

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

Maicol Flores de Melo

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA LÂMPADA LED BULBO
EM CONFORMIDADE COM ASPECTOS ELÉTRICOS, TÉRMICOS E
ÓPTICOS EXIGIDOS PELAS NORMATIVAS BRASILEIRAS**

Santa Maria, RS
2018

Maicol Flores de Melo

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA LÂMPADA LED BULBO EM
CONFORMIDADE COM ASPECTOS ELÉTRICOS, TÉRMICOS E ÓPTICOS
EXIGIDOS PELAS NORMATIVAS BRASILEIRAS**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção de grau de **Doutor em Engenharia Elétrica.**

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio Dalla Costa
Coorientador: Prof. Dr. José Marcos Alonso Álvarez

Santa Maria, RS
2018

Melo, Maicol Flores de

Projeto e implementação de uma lâmpada LED bulbo em conformidade com aspectos elétricos, térmicos e ópticos exigidos pelas normativas brasileiras / Maicol Flores de Melo.- 2018.

122 p.; 30 cm

Orientador: Marco Antônio Dalla Costa

Coorientador: José Marcos Alonso Álvarez

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2018

1. Conversores ressonantes 2. Lâmpada LED bulbo 3. Teoria fotoeletrotérmica I. Dalla Costa, Marco Antônio II. , José Marcos Alonso Álvarez III. Título.

Maicol Flores de Melo

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA LÂMPADA LED BULBO EM
CONFORMIDADE COM ASPECTOS ELÉTRICOS, TÉRMICOS E ÓPTICOS
EXIGIDOS PELAS NORMATIVAS BRASILEIRAS**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção de grau de **Doutor em Engenharia Elétrica.**

Aprovado em 31 de Agosto de 2018:

Marco Antônio Dalla Costa, Dr. (UFSM)
Presidente/Orientador

José Marcos Alonso Álvarez, Dr. (UNIOVI/Espanha)
(Coorientador)

Edilson Mineiro Sá Jr., Dr. (IFCE) (videoconferência)

Fábio Ecke Bisogno, Dr. (UFSM)

Pedro Santos Almeida, Dr. (UFJF) (videoconferência)

Vitor Cristiano Bender, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2018

Aos meus pais Clóvis e Mariseti.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Clóvis Silva de Melo e Mariseti Flores de Melo por todos os esforços realizados para propiciar meu crescimento pessoal e profissional.

Ao professor Marco Antônio Dalla Costa pela orientação, conhecimentos transmitidos e amizade desde meu ingresso em meio científico.

Ao professor José Marcos Alonso Álvarez pela coorientação durante a realização do trabalho.

Aos colegas de grupo de pesquisa Jean Santis Brand, Leandro Chies, Rudimar Spanemberg Junior e William Dotto Vizzotto pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho.

À família GEDRE pelo acolhimento, apoio, troca de conhecimentos e amizades construídas ao longo desses anos.

Ao Grupo de Sistemas Elétricos e Computacionais (GSEC) e seus integrantes pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

Aos membros da banca examinadora por contribuírem com seus conhecimentos na melhoria deste trabalho.

À todas as pessoas e amigos que de alguma forma contribuíram em minha formação pessoal e profissional.

Aos órgãos de fomento CAPES e CNPQ pelo incentivo à pesquisa.

“Tenha compromisso, seja honesto
Trabalhador
Justo e agradecido
E quanto mais longe for
Mais se lembre de onde tenha saído
Por mais que tenha vencido
Nunca cruze por cima
De quem tivesse caído
Pois mais vale um homem desarmado
Do que uma arma sem homem
Mais vale um pobre coitado
Do que um coitado de alma pobre.”

Mano Lima

RESUMO

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA LÂMPADA LED BULBO EM CONFORMIDADE COM ASPECTOS ELÉTRICOS, TÉRMICOS E ÓPTICOS EXIGIDOS PELAS NORMATIVAS BRASILEIRAS

AUTOR: Maicol Flores de Melo

ORIENTADOR: Marco Antônio Dalla Costa

COORIENTADOR: José Marcos Alonso Álvarez

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma lâmpada LED bulbo para substituição das tecnologias mais tradicionais em iluminação, como a lâmpada incandescente e a lâmpada fluorescente compacta. Os requisitos necessários para comercialização das lâmpadas LED baseados na portaria nº 389 do INMETRO e nos selos voluntários Procel e Energy Star são apresentados. Uma revisão a respeito da situação atual dos sistemas de iluminação à base de LEDs e uma projeção para os próximos anos envolvendo esses sistemas é apresentada. A abordagem inicial para o desenvolvimento da lâmpada é realizada considerando o projeto térmico, elétrico e óptico, também conhecida como teoria fotoeletrotérmica. Vale ressaltar que essa metodologia é amplamente utilizada na literatura, no entanto, a mesma exige a realização de testes experimentais em equipamentos de elevado custo. Como contribuição, pode-se ressaltar a apresentação de uma metodologia sem a necessidade de testes experimentais, realizando a mesma com base apenas nos dados contidos na folha de dados dos LEDs. Com a realização do projeto fotoeletrotérmico obtém-se as especificações desejadas para a lâmpada LED, sempre levando em consideração as normativas apresentadas. Como exemplo de características definidas com a realização da teoria fotoeletrotérmica estão eficácia luminosa, vida útil, fluxo luminoso total, entre outras. Além disso, é possível definir características que devem ser consideradas no desenvolvimento eletrônico da lâmpada, como quantidade de LEDs, corrente direta que deve ser utilizada para alimentação desses LEDs, potência elétrica necessária, entre outras. Assim, o projeto do sistema eletrônico, o qual deve ser simples, robusto, de longa vida útil, e reduzido volume, a fim de ser compatível com as características da lâmpada LED, pode ser realizado. Além da alimentação satisfatória dos LEDs, o foco dado ao sistema eletrônico nesse trabalho é em relação ao estágio de controle de potência. Esse estágio foi estudado dando-se ênfase na transmissão de ondulação em baixa frequência da tensão de barramento para a corrente nos LEDs, a fim de se possibilitar a redução da capacitância de barramento necessária e reduzindo os efeitos prejudiciais da ondulação de corrente nos LEDs, como riscos à saúde do observador e alimentação satisfatória dos LEDs. Para isso, o conversor série ressonante foi analisado e comparado com o conversor Buck, o qual é amplamente utilizado nos sistemas de iluminação residenciais e comerciais, operando em ambos os modos de operação. Testes experimentais em uma esfera integradora comprovam a viabilidade da metodologia fotoeletrotérmica proposta. Um protótipo do circuito de acionamento foi implementado, onde comprova-se o funcionamento satisfatório do mesmo para alimentação dos LEDs e uma característica positiva em relação a transmissão de ondulação por parte do ressonante, também comprovando a teoria proposta.

Palavras-chave: Conversor ressonante; Lâmpada LED bulbo; Regulamentações brasileiras; Teoria fotoeletrotérmica; Transmissão de ondulação em baixa frequência.

ABSTRACT

AN LED BULB LAMP DESIGN AND IMPLEMENTATION ACCORDING TO THE ELECTRICAL, THERMAL AND OPTICAL ASPECTS REQUIRED BY BRAZILIAN STANDARDS

AUTHOR: Maicol Flores de Melo
ADVISOR: Marco Antônio Dalla Costa
CO-ADVISOR: José Marcos Alonso Álvarez

This work presents an LED bulb lamp conception aiming to replace traditional lighting technologies such as incandescent and compact fluorescent lamps. The LED lamp manufacture and sale requirements based on INMETRO Ordinance 389 and Procel and Energy Star voluntary seals are initially presented. Moreover, the work shows the current state and a coming years projection involving LED-based lighting systems. Initial approach to an LED lamp design must consider thermal, electrical and optical aspects, also known as photoelectrothermal theory. The photoelectrothermal theory is widely discussed in the literature. However, these theories require high cost equipment to perform experimental tests. This way, it is possible to emphasize as a contribution that the proposed methodology avoid experimental tests, performing the system design based only on the LED datasheet information. The photoelectrothermal design enables to define the desired lighting system specifications, always taking into account the regulations presented. To exemplify the characteristics that can be defined during the photoelectrothermal design are luminous efficacy, useful life, total luminous flux, among others. In addition, it is possible to define electronic circuit characteristics, such as LEDs amount, LEDs forward current, electrical power and others. Thus, after the photoelectrothermal design the electronic system design can be performed, which should be simple, robust, present long useful life and reduced volume. Besides a satisfactory LEDs supply, this work presents a low frequency ripple transmission analysis from bus voltage to LED current considering the power control stage. Attenuate the low frequency ripple transmission reduces the necessary bus capacitance and mitigates the LED current ripple effects in the observer health. This way, resonant series converter is analyzed and a comparative study with the Buck converter, operating in both operation modes, is performed. Experimental tests in one integrating sphere prove the feasibility of the proposed photoelectrothermal methodology. A prototype of the electronic circuit was implemented, where it is proved the satisfactory LEDs supply behavior and a positive characteristic regarding the ripple transmission by the series resonant converter, proving the proposed theory.

Keywords: Brazilian standards; LED bulb lamp; Low frequency ripple transmission; Photoelectrothermal theory; Resonant Converter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Inter-relações entre as partes de uma lâmpada LED.....	27
Figura 2.1 – Características equivalentes entre as tecnologias de lâmpadas.....	32
Figura 2.2 – Perspectiva em relação a evolução da eficácia luminosa de luminárias LED.	34
Figura 2.3 - Impacto ambiental das tecnologias de lâmpadas encontradas no mercado.	35
Figura 2.4 - Projeção de economia de energia nos EUA com inserção dos LEDs.....	36
Figura 2.5 - Custo incremental de lâmpadas ao longo da operação de uma lâmpada LED.	38
Figura 2.6 - Projeções do custo das lâmpadas LED até o ano de 2020.	39
Figura 2.7 - Estrutura de uma lâmpada LED bulbo.....	39
Figura 3.1 - Etiqueta Nacional de Conservação de Energia para lâmpada LEDs.	44
Figura 3.2 – Selo PROCEL e sua etiqueta de eficiência energética.	45
Figura 3.3 – Selo do programa Energy Star	47
Figura 3.4 - Fluxo luminoso e potência equivalente entre diferentes tecnologias de lâmpadas	49
Figura 3.5 - Lâmpada não direcional ou Omnidirecional.....	49
Figura 3.6 – Manutenção mínima de fluxo luminoso para determinação da vida útil	51
Figura 4.1 – Circuito eletrotérmico em regime permanente de um sistema a LED.	57
Figura 4.2 – Aproximação de ϕ_v em função de I_f para o LED Luxeon 3535L.....	60
Figura 4.3 – Aproximação de V_f em função de I_f para o LED Luxeon 3535L.....	60
Figura 4.4 - Variação da eficácia de referência (E_0) para o LED Luxeon 3535L.	61
Figura 4.5 – Aproximação do distribuição espectral de potência por funções gaussianas considerando $T_a = 25\text{ }^\circ\text{C}$ e visão fotópica ($V(\lambda)$).....	63
Figura 4.6 - Comparação entre fluxo luminoso teórico e medido para uma lâmpada LED.	66
Figura 4.7 - Variação das especificações R_{hs} , E e T_J em função de I_f (LED Luxeon 3535L). .	68
Figura 4.8 - Fluxograma de projeto	68
Figura 4.9 - Projeto de lâmpada proposta.....	70
Figura 4.10 – Possíveis valores de eficácia luminosa, corrente direta e número de LEDs.	70
Figura 4.11 – Possíveis valores de temperatura de junção, corrente direta e número de LEDs.	71
Figura 4.12 - Fluxo luminoso teórico e experimental em função da corrente na lâmpada	72
Figura 4.13 - Imagem termográfica dos LEDs para uma corrente de 94 mA.	72
Figura 5.1 - Estrutura básica de um circuito para acionamento de LEDs.	75
Figura 5.2 – Níveis de risco da ondulação de corrente ao observador.	78

Figura 5.3 - Conversor Série Ressonante.....	81
Figura 5.4 - Comportamento da resistência e das reatâncias com a variação da frequência. .	82
Figura 5.5 - Resposta em frequência do filtro LC série: (a) impedância e (b) potência.	82
Figura 5.6 – Metodologia de projeto (a) tradicional e (b) proposta para o filtro ressonante. ...	84
Figura 5.7 – Simplificação do CSR	84
Figura 5.8 – Circuito simplificado para análise matemática da transmissão da ondulação....	85
Figura 5.9 - Formas de onda do CSR.....	87
Figura 5.10 - Ondulação teórica de corrente para $\Delta V_B(\%) = 10\%$ em função de f_s e V_B	88
Figura 5.11 – Ondulação teórica de corrente para $\Delta V_B(\%) = 30\%$ em função de f_s e V_B	88
Figura 5.12 - Fator de transmissão da ondulação no CSR em função de f_s e V_B	89
Figura 5.13 – Espectro da tensão de entrada do circuito tanque.....	90
Figura 5.14 - Resultados experimentais vs. teóricos para (a) $\Delta V_B = 10\%$ e (b) $\Delta V_B = 30\%$...	92
Figura 5.15 – Resultado experimental para o filtro 2 e $\Delta V_B(\%) = 30\%$: $V_B = 89,4$ V (25V/div); $I_{LED} = 354$ mA (200mA/div); tempo (10ms/div).....	94
Figura 5.16 - Resultado experimental para o filtro 2 e $\Delta V_B(\%) = 30\%$: $V_B = 160,3$ V (25V/div); $I_{LED} = 352,5$ mA (100mA/div); tempo (10ms/div).....	94
Figura 5.17 - Conversor Buck.....	95
Figura 5.18 – Comportamento da ondulação de corrente e do FT para o conversor Buck CCM.	97
Figura 5.19 - Comportamento da ondulação de corrente e do FT para o conversor Buck DCM	99
Figura 5.20 – FT para o Buck CCM	101
Figura 5.21 – FT para o Buck DCM	101
Figura 5.22 – FT para o CSR	102
Figura 5.23 - Mínimo $\Delta I_{LED}(\%)$ em função de $\Delta V_B(\%)$ para o CSR e o conversor Buck....	103
Figura 5.24 - Lâmpada utilizada nos testes experimentais	104
Figura 5.25 - Protótipo do conversor Buck.....	104
Figura 5.26 – Curva teórica e resultados experimentais e de simulação para o Buck DCM.	105
Figura 5.27 - Resultado experimental - Buck DCM ($V_B = 200$ V) (a) $\Delta V_B = 5\%$; (b) $V_B = 10\%$	106
Figura 5.28 - Resultado experimental - Buck DCM ($V_B = 300$ V) (a) $\Delta V_B = 5\%$; (b) $\Delta V_B = 10\%$	106
Figura 5.29 - Resultado experimental - Buck DCM ($V_B = 400$ V) (a) $\Delta V_B = 5\%$; (b) $\Delta V_B = 10\%$	106

Figura 5.30 – Protótipo do CSR	107
Figura 5.31 - Curva teórica e pontos obtidos experimentalmente para o CSR.	108
Figura 5.32 - Resultado experimental - CSR ($V_B = 300\text{ V}$) (a) $\Delta V_B = 5\%$; (b) $\Delta V_B = 10\%$..	108
Figura 5.33 - Resultado experimental - CSR ($V_B = 350\text{ V}$) (a) $\Delta V_B = 5\%$; (b) $\Delta V_B = 10\%$..	108
Figura 5.34 - Resultado experimental - CSR ($V_B = 400\text{ V}$) (a) $\Delta V_B = 5\%$; (b) $\Delta V_B = 10\%$..	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Quadro resumo dos requisitos para a lâmpada LED bulbo	52
Tabela 4.1 - Parâmetros PET	58
Tabela 4.2 - Parâmetros obtidos para o LED Luxeon 3535L	65
Tabela 4.3 - Comparação entre especificações medidas e calculadas	72
Tabela 5.1 - Característica da lâmpada utilizada para validação da metodologia proposta.	87
Tabela 5.2 - Filtros ressonantes utilizados para validação da metodologia proposta.....	88
Tabela 5.3 - Componentes utilizados nos testes experimentais.....	91
Tabela 5.4 – Comparação entre o ponto de operação teórico e prático.....	93
Tabela 5.5 - Parâmetros dos LEDs utilizados na análise de transmissão de ondulação.....	100
Tabela 5.6 - Parâmetros das lâmpadas LED utilizadas na análise de transmissão de ondulação.	100
Tabela 5.7 - Componentes utilizados no Buck DCM para realização dos testes experimentais.	105
Tabela 5.8 – Parâmetros utilizados em cada ponto de operação	105
Tabela 5.9 - Componentes utilizados no CSR para realização dos testes experimentais.....	107
Tabela 5.10 – Parâmetros utilizados em cada ponto de operação.	107

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	23
1 INTRODUÇÃO.....	25
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	25
1.2 MOTIVAÇÕES E JUSTIFICATIVA.....	26
1.3 OBJETIVOS.....	27
1.3.1 Objetivo geral	27
1.3.2 Objetivos específicos	28
1.4 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO.....	28
1.5 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	29
1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	29
2 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO E O DIODO EMISSOR DE LUZ.....	31
2.1 TECNOLOGIAS EM ILUMINAÇÃO.....	31
2.2 ILUMINAÇÃO DE ESTADO SÓLIDO.....	32
2.2.1 Perspectiva em relação a eficácia luminosa	33
2.2.2 Sustentabilidade ambiental	34
2.2.3 Potencial de economia de energia elétrica	36
2.2.4 Custo de uma lâmpada LED e projeção para os próximos anos	37
2.3 ESTRUTURA DA LÂMPADA LED BULBO.....	39
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO.....	41
3 REQUISITOS PARA UMA LÂMPADA LED BULBO.....	43
3.1 NORMAS, SELOS E RECOMENDAÇÕES.....	43
3.1.1 Portaria Nº 389 – INMETRO	43
3.1.2 PROCEL	45
3.1.3 Energy Star	46
3.2 RESUMO DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS.....	47
3.2.1 Fator de Potência	48
3.2.2 Potência equivalente e distribuição do fluxo luminoso	48
3.2.3 Eficácia luminosa	50
3.2.4 Manutenção luminosa e vida útil	50
3.2.5 Índice de reprodução de cores	52
3.2.6 Resumo dos requisitos	52
3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO.....	53
4 PROJETO ÓPTICO, ELÉTRICO E TÉRMICO DA LÂMPADA.....	55
4.1 ESTADO DA ARTE.....	55
4.2 TEORIA FOTOELETROTÉRMICA.....	56
4.2.1 Eficácia de Referência Variável	59
4.2.2 Estimativa do coeficiente k_h	61
4.2.3 Potência Elétrica Variável (P_{ld})	63
4.2.4 Dados Técnicos	64
4.2.5 Estimativa do Fluxo luminoso com E_0 variável	65
4.3 ESPECIFICAÇÕES DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO À BASE DE LEDS.....	66
4.3.1 Resumo da metodologia desenvolvida	68
4.4 EXEMPLO DE PROJETO.....	69
4.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	71
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO.....	73
5 SISTEMA ELETRÔNICO.....	75
5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS A RESPEITO DO SISTEMA ELETRÔNICO.....	75
5.2 ONDULAÇÃO DE CORRENTE EM BAIXA FREQUÊNCIA SOBRE OS LEDS.....	77

5.3	CONVERTOR SÉRIE RESSONANTE.....	80
5.3.1	Projeto do filtro ressonante	81
5.3.2	Análise da ondulação de corrente em baixa frequência	84
5.3.3	Comprovação da metodologia proposta	87
5.4	CONVERTOR BUCK.....	95
5.4.1	Conversor Buck em modo de condução contínua	95
5.4.2	Conversor Buck em modo de condução descontínua	97
5.5	ANÁLISE COMPARATIVA E INFLUÊNCIA DO MODELO DO LED.....	99
5.6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	103
5.6.1	Buck DCM	104
5.6.2	CSR	107
5.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO	109
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	111
6.1	CONCLUSÕES	111
6.2	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	113
6.3	PUBLICAÇÕES	113
6.3.1	Publicações relacionadas ao tema da tese:	113
6.3.2	Outras publicações:	114
6.4	OPORTUNIDADES DE TRABALHOS FUTUROS	115
	REFERÊNCIAS.....	117

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma visão inicial do trabalho, começando por uma contextualização dos sistemas de iluminação. Posteriormente, são apresentadas as motivações e justificativas do trabalho, assim como seus objetivos, contribuições e delimitações. Por fim, a organização do trabalho é apresentada.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O consumo de energia elétrica nos setores residencial e comercial compõe uma grande parcela da energia elétrica consumida mundialmente. Assim, esses setores apresentam um elevado potencial de economia de energia a ser explorado, desde que seja realizada a efficientização dos sistemas de iluminação. Uma estimativa da evolução das instalações de lâmpadas LED prevê que a implantação de LEDs crescerá rapidamente de menos de 5% em 2014 para mais de 30% em 2020 (P. SMALLWOOD, 2015). Até o ano de 2030 a tecnologia LED tem potencial para economizar nos Estados Unidos da América 261 TWh anualmente. Assumindo um cenário com projeções mais agressivas, a economia anual poderia aumentar para 395 TWh em 2030, a qual, no cenário Norte Americano, é aproximadamente 2 vezes a geração de energia eólica e 20 vezes a geração de energia solar considerando o ano de 2030 (DOE SSL PROGRAM, 2014).

No cenário nacional, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o setor residencial é responsável por aproximadamente 28,8% do consumo total de energia elétrica no Brasil, enquanto o setor comercial apresenta uma demanda de 19,1% do total dessa (EPE, 2017). Em relação aos sistemas de iluminação, os mesmos consomem cerca de 14% da energia elétrica no setor residencial (MORAIS, 2015), sendo que no setor de serviços essa taxa sobe para 20% (LOUÇANO, 2009). Dessa forma, devido a esse elevado montante de energia destinado aos sistemas de iluminação, a Associação Brasileira da Indústria de Iluminação (Abilux) apresentou em fevereiro de 2015 um conjunto de medidas para a redução do consumo de energia no Brasil. Essas medidas estão focadas na maior utilização e disseminação das lâmpadas LED, como substituição de pontos de iluminação pública por lâmpadas LEDs, redução da carga tributária para os produtos que utilizam LEDs, criação de linhas de financiamento para produtos e projetos de iluminação, entre outras.

Para uma melhor compreensão desse elevado montante de energia elétrica envolvido nos sistemas de iluminação e o vasto potencial de economia de energia basta analisarmos as características das lâmpadas incandescentes, utilizadas praticamente em todos os estabelecimentos residenciais e comerciais em um passado bastante recente. Essas lâmpadas não são sustentáveis, pois gastam mais energia, iluminam menos, e têm vida útil menor do que outras tecnologias atualmente utilizadas em iluminação. Sua substituição propicia uma menor produção de CO₂ devido à economia de energia elétrica e, portanto, reduz o efeito estufa e suas consequências. Nesta tecnologia uma parcela inferior a 10% da energia aplicada à lâmpada é convertida em luz, sendo os 90% restantes convertidos em calor. Devido a isso, essas lâmpadas foram gradativamente retiradas do mercado desde o ano de 2014. As lâmpadas incandescentes com potência acima de 75 W deixaram de ser fabricadas e comercializadas no ano de 2014. As lâmpadas mais utilizadas, com potência de 60W, deixaram o mercado no ano de 2015. Atualmente, nem mesmo as lâmpadas de 25 W estão disponíveis, cumprindo assim as exigências da portaria interministerial nº 1.007 de 2010 (DOU, 2010), que estabeleceu limites mínimos de eficácia das lâmpadas.

A partir de então intensificou-se a venda, utilização e pesquisas referente a Lâmpada Fluorescente Compacta (LFC) e a lâmpada LED (do inglês, *Light Emitting Diode*). Um novo patamar foi propiciado por essas novas tecnologias, melhorando drasticamente características como economia de energia, eficácia luminosa, vida útil, entre outras. Um comparativo mais detalhado dessas tecnologias será apresentado no próximo capítulo.

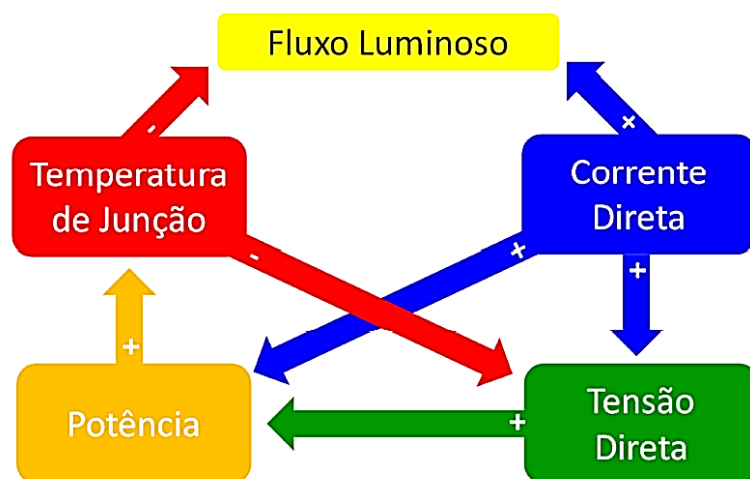
1.2 MOTIVAÇÕES E JUSTIFICATIVA

A evolução tecnológica está cada dia mais veloz, causando revoluções em diversas áreas e setores. Visto que toda quebra de paradigma, como costumeiramente acontece com a evolução tecnológica, traz consigo incertezas, muitas vezes se faz necessário estudos que propiciem um melhor entendimento dessas novas tecnologias, quais são suas vantagens, principais desafios, entre outros. Além disso, a constante busca por sistemas energeticamente mais eficientes e que apresentem menores impactos ambientais faz com que esses sistemas necessitem ser estudados e discutidos, a fim de que essa evolução ocorra de maneira eficaz e sustentável.

Nesse contexto de avanço tecnológico, efficientização energética, redução de impactos ambientais, entre outros, que os sistemas de iluminação à base de LEDs, mais especificamente os sistemas residenciais e comerciais que utilizam-se de lâmpadas bulbo, serão abordados

neste trabalho. Vale ressaltar que embora as lâmpadas LED apresentem diversos benefícios em relação a outras tecnologias de iluminação, para aproveitar-se desses benefícios um criterioso projeto deve ser realizado, considerando aspectos ópticos, térmicos e elétricos, além de suas inter-relações, conforme representado na Figura 1.1.

Figura 1.1 - Inter-relações entre as partes de uma lâmpada LED.



Fonte: BENDER (2012)

Como pode ser observado na Figura 1.1, o fluxo luminoso do LED é diretamente influenciado pela corrente direta do dispositivo. No entanto, uma maior corrente aumenta a potência aplicada no mesmo. Por sua vez, uma maior potência apresenta como consequência uma elevação na temperatura de junção do LED, acarretando assim em uma redução do fluxo luminoso total e na tensão direta. Tantas outras inter-relações ocorrem durante a operação de um sistema de iluminação à base de LEDs. Assim, essas relações foram citadas apenas para demonstrar a importância de uma modelagem completa do sistema para a realização de um projeto satisfatório, mantendo assim os benefícios proporcionados pelos LEDs no sistema como um todo, como elevada eficácia luminosa, longa vida útil, redução do consumo de energia, entre outros.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Como objetivo geral deste trabalho tem-se o desenvolvimento do projeto óptico, térmico e elétrico de uma lâmpada LED bulbo para utilização residencial e/ou comercial.

1.3.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos do trabalho pode-se citar:

- a) Revisar e apresentar as normas e requisitos necessários aos sistemas de iluminação compatíveis com aplicações residenciais e comerciais no Brasil;
- b) Apresentar e aplicar uma metodologia fotoeletrotérmica para projeto do sistema de iluminação à base de LEDs sem a necessidade de realização de testes experimentais;
- c) Realizar um estudo a respeito da transmissão da ondulação de baixa frequência da tensão de barramento para a corrente nos LEDs em estágios de controle de potência;
- d) Conceber uma lâmpada LED bulbo completa de acordo com as exigências ópticas, térmicas e elétricas apresentadas pelas normativas brasileiras e selos de qualidade de energia.

1.4 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

As principais contribuições desse trabalho são:

- Revisão bibliográfica a respeito da inserção dos LEDs nos sistemas de iluminação e as normas que regulamentam as lâmpadas LED bulbo no mercado nacional.
- Aplicação de uma metodologia de projeto elétrico, térmico e óptico para lâmpadas LED sem a necessidade de realização de testes experimentais.
- Análise do sistema eletrônico baseado na transferência de ondulação em baixa frequência da tensão de barramento para a corrente nos LEDs.
- Aplicação do conversor série ressonante para redução dessa transmissão de ondulação, possibilitando assim uma redução no valor das capacitâncias de barramento dos circuitos de acionamento aplicados a lâmpadas LEDs.
- Realização de um projeto completo, abordando a concepção de uma lâmpada LED bulbo considerando aspectos elétricos, térmicos e ópticos de maneira integrada.

1.5 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Neste trabalho não se tem como objetivo apresentar contribuições nos seguintes aspectos:

- No que diz respeito ao sistema eletrônico, o estágio de correção do fator de potência não é abordado, assim como sua possível integração com o estágio de controle de potência.

- O circuito eletrônico opera em malha aberta, não sendo propostas técnicas de controle para compensação da ondulação da corrente nos LEDs.

- Não são apresentados os requisitos completos das normativas para lâmpadas LED, apenas os que apresentam restrições aos aspectos abordados no trabalho. Dentre os requisitos não abordados podem ser citados os requisitos referentes à segurança, identificação visual, resistências mecânicas e compatibilidade eletromagnética.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para alcançar os objetivos apresentados, o presente trabalho está dividido em seis capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica que contextualiza os sistemas de iluminação e as tecnologias empregadas nesses sistemas. Também apresenta uma revisão sobre a inserção dos LEDs nesses sistemas, trazendo suas principais vantagens e uma perspectiva de futuro para os sistemas de iluminação empregando a tecnologia LED. As principais partes que compõem uma lâmpada LED bulbo é brevemente apresentada e discutida.

O Capítulo 3 apresenta as normas e selos de qualidade, assim como os requisitos que as lâmpadas LED bulbo para utilização residencial e comercial devem cumprir para serem comercializadas em território nacional.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia de projeto que inter-relaciona o projeto óptico, térmico e elétrico da lâmpada, a qual pode ser aplicada sem a necessidade de testes experimentais, visto que, conforme apresentado na literatura, esses testes exigem a utilização de equipamentos de elevado custo e tamanho, dificultando assim o projeto desses sistemas.

O Capítulo 5 apresenta o desenvolvimento e análise do sistema eletrônico, principalmente sob o ponto de vista de transmissão da ondulação de baixa frequência da tensão de barramento para a corrente nos LEDs, assim como os efeitos e limites dessa ondulação.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais, sintetizando as contribuições do trabalho, os resultados obtidos no desenvolvimento do mesmo, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO E O DIODO EMISSOR DE LUZ

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma visão geral sobre os sistemas de iluminação, dando ênfase aos sistemas de iluminação à base de LEDs para substituição das tecnologias mais tradicionais utilizadas em aplicações residenciais e comerciais. Os principais tópicos abordados são as tecnologias atuais utilizadas nesses sistemas, o motivo pelo qual algumas dessas tecnologias ficaram obsoletas, as características que tornam os LEDs comercialmente competitivos e uma abordagem geral sobre aspectos econômicos do investimento em lâmpadas LED. Por fim, é apresentada uma lâmpada LED completa com todos os componentes que a constituem e uma breve discussão sobre esses componentes.

2.1 TECNOLOGIAS EM ILUMINAÇÃO

Previamente, alguns motivos pelos quais as lâmpadas incandescentes foram abolidas do cenário nacional foram apresentados, tendo assim sua comercialização proibida nos últimos anos. Nesse cenário as LFCs, cuja tecnologia atual é bastante superior à incandescente, se consolidaram no mercado nacional. Enquanto as lâmpadas incandescentes apresentam uma vida útil de até 1.000 horas e uma eficácia luminosa em torno de 15 lm/W, as LFCs proporcionaram um salto de qualidade nos sistemas de iluminação, com vida útil em torno de 8.000 horas e eficácia luminosa de aproximadamente 65 lm/W, valores que representam os padrões comerciais atualmente (OSRAM, 2018; PHILIPS, 2018) .

A recente evolução dos LEDs evidencia alguns aspectos nos quais melhorias ainda são possíveis nos sistemas de iluminação e que tornam as LFCs substituíveis. Em relação aos padrões comerciais das lâmpadas LED bulbo, essas apresentam uma vida útil de 25.000 horas e eficácia luminosa que pode ultrapassar os 100 lm/W (INTRAL, 2018). Assim, em comparação com as lâmpadas LEDs, as LFCs apresentam uma menor eficácia luminosa, reduzida vida útil e são constituídas por metais pesados, como por exemplo o mercúrio, dificultando assim o seu descarte e até mesmo agregando custos para sua reciclagem. A Figura 2.1 apresenta um quadro comparativo das tecnologias de lâmpadas encontradas no mercado.

Figura 2.1 – Características equivalentes entre as tecnologias de lâmpadas



Fonte: adaptação de (VOLTALEDCENTER, 2018)

Como pode ser observado, a lâmpada LED atinge o mesmo fluxo luminoso com uma redução de aproximadamente 85% no consumo de energia em relação à lâmpada incandescente e de aproximadamente 40% em relação à LFC. Também é possível observar a quantidade de lâmpadas incandescentes e LFC a serem utilizadas durante a vida útil de uma lâmpada LED, evidenciando vantagens das lâmpadas LED em relação ao tempo de retorno do investimento e o impacto ambiental causado pelo descarte dessas lâmpadas. Essas características que fazem com que as lâmpadas LED apresentem diversos benefícios e se consolidem no mercado nacional são apresentadas e discutidas detalhadamente na próxima seção.

2.2 ILUMINAÇÃO DE ESTADO SÓLIDO

Os LEDs, desenvolvidos na década de 1960, são semicondutores que têm a propriedade de transformar energia elétrica em luz através do fenômeno da eletroluminescência. Ao contrário das lâmpadas convencionais, os LEDs não possuem filamentos, eletrodos ou tubos de descarga e se apresentam como componentes de dimensões reduzidas. Nos LEDs, a transformação de energia elétrica em luz é feita na matéria, estando essa em estado sólido, sendo, por isso, chamada de iluminação de estado sólido, ou ainda SSL (do inglês, *Solid State Lighting*).

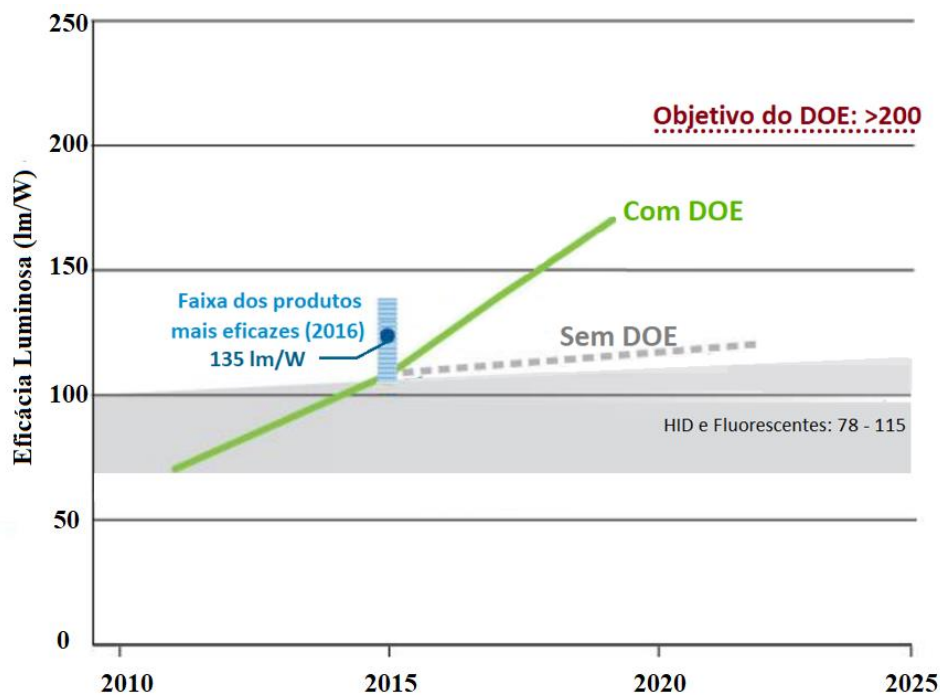
A iluminação de estado sólido sinaliza uma profunda mudança na forma como se utilizam os sistemas de iluminação, além de apresentar um enorme potencial para gerar significativa economia de energia. O aumento recorrente dos preços da energia elétrica, preocupações com alterações climáticas, sustentabilidade ambiental e desejo de auto-suficiência energética influenciam diretamente no mercado de iluminação, principalmente na busca por fontes de luz energeticamente mais eficientes. Assim, serão apresentados alguns estudos e características a respeito da iluminação de estado sólido que representam o quanto essa tecnologia está cada vez mais sustentável, eficaz e economicamente competitiva. Além disso, também são apresentadas projeções para o desenvolvimento desses sistemas nos próximos anos.

2.2.1 Perspectiva em relação a eficácia luminosa

Uma das principais características a ser considerada em tecnologias de iluminação é a eficácia luminosa das fontes de luz, a qual tem impacto no consumo de energia, no gerenciamento térmico, em questões ambientais, e em diversos outros aspectos. Eficácia luminosa é a razão entre o fluxo luminoso total emitido por uma lâmpada, o qual é medido em lúmens (lm), e a potência elétrica total, medida em watts (W), consumida pela mesma. Ou seja, a mesma pode ser definida como um indicador da eficiência no processo de emissão de luz visível sob o ponto de vista do aproveitamento energético. Por essa razão, é incessante a busca por fontes de luz mais eficazes, o que propicia uma redução no consumo de energia elétrica por esses sistemas.

De acordo com o Departamento de Energia dos Estados Unidos (do inglês, *United States Department of Energy - DOE*) os LEDs, atualmente, podem atingir eficácias de até 200 lm/W. Porém, esse índice ainda está acima dos resultados obtidos em condições operacionais, existindo uma significativa margem para melhorar a performance e custo desses sistemas (DOE SSL PROGRAM, 2015). O objetivo do DOE é que os sistemas à base de LEDs atinjam uma eficácia luminosa maior que 200 lm/W até 2020. Além disso, estima-se que esses sistemas possam apresentar eficácias de até 100 lm/W acima da eficácia máxima de outras tecnologias de iluminação existentes. Atualmente, o valor de eficácia máxima projetada para os LEDs está em torno de 250 lm/W a uma temperatura de 25°C (DOE SSL PROGRAM, 2015). A Figura 2.2 apresenta o cenário atual e uma perspectiva para a evolução da eficácia luminosa de luminárias LED de 2010 até 2025, além de um comparativo dessa evolução considerando cenários com ou sem o programa SSL do DOE (DOE SSL PROGRAM, 2017).

Figura 2.2 – Perspectiva em relação a evolução da eficácia luminosa de luminárias LED.



Fonte: adaptação de (DOE SSL PROGRAM, 2017)

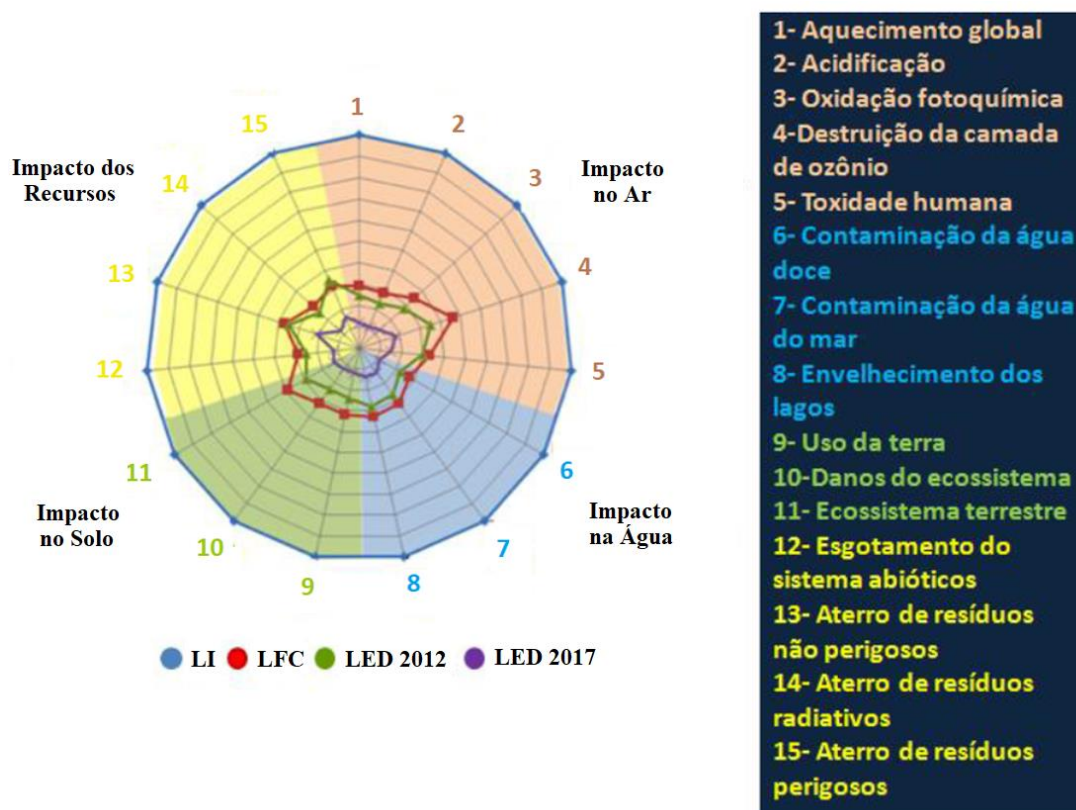
2.2.2 Sustentabilidade ambiental

Sustentabilidade é um termo usado para definir ações e atividades humanas que visam suprir as necessidades atuais dos seres humanos sem comprometer o futuro das próximas gerações. Ou seja, a sustentabilidade está diretamente relacionada ao desenvolvimento econômico e material sem agredir o meio ambiente, usando os recursos naturais de forma inteligente para que eles se mantenham no futuro. Portanto, quando o tema é iluminação sustentável, a primeira alternativa viável é obviamente um projeto com fontes eficientes de luz. A fonte de luz mais sustentável é a luz natural e seu aproveitamento em projetos arquitetônicos deve ser cuidadosamente analisado para minimizar a necessidade de fontes artificiais de iluminação.

Obviamente, a preocupação com o consumo energético das fontes de iluminação não pode ser depositada exclusivamente no consumo durante a operação desses sistemas. Essa preocupação deve começar com a energia utilizada desde a fabricação até o descarte das lâmpadas, ou seja, uma análise do impacto de todo o ciclo de vida da lâmpada. Assim, quinze medidas de impacto ambiental foram estudadas em (DOE SSL PROGRAM, 2012), resultando

em um comparativo entre as três tecnologias de iluminação residenciais mais utilizadas, conforme apresentado na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Impacto ambiental das tecnologias de lâmpadas encontradas no mercado.



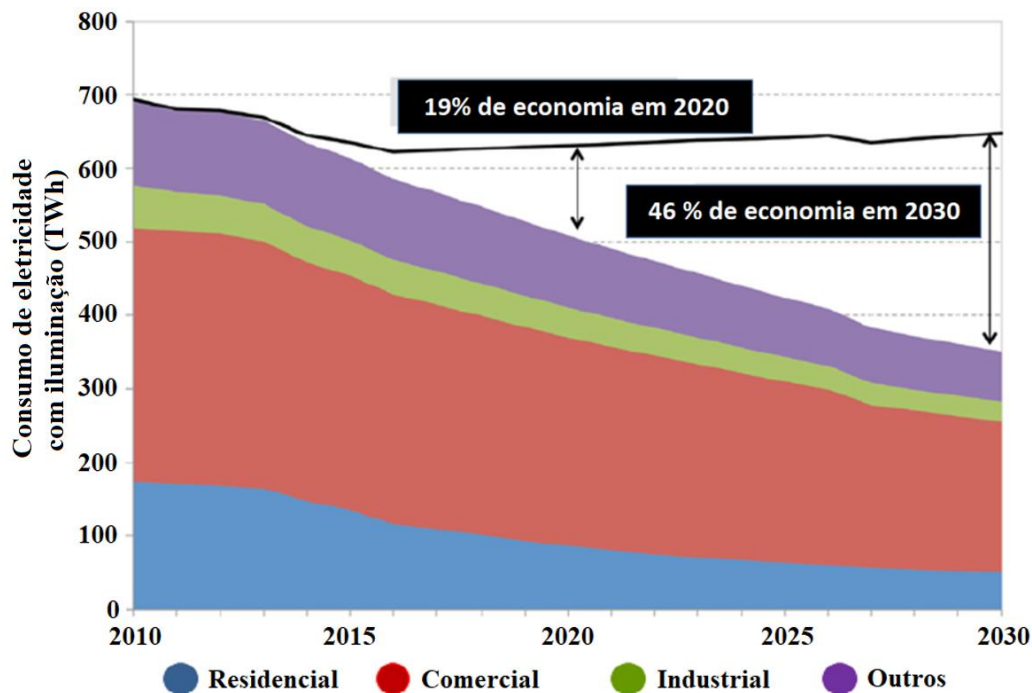
Fonte: adaptação de (DOE SSL PROGRAM, 2012)

Pode ser observado que a lâmpada incandescente (LI) apresenta maior impacto em todas as 15 avaliações, sendo representada pelo círculo mais distante possível do centro da teia. As LFC são mais prejudiciais do que as lâmpadas LED em quatorze dos quinze critérios, considerando as características dos processos para fabricação de lâmpadas LED no ano de 2012. O critério em que a lâmpada LED ainda apresentava um maior impacto faz referência ao aterro de resíduos perigosos, devido ao alumínio utilizado nos dissipadores das luminárias. Conforme a projeção apresentada no estudo, no ano de 2017 os LEDs apresentariam um impacto bastante reduzido quando comparado com o próprio LED produzido em 2012, tendo o menor impacto nos 15 critérios avaliados.

2.2.3 Potencial de economia de energia elétrica

Reduzir o consumo de energia traz diversos benefícios, pois um menor consumo de energia elétrica impacta em uma maior confiabilidade energética do sistema como um todo, reduz o efeito estufa e a emissão de poluentes no meio ambiente. Uma análise das luminárias à base de LEDs comprova que 90% de seu consumo de energia é resultante de sua operação, sendo que os 10% restantes se dividem em utilização de matéria-prima, produção, transporte e reciclagem. Além disso, apenas 1% da energia necessária refere-se à utilização de materiais para produção da luminária (IBDA, 2015). Segundo o DOE, nos Estados Unidos da América a iluminação utilizando LED tem potencial para reduzir praticamente pela metade o consumo de energia dos sistemas de iluminação quando comparado com um cenário sem a inserção do LED, considerando um intervalo de tempo de 20 anos, entre os anos de 2010 a 2030, conforme apresentado na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Projeção de economia de energia nos EUA com inserção dos LEDs.



Fonte: adaptação de (DOE SSL PROGRAM, 2015)

Assim, com a inserção dos LEDs nos sistemas de iluminação, o consumo de energia elétrica destinada aos sistemas de iluminação diminuirá 19% até o ano de 2020 e 46% até o ano de 2030 considerando como comparativo um cenário sem a penetração da iluminação à base de LED no mercado Norte Americano, atingindo uma economia de energia de 300 TWh,

o que corresponde a uma redução de emissão de 210 milhões de toneladas de CO₂ (FERREIRA, 2014).

No cenário nacional, segundo a Abilux, a utilização de LED nos setores público e privado poderia fazer o consumo global de energia com iluminação cair dos atuais 20% para 10% da energia total consumido, ou seja, uma redução pela metade do que é gasto com iluminação no país.

2.2.4 Custo de uma lâmpada LED e projeção para os próximos anos

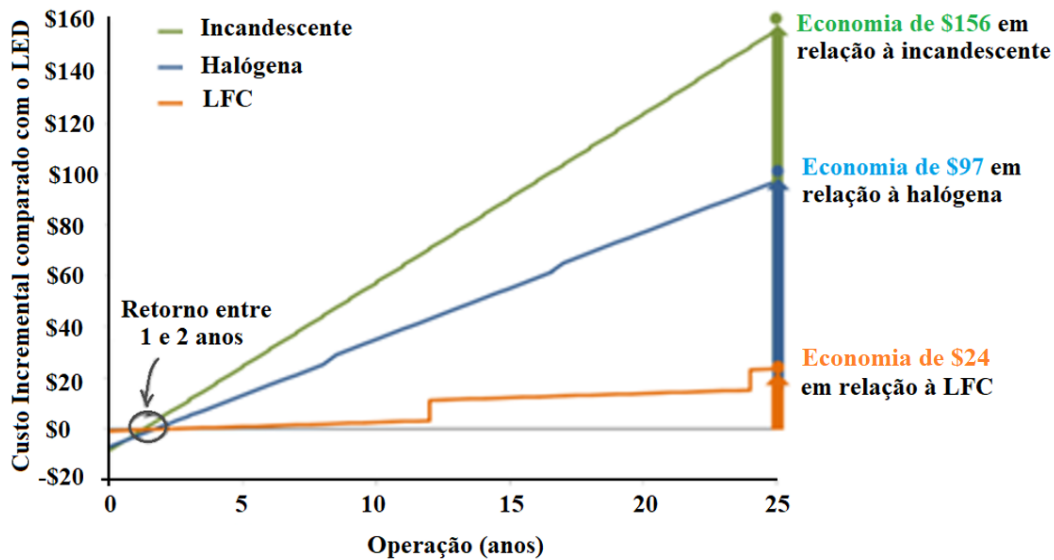
O custo das fontes de iluminação é normalmente adotado como um valor de referência por kilolumen (R\$/klm). Certamente, o custo dos sistemas de iluminação é um dos parâmetros mais importantes para que as novas tecnologias apresentem uma maior disseminação. O custo para substituição de lâmpadas convencionais por lâmpadas LEDs vem apresentando consideráveis quedas nos últimos anos; porém, o custo inicial dos LEDs ainda é considerado elevado. Um estudo realizado por (DOE SSL PROGRAM, 2015) apresenta uma comparação entre o custo associado à utilização de uma incandescente, halógena, LFC e uma lâmpada LED ao longo de anos, a fim de se definir a tecnologia mais viável economicamente. É válido ressaltar que esses valores variam conforme o custo da energia, custo inicial da lâmpada, eficácia, entre outros quesitos.

Baseado nessa projeção, a Figura 2.5 apresenta a comparação de custo para um período de 25 anos, assumindo que a lâmpada opera 1.000 horas por ano (aproximadamente 3 horas por dia). O preço da aquisição do LED é maior que outras tecnologias, no entanto a mesma se torna viável economicamente ao passar dos anos. Essa viabilidade pode ser justificada pelo fato de que o custo incremental da lâmpada LED em comparação com as demais tecnologias é nulo, devido sua maior vida útil e menor consumo de energia. Como consequência da vida útil reduzida das lâmpadas incandescente, halógena e LFC em relação aos LEDs, essas tecnologias precisam ser substituídas algumas vezes durante esses 25 anos. Esse custo para aquisição de uma nova lâmpada é representado por degraus na Figura 2.5.

As lâmpadas incandescente e halógena são baratas e ineficientes e o custo para troca das mesmas é praticamente insignificante. Porém, devido ao elevado consumo de operação dessas lâmpadas, o tempo de retorno das lâmpadas LED ocorre em aproximadamente um ano. Em contrapartida, as LFCs são mais eficientes, enquanto o custo para troca das mesmas é mais significativo, resultando em um tempo de retorno de aproximadamente dois anos para tecnologia LED.

Obviamente, como comentado anteriormente, os custos apresentados e o tempo de retorno apresentam constante mudanças e dependem de diversos fatores. No entanto, esses estudos demonstram que a lâmpada à base de LED é um investimento viável em um período de tempo relativamente curto.

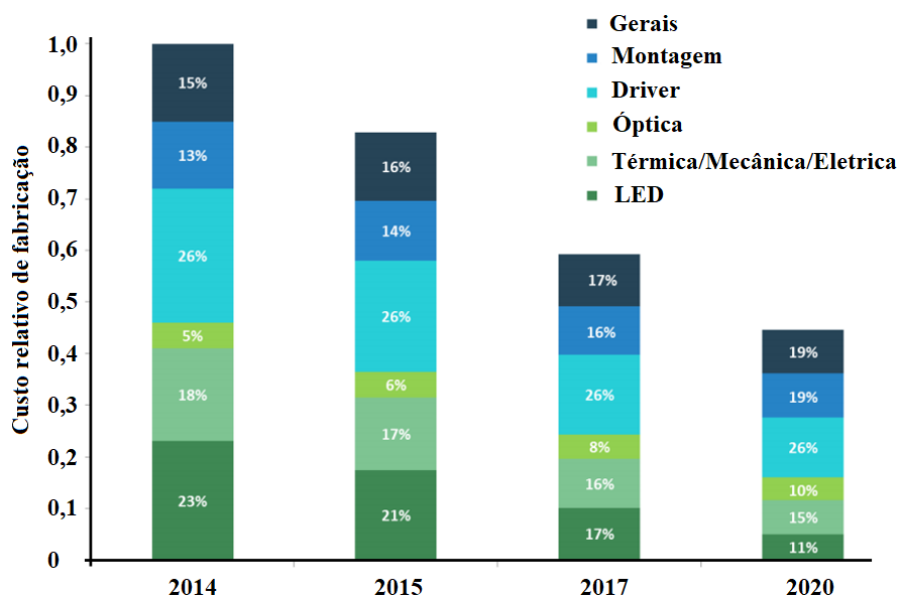
Figura 2.5 - Custo incremental de lâmpadas ao longo da operação de uma lâmpada LED.



Fonte: adaptação de (DOE SSL PROGRAM, 2015)

Esse cenário se torna ainda mais favorável à tecnologia LED quando realiza-se uma projeção a longo prazo. A Figura 2.6 apresenta a estimativa do custo de produção de uma lâmpada LED para substituir uma incandescente de 60 W entre os anos de 2014 e 2020. O principal responsável pela queda do preço é o custo do próprio LED, que é estimado cair de 23% do preço total da lâmpada em 2014 para aproximadamente 11% em 2020 (DOE SSL PROGRAM, 2015). Outra projeção importante que pode ser observada na Figura 2.6 é que o custo da lâmpada deve reduzir mais do que 50% no ano de 2020 em relação ao ano de 2014.

Figura 2.6 - Projeções do custo das lâmpadas LED até o ano de 2020.

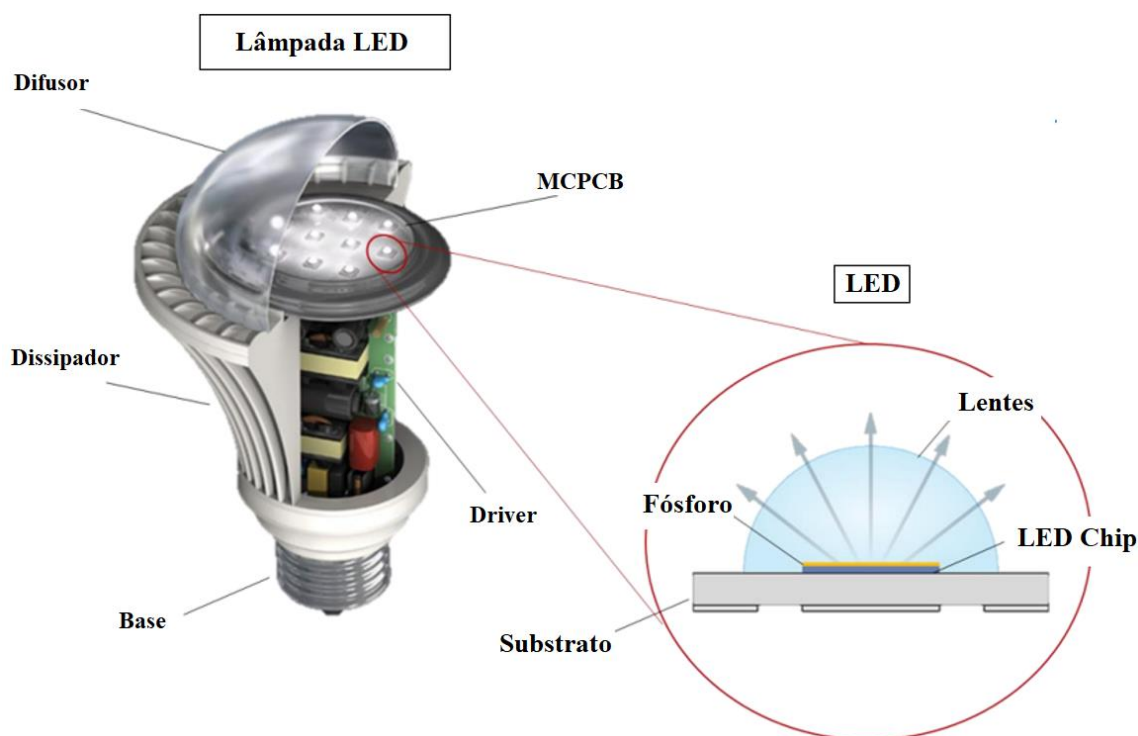


Fonte: adaptação de (DOE SSL PROGRAM, 2015)

2.3 ESTRUTURA DA LÂMPADA LED BULBO

Basicamente, a lâmpada LED bulbo pode ser dividida em três partes principais, as quais são óptica, térmica e elétrica. Obviamente, a constituição da lâmpada compreende várias outras partes, as quais são apresentadas na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Estrutura de uma lâmpada LED bulbo



Fonte: Adaptação de (DOE SSL PROGRAM, 2015)

Apesar da simplicidade envolvida com o acionamento de LEDs de potência, onde basta alimentá-los com formas de onda de tensão e corrente contínuas, existem vários desafios a serem transpostos no desenvolvimento de uma lâmpada LED bulbo. Assim, vários aspectos devem ser desenvolvidos até a concepção de uma lâmpada LED, sendo apresentado a seguir uma breve discussão sobre as principais partes dessas lâmpadas.

Óptica: O LED é um semicondutor que gera uma radiação luminosa dirigida, com ângulo de abertura típico de 120°. No entanto, em uma aplicação de iluminação de interiores, residencial ou comercial, o objetivo é que a iluminação seja uniforme em todo o ambiente. Deste modo, o projeto óptico da lâmpada é essencial no desenvolvimento da mesma. O projeto óptico influencia em questões térmicas e elétricas como, por exemplo, redução da potência necessária para se atingir o fluxo luminoso necessário. Nesse contexto, um estudo óptico é fundamental para a concepção da lâmpada. Além dos LEDs, o difusor é uma parte essencial a ser considerada na análise óptica da mesma.

Térmica: A parcela de energia aplicada aos LEDs que se transforma em luz visível é de aproximadamente 40%, sendo o restante transformado em calor não radiante no semicondutor. Assim, um bom gerenciamento térmico desses sistemas é necessário, pois um aumento significativo da temperatura pode comprometer tanto questões ópticas, como decaimento do fluxo luminoso, quanto questões elétricas, comprometendo a vida útil do sistema. Assim, estudos voltados apenas ao corpo (bulbo) da lâmpada, como possíveis formatos, possibilidade de ventilação forçada, materiais, tamanhos, entre outros, são bastante explorados na literatura.

Elétrica: Além do gerenciamento térmico, outra questão limitante na lâmpada LED bulbo é o volume do circuito para alimentação dos LEDs, visto que o mesmo deve estar embutido dentro do bulbo da lâmpada. Outro fator limitante da vida útil de circuitos de acionamento de LEDs consiste na presença de capacitores eletrolíticos, os quais possuem uma reduzida vida útil em comparação à dos LEDs. Além disso, este circuito é responsável por um acionamento satisfatório dos LEDs além de estar de acordo com as exigências das normas que regulamentam esse tipo de aplicação.

Além dessas três principais partes da lâmpada, vale destacar que a mesma é classificada como lâmpada LED com dispositivo de controle integrado à base, uma vez que o circuito eletrônico (*driver*) está dentro do próprio bulbo da lâmpada. Além disso, os LEDs são fixados na MCPCB (do inglês, *Metal Core Printed Circuit Board*) da lâmpada, o qual tem função de fazer a ligação elétrica entre os LEDs e ainda servir como caminho térmico entre o calor gerado pelo LED e o dissipador da lâmpada.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

As lâmpadas incandescentes estão abolidas do mercado por serem tecnologias ineficientes, apresentando elevado consumo de energia e reduzida vida útil. A tecnologia que vem naturalmente substituindo-as são as LFC, principalmente por serem mais eficazes e com uma vida útil maior. Porém, nos últimos anos as lâmpadas LED vêm ganhando espaço no mercado de iluminação. Essas lâmpadas apresentam como principais vantagens uma longa vida útil, eficácia luminosa elevada, sustentabilidade ambiental, entre outras características interessantes em um sistema de iluminação. O principal obstáculo que impedem a disseminação das lâmpadas LED é o custo inicial, o qual é elevado quando comparado com essas outras tecnologias. No entanto, como apresentado neste capítulo, esse custo vem apresentando quedas ano após ano, já se apresentando como uma tecnologia economicamente viável. Além da questão econômica, tem-se a exigência de um projeto térmico, óptico e elétrico adequado a fim de não comprometer as características positivas dos LEDs, o qual é mais complexo do que para outras tecnologias atuais de iluminação. Assim, um projeto englobando diversos aspectos da lâmpada será abordado no desenvolvimento desse trabalho, com o objetivo de se conceber uma lâmpada LED bulbo contemplando um desenvolvimento adequado desses quesitos, contribuindo assim com a qualidade das lâmpadas LED para aplicações residenciais e comerciais.

3 REQUISITOS PARA UMA LÂMPADA LED BULBO

Este capítulo tem por objetivo apresentar as normas e recomendações voltadas para as lâmpadas LED bulbo. Dentre as normativas estão as exigências do INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia), que apresenta regulamentações para fabricação e comercialização dessas lâmpadas através da portaria nº 389. Além disso, os selos voluntários Procel e Energy Star também são analisados. Por fim, os principais requisitos que a lâmpada LED bulbo deve atender são apresentados e discutidos com base nessas três regulamentações.

3.1 NORMAS, SELOS E RECOMENDAÇÕES

3.1.1 Portaria Nº 389 – INMETRO

O INMETRO publicou no dia 25 de agosto de 2014 a Portaria nº 389 intitulada “Regulamento Técnico da Qualidade Para Lâmpadas Led Com Dispositivo de Controle Integrado à Base” que regulamenta e determina especificações técnicas para as lâmpadas LED comercializadas no Brasil. Dentre os requisitos tratados nessa regulamentação estão valores mínimos de eficácia luminosa, índice de reprodução de cores (IRC), equivalência das lâmpadas LEDs com outras tecnologias de iluminação, fator de potência, distribuição luminosa, entre outras especificações.

Conforme apresentado no próprio nome da portaria, esse regulamento se aplica às lâmpadas LED com dispositivo de controle integrado à base ou corpo, constituindo dessa maneira uma peça única, não destacável. Assim, a aplicação proposta neste trabalho está completamente coberta pela portaria nº 389, uma vez que apresenta alimentação em rede de distribuição de corrente alternada de 60 Hz, para tensões nominais de 127 V e/ou 220 V, previstas para uso doméstico e similar, com potência nominal de até 60 W. Os demais requisitos e características definidos pela portaria, assim como tipos de lâmpadas que estão cobertas pela mesma podem ser verificadas em (PORTARIA Nº 389 - INMETRO, 2014).

Vale destacar que quando o INMETRO cria uma nova regulamentação, o mesmo emite dois documentos diferenciados: o RTQ – Regulamento Técnico da Qualidade e o RAC – Requisitos de Avaliação de Conformidade. O RTQ, que é propriamente a portaria, dispõe

sobre as condições técnicas, como os requisitos mínimos citados anteriormente, de eficácia luminosa, vida útil, segurança, índice de reprodução de cores, produtos cobertos pela regulamentação, entre outros. Já o RAC, define os mecanismos de análise, datas de implantação da medida compulsória, prazos para comercialização e importação pelos fabricantes e comerciantes, concessão e regras para obter registros, mecanismos de fiscalização, e afins.

As lâmpadas que atenderem aos requisitos de eficiência energética e segurança estabelecidos pela portaria nº 389 receberão a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), do INMETRO. A Figura 3.1 apresenta a ENCE, sendo a mesma obrigatória em todos as lâmpadas para que as mesmas possam ser comercializadas.

Figura 3.1 - Etiqueta Nacional de Conservação de Energia para lâmpada LEDs.



Fonte: INMETRO (2018)

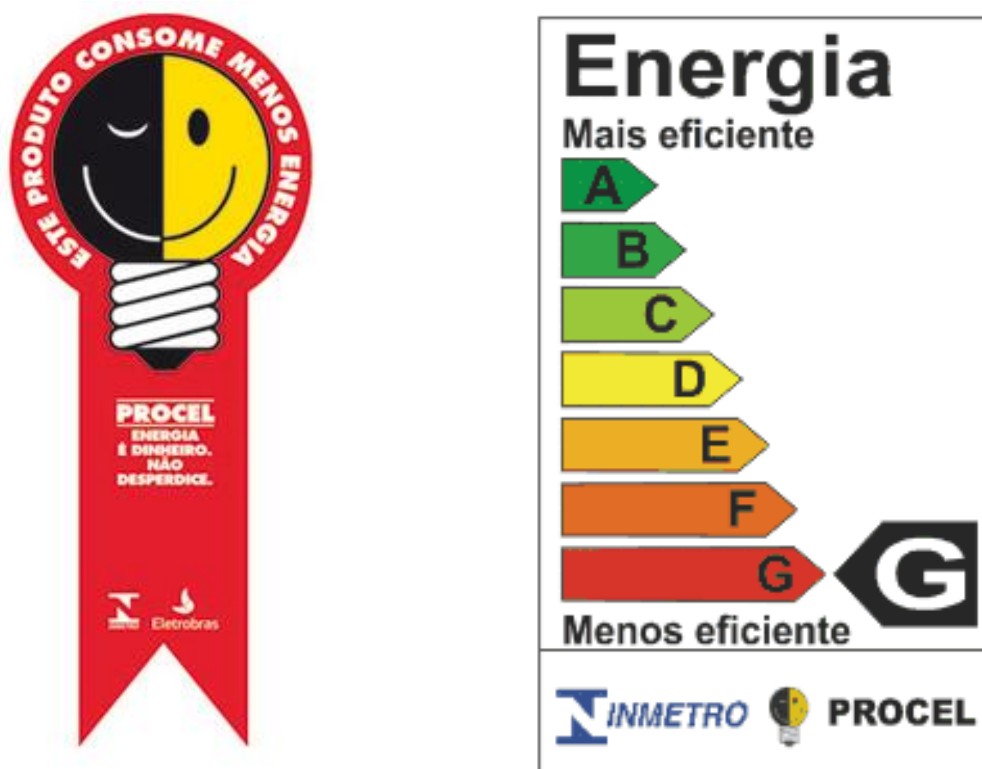
Na ENCE é possível observar informações essenciais para um sistema de iluminação, como a potência elétrica (W), o fluxo luminoso (lm) e a eficácia luminosa (lm/W) da lâmpada LED. Como comentado, essa etiquetagem é obrigatória, no entanto, a lâmpada ainda pode apresentar uma qualidade superior ao exigido pelo INMETRO, tendo assim a possibilidade de

receberem selos voluntários de programas que incentivam economia de energia e sustentabilidade ambiental, como o Selo Procel e o Energy Star, conforme apresentado a seguir.

3.1.2 PROCEL

O PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) é um programa de governo, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e executado pela Eletrobrás. Foi instituído em 30 de dezembro de 1985 para promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício. As ações do PROCEL contribuem para o aumento da eficiência dos bens e serviços, para o desenvolvimento de hábitos e conhecimentos sobre o consumo eficiente da energia e, além disso, postergam os investimentos no setor elétrico, mitigando, assim, os impactos ambientais e colaborando para um Brasil mais sustentável (PROCEL INFO). O selo PROCEL, apresentado na Figura 3.2 juntamente com a etiqueta de eficiência energética, é uma ferramenta que tem por finalidade informar ao consumidor sobre quais são os equipamentos e eletrodomésticos mais eficientes à disposição no mercado.

Figura 3.2 – Selo PROCEL e sua etiqueta de eficiência energética.



Fonte: Adaptação de (PROCEL INFO, 2018)

Entre os equipamentos avaliados pelo PROCEL estão refrigeradores, televisores, condicionadores de ar, lâmpadas fluorescentes, lâmpadas a vapor de sódio, reatores, módulos fotovoltaicos, entre outros. A lâmpada LED é a 38ª categoria de equipamentos que recebeu o selo Procel, fato que ocorreu em Dezembro de 2014. A nova categoria é fruto de um longo processo que envolveu os principais agentes do setor de iluminação, entre eles, laboratórios de ensaios e certificação, especialistas, fabricantes, importadores, empresas de distribuição de energia elétrica e o próprio INMETRO.

Para obter o Selo PROCEL, o fornecedor deverá comprovar que o seu equipamento atende a todos os requisitos estabelecidos. Para isso, as lâmpadas devem ser submetidas a ensaios em um dos laboratórios indicados pelo programa, os quais podem ser verificados no site da Eletrobrás. Embora as exigências do selo PROCEL sejam mais rigorosas que as apresentadas pelo INMETRO através da portaria nº 389, além dos requisitos exigidos pelo próprio PROCEL para a obtenção do selo é necessário que a lâmpada atenda também aos requisitos da portaria. Isso se dá devido ao fato da portaria apresentar exigências que não são tratadas pelo PROCEL.

3.1.3 Energy Star

Energy Star é um programa conjunto da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos - EPA (do inglês, *United States Environmental Protection Agency*) e do Departamento de Energia dos Estados Unidos - DOE (do inglês, *United States Department of Energy*), criado em 1992. A meta do programa é ajudar os consumidores a economizar energia elétrica e ao mesmo tempo proteger o meio ambiente utilizando produtos e práticas específicas. Os primeiros produtos certificados pelo Energy Star foram computadores e monitores, porém, atualmente mais de 60 categorias e milhares de modelos são certificados, incluindo eletrodomésticos, produtos comerciais de iluminação, refrigeração e calefação (ENERGY STAR PROGRAM).

De acordo com o DOE, durante o ano de 2014 os norte-americanos com a ajuda do Energy Star economizaram energia suficiente para abastecer 10 milhões de casas e evitar emissões de gás de 12 milhões de carros, o que corresponde, no total, a 6 bilhões de dólares. Assim como o selo PROCEL, o Energy Star também é uma etiquetagem voluntária, sendo o selo atual do programa apresentado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Selo do programa Energy Star



Fonte: Adaptação de (ENERGY STAR PROGRAM, 2018)

No que diz respeito a lâmpadas LED, o Energy Star também define parâmetros como vida útil das lâmpadas, taxas de falhas, depreciação máxima de fluxo luminoso ao longo da vida útil, características cromáticas como variação da temperatura de cor, além de especificar critérios para ensaios de segurança.

3.2 RESUMO DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS

Visando o desenvolvimento de uma lâmpada LED bulbo de acordo com os requisitos obrigatórios e também passível de receber os selos voluntários, nesta seção são apresentados os principais requisitos da portaria nº 389 do INMETRO e dos Selos PROCEL e Energy Star. Vale ressaltar que os requisitos apresentados pela portaria nº 389 devem ser atendidos para a comercialização das lâmpadas LED, sendo os demais selos considerados etiquetagem voluntária.

A seguir serão apresentados requisitos como Fator de Potência (FP), potência equivalente das lâmpadas LED em relação a lâmpadas incandescentes e LFC, eficácia luminosa, vida útil declarada em função da manutenção mínima do fluxo luminoso e Índice de Reprodução de Cores (IRC).

3.2.1 Fator de Potência

A exigência de FP depende da potência nominal declarada da lâmpada LED. Por exemplo, para potências de até 5 W não é exigido um FP mínimo. Já para potências entre 5 W e 25 W é exigido um FP maior ou igual a 0,7 tanto pela portaria nº 389 quanto pelo programa Energy Star. Para potências acima de 25 W a portaria nº 389 traz como exigência um FP maior do que 0,92 e que o conteúdo harmônico da corrente de entrada esteja de acordo com os limites impostos pela IEC 61000-3-2.

No que diz respeito ao selo PROCEL, é exigido um FP maior que 0,92, independente da potência da lâmpada. Para as lâmpadas LED tubulares o FP exigido pela portaria nº 389 é de 0,92, independente da potência nominal declarada, visto que as lâmpadas fluorescentes tubulares normalmente apresentam elevado FP.

3.2.2 Potência equivalente e distribuição do fluxo luminoso

Com o objetivo de padronizar o fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas LED em relação às lâmpadas incandescentes e às LFCs, foram criados padrões de equivalências para substituição dessas lâmpadas por lâmpadas LEDs. A Figura 3.4 apresenta essas equivalências definidas inicialmente na portaria nº 389, sendo posteriormente modificada pela portaria nº 143. Essa portaria complementa o RTQ para “Lâmpadas LED com Dispositivo Integrado à Base”, visto que nessa foram adicionadas as potências equivalentes das LFCs, uma vez que a portaria original apresentava apenas as potências equivalentes para as lâmpadas incandescentes (PORTARIA N.º 143 - INMETRO, 2015).

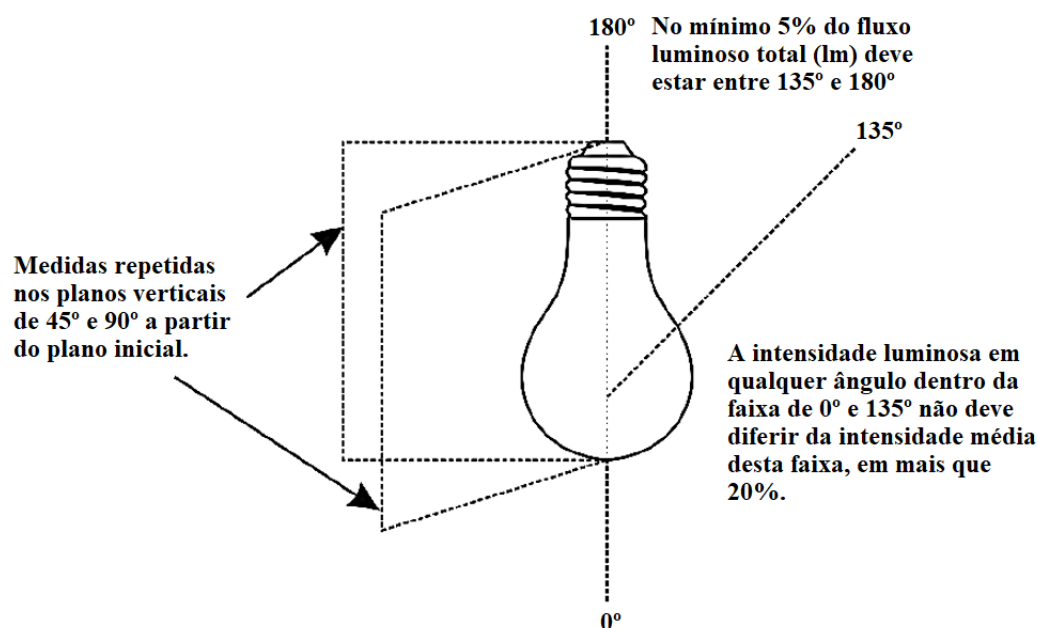
Como pode ser observado, as equivalências apresentadas são para lâmpadas omnidirecionais (não direcionais). Essa classificação é relativa à distribuição luminosa apresentada pela lâmpada, sendo as omnidirecionais as que apresentam uma distribuição uniforme ao entorno de seu corpo, emulando assim uma incandescente convencional, conforme apresentada na Figura 3.5. Como pode ser observado na ilustração, ao menos 5% do fluxo total da lâmpada deve ser emitido entre 135° e 180° da projeção vertical da lâmpada. Além disso, entre 0° e 135° a intensidade luminosa não deve apresentar variações maiores do que 20% da intensidade média.

Figura 3.4 - Fluxo luminoso e potência equivalente entre diferentes tecnologias de lâmpadas

Tipo de lâmpada	Potência de Equivalência P_{eq} (Lâmpada incandescente) (W)	Potência de Equivalência P_{eq} (Lâmpada Fluorescente Compacta) (W)	Faixa de fluxo luminoso a ser atingida com a lâmpada de LED (lm)
Omnidirecionais (Não-direcionais) Semi-direcionais	20	5	159 – 212
	25	7	213 – 301
	30	9	302 – 479
	35	10	480 - 559
	40	13	560 – 640
	50	15	641 – 802
	60	16	803 – 946
	70	17	947 – 1 017
	75	20	1 018 – 1 115
	80	23	1 116 – 1 310
	90	26	1 311 – 1 506
	100	29	1 507 – 1 671
	110	31	1 672 – 1 835
	120	33	1 836 – 2 000
	125	34	2 001 – 2 082
	130	37	2 083 – 2 163
140	40	2 164 – 2 328	
150	41	2 329 – 2 517	

Fonte: Adaptação de (PORTARIA N.º 143 - INMETRO, 2015)

Figura 3.5 - Lâmpada não direcional ou Omnidirecional



Fonte: Adaptação de (PORTARIA N.º 389 - INMETRO, 2014)

3.2.3 Eficácia luminosa

A portaria nº 389 exige uma eficácia luminosa mínima de 55 lm/W para lâmpadas com potências inferiores a 15 W. No que diz respeito a lâmpadas com potência acima de 15 W a eficácia mínima exigida é de 60 lm/W. No entanto, para que essas lâmpadas adquiram os padrões de qualidade exigidos pelos selos voluntários, tanto PROCEL quanto Energy Star, uma eficácia luminosa mínima de 80 lm/W é exigida.

3.2.4 Manutenção luminosa e vida útil

O fluxo luminoso dos LEDs diminui ao longo do tempo, de forma gradual. Assim, a vida útil da lâmpada corresponde ao tempo em horas durante o qual a lâmpada fornece no mínimo 70% (L70) do fluxo luminoso inicial. Embora os LEDs apresentem essa característica, pode ocorrer uma falha súbita na lâmpada LED em algum componente eletrônico ou no próprio LED.

O requisito mínimo de vida útil declarada para lâmpadas LED é de 25.000 horas. Dessa forma, a lâmpada LED deve apresentar após 25.000 horas de funcionamento a manutenção do fluxo luminoso em, no mínimo, 70%. Obviamente, não é viável que os LEDs sejam ensaiados durante todo esse período para comprovação da vida útil. Assim, a certificação ocorre através das normativas LM-80 e TM-21, onde se consegue extrapolar a curva de depreciação do fluxo luminoso dos LEDs com medições de temperatura em testes com duração de 3.000 e 6.000 horas. A validação da vida útil pode ser feita em duas situações, conforme previstas na portaria nº 389 e na Energy Star:

- a) Ensaios de 3.000 horas com LEDs previamente certificados pela LM-80 e ISTMT:

Este caso deve ser utilizado caso o LED já tenha sido previamente certificado pela norma IESNA LM-80, a qual define testes de manutenção do fluxo luminoso para LEDs encapsulados, bem como para módulos e matrizes. Uma vez que os LEDs são incorporados em lâmpadas integrais, com dissipadores de calor, elementos ópticos, fontes de alimentação, entre outros componentes que constituem uma lâmpada LED, e assim, operando em uma variedade de ambientes, a norma LM-80 por si só não é um indicador de manutenção do fluxo luminoso da lâmpada integral. Para relacionar os resultados dos testes apresentados na LM-80 com a lâmpada integral, é necessária a verificação da temperatura do LED em ambientes que

simulam aplicações práticas (*in situ*), medindo-se a temperatura no LED que apresenta a maior temperatura na lâmpada, em regime de operação e em equilíbrio térmico. O procedimento é chamado de “*In Situ Temperature Measurement Test*” (ISTMT) ou, em português, teste de medição de temperatura *in situ*. Assim, caso a lâmpada esteja operando completa e a temperatura do LED *in situ* esteja menor ou igual ao indicado pelo fabricante do LED com base no teste da LM-80, a comprovação da vida útil da lâmpada pode ser realizada por ensaios em 3.000 horas. Nesse caso, a lâmpada será considerada aprovada se o fluxo for mantido superior a 95,8% após transcorrida 3.000 horas de teste.

b) Ensaios de 3.000 e 6.000 horas com LEDs não certificados pela LM-80:

Caso o LED utilizado na lâmpada não seja previamente certificado pela LM-80 a comprovação da vida útil será feita com medições do fluxo luminoso em 3.000 e 6.000 horas. Os percentuais de fluxo mínimo a serem mantidos, transcorridos esses testes, são apresentados na Figura 3.6. Como pode ser observado, para as lâmpadas omnidirecionais após 3.000 horas de testes o fluxo luminoso deve ser de no mínimo 95,8% em relação ao inicial, enquanto que, após transcorridas 6.000 horas de teste, o fluxo deve ser de no mínimo 91,8% do fluxo inicial.

Figura 3.6 – Manutenção mínima de fluxo luminoso para determinação da vida útil

Tipo de lâmpada	Mínimo fluxo no final de 3 000 h comparado com o fluxo inicial	Mínimo fluxo no final de 6 000 h comparado com o fluxo inicial	Máxima Vida nominal declarada (L₇₀) - em h
Decorativa	93,1 %	86,7 %	15 000
Omnidirecional (Não-direcional)	95,8 %	91,8 %	25 000
Direcional			
Semi-Direcionais			
LED Tubular			

Fonte: PORTARIA N° 389 - INMETRO (2014)

Ainda é possível declarar valores opcionais de vida útil da lâmpada LED, ou seja, vida nominal superior a 25.000 horas. Para isso, os requisitos de manutenção mínima do fluxo luminoso após 6.000 horas de teste são mais elevados, além da necessidade de que a lâmpada mantenha no mínimo 91,5% do fluxo inicial para testes mais longos, os quais podem durar até 12.500 horas caso se deseje declarar uma vida útil de 50.000 horas para a lâmpada em teste.

As informações completas dos períodos de teste necessário podem ser verificados na portaria nº 389 do INMETRO.

3.2.5 Índice de reprodução de cores

Em relação ao Índice de Reprodução de Cores (IRC), tanto a portaria nº 389 quanto o Energy Star apresentam as mesmas exigências. O índice de reprodução de cor geral que caracteriza o IRC de acordo com a CIE 13.3 é calculado através da média dos índices de R1 a R8. Para lâmpadas com dispositivo de controle integrado, o valor mínimo de IRC deve ser 80. Além disso, o valor do índice R9 deve ser maior do que 0. Para se atender esse requisito, o LED utilizado na lâmpada deve apresentar $R9 > 0$, índice que é apresentado na folha de dados do LED.

3.2.6 Resumo dos requisitos

A Tabela 3.1 apresenta um quadro resumo dos principais requisitos necessários na lâmpada LED bulbo. Como comentado anteriormente, mesmo o selo PROCEL não apresentando algumas exigências como IRC e distribuição luminosa, para sua obtenção a lâmpada deve estar de acordo com todos os requisitos exigidos pela portaria nº 389 do INMETRO.

Tabela 3.1 - Quadro resumo dos requisitos para a lâmpada LED bulbo

Requisito	Portaria 389	Selo Procel	Energy Star
Fator de potência	0,7	0,92	0,7
Equivalência	Figura 3.4	Figura 3.4	Figura 3.4
Eficácia luminosa	60 lm/W	80 lm/W	80 lm/W
Vida útil mínima	25.000 horas	25.000 horas	25.000 horas
IRC	IRC > 80 e R9 > 0	-	IRC > 80 e R9 > 0

Fonte: Autor

No que diz respeito ao trabalho proposto, deseja-se desenvolver uma lâmpada LED bulbo para substituição de uma lâmpada incandescente de 75 W e uma LFC de 20 W, conforme apresentado na Figura 3.4. Assim, a faixa de fluxo luminoso desejável está entre

1018 lm e 1115 lm. A eficácia luminosa deve ser maior do que 80 lm/W a fim de estar de acordo com as exigências apresentadas pelos selos voluntários. Considerando esses valores de fluxo luminoso e eficácia luminosa, a lâmpada LED deve apresentar uma potência elétrica entre 13 W e 14 W. No que diz respeito à vida útil, deve-se garantir as 25.000 horas exigidas. Assim, embora não se tenha realizado testes de depreciação de fluxo em 3.000h, devem ser respeitados os limites de corrente e temperatura utilizados para a certificação do LED.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os principais requisitos técnicos para fabricação e comercialização de lâmpadas LED como dispositivo de controle integrado à base. Para isso três documentos foram considerados. A portaria nº 389 do INMETRO e os selos voluntários PROCEL e Energy Star. A lâmpada LED bulbo deve obrigatoriamente estar de acordo com os requisitos da portaria nº 389 para ser comercializada, recebendo assim a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia para lâmpada LEDs. Os selos voluntários Procel e Energy Star exigem qualidade superior aos requisitos mínimos necessários trazidos pela portaria, por isso são selos voluntários que têm por objetivo reforçar características positivas como economia de energia e sustentabilidade ambiental de alguns produtos. Os principais requisitos dessas normativas, como fator de potência, equivalência entre potências e fluxo luminoso com lâmpadas incandescentes e LFCs, vida útil, eficácia luminosa e IRC foram apresentados e discutidos. Essas normativas são muito importantes, visto que garantem que os produtos apresentem os requisitos mínimos de qualidade. Assim, os benefícios dos LEDs são mantidos nos produtos, dando maior confiabilidade a essa tecnologia e melhorando a qualidade de energia dos sistemas de iluminação.

4 PROJETO ÓPTICO, ELÉTRICO E TÉRMICO DA LÂMPADA

Este capítulo tem por objetivo realizar o projeto da lâmpada LED proposta. Para isso, é utilizada uma metodologia que inter-relaciona os aspectos ópticos, elétricos e térmicos dos sistemas de iluminação, também conhecida como teoria PET (do inglês, photo-electro-thermal). Uma das principais vantagens da metodologia utilizada é a possibilidade de se realizar o projeto da lâmpada considerando apenas os dados presentes na folha de dados dos LEDs, sem a necessidade de testes experimentais para obtenção dos parâmetros de projeto. Com essa metodologia é possível definir as especificações do sistema, como eficácia luminosa, resistência térmica do dissipador, temperatura de junção do LED, quantidade de LEDs, corrente direta, potência elétrica, entre outros aspectos essenciais para conceber um sistema de iluminação satisfatório. Assim, será realizado o projeto completo da lâmpada de LED de acordo com as exigências trazidas pelas normativas, as quais foram apresentadas no capítulo 3.

4.1 ESTADO DA ARTE

Para que os benefícios dos LEDs sejam aproveitados em um sistema de iluminação se faz necessária a realização de um projeto satisfatório, o que requer uma modelagem que integre os parâmetros PET, visto que os mesmos apresentam grande influência nas características dos sistemas à base de LEDs (ARIK, 2002; POPPE, 2009; CHEN, 2014; CHEN, 2015). Assim, um dos grandes desafios na concepção de uma lâmpada LED é o projeto PET, o qual pode garantir longa vida útil, elevada eficácia luminosa, baixo custo, economia de energia, entre outras características.

Inicialmente, para se realizar o projeto PET é necessário estimar o fluxo luminoso do sistema, o qual tem influência na potência elétrica exigida pelo sistema, na eficácia luminosa, número de LEDs, corrente elétrica, entre diversas outras especificações. Por exemplo, em (BIBER, 2008; HUI, 2009; CHEN, 2012; BENDER, 2013), são propostas maneiras para se determinar o fluxo luminoso do sistema. Em (BIBER, 2008), o fluxo luminoso é estimado considerando duas funções: “fluxo relativo emitido vs. temperatura de junção do LED” e “fluxo relativo emitido vs. corrente direta”. Em (BENDER, 2013) é realizada uma melhoria

em relação a (BIBER, 2008), estimando-se a temperatura de junção através da temperatura ambiente e dos parâmetros elétricos e térmicos. Além disso, algoritmos para maximizar o fluxo luminoso para uma corrente direta ótima, ou para minimizar o tamanho do dissipador também foram propostos. Em (HUI, 2009) foi proposta uma estimativa do fluxo luminoso através da relação entre eficácia luminosa e potência do LED, onde parâmetros elétricos e térmicos são utilizados para se determinar a eficácia luminosa. Em (CHEN, 2012) é realizada uma melhoria na teoria presente, a qual utiliza um fator k_h variável. Esse fator é fundamental para o projeto térmico do sistema, uma vez que representa o percentual da potência elétrica aplicada ao LED que é transformada em calor. No entanto, um fator essencial para se utilizar dessas teorias é a necessidade de testes experimentais, os quais exigem a utilização de equipamentos com elevado custo para obtenção dos parâmetros necessários para a aplicação da teoria PET, como, por exemplo, uma esfera integradora.

Uma das contribuições propostas nesta tese é o desenvolvimento de uma metodologia para projeto de sistemas à base de LEDs utilizando apenas as informações contidas nas folhas de dados dos LEDs, sem a necessidade de testes experimentais e realização de simulações, as quais exigem elevada capacidade de processamento. Uma parte desta metodologia foi apresentada em (CHIES, 2015; CHIES, 2016), onde os parâmetros PET são obtidos através das informações contida na folha de dados do LED e, neste trabalho, a mesma foi adaptada ao projeto de uma lâmpada LED bulbo. Essa metodologia consiste em três passos, organizados da seguinte forma: determinação dos parâmetros PET, equacionamento das especificações do sistema LED e análise gráfica do espaço de projeto.

4.2 TEORIA FOTOELETROTÉRMICA

O fluxo luminoso total (ϕ_v) de uma luminária à base de LEDs pode ser obtido através de (4.1), considerando a eficácia total (E), a potência elétrica do LED (P_{ld}) e a quantidade de LEDs utilizados no sistema (N_{ld}), segundo a *general photo-electro-thermal theory* (HUI, 2009).

$$\phi_v = N_{ld} P_{ld} E \quad (4.1)$$

No que diz respeito à eficácia luminosa, a mesma decai com o aumento da temperatura, podendo esse decaimento ser considerado linear, conforme apresentado em (4.2). A eficácia de referência (E_0) é definida na temperatura de referência (T_0), normalmente 25°C,

e na corrente de teste, a qual é utilizada para a geração da curva da temperatura de junção (T_j) vs. ϕ_v . O coeficiente negativo (k_e) representa a taxa de redução de E com o aumento de T_j .

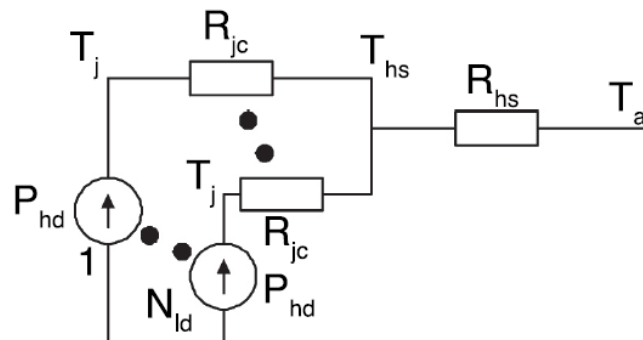
$$E = E_0 [1 + k_e (T_j - T_0)] \quad (4.2)$$

Outro parâmetro de extrema importância para o desenvolvimento da teoria PET é a determinação da quantidade de calor gerado pelo sistema. Para isso, considera-se a potência elétrica do LED ($P_{ld} = V_f I_f$), onde V_f é a queda de tensão direta e I_f é a corrente direta sobre o mesmo. Porém, apenas parte dessa potência é transformada em calor, sendo essa parcela representada pelo coeficiente (k_h). Assim, a potência térmica sobre o LED (P_{hd}) é dada por (4.3).

$$P_{hd} = k_h P_{ld} = k_h V_f I_f \quad (4.3)$$

Um modelo de circuito eletrotérmico em regime permanente, no qual as capacitâncias que representam o aquecimento ao longo do tempo não são consideradas é apresentado na Figura 4.1. Pode-se considerar nesses sistemas que a temperatura do dissipador (T_{hs}) tem uma relação com o calor gerado pelos LEDs, com a resistência térmica do dissipador (R_{hs}) e com a temperatura ambiente (T_a), conforme apresentada em (4.4). A temperatura de junção depende da resistência térmica entre a junção e o encapsulamento (R_{jc}), a qual é apresentada em (4.5), conforme (HUI, 2009).

Figura 4.1 – Circuito eletrotérmico em regime permanente de um sistema a LED.



Fonte: Adaptado de (CHIES, 2016).

$$T_{hs} = T_a + R_{hs} N_{ld} P_{hd} \quad (4.4)$$

$$T_j = T_{hs} + R_{jc} P_{hd} \quad (4.5)$$

Substituindo-se (4.4) em (4.5) encontra-se (4.6), a qual representa T_j .

$$T_j = T_a + (R_{jc} + R_{hs} N_{ld}) k_h P_{hd} = T_a + (R_{jc} + R_{hs} N_{ld}) k_h V_f I_f \quad (4.6)$$

Inserindo-se (4.6) em (4.2) obtém-se (4.7), a qual deve ser inserida em (4.1) a fim de se obter o fluxo luminoso total do sistema em função dos parâmetros fotométricos, térmicos e elétricos (4.8) (HUI, 2009).

$$E = E_0 \left[1 + k_e (T_a - T_0) + k_e k_h P_{ld} (N_{ld} R_{hs} + R_{jc}) \right] \quad (4.7)$$

$$\phi_v = N_{ld} E_0 \left\{ \left[1 + k_e (T_a - T_0) \right] P_v + \left[k_e k_h (N_{ld} R_{hs} + R_{jc}) \right] P_{ld}^2 \right\} \quad (4.8)$$

A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos parâmetros PET utilizados para o desenvolvimento da metodologia.

Tabela 4.1 - Parâmetros PET

Símbolo	Significado	Unidade
N_{ld}	Número de LEDs	-
E	Eficácia luminosa	lm/W
ϕ_v	Fluxo luminoso	lm
P_{ld}	Potência elétrica do LED	W
E_0	Eficácia de referência em T_0	lm/W
T_0	Temperatura de referência	°C
T_a	Temperatura ambiente	°C
k_e	Coefficiente negativo que representa a taxa de redução da E como aumento de T_j .	1/°C
T_j	Temperatura de junção do LED.	°C
k_h	Percentual da potência elétrica do LED transformada em calor	%
R_{jc}	Resistência térmica da junção para o case	°C/W
R_{hs}	Resistência térmica do dissipador para o ambiente	°C/W

Fonte: Autor

Neste trabalho serão apresentadas três contribuições principais em relação à teoria PET, as quais são:

- I. Estimativa de ϕ_v utilizando E_0 variável.
- II. Estimativa de k_h através da folha de dados dos LEDs.
- III. Determinação de P_{ld} relacionado aos parâmetros térmicos e à corrente direta do LED.

Essas contribuições, também apresentadas em (CHIES, 2016), serão discutidas nas subseções a seguir. Vale ressaltar que o LED utilizado nessa análise é o Luxeon 3535L, modelo MxA8-PW40-4000K.

4.2.1 Eficácia de Referência Variável

Um dos principais parâmetros para se determinar o fluxo luminoso de um LED é sua eficácia de referência, a qual depende da corrente direta do mesmo. Assim, E_0 pode ser representado como dependente da corrente direta ($E_0(I_f)$), sendo modelado a partir das informações contidas na folha de dados do LED, a qual apresenta a curva de ϕ_v e V_f em função de I_f , ambos para T_0 .

Assim, o procedimento para se obter $E_0(I_f)$ depende da modelagem dessas duas curvas, gerando dessa forma dois polinômios: $p_\phi(I_f)$ que representa o polinômio gerado pela curva ϕ_v em função de I_f e $p_v(I_f)$ que representa o polinômio gerado pela curva V_f em função de I_f . Assim, $E_0(I_f)$ é apresentado em (4.9), onde ϕ_0 é o fluxo de referência considerado para normalizar ϕ_v vs. I_f , o qual é apresentado na folha de dados do LED.

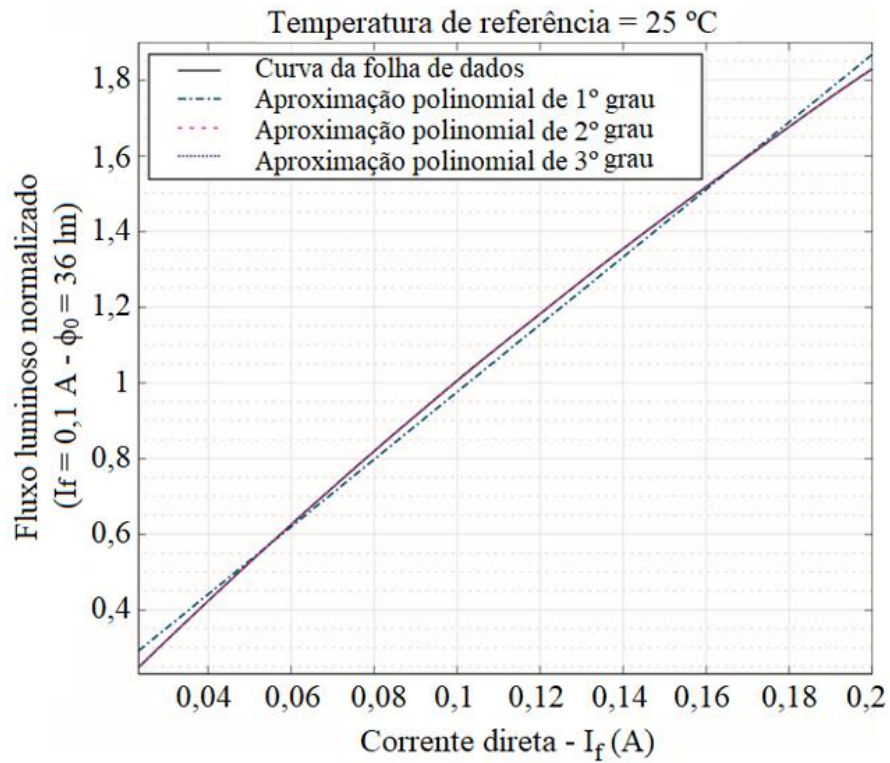
$$E_0(I_f) = \frac{p_\phi(I_f)\phi_0}{I_f p_v(I_f)} \quad (4.9)$$

O grau dos polinômios utilizados nas interpolações depende da precisão desejada. Neste trabalho são utilizados polinômios com grau três, gerando uma aproximação satisfatória para toda a faixa de variação de I_f , tanto para ϕ_v e V_f , conforme apresentado na Figura 4.2 e na Figura 4.3 respectivamente. Vale ressaltar que o LED utilizado apresenta um comportamento bastante linear, no entanto, o comportamento dessas curvas em outros modelos de LEDs justificam a necessidade de utilização de polinômios com maiores graus. Os coeficientes polinomiais de $p_\phi(I_f)$ e $p_v(I_f)$ são, respectivamente, d_0, d_1, d_2 e d_3 de acordo com (4.10) e v_0, v_1, v_2 e v_3 , de acordo com (4.11). Os valores desses coeficientes são apresentados na seção 4.2.4.

$$p_\phi(I_f) = (d_3 I_f^3 + d_2 I_f^2 + d_1 I_f + d_0) \quad (4.10)$$

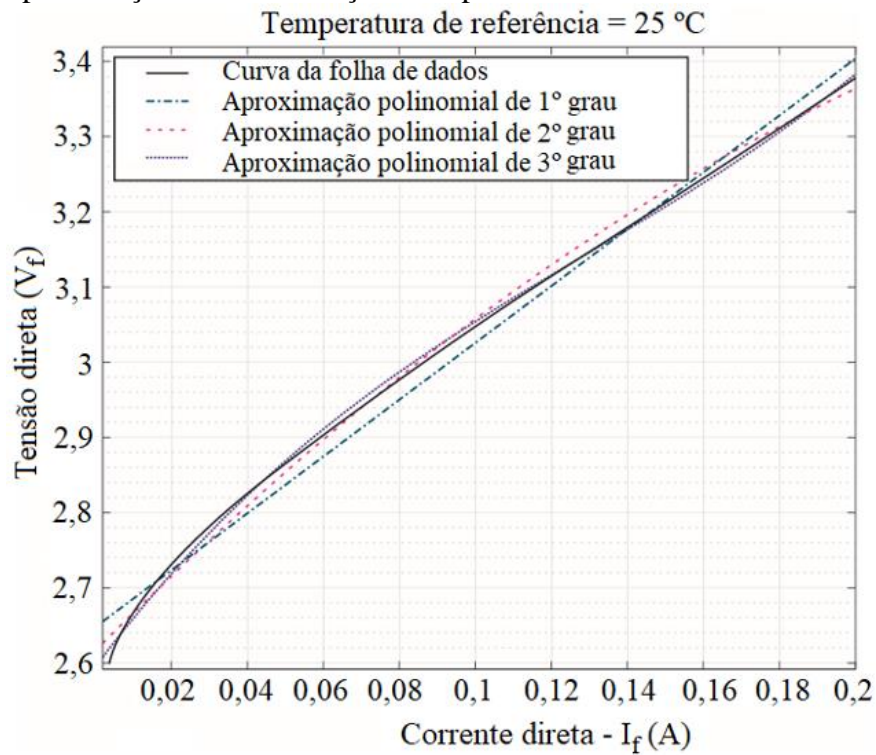
$$p_v(I_f) = (v_3 I_f^3 + v_2 I_f^2 + v_1 I_f + v_0) \quad (4.11)$$

Figura 4.2 – Aproximação de ϕ_v em função de I_f para o LED Luxeon 3535L.



Fonte: Autor

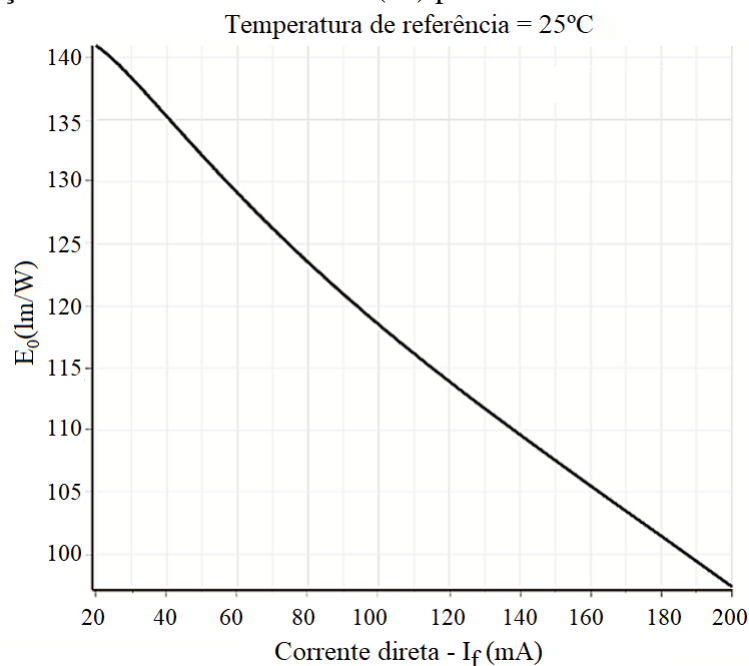
Figura 4.3 – Aproximação de V_f em função de I_f para o LED Luxeon 3535L.



Fonte: Autor

A Figura 4.4 apresenta o resultado da variação de E_0 em função da corrente direta do LED. Pode-se observar que E_0 apresenta uma variação significativa, reduzindo assim os possíveis erros inseridos pelas metodologias que consideram E_0 fixo.

Figura 4.4 - Variação da eficácia de referência (E_0) para o LED Luxeon 3535L.



Fonte: Autor

4.2.2 Estimativa do coeficiente k_h

O coeficiente k_h representa o percentual da potência elétrica que é transformada em calor. Os métodos para se obter o valor de k_h são empíricos, conforme apresentado em (BENDER, 2013), ou experimentais, utilizando-se uma esfera integradora, como apresentado em (HUI, 2009; CHEN, 2012). Assim, visto que esses métodos requerem testes em equipamentos de elevado custo, a obtenção de um método para se determinar o coeficiente k_h sem a necessidade de testes experimentais é altamente desejável, economizando tempo e o custo envolvido no projeto desses sistemas. Portanto, um método para se obter o coeficiente k_h através das informações contidas na folha de dados do LED é proposto.

Inicialmente é realizada uma estimativa baseada na distribuição espectral de potência $\Phi_r(\lambda)$, também conhecida como SPD (do inglês, *spectral power distribution*). Normalmente o espectro é apresentado normalizado na folha de dados do LED, representado por $\Phi_m(\lambda)$, conforme apresentado na Figura 4.5. Sendo que o espectro de luz radiante do LED branco é predominantemente na faixa de comprimento de onda da luz visível, a definição original de

lúmens (4.12) origina uma definição modificada de lúmens (4.13). Essa definição modificada permite determinar o coeficiente K_n , isolado em (4.14), o qual reverte a normalização do espectro radiante.

$$\phi_v = 683 \int \phi_r(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (4.12)$$

$$\phi_v = 683 \int k_n \phi_m(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (4.13)$$

$$k_n = \frac{\phi_v}{683 \int \phi_m(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (4.14)$$

Na apresentação do SPD são informadas as condições de temperatura e corrente na qual o mesmo foi levantado, sendo normalmente utilizada a temperatura de referência e a corrente de teste para sua obtenção. Para essas condições também é informado o fluxo luminoso total (ϕ_v) e a tensão sobre o LED. Uma vez que a função da luminosidade em condição fotópica ($V(\lambda)$) é conhecida, a folha de dados do LED apresenta as informações adicionais para se determinar k_n .

A potência térmica (P_h), definida em (4.15), é a diferença entre a potência elétrica total e a potência total radiante (ϕ_r), definida em (4.16). Dessa forma, o coeficiente k_h pode ser encontrado substituindo (4.16) em (4.15) e o resultado em (4.17).

$$P_h = P_{ld} - \phi_r \quad (4.15)$$

$$\phi_r = k_n \int \phi_m(\lambda) \quad (4.16)$$

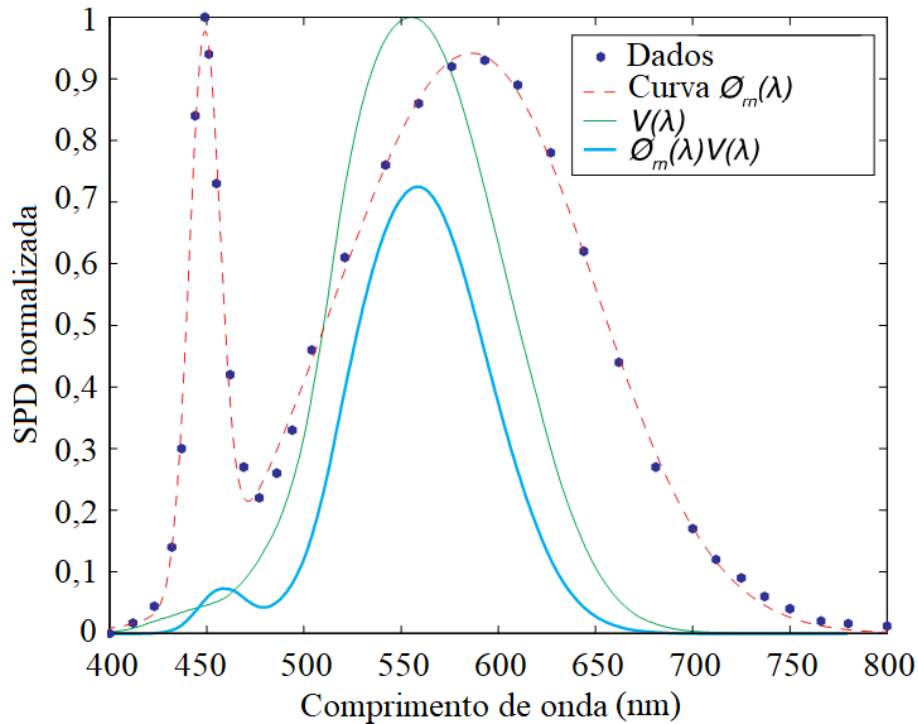
$$k_h = \frac{P_h}{P_{ld}} \quad (4.17)$$

Pode ser observado que para se determinar k_h os valores normalizados do SPD para cada comprimento de onda do observador devem ser considerados para a visão fotópica. A folha de dados do LED apresenta alguns comprimentos de onda correspondente a valores do SPD na forma gráfica, assim o SPD pode ser aproximado por três funções gaussianas, de acordo com (4.18) onde a_i é a amplitude, b_i é o centroide desses picos, enquanto c_i está relacionado com a largura de pico da função gaussiana. Os valores encontrados para esses coeficientes são apresentados na Tabela 4.2, enquanto o procedimento detalhado para obtenção dos mesmos foi apresentado em (CHIES, 2016). A Figura 4.5 apresenta os

resultados aproximados pra o LED Luxeon 3535L considerando uma temperatura de cor igual a 4000K.

$$\phi_m = a_1 \left(\exp \left(- \left(\frac{\lambda - b_1}{c_1} \right)^2 \right) \right) + a_2 \left(\exp \left(- \left(\frac{\lambda - b_2}{c_2} \right)^2 \right) \right) + a_3 \left(\exp \left(- \left(\frac{\lambda - b_3}{c_3} \right)^2 \right) \right) \quad (4.18)$$

Figura 4.5 – Aproximação do distribuição espectral de potência por funções gaussianas considerando $T_a = 25^\circ\text{C}$ e visão fotópica ($V(\lambda)$).



Fonte: Autor

Deve-se enfatizar que fisicamente o coeficiente k_h varia de acordo com temperatura de junção e a corrente direta do LED. No entanto, este efeito pode ainda ser representado pela variação de $E_0(I_f)$. Na metodologia proposta nesse trabalho, k_h é considerado constante, sendo esta variação intrínseca a variação de E_0 , conforme apresentado na seção anterior.

4.2.3 Potência Elétrica Variável (P_{ld})

A queda de tensão direta do LED (V_f) decresce quase que linearmente com o aumento da temperatura de junção (MEYAARD, 2017). Portanto, pode-se estimar a tensão sobre o LED considerando a temperatura de junção do mesmo (BENDER, 2013), conforme apresentado em (4.19), onde k_v é um coeficiente negativo que representa a taxa de redução de V_f com o aumento de T_j , apresentado na folha de dados do LED.

Inserindo a equação de T_j (4.6) em (4.19) é possível encontrar a tensão V_f como função da corrente e dos parâmetros térmicos, de acordo com (4.20). Multiplicando-se (4.20) por I_f resulta na potência elétrica sobre os LEDs (4.21).

$$V_f = p_v(I_f) + k_v(T_j - T_0) \text{ para } T_j > T_0 \quad (4.19)$$

$$V_f(I_f) = \frac{p_v(I_f) + k_v(T_a - T_0)}{1 - k_v k_h I_f (N_{ld} R_{hs} + R_{jc})} \quad (4.20)$$

$$P_{ld}(I_f) = \frac{p_v(I_f) + k_v(T_a - T_0)}{1 - k_v k_h I_f (N_{ld} R_{hs} + R_{jc})} I_f \quad (4.21)$$

4.2.4 Dados Técnicos

A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros obtidos da folha de dados do LED conforme procedimentos apresentados. São apresentados os coeficientes das funções gaussianas, os coeficientes dos polinômios $p_\phi(I_f)$ e $p_v(I_f)$ e os parâmetros k_e e k_h . Todos esses parâmetros foram obtidos através do processamento matemático das informações apresentadas na folha de dados do LED, por isso denominados parâmetros obtidos indiretamente.

Como coeficientes obtidos diretamente da folha de dados, ou seja, sem a necessidade de processamento matemático, estão ϕ_0 , T_0 , R_{jc} e k_v .

Tabela 4.2 - Parâmetros obtidos para o LED Luxeon 3535L

Método	Símbolo	Valor
Parâmetros obtidos indiretamente	a_1 (W/W)	0.8866
	b_1 (nm)	448.9
	c_1 (nm)	11.29
	a_2 (W/W)	0.9184
	b_2 (nm)	590.6
	c_2 (nm)	84.62
	a_3 (W/W)	0.1236
	b_3 (nm)	514
	c_3 (nm)	57.56
	d_3	11.5556
	d_2	-12.8667
	d_1	11.3053
	d_0	-0.0082
	v_3	74.5589
	v_2	-28.8816
	v_1	6.7364
	v_0	2.5946
	Parâmetros obtidos diretamente	k_e (V/°C)
k_h (W/W)		0.54
ϕ_0 (lm)		36
R_{jc} (°C/W)		33.33
k_v (mV/°C)		-3
T_0 (°C)		25

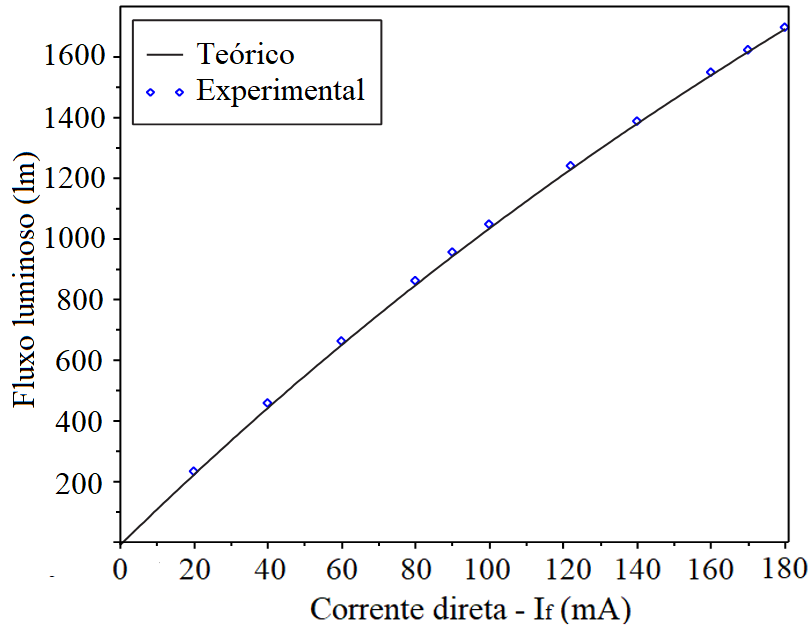
4.2.5 Estimativa do Fluxo luminoso com E_0 variável

O fluxo luminoso estimado com eficácia variável, $E_0(I_f)$, apresentado em (4.22), foi validado através de uma lâmpada LED com $R_{hs} = 0,73^\circ\text{C}/\text{W}$. Assim, o fluxo total teórico obtido foi comparado ao fluxo total obtido experimentalmente em uma esfera integradora, com 200 cm de diâmetro, da Inventfine™. A Figura 4.6 apresenta essa análise comparativa em função da corrente direta no LED. A teoria proposta com $E_0(I_f)$ variável mantém a tendência do fluxo medido, enfatizando assim a melhoria alcançada, uma vez que o comportamento da curva com um valor fixo de E_0 seria linear.

¹Linearização entre 25°C e 105°C.

$$\phi_v(I_f) = N_{ld} \cdot E_0(I_f) \cdot \left\{ \left[1 + K_e \cdot (T_a - T_0) \right] \cdot P_{ld}(I_f) + \left[K_e \cdot K_h (N_{ld} \cdot R_{hs} + R_{jc}) \right] \cdot (P_{ld}(I_f))^2 \right\} \quad (4.22)$$

Figura 4.6 - Comparação entre fluxo luminoso teórico e medido para uma lâmpada LED.



Fonte: Autor

Nesta seção foi apresentado o procedimento para obtenção dos parâmetros necessários para se realizar a metodologia PET, os quais são essenciais para o projeto do sistema de iluminação. No entanto, um segundo passo é necessário, o qual consiste na especificação do sistema LED, apresentado na seção a seguir.

4.3 ESPECIFICAÇÕES DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO À BASE DE LEDs

Determinados os parâmetros PET, é realizado o equacionamento das especificações do sistema de iluminação à base de LEDs. Três importantes especificações devem ser consideradas para um projeto satisfatório do sistema de iluminação, as quais são:

- I. Resistência térmica do dissipador (R_{hs});
- II. Temperatura de junção dos LEDs (T_j);
- III. Eficácia luminosa total (E).

Desde que o projetista conheça essas especificações é possível realizar o projeto de iluminação com ênfase nas características desejadas. Por exemplo, pode ser dada ênfase na vida útil da lâmpada, na eficácia ou fluxo luminoso desejado, ou até mesmo no custo do sistema. Outra possibilidade é a visualização de diferentes sistemas de iluminação,

empregando diferentes quantidades de LEDs e correntes de alimentação, mantendo o mesmo desempenho e requisitos de qualidade. Portanto, um projeto completo de um sistema de iluminação pode ser realizado satisfatoriamente, onde E , T_j , N_{ld} , I_f , ϕ_v , potência consumida, vida útil e custo podem ser estimados. A seguir são determinadas essas três especificações em função da quantidade de LEDs e de sua corrente direta.

A definição da resistência térmica do dissipador é realizada inserindo-se (4.9) e (4.21) em (4.22), resultando em (4.23).

$$R_{hs}(I_f, N_{ld}) = \frac{\left\{ \begin{array}{l} N_{ld} E_0(I_f) I_f \left[\frac{p_v(I_f) k_e k_v (T_0 - T_a) + k_v p_v(I_f)}{+ k_v^2 (T_a - T_0) - k_e (p_v(I_f))^2} \right] \\ + 2K_v \phi_v (-1 + k_v k_h I_f R_{jc}) \\ - \sqrt{(-k_v T_a - p_v(I_f) + k_v T_0)^2 N_{ld} I_f E_0(I_f) A} \end{array} \right\}}{2\phi_v k_v^2 k_h N_{ld} I_f} \quad (4.23)$$

Onde,

$$A = N_{ld} E_0(I_f) I_f \left(k_v^2 - 2k_e k_v p_v(I_f) + k_e^2 (p_v(I_f))^2 \right) + 4k_v \phi_v k_e \quad (4.24)$$

A estimativa da temperatura de junção do LED é realizada inserindo-se (4.20) e (4.23) em (4.6), resultando em (4.25).

$$T_j(I_f, N_{ld}) = \left[\begin{array}{l} T_a + (R_{jc} + R_{hs}(I_f, N_{ld}) N_{ld}) k_h \\ \left(\frac{p_v(I_f) + k_v (T_a - T_0)}{1 - k_v k_h I_f (N_{ld} R_{hs}(I_f, N_{ld}) + R_{jc})} I_f \right) \end{array} \right] \quad (4.25)$$

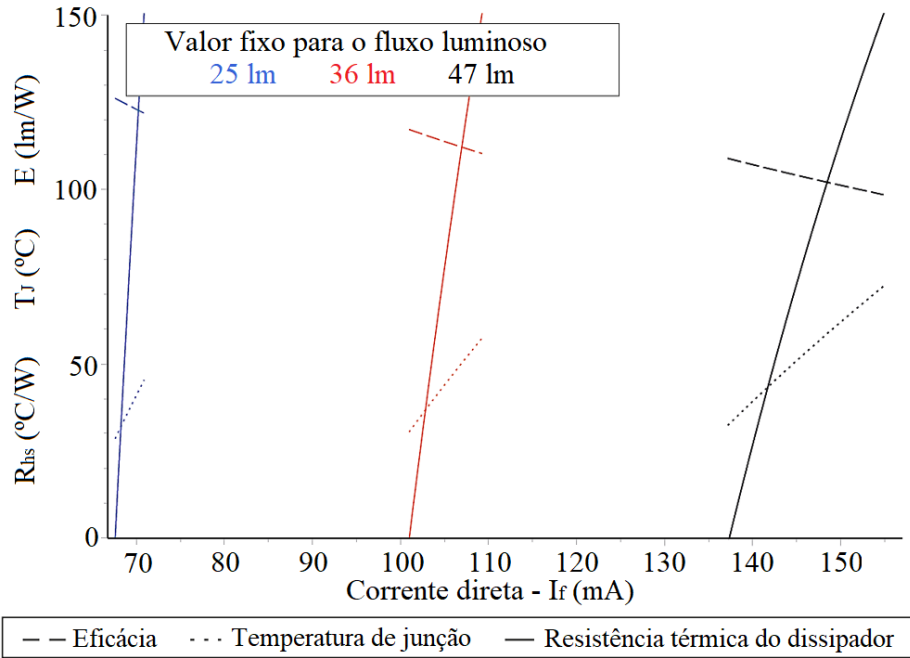
No que diz respeito à eficácia luminosa, a mesma é calculada inserindo-se (4.23) em (4.21) e o resultado em (4.7), resultando em (4.26).

$$E(I_f, N_{ld}) = E_0(I_f) \left[\begin{array}{l} 1 + k_e (T_a - T_0) + k_e k_h (R_{jc} + R_{hs}(I_f, N_{ld}) N_{ld}) \\ \left(\frac{p_v(I_f) + k_v (T_a - T_0)}{1 - k_v k_h I_f (N_{ld} R_{hs}(I_f, N_{ld}) + R_{jc})} I_f \right) \end{array} \right] \quad (4.26)$$

De posse das três equações para as especificações do sistema é possível realizar uma análise gráfica para definição do projeto. A Figura 4.7 apresenta a análise das três

especificações (R_{hs} , T_j , E) considerando apenas um LED. Para essa estimativa foi considerada $T_a = 30\text{ }^\circ\text{C}$ e diferentes possibilidades para o fluxo luminoso desejado.

Figura 4.7 - Variação das especificações R_{hs} , E e T_j em função de I_f (LED Luxeon 3535L).

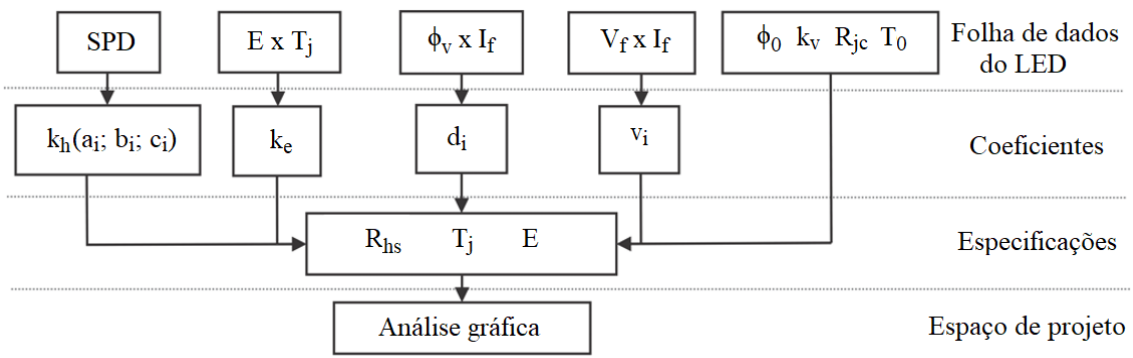


Fonte: Autor

4.3.1 Resumo da metodologia desenvolvida

A Figura 4.8 apresenta um fluxograma da metodologia desenvolvida. O primeiro passo é obter os parâmetros da folha de dados do LED (Tabela 4.2). Após isso, os coeficientes são calculados para serem utilizados nas especificações do sistema (Seção 4.3). Por fim, os resultados são apresentados na forma gráfica (espaço de projeto), possibilitando o projetista definir as características do sistema.

Figura 4.8 - Fluxograma de projeto



Fonte: Autor

4.4 EXEMPLO DE PROJETO

O exemplo de projeto será realizado para uma lâmpada LED bulbo, empregando o LED Luxeon 3535L, a qual deve estar de acordo com os requisitos apresentados na portaria nº 389, selo Procel e Energy Star, conforme apresentado na Tabela 3.1. Foi definida que a lâmpada será concebida para substituição da lâmpada incandescente de 75 W e da LFC de 20 W, definindo-se, dessa forma, o fluxo luminoso de 1100 lm. Como também apresentado no capítulo 3, a eficácia luminosa do sistema deve ser maior do que 80 lm/W com uma vida útil de, no mínimo, 25.000 horas.

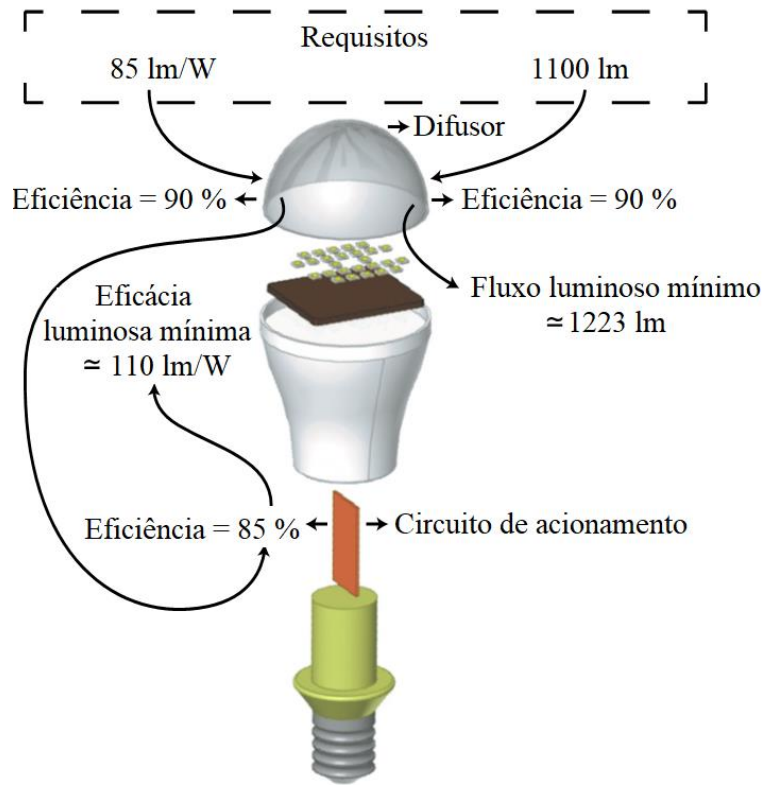
O projeto foi realizado considerando uma eficiência de 90% para o difusor e 85% para o circuito de acionamento. Assim, os LEDs necessitam gerar um fluxo luminoso de 1223 lm e apresentar uma eficácia luminosa mínima de 110 lm/W, a fim de se obter na lâmpada uma eficácia luminosa total de 85 lm/W e um fluxo luminoso de 1100 lm. Outra especificação bastante importante é a vida útil do LED, sendo que para esse modelo de LED T_j precisa estar abaixo de 105 °C e com uma corrente máxima de 150 mA para garantir uma vida útil de 25.000 horas, de acordo com o relatório “*lumen maintenance and reliability LED LM-80*” do fabricante do LED (IESNA LM-80 TEST REPORT, 2013). A Figura 4.9 apresenta uma ilustração de todas as grandezas envolvidas na concepção da lâmpada proposta.

O bulbo utilizado no projeto é o de uma lâmpada comercial, com $R_{hs} = 7,7$ °C/W. Assim, das três especificações apresentadas anteriormente, duas ainda devem ser analisadas, sendo elas E e T_j , as quais serão definidas de acordo com o número de LEDs e a corrente direta da lâmpada. Vale ressaltar que é considerado na análise um máximo de 50 LEDs, devido ao espaço físico disponível na MCPCB.

A Figura 4.10 apresenta uma análise das possibilidades de eficácia luminosa em função da corrente direta e número de LEDs, para se obter um fluxo luminoso de 1223 lm. Pode-se observar que para $E \geq 110$ lm/W são necessários, no mínimo, 41 LEDs. Assim, para se alcançar a eficácia luminosa desejada e respeitar o espaço físico disponível na MCPCB, o número de LEDs da lâmpada deve estar entre 41 e 50 LEDs.

No que diz respeito à temperatura de junção, para qualquer possibilidade em relação ao número de LEDs a faixa de temperatura está de acordo com o limite máximo de temperatura de 105 °C, de acordo com a Figura 4.11.

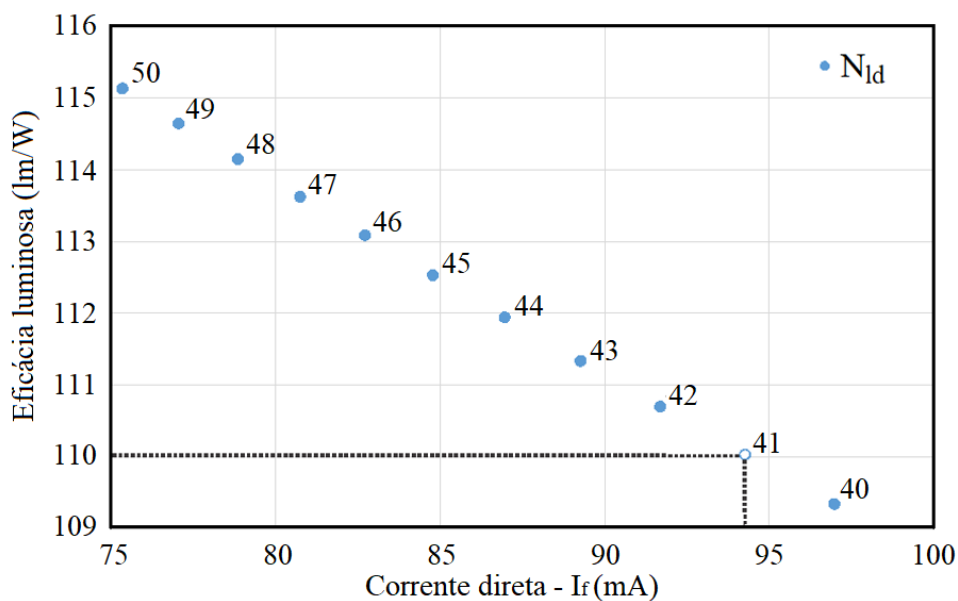
Figura 4.9 - Projeto de lâmpada proposta



Fonte: Autor

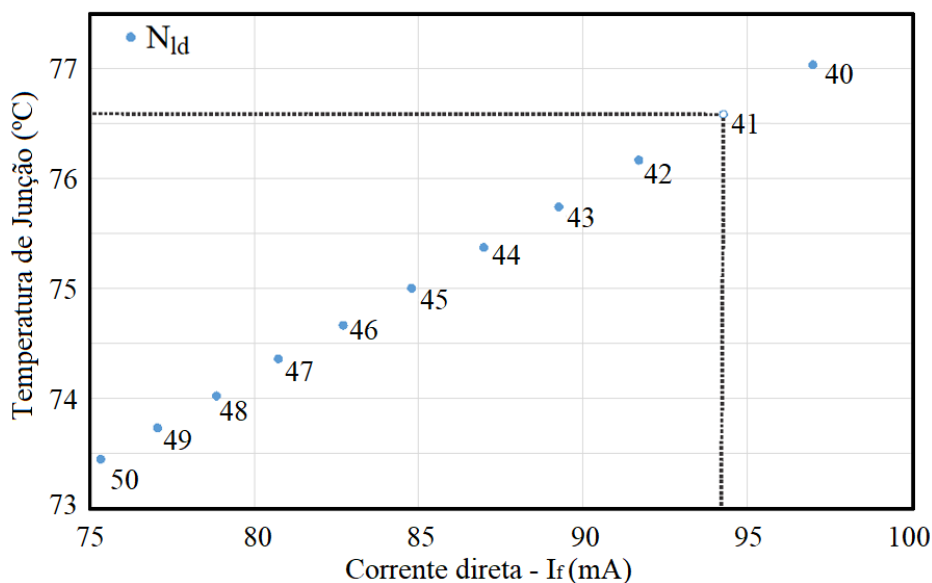
Assim, ficou definida uma lâmpada LED bulbo com 41 LEDs em série alimentados por uma corrente de 94 mA. Como comentado, o projeto foi realizado para resultar em um fluxo luminoso total de 1223 lm e deve operar com $T_J = 76,6$ °C e $E = 110$ lm/W.

Figura 4.10 – Possíveis valores de eficácia luminosa, corrente direta e número de LEDs.



Fonte: Autor

Figura 4.11 – Possíveis valores de temperatura de junção, corrente direta e número de LEDs.



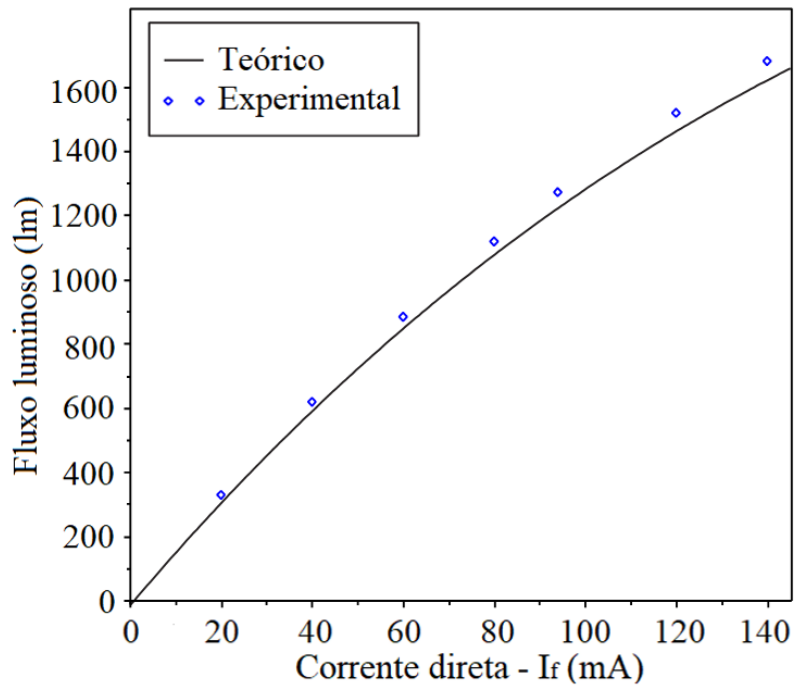
Fonte: Autor

4.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A fim de comprovar a eficiência da metodologia de projeto proposta, foram realizados testes experimentais na esfera integradora. A Figura 4.12 apresenta um gráfico comparativo entre os resultados de fluxo luminoso teórico e experimental de acordo com a variação de corrente, onde se observa um elevado grau de precisão. A temperatura de junção foi estimada medindo a temperatura do dissipador de calor com um termopar tipo K, usando a potência aplicada ao LED e a resistência R_{jc} , conforme descrito em (BRIDGELUX, 2011). As medições foram realizadas em intervalos de 15 minutos, garantindo que entre as medidas de tensão e fluxo luminoso a variação seja menor do que 0,5%, garantindo assim a estabilidade do sistema, conforme apresentado em (IES LM-79-08). A Figura 4.13 apresenta uma imagem termográfica dos LEDs na lâmpada bulbo para a corrente definida em projeto de 94 mA, sendo possível observar a distribuição de temperatura nos LEDs.

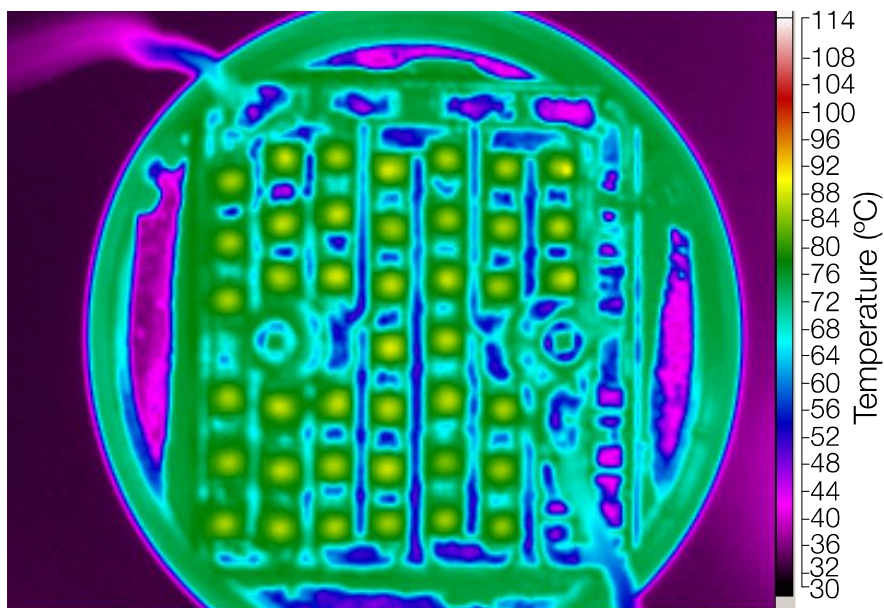
Considerando a corrente de alimentação de 94 mA e a tensão do LED de 122,2 V, a potência aplicada à lâmpada, desconsiderando o circuito eletrônico é de 11,5 W. Além disso, o fluxo luminoso medido foi de 1271 lm. Assim, a eficácia luminosa obtida foi de 110,52 lm/W. A Tabela 4.3 apresenta um comparativo entre os resultados teóricos e experimentais, assim como os respectivos erros entre esses valores.

Figura 4.12 - Fluxo luminoso teórico e experimental em função da corrente na lâmpada



Fonte: Autor

Figura 4.13 - Imagem termográfica dos LEDs para uma corrente de 94 mA.



Fonte: Autor

Tabela 4.3 - Comparação entre especificações medidas e calculadas

Especificação	Valor Medido	Valor Calculado	Erro (%)
Flux Luminoso (lm)	1271,7	1224,65	3,7
Eficácia Luminosa (lm/W)	112,36	110,25	1,88
Temperatura de junção (°C)	79,67	76,6	3,85

Fonte: Autor

Além disso, de acordo com LM-80 do LED, com a temperatura de junção de teste medida estariam asseguradas as 25.000 horas de operação do LED, pois os limites de corrente e temperatura da certificação estão respeitados. Assim, apenas seria necessário o teste de 3.000 horas para garantir que o fluxo luminoso não decaia abaixo dos 95,8% do fluxo inicial depois de transcorrido o teste.

Dessa forma, todos os requisitos de vida útil, eficácia luminosa, e fluxo luminoso equivalente estariam respeitando as exigências apresentadas pelas normativas e selos voluntários. Além disso, uma possível redução na potência consumida seria possível, uma vez que a lâmpada incandescente equivalente apresenta um consumo de 75 W e a LFC 20 W, as quais seriam substituídas por uma lâmpada LED de aproximadamente 13,5 W, considerando 85% de eficiência do circuito de acionamento.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Esta Seção apresentou uma metodologia alternativa de projeto PET que evita testes experimentais ou de simulação para se realizar o projeto de iluminação à base de LEDs. A metodologia PET permite ao projetista definir as especificações do sistema previamente. As principais melhorias da metodologia proposta são a obtenção de um coeficiente k_h sem a necessidade de testes experimentais, baseado somente na folha de dados dos LEDs; definição de um E_0 variável, o qual é dependente da corrente direta dos LEDs; e otimização do equacionamento para se obter as especificações do sistema de iluminação.

Foi realizado um exemplo de projeto para uma lâmpada LED bulbo ($R_{hs} = 7,77 \text{ } ^\circ\text{C/W}$) considerando as regulamentações vigentes para se definir as características do sistema, como eficácia do sistema, vida útil, fluxo luminoso total, entre outras. Para se obter esses resultados, três diferentes especificações foram consideradas (R_{hs} , T_j e E) como função da corrente dos LEDs e quantidade de LEDs do sistema. Os resultados experimentais comprovam a viabilidade da metodologia proposta, através da análise do fluxo luminoso obtido, eficácia luminosa e temperatura de junção do LED. Os erros entre os resultados experimentais e teóricos dessas grandezas foram 3,70%, 1,88% e 3,85%, respectivamente.

Portanto, a metodologia proposta facilita a otimização e as definições prévias das características dos sistemas de iluminação. Além disso, a metodologia de projeto propicia economia de tempo, energia, custo, entre outros benefícios. Assim é possível definir os requisitos mínimos necessários para projetar o sistema e enfatizar as características desejadas do sistema.

5 SISTEMA ELETRÔNICO

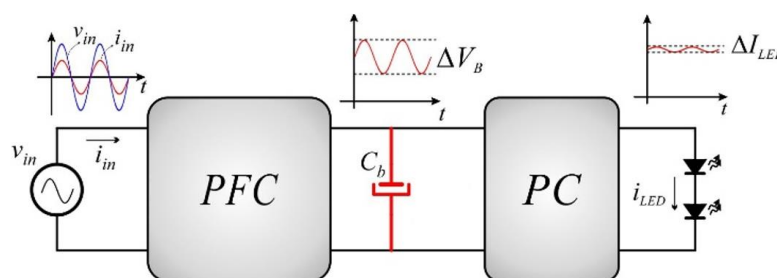
Neste capítulo é apresentada a análise da transmissão de ondulação da tensão de barramento para a corrente nos LEDs no estágio de controle de potência dos drivers de LED. Uma metodologia de projeto para o conversor série ressonante é desenvolvida considerando essa transmissão de ondulação. O conversor série ressonante é comparado ao conversor Buck por se tratarem de topologias com algumas características em comum, além do Buck ser bastante utilizado comercialmente. Resultados experimentais são apresentados a fim de comprovar a análise e a metodologia propostas.

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS A RESPEITO DO SISTEMA ELETRÔNICO

Algumas características são desejadas no sistema eletrônico, comumente denominado de *driver* ou circuito de acionamento, quando a carga se trata de lâmpadas LED. Dentre essas características estão longa vida útil, simplicidade, baixo custo, robustez, eficiência, entre outras. A estrutura básica e tradicional desses circuitos de acionamento é composta por um estágio para correção do fator de potência, ou estágio PFC (do inglês, *Power Factor Correction*) e um estágio de controle de potência, ou estágio PC (do inglês, *Power Control*).

Outra característica de grande relevância nos sistemas de iluminação à base de LEDs é a ondulação em baixa frequência da corrente sobre os LEDs. Essa ondulação ocorre visto que a ondulação na tensão de barramento (ΔV_B) produz uma ondulação na corrente dos LEDs (ΔI_{LED}), como representado na Figura 5.1.

Figura 5.1 - Estrutura básica de um circuito para acionamento de LEDs.



Fonte: Autor

A transmissão de ΔV_B para ΔI_{LED} ocorre através do estágio PC, o qual pode ser projetado para atenuar ao máximo essa transmissão de ondulação, visto que a mesma influencia no desempenho dos LEDs, apresentando limitações em relação à corrente máxima que pode ser aplicada aos mesmos, vida útil, confiabilidade e desempenho óptico, como flicker, eficácia luminosa e deslocamento cromático. Assim, diversos trabalhos abordam o estudo do flicker e o efeito do mesmo nos sistemas de iluminação (WILKINS, 2010; ZHANG, 2013; MORAIS, 2017; SANTOS, 2017). O Conversor Série Ressonante (CSR) e o conversor Buck, os quais são amplamente utilizados como estágio PC para acionamento de LEDs (CHERN, 2011; GORYASHIN, 2013; ALMEIDA, 2013; TEODOSESCU, 2014; LV, 2015; GARCÍA, 2017; MOUNIKA, 2017; SAIKIA, 2017; BAEK, 2017; VALCHEV, 2017; GUCIN, 2018; ROSA, 2018), são abordados nesse estudo. No entanto, diferentemente dos trabalhos citados, esse estudo não apresenta a análise ou o projeto desses conversores, mas sim a análise da transmissão da ondulação nos mesmos quando utilizados como estágio PC. Para essa análise será considerada uma ondulação de baixa frequência na tensão de barramento, não sendo o estágio PFC abordado no presente trabalho devido à diversas abordagens sobre o assunto na literatura (DALLA COSTA, 2008; KIRSTEN, 2011; ALMEIDA, 2014; LUZ, 2017; COSETIN, 2017).

Vale ressaltar que a ondulação de corrente nos LEDs pode ser controlada através de uma compensação ativa, utilizando-se uma malha de controle no estágio PC, como apresentado em (ARIAS, 2013; WHITE, 2015; LUZ, 2017; SOARES, 2017). No entanto, essas técnicas são utilizadas para estágios independentes de processamento de energia. Para baixas potências os conversores utilizados nos sistemas de iluminação costumam apresentar seus estágios integrados, utilizando-se o método apresentado em (WU, 1996). As topologias integradas apresentam uma alternativa ao alto custo dos circuitos de acionamento com dois estágios independentes. Além disso, o número de semicondutores ativos é reduzido, o que implica em redução no custo e simplificação do circuito de controle (COSETIN, 2017). Dessa forma, quando ocorre a integração desses estágios a compensação ativa da ondulação de corrente se torna inviável, uma vez que a dinâmica da malha de controle da corrente nos LEDs modifica a característica de entrada do conversor causando assim distorções na corrente de entrada e prejudicando a eficácia do estágio PFC. Assim, cabe salientar que o estudo proposto nesse trabalho será realizado considerando o estágio PC operando em malha aberta, possibilitando assim a integração desse estágio com o estágio PFC.

5.2 ONDULAÇÃO DE CORRENTE EM BAIXA FREQUÊNCIA SOBRE OS LEDS

A IEEE 1789-2015 (*IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers*) apresenta limites recomendados para a ondulação máxima de corrente sobre os LEDs não causar danos à saúde do observador (IEEE POWER ELECTRONICS SOCIETY, 2015). Assim, conforme as recomendações da IEEE 1789-2015, a ondulação de corrente nos LEDs deve obedecer a certos limites relacionados à modulação de iluminância, conforme (5.1):

$$\text{Mod}\% = 100 \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (5.1)$$

Onde I_{\max} e I_{\min} representam, respectivamente, o valor máximo e mínimo da corrente nos LEDs.

As recomendações da IEEE são realizadas com base em dois níveis de percepção humana em relação à variação na iluminância. Assim, foram estabelecidos dois limites para a modulação percentual de corrente, conforme apresentado a seguir.

- a) Nível de baixo risco: minimiza qualquer efeito biológico ou distração devido à variação na luminosidade. Para esse nível, a modulação da corrente deve obedecer ao limite apresentado em (5.2).

$$\text{Mod}\% \leq 0,08\text{freq} \quad (5.2)$$

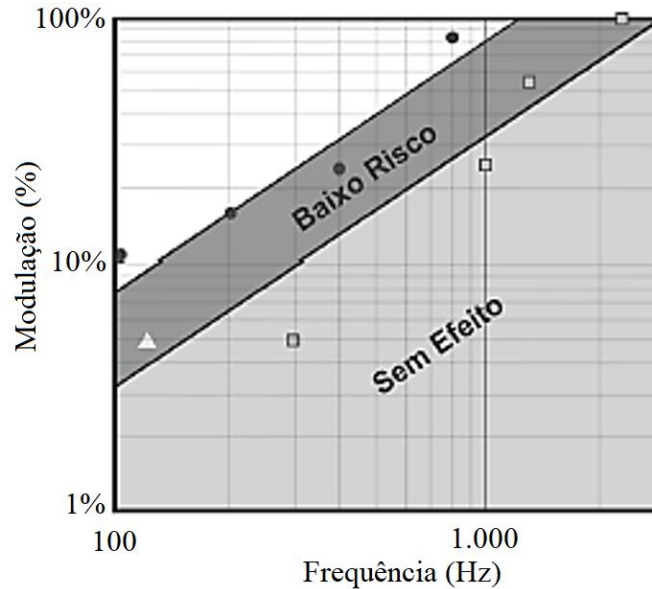
Onde freq é a frequência da ondulação da corrente nos LEDs.

- b) Nível sem efeito observável: nenhuma variação na luminosidade é percebida, não apresentando dessa forma nenhum efeito biológico no observador. Para esse nível a modulação deve obedecer ao limite apresentado em (5.3).

$$\text{Mod}\% \leq 0,033\text{freq} \quad (5.3)$$

A Figura 5.2 apresenta graficamente esses níveis de modulação relacionados à frequência da ondulação de corrente.

Figura 5.2 – Níveis de risco da ondulação de corrente ao observador.



Fonte: Adaptação de (WILKINS, 2014)

Com base em (5.1) pode ser definida a ondulação absoluta de corrente (5.4) e a ondulação percentual (5.5) em função da frequência do sinal, cabendo ao projetista escolher o nível desejado.

$$\Delta I_{LED} = \frac{2Mod\% I_{LEDmed}}{100} \quad (5.4)$$

$$\Delta I_{LED}(\%) = 2Mod\% \quad (5.5)$$

Onde ΔI_{LED} é o valor de pico a pico da ondulação e I_{LEDmed} é o valor médio da corrente nos LEDs.

A fim de limitar essa ondulação a valores aceitáveis, os circuitos de acionamento normalmente apresentam em sua estrutura capacitores eletrolíticos no barramento (C_b). O emprego dessa tecnologia se dá visto que a potência na entrada do sistema é pulsante, enquanto que a potência entregue ao estágio PC deva possuir pequena ondulação, uma vez que essa, como já comentado, é transferida para a corrente nos LEDs. No entanto, a vida útil desses capacitores é significativamente inferior à vida útil dos LEDs. Os capacitores eletrolíticos convencionais apresentam em sua grande maioria uma vida útil de aproximadamente 5.000 horas operando com temperaturas de 85 °C, a qual é bastante reduzida quando comparado com a vida útil mínima de 25.000 horas exigida para as lâmpadas LED bulbo. Outra solução bastante utilizada para elevar a vida útil dos capacitores é a

utilização de capacitores de elevada vida útil operando com temperatura reduzida, uma vez que a vida útil desses capacitores dobra para cada redução de 10 °C na temperatura de operação em relação a sua máxima suportada (MAXIM, 2013). A utilização de capacitores eletrolíticos nesses circuitos é tão crítica que a própria portaria nº 389 do INMETRO apresenta uma seção para garantia da vida útil do capacitor eletrolítico, intitulada “Ensaio de verificação da qualidade do projeto eletrônico p/capacitores eletrolíticos, quando aplicável”. Assim, a própria portaria traz a equação para estimar a vida útil do capacitor eletrolítico, apresentada em (5.6), a qual é uma adaptação da Equação de Arrhenius.

$$L_T = L_0 2^{\left(\frac{T_0 + 5 - T_x}{10}\right)} \quad (5.6)$$

Onde L_T é a vida útil em horas do capacitor considerando sua temperatura de operação (T_x) e L_0 e T_0 são, respectivamente, a vida útil e a temperatura máxima de operação.

Assim, para que a vida útil desses capacitores supere as 25.000 horas de funcionamento seria necessário uma redução da temperatura do sistema como um todo, o que pode ser extremamente complicado em sistema enclausurado, como o caso de lâmpadas bulbo. Também poderia ser necessária a utilização de circuitos de resfriamento e controle de temperatura, agregando assim custo e complexidade ao sistema.

Assim, diversos autores (CHEN, 2012; ALONSO, 2012; COSETIN, 2012; ALMEIDA, 2014; CAMPONOGARA, 2015; LUZ, 2017; COUTINHO, 2017) apresentam estudos para substituição dos capacitores eletrolíticos por capacitores de filme nos circuitos de acionamentos aplicados a LEDs. Os capacitores de filme apresentam vida útil bastante elevada, não sendo dessa forma um fator limitante para a vida útil do sistema. Porém, tanto os capacitores de filme quanto os capacitores eletrolíticos apresentam para elevadas temperaturas de operação valores limitados de capacitância, são mais caros e volumosos, outro fator limitante para lâmpadas bulbo.

Portanto, independente da solução escolhida para equalizar a vida útil do circuito de acionamento com a dos LEDs, deseja-se a redução do valor da capacitância de barramento desses sistemas. Porém, como já comentado, essa redução apresenta por consequência uma maior ondulação da tensão de barramento, sendo necessário que se encontre alternativas para que o estágio PC reduza o impacto de ΔV_B em ΔI_{LED} .

Nesse contexto o CSR operando como estágio PC se apresenta como uma boa alternativa. Além de apresentar características positivas quanto à transmissão da ondulação, propicia simplicidade e elevada eficiência ao sistema (WANG, 2015; MELO, 2015). Outra

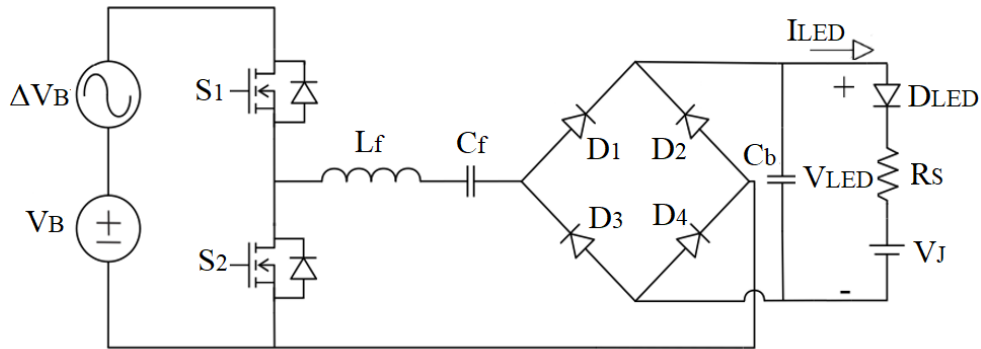
característica positiva do CSR diz respeito às perdas por comutação, uma vez que a comutação do mesmo ocorre em ZVS (do inglês, *zero voltage switching*) ou ZCS (do inglês, *zero current switching*) (ERICKSON, 2001). Assim, os conversores ressonantes podem operar com uma frequência de chaveamento elevada, propiciando uma elevada densidade de potência e eficiência (KOJORI, 1991; CHUANG, 2009; HARIYA, 2015), fator bastante desejável em lâmpada LED bulbo devido ao reduzido espaço físico para o *driver*. Algumas características apresentadas pelo CSR como simplicidade, baixo custo e elevada eficiência também são apresentadas pelo conversor Buck, o qual é amplamente utilizado nos sistemas comerciais de iluminação, existindo uma vasta gama de circuitos integrados (CI's) dedicados ao mesmo como o ILD4035 e o ILD4071 (Infineon), FL7701 (Fairchild), LM3405 (Texas Instruments), entre outros. Além disso, ambos os conversores apresentam características de redutores de tensão, bastante desejável nesses sistemas visto que a tensão da lâmpada LED é menor do que a da rede elétrica. Assim, uma análise mais detalhada dessas topologias operando como estágio PC será realizada a seguir, analisando principalmente o comportamento dos mesmos sob o ponto de vista da transmissão de ondulação.

5.3 CONVERSOR SÉRIE RESSONANTE

Como previamente citado, o CSR apresenta diversas características positivas que justificam sua utilização como estágio PC em circuitos de acionamento de LEDs. Para isso, os conversores série ressonante apresentam um circuito inversor de alta frequência associado a um tanque ressonante (LC série) e um circuito retificador de alta frequência na saída. O CSR utilizado nesse estudo é apresentado na Figura 5.3.

A tensão na entrada do circuito é representada por uma tensão constante (V_B) em série com uma ondulação de tensão (ΔV_B), as quais emulam o valor médio e a ondulação de baixa frequência da tensão de barramento, respectivamente. Um inversor meia ponte, formado pelos interruptores S_1 e S_2 , tem a função de prover ao filtro série ressonante (L_f e C_f) uma tensão quadrada de alta frequência. Um estudo mais detalhado dos inversores é apresentado em (ALMEIDA, 2014). Como os LEDs devem ser alimentados em corrente contínua e o filtro ressonante opera com corrente alternada, na saída do circuito é colocada uma ponte retificadora (D_1 - D_4) a fim de alimentar o capacitor de saída C_b e os LEDs. Esses são representados por seu modelo elétrico equivalente, formado pelo diodo (D_{LED}), a resistência intrínseca do LEDs (R_s) e a tensão de joelho (V_J).

Figura 5.3 - Conversor Série Ressonante



Fonte: Autor

5.3.1 Projeto do filtro ressonante

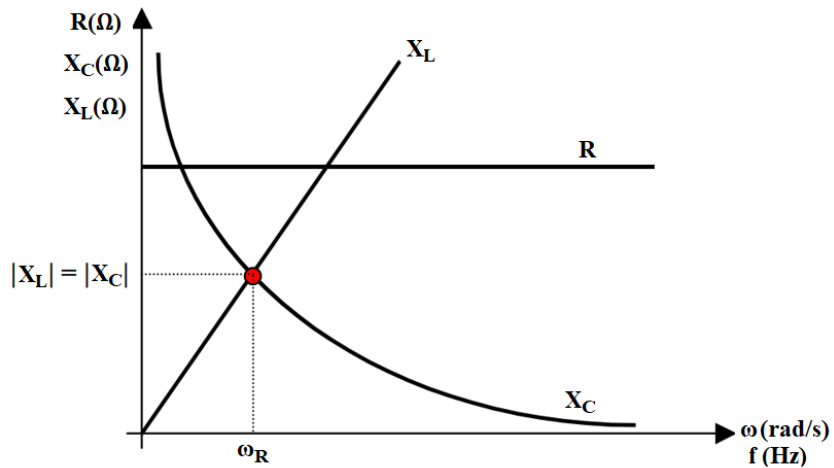
Os componentes passivos apresentam comportamentos típicos relacionados à frequência do sinal neles aplicado. Quanto ao resistor, a sua resistência independe da frequência do sinal. O capacitor apresenta uma reatância capacitiva (5.7), a qual é inversamente proporcional ao valor da frequência. O indutor apresenta uma reatância indutiva (5.8), a qual é proporcional ao valor da frequência do sinal nele aplicado. O comportamento desses componentes em função da frequência pode ser observado na Figura 5.4.

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (5.7)$$

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (5.8)$$

Como pode ser observado na Figura 5.4, existe uma determinada frequência na qual as reatâncias indutiva e capacitiva se anulam e o circuito apresenta um comportamento puramente resistivo. Neste caso, toda a tensão da fonte estará sobre o resistor, provocando máxima dissipação de potência. Essa condição é chamada de ressonância, sendo a frequência que provoca esta situação chamada de frequência de ressonância, a qual é expressa por (5.9) para o circuito LC série ressonante.

Figura 5.4 - Comportamento da resistência e das reatâncias com a variação da frequência.



Fonte: Adaptação de (MUSSOI, 2004)

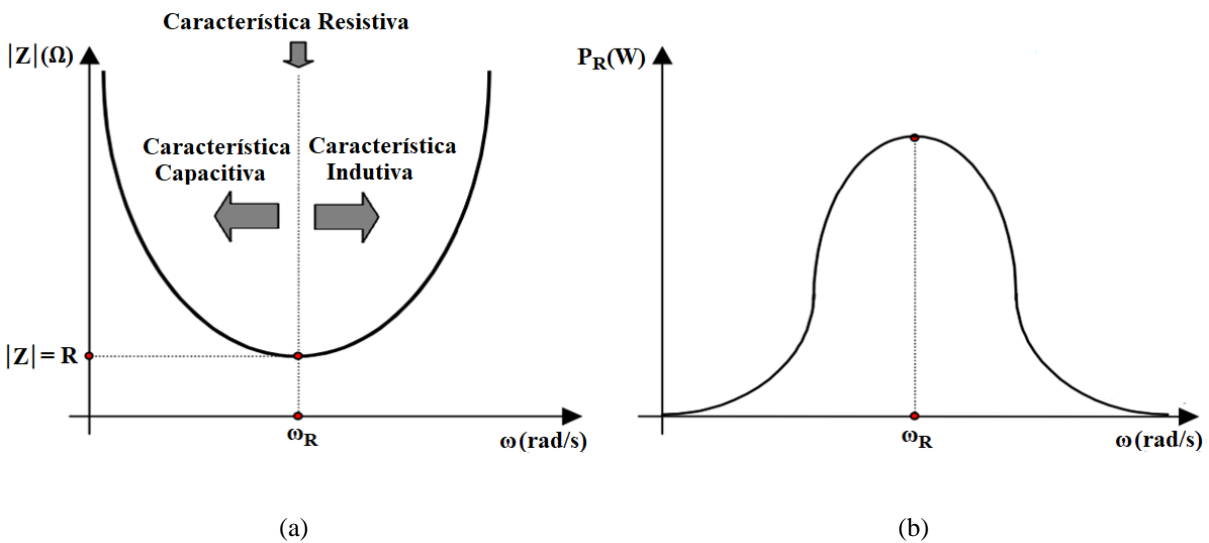
$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{ou} \quad f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5.9)$$

Onde ω_R é a frequência de ressonância angular dada em rad/s e f_R é a frequência de ressonância dada em Hz.

Dois importantes parâmetros podem ser obtidos da análise em frequência, como o comportamento da impedância série (5.10) e da potência ativa em função da frequência desses circuitos, conforme apresentada na Figura 5.5

$$Z_{eq} = R + jX_L - jX_C = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} \quad (5.10)$$

Figura 5.5 - Resposta em frequência do filtro LC série: (a) impedância e (b) potência.



Fonte: Adaptação de (MUSSOI, 2004)

Outro parâmetro bastante importante para análise de filtros ressonantes é o fator de qualidade (Q), o qual expressa a relação entre a frequência de ressonância ω_R e a largura de banda $\Delta\omega$, a qual para o circuito RLC é dada por $\Delta\omega = R/L$. Assim, Q pode ser calculado por (5.11).

$$Q = \frac{\omega_R}{\Delta\omega} = \frac{\omega_R L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5.11)$$

De posse desses parâmetros do filtro ressonante, como frequência de ressonância e fator de qualidade, é possível calcular o valor dos componentes reativos do filtro. O valor do indutor pode ser calculado com base em (5.11), resultando em (5.12).

$$L_f = \frac{QR}{\omega_R} = \frac{QR}{2\pi f_R} \quad (5.12)$$

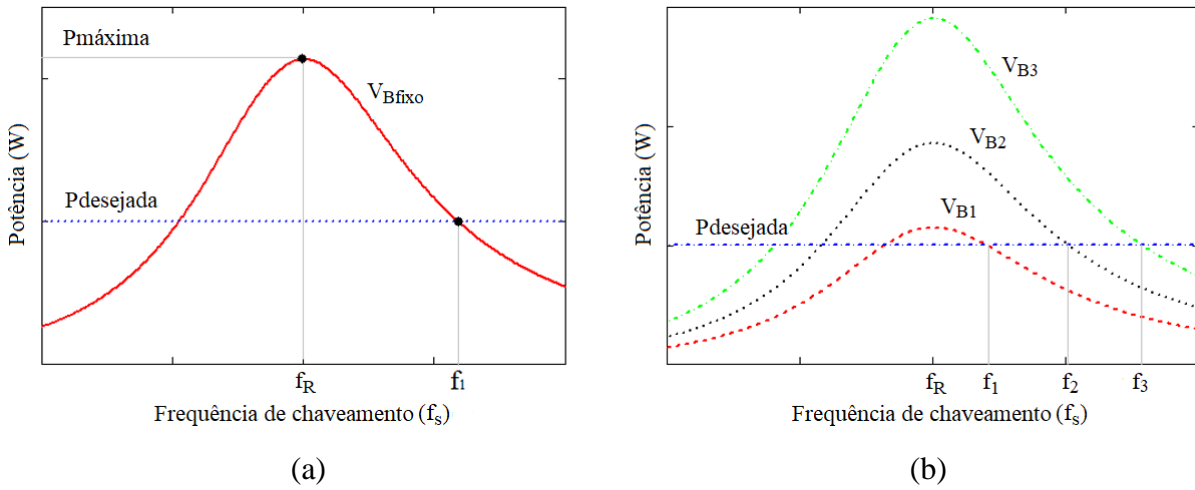
Uma vez obtido o valor da indutância do filtro, a determinação do valor do capacitor pode ser realizada utilizando-se (5.9), resultando em (5.13).

$$C_f = \frac{1}{L_f (2\pi f_R)^2} \quad (5.13)$$

Assim, de posse dos componentes do filtro (L_f e C_f) é possível gerar o gráfico da potência ativa em função da frequência do sinal aplicado ao filtro, considerando sua impedância equivalente, apresentada em (5.10). Para isso, normalmente é considerada previamente uma tensão de alimentação do filtro, sendo o ponto de operação definido em função da potência desejada, conforme apresentado na Figura 5.6(a). Um estudo contemplando projeto, análises de sensibilidade, perdas, conteúdo harmônico, comportamento transiente e estabilidade de circuitos ressonantes é apresentado em (BISOGNO, 2006).

No entanto, para a análise do comportamento da ondulação de corrente nos LEDs apenas a carga é fixada, definindo-se conseqüentemente a potência ativa de saída requerida pelos LEDs. Assim, essa análise é realizada em função da variação da tensão de barramento e conseqüentemente da frequência de chaveamento, a fim de se realizar o ajuste do ganho do filtro, conforme apresentado na Figura 5.6(b). Essa análise é apresentada detalhadamente na seção a seguir.

Figura 5.6 – Metodologia de projeto (a) tradicional e (b) proposta para o filtro ressonante.

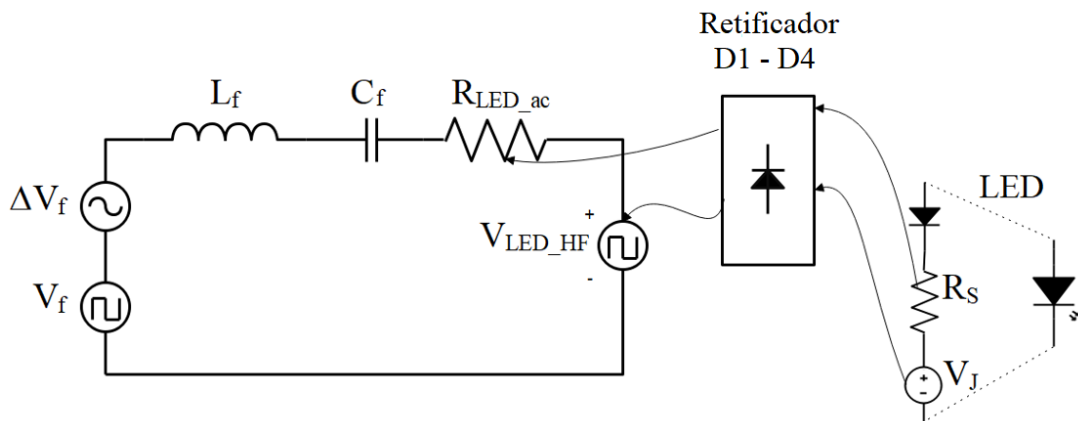


Fonte: Autor

5.3.2 Análise da ondulação de corrente em baixa frequência

O procedimento matemático para se definir como ocorre a transmissão da ondulação no CSR é realizado considerando uma simplificação inicial do circuito apresentado na Figura 5.3, a qual é apresentada na Figura 5.7.

Figura 5.7 – Simplificação do CSR



Fonte: Autor

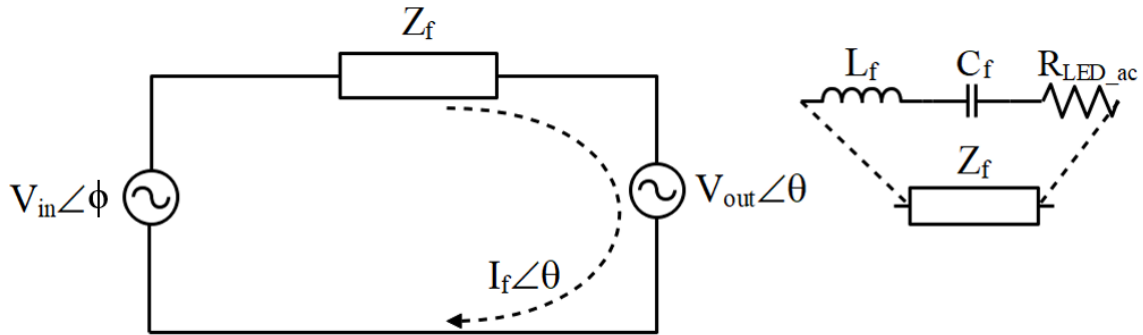
A tensão na entrada do filtro (V_F) é representada por uma tensão quadrada, enquanto ΔV_F representa a ondulação da tensão de barramento. A resistência (R_{LED_ac}) em série com L_f e C_f representa o efeito da resistência intrínseca dos LEDs (R_S) antes do retificador de saída, conforme apresentado em (5.14). Por fim, a tensão sobre os LEDs é representada por uma

fonte de tensão quadrada (V_{LED_HF}) a qual varia entre $\pm V_I$, conforme a polarização dos diodos da ponte retificadora.

$$R_{LED_ac} = \frac{8}{\pi^2} \cdot R_S \quad (5.14)$$

É possível representar as fontes de tensões quadradas (V_F e V_{LED_HF}) por tensões senoidais, considerando apenas a componente fundamental das mesmas, uma vez que o filtro ressonante atenua as harmônicas de ordens mais elevadas. A Figura 5.8 apresenta o circuito resultante dessa aproximação, o qual será considerado para o desenvolvimento matemático.

Figura 5.8 – Circuito simplificado para análise matemática da transmissão da ondulação.



Fonte: Autor

A tensão de entrada V_{in} representa a componente fundamental de V_F com uma ondulação ΔV_F e um ângulo ϕ , enquanto a tensão de saída (V_{out}) representa a componente fundamental de V_{LED_HF} . Uma vez que a corrente do filtro (I_f) (5.15) polariza os diodos da ponte retificadora de saída, I_f e V_{out} apresentam o mesmo ângulo (θ). A impedância série de L_f , C_f e R_{LED_ac} é representada por Z_f , cujo módulo é apresentado em (5.16).

$$I_f \angle \theta = \frac{V_{in} \angle \phi - V_{out} \angle \theta}{Z_f \angle \phi} \quad (5.15)$$

$$|Z_f| = \sqrt{(R_{LED_ac})^2 + \left(\omega L_f - \frac{1}{\omega C_f} \right)^2} \quad (5.16)$$

Considerando θ como o ângulo de referência ($\theta = 0^\circ$) é possível redefinir (5.15), originando (5.17).

$$I_f \angle 0^\circ = \frac{V_{in} \angle \phi - V_{out} \angle 0^\circ}{Z_f \angle \phi} \quad (5.17)$$

Visto que ϕ é desconhecido e que a diferença entre os ângulos ($\phi - \theta$) variam durante a operação do CSR, a corrente I_f pode ser encontrada a partir da decomposição da tensão de entrada, como apresentado em (5.18), (5.19), (5.20) e (5.21).

$$V_{in} \cos(\phi) = V_{out} \angle 0^\circ + \text{Re}(Z_f) I_f \angle 0^\circ \quad (5.18)$$

$$V_{in} \sin(\phi) = \text{Im}(Z_f) I_f \angle 0^\circ \quad (5.19)$$

$$\cos(\phi)^2 + \sin(\phi)^2 = 1 \quad (5.20)$$

$$\left(\frac{V_{out} \angle 0^\circ + \text{Re}(Z_f) \cdot I_f \angle 0^\circ}{V_{in} \angle \phi^\circ} \right)^2 + \left(\frac{\text{Im}(Z_f) \cdot I_f \angle 0^\circ}{V_{in} \angle \phi^\circ} \right)^2 = 1 \quad (5.21)$$

Onde V_{in} é a tensão eficaz do aplicada ao filtro ressonante, dada por (5.22), a qual é utilizada para cálculo da tensão de barramento (5.24).

$$|V_{in}| = \sqrt{[V_{out} \angle 0^\circ + \text{Re}(Z_f) \cdot I_f \angle 0^\circ]^2 + [\text{Im}(Z_f) \cdot I_f \angle 0^\circ]^2} \quad (5.22)$$

$$V_B = \frac{\pi \sqrt{2} V_{in}}{2} \quad (5.23)$$

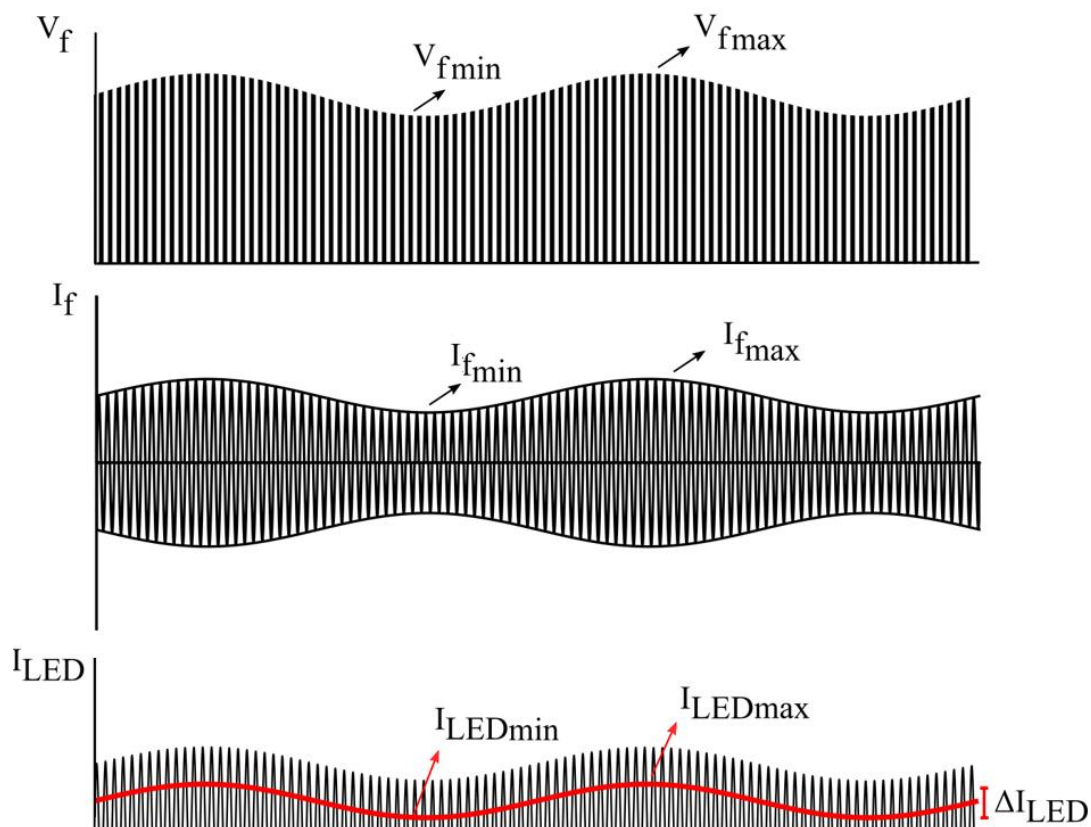
Como pode ser observado em (5.17), para a tensão de entrada máxima a corrente I_f é máxima, enquanto para uma mínima tensão de entrada a corrente I_f é mínima. Assim, a corrente I_f máxima e mínima que resolve (5.21) pode ser calculada.

De posse da corrente que circula no filtro ressonante, pode-se calcular a corrente nos LEDs. Isso é possível uma vez que I_{LED} é a média da corrente do filtro após essa ser retificada. Assim, a corrente máxima nos LEDs (I_{LEDmax}) e a corrente mínima nos LEDs (I_{LEDmin}) podem ser encontradas. As formas de onda envolvidas nesse procedimento matemático são apresentadas na Figura 5.9. Dessa forma é possível calcular a ondulação de corrente absoluta (5.24) e percentual (5.25).

$$\Delta I_{LED} = I_{LEDmax} - I_{LEDmin} \quad (5.24)$$

$$\Delta I_{LED} (\%) = \frac{\Delta I_{LED}}{I_{LED}} \cdot 100 \quad (5.25)$$

Figura 5.9 - Formas de onda do CSR



Fonte: Autor

5.3.3 Comprovação da metodologia proposta

5.3.3.1 Análise teórica

A fim de se realizar uma análise teórica do comportamento da ondulação de corrente expresso pelo equacionamento proposto foi considerada uma lâmpada LED composta por 10 LEDs, modelo Luxeon Rebel ES, conectados em série, operando com uma corrente de 350 mA, conforme apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Característica da lâmpada utilizada para validação da metodologia proposta.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Quantidade de LEDs	N_{ld}	10
Tensão de joelho da lâmpada	V_J	27,8 V
Resistência intrínseca da lâmpada	R_S	5,66 Ω
Corrente média da lâmpada	I_{LED}	350 mA
Potência da lâmpada	P_{LED}	10,4 W

Fonte: Autor

Foram utilizados para a ondulação de tensão de barramento $\Delta V_B(\%) = 10\%$ e $\Delta V_B(\%) = 30\%$ e três filtros ressonantes, conforme apresentado na Tabela 5.2.

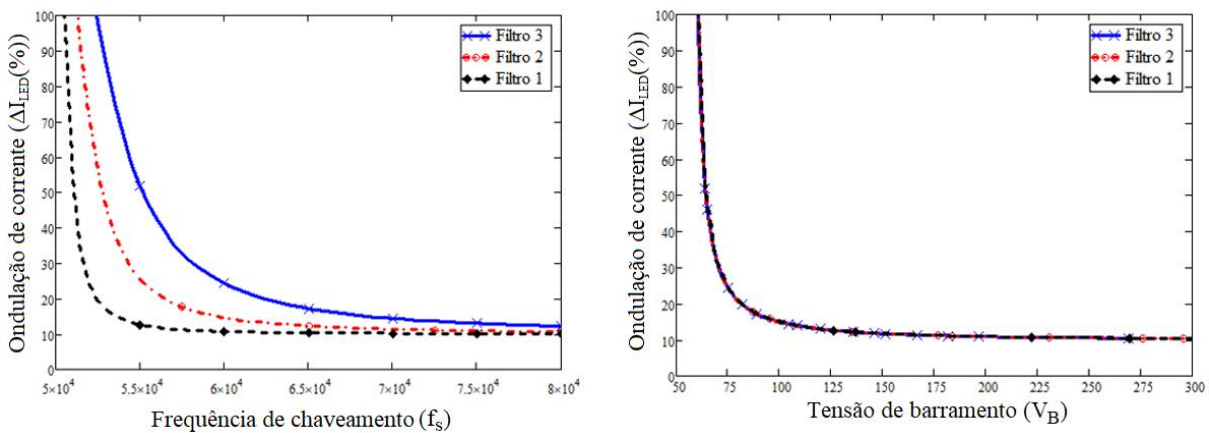
Tabela 5.2 - Filtros ressonantes utilizados para validação da metodologia proposta

Filtro	Componente	Valor	Fator de qualidade	Frequência de ressonância
Filtro ressonante 1	L_f	2,1 mH	Q1 = 9,81	$f_R = 50$ kHz
	C_f	4,7 nF		
Filtro ressonante 2	L_f	844 μ H	Q2 = 3,84	$f_R = 50$ kHz
	C_f	12 nF		
Filtro ressonante 3	L_f	460 μ H	Q3 = 2,1	$f_R = 50$ kHz
	C_f	22 nF		

Fonte: Autor

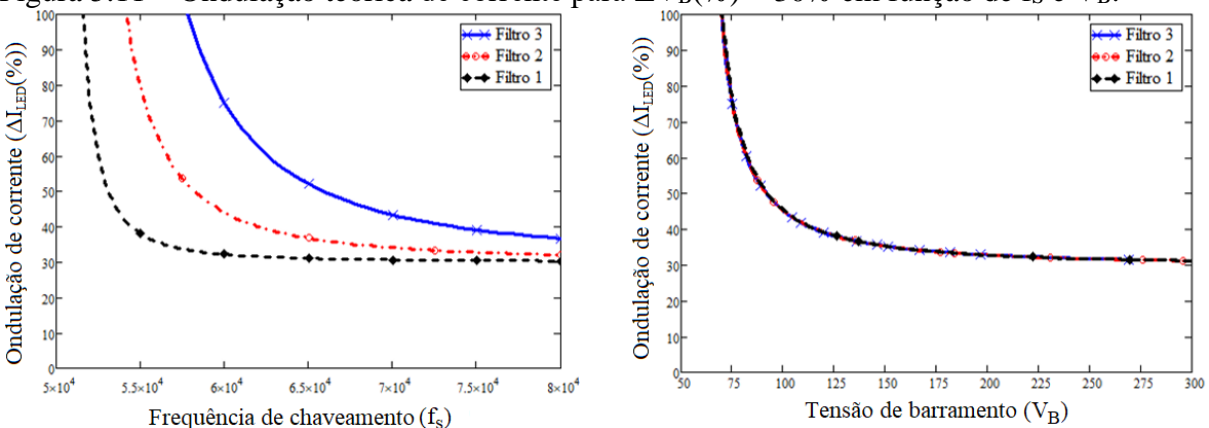
A análise do comportamento da transmissão da ondulação foi realizada conforme apresentado na Figura 5.6(b). A Figura 5.10 apresenta o comportamento de $\Delta I_{LED}(\%)$ considerando $\Delta V_B(\%) = 10\%$ para os três filtros propostos em função de f_s e V_B . A Figura 5.11 apresenta essa mesma análise para $\Delta V_B(\%) = 30\%$.

Figura 5.10 - Ondulação teórica de corrente para $\Delta V_B(\%) = 10\%$ em função de f_s e V_B .



Fonte: Autor

Figura 5.11 – Ondulação teórica de corrente para $\Delta V_B(\%) = 30\%$ em função de f_s e V_B .



Fonte: Autor

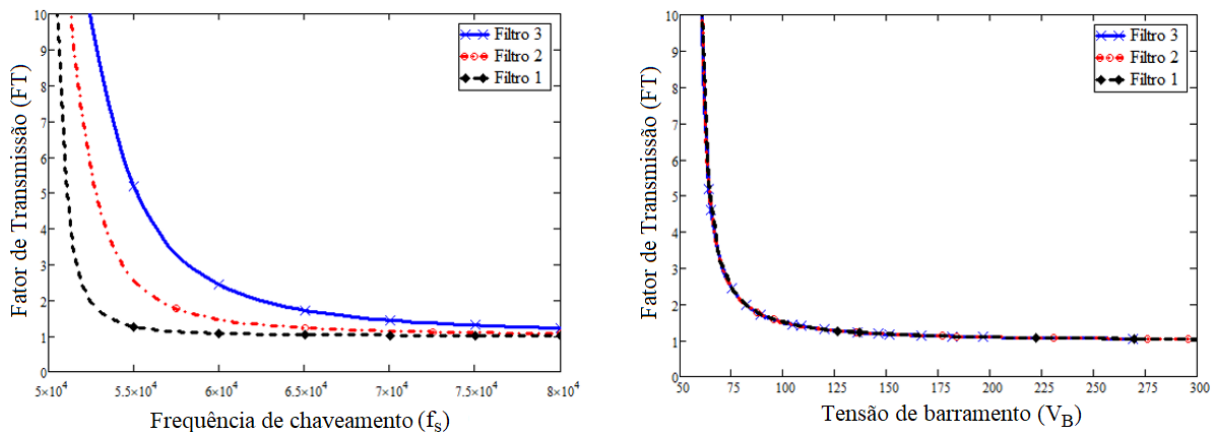
Importantes conclusões podem ser obtidas dessa análise. Independentemente do filtro utilizado, $\Delta I_{LED}(\%)$ é determinada por V_B . Além disso, $\Delta I_{LED}(\%)$ estabiliza no mesmo valor de $\Delta V_B(\%)$, ou seja, $\Delta I_{LED}(\%)$ é no mínimo igual a $\Delta V_B(\%)$. Também se pode dizer que a análise em função da V_B e de f_s são complementares, uma vez que $\Delta I_{LED}(\%)$ pode ser definida em função de V_B e baseado nessa ondulação de corrente definir Q e f_s do CSR. É importante mencionar que a definição de f_s influencia na quantidade de potência reativa circulante no filtro, uma vez que quanto mais afastado da f_R maior é a potência reativa. Como comentado anteriormente, f_s também tem influência no tamanho dos componentes passivos do filtro, fator bastante importante quando o espaço físico para alojamento do *driver* é reduzido. É importante ressaltar que f_R não influencia no comportamento da transmissão da ondulação, podendo os resultados serem apresentados para uma frequência normalizada em relação a frequência de ressonância ($\Omega = f_s/f_R$).

Para facilitar a análise e projeto desses conversores será utilizado como parâmetro um fator de transmissão (FT) de ondulação, definido por (5.26), o qual representa quantas vezes maior é $\Delta I_{LED}(\%)$ em relação a $\Delta V_B(\%)$.

$$FT = \frac{\Delta I_{LED}(\%)}{\Delta V_B(\%)} \quad (5.26)$$

Os gráficos da Figura 5.12 apresentam o comportamento do FT em função de f_s e V_B . É possível perceber que utilizando-se o FT a análise passa a ser independente de $\Delta V_B(\%)$, sendo $FT = 1$ ($\Delta I_{LED}(\%) = \Delta V_B(\%)$) a menor taxa de transmissão de ondulação para o CSR, conforme apresentado na Figura 5.10 e na Figura 5.11.

Figura 5.12 - Fator de transmissão da ondulação no CSR em função de f_s e V_B .



Fonte: Autor

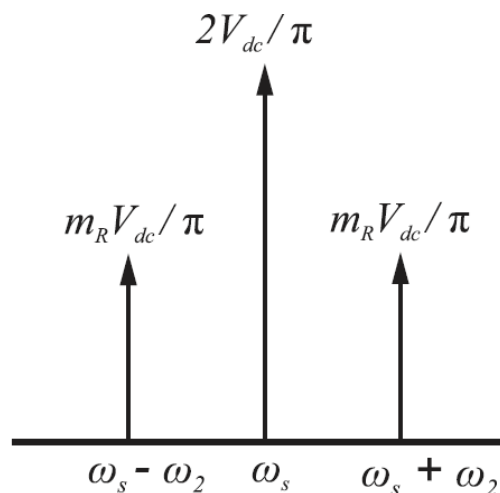
Uma vez que esse trabalho propõe a análise do comportamento da transmissão de ondulação, a partir desse momento os resultados serão apresentados apenas em função de V_B . Uma análise mais detalhada de energia reativa circulante no tanque ressonante, frequência de operação, tamanho dos componentes reativos, entre outras características, pode ser verificada em (ALMEIDA, 2014).

Deve-se ressaltar que a conclusão de que $\Delta I_{LED}(\%)$ é no mínimo igual a $\Delta V_B(\%)$ foi realizada considerando uma frequência de chaveamento bastante elevada, na ordem de dezenas de kHz. Em (SANTOS, 2017) foi realizada uma investigação que considera a propagação da ondulação em baixa frequência baseada na teoria de modulação por amplitude - AM (do inglês, *amplitude modulation*), a qual será brevemente discutida a seguir. A componente fundamental e as harmônicas ímpares da tensão de entrada do circuito ressonante são moduladas em amplitude, possuindo três componentes, como pode ser observado na Figura 5.13.

1. A componente central em frequência angular ω_s ;
2. A componente da raia inferior em frequência angular $\omega_s - \omega_2$, e
3. A componente da raia superior em frequência angular $\omega_s + \omega_2$.

Onde: ω_s é a frequência angular de chaveamento e ω_2 a frequência angular do dobro da frequência da rede.

Figura 5.13 – Espectro da tensão de entrada do circuito tanque.



Fonte: (SANTOS, 2017)

A ondulação de corrente em baixa frequência no conversor série ressonante está associado com a magnitude de ganho da raia inferior ($\omega_s - \omega_2$) e raia superior ($\omega_s + \omega_2$) do espectro. Assim, para frequências de chaveamento reduzidas, onde as raias inferior e superior

se distanciam da raia central, é possível obter valores para $\Delta I_{LED}(\%)$ menores do que $\Delta V_B(\%)$. No entanto, para que esse mesmo efeito ocorra para frequências de comutação elevadas, se faz necessário um filtro com fator de qualidade bastante elevado e, conseqüentemente, uma indutância bastante elevada, uma vez que as componentes de raia inferior ($\omega_s - \omega_2$) e superior ($\omega_s + \omega_2$) ficarão muito próximas da componente central (ω_s) (SANTOS, 2017). Essa condição ainda não é alcançada devido as limitações tecnológicas, assim como uma redução na frequência de comutação traz como consequência circuitos bastante volumosos e pesados.

5.3.3.2 Análise Experimental

Para a validação da análise apresentada foram realizados testes experimentais considerando os filtros e a lâmpada estudada na seção anterior, os quais são apresentados na Figura 5.14. A Tabela 5.4 apresenta uma comparação entre o ponto de operação teórico e prático para cada aquisição apresentada na Figura 5.14. A Tabela 5.3 apresenta um resumo dos componentes utilizados nos protótipos. Para geração de V_B foi utilizada a fonte *Agilent 6812B AC Power Source/Analyzer*.

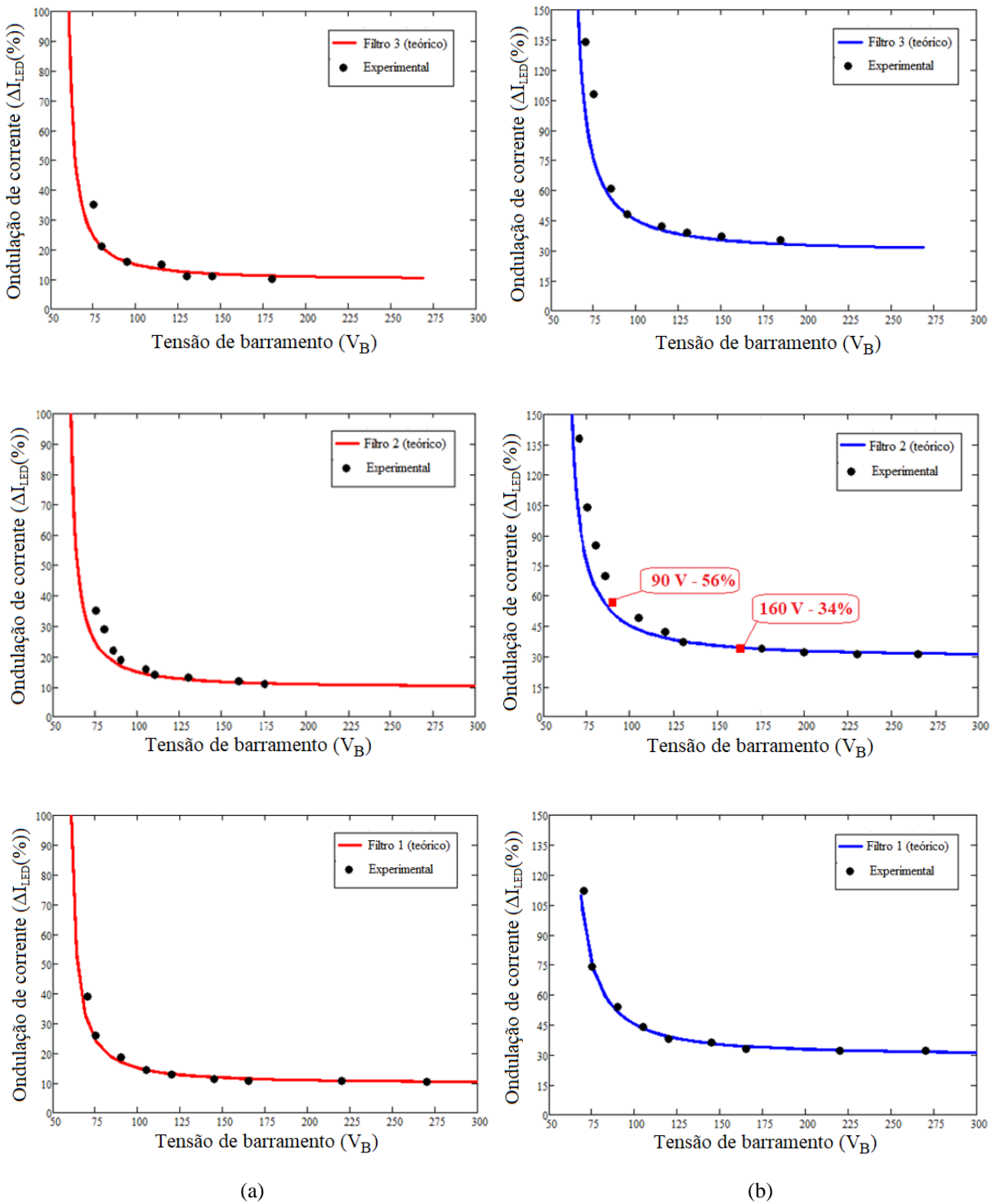
A fim de apresentar como foram levantados os pontos experimentais, duas aquisições são apresentadas a seguir para o filtro ressonante 2, considerando $\Delta V_B(\%) = 30\%$. A Figura 5.15 apresenta a aquisição para $V_B = 90\text{ V}$, enquanto a Figura 5.16 apresenta a aquisição para $V_B = 160\text{ V}$, as quais resultaram em $\Delta I_{LED}(\%) = 56\%$ e $\Delta I_{LED}(\%) = 34\%$ respectivamente.

Tabela 5.3 - Componentes utilizados nos testes experimentais.

Componente		Variável	Valor
Filtro 1	L_f	Indutância	2,1 mH
		Espiras/Condutor	120/AWG25
		Núcleo	E - 30/7
	C_f	Capacitância/Tensão	4,7 nF/400V
Filtro 2	L_f	Indutância	844 μ H
		Espiras/Condutor	91/AWG25
		Núcleo	E - 20
	C_f	Capacitância/Tensão	12 nF/400V
Filtro 3	L_f	Indutância	460 μ H
		Espiras/Condutor	31/AWG24
		Núcleo	E - 30/7
	C_f	Capacitância/Tensão	22 nF/400V
Interruptores		Modelo	IRF 830
Diodos da ponte retificadora		Modelo	BYV26C

Fonte: Autor

Figura 5.14 - Resultados experimentais vs. teóricos para (a) $\Delta V_B = 10\%$ e (b) $\Delta V_B = 30\%$



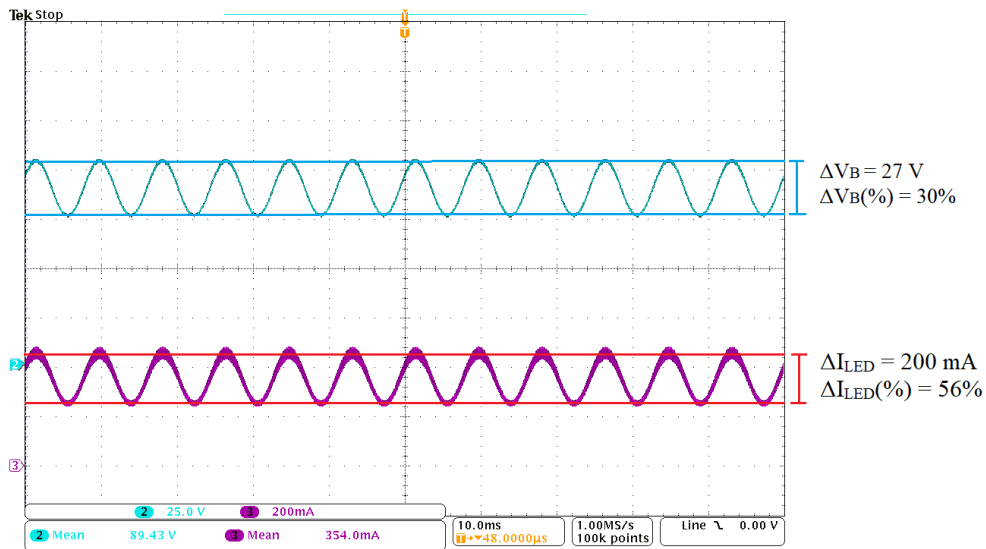
Fonte: Autor

Tabela 5.4 – Comparação entre o ponto de operação teórico e prático.

Filtro	$\Delta V_B = 10\%$			$\Delta V_B = 30\%$		
	Tensão (V)	Frequência		Tensão (V)	Frequência	
		Teórica (kHz)	Prática (kHz)		Teórica (kHz)	Prática (kHz)
Filtro 3	75	60	55	70	58	52
	80	62	61	75	60	55
	95	67	65	86	64	61
	117	74	70	95	67	65
	129	78	75	117	74	70
	145	83	80	130	78	75
	181	95	90	151	85	80
	-	-	-	184	96	90
Filtro 2	75	55	52	70	54	51
	80	56	53	75	55	52
	85	57	54	80	56	53
	89	58	55	85	57	54
	106	60	58	106	60	57
	109	61	59	120	63	60
	129	64	62	130	64	62
	161	69	65	174	71	68
	174	71	68	200	75	71
	200	75	71	231	80	75
267	86	80	267	86	80	
Filtro 1	70	51	49	70	51	49
	75	52	50	75	52	50
	90	53	51	90	53	51
	104	54	52	104	54	52
	121	55	53	121	55	53
	145	56	54	145	56	54
	165	57	55	165	57	55
	220	60	57	220	60	57
269	62	60	269	62	60	

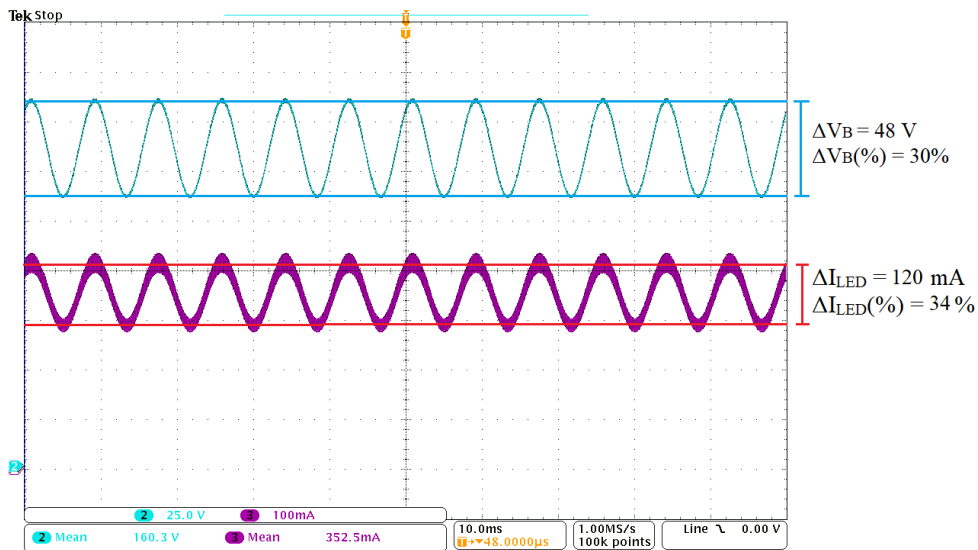
Fonte: Autor

Figura 5.15 – Resultado experimental para o filtro 2 e $\Delta V_B(\%) = 30\%$: $V_B = 89,4 \text{ V}$ (25V/div); $I_{LED} = 354 \text{ mA}$ (200mA/div); tempo (10ms/div).



Fonte: Autor

Figura 5.16 - Resultado experimental para o filtro 2 e $\Delta V_B(\%) = 30\%$: $V_B = 160,3 \text{ V}$ (25V/div); $I_{LED} = 352,5 \text{ mA}$ (100mA/div); tempo (10ms/div).



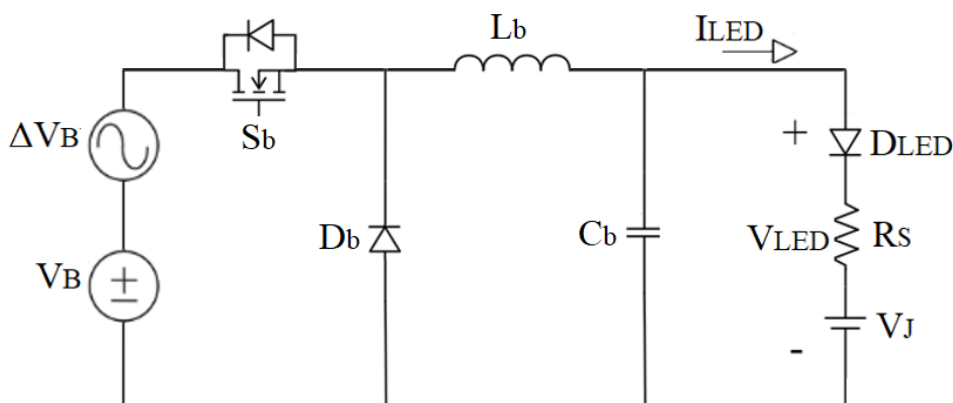
Fonte: Autor

Como se pode observar, os resultados experimentais apresentam-se de acordo com o apresentado na análise teórica e com o mesmo comportamento indicado na análise gráfica, validando dessa forma a metodologia apresentada para o cálculo da transmissão da ondulação de baixa frequência de $\Delta I_{LED}(\%)$ para $\Delta V_B(\%)$ quando utilizado o CSR.

5.4 CONVERSOR BUCK

O conversor Buck operando em modo de condução contínua - CCM (do inglês, *continuous conduction mode*) e modo de condução descontínua - DCM (do inglês, *discontinuous conduction mode*) será analisado pela mesma perspectiva da transmissão da ondulação. A Figura 5.17 apresenta a estrutura proposta do conversor Buck para essa análise.

Figura 5.17 - Conversor Buck



Fonte: Autor

5.4.1 Conversor Buck em modo de condução contínua

O ganho de tensão do conversor Buck operando em CCM (G_V) apresenta uma influência direta na tensão de saída e na ondulação de corrente sobre os LEDs. A tensão sobre os LEDs depende diretamente de G_V e V_B , como apresentado em (5.27).

$$V_{LED} = G_V V_B \quad (5.27)$$

Uma ondulação em V_B resulta em uma ondulação de tensão sobre os V_{LEDs} (5.28), a qual, por sua vez, resulta em uma ondulação de corrente em baixa frequência sobre os LEDs, apresentada em (5.29).

$$\Delta V_{LED} = G_V \Delta V_B \quad (5.28)$$

$$\Delta I_{LED} = \frac{\Delta V_{LED}}{R_s} = \frac{G_V \cdot \Delta V_B}{R_s} \quad (5.29)$$

A ondulação percentual de tensão no barramento do conversor Buck é dada por (5.30).

$$\Delta V_B (\%) = \frac{\Delta V_B}{V_B} 100 \quad (5.30)$$

Substituindo-se (5.30) em (5.29) resulta em (5.31), a qual representa a ondulação de corrente sobre os LEDs, e em (5.32), a qual representa a ondulação percentual de corrente sobre os LEDs.

$$\Delta I_{LED} = \frac{G_V V_B \Delta V_B (\%)}{R_S 100} \quad (5.31)$$

$$\Delta I_{LED} (\%) = \frac{G_V V_B \Delta V_B (\%)}{R_S I_{LED}} \quad (5.32)$$

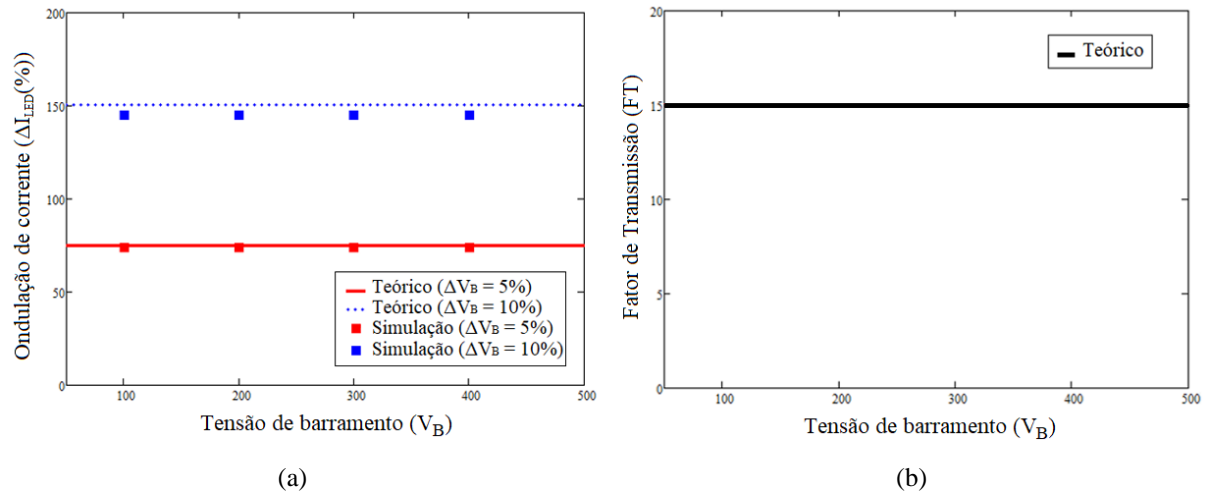
A fim de tornar essa análise dependente apenas dos parâmetros dos LEDs e da ondulação percentual da tensão de barramento, (5.27) é considerada em (5.32), originando (5.33).

$$\Delta I_{LED} (\%) = \frac{V_{LED} \Delta V_B (\%)}{R_S I_{LED}} \quad (5.33)$$

A fim de se analisar o comportamento da transmissão da ondulação quando se utiliza o conversor Buck operando em CCM é considerada a mesma carga utilizada para a análise do CSR, apresentada na Tabela 5.1. A Figura 5.18(a) apresenta o comportamento da ondulação para $\Delta V_B = 5\%$ e $\Delta V_B = 10\%$, enquanto a Figura 5.18(b) apresenta o FT para o conversor Buck CCM.

Pode-se observar que o conversor Buck operando em CCM apresenta uma elevada transmissão de ondulação. O mesmo comportamento linear de $\Delta I_{LED}(\%)$ em função de $\Delta V_B(\%)$ pode ser observado, possibilitando dessa forma a utilização do FT, o qual é igual a 15 para esse caso. É importante mencionar que o FT, por ser dependente apenas dos parâmetros do LED, pode apresentar variações para o conversor Buck CCM, conforme será apresentado posteriormente. Além disso, também por ser dependente apenas da carga de LED, $\Delta I_{LED}(\%)$ apresenta um comportamento constante independentemente do valor de V_B , conforme apresentado em (5.33).

Figura 5.18 – Comportamento da ondulação de corrente e do FT para o conversor Buck CCM.



Fonte: Autor

5.4.2 Conversor Buck em modo de condução descontínua

O equacionamento para o conversor Buck operando em DCM baseia-se em (ALONSO, 2012). Considerando um circuito sem perdas, a potência drenada na entrada do conversor (P_b) é totalmente entregue aos LEDs (P_{LED}), sendo a potência de saída definida por (5.34).

$$P_{LED} = I_{LED} V_{LED} = I_{LED}^2 R_S + I_{LED} V_J \quad (5.34)$$

Resolvendo (5.34) é possível encontrar I_{LED} , conforme apresentado em (5.35), e substituindo-se (5.35) em (5.34), obtém-se a tensão sobre os LEDs (5.36).

$$I_{LED} = \frac{-V_J}{2R_S} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{V_J}{R_S}\right)^2 + \frac{4P_b}{R_S}} \quad (5.35)$$

$$V_{LED} = \frac{V_J}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{V_J^2 + 4P_b R_S} \quad (5.36)$$

O ganho estático do conversor Buck DCM pode ser expresso por (5.37). A partir da derivada parcial de (5.37) encontra-se o fator de transformação de ripple (v) para o Buck DCM (5.38).

$$G_V = \frac{V_{LED}}{V_B} \quad (5.37)$$

$$v = \frac{\partial V_{LED}}{\partial V_B} \quad (5.38)$$

Assim, $\Delta I_{LED}(\%)$ pode ser calculado de acordo com (5.39).

$$\Delta I_{LED}(\%) = v \frac{\Delta V_B}{I_{LED} R_S} 100 \quad (5.39)$$

Necessita-se então para a determinação da ondulação percentual de corrente calcular v . Para isso, considera-se inicialmente a resistência equivalente do conversor (5.40).

$$R_{eq} = \frac{2f_s L}{D^2} \quad (5.40)$$

A corrente de entrada (I_b) do conversor Buck é dada pela integral da corrente no interruptor (i_s), conforme (5.41), enquanto a potência de entrada é dada por (5.42).

$$I_b = \frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} i_s dt = \int_0^{DT_s} \frac{(V_B - V_{LED})t}{L_b} dt = \frac{(V_B - V_{LED})}{R_{eq}} \quad (5.41)$$

$$P_b = V_B I_b = \frac{(V_B^2 - V_{LED} V_B)}{R_{eq}} \quad (5.42)$$

Assim, utilizando-se (5.42) é possível encontrar V_B , conforme apresentado em (5.43).

$$V_B = \frac{V_{LED}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{V_{LED}^2 + 4P_b R_{eq}} \quad (5.43)$$

Substituindo (5.43) em (5.36) é obtida a expressão para V_{LED} em função de V_B , como mostra (5.44).

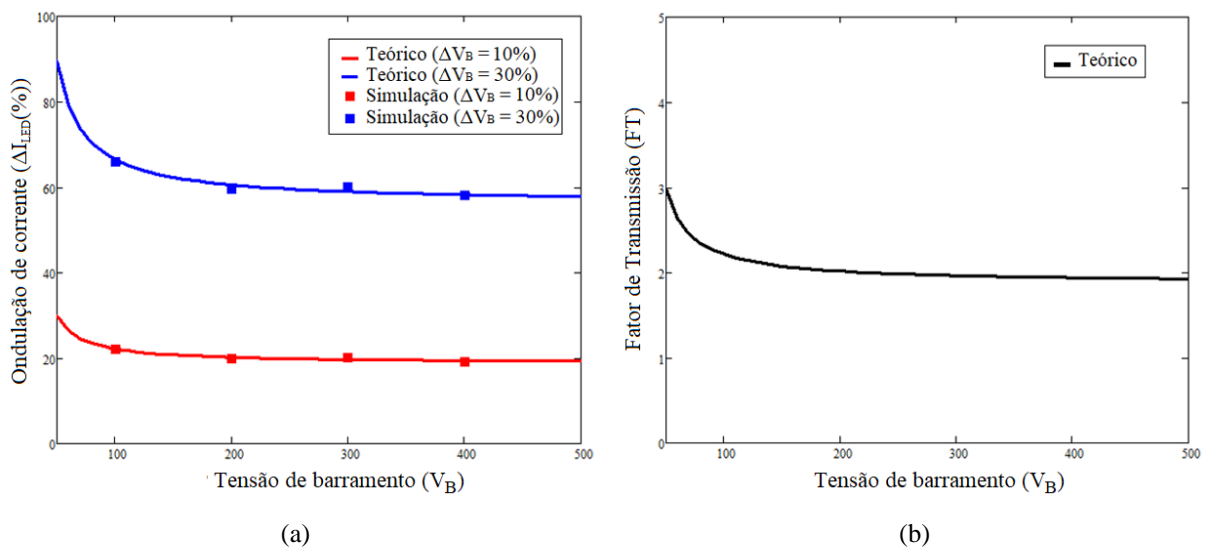
$$V_{LED} = \frac{V_J}{2} - \frac{V_B R_S}{2R_{eq}} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(V_J - \frac{V_B R_S}{R_{eq}} \right)^2 + \frac{4V_B^2 R_S}{R_{eq}}} \quad (5.44)$$

Conforme apresentado em (5.38), realizando-se a derivada parcial de V_{LED} em relação à V_B é encontrado v , conforme (5.45). Assim, (5.45) pode ser substituído em (5.39) a fim de se calcular $\Delta I_{LED}(\%)$.

A Figura 5.19(a) apresenta o comportamento da ondulação para $\Delta V_B = 10\%$ e $\Delta V_B = 30\%$, enquanto a Figura 5.19(b) apresenta o FT para o conversor Buck DCM. Pode-se observar que o conversor Buck operando em DCM apresenta uma transmissão de ondulação bastante reduzida quando comparado com o Buck CCM. Para o Buck DCM o FT mínimo observado é $FT = 2$, ou seja, no melhor caso $\Delta I_{LED}(\%) = 2\Delta V_B(\%)$.

$$v = \frac{R_s}{2R_{eq}} + \frac{1}{4} \frac{R_s \left(2V_B \frac{R_s}{R_{eq}} + 8V_B - 2V_J \right)}{\sqrt{\left(V_J - \frac{V_B R_s}{R_{eq}} \right)^2 + \frac{4V_B^2 R_s}{R_{eq}}}} \quad (5.45)$$

Figura 5.19 - Comportamento da ondulação de corrente e do FT para o conversor Buck DCM



Fonte: Autor

5.5 ANÁLISE COMPARATIVA E INFLUÊNCIA DO MODELO DO LED

Depois de realizado o equacionamento de $\Delta I_{LED}(\%)$ para o CSR e para o conversor Buck, operando em CCM e DCM, é apresentada uma análise comparativa da resposta desses conversores em relação à transmissão de ondulação. Visto que os parâmetros do LED apresentam influência na resposta do conversor, quatro modelos distintos de LEDs foram

considerados nessa análise: LED *mid power* (modelo Luxeon 3030 2D da Lumileds), *chip-on-board* (COB) LED (modelo BXRA-C4500 da Bridgelux), LED *high power* (modelo Luxeon Rebel ES da Lumileds) e o LED *mid power* (modelo 3535L da Lumileds), o qual foi utilizado no estudo PET apresentado no capítulo 4. A Tabela 5.5 apresenta um resumo dos parâmetros desses LEDs. Assim, quatro lâmpadas foram consideradas nesse estudo, cujas características são apresentadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.5 - Parâmetros dos LEDs utilizados na análise de transmissão de ondulação.

Parâmetro	Symbol	3030 2D	COB	Rebel ES	3535L	Unit
Corrente	I_f	0,12	2	0,7	0,094	A
Tensão	V_J	5,5	22,7	2,73	2,67	V
Resistência	R_s	5	1,35	0,66	3,3	Ω

Fonte: Autor

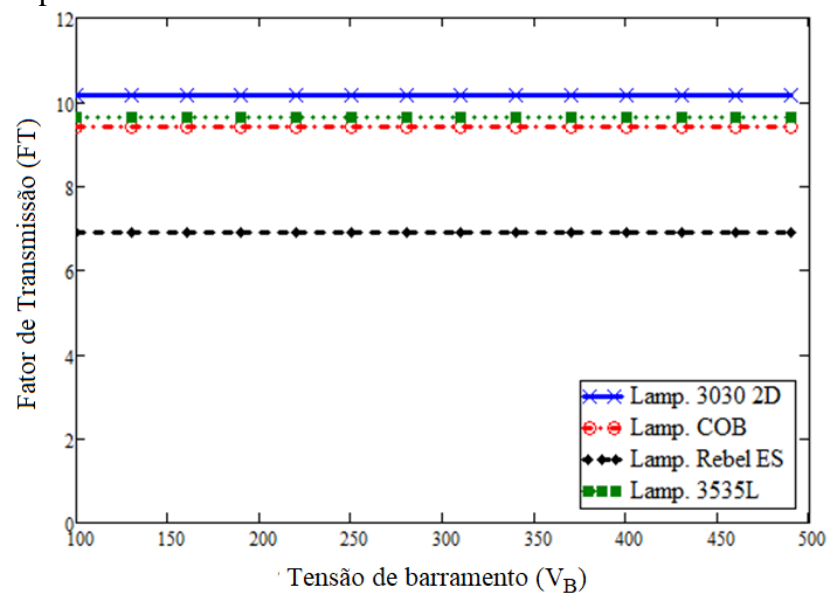
Tabela 5.6 - Parâmetros das lâmpadas LED utilizadas na análise de transmissão de ondulação.

Parâmetro	Símbolo	Lâmpada 1 (3030 2D)	Lâmpada 2 (COB)	Lâmpada 3 (Rebel ES)	Lâmpada 4 (3535L)	Unidade
Quantidade	N_{ld}	16	1	20	41	-
Corrente	I_{LAMP}	120	2000	700	94	mA
Tensão	V_{LAMP}	97,6	25,4	63,8	122,2	V
Resistência	R_{SLAMP}	80	1,35	13,2	13,2	Ω
Potência	P_{LAMP}	11,7	50,8	44,6	11,5	W

Fonte: Autor

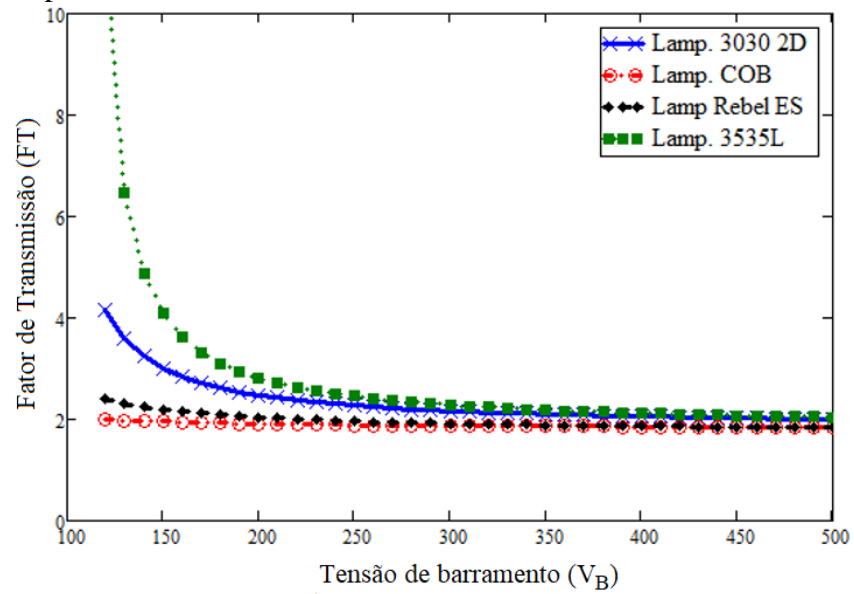
Considerando as quatro lâmpadas propostas, o FT para o conversor Buck CCM, Buck DCM e o CSR são apresentados na Figura 5.20, Figura 5.21 e Figura 5.22 respectivamente.

Figura 5.20 – FT para o Buck CCM



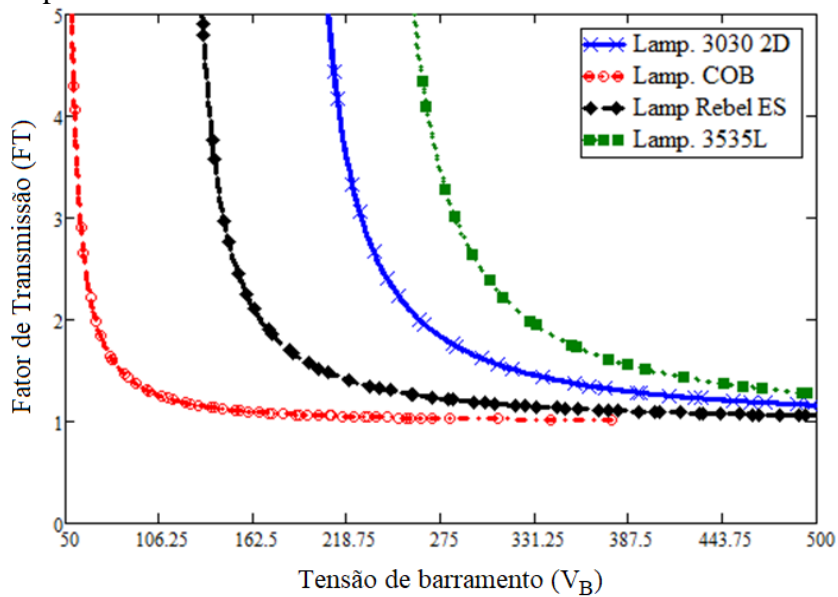
Fonte: Autor

Figura 5.21 – FT para o Buck DCM



Fonte: Autor

Figura 5.22 – FT para o CSR

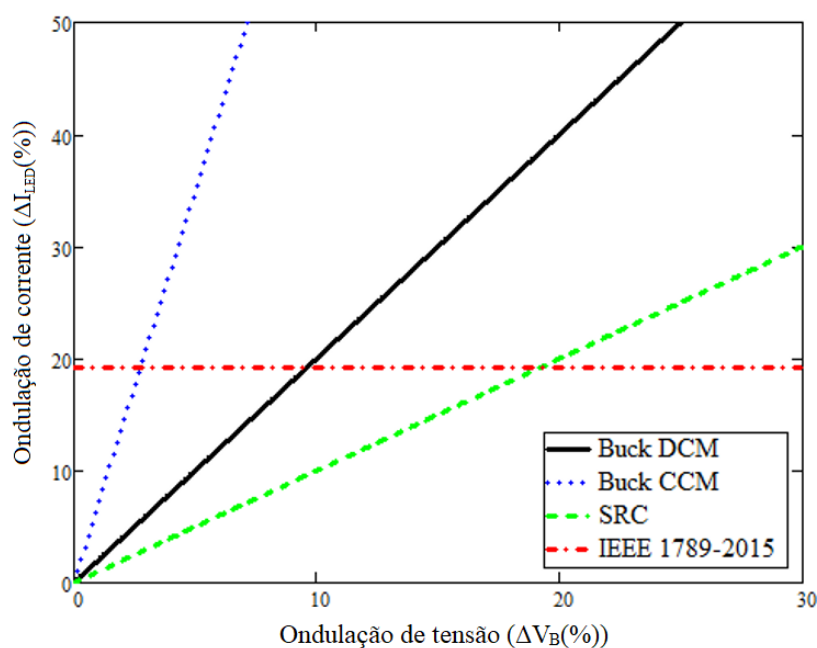


Fonte: Autor

O comportamento previamente apresentado na análise individual dos conversores foi mantido para as quatro lâmpadas analisadas. O comportamento do conversor Buck CCM manteve-se constante para toda a faixa da tensão de barramento e dependente do modelo do LED utilizado na lâmpada. No que diz respeito ao comportamento do conversor Buck DCM e do CSR ambos apresentam como característica a influência do modelo do LED no FT apenas para tensões de barramento mais baixas, visto que para tensões maiores o FT atinge o valor mínimo, independente do modelo do LED utilizado.

O FT mínimo para o conversor Buck CCM, para as lâmpadas consideradas nesse estudo, é aproximadamente 7. Para o conversor Buck DCM o FT mínimo praticável é igual a 2, ou seja, $\Delta I_{LED}(\%)$ é no mínimo o dobro de $\Delta V_{BUS}(\%)$. Para o CSR o FT mínimo praticável é igual a 1, sendo assim, $\Delta I_{LED}(\%)$ pode ser igual a $\Delta V_{BUS}(\%)$. Esses níveis mínimos de $\Delta I_{LED}(\%)$ em função de $\Delta V_{BUS}(\%)$ para cada conversor são apresentados na Figura 5.23. Além disso, o limite recomendado pela IEEE 1789-2015 (5.5) também é representado.

Figura 5.23 - Mínimo $\Delta I_{LED}(\%)$ em função de $\Delta V_B(\%)$ para o CSR e o conversor Buck.



Fonte: Autor

Assim, para atender os limites recomendados pela IEEE, $\Delta V_B(\%)$ para o Buck CCM deve ser menor do que 3%. Para o Buck DCM $\Delta V_B(\%)$ deve ser no máximo 9,5% e para o CSR é possível utilizar um $\Delta V_B(\%)$ de até 19%. Assim, uma maior ondulação da tensão de barramento é permitida no CSR, possibilitando a utilização de menores capacitâncias de barramento.

5.6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Visando comprovar a análise comparativa realizada, o conversor Buck DCM e o CSR foram implementados para a análise da transmissão de ondulação utilizando a lâmpada concebida na metodologia PET (Lamp. 3535L) apresentada na Tabela 5.6. Duas ondulações percentuais de tensão de barramento são consideradas nessa análise $\Delta V_B(\%) = 5\%$ e $\Delta V_B(\%) = 10\%$. A lâmpada e a MCPCB utilizada nos testes são apresentadas na Figura 5.24.

Figura 5.24 - Lâmpada utilizada nos testes experimentais



Fonte: Autor

5.6.1 Buck DCM

O protótipo do conversor Buck é apresentado na Figura 5.25, sendo os componentes utilizados apresentados na Tabela 5.7. A Tabela 5.8 apresenta um resumo dos parâmetros utilizados na operação do conversor para cada ponto experimental. A curva teórica do Buck DCM para essa lâmpada juntamente com os pontos levantados experimentalmente e em simulação são apresentados na Figura 5.26. A Figura 5.27, Figura 5.28 e Figura 5.29 apresentam as aquisições obtidas para o Buck operando em DCM.

Figura 5.25 - Protótipo do conversor Buck



Fonte: Autor

Tabela 5.7 - Componentes utilizados no Buck DCM para realização dos testes experimentais.

Componente	Variável	Valor
Indutor	Indutância	2 mH
Capacitor	Capacitância	1 μ F/400V
Interruptor	Modelo	IRF 830
Diodo	Modelo	MUR 460

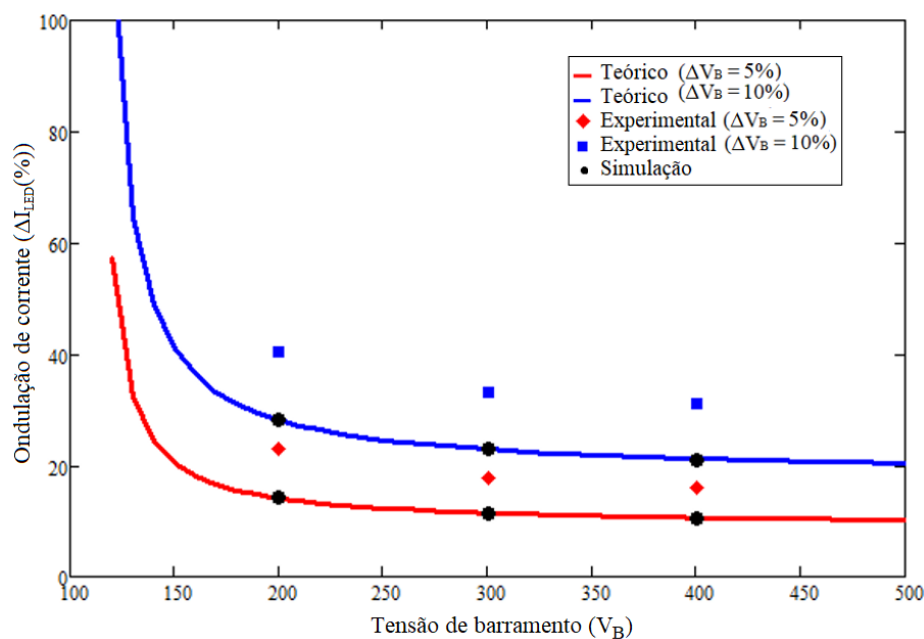
Fonte: Autor

Tabela 5.8 – Parâmetros utilizados em cada ponto de operação

Parâmetro	Ponto 1 (P1)	Ponto 2 (P2)	Ponto 3 (P3)
Tensão (V)	200	300	400
Razão cíclica (%)	42,1%	22,7%	15,7%
Fs (kHz)	60	60	60

Fonte: Autor

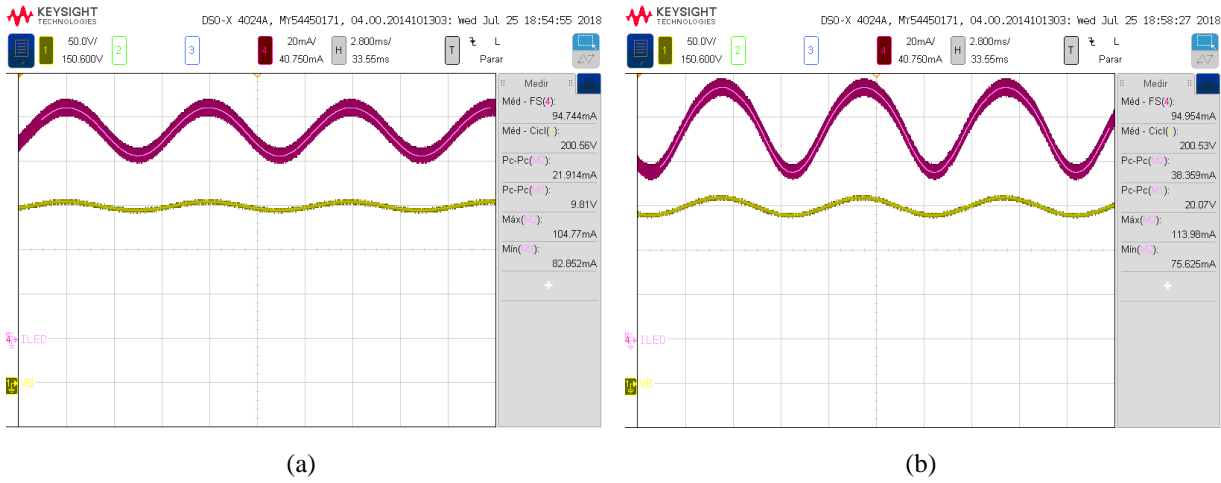
Figura 5.26 – Curva teórica e resultados experimentais e de simulação para o Buck DCM.



Fonte: Autor

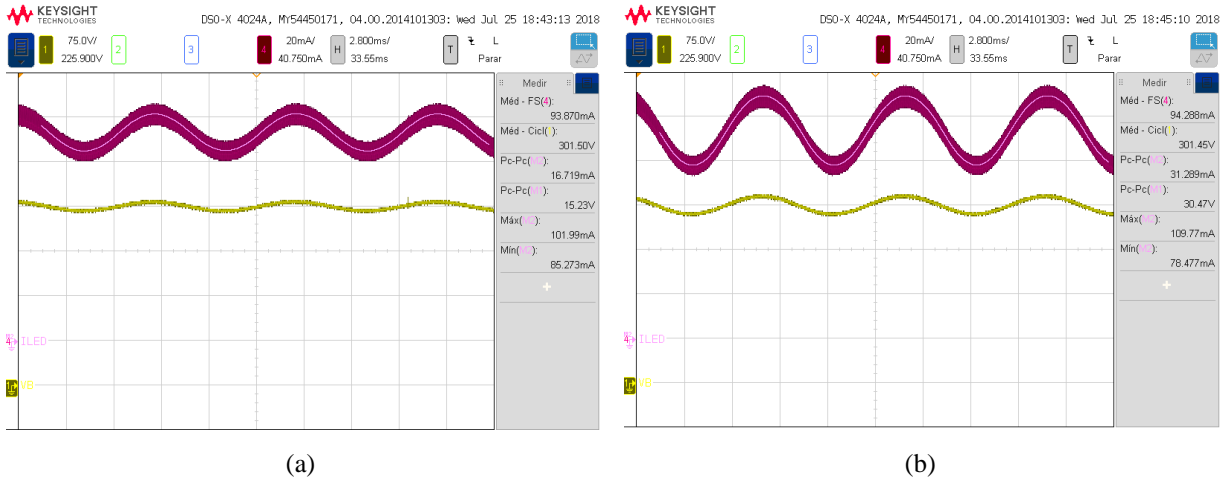
É possível verificar uma diferença significativa entre os resultados experimentais e teóricos para $\Delta I_{LED}(\%)$. No entanto, isso pode ser explicado pelo modelo do LED utilizado, o qual é altamente sensível à variação de tensão. Para exemplificar essa sensibilidade, a maior diferença entre os resultados teóricos e práticos obtidos corresponde a uma diferença de apenas 1,6 V em ΔV_{LED} , sendo $V_{LEDmed} = 122$ V. Ou seja, apenas 0,8 V acima e 0,8 V abaixo do que V_{LEDmax} e V_{LEDmin} calculados causa essa diferença em $\Delta I_{LED}(\%)$, considerando o modelo equivalente do LED. Esse efeito é bastante reduzido e os resultados são bem mais precisos quando se utilizam outros modelos de LED, com corrente média mais elevada, reduzindo assim o efeito na ondulação percentual.

Figura 5.27 - Resultado experimental - Buck DCM ($V_B = 200\text{ V}$) (a) $\Delta V_B=5\%$; (b) $V_B=10\%$.



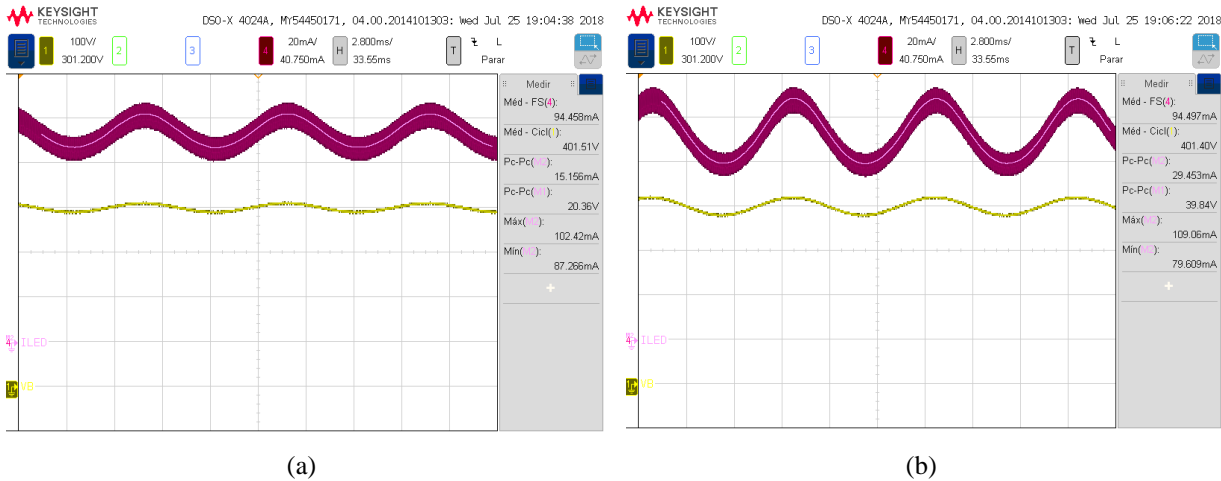
Fonte: Autor

Figura 5.28 - Resultado experimental - Buck DCM ($V_B = 300\text{ V}$) (a) $\Delta V_B=5\%$; (b) $\Delta V_B=10\%$.



Fonte: Autor

Figura 5.29 - Resultado experimental - Buck DCM ($V_B = 400\text{ V}$) (a) $\Delta V_B=5\%$; (b) $\Delta V_B=10\%$.

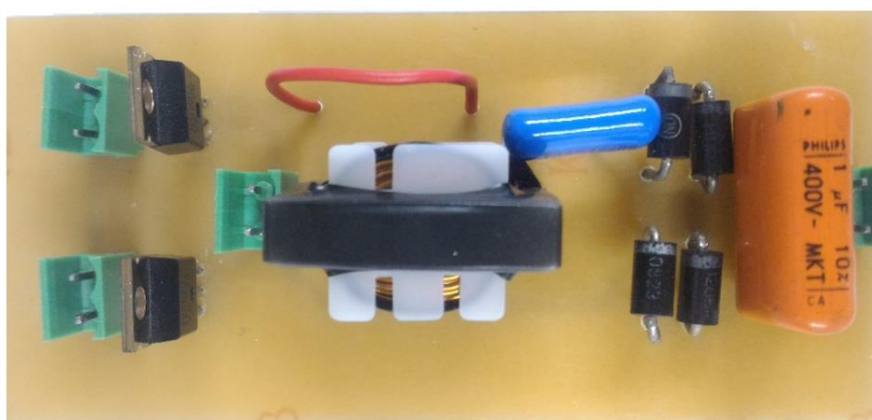


Fonte: Autor

5.6.2 CSR

O protótipo do CSR é apresentado na Figura 5.30, sendo os componentes utilizados apresentados na Tabela 5.9. A Tabela 5.10 apresenta um resumo dos parâmetros utilizados na operação do conversor para cada ponto experimental. A curva teórica do CSR para essa lâmpada juntamente com os pontos levantados experimentalmente são apresentados na Figura 5.31. A Figura 5.32, Figura 5.33 e Figura 5.34 apresentam as aquisições obtidas para o CSR.

Figura 5.30 – Protótipo do CSR



Fonte: Autor

Tabela 5.9 - Componentes utilizados no CSR para realização dos testes experimentais.

Componente	Variável	Valor
Indutor do filtro	Indutância	2,1 mH
Capacitor do filtro	Capacitância/Tensão	12 nF/400V
Capacitor	Capacitância/Tensão	1μF/400V
Interruptores	Modelo	IRF 830
Diodos da ponte retificadora	Modelo	MUR 420

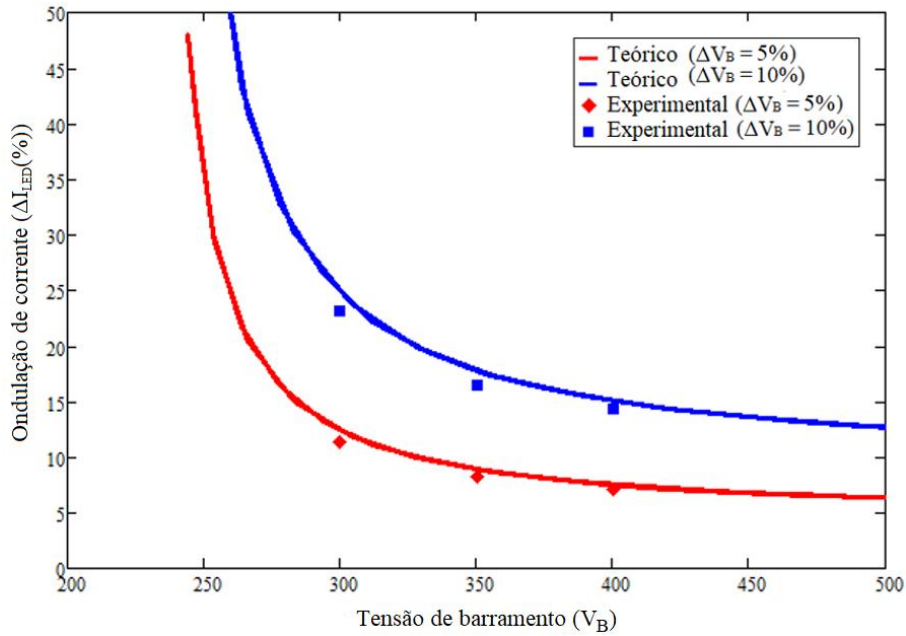
Fonte: Autor

Tabela 5.10 – Parâmetros utilizados em cada ponto de operação.

Parâmetro	Ponto 1 (P1)	Ponto 2 (P2)	Ponto 3 (P3)
Tensão (V)	300	350	400
fs (kHz)	53	57	60

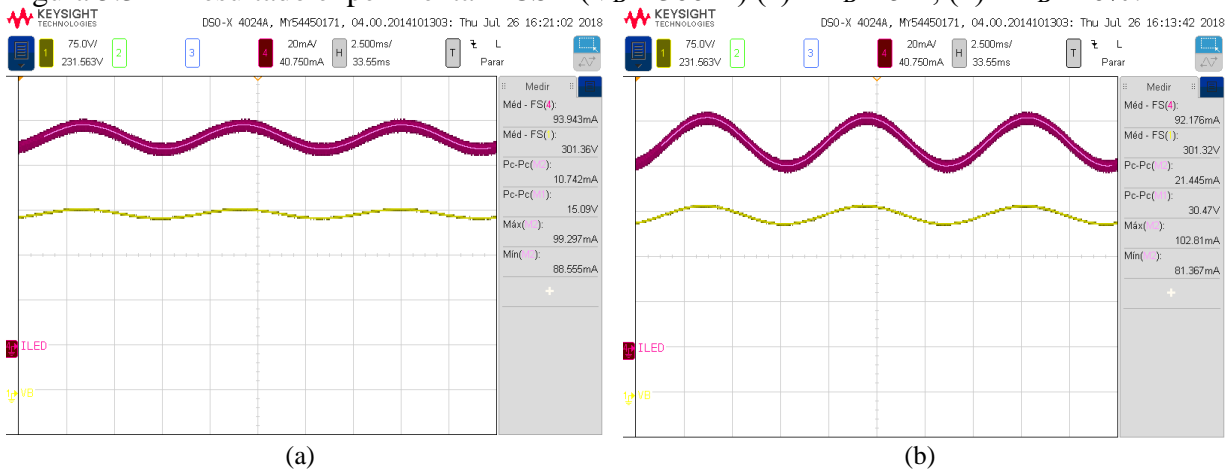
Fonte: Autor

Figura 5.31 - Curva teórica e pontos obtidos experimentalmente para o CSR.



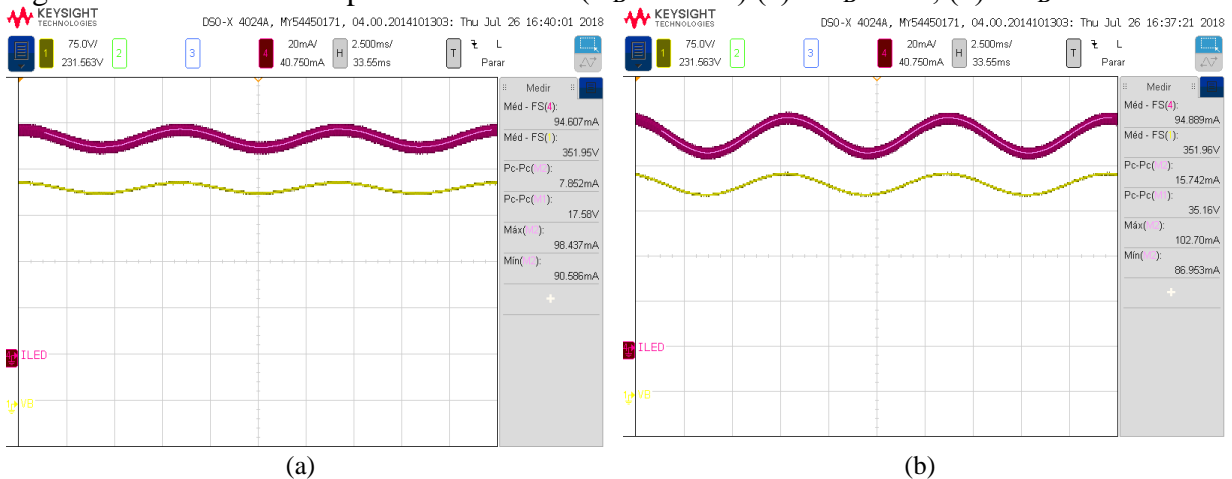
Fonte: Autor

Figura 5.32 - Resultado experimental - CSR ($V_B = 300\text{ V}$) (a) $\Delta V_B = 5\%$; (b) $\Delta V_B = 10\%$.



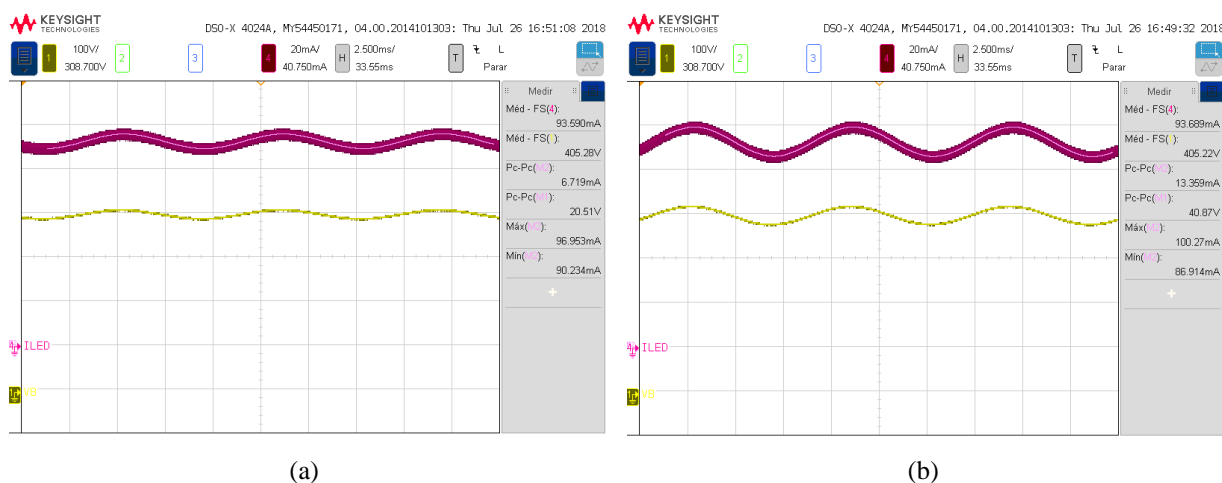
Fonte: Autor

Figura 5.33 - Resultado experimental - CSR ($V_B = 350\text{ V}$) (a) $\Delta V_B = 5\%$; (b) $\Delta V_B = 10\%$.



Fonte: Autor

Figura 5.34 - Resultado experimental - CSR ($V_B = 400\text{ V}$) (a) $\Delta V_B = 5\%$; (b) $\Delta V_B = 10\%$.



Fonte: Autor

5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Foi apresentada nesse capítulo uma abordagem em relação ao circuito de acionamento para lâmpadas LED com ênfase na transmissão da ondulação da tensão de barramento para a corrente nos LEDs, considerando o estágio de controle de potência. Essa transmissão foi estudada por dois motivos principais, os quais são: possibilidade de redução da capacitância de barramento e redução da ondulação de corrente sobre os LEDs.

A redução do valor da capacitância de barramento pode ser realizada uma vez que a transmissão dessa ondulação para a corrente dos LEDs é atenuada. Assim, é possível permitir uma maior ondulação na tensão de barramento mantendo a ondulação na corrente dos LEDs em níveis aceitáveis. Como principal consequência dessa melhoria está a possibilidade de se evitar a utilização de capacitores eletrolíticos, os quais podem comprometer a vida útil da lâmpada, e até mesmo possibilitar a utilização de capacitores de menor volume e custo, fator preponderante em uma lâmpada LED bulbo. No que diz respeito à redução da ondulação de corrente nos LEDs, essa redução é bastante desejável visto que a mesma pode causar risco a saúde do observador e danos e variações nas características dos LEDs.

O circuito que apresentou um melhor comportamento em relação a essa transmissão de ondulação foi o Conversor Série Ressonante, o qual além de manter simplicidade e eficiência desses sistemas apresentou uma transmissão de ondulação unitária, ou seja, a mesma ondulação percentual da tensão de barramento foi verificada na ondulação de corrente sobre os LEDs. Por apresentarem características semelhantes, o conversor ressonante foi comparado ao conversor Buck, o qual é amplamente utilizado em sistemas comerciais de iluminação. O

conversor Buck CCM apresentou o pior comportamento, com uma transmissão de ondulação bastante elevada, embora essa característica dependa do modelo do LED utilizado no sistema. O Conversor Buck operando em DCM apresentou uma transmissão de ondulação igual a dois, ou seja, a ondulação percentual de corrente sobre os LEDs é o dobro da ondulação percentual da tensão de barramento. Também foi apresentado que para se atender os limites recomendados pela IEEE para a ondulação de corrente sobre os LEDs, a ondulação percentual da tensão de barramento para o Buck CCM deve ser menor do que 3%. Para o Buck DCM deve ser no máximo 9,5% e para o CSR é possível uma ondulação de até 19%. Assim, uma maior ondulação da tensão de barramento é permitida no CSR, possibilitando a utilização de menores capacitâncias de barramento.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Este trabalho aborda um contexto geral a respeito das lâmpadas utilizadas em sistemas residenciais e comerciais de iluminação. Uma das fontes de iluminação mais tradicionais desses sistemas, as lâmpadas incandescentes, foram abolidas do mercado nacional por se tratarem de uma tecnologia ultrapassada, ineficiente, com elevado consumo de energia elétrica e reduzida vida útil. Assim, uma significativa lacuna no mercado foi criada no que diz respeito à iluminação residencial e comercial. As tecnologias mais recentes em iluminação e que vêm naturalmente substituindo as incandescentes são as lâmpadas fluorescentes compactas e as lâmpadas bulbo LED. Pode-se dizer que as lâmpadas LED, embora sejam tecnologias mais recentes do que as fluorescentes compactas, já apresentam diversas vantagens que viabilizam sua utilização. Dentre essas principais vantagens, pode-se citar longa vida útil, elevada eficácia luminosa, sustentabilidade ambiental e economia de energia. Duas dessas características merecem destaque atualmente, como sustentabilidade ambiental, tema que motiva diversas pesquisas e esforços, e economia de energia, devido ao elevado montante de energia consumida pelos sistemas de iluminação e, conseqüentemente, ao elevado potencial de economia de energia.

O principal obstáculo que ainda impede a disseminação das lâmpadas LED é o custo inicial, o qual é elevado quando comparado com outras tecnologias. No entanto, como apresentado no trabalho, o custo das lâmpadas vem sendo reduzido, sendo essa projeção ainda mais favorável considerando uma estimativa de custo para os próximos anos. Estudos de viabilidade econômica demonstram que a utilização de lâmpadas LED já é financeiramente viável nos dias atuais, considerando sua elevada vida útil e consumo reduzido de energia. Outro fator que dificultava a disseminação dessas lâmpadas é a qualidade de alguns modelos que eram comercializados. Porém, as recentes normativas exigem requisitos mínimos que as lâmpadas devem atender, forçando os fabricantes a melhorarem a qualidade de seus produtos. No Brasil, os requisitos apresentados pela portaria do INMETRO nº 389 devem ser obrigatoriamente contemplados na lâmpada. Essas lâmpadas também são passíveis de receberem os selos voluntários, PROCEL e Energy Star, os quais garantem uma qualidade ainda superior a esses produtos.

Porém, para que se usufrua desses aspectos positivos dos LEDs, faz-se necessário um projeto térmico, óptico e elétrico bastante criterioso, o qual pode ser considerado mais

complexo do que para outras tecnologias de iluminação. É nesse aspecto que esse trabalho apresenta uma importante contribuição, sendo concebida uma lâmpada LED bulbo de maneira criteriosa, considerando as normativas e contemplando um desenvolvimento adequado de todos esses quesitos, contribuindo assim com a qualidade das lâmpadas LED para aplicações residenciais e comerciais. Um dos primeiros passos para a concepção de uma lâmpada LED é a aplicação da metodologia PET, a qual integra os aspectos ópticos, elétricos e térmicos da lâmpada. Nessa etapa são definidas as especificações desejadas para o sistema, como fluxo luminoso, eficácia luminosa, vida útil, entre outros. Como contribuição nesse aspecto, foi apresentada e aplicada uma metodologia que evita testes experimentais ou de simulação, os quais envolvem equipamentos de elevado custo e um maior tempo para o projeto. Assim, a metodologia apresentada no trabalho traz algumas melhorias que possibilitam realizar o projeto utilizando apenas os dados apresentados na folha de dados do LED. Essas melhorias são referente à obtenção do coeficiente k_h sem testes experimentais, definição de um E_0 dinâmico e consideração dos parâmetros térmicos na potência do LED.

Tendo posse das especificações da lâmpada, as quais foram obtidas na realização do projeto PET, pode ser realizado o projeto do circuito eletrônico. Dentre as características resultantes do projeto PET estão o número de LEDs que devem ser empregados na lâmpada, a corrente direta a ser aplicada nesses LEDs e a potência elétrica da lâmpada. Como diversos trabalhos apresentam estudos envolvendo a concepção de circuitos eletrônicos para alimentação de LEDs, nesse trabalho foi dado ênfase na transmissão da ondulação da tensão de barramento para a corrente nos LEDs, a qual ocorre através do estágio de controle de potência. Essa transmissão apresenta uma grande influência no capacitor de barramento do circuito e na corrente nos LEDs. Visto que o capacitor de barramento pode ser o ponto crítico da vida útil da lâmpada, principalmente com a utilização de capacitores eletrolíticos, é desejado que se possa reduzir o valor dessas capacitâncias. Além disso, uma elevada ondulação na corrente dos LEDs pode causar riscos ao observador e mudança nas características ópticas da lâmpada. O circuito que apresentou um melhor comportamento em relação a essa transmissão de ondulação foi o Conversor Série Ressonante, o qual além de manter simplicidade e eficiência desses sistemas apresentou uma transmissão de ondulação unitária, ou seja, a mesma ondulação percentual da tensão de barramento foi verificada na ondulação de corrente sobre os LEDs.

6.2 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições deste trabalho são:

- a) Revisão a respeito das principais normas e requisitos que as lâmpadas LED devem respeitar;
- b) Aplicação de uma metodologia PET para projeto do sistema de iluminação sem a necessidade de realização de testes experimentais;
- c) Estudo da transmissão da ondulação de baixa frequência da tensão de barramento para a corrente nos LEDs em estágios de controle de potência, comparando o comportamento do Conversor Série Ressonante com o conversor Buck;
- d) Projeto de uma lâmpada LED bulbo completa de acordo com as exigências ópticas, térmicas e elétricas apresentadas pelas normativas brasileiras e selos de qualidade de energia.

6.3 PUBLICAÇÕES

6.3.1 Publicações relacionadas ao tema da tese:

- I. Design Methodology for Led Lighting Systems Based On Photo-electro-thermal Interrelationships. Publicado em *Eletrônica de Potência (SOBRAEP)*, Vol.: 23, nº 3, 2018.
- II. Design Space for LED Systems Considering Photoelectrothermal Aspects. Publicado em *IEEE Industry Applications Society (IAS) Annual Meeting*, Portland, OR, USA, 2016.
- III. Analysis of low-frequency current ripple transmission in series-resonant LED drivers. Publicado em *Electronics Letters (IET)*, Vol.: 51, Issue: 9, 2015.
- IV. Sistema e método para alimentação de lâmpadas LED bulbo. **Nº BR 10 2015 032822-2**, 29 nov. 2015. Agência de Inovação e Transferência de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria.

- V. Analysis of series-resonant LED driver applied to reduce the low-frequency current ripple transmission. Publicado em IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) Annual Meeting, Buzios, Brazil, 2015.
- VI. Self-oscillating series-resonant LED driver applied to reduce low-frequency current ripple transmission. Publicado em IEEE Industry Applications Society (IAS) Annual Meeting, Addison, TX, USA, 2015.

6.3.2 Outras publicações:

- I. LED Driver Based on Input Current Shaper Without Electrolytic Capacitor. Publicado em IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.: 64, Issue: 6, 2017.
- II. Bidirectional Grid-Tie Flyback Converter Applied to Distributed Power Generation and Street Lighting Integrated System. Publicado em IEEE Transactions on Industry Applications (TIA), Vol.: 51, Issue: 6, 2015.
- III. Conversor flyback bidirecional conectado à rede elétrica aplicado a um sistema de microgeração e iluminação pública. Publicado em Eletrônica de Potência (SOBRAEP), Vol.: 20, nº 1, 2015.
- IV. Fast Dynamics Current Control of DCM Flyback as PFC Front Converter for Lighting Applications. Publicado em IEEE Industry Applications Society (IAS) Annual Meeting, Addison, TX, USA, 2015.
- V. High-Power-Factor LED Driver based on Input Current Shaper using a Flyback Converter. Publicado em IEEE Industry Applications Society (IAS) Annual Meeting, Addison, TX, USA, 2015.

6.4 OPORTUNIDADES DE TRABALHOS FUTUROS

Como oportunidade de trabalhos futuros pode-se destacar:

- Ampliação das análises abordadas para outros filtros ressonantes e conversores CC-CC.

- Análise do impacto de algumas especificações de projeto do filtro ressonante, como fator de qualidade e frequência de chaveamento, em quesitos como rendimento, circulação de energia reativa, densidade de potência e volume do circuito do acionamento.

- Uma análise detalhada dos valores necessários de capacitores de barramento nesses circuitos, verificando possibilidades e tecnologias que podem ser empregados no mesmo.

- Implementação do circuito completo, com uma análise do estágio PFC e a possibilidade de integração desses estágios, mantendo a análise de transmissão de ondulação para esses circuitos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. S. et al. **Application of series resonant converters to reduce ripple transmission to LED arrays in offline drivers.** Electronics Letters, v. 49, n. 6, p. 414–415, 2013.
- ALMEIDA, P. S. **Síntese de conversores ressonantes com alto fator de potência e alta eficiência para o acionamento de diodos emissores de luz.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014.
- ALONSO, J. M. et al. **Reducing storage capacitance in off-line LED power supplies by using integrated converters.** IEEE Industry Applications Society, Annual Meeting, p. 1–8, 2012.
- ARIAS, M. et al. **High-efficiency LED driver without electrolytic capacitor for street lighting.** IEEE Transactions on Industry Applications, v. 49, n. 1, p. 127–137, 2013.
- ARIK, M.; PETROSKF, J.; WEAVERY, S. **Thermal challenges in the future generation solid state lighting applications: light emitting diodes.** p. 113–120, 2002.
- BAEK, J.; CHAE, S. **Off-line buck LED driver for series connected LED segments.** IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, p. 1506–1510, 2017.
- BENDER, V. C. **Metodologia de Projeto Eletrotérmico de LEDs Aplicada ao Desenvolvimento de Sistemas de Iluminação Pública.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.
- BENDER, V. C. et al. **Design methodology for light-emitting diode systems by considering an electrothermal model.** IEEE Transactions on Electron Devices, v. 60, n. 11, p. 3799–3806, 2013.
- BIBER, C. **LED Light Emission as a Function of Thermal Conditions.** Twenty-fourth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, p. 180–184, 2008.
- BRIDGELUX. **Effective Thermal Management of Bridgelux LED Arrays.** p. 1–22, 2011.
- CAMPONOGARA, D. et al. **Capacitance reduction with an optimized converter connection applied to LED Drivers.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 62, n. 1, p. 184–192, 2015.
- CHEN, H. T. et al. **Reduction of Thermal Resistance and Optical Power Loss Using Thin-Film Light-Emitting Diode (LED) Structure.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 62, n. 11, p. 6925–6933, 2015.
- CHEN, H. T.; TAO, X. H.; RON HUI, S. Y. **Estimation of optical power and heat-dissipation coefficient for the photo-electro-thermal theory for LED systems.** IEEE Transactions on Power Electronics, v. 27, n. 4, p. 2176–2183, 2012.

CHEN, W.; RON HUI, S. Y. **Elimination of an electrolytic capacitor in AC/DC light-emitting diode (LED) driver with high input power factor and constant output current.** IEEE Transactions on Power Electronics, v. 27, n. 3, p. 1598–1607, 2012.

CHERN, T. L. et al. **Single-stage Buck type LED lighting driver with new design of current integral control.** IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA, p. 2197–2202, 2011.

CHIES, L. et al. **Improved design methodology for LED Lamps.** IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics, p. 1196–1201, 2015.

CHIES, L. et al. **Design space for LED systems considering photoelectrothermal aspects.** IEEE Industry Application Society (IAS), Annual Meeting, p. 1–8, 2016.

CHIES, L. **Aprimoramento da Estimativa do Fluxo Luminoso e Metodologia de Projeto para Sistemas de Iluminação que Utilizam Diodos Emissores de Luz.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

CHUANG, Y. C. et al. **Implementation and analysis of an improved series-loaded resonant DC-DC converter operating above resonance for battery chargers.** IEEE Transactions on Industry Applications, v. 45, n. 3, p. 1052–1059, 2009.

COSETIN, M. R. **Análise e desenvolvimento de sistema eletrônico de iluminação com leds de potência empregando conversor ressonante e indutor variável** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

COSETIN, M. R. et al. **Single-stage SEPIC-Buck converter for LED lighting with reduced storage capacitor.** Industrial Electronics Society (IECON), Annual Conference, p. 4597–4603, 2012.

COUTINHO, R. P. et al. **Three-Phase Resonant Switched Capacitor LED Driver With Low Flicker.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 7, 2017.

DA ROSA, W. G. et al. **Design Approach for a Self-Oscillating Resonant Converter Operating in High-Frequency for LED Applications.** IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, v. 6, n. 3, p. 1154–1165, 2018.

DALLA COSTA, M. A. et al. **A single-stage high-power-factor electronic ballast based on integrated buck flyback converter to supply metal halide lamps.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 55, n. 3, p. 1112–1122, 2008.

DIODES, W. L.; CHEN, H.; HUI, S. Y. R. **Dynamic Prediction of Correlated Color Temperature and Color Rendering Index of Phosphor-Coated.** IEEE Transactions on Industrial Electronics v. 61, n. 2, p. 784–797, 2014.

DOE SSL PROGRAM. **Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products,** U.S. Department of Energy Report, 2012.

DOE SSL PROGRAM. **Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications.** U.S. Department of Energy Report, 2014.

DOE SSL PROGRAM. **R & D Plan**. U.S. Department of Energy Report, 2015.

DOE SSL PROGRAM. **Solid State Lighting 2017 Suggested Research Topics Supplement: Technology and Market Context**. U.S. Department of Energy Report, 2017.

DOU. **Diário Oficial da União. Portaria interministerial nº1.007**, 2010.

ENERGY STAR PROGRAM. Requirements for Lamps (Light Bulbs) Partner Commitments.

EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Ministério de Minas e Energia. 2017.

ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. **Fundamentals of Power Electronics**. 2ed, 2001.

BISOGNO, F. E. **Energy-related system normalization and decomposition targeting sensitivity consideration**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Chemnitz, 2006.

FERREIRA, A. R. **Iluminação do estado sólido, economia potencial de energia elétrica para o país**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do ABC, 2014.

GARCÍA, E. F. et al. **Variable Frequency Self-Oscillating Converter Applied as a LED Driver**. IEEE International Autumn Meeting on Power Electronics and Computing (ROPEC), p. 7–9, 2017.

GORYASHIN, N. N.; SIDOROV, A. S.; SOLOMATOVA, A. S. **LED driver based on zero-voltage-switching buck converter with on-time control**. International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM, v. 2, n. 1, p. 283–287, 2013.

GUCIN, T. N.; FINCAN, B.; BIBEROGLU, M. **A Series Resonant Converter Based Multi-Channel LED Driver with Inherent Current Balancing and Dimming Capability**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 8993, p. 1–11, 2018.

HARIYA, A. et al. **Five-Megahertz PWM-Controlled Current-Mode Resonant DC – DC Step-Down Converter Using GaN-HEMTs**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 51, n. 4, p. 3263–3272, 2015.

VOLTA LED CENTER, **Disponível em** <<http://www.voltaledcenter.com.mx/>> acessado em 19 de Julho de 2018.

HUI, S. Y. .; QIN, Y. X. **A general photo-electro-thermal theory for light emitting diode (LED) systems**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 24, n. 8, p. 1967–1976, 2009.

IBDA. Iluminação e Sustentabilidade. p. 3–7, 2015.

IEEE STANDARDS ASSOCIATION, **IEEE Recommended practices for modulating**

current in high-brightness LEDs for mitigating health risks to viewers. IEEE Power Electronics Society, 26 de março de 2015.

IES LM-79-08. Approved Method : Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products.

IESNA LM-80 TEST REPORT. p. 1–20, 2013.

INMETRO. **Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia.**

INTRAL. **Catálogo de Produtos**, 2018.

KIRSTEN, A. **Reator eletrônico para lâmpadas de descarga em alta pressão baseado no conversor biflyback inversor.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

KOJORI, H. A.; DEWAN, S. B.; LAVERS, J. D. **Steady-State Analysis and Design Optimization of an Inductor-Transformer Resonant DC-DC Converter.** IEEE Transactions on Industry Applications, v. 27, n. 3, p. 515–522, 1991.

LOUÇANO, N. R. **Eficiência energética em edifícios : Gestão do sistema iluminação Engenharia Industrial Ramo Engenharia Electrotécnica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Instituto Politécnico de Bragança, 2009.

LUZ, P. C. V. **Controle ressonante aplicado à redução de capacitância de barramento em conversores com estágios de potência integrados para alimentação de LEDs a partir da rede CA.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017..

LV, H.; LIU, S.; WU, X. **A High Power Buck Derived Non-isolated AC / DC LED Driver.** IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), 2015.

MAXIM. **Ensure Long Lifetimes from Electrolytic Capacitors : a Case Study in LED Light Bulbs Power Factor and Ripple: a Trade-Off.** p. 1–4, 2013.

MELO, M. F. et al. **Analysis of low-frequency current ripple transmission in series-resonant LED drivers.** Electronics Letters, v. 51, n. 9, p. 716–717, 2015.

MEYAARD, D. S. et al. **GaInN light-emitting diodes Analysis of the temperature dependence of the forward voltage characteristics of GaInN light-emitting diodes.** Applied Physics Letters, 2013.

MORAIS, L. C. **Estudo sobre o panorama da energia elétrica no Brasil e Tendências futuras.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), UNESP, 2015.

MORAIS, M. B. M. et al. **A comparative study the percent flicker and photometric measurement in three-phase and single-phase drivers.** Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), 2017.

MOUNIKA, D.; PORPANDISELVI, S. ADC. **Controlled Half-Bridge LC Series Resonant Converter for LED Lighting**. IEEE 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), p. 1037–1042, 2017.

MUSSOI, F. L. R. Resposta em Frequência - Filtros Passivos. p. 0–85, 2004.

OSRAM. **Catálogo de Produtos**, 2018.

P. SMALLWOOD. **How Big is the LED Lighting Market Going to Get?**, 2015.

PHILIPS. **Catálogo de Produtos**, 2018.

POPPE, A.; LASANCE, C. J. M. **On the Standardization of Thermal Characterization of LEDs**. IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, p. 151–158, 2009.

PORTARIA Nº 143 - INMETRO. **Regulamento técnico da qualidade para lâmpadas led com dispositivo de controle integrado à base**, 2015.

PORTARIA Nº 389 - INMETRO. **Regulamento técnico da qualidade para lâmpadas led com dispositivo de controle integrado à base**, 2014.

PROCEL INFO. **Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética**.

SAIKIA, M.; TOM, B. M. **LC series resonant converter based high power HBLED lamp driver with ZVS**. IEEE Annual India Conference (INDICON), 2016.

SANTOS, R. L. et al. **A charge-pump LED driver with PFC and low-frequency-flicker reduction**. Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), p. 1–7, 2017.

SANTOS, R. L. **Drivers para LEDs empregando o conceito *charge-pump* para redução do flicker**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação), Universidade Federal do Ceará, Sobral, 2017.

SOARES, G. M. et al. **Capacitance minimization in offline LED drivers using an active-ripple-compensation technique**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 32, n. 4, p. 3022–3033, 2017.

TEODOSESCU, P. D.; BOJAN, M.; MARSCHALKO, R. **Resonant LED driver with inherent constant current and power factor correction**. Electronics Letters, v. 50, n. 15, p. 1086–1088, 2014.

VALCHEV, V. C.; MAREVA, D. J.; YUDOV, D. D. **Analysis and Improvements of a Buck Converter Based LED Driver**. XXVI International Scientific Conference Electronics (ET), 2017.

WANG, Y. et al. **A Single-Stage LED Driver Based on Interleaved Buck – Boost Circuit and LLC Resonant Converter**. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, v. 3, n. 3, p. 732–741, 2015.

WHITE, B. et al. **An Average Current Modulation Method for Single Stage LED Drivers with High Power Factor and Zero Low Frequency Current Ripple.** IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, n. 99, 2015.

WILKINS, A. J. **Designing to Mitigate the Effects of Flicker Reducing risks to health and safety.** IEEE Power Electronics Magazine, September, p. 18–26, 2014.

WILKINS, A.; VEITCH, J.; LEHMAN, B. **LED lighting flicker and potential health concerns: IEEE standard PAR1789 update.** IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), p. 171–178, 2010.

WU, T.-F.; CHEN, Y.-K. **A systematic and unified approach to modeling PWM DC/DC converters based on the graft scheme.** IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation (IECON), v. 2, p. 1041–1046, 1996.

ZHANG, F.; NI, J.; YU, Y. **High power factor AC-DC LED driver with film capacitors.** IEEE Transactions on Power Electronics, v. 28, n. 10, p. 4831–4840, 2013.