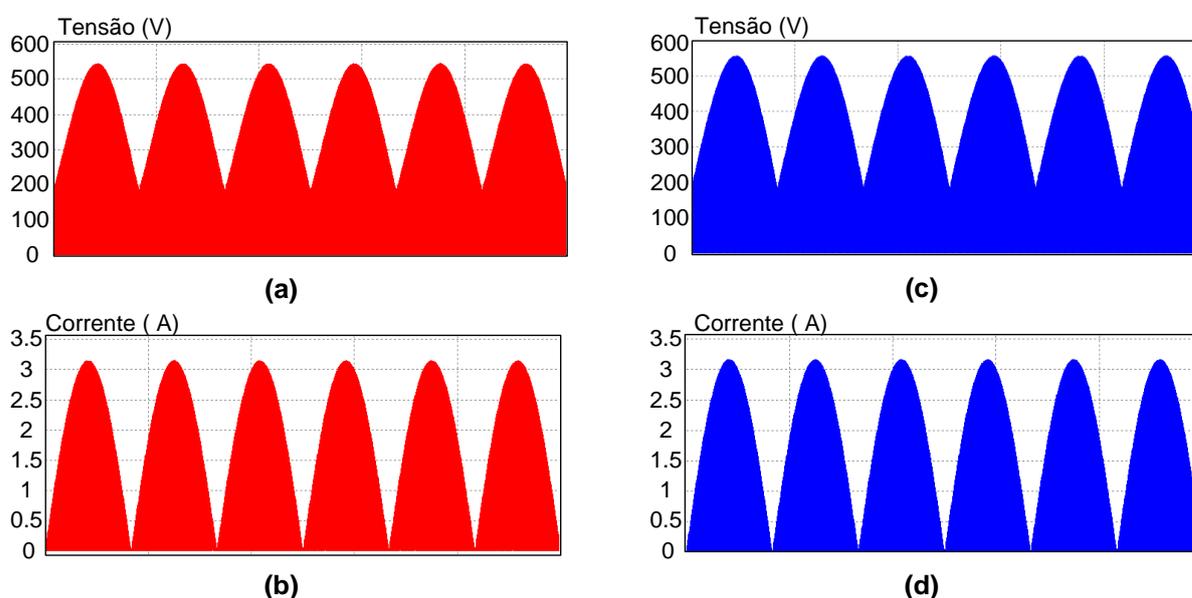


Figura 53. Formas de onda de tensão (a) e corrente (b) no MOSFET; Formas de onda de (c) tensão e (d) corrente no diodo.

A partir das formas de onda mostradas na Figura 53, é possível fazer o projeto das chaves semicondutoras. Através da simulação realizada, algumas grandezas importantes no projeto das chaves semicondutoras foram obtidas. A Tabela 15 resume estes parâmetros.

Tabela 15. Parâmetros importantes no projeto das chaves semicondutoras

Parâmetro	MOSFET	DIODO
Tensão de pico	544 V	558 V
Corrente média	294 mA	421 mA
Corrente de pico	3,15 A	3,17 A

#### 6.4. ANÁLISE EXPERIMENTAL DO CONVERSOR ĆUK OPERANDO EM DCM COMO DRIVER DE LEDS

Para verificar o desenvolvimento teórico proposto nas seções anteriores deste capítulo, bem como os resultados obtidos em simulação, um protótipo de laboratório foi montado de acordo com o projeto feito na seção 6.3. As chaves semicondutoras foram escolhidas através dos valores da Tabela 15. Os componentes selecionados, com algumas de suas características seguem na Tabela 16.

Tabela 16. Características das chaves semicondutoras selecionadas

Parâmetro	MOSFET(10N60)	DIODO (MUR160)
Tensão máxima de bloqueio	600 V	600 V
Corrente média	10 A @ 25 °C	1 A
Corrente de pico pulsante	36 A	35 A
Resistência série equivalente ( $r_{ds_{on}}$ )	750 m $\Omega$	-

A Tabela 17 resume os dados do protótipo e a Figura 54 mostra a foto do mesmo.

Tabela 17. Parâmetros do protótipo de laboratório

Item	Valor
<b>Filtro EMI (LC-type)</b>	150 $\mu$ H, 470 nF
<b>Indutância de entrada <math>L_1</math></b>	5.2 mH
<b>Indutância de saída <math>L_2</math></b>	700 $\mu$ H
<b>Capacitor <math>C_1</math></b>	100 nF / 630V - poliéster
<b>Capacitor de saída <math>C_o</math></b>	45 $\mu$ F / 250V - polipropileno
<b>MOSFET M1</b>	IRF840 <sup>1</sup> (850 m $\Omega$ )
<b>Diodo D</b>	MUR 160

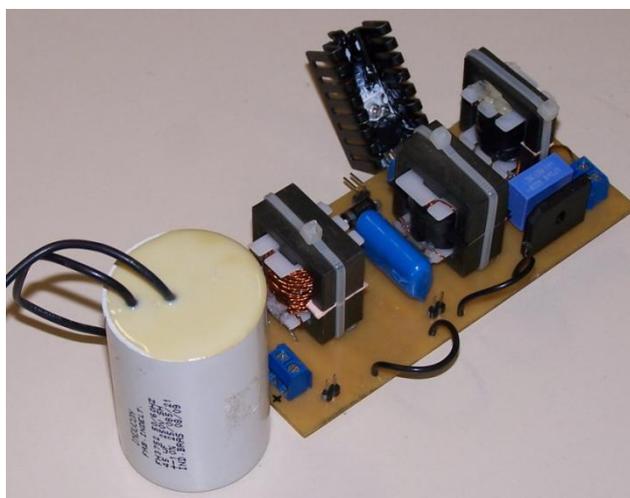


Figura 54. Protótipo do conversor apresentado neste trabalho

Pode-se ver que o número de componentes do protótipo é bem reduzido, o que mostra robustez do conversor para aplicações como iluminação pública. Além da robustez, o baixo custo também é destaque no conversor apresentado.

A seguir são mostradas as formas de onda obtidas em laboratório. Para este ensaio, a tensão de entrada foi de 220  $V_{RMS}$ .

A Figura 55 mostra as formas de onda de tensão e corrente de entrada do conversor proposto. Nota-se que a corrente de entrada é aproximadamente senoidal, contudo possui pequenas distorções devido à ressonância entre capacitâncias parasitas das chaves semicondutoras e as indutâncias do circuito (DE GUSSEME, *et al.*, 2003). Apesar disso, o fator de potência alcançado foi de 0,984 com uma THD de 4,7%.

<sup>1</sup> Por questões de disponibilidade no laboratório, o MOSFET IRF840 foi utilizado ao invés do 10N60, contudo os mesmos possuem características semelhantes.

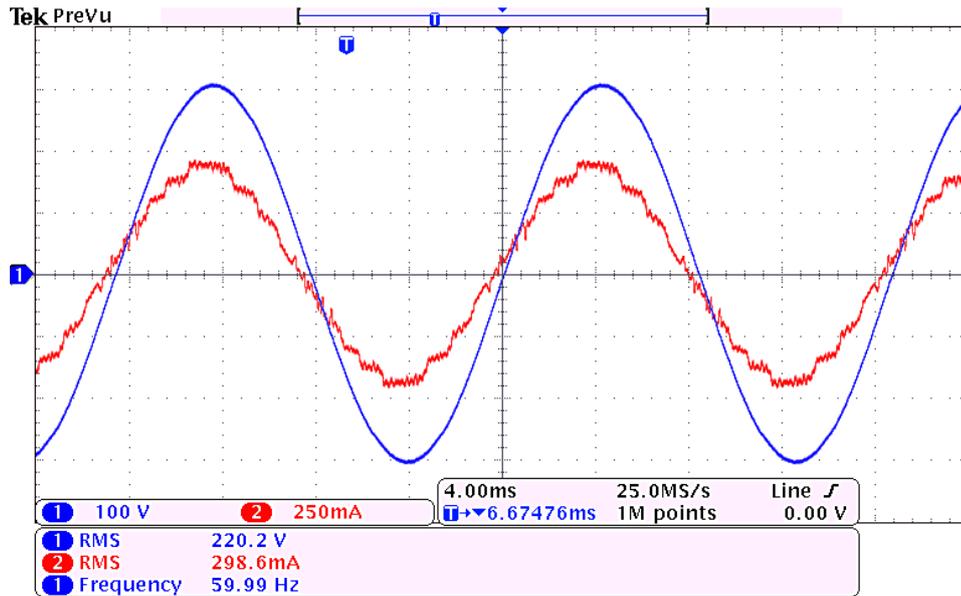


Figura 55. Tensão (CH1 - 100V/div) e corrente (CH2 - 250 mA/div) de entrada. Escala de tempo : 4 ms/div.

A Figura 56 mostra o conteúdo harmônico da corrente de entrada do conversor Cúk, bem como os limites impostos pela norma IEC 61000-3-2. Pode-se ver que as características de entrada do conversor atendem esta norma, já que as amplitudes das componentes harmônicas da corrente de entrada do conversor são menores do que os limites estabelecidos na normatização europeia.

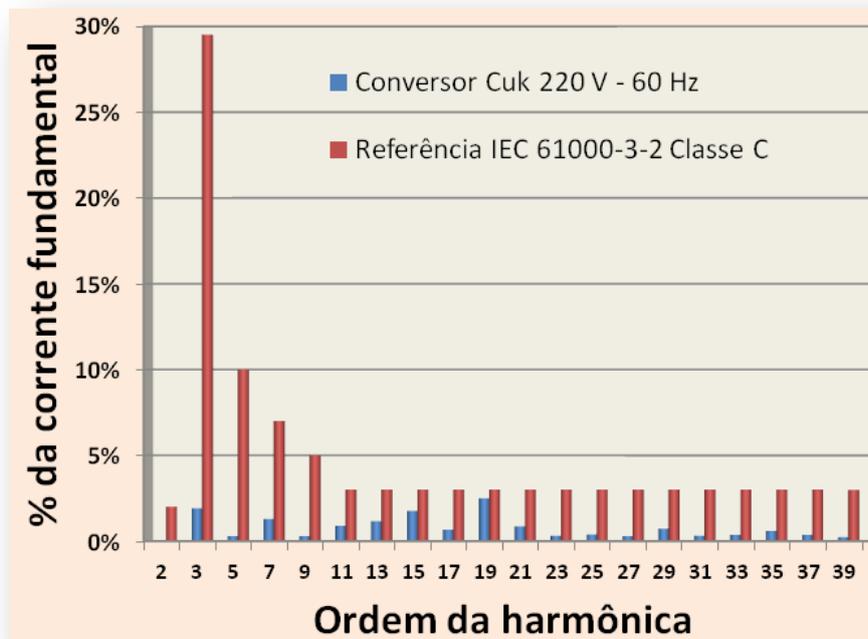


Figura 56. Comparação do conteúdo harmônico do conversor proposto e os limites impostos pela norma IEC 6100-3-2.

A Figura 57 mostra a tensão e a corrente de saída do conversor Ćuk, pode-se notar que o *ripple* de corrente de 195 mA visto na figura é muito próximo ao calculado (i.e. 201 mA). A tensão de saída também se apresenta de forma semelhante à estimada na abordagem teórica. As pequenas diferenças apresentadas ocorrem devido às imperfeições dos componentes, não levadas em consideração na análise feita. Contudo, mesmo sendo feitas estas simplificações, o resultado da abordagem apresentada no trabalho é satisfatório.

As formas de onda de corrente nos indutores estão representadas nas Figuras Figura 58 e Figura 59. Em ambas as imagens, a forma de onda de corrente em baixa frequência é mostrada na parte superior, já na parte inferior da figura, é feita uma ampliação próxima ao pico da tensão da rede, para que sejam mostradas as características de alta frequência. Analisando as formas de onda dos indutores é possível observar três estágios de operação, caracterizando o modo de condução descontínuo (DCM). No primeiro estágio, ambos os indutores estão se carregando, no segundo estágio os mesmos se descarregam até que o diodo D pare de conduzir e os indutores passam a ter uma corrente de mesmo módulo, mas sentidos contrários. Note que, diferentemente de alguns outros conversores (e.g Buck, Boost e Buck-boost), a operação no modo descontínuo não é caracterizada pelo momento em que a corrente nos indutores assumem valores nulos.

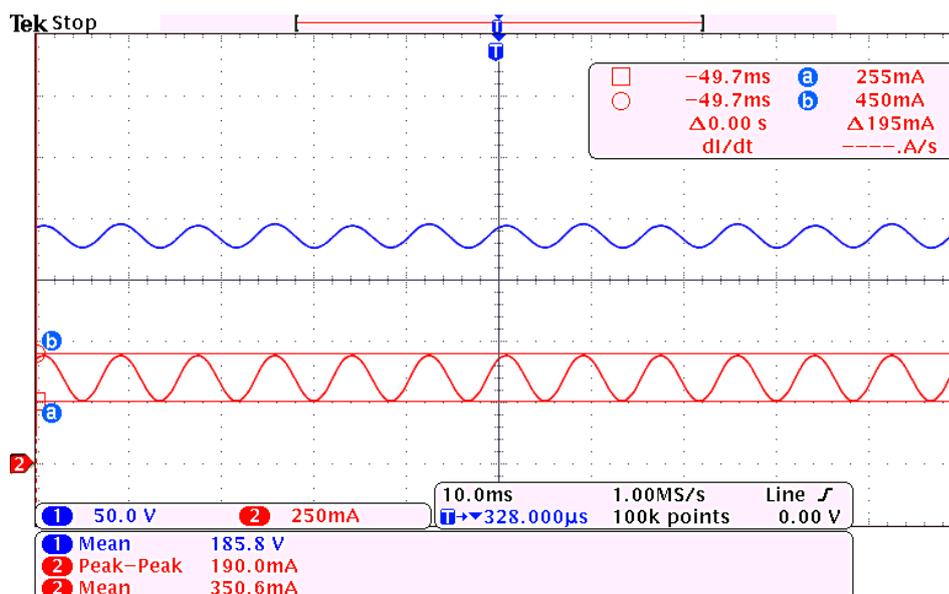


Figura 57. Tensão (CH1 - 50V/div) e corrente (CH2 - 250 mA/div) de saída. Escala de tempo: 10 ms/div.

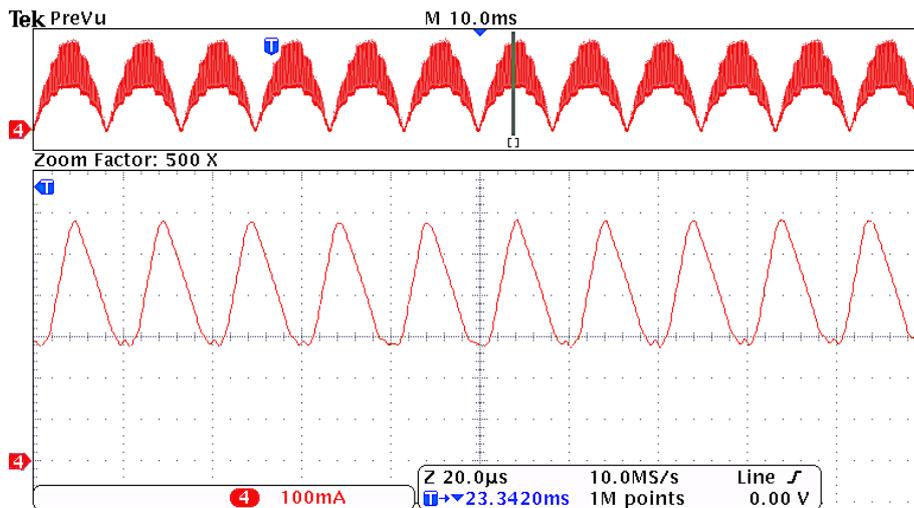


Figura 58. Forma de onda da corrente no indutor  $L_1$  (100 mA/div). Escala de tempo: 20  $\mu$ s/div.

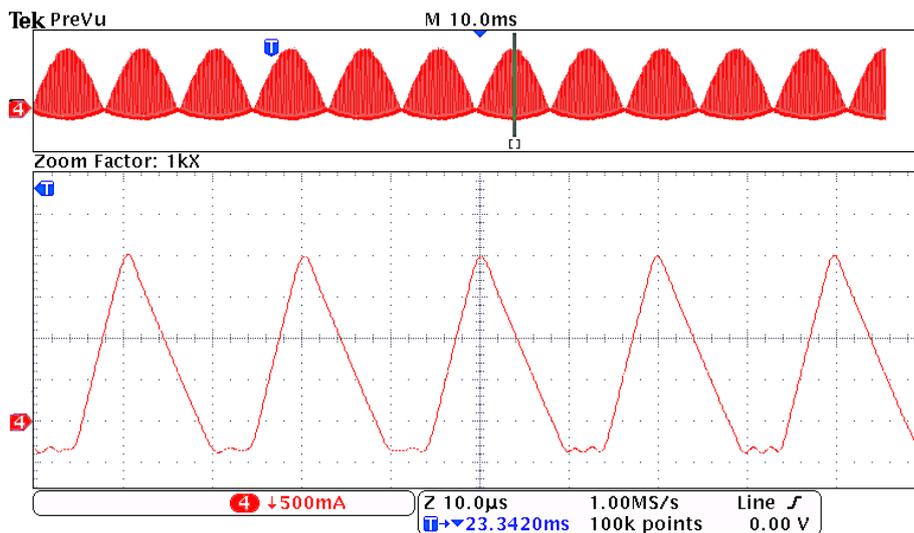


Figura 59. Forma de onda da corrente no indutor  $L_2$  (500 mA/div). Escala de tempo: 10  $\mu$ s/div.

As formas de onda de tensão e corrente no MOSFET podem ser vistas na Figura 60. Novamente é possível notar uma ressonância devido a elementos parasitas do circuito. É importante ressaltar que, mesmo possuindo mais esforços de corrente nas chaves semicondutoras devido ao modo de operação DCM, o MOSFET possui baixas perdas no ligamento, pois a corrente neste componente possui valor mínimo neste instante, como pode ser observado na Figura 60. Esta característica reduz parte das perdas de comutação, podendo aumentar a eficiência do conversor.

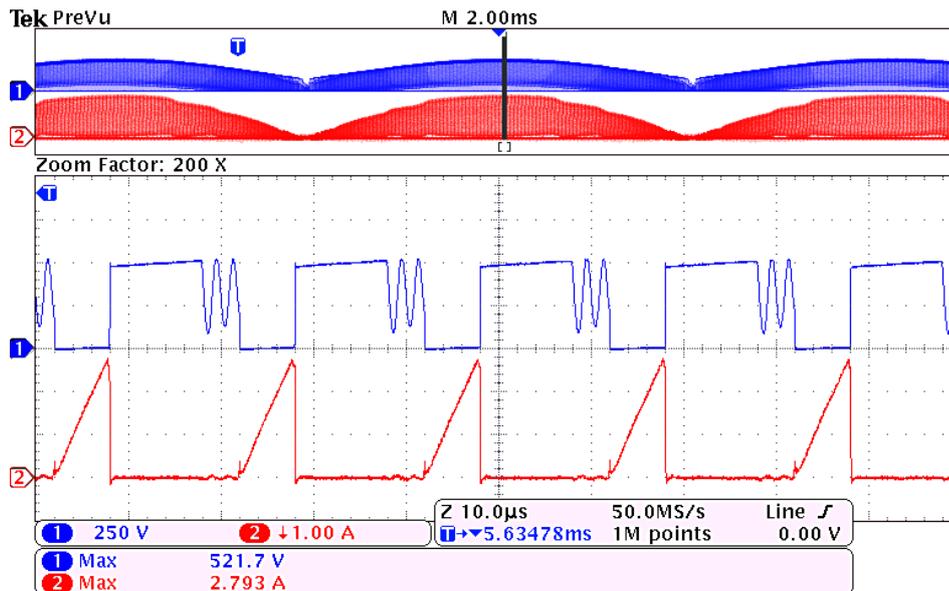


Figura 60. Tensão(CH1 - 250V/div) e corrente (CH2 - 1A/div) no MOSFET. Escala de tempo: 10 µs/div.

A Figura 61 mostra o protótipo do conversor em funcionamento. Pode-se ver na figura que o wattímetro indica 94,95% de eficiência, mostrando o excelente desempenho da topologia proposta.

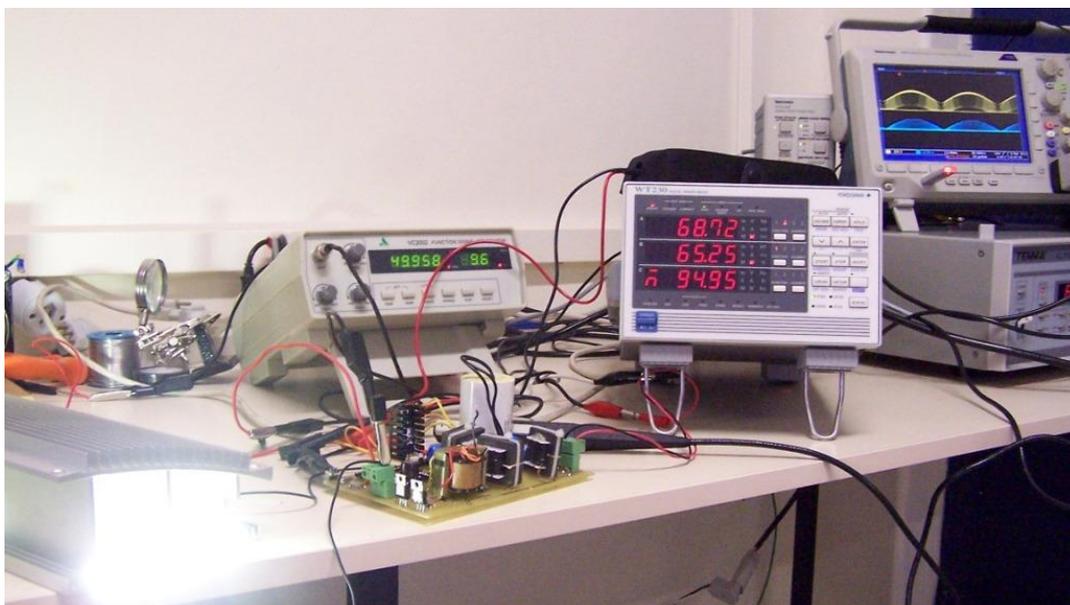


Figura 61. Protótipo em funcionamento

Os principais resultados experimentais são resumidos na Tabela 18. Verifica-se que todas as características desejáveis para uma luminária para LEDs foram atingidas.

Tabela 18. Resultados experimentais

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor obtido no experimento</b>	<b>Valor desejado</b>
<b>Potência de entrada</b>	68,72 W	-
<b>Potência de saída</b>	65,25 W	-
<b>Eficiência</b>	94,95 %	> 85%
<b>Fator de potência</b>	0,984	> 0,92
<b>THD</b>	4,7 %	< 32% <sup>1</sup>
<b>Corrente média na saída</b>	350,6 mA	350 mA
<b>Ripple de corrente na saída</b>	195 mA	< 201 mA

## 6.5. CONCLUSÃO PARCIAL

Neste capítulo foi apresentada a solução do autor para o acionamento de LEDs em iluminação pública. Foi mostrado que esta solução, baseada no conversor *Cúk* operando no modo descontínuo de condução, atende aos pré-requisitos tanto do ponto de vista da carga, pois consegue fornecer corrente controlada e com um *ripple* aceitável para os LEDs, quanto do ponto de vista da fonte, pois possui elevado fator de potência e baixo THD.

As análises teóricas desenvolvidas no capítulo se mostraram satisfatórias e puderam ser comprovadas através de simulação e dos resultados experimentais. A metodologia de projeto, baseada no desempenho fotométrico dos LEDs, mostra-se interessante, pois é possível avaliar as características da carga e por sua vez projetar um conversor que atenda de forma satisfatória não só os parâmetros elétricos da mesma, mas como também a principal variável de saída do sistema: o fluxo luminoso resultante do arranjo de LEDs. Esta metodologia possibilitou também o uso de capacitores de filme ao invés dos tradicionais capacitores eletrolíticos, aumentando confiabilidade e vida útil do sistema.

<sup>1</sup> Cálculo feito através da IEC 6100-3-2 baseado num dispositivo com fator de potência igual a 0,92.

É possível ainda fazer uma breve análise de custo do conversor. O mesmo se mostra muito atrativo economicamente, pois emprega um único estágio de conversão para corrigir o fator de potência, bem como controlar a corrente na carga. Isto faz com que a topologia proposta possua um número reduzido de componentes e com isso o custo é bem reduzido. Além disso, mesmo utilizando componentes sem características especiais (e.g. 10N60, MUR 160), altos níveis de eficiência do conversor foram obtidos.

## 7. CONCLUSÃO

Este trabalho propôs um conversor eletrônico para o acionamento de LEDs em iluminação pública baseado na topologia  $\acute{C}uk$ . Foi feito um estudo minucioso de todas as peculiaridades da tecnologia LED, bem como uma análise de sua aplicação em iluminação.

Foram mostrados estudos acerca da atratividade econômica dos sistemas de iluminação em estado sólido, bem como a importância do conversor para o sucesso da tecnologia.

Uma análise sobre o desempenho fotométrico dos LEDs, bem como uma avaliação das correlações existentes entre as variáveis elétricas e luminotécnicas destes dispositivos foram feitas a fim de se criar uma base para a metodologia de projeto do conversor proposto. A partir dos estudos fotométricos, foi verificado que os LEDs possuem uma queda na eficiência quando acionados em correntes com valores elevados. Foi verificado ainda que os diodos emissores de luz podem operar com elevados ripples de corrente sem que ocorra uma degradação significativa no fluxo luminoso emitido pelo dispositivo.

Foram abordadas também questões sobre qualidade de energia. Uma avaliação acerca desta questão em luminárias LED comerciais foi feita a fim de se verificar a poluição harmônica gerada por estes equipamentos. Foi possível ver que grande parte dos fabricantes já possuem uma preocupação com qualidade de energia. Foram também analisadas questões sobre a oscilação de tensão nas redes de distribuição, para que então fosse definida a faixa de variação da tensão de entrada que o driver deveria suportar.

Algumas topologias para acionamento de LEDs foram apresentadas. Foi mostrado que o conversor  $\acute{C}uk$  operando em DCM possuía excelentes características para a aplicação, pois seria possível atender todas as premissas do projeto com esta topologia.

Foi então mostrado o desenvolvimento teórico para o conversor  $\acute{C}uk$  operando em DCM como driver de LEDs. Juntamente com a análise desenvolvida no capítulo 3, foi criada uma metodologia de projeto para o conversor  $\acute{C}uk$  que eliminava o uso de capacitores eletrolíticos no circuito do mesmo, atendendo

também aos parâmetros de entrada e de saída do driver, especificados ao longo do trabalho.

Um protótipo de 65 W foi construído a fim de validar o desenvolvimento teórico proposto. Foi possível verificar que todas as equações propostas foram validadas e uma eficiência de 95% foi atingida, mostrando que a escolha topológica foi bem sucedida.

Para trabalhos futuros, pretende-se fazer a modelagem dinâmica da topologia, bem como implementar o controle em malha fechada do conversor, para que assim o mesmo possa funcionar de forma adequada perante a variações na tensão de entrada e na carga. Pretende-se ainda analisar outras normatizações aplicáveis a drivers para LED, bem como uma análise de desempenho do conversor diante de variações de umidade e temperatura.

## **PRODUÇÃO CIENTÍFICA RESULTANTE DESTE TRABALHO**

### **Artigos publicados em conferências internacionais:**

ALMEIDA, P. S. ; BRAGA, H. A. C. ; JORGE, J. M. ; SOARES, G. M. ; RODRIGUES, C. R. B. S. ; PINTO, D. P. . **An Experimental Comparison Between Different Technologies Arising for Public Lighting: LED Luminaires Replacing High Pressure Sodium Lamps**. In: Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on, 2011, Gdansk. ISIE2011, 2011. p. 141-146.

RODRIGUES, C. R. B. S. ; ALMEIDA, P. S. ; SOARES, G. M. ; JORGE, J. M. ; BRAGA, H. A. C. ; PINTO, D. P. . **Um estudo comparativo de sistemas de iluminação pública: Estado sólido e lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão**. In: International Conference on Industry Applications, 2010, São Paulo. IEEE/IAS 9th INDUSCON, 2010.

ALMEIDA, P. S. ; BRAGA, H. A. C. ; JORGE, J. M. ; SOARES, G. M. ; RODRIGUES, C. R. B. S. ; PINTO, D. P. . **A Novel Method of Current Equalization in LED Strings Based on Simple Linear Circuit**. In: Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on, 2011, Gdansk. ISIE2011, 2011. p. 95-100

#### **Artigos publicados em conferências nacionais:**

SOARES, G. M. ; ALMEIDA, P. S. ; JORGE, J. M. ; RODRIGUES, C. R. B. S. ; BRAGA, H. A. C. ; PINTO, D. P. . **Power Quality Analysis of LED-Based Luminaires Employed on Street Lighting**. In: CBEE, 2011, Juiz de Fora. CBEE2011, 2011.

RODRIGUES, C. R. B. S. ; ALMEIDA, P. S. ; SOARES, G. M. ; JORGE, J. M. ; BRAGA, H. A. C. ; PINTO, D. P. . **Experimental Characterization Regarding Two Types Of Phosphor-converted White High-brightness LEDs**. In: COBEP, 2011, Natal. COBEP2011, 2011.

RODRIGUES, C. R. B. S. ; ALMEIDA, P. S. ; SOARES, G. M. ; JORGE, J. M. ; BRAGA, H. A. C. ; PINTO, D. P. . **Experimental Assessment of the Differences Between Low Power and High Power White PC-LEDs**. In: CBEE, 2011, Juiz de Fora. CBEE2011, 2011.

#### **Artigos aceitos para publicação em conferências internacionais:**

P. S. Almeida, G. M. Soares, H. A. C. Braga, D. P. Pinto, "**High Power Factor LED Driver Based on the Ćuk Converter**," Power Electronics South America, (in press), 2012

## REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 15415 : EXPOSIÇÃO A CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS DE 50 E 60 Hz.** [S.I.]. 2006.

ALI, M. et al. **A single stage SEPIC PFC converter for LED street lighting applications.** PECON. [S.I.]: [s.n.]. 2010.

ALMEIDA, ET. AL. **AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE PHOTOMETRICAL IMPACTS OF SEVERAL CURRENT WAVEFORMS ON POWER WHITE LEDS.** 11º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (COBEP). [S.I.]: [s.n.]. 2011c.

ALMEIDA, P. S. **Conversor Integrado SEPIC-Buck-Boost Aplicado ao Acionamento de LEDs de Potência em Iluminação Pública. Dissertação de Mestrado, Juiz de Fora, MG, Brasil, 2012.**

ALMEIDA, P. S. et al. **An Experimental Comparison Between Different Technologies Arising for Public Lighting: LED Luminaires Replacing High Pressure Sodium Lamps.** Industrial Electronics , IEEE International Symposium on. Gdansk: [s.n.]. 2011a. p. 141-146.

ALMEIDA, P. S. et al. **Iluminação pública eficiente empregando LEDs.** In: PINTO, D. P.; GOMES, F. J.; JOTA, F. G. **Anais do IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética.** Belo Horizonte: ABEE, 2011b. p. 1-28.

ALONSO, J. M. et al. **Analysis and Design of the Integrated Double Buck–Boost Converter as a High-Power-Factor Driver for Power-LED Lamps.** **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 59, n. 4, p. 1689 - 1697, 2012.

ANEEL. **Resolução nº 456: Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica Resolução 456.** [S.I.]. 2000.

ANEEL. **PRODIST: Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica.** [S.I.]. 2011.

BRKOVIC, M. "Input Current Shaper Using Cuk Converter". **Proc. of INTELEC, Washington, USA**, p. pp. 532-539, 1992.

BRKOVIC, M.; CUK, S. **Input current shaper using Cuk converter.** 14th International Telecommunications Energy Conference, 1992. INTELEC '92. [S.I.]: [s.n.]. 1992. p. 532 - 539.

BUIATTI, G. M. et al. Condition Monitoring of Metallized Polypropylene Film Capacitors in Railway Power Trains. **Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on**, v. 58, n. 10, p. 3796- 3805, 2009.

CASAROTTO FILHO, N.; HARTMUT KOPITTKKE, B. **Análise de investimentos**. 7<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Atlas, 1996.

CHENG, C.-A. E. A. **A novel single-stage high power LEDs driver**. IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE). [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. 2733 - 2740.

CHUNG, H. S.-H. et al. Comparison of Dimmable Electromagnetic and Electronic Ballast Systems—An Assessment on Energy Efficiency and Lifetime. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, v. 54, n. 6, p. 3145- 3154 , 2007.

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

DE BRITTO, J. R. et al. **A proposal of Led Lamp Driver for universal input using Cuk converter**. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008.. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 2640 - 2644.

DE GUSSEME, K. et al. **Input current distortion of CCM boost PFC converters operated in DCM**. Power Electronics Specialist Conference, 2003. PESC '03. 2003 IEEE 34th Annual. [S.l.]: [s.n.]. 2003. p. 1685- 1690.

ELETROBRAS. Disponível em <http://www.eletrabras.com/elb/procel/main.asp#>. **Dados da iluminação Pública 2008**, 2008. Acesso em: Dezembro de 2010.

EVERLIGHT. "EHP-AX08EL GT01H-P01 High Power LED", Datasheet, 2009.

EVERLIGHT. "EHP-AX08EL/LM01H-P01 High Power LED", Datasheet, 2009.

GACIO, D. et al. **A Universal-Input Single-Stage High-Power-Factor Power Supply for HB-LEDs Based on Integrated Buck-Flyback Converter**. IEEE Transactions on Industrial Electronics. [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. 589 - 599.

HUI, S. Y. et al. A Novel Passive Offline LED Driver. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 19 Abril 2010. 2665 - 2672.

IEC. **IEC 61000-3-2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current < 16 A per phase)**. [S.l.]. 2005a.

IEC. **IEC 61000-3-3: Limits - Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current  $\leq 16$  A per phase and not subject to conditional connection.** [S.I.]. 2005b.

IEC. **IEC 61000-6-3 :Electromagnetic compatibility (EMC). Generic standards. Emission standard for residential, commercial and light-industrial environments.** [S.I.]. 2007.

JONES, B. F. **The influence of spectral energy distribution of light sources on visual performance.** Industry Applications Society Annual Meeting, 1989., Conference Record of the 1989 IEEE. [S.I.]: [s.n.]. 1989. p. 2394- 2399 vol.2.

KRAMES, M. R. et al. Status and future of high-power. **IEEE Journal of Display, vol. 3,** Junho 2007. 160-175.

KROEMER, H. A proposed class of heterojunction injection lasers. **Proc. IEEE, vol. 51,** Dez 1963. 1782–1783.

LEDMAN, O. "Model No. LL1503SEWW1-301, Doc. No. LMS-15-148", Datasheet, 2005.

LEE, B.; KIM, H.; RIM, C. Robust Passive LED Driver Compatible With Conventional Rapid-Start Ballast. **IEEE Transactions on Power Electronics,** 26, 2011.

LI, F. et al. **LEDs: A Promising Energy-Saving Light Source for Road Lighting.** Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific. [S.I.]: [s.n.]. 2009. p. 1-3.

MARCHESAN, T. B. Integração de Conversores Estáticos Aplicados a Sistemas de iluminação Pública. **Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Maria(UFSM),** Santa Maria, RS, 2007.

OSRAM.

[http://www.osram.com.br/osram\\_br/Ferramentas\\_%26\\_Catlogos/Downloads/Iluminacao\\_Geral/Catalogo\\_Geral\\_2011-2012/index.html](http://www.osram.com.br/osram_br/Ferramentas_%26_Catlogos/Downloads/Iluminacao_Geral/Catalogo_Geral_2011-2012/index.html). **Catálogo Geral 2011-2012 - Lâmpadas de Descarga em Alta Pressão,** 2011. Acesso em: Junho 2012.

OSRAM, O. S. "LCW W5PM Golden Dragon Oval Plus", Datasheet, 2010a.

OSRAM, O. S. "LUW W5PM Golden Dragon Oval Plus", Datasheet, 2010b.

PECK, J.; ASHBURNER, G.; SCHRATZ, M. **Solid state led lighting technology for hazardous environments; lowering total cost of ownership while**

**improving safety, quality of light and reliability.** Petroleum and Chemical Industry Conference Europe Conference Proceedings (PCIC EUROPE), 2011. [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. 1-8.

PHILIPS, L. "Luxeon III Emitter", Datasheet, 2006.

PINTO, R. A. Projeto e Implementação de Sistemas de Iluminação Empregando LEDs de Alta Intensidade. **Dissertação de Mestrado, Santa Maria, RS, Brasil**, 2008.

POLONSKII, M.; SEIDEL, Á. R. **Reatores Eletrônicos para Iluminação Fluorescente**. 1. ed. Ijuí: Editora Unijuí, 2008.

RANGANATHAN, G.; UMANAND, L. **Power factor improvement using DCM Cuk converter with coupled inductor**. IEE Proceedings -Electric Power Applications. [S.l.]: [s.n.]. 1999. p. 231 - 236 vol. 146 , 2ª Edição.

RODRIGUES, ET. AL. **Experimental Characterization Regarding Two Types Of Phosphor-converted White High-brightness LEDs: Low Power And High Power Devices**. Proc. of 11th COBEP. Natal: [s.n.]. 2011.

RODRIGUEZ, C.; AMARATUNGA, G. A. J. Long-Lifetime Power Inverter for Photovoltaic. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 55, Julho 2008.

ROSSETTO, L.; TENTI, P.; ZUCCATO, A. Electromagnetic Compatibility Issues in Industrial Equipments. **IEEE Industry Applications Magazine**, 1999.

SCHREUDER, D. **Outdoor Lighting: Physics, Vision and Perception**. 1. ed. Leidschendam: Springer, 2008. 447 p.

SCHUBERT, E. F. **Light-Emitting Diodes**. [S.l.]: Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

SHUR, M. S.; ZUKAUSKAS, R. Solid-State Lighting: Toward Superior Illumination. **IEEE Journals** , vol. 93 , Issue: 10 , 2005. 1691 - 1703.

SIMONETTI, D. S. L.; SEBASTIAN, J.; UCEDA, J. The discontinuous conduction mode Sepic and Cuk power factor preregulators: analysis and design. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 44, n. 5, p. 630 - 637, 1997.

SOARES, G. M. et al. **Power quality of LED-based luminaires employed on street lighting**. IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética. [S.l.]: [s.n.]. 2011.

SUNLED. "XZCW10X106W Apollo ", Datasheet, 2008.

WEI, H.; BATARSEH, I. **Comparison of basic converter topologies for power factor correction**. IEEE Southeastcon '98. Proceedings. [S.l.]: [s.n.]. 1998. p. 348 - 353.

WENRUN, O. "Specifications for Standard LED Lamps - LUW503F43", Datasheet, 2006.

WINDER, S. **Power Supplies for LED Driving, 1 ed, Elsevier**. [S.l.]: [s.n.], 2008.