

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA ELETRICA
PRISCILA COSTA RIBEIRO SILVA

**ESTUDO DAS TOPOLOGIAS DE *DRIVERS LED*: análise de fatores que influenciam o
tempo de vida útil e eficiência**

Varginha
2016

PRISCILA COSTA RIBEIRO SILVA

ESTUDO DAS TOPOLOGIAS DE *DRIVERS LED*: análise de fatores que influenciam o tempo de vida útil e eficiência

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel sob orientação do Prof. Me. Hugo Vieira.

**Varginha
2016**

PRISCILA COSTA RIBEIRO SILVA

ESTUDO DAS TOPOLOGIAS DE *DRIVERS LED*: análise de fatores que influenciam o tempo de vida útil e eficiência

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em / /

Prof. Me. Hugo Rodrigues Vieira

Prof. Me. Eduardo Henrique Ferroni

Prof. Esp. Roberto Lazarino do Prado Mudesto

OBS:

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a minha família e namorado pela confiança incondicional e motivação nos momentos em que duvidei que conseguiria superar os desafios. Também deixo meu muito obrigada a todos que, com boa intenção, colaboraram para a realização e conclusão deste trabalho.

A Ciência é mais do que um corpo de conhecimentos. Ela é um modo de pensar; um modo de interrogar ceticamente o Universo, com uma compreensão sensata da falibilidade humana. Se nós não formos capazes de fazer questionamentos céticos, de interrogar aqueles que nos dizem que algo é verdadeiro, de ser cético com relação àqueles em posição de autoridade, então nós estamos à mercê do próximo charlatão incoerente – político ou religioso – que aparecer entre nós.

Carl Sagan (1934 – 1996), astrônomo, astrofísico, cosmologista, autor e divulgador da Ciência.

RESUMO

Os sistemas *LED* estão em destaque no mercado, e sua implementação para as diversas aplicações ainda apresenta desafios para fabricantes e desenvolvedores. Este trabalho considera a importância que o *driver LED* possui para garantir a confiabilidade do sistema de iluminação como um todo, sendo responsável direto pelo seu tempo de vida útil e eficiência. Sendo que este estudo inicia-se apresentando os conceitos teóricos como o aquecimento da junção p-n dos semicondutores, a relação definida pela equação de Shockley entre corrente no *LED* e variações de tensão na carga. Em seguida é explicado quais são os blocos de circuito que compõem um *driver LED*, com ênfase no estágio de conversão CC-CC, cujo circuito é fundamental para determinar a eficiência, o fator de potência e vida útil do produto (devido aos capacitores eletrolíticos de filtragem). Em seguida, apresenta-se em detalhes os tipos de *drivers LED* disponíveis no mercado, principalmente quanto as topologias do controle de tensão e corrente para a carga; com objetivo de mostrar as vantagens e desvantagens de cada uma delas; a partir dessa comparação conclui-se que é necessário conhecimento técnico detalhado para selecionar aquela topologia mais adequada a cada aplicação específica. Como estudo de caso prático dos conceitos apresentados, realizou-se uma análise técnica comparativa entre duas amostras de engenharia de *Drivers para LED*, uma com topologia de tensão constante na carga (*ELECPower 100-277VCA – 48VDC*) e outra de corrente constante (*OSRAM OPTRONIC OT 9/10 24-350*). Nessa análise foram realizados ensaios de performance elétrica, mapeamento térmico dos componentes e levantamento do circuito elétrico esquemático. Para todos os ensaios buscou-se realizar uma comparação direta entre os dois *drivers* testados. Os resultados comprovam e mensuram a influência direta que fatores como a temperatura de operação e as variações de corrente na carga para a expectativa de vida útil, luminescência e eficiência dos *drivers LED*. Por fim, após analisadas as particularidades entre as duas topologias, o autor conclui que a escolha de uma topologia de corrente constante, que tenha um controle mais preciso e flexibilidade da corrente fornecida para a carga, seria a mais recomendada para ser utilizada com a recente tecnologia de *LED* orgânicos quando aplicados a iluminação. E ainda sugere que em um futuro breve topologias de conversores que possibilitem a substituição do capacitor eletrolítico por um capacitor de filme metálico ou de poliestireno serão predominantes no mercado, justamente por viabilizar um aumento, considerável da vida útil dos sistemas *LED*.

Palavras-chave: Topologias de conversores CC-CC. Vida útil e Eficiência. *Driver* de Tensão constante. *Driver* de Corrente Constante.

ABSTRACT

The LED systems are featured in the market, and its implementation for many applications presents challenges for manufacturers and product development. This work considers the importance that the LED driver has to ensure the reliability of a lighting system as a whole, being directly responsible for its life span and efficiency. In addition, this study begins by showing the theoretical concepts as junction p-n semiconductor heating, a mathematical relations defined by the equation of Shockley between current in the LED voltage and load variations. Next, will be explained what are the circuit blocks that make up a LED driver, with emphasis on conversion stage DC-DC, whose circuit is critical in determining the driver efficiency, power factor and product life span (due to electrolytic capacitors filtering). Then its presents in details the types of LED drivers on the market, especially as the topologies of voltage control and current load; in order to show the advantages and disadvantages of each one of them. Then, from this comparison, can be concluded that it is necessary detaILED technical knowLEDge to select the one most appropriate topology for each specific application. As a practical study case, the concepts presented are exemplified through a comparative technical analysis of two LED Drivers engineering samples, one with constant voltage topology in charge (ELECPOWER 100-277VCA - 48VDC) and another with constant current (OSRAM OPTRONIC OT 9/10 24-350). In this analysis will be tested an electrical performance, a thermal map of the most important components and an electrical circuit schematic. After that, some direct comparison between the two LED drivers made through lab tests. The results confirm and measure how some factors such as operating temperature and current load variations directly influence in the LED drivers life span, luminescence and efficiency. Finally, after analyzing the characteristics between the two topologies, the author concludes that the choice of a constant current topology, which had more precise current output control to the load, are recommended to use with recent technology of organic LEDs when applied to outdoor lighting. Also suggests that in a near future topologies of converters that allow the replacement of the electrolytic capacitor by a film capacitor will be predominant in the market, because will enable a large increase in the LED systems life span and efficiency.

Keywords: *Topologies of DC-DC converters. Life Span and Efficiency. Constant voltage Driver. Constant current Driver.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva característica corrente-tensão e seus respectivos gaps.....	6
Figura 2: Efeitos das resistências parasitas na curva característica do diodo GaAs.....	7
Figura 3: Blocos de circuitos inclusos no estágio de entrada do <i>driver LED</i>	9
Figura 4: Blocos no estágio de armazenamento de energia.	10
Figura 5: Blocos inclusos no estágio de saída do <i>driver</i>	10
Figura 6: Diagrama do funcionamento de um <i>Driver</i>	11
Figura 7: Circuito de um filtro EMI típico	12
Figura 8: Defasagem tensão e corrente em <i>Drivers</i> de baixo e alto fator de potência.	13
Figura 9: Operação não ideal da comutação dos transístores.....	20
Figura 10: Medição da conversão CC-AC alta frequência.	21
Figura 11: Reflexão interna de fótons em chips <i>LED</i>	22
Figura 12: componentes para gerenciamento térmico de módulos <i>LED</i>	23
Figura 13: Funcionamento de um <i>LED</i> encapsulado.....	23
Figura 14: Vida útil estimada de capacitores eletrolíticos.	25
Figura 15: Fluxograma de análise para <i>Drivers LED</i>	28
Figura 16: Bancada de ensaios 01.....	30
Figura 17: Bancada de ensaios 02 e 03.	30
Figura 18: Fonte de corrente contínua e analisador de componentes.	31
Figura 19: Fonte de tensão alternada variável.	31
Figura 20: Medidor de campo elétrico e indutância toroidal.	32
Figura 21: Medidor de temperatura:	32
Figura 22: Analisador de energia Xitron Technologies	32
Figura 23: Analisador de energia Yokogawa WT210.	33
Figura 24: Osciloscópio Lecroy 6030A 350 Mhz	33
Figura 25: Luxímetro	34
Figura 26: Diferença entre lux e lumens.	34
Figura 27: <i>Driver LED ELECPOWER 100-277VAC/ 48VDC - 0,6A</i>	35
Figura 28: Vista lateral do <i>Driver ELECPOWER 100-277VAC/ 48VDC -0,6A</i>	36
Figura 29: Vista inferior <i>Driver ELECPOWER 100-277VAC - 48VDC - 0,6A</i>	36
Figura 30: <i>Driver</i> de corrente constante <i>OPTRONIC OT 9/10 24-350 OSRAM</i>	36
Figura 31: Vista superior <i>Driver OPTRONIC OT 9/10 24-350 OSRAM</i>	37
Figura 32: Vista inferior <i>Driver OPTRONIC OT 9/10 24-350 OSRAM</i>	37
Figura 33: Ripple e ruídos na tensão e corrente - 100Vca	42

Figura 34: Ripple e ruídos na tensão e corrente - 139Vca	42
Figura 35: Ripple e ruídos na tensão e corrente - 200Vca	43
Figura 36: Ripple e ruídos na tensão e corrente - 250Vca	43
Figura 37: Topologia ‘Flyback’ do <i>OPTRONIC OT 9/10 24-350</i>	45
Figura 38: Esquemático do transformador isolador do Flyback.....	45
Figura 39: Gráfico do mapeamento térmico <i>DRIVER OPTRONIC OT 9/1024-350</i>	46
Figura 40: Gráfico do mapeamento térmico do <i>Driver LED ELECPOWER 48VDC</i>	47
Figura 41: Medição de temperatura do núcleo ferromagnético do indutor.	48
Figura 42: Medição da temperatura no enrolamento do indutor de saída.	49
Figura 43: Medição temperatura “bottom” da PCB.....	50
Figura 44: Medição nos transistores de comutação e dissipador térmico.	50
Figura 45: Fluxo luminoso e eficiência dependendo da temperatura.	52
Figura 46: Fluxo luminoso e eficiência dependendo da corrente fornecida a carga.....	52
Figura 47: Variação da eficácia luminosa com a corrente.	53
Figura 48: Sistema de iluminação <i>LED</i> e seus subsistemas.....	54
Figura 49: Exemplo de perdas do sistema óptico.	54
Figura 50: Eficiência do sistema <i>LED</i> e seus subsistemas.....	55
Figura 51: Eficácia Luminosa <i>LED</i> e previsão futura	56
Figura 52: Modelo de layout de processo de "Binning".	57
Figura 53: Ilustração representativa do processo sugerido.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Performance elétrica <i>Driver ELECPOWER</i> 48VDC - 0,6A.....	39
Tabela 2: Medição do THD com carga	40
Tabela 3: Regulação da corrente de saída	40
Tabela 4: Eficiência do <i>driver</i> x tensão de entrada.....	41
Tabela 5: Fator de potência para frequência de 60Hz.....	41
Tabela 6: Fator de potência para frequência de 50Hz.....	41
Tabela 7: Ripple e ruídos na corrente e tensão da carga.....	42
Tabela 8: Performance <i>OPTRONIC</i> 9/10 - 24/350.....	44
Tabela 9: Especificação do transformador isolador usado no Flyback.....	45
Tabela 10: Medições de temperatura <i>LED OPTRONIC</i> OT 9/10 24/350.....	47
Tabela 11: Medições de temperatura do <i>Driver ELECPOWER</i> 48VDC.....	48
Tabela 12: Tempo de vida do sistema <i>LED</i>	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Comparativo entre topologias de conversores CC-CC.....	15
Quadro 2: Comparação de fonte linear e fonte chaveada	18
Quadro 3: Comparativo entre <i>LED</i> e outras fontes de energia convencionais.....	24
Quadro 4: Lista de verificação para ensaio de <i>Drivers LED</i>	29
Quadro 5: Níveis de tensão e correspondentes classificações de segurança.....	38
Quadro 6: Performance <i>OPTRONIC 9/10 -24/350</i>	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	01
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	04
2.1 Diodos emissores de Luz	04
2.2 Características básicas sobre <i>LED</i>.....	05
2.2.1 Propriedades elétricas do <i>LED</i>	05
2.3 <i>Drivers</i> para acionamento de <i>LEDs</i>.....	08
2.4 Circuitos que compõem os <i>Drivers</i> para <i>LEDs</i>.....	08
2.5 Análise comparativa entre conversores CC-CC.....	13
2.6 <i>Drivers</i> com Tensão constante versus Corrente constante.....	15
2.7 Do controle de potência linear à Modulação por Largura de Pulso.....	17
2.7.1 Vantagens do PWM.....	19
2.8 Influência da temperatura na operação dos dispositivos <i>LED</i>.....	21
2.9 A influência do Capacitor Eletrolítico na vida útil do <i>Driver</i>.....	24
3 METODOLOGIA.....	27
3.1 Fluxograma de análise para <i>drivers LED</i>.....	27
3.2. Laboratório e equipamentos.....	29
4 ENSAIOS E RESULTADOS	35
4.1 Resultados do Ensaio de performance elétrica.....	38
4.2 Resultados do Ensaio de mapeamento térmico.....	45
4.3 Resultados da estimativa de vida útil e Eficiência.....	51
5 CONCLUSÃO.....	58
REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

O setor de iluminação vem renovando-se através de fontes de energia mais eficientes e com maior durabilidade. Exemplo disso é a tecnologia *LED*¹ (Diodo emissor de Luz), que continua evoluindo, e atualmente são realizados testes em laboratórios de pesquisa, visando aprimorar as propriedades dos *LEDs*, como eficiência luminosa, medida em lúmens por watts; melhorar a distribuição de luz através da expansão do foco usando refletores; otimizar a dissipação térmica para desacelerar o processo de degradação do componente; possibilitar o controle mais preciso da temperatura de cor e prolongar a vida útil em operação do sistema de iluminação como um todo.

Os *LEDs* estão rapidamente ganhando o mercado de iluminação como a fonte de luz mais recomendada para uma quantidade crescente de aplicações. Eles oferecem diversos benefícios, incluindo aumento da eficiência energética e menor custo com manutenção devido a sua maior durabilidade. No entanto, essas vantagens podem ser facilmente desperdiçadas caso algumas considerações importantes no projeto do sistema de iluminação sejam desconsideradas.

O conversor de acionamento, também chamado de *driver LED*, é considerado como o ponto fraco e aquele responsável pela queda do desempenho das soluções de iluminação *LED*. Isso ocorre porque os *LEDs* precisam ser acionados por uma fonte de corrente constante ou uma tensão contínua fixa, uma vez que uma sutil variação ou flutuação em ambos pode resultar em uma significativa diminuição da eficiência energética e luminescência do sistema. Além disso, as atuais topologias de conversores *CC-CC*² adotadas por esses *drivers* utilizam predominantemente capacitores eletrolíticos, que apresentam uma baixa expectativa de durabilidade comparada ao potencial de tempo que teria o sistema.

Como lâmpadas *LED* continuam ganhando mercado e expandindo suas possibilidades de aplicações, desenvolvedores de produtos e fabricantes estão empenhados em oferecer soluções que minimizem as falhas dos *drivers*. Sabendo que uma adequada especificação do *Driver LED* pode garantir uma melhor performance e prolongar a capacidade de luminescência, torna-se relevante a análise entre as topologias de *drivers* presentes no mercado, para verificar os fatores que influenciam na vida útil e eficiência desses.

Existem considerações importantes ao se projetar ou especificar um *driver* de

¹ Nota: Ao mencionar ‘Tecnologia LED’ considerar de modo geral como tecnologia de emissão de Luz por materiais de estado sólido, ou semicondutores. Diferente de ‘Tecnologia OLED’, que refere-se a material derivado de um polímero (por isso o termo orgânico) com propriedades de emissão de Luz com passagem de corrente.

² Conversor *CC-CC* é o nome dado a um circuito eletrônico que converte um nível de sinal contínuo para um nível menor, igual ou maior ao valor anterior.

acionamento para módulos *LED* em operação estável. Dentre elas, deve-se incluir que a simplicidade do circuito do *driver* deve ser compatível com a aplicação a qual se destina; sua eficiência energética, e também a compensação da relação direta entre temperatura, intensidade luminosa a ser atendida de acordo com o projeto luminotécnico e a vida útil em operação do sistema de iluminação como um todo.

O *driver LED* mais simples que pode ser projetado seria simplesmente um circuito que forneça uma fonte de tensão constante a carga, tal como uma bateria ou mesmo um circuito retificador na saída de um transformador. Porém esse produto possui outros importantes critérios que devem ser atendidos, como elevada eficiência energética (rendimento), interface a protocolos de controle para dimerização, acionamento programável, filtro de alta frequência (EMI) para amenizar harmônicas, correção do fator de potência e regulação de carga. Devido a isso a topologia de *driver LED* de tensão constante, com esses blocos de circuitos acessórios, são a opção geralmente preterida por fabricantes pelo menor custo e simplicidade, e frequentemente preterida pelos eletricitas pela sua familiaridade com funcionamento e compatibilidade dos níveis de tensão de saída entre os *LED* e demais circuitos auxiliares. Entretanto, esta topologia apresenta certos inconvenientes, em geral, quando consideramos o princípio de operação dos semicondutores, através da equação de Shockley percebemos que a corrente no diodo depende exponencialmente da tensão, portanto uma pequena variação na tensão do *driver* resulta em uma larga variação da corrente na carga, isso provoca uma maior elevação da temperatura de operação do *LED*, ou seja, o aumento significativo da corrente fornecida ao *LED* provoca sobreaquecimento no *driver* e no módulo *LED*. Em resumo, o *driver LED* eventualmente falha em operação muito antes da capacidade de durabilidade dos módulos *LED*, exigindo uma manutenção precoce no sistema de iluminação.

Visto isso, este trabalho objetiva realizar um estudo dos fatores que influenciam diretamente na vida útil e eficiência dos sistemas de iluminação *LED*. Pretende-se realizar uma análise comparativa entre as topologias de *drivers* com tensão constante e corrente constante. Objetivando demonstrar através de ensaios em laboratório quais os aspectos técnicos de cada topologia. Tem-se como expectativa concluir que *drivers LED* de corrente constante são a melhor opção de escolha aos responsáveis técnicos em projetos de iluminação “outdoor³” usando tecnologia *LED*.

Tanto o *LED* quanto o *OLED* são tecnologias relativamente novas, e devido a isso seu custo ainda é considerado alto quando comparado com outros tipos de iluminação

³ Sistema de iluminação ‘outdoor’ é o termo frequentemente usado para incluir sistemas de iluminação de maiores potências, como iluminação pública, iluminação de ambientes externos ou abertos.

convencional. No entanto, com a intensificação dos estudos nessa área, e a crescente necessidade por instalações energeticamente eficientes, as empresas vem aumentando o volume de produção e venda à medida em que surgem novas aplicações para adoção dos produtos relacionados à tecnologia *LED*. Assim, a tendência é que esse custo diminua e seja cada vez mais acessível a sua utilização. Com relação a durabilidade dos sistemas de iluminação, ainda são necessários avanços técnicos no desenvolvimento dos *drivers* e, sobretudo utilizando topologias que substituam os capacitores eletrolíticos por capacitores de filme metálico, pois essa alteração possibilitaria um aumento expressivo no tempo de vida útil dos produtos. Além disso, a eficiência dos produtos *LED* aumentou significativamente na última década, passando de 30Lm/W em 2002 para 150Lm/W nos dispositivos mais recentes.

O objetivo geral deste trabalho é uma análise dos fatores que influenciam diretamente na expectativa de vida útil e eficiência de sistemas *LED* de iluminação para ambas as topologias consideradas, de tensão constante e corrente constante. Para isso, este trabalho inclui um estudo do referencial bibliográfico relacionado a eletrônica de potência, inovações na tecnologia *LED* e artigos relacionados a operação dos conversores CC-CC. Como estudo prático, foram realizados ensaios em laboratório com duas amostras de *driver LED*, resultando em uma síntese de dados coletados que comprovam a relação direta dos parâmetros propostos.

Portanto a principal aplicação deste trabalho será realização de um ensaio de performance e eficiência em dois *drivers LED*, cada qual de uma topologia (corrente e tensão constante). Para isso utilizou-se os *drivers ELECPOWER 100-277VAC 48VDC – 0,6A* de tensão constante na carga e *OPTOTRONIC OT 9/10 – 24/350 DIM* de corrente constante na carga, ambos são amostras de engenharia que foram obtidas para testes em laboratório pelo autor.

Com este estudo espera-se concluir que embora os *drivers* de tensão constante sejam predominantes no mercado brasileiro devido a sua facilidade de compatibilidade com outros acessórios utilizados em instalações elétricas e seu menor custo, busca-se demonstrar como os *drivers* com topologia de corrente constante são mais vantajosos para aplicações de *LEDs* de alta potência, por garantir um controle de potência na carga com menores flutuações, e prolongar a vida útil do sistema de iluminação por reajustar o nível de corrente com a variação de impedância da carga.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A base teórica para elaboração deste trabalho são os conceitos e definições da eletrônica de potência, principalmente no estudo de fontes chaveadas e conversores CC-CC, que são os principais blocos de circuitos eletrônicos utilizados para projeto de um *driver LED*, pois determinam diretamente a eficiência e fator de potência do dispositivo. A seguir são apresentados tópicos relevantes para entendimento do tema, desde propriedades da tecnologia *LED* até a explicação do funcionamento de um *driver* em seus diversos blocos funcionais.

2.1 Diodos emissores de Luz

Os diodos emissores de luz, ou *LEDs*, são dispositivos semicondutores de única junção P-N que quando percorridos por uma corrente elétrica emitem fótons através da passagem de elétrons da banda de condução para a banda de valência. Dessa forma é possível a produção de energia luminosa com baixas perdas. Esse fenômeno é conhecido como eletroluminescência, cuja principal vantagem é a emissão de luz em temperatura ambiente. “Enquanto no fenômeno de incandescência consiste na emissão de radiação eletromagnética visível por um material aquecido em alta temperatura, geralmente $>750^{\circ}\text{C}$ ” (SCHUBERT 2006, p. 64, tradução nossa).

No processo de eletroluminescência em semicondutores existem tanto a recombinação radioativa como a recombinação não-radioativa de portadores, elétrons e lacunas. Sendo que para dispositivos emissores de luz a primeira é considerada preferencial. No entanto, em condições práticas, a recombinação não radioativa nunca pode ser reduzida a zero. Contudo, procura-se maximizar a recombinação radioativa de portadores, enquanto busca-se minimizar a outra. Isso porque a fração dentre esses tipos de recombinação que define a eficiência quântica interna de um *LED*.

Os *LEDs* inicialmente eram utilizados exclusivamente para sinalização, como por exemplo em iluminação semafórica, em luzes indicadoras externas em veículos e em iluminação de emergência. No entanto, devido à inovação na década de 1990 dos *LEDs* de alta intensidade ou de alto brilho, surgiu a possibilidade de sua aplicação em iluminação de potências acima de 40W (DUPUIS e KRAMES 2008, p. 1160).

Desde a introdução da tecnologia dos *LEDs* brancos de potência, a eficiência de conversão dos dispositivos tem crescido de forma exponencial. “Com eficácias luminosas que já superam 100 lumens por watt, é estimado que os *LEDs* brancos de potência atingirão valores tão altos quanto 200 Lm/W ou até mesmo 300 Lm/W em um futuro próximo” (MARUSKA e

STEVENSON 2006, p.17), quando acionados com a corrente nominal de operação.

2.2 Características básicas sobre LED

Para realizar o estudo de vida útil de sistema de iluminação LED precisamos conhecer em detalhes as propriedades dos semicondutores, e quais fatores influenciam na melhor escolha do material, tensão, corrente e temperatura de operação dos LEDs com objetivo de prolongar a vida útil do sistema.

2.2.1 Propriedades elétricas do LED

O funcionamento dos dispositivos semicondutores é explicado pelo processo de recombinação de portadores de carga, e este resulta na chamada região de depleção onde apenas se encontram íons positivos e negativos fixos na estrutura cristalina, por isso considerada uma região neutra e de alta resistividade.

“A primeira relação característica de corrente-tensão de uma junção P-n foi desenvolvida por Shockley e a equação descrevendo a curva I-V de um diodo P-n é referida como equação de Shockley” (SCHUBERT 2006, p.59, tradução nossa). A equação Shockley para um diodo com seção transversal A é dada por:

$$I = e A \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{n_i^2}{N_A} \right) (e^{eV/kT} - 1) \quad (1.1)$$

Onde:

D_{np} é a constante de difusão de elétrons e lacunas, respectivamente;

τ_{np} é a constante do tempo de vida de portadores minoritários de elétrons e lacunas;

A é a área de seção do material semicondutor;

N_n e N_d são a concentração de elétrons e lacunas no semicondutor;

e é a quantidade de energia em elétron-volt;

n_i é uma constante que depende da dopagem do material semicondutor.

“Em condição de condução reversa, a corrente no diodo satura, e a corrente de saturação é dada por um fator exponencial em função da equação de Shockley”. (SCHUBERT 2006, p. 60) A relação I-V do diodo pode ser escrita como:

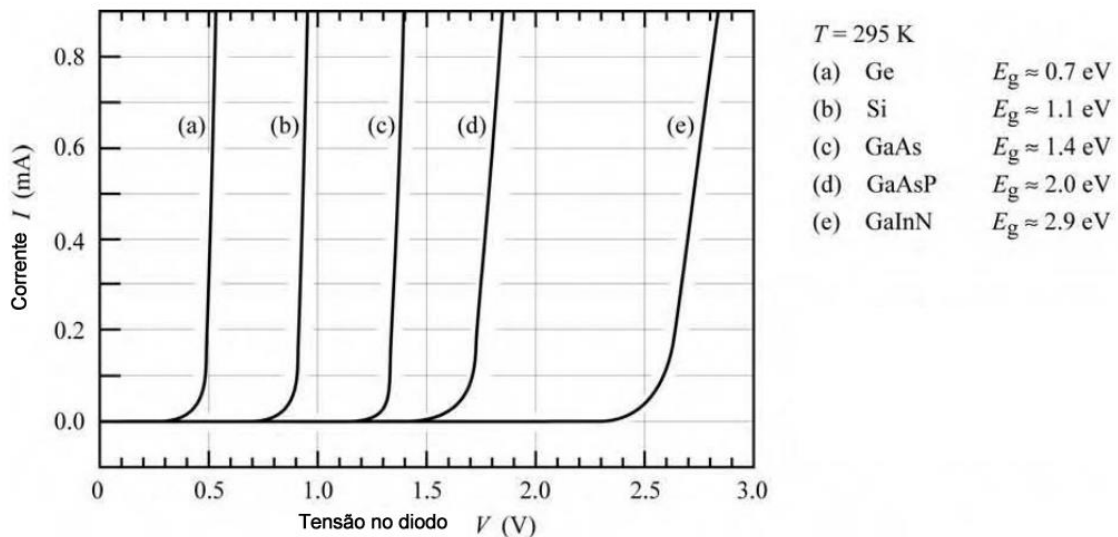
$$I = I_s (e^{eV/kT} - 1) \quad \text{ou seja, } I_s = e A \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{n_i^2}{N_A} \right) \quad (1.2)$$

Sob condução direta a tensão no diodo é $V \gg kT/e$, e então $e^{eV/kT-1}$ é aproximadamente $e^{eV/kT}$. E assim a equação de Shockley pode ser reescrita para condução direta como:

$$I = e A \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} N_A + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} N_D \right) (e^{e(V-V_D)/kT}) \quad (1.3)$$

O expoente na parte exponencial da função quando a tensão no diodo (V) atinge a Tensão de Difusão (V_D). A tensão na qual a corrente aumenta rapidamente é chamada de tensão limiar (V_{th}), que é dada por $V_{th} \approx V_D$. Chamamos de GAP a energia que separa a banda de condução da banda de valência de um material, e na Figura 1, que mostra diversas curvas características da relação I-V em diodos, observamos uma comparação direta dessa quantidade de energia nos principais materiais semicondutores do mercado.

Figura 1: Curva característica corrente-tensão e seus respectivos gaps.



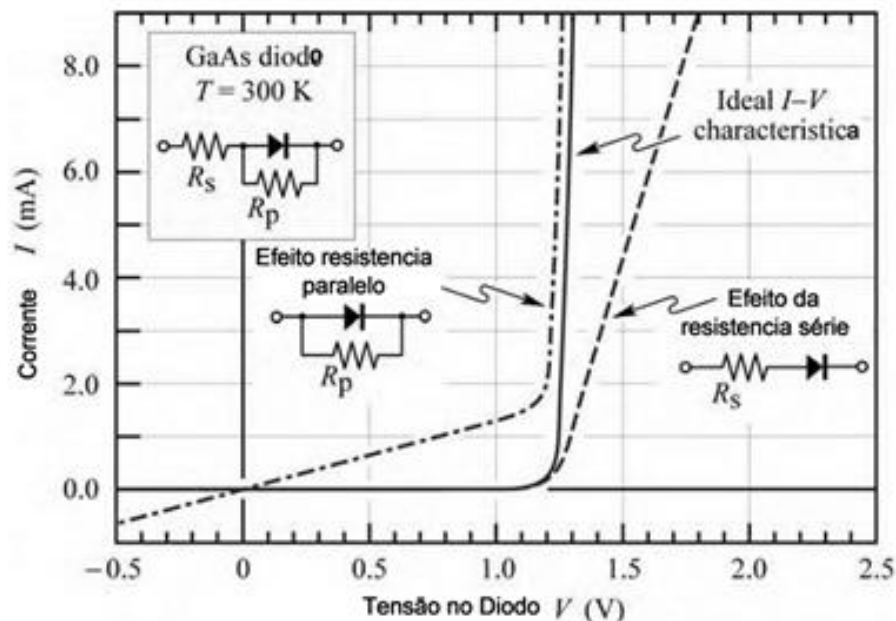
Fonte: Adaptada de (SCHUBERT 2006, p. 60)

Segundo Schubert (2006), os materiais semicondutores quando submetidos à temperatura de zero Kelvin (zero absoluto), todos elétrons encontram-se na banda de valência. Nessa condição o semicondutor tem características de um isolante elétrico. E na proporção em que sua temperatura aumenta, os elétrons absorvem energia passando para a camada de condução. Essa quantidade de energia que o elétron precisa para efetuar a transição é chamada de gap de energia (E_g). Sendo que, quando a temperatura do semicondutor aumenta, o número de elétrons que passam para a banda de condução cresce, ou seja a condutividade elétrica do semicondutor aumenta ao ser submetido a uma diferença de potencial. Assim conforme pode-se observar na imagem anterior, o material cujo o *LED* é fabricado determina sua

condutividade elétrica. Além disso, [...] “o comprimento de onda da luz emitida, ou seja, sua temperatura de cor, depende do band gap do material. Quanto maior o band gap menor o comprimento de onda da luz emitida” (BENEVIDES, BERTOLOSSO e OLIVEIRA 2010, p. 13). Essa constatação de que a cor da luz é determinada pela dopagem do material semicondutor, possibilitou o desenvolvimento da luz branca em *LEDs*. Isso ocorreu quando semicondutores de GaInN (Nitreto de Gálio índio), que produzem cores muito saturadas em um comprimento de onda estreito (tonalidade azul), foram combinados com pós fluorescentes, como o fósforo, para produzir uma de luz branca para aplicação em iluminação.

Voltando a considerar o comportamento do *LED* sob operação, temos que a equação de Shockley fornece a curva I-V ideal da junção p-n; porém frequentemente possui uma indesejada resistência parasita, que causa o efeito de resistência em série e/ou paralelo, cuja influência na curva I-V pode ser analisada na Figura 2.

Figura 2: Efeitos das resistências parasitas na curva característica do diodo GaAs⁴.



Fonte: Adaptada de (SCHUBERT 2006, 64)

Esta análise é fundamental para justificar teoricamente o que acontece na prática com relação ao funcionamento dos dispositivos *LED*, pois no decorrer do tempo de operação, para finalidade de análise de circuitos, o *LED* pode ser substituído por uma resistência. Isso porque com ao longo da vida útil, a camada de depleção aumenta devido ao acréscimo de portadores recombinados, e conseqüentemente a condutividade da junção p-n diminui. Essas variações de

⁴ GaAs: Arseneto de gálio é um material semicondutor de interesse da indústria eletrônica/informática, muito utilizado na construção de diodos, transistores e circuitos integrados.

carga podem ser críticas caso não haja uma adequada regulação de potência do circuito acionador.

Assim para uma topologia de *driver* que utiliza tensão constante, no decorrer do tempo a resistência dos *LEDs* diminuem, para compensar mantendo um mesmo nível de tensão constante a corrente fornecida pelo *driver* irá aumentar, e como a intensidade luminosa depende da corrente, na primeira vista o sistema apresentará um brilho intenso e aparentemente satisfatório. Porém com acréscimo da corrente, a temperatura do *LED* aumenta, ocorre queda no processo de recombinação responsável pela emissão de fótons devido ao excesso de calor. Assim o sistema terá uma vida útil inferior, ou seja a luminescência irá atingir os 70% da capacidade de emitir lúmens precocemente. Consequência que poderia ser evitada ao utilizar-se um *driver LED* de corrente constante, pois com o aumento da resistência, haveria uma compensação no nível de tensão que manteria a corrente fornecida a carga constante.

2.3 Drivers para acionamento de *LEDs*

Drivers para *LED* são dispositivos equivalentes aos reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes e lâmpadas de descargas de alta pressão (HID, do inglês, High Intensity Discharge), e tem como função converter o sinal de tensão de alternado para contínuo, e acionar a carga. Os *drivers* isolam o sistema de iluminação de alta tensão, atenuando drasticamente os riscos de choque elétrico, e realiza a regulação de carga e potência para conter as inevitáveis flutuações da rede elétrica, que podem facilmente danificar os *LEDs*.

Para otimizar a operação dos sistemas de iluminação, os *drivers LED* são produzidos ambos com saída com tensão constante ou corrente constante, dependendo do design das lâmpadas *LED* utilizadas e outros requerimentos da aplicação. A maioria dos *drivers LED* são capazes de acionar muitos *LEDs* disponíveis comercialmente, embora alguns fabricantes ofertam também modelos de dispositivos específicos para aplicações. Assim como reatores eletrônicos, os *drivers LED* possuem alta eficiência, a qual aumenta linearmente com a tensão de saída, pois apresenta menor corrente e conseqüentemente menos perdas de potência.

A expectativa de vida média da maioria dos *drivers LED* é aproximadamente 50.000 horas, indo de encontro com a expectativa de vida de muitas PCBs de *LEDs*. No entanto com a pesquisa e desenvolvimento, *LED* brancos e os recentes *LED* orgânicos são capazes de alcançar até estimadas 150.000 horas de operação, e por isso fabricantes estão começando a produzir *drivers* com tempo de vida mais longo, o que torna-se um desafio de projeto em vista da acentuada degradação dos componentes eletrônicos. Porém tais projetos tornam-se viáveis em topologias de circuito de *drivers LED* que dispensam o uso de capacitores eletrolíticos.

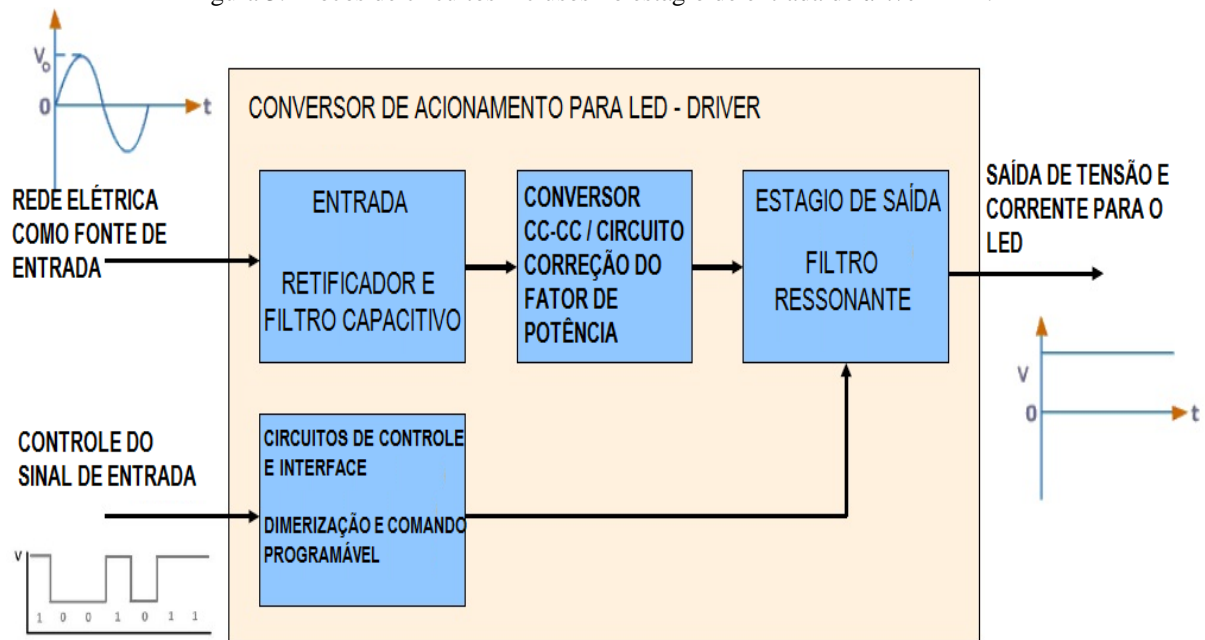
2.4 Circuitos que compõem os *Drivers* para *LEDs*

O correto funcionamento dos *LEDs* depende do fornecimento de tensão e corrente contínua, e devido a isso é necessário um dispositivo auxiliar para o acionamento de lâmpadas *LED*. Tal equipamento auxiliar é composto basicamente por uma fonte chaveada juntamente com outros blocos de circuitos com funções diversas.

Na indústria de aparelhos eletrônicos foi convencionado denominar esses dispositivos auxiliares de acionamento como “*drivers*”, sendo que suas funções principais são fornecer corrente ou tensão contínua regulada e estabilizada, dependendo da topologia, para proporcionar o adequado funcionamento dos *LEDs*.

Os *drivers* de modo geral, possuem diversos blocos de circuitos internos, cada qual com sua respectiva função, ou seja, cada qual responsável por um estágio de conversão. Dentre as funções principais do *Driver LED* existe a conversão dos parâmetros de entrada da rede, adequando-os a corrente e tensão que o *driver* utiliza para seu correto funcionamento. Segundo o *driver* permite o controle da intensidade de luminosidade da instalação através do controle de potência e regulação de carga, assim também controla o consumo de energia da luminária. E por fim, o drive é projetado de modo que atenda a requisitos de segurança e desempenho estabelecido por normatização internacional. Na Figura 3, verificar-se quais os principais blocos de circuitos que compõem o *driver* para *LED*

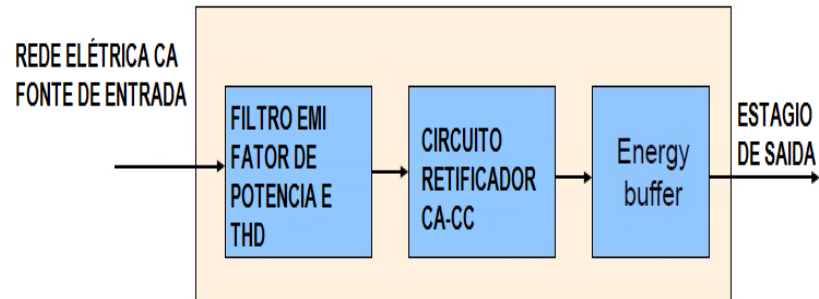
Figura 3: Blocos de circuitos inclusos no estágio de entrada do *driver LED*.



Fonte: O autor.

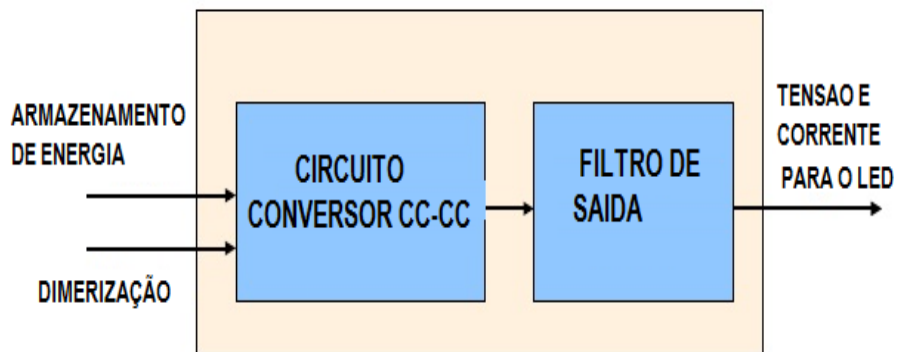
E ainda, pode-se analisar quais os blocos de circuitos que compõem o estágio de armazenamento de energia e saída nos *drivers* de acionamento para *LED*, em geral, conforme a Figura 4 e Figura 5, respectivamente:

Figura 4: Blocos no estágio de armazenamento de energia.



Fonte: O autor.

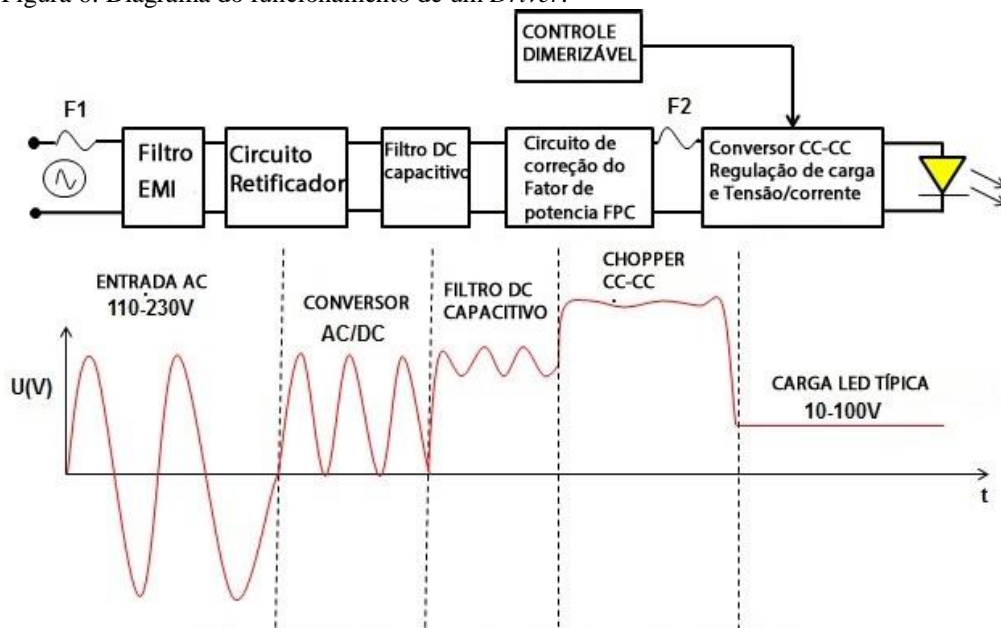
Figura 5: Blocos inclusos no estágio de saída do *driver*.



Fonte: O autor.

Apresentaremos a seguir os principais componentes de um *driver*, porém será apenas de modo simplificado pois o objetivo deste trabalho concentra-se especificamente em apenas um dos blocos mencionados (conversores CC-CC), e por isso um entendimento superficial relacionado aos outros componentes é suficiente, conforme exemplifica a Figura 6.

Figura 6: Diagrama do funcionamento de um *Driver*.



Fonte O autor.

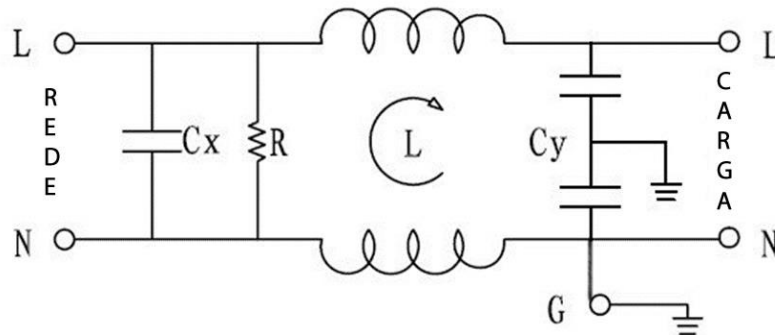
O *Driver* é basicamente uma fonte chaveada, que funciona a partir da comutação em alta frequência de transistores, circuitos com SCRs (do inglês, Silicon controlLED rectifier) e TRIACs, esses componentes geram um elevado ruído eletromagnético. “Nos *drivers* ocorrem dois tipos de interferência eletromagnética: a irradiada, que propaga rádio frequência pelo ar; e aquela conduzida pela rede de alimentação” (OLIVEIRA 2009, p.1). Para evitar que essa interferência eletromagnética na forma de componentes harmônicas prejudique o sinal da rede elétrica de alimentação, geralmente o primeiro bloco de circuito do *driver* é um filtro EMI/RFC (do inglês, Electromagnetic Interference/ Radio Frequency Interference), cuja função é bloquear os ruídos de alta frequência do *driver*.

“As emissões conduzidas por conversores CC-CC ocupam, atualmente, uma faixa que vai de 20 kHz até próximo de 30 MHz, o que depende da topologia do conversor e da potência de operação” (OLIVEIRA 2009, p.2). Essa faixa de frequência abrange a maioria dos equipamentos eletroeletrônicos, demonstrando a importância de impedir tal interferência.

É chamado de Bloco “EMI” o circuito que compõe um filtro que atua no Modo Comum e Modo Diferencial. Ambos atuam na redução de interferência conduzida e irradiada, geradas pelo *driver* eletrônico. Tendo como função minimizar possíveis interferências eletromagnéticas em equipamentos sensíveis, sendo normalmente utilizado em *drivers* destinados à aplicação profissional, como por exemplo instalação em hospitais. Além disso, a maneira mais simples e eficaz de bloquear ruídos irradiados é a utilização de “housing” (carcaça do *driver*) fabricado de material metálico para oferecer blindagem ao circuito. E ainda,

a luminária deve ser devidamente aterrada para garantir a segurança da instalação. Na Figura 7 a seguir, apresenta-se um típico circuito de filtro EMI, onde C_x e L constituem o Filtro de Modo Comum; C_y constituem o Filtro de Modo Diferencial.

Figura 7: Circuito de um filtro EMI típico

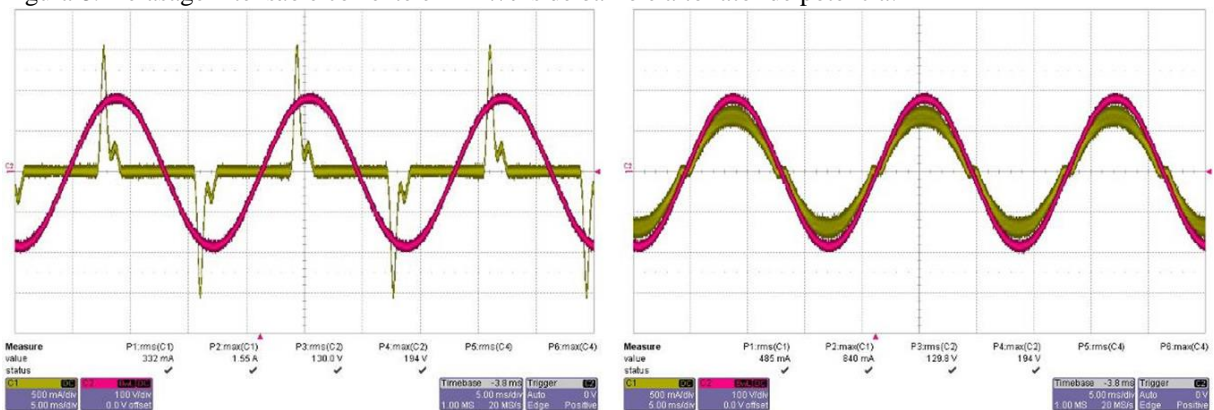


Fonte: O autor.

Em seguida, como rede elétrica fornece uma tensão e corrente alternada ao *driver*, o segundo bloco é composto por um circuito retificador, com filtro capacitivo para reduzir o ripple (nomenclatura usual para amplitude de pico) do sinal elétrico. Ou seja, a função desse bloco é transformar o sinal de entrada em baixa frequência oriunda da rede de alimentação para um sinal contínuo com baixo ripple. Normalmente tal bloco é composto de uma ponte retificadora de onda completa juntamente com um circuito dobrador de tensão.

Próxima etapa é o circuito *PFC* (do inglês, *Power Factor Correction*) que possui a função de corrigir o fator de potência para atender especificações mínimas definidas pela normatização da concessionária de fornecimento de energia, e também reduzir a distorção harmônica do *driver*. Isso é necessário pois normalmente *drivers* eletrônicos distorcem a forma de onda da corrente e comprometem o ângulo de defasagem entre tensão e corrente de entrada. Conforme pode ser observado da Figura 8, que compara duas formas de onda no osciloscópio “*Lecroy*”, demonstrando a defasagem entre tensão (vermelho) e corrente (amarelo) para um *driver* de baixo fator de potência à esquerda e um *driver* de alta fator de potência a direita.

Figura 8: Defasagem tensão e corrente em *Drivers* de baixo e alto fator de potência.



Fonte: O autor. Medição realizada em laboratório, utilizado osciloscópio de alta resolução LECROY

Existem várias topologias para a função de correção do fator de potência, algumas delas são: “Valley Fill”, “Power Feed Back” e Boost.

Por fim, o bloco mais importante do *driver* é formado por uma topologia de conversor CC-CC, também chamado de “chopper”, ou regulador chaveado. Eles são muito eficientes, pois como funcionam por comutação dos transistores entre os estados ligado e desligado, a dissipação de potência dos transistores é bastante reduzida. Valores típicos de eficiência para conversores são entre 65% a 75% para não regulados e entre 75% a 95% para reguladores chaveados (MALVINO e BATES 2007, p.598).

Existem dois tipos de conversores CC-CC, dentre eles os típicos conversores não-regulados, também chamados de conversores não-isolados, em que a tensão CC de entrada é aplicada a um oscilador de onda quadrada, sendo essa onda usada para acionar o enrolamento de um transformador de núcleo toroidal com um loop de histerese retangular. Isso produz uma tensão no secundário que é uma onda quadrada, e dessa forma podemos construir conversores CC-CC elevadores ou abaixadores. Porém podemos inferir que nesse caso a tensão no secundário será diretamente proporcional à onda quadrada da entrada. Ou seja, o sinal de saída depende diretamente do sinal de entrada, não ocorre isolação.

Outro tipo de conversor são os reguladores chaveados, que apresenta a vantagem da saída ser isolada do sinal de entrada; e também inclui regulação de tensão que é realizada através da modulação por largura de pulso, a qual controla o tempo em que os transistores ficam ligados e desligados. Conseqüentemente mesmo alterando o ciclo de trabalho, um regulador chaveado pode manter a tensão de saída constante sob condições de variação de linha e de carga.

2.5 Análise comparativa entre conversores CC-CC

Conforme visto, existem diversas topologias (técnica de projeto ou o layout fundamental de um circuito) relacionadas a conversores CC-CC, porque algumas delas se adaptam melhor

a determinadas aplicações do que outras. Devido a isso para cada projeto de *driver* com aplicação específica, o projetista (ou desenvolvedor) deve analisar qual a melhor topologia a ser aplicada.

Um entendimento das principais topologias de conversores é fundamental para entender a operação dos diversos *drivers* no mercado. Sendo que este bloco de circuito é determinante para uma eficiência satisfatória e um adequado controle de potência na carga. As topologias de conversores também podem ser divididas entre aqueles não isolados, e os isolados.

Os principais conversores não isolados possuem as topologias *Buck*, *Boost*, *Buck-Boost*, *Ćuk*, *SÉPIC* e *Zeta*. Para eles o sinal de saída entregue a carga pode carregar ruídos do sinal da entrada da rede e vice versa, ou seja a alta frequência dos elementos comutadores do *driver* injetam ruídos no sinal da rede, e conseqüentemente aumenta o THD (do inglês, *Total Harmonic Distortion*) da instalação. Sendo que produtos eletrônicos precisam atender requisitos de norma relacionados ao percentual de THD para evitar prejuízo a qualidade de energia da rede elétrica de fornecimento, as componentes harmônicas devem ser amenizadas através de filtros.

Os conversores CC-CC isolados mais usuais possuem topologias *Fly-back*, *Forward*, *push-Pull* e ainda podem ser também *Ćuk* modificado com isolação. A vantagem de um conversor isolado é oferecer uma pré regulação do fator de potência usando um transformador acoplado. Segundo Pimentel (2014), tais topologias oferecem maior confiabilidade circuito.

A seguir verificamos no Quadro 1, um resumo das principais topologias de conversores, incluindo: seus respectivos modos de operação (abaixadores ou elevadores de tensão e corrente); o fato de determinada topologia admitir o uso de indutor, significa que o conversor oferece uma prévia correção do fator de potência ao *driver*, uma vez que os módulos *LED* possuem reatância capacitiva.

Ainda o fato de determinada topologia utilizar transformador em seu circuito significa, de modo geral, ser uma topologia de conversor isolado, ou seja, o sinal fornecido a carga é isolado de influências causadas pela entrada da rede elétrica e outras possíveis instabilidades no circuito do *driver*.

Torna-se de grande relevância considerar a quantidade de componentes de estado sólido presentes no *driver*, como diodos, transistores, *MOSFETs* (do inglês, *Metal Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) *IGBTs* (do inglês, *Insulated Gate Bipolar Transistor*), *TRIACs* (do inglês, *Triode for Alternating Current*), pois eles geralmente sobreaquecem durante a operação, são críticos para dimensionamento e podem ser decisivos para terminar a

máxima temperatura de case (T_C)⁵ do produto. Além disso, esses componentes possuem elevada contribuição no custo da BOM (*Bill of materials*) do produto; e também são componentes importantes no projeto do *driver* quando se trata do dimensionamento de componentes para gerenciamento do risco de falhas.

Quadro 1: Comparativo entre topologias de conversores CC-CC.

Topologias de Conversores CC-CC (Chopper)							
Topologia	Modo	Indutor	Trafo	Diodo	Transistor	Potência	Complexidade
Buck	Abaixador	Sim	Não	1	1	0-150W	Baixa
Boost	Elevador	Sim	Não	1	1	0-150W	Baixa
Buck-Boost	Abaixador/ Elevador	Sim	Não	1	1	0-150W	Baixa
Cúk	Abaixador/ Elevador	Sim	Sim*	1	1	0-150W	Média
SÉPIC	Abaixador/ Elevador	Sim	Sim*	1	1	0-150W	Média
ZETA	Abaixador/ Elevador	Sim	Sim*	1	1	0-150W	Média
Flyback	Abaixador/ Elevador	Sim	Sim	1	1	0-150W	Média
Push-Pull	Abaixador/ Elevador	Sim	Sim	2	2	100- 1000W	Alta
Meia ponte	Abaixador/ Elevador	Sim	Sim	4	2	100- 500W	Alta
Ponte completa	Abaixador/ Elevador	Sim	Sim	4	4	400- 2000W	Muito Alta

Fonte: Adaptada pelo autor de (MALVINO, Ivo; BATES, David 2007, p.604)

As topologias que apresentam esta demarcação (*), indicam que podem ser modificadas para conversores isolados, ou seja, existe a possibilidade de adaptar o circuito para adicionar um transformador, de modo a evitar que distúrbios no sinal de entrada influenciem na saída.

2.6 Drivers com Tensão constante versus Corrente constante

Antes dos LEDs serem usados amplamente em aplicações indoor, outdoor, estacionamentos, iluminação pública e designers arquitetônicos, eles eram a tecnologia de iluminação predominante para sinalização, em máquinas, semáforos entre outras aplicações.

⁵ O termo Temperatura de case (T_C) é fundamental para análise térmica do *driver*, ele é representado de forma impressa no “housing” (carcaça), indicando o ponto de maior temperatura, dentre os componentes, durante operação. Um T_C elevado causa preocupação em relação a dissipação do calor para o ‘housing’ e o risco de falha do componente com sobreaquecimento.

LED drivers com tensão constante proporcionam flexibilidade para conectar segmentos incrementais ao *LED* até a potência máxima e estão amplamente disponíveis para saídas de baixa tensão, o que é ideal para a indústria de sinalização. Historicamente aplicações de iluminação de sinais incorporaram *LED* de baixa potência (abaixo de 1W cada) conectados a segmentos incrementais com a corrente limitada por resistores para auxiliar a proteger os *LEDs* da variação de tensão da fonte em cada segmento. Essa configuração induz para a muito difundida especificação de *driver LED* com tensão constante para aplicações de sinalização. Conseqüentemente, engenheiros projetistas e técnicos de instalações tendem a estar mais familiarizados com a tecnologia de tensão constante, que também inclui o benefício de menor custo e funcionamento de baixa complexidade.

Os designs de fitas *LED*, ou PCBs (‘Printed Circuit Boards’) com *LEDs* SMD (do inglês, ⁶Semi Metallic Disc), tem evoluído muito ao longo do tempo e o uso de resistores limitadores de corrente têm sido substituídos por reguladores de corrente constante ‘*onboard*’ (termo técnico usual para integrado a placa), que apresentam avançados circuitos de monitoramento de ‘*feedback*’ para alcançar melhor eficiência, incorporar balanceamento de corrente e proteções inteligentes.

“À medida em que os *LEDs* ganham uma parcela maior do mercado em aplicações de iluminação mais generalizadas, parece que conversores de acionamento com tensão constante não alcançam versatilidade suficiente para atender as demandas” (FROSCH 2014, p.3, tradução nossa).

Drivers LEDs com saída de tensão constante estão sujeitos a perdas de potência nos componentes que limitam a corrente, o que diminui a eficiência para *LED* de alta potência tipicamente utilizados para aplicações de iluminação. Essa topologia de *driver* também exige um estágio de conversão adicional, e portanto um considerável número de componentes para alimentar as várias ‘strings’ de *LEDs*. Sendo que a cada componente adicional dentro de um sistema aumenta-se o potencial de falha desse último, e por isso *driver* de tensão constante pode, em geral, reduzir a confiabilidade de sistemas de iluminação.

Inclusive, em termos de projeto, pode-se considerar que *drivers LED* de tensão constante não são uma solução confiável para acionar *LED* brancos, uma vez que variações de tensão da fonte tão pequenas quanto 5% (por exemplo de 3,3 para 3,5V), o que é uma ocorrência normal usando *drivers* de tensão constante, podem provocar uma diferença de 100% na entrega de corrente a carga (por exemplo de 350 para 700mA), isso ultrapassa o valor máximo absoluto de sua capacidade de corrente (FROSCH 2014, p.2, tradução nossa).

⁶ Componente Onboard significa previamente incluso e fixo na placa de circuito impresso durante fabricação.

Quando o *driver* fornece excesso de corrente a carga, em comparação aos valores especificados, os *LEDs* emitem luz mais intensa e produz calor adicional, e isso degrada sua capacidade de luminescência mais rápido e por isso reduz significativamente seu tempo de vida útil.

Ao contrário desses, os *drivers LED* de corrente constante não estão sujeitos a perdas de potência significativas nos componentes limitadores de corrente e podem ser conectados diretamente em uma única string de *LEDs*, proporcionando maior confiabilidade para aplicações em sistemas de iluminação. Adicionalmente, *drivers* de corrente constante podem evitar que se ultrapasse a máxima corrente de especificação nos sistemas de *LEDs*, maximizando sua luminescência (saída de luz), sem provocar um desgaste excessivo. Isso garante que cada *LED* forneça a cromaticidade e intensidade luminosa prevista e dimensionada, o que é essencial para *LEDs* brancos, painéis e iluminação de decoração em geral.

Devido a isso, o mercado de iluminação tem sido envolvido em uma mudança gradativa para luminárias usando *drivers* de corrente constante para uma variedade cada vez maior de aplicações residenciais, comerciais e para ambientes industriais. “Embora mais amplamente disponível na faixa de corrente de 350 a 700mA de saída, está sendo introduzido no mercado *driver* de corrente constante com saída maior que 1A” (FROSCHE 2014,p.3, tradução nossa), o que possibilita o fornecimento de energia de forma eficiente para ambas alta e baixa tensão de entrada. Apesar de apresentar significativas vantagens, os *drivers* de corrente constante não estão substituindo *drivers* de tensão constante para todas as aplicações de iluminação *LED*, mas eles estão aos poucos se tornando a escolha preferencial para acionamento de uma ampla gama de aplicações.

2.7 Do controle de potência linear à Modulação por Largura de Pulso

Uma das principais vantagens da tecnologia *LED* está na capacidade de amplo controle de potência através da dimerização, e no caso dos *OLEDs* ainda tem-se a possibilidade de variação da temperatura de cor durante a operação. Para entender melhor como é realizado esse controle de potência fornecida a carga, apresentamos os conceitos desde o controle linear de energia fornecida a carga até o método de modulação por largura de Pulso (PWM), este último considerado a forma mais eficiente de controle de potência.

A implementação de uma fonte de alimentação linear, partindo-se de uma fonte CC não regulada, apresenta como características uma boa regulação e razoável resposta a transitórios. No entanto, seu grande inconveniente é a baixa eficiência, uma vez que a diferença entre a

tensão de entrada e a tensão da carga recai sobre o elemento regulador, normalmente um transistor. Sendo a corrente da carga a mesma corrente que atravessa o elemento regulador, tem-se uma elevada dissipação de potência sobre o transistor. Isto significa que é praticamente inviável a construção de fontes de tensão (principalmente as de valor ajustável) e de potência considerável (acima de algumas dezenas de Watts) utilizando esta técnica.

Uma outra alternativa é o uso de retificadores (conversão CA/CC) controláveis. Neste caso tem-se uma elevada eficiência. Para a obtenção de uma tensão CC com baixa ondulação é necessária a inclusão de filtros de saída, tipicamente do tipo LC (passa-baixas). Como a frequência da ondulação é baixa, os elementos de filtragem são de valor elevado e volumosos. A resposta dinâmica a transitórios é lenta devido à resposta do filtro.

Uma terceira alternativa que associa alta eficiência com valores reduzidos de elementos de filtragem são as fontes chaveadas. O elemento regulador é um transistor que trabalha como chave, e não na região linear. Sendo elevada a frequência de chaveamento, os elementos do filtro de saída são proporcionalmente reduzidos, contribuindo para a obtenção de elevadas densidades de potência (POMILIO 2014, p.24).

De acordo com Pomílio (2014) uma comparação de valores típicos entre um regulador linear e um regulador chaveado, quando fornecendo a mesma potência a carga, é resumido no Quadro 2:

Quadro 2: Comparação de fonte linear e fonte chaveada

	Tipo Chaveado	Tipo Linear
Rendimento	80% a 95%	25% a 50%
Ondulação (para iguais capacitores)	20 mV a 50 mV	5 mV
Peso	2 kW/kg	0,5 kW/kg
Volume	10 cm ³ /W	50 cm ³ /W
Interferência eletromagnética	alta	desprezível
Rejeição a Transientes	alta	baixa

Fonte: (POMILIO 2014, p.28)

Dessa tabela podemos inferir importantes considerações. Primeiro com relação a eficiência energética, pois o uso de componentes de estado sólido como comutadores reduz muito as perdas de potência, mas ainda ocorre aquecimento na junção p-n dos semicondutores e perda nas resistências parasitas.

Segundo, observamos um parâmetro que torna-se preocupante para algumas aplicações, principalmente tratando-se da tecnologia *OLED* (Diodo Emissor de Luz Orgânico), a qual apresenta grande sensibilidade a variações de tensão, essa maior ondulação nos reguladores chaveados pode gerar maiores valores de pico de tensão e corrente entregue a carga.

Em seguida, temos a comparação de dois parâmetros cuja evolução é indiscutível, sendo que o peso e volume dos reguladores chaveados é em média 5 vezes menor do que conversores ressonantes, e isso em termo de custo de fabricação proporcionou a expansão acelerada do mercado. Quanto a interferência eletromagnética, o uso de filtros EMI para reguladores chaveados é fundamental para não prejudicar a qualidade de energia da instalação e não danificar outros equipamentos eletroeletrônicos.

E por fim, com relação aos transientes⁷, no projeto de *drivers LED* é importante especificar componentes para compensar os surtos de tensão provocados pelo próprio chaveamento em alta frequência do circuito. Então para compensar os transientes internos geralmente utiliza-se o circuito auxiliar “schmitt trigger” (Disparador schmitt), que consiste em um comparador realimentado cuja função é definir um limiar de tensão para operação, ou seja cria uma imunidade a ruídos diferentes dos valores definidos pelo comparador. Para transientes externos, uma das opções consiste no uso de varistores⁸ como componente de proteção, porém apenas para curtos surtos de tensão pois para sobretensões mantidas por maiores intervalos de tempo podem causar sobreaquecimento ao circuito (por isso é importante que *drivers* tenham fusíveis de proteção).

Nos últimos anos, os conversores chaveados substituíram quase que na totalidade os reguladores de carga linear (ressonantes), devido principalmente, ao seu maior rendimento, menor peso e menor tamanho.

2.7.1 Vantagens do modo de operação PWM

A modulação por largura de pulso ou Pulse Width Modulation (PWM) é uma técnica que permite controlar a quantidade de energia fornecida a carga. Em resumo o controle é obtido através da variação da largura da onda quadrada (CC) ao longo de um período de tempo. Quanto maior a largura do retângulo maior a potência na carga, a essa variação de largura, ou seja de tempo onde o sinal tem nível alto chamamos de duty cycle (ciclo de trabalho). Portanto o sinal PWM é uma onda digital quadrada, em que a frequência é constante e o tempo em que o sinal possui nível alto pode ser variado entre 0 e 100% (duty cycle), sendo o método de controle mais utilizado no comando para dimerização de *drivers LED*.

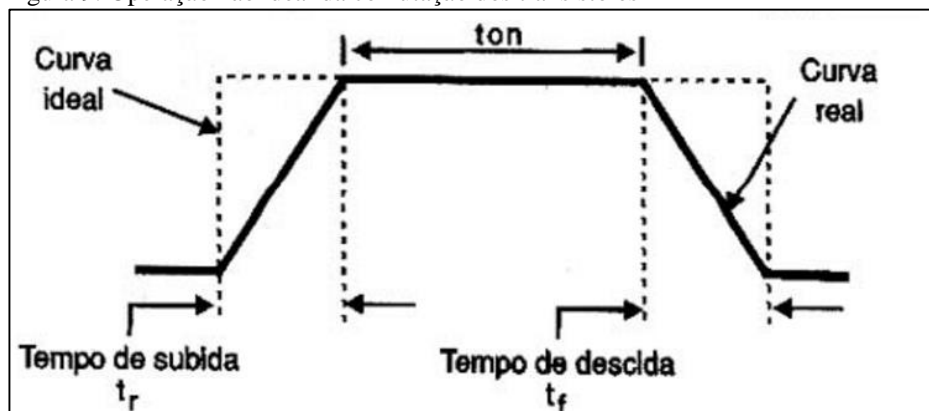
⁷ Transiente é o nome dado a um surto de tensão que ocorre em um pequeno intervalo de tempo, entre micro e milissegundos. É considerado um estado transitório, em que rapidamente o circuito retorna a sua operação em regime permanente. Pode ser causado por fatores externos, como uma descarga atmosférica que induz tensão na rede elétrica, ou internamente pela própria operação de chaveamento do dispositivo eletrônico.

⁸ Varistor ou VDR (Voltage Dependent Resistor) é um componente no qual a resistência varia inversamente a tensão. Ele protege o dispositivo desviando a sobretensão, ou sobrecorrente para o aterramento, pois comporta-se como um curto-circuito submetido a altas tensões.

O controle de potência por PWM apresenta vantagens significativas. Na condição de aberto, nenhuma corrente circula pelo dispositivo de controle e, portanto, sua dissipação é nula. Na condição de fechado, teoricamente, se ele apresenta uma resistência nula, a queda de tensão é nula, e ele não dissipa também nenhuma potência. Isso significa que, na teoria, os controles PWM não dissipam potência alguma e, portanto, consistem em soluções ideais para este tipo de aplicação.

Na prática, entretanto, isso não ocorre. Em primeiro lugar, os dispositivos usados no controle não são capazes de abrir e fechar o circuito num tempo infinitamente pequeno. Eles precisam de um tempo para mudar de estado e, neste intervalo de tempo, sua resistência sobe de um valor muito pequeno para dezenas de mega ohms. A curva de comutação real desses componentes será conforme mostra a Figura 9, em que a potência consumida durante o tempo de subida e descida, produz calor e sobreaquece o componente, por isso ainda existe margem de perdas na comutação.

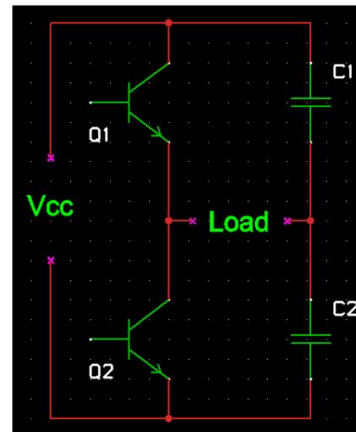
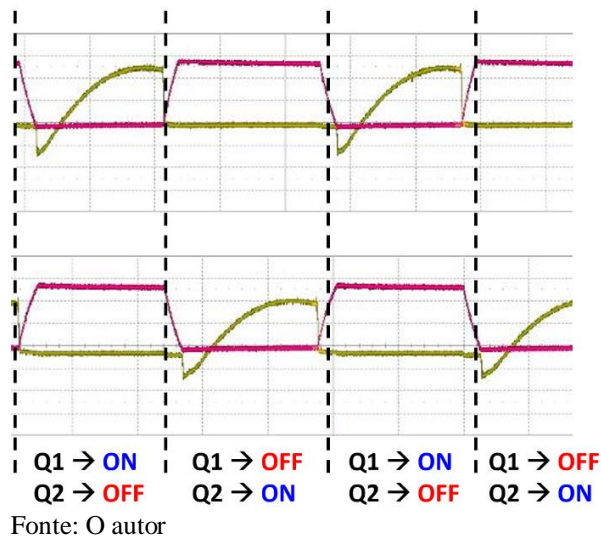
Figura 9: Operação não ideal da comutação dos transístores



Fonte: Adaptada pelo autor de (BRAGA,2015).

A Figura 10 mostra uma medição da corrente nos transistores comutadores (em vermelho) e a corrente no capacitor de filtragem (em amarelo), essa é uma configuração de circuito básica para conversão de CC-CA, e nela observamos claramente a operação real dos componentes.

Figura 10: Medição da conversão CC-AC alta frequência.



Observe na Figura 9 que para a comutação real dos dispositivos, justamente nos intervalos t_r e t_f , o componente gera grande quantidade de calor. Sendo fundamental uma análise térmica para dimensionar os comutadores, pois o sobreaquecimento dele além de aumentar o risco de falha desse componente específico, ainda irá contribuir para aumento da temperatura de operação do *driver* todo, devido a irradiação e condução do calor para os demais componentes.

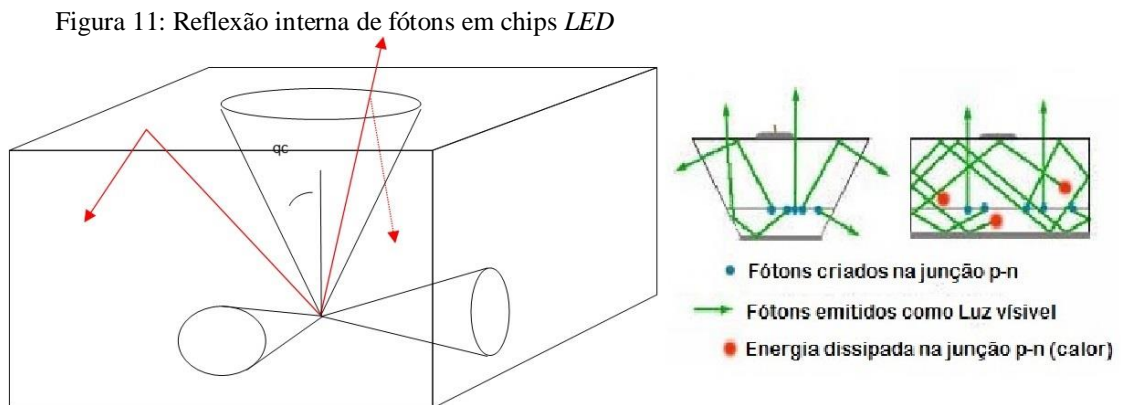
Entretanto, mesmo com este problema, a potência perdida num controle PWM ainda é muito menor do que em um circuito de controle linear equivalente. Transistores de comutação rápidos, FETs (do inglês, Field Effect Transistor) de potência e outros componentes de chaveamento podem ser suficientemente rápidos para permitir que projetos de controle para elevadas potências sejam implementados sem a necessidade de grandes dissipadores de calor ou que tenham problemas de perdas de energia por sobreaquecimento que possam ser preocupantes.

2.8 Influência da temperatura na operação dos dispositivos LED

De acordo com conceitos da física, sabemos que para materiais condutores, um aumento na temperatura ocasiona um aumento da resistência oferecida a passagem da corrente. Enquanto para materiais semicondutores ocorre o contrário, ou seja, um aumento da temperatura ocasiona uma redução da resistividade, pois a energia térmica provoca a liberação de mais elétrons livres para a banda de condução do material e consequente liberação de fótons.

A tecnologia de emissão de luz por materiais de estado sólido evidentemente não é de total eficiência, pois os LEDs tradicionais perdem energia na forma de calor através do

aquecimento da junção p-n do semiconductor. Isso pode ser explicado de maneira simplificada através da Figura 11, onde observamos que o chip de *LED* pode ser interpretado como uma “armadilha de fótons”, na qual uma parte considerável da luz emitida devido a transição de elétrons entre as camadas de valência é refletida internamente pela superfície do componente e convertida em calor na junção do semiconductor.

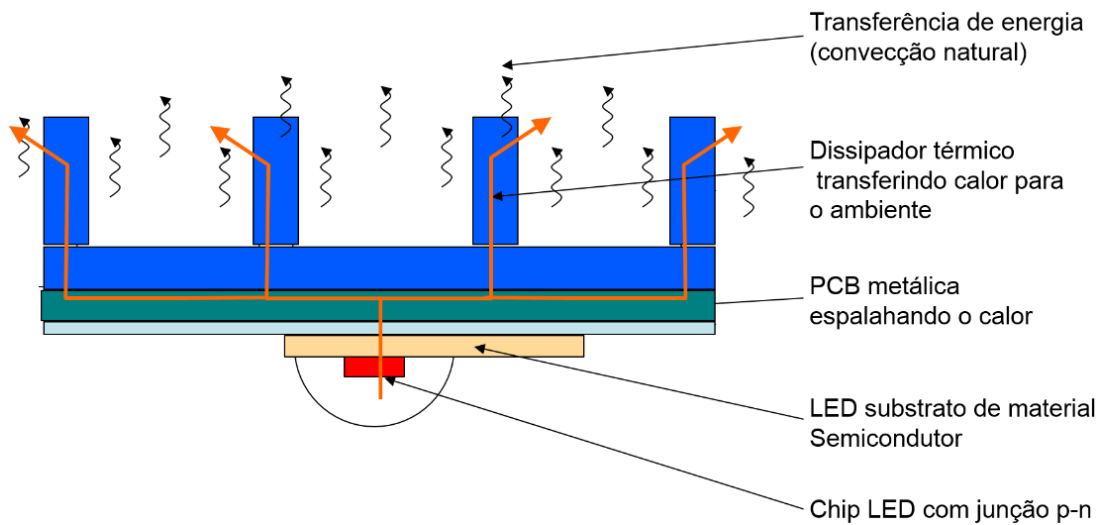


Fonte: Adaptada pelo autor de learnabout-electronics.org

Os *LEDs* fabricados a partir do material semiconductor InGaN (Nitreto gálio-índio) são predominantes no mercado para aplicações em módulos *LED* que emitem luz azul, verde e branca e células fotovoltaicas. Segundo dados levantados no laboratório de desenvolvimento Philips em 2015, para esses *LEDs* a maioria da energia elétrica é convertida em calor, com aquecimento da junção p-n, sendo que de 20 a 40% da energia fornecida é convertida em luz visível, e 50 a 80% da energia é dissipada na forma de calor. Considerando que o sobreaquecimento pode causar danos permanentes ao componente, o aumento de temperatura na junção p-n irá prejudicar o desempenho do módulo *LED* em termos de eficiência através da perda de potência, e acelerado decaimento da capacidade de emissão de luz.

O aumento da temperatura de junção do semiconductor precisa ser corretamente gerenciado através da condução e posterior transferência de calor para o ambiente. As Figura 12 e Figura 13 exemplificam os mecanismos que podem ser utilizados para controle da temperatura de junção dos *LED*, como uso de PCBs (Printed Circuit Boards) metálicas que apresentam boa condutividade térmica e dissipadores térmicos diretamente nos módulos *LED* ou luminárias. Somente assim torna-se possível garantir uma adequada operação do dispositivo, garantindo a otimização da emissão de luz e maximização do tempo de vida em funcionamento.

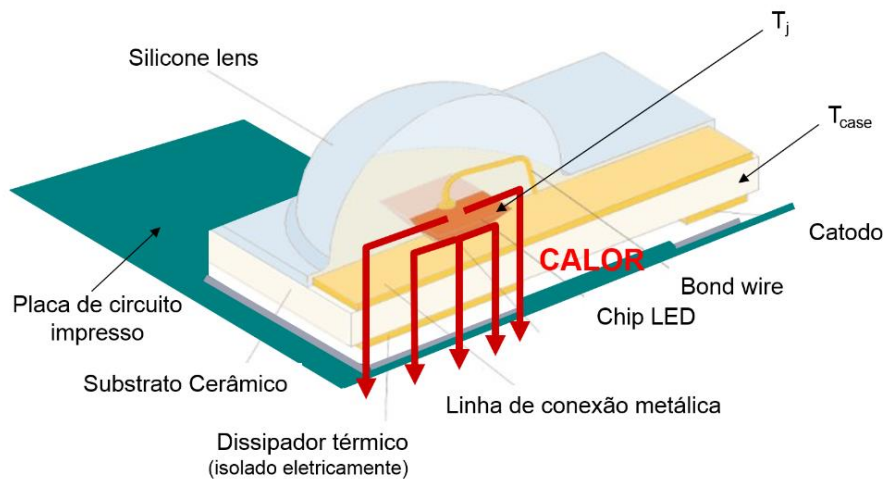
Figura 12: componentes para gerenciamento térmico de módulos *LED*.



Fonte: O autor.

Figura 13: Funcionamento de um *LED* encapsulado.

$T_{\text{junção}}$ **aumenta** \longrightarrow **Luminescência (lm), Eficácia (lm/W) e tempo de vida do LED diminuem**



Fonte: O autor.

A seguir apresentamos o Quadro 3, que compara o *LED* em relação outras fontes convencionais de energia, considerando critérios como percentual da potência fornecida que é efetivamente convertida em luz visível, percentual de emissão de radiação infravermelha (IR), emissão de radiação ultravioleta (UV) e aquecimento com posterior transferência de energia na forma de calor. Nela podemos inferir que o potencial de aquecimento da junção p-n de semicondutores pode ser considerado crítico quando não utilizados dissipadores corretamente projetados. Considere as informações sobre teste secundárias para este trabalho, porém de modo breve, temos um módulo *LED* 50W sem dissipador de calor, uma lâmpada incandescente 100W, uma lâmpada fluorescente tubular T5 de 28W e lâmpada de vapor de mercúrio 150W.

Quadro 3: Comparativo entre *LED* e outras fontes de energia convencionais

Conversão de Energia: LEDs Vs iluminação convencional				
	LED	Incandescente	Fluorescente	Vapor metálico
Luz visível	25 – 45%	8%	21%	27%
IR	~ 0%	73%	37%	17%
UV	0%	0%	~ 0%	19%
Calor	55 – 75%	19%	42%	37%

Fonte: Philips LumiLED (não publicada).

Após destacar a importância do gerenciamento térmico nos chips de *LED*, precisamos voltar nossa atenção para análise térmica do *driver LED*. Pois uma vez que garantiu-se o correto gerenciamento térmico do módulo, é fundamental considerar que o *driver* torna-se o ponto crítico do sistema. Sabemos que para projeto e especificação de *drivers LED*, torna-se necessário o mapeamento térmico dos principais componentes dimensionados, especialmente para elementos sensíveis à temperatura, os quais apresentam sobreaquecimento durante a operação. Dentre eles, destacamos os Transístores, diodos, capacitores (principalmente eletrolíticos) e indutores. Em vista disso, torna-se fundamental o adequado dimensionamento dos componentes considerando os esforços aos quais serão submetidos. Para isso as informações dos *datasheets*⁹ (do inglês, folha de dados) são essenciais para orientação do projetista, que geralmente utiliza uma margem de segurança em relação aos máximos valores de tensão e corrente admitidos. Porém existe a relação de equilíbrio entre custo e gerenciamento dos riscos de falha, o que determina a confiabilidade e qualidade do produto.

Conforme descrito no capítulo referente aos ensaios, ao realizar uma análise técnica do *driver*, é realizado um mapeamento térmico dos componentes críticos, afim de verificar a temperatura de operação dos capacitores eletrolíticos, dos transistores e indutores. Assim, pode-se estimar aproximadamente o tempo de vida em funcionamento do *driver*.

2.9 A influência do Capacitor Eletrolítico na vida útil do *driver*

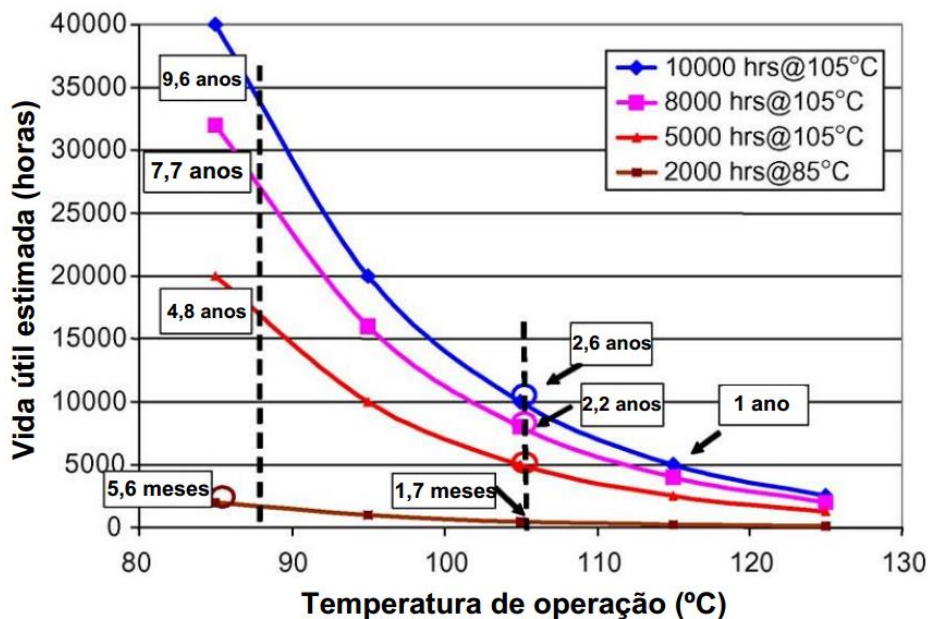
Os módulos de *LED* quando corretamente projetado, considerando o gerenciamento térmico através de um bom dissipador de calor mantendo a temperatura na junção p-n sob

⁹ Datasheet: termo em inglês, muito usual em eletrônica, caracteriza o a folha de dados e manual de operação de determinado componente. Ela apresenta todas as informações relevantes, como máxima tensão e corrente, temperatura máxima suportada, perdas de potência, entre outros dados.

controle, possuem uma longa vida útil¹⁰. Sendo que existem produtos de ponta no mercado que são especificados por seus fabricantes com vida útil de até 150.000 horas em operação, sob critério da L70. Porém no mercado em sua grande maioria os sistemas de iluminação *LED*¹¹ são especificados para 50.000 horas, e sabemos que o motivo dessa discrepância é o fato dos *drivers* de acionamento dos *LED* serem o ponto fraco na durabilidade do sistema de iluminação. E a causa disso, considerando que todos os demais componentes foram corretamente dimensionados, é justamente a presença do capacitor eletrolítico na composição do circuito.

O capacitor eletrolítico é formado por duas folhas de alumínio, separadas por uma pequena camada de óxido de alumínio, as quais são enroladas e imersas em um óleo chamado de eletrólito; sendo que o capacitor é danificado quando este óleo resseca e assim perde sua isolamento. Esses capacitores são usados predominantemente para suprir a necessidade de altas capacitâncias de filtragem dos conversores eletrônicos. Conforme demonstrado em Chung (2007), a vida útil dos capacitores eletrolíticos depende diretamente de sua temperatura de operação. A Figura 14 mostra essa relação.

Figura 14: Vida útil estimada de capacitores eletrolíticos.



Fonte: Adaptado de (CHUNG 2007) apud (SOARES 2012, p.)

“A temperatura nominal de operação, definida pelos fabricantes de capacitores eletrolíticos, está na faixa de 85°C a 105°C, para uma vida útil de 2.000 a 3.000 horas” (SOARES 2012, p.29), dependendo do custo do componente. Portanto os desenvolvedores

¹⁰ Tempo que a lâmpada leva para emitir 70% de seu fluxo original de acordo com a norma L70.

¹¹ Sistema de iluminação LED é composto por: *Driver* eletrônico, luminária, dissipadores térmicos, refletores ópticos e controle programável.

procuram dimensionar esses componentes sob menores esforços, com objetivo de reduzir sua temperatura de operação. Entretanto, se os *LEDs* podem durar muito mais que 50.000 horas, uma falha precoce do *driver* acaba gerando custos com mão de obra para manutenção do sistema, reduzindo a confiabilidade da instalação.

Demonstrou-se no estudo de Rodrigues e Amaratunga (2008), a possibilidade de as capacitâncias de filtragem serem diminuídas, fazendo com que seja viável a utilização de capacitores de filme ao invés de capacitores eletrolíticos, que são os grandes responsáveis pela diminuição da vida útil do *driver*. “A vida útil de um capacitor eletrolítico praticamente dobra a cada 10 °C de redução em sua temperatura de operação” (SOARES 2012, p.26). Assim, se ele estiver 40 °C abaixo da temperatura de operação especificada pelo fabricante (redução de $4 \times 10^{\circ}\text{C}$), terá um ganho de $2^4 = 16$, ou seja, $16 \times 3.000 = 48.000$ horas. Ou, no pior caso, $16 \times 2.000 = 32.000$ horas

Considere que a maioria das lâmpadas e luminárias de *LED* têm uma vida útil especificada em folhas de dados, sem qualquer referência à temperatura ambiente, como 40.000 ou 50.000 horas de funcionamento, sem mencionar a possibilidade de ocorrer defeito no *driver* usando capacitor eletrolítico durante esse período. Isso somente aconteceria se a temperatura ambiente ao redor da lâmpada ou luminária fosse menor que 25°C (o que pode ocorrer em algumas localidades do globo), e com uma condição favorável para dissipação de calor, de modo que os capacitores eletrolíticos do *driver* ficassem com temperatura abaixo de 45°C, mas na prática essa condição raramente ocorre.

Contudo, existem algumas técnicas de projeto para minimizar os problemas que podem surgir com a degradação do capacitor eletrolítico no circuito do *driver*; como por exemplo o uso de dois ou mais capacitores em paralelo de modo a dividir a corrente e conseqüentemente a temperatura de operação, porém esses artifícios aumentam o custo do produto e o valor é repassado ao consumidor. Por isso, geralmente sistemas de iluminação *LED* de boa qualidade, e realista na sua expectativa de vida útil apresentada, com certeza custam mais caro, e dificilmente prometem mais do que 35.000 horas de vida útil. Além disso, mencionam abertamente que o produto não pode ser instalado em luminárias fechadas, que dificultem o processo de convecção e condução do calor para o ambiente externo e para o corpo dissipador do sistema, destacando a importância de garantir um fluxo de ar para que o dissipador consiga manter a temperatura na superfície em um limite aceitável (normalmente abaixo de 60°C).

3 METODOLOGIA

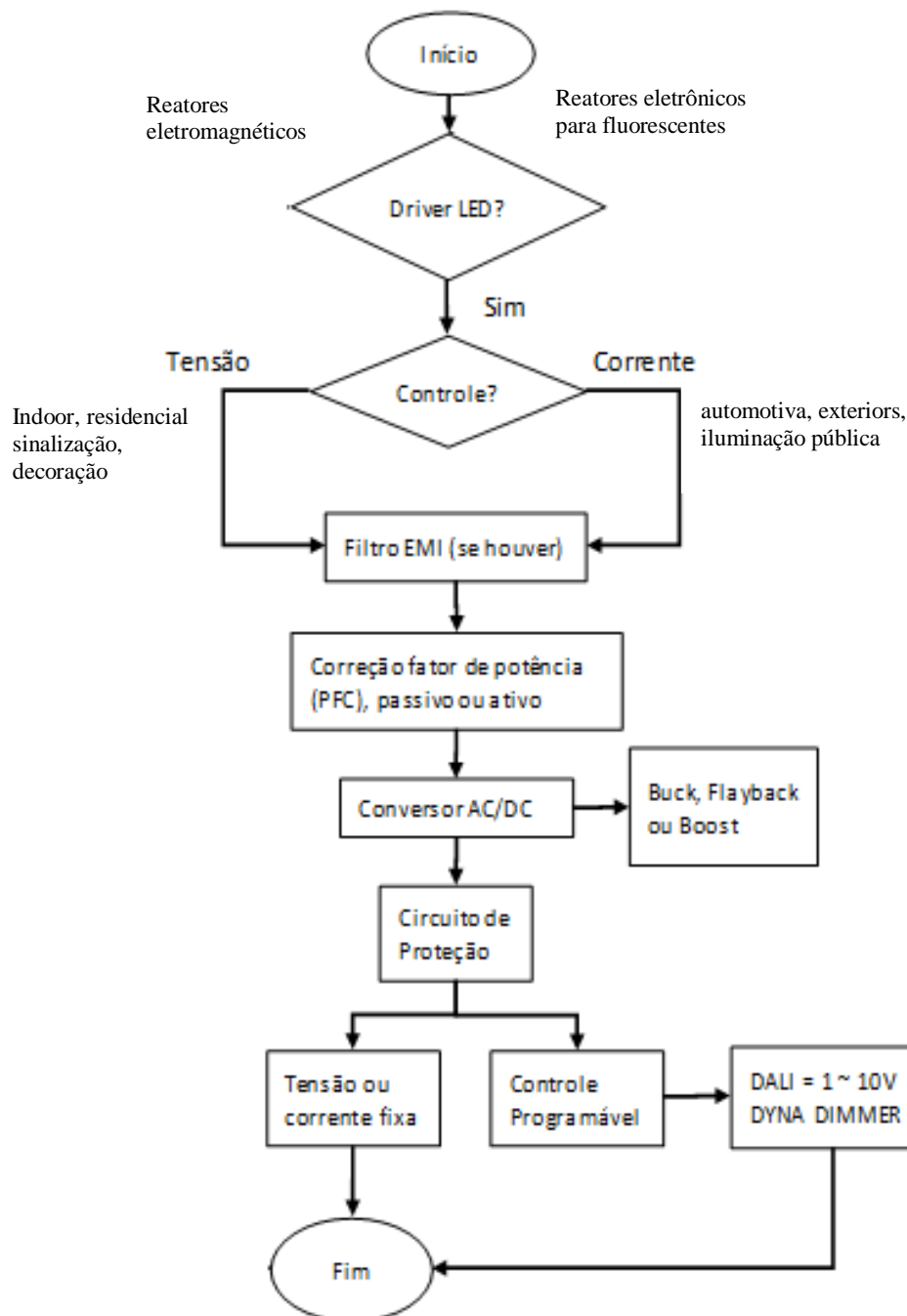
O acesso aos equipamentos e produtos utilizados nesta análise, assim como a orientação técnica que resultou neste trabalho, foram obtidos em um laboratório de engenharia de desenvolvimento de produtos de uma empresa do segmento de iluminação, na qual a autora realizou estágio profissional durante dois anos.

Todo e qualquer ensaio em produtos possui um procedimento que deve ser seguido para proporcionar satisfatório entendimento e conclusão das informações técnicas relevantes a serem analisadas. Por isso, a metodologia para coleta de dados deste trabalho inclui a descrição do procedimento dos ensaios técnicos realizados, bem como um fluxograma do processo de análise da topologia de *drivers LED* que foi adotado, obviamente buscou-se apresentá-los da forma mais simplificada.

3.1 Fluxograma de análise para *drivers LED*

Com objetivo de padronizar a representação dos métodos adotado, fornecendo maior rapidez e facilidade na leitura e entendimento dos processos, foi realizado um fluxograma simplificado da análise técnica dos *drivers* para *LED*, conforme ilustrado na Figura 15.

Descrevendo resumidamente as etapas, primeiramente temos o processo decisivo de qual *driver* será analisado, e saber identificar critérios que os diferenciam de outras fontes de acionamento, como por exemplo reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes e reatores para lâmpadas de vapores pressurizados (mercúrio e sódio). Em seguida, outro processo de tomada de decisão, em que analisamos qual a topologia de operação do *driver*, se corrente constante ou tensão contante, também identificamos a qual aplicação o *driver* destina-se a partir da potência e eficácia luminosa em lúmens por watts. Na próxima etapa é verificado critérios de emissão de interferências eletromagnéticas, se existe ou não a filtragem desses ruídos irradiados e conduzidos. Depois disso verifica-se a existencia de circuito de correção do fator de potência, se este tem topologia passiva ou ativa (quando apresenta ganho). Logo após chegamos na análise da topologia do estágio de conversão CA-CC e CC-CC, cujo circuito é fundamental para determinar a eficiência do *driver*. Depois temos os circuitos de proteção para condições anormais de operação, para o qual são realizados testes específicos durante desenvolvimento do *driver*, como teste para medir a perda de potência em *standby*. Por fim, chegamos a etapa de saída, ou seja, do fornecimento de potência a carga, em que verificamos a regulação de linha e de carga, também se o *driver* apresenta controle programável através dos protocolos *DALI* ou *DMX*, e dimerização linear ou pelo *modo PWM*.

Figura 15: Fluxograma de análise para *Drivers LED*

Fonte: O autor.

O Quadro 4 descreve uma lista para verificação dos procedimentos de ensaios e análises técnicas em *drivers LED*, em geral. Como o objetivo deste trabalho é comprovar a influência dos fatores temperatura e regulação de corrente na carga como determinantes da vida útil e eficiência de sistemas de iluminação *LED*, foram dispensadas algumas etapas visando tornar este trabalho mais coeso.

Quadro 4: Lista de verificação para ensaio de *Drivers LED*.

Check List - Análise de Produtos - Drivers LED		
sequência	Ação	Status
1°	Foto do produto embalado	Concluído
2°	Foto do produto sem embalagem	Concluído
3°	Foto interna da placa parte superior	Concluído
4°	Foto interna da placa parte inferior	Concluído
5°	Características mecânicas (Dimensões do housing), peso, cabos de conexões, material do housing	Não aplicável
6°	Performance na(s) tensão(ões) especificada(s) no produto	Concluído
7°	Relação entre Vin x Vout na(s) principal(is) tensão(ões) com $\pm 10\%$	Concluído
8°	Imagem da câmara térmica com driver em operação a temperatura ambiente	Concluído
9°	Imagem da câmara térmica com driver dentro do housing	Não realizado
10°	Verificar se produto atende a Legislação (Vide especificação do fabricante e L70, L50)	Não aplicável
12°	Fator de potencia (para drivers mínimo de 0,92)	Concluído
13°	Verificar se driver é programável (dimerização, turn on/off) - Protocolo utilizado DALI, DMX ou DSI	Concluído
14°	Forma de onda da tensão na carga (verificar percentual das variações)	Concluído
15°	Forma de onda da corrente na carga (verificar peak-peak do sinal)	Concluído
16°	Eficiência (Pin/Pout) do Driver	Concluído
17°	Estimativa da vida útil através do eletrolítico (Quando houver)	Concluído
18°	Dimerização - Curvas do modo PWM em 25%, 50%, 75% e 100% da potência	Não realizado
19°	Mapeamento térmico na(s) principal(is) tensão(ões) em 25°C, 55°C, 75°C	Concluído
20°	Indicação da posição comercial do produto	Não realizado
21°	Bill Of Material (BOM) do produto	Concluído
22°	Custo estimado do produto (setor de controladoria)	Não realizado
23°	Esquema elétrico do produto	Concluído
24°	Indicação de pontos fortes	Não aplicável
25°	Indicação de pontos fracos	Não aplicável
26°	Indicar principais componentes do produto	Não aplicável

Legenda:

- Concluído
- Não aplicável
- Não realizado

Fonte: O autor.

3.2 Laboratório e equipamentos

Bancadas de trabalho, onde eram realizados diversos ensaios nos drivers e reatores eletrônicos. Dentre eles, incluem ensaio de performance com medição das características elétricas dos produtos como corrente de filamento, tensão de ignição, luminância, parciais harmônicas e fator de potência. Um osciloscópio de alta resolução foi utilizado para observar as formas de onda do circuito e por fim realizou-se um ensaio térmico em estufa para verificar a temperatura de operação dos principais componentes, o que permite levantar uma estimativa do tempo de vida útil do produto analisado. As Figuras 23 e Figura 24 mostram as bancadas de laboratório utilizadas para os ensaios propostos. Elas incluem os diversos equipamentos usados nos ensaios, como fonte de corrente constante, analisador de energia, osciloscópio, luxímetro, estufa térmica, entre outros.

Figura 16: Bancada de ensaios 01.



Fonte: Laboratório de Engenharia de Desenvolvimento de empresa do setor iluminação.

Figura 17: Bancada de ensaios 02 e 03.



Fonte: Laboratório de Engenharia de Desenvolvimento de empresa do setor iluminação.

Parte da metodologia consiste em mostrar os instrumentos e equipamentos de laboratório utilizados durante as análises. Procurando explicar rapidamente sua funcionalidade e aplicação. Como na Figura 18, em que acima temos uma fonte de corrente contínua variável, utilizada para testes em *drivers* e módulos para *LED*; e abaixo temos um analisador de componente (equipamento de alta precisão marca Wayne Kerr 6430A) cuja função é verificar margem de tolerância de componentes eletrônicos.

Figura 18: Fonte de corrente contínua e analisador de componentes.



Fonte: Laboratório de Engenharia de uma empresa do setor iluminação.

Na Figura 19 observamos uma fonte de tensão CA variável (marca Chroma 61601), na qual também pode-se controlar a frequência da tensão de entrada. Cada bancada de ensaios no laboratório possui uma fonte semelhante a essa, pois é usada para garantir um nível estável de tensão durante os ensaios evitando qualquer influência de ruídos no sinal de entrada da rede elétrica, além de possibilitar valores entre 1V a 350V.

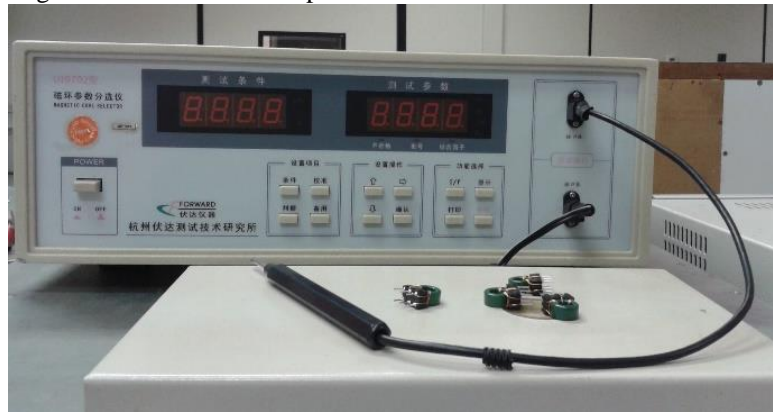
Figura 19: Fonte de tensão alternada variável.



Fonte: Laboratório de Engenharia de Desenvolvimento.

Na Figura 20, temos um aparelho medidor de campo elétrico e indutância toroidal. Fontes chaveadas, circuitos ressonantes, conversores entre outros dispositivos eletrônicos possuem componentes eletromagnéticos, tornando este equipamento muito útil no desenvolvimento de protótipos que necessitam de um toróide diferenciado. Sua função é medir a intensidade do campo magnético do componente, através do fenômeno conhecido como Efeito Hall.

Figura 20: Medidor de campo elétrico e indutância toroidal.



Fonte: Laboratório de Engenharia de Desenvolvimento de empresa do setor iluminação.

Na Figura 21 mostramos um medidor de temperatura, no qual conecta-se os termopares para medição durante ensaios térmicos. Cada bancada no laboratório conta com uma estufa de ensaio juntamente com este aparelho da imagem.

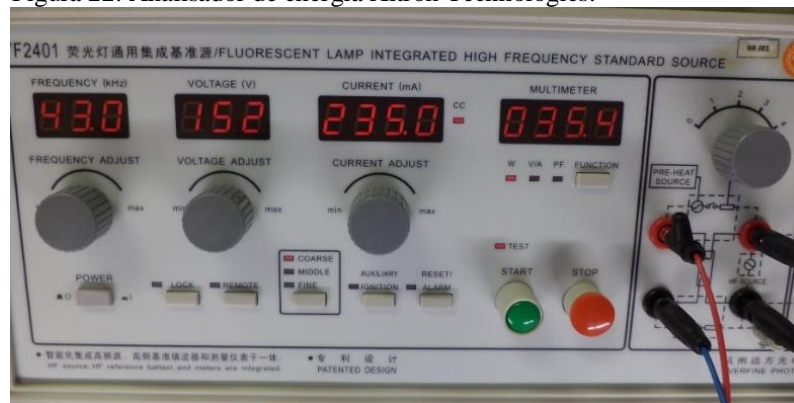
Figura 21: Medidor de temperatura:



Fonte: Laboratório de Engenharia de uma empresa do setor iluminação.

Já na Figura 22, temos um analisador de energia da Xitron Technologies para altas potências, em que pode-se medir a frequência de saída, em kHz, a tensão de saída, corrente de saída e parâmetros de potência.

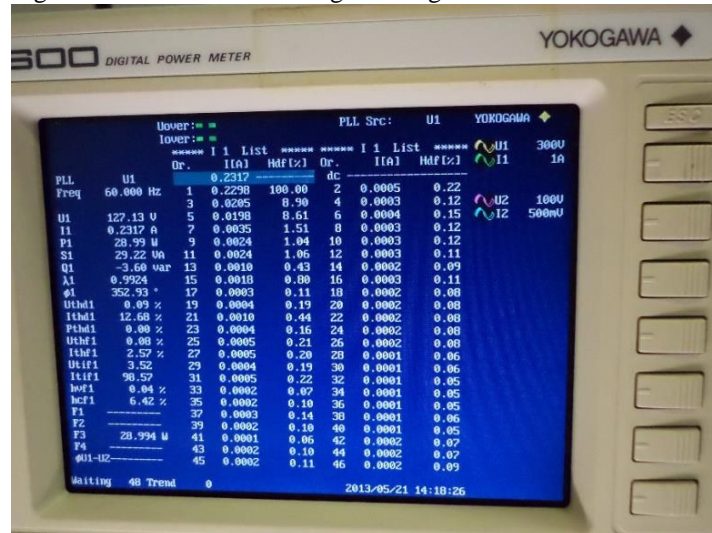
Figura 22: Analisador de energia Xitron Technologies.



Fonte: Laboratório de Engenharia de uma empresa do setor iluminação.

Na Figura 23 a seguir temos um analisador de energia Yokogawa WT210, que possui excelente estabilidade e precisão, para altas frequências (da ordem de KHz). Este equipamento com várias funcionalidades além de wattímetro, realiza inclusive medição de componentes harmônicas, fator de potência, correntes de saída e rendimento de dispositivos eletrônicos.

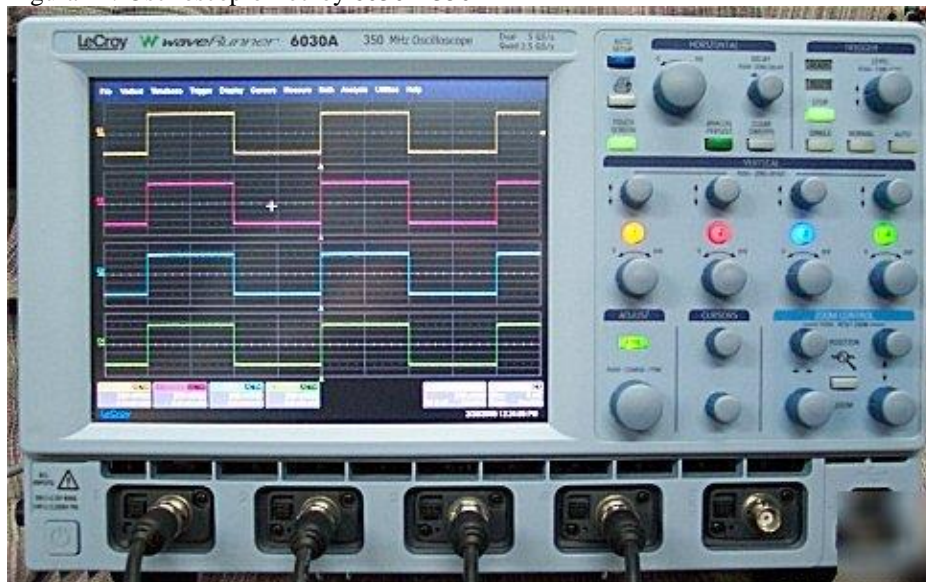
Figura 23: Analisador de energia Yokogawa WT210.



Fonte: Laboratório de Engenharia de Desenvolvimento.

Na Figura 24 ilustra o osciloscópio de alta frequência Lecroy 6030A 350 Mhz, utilizado para medir e observar formas de ondas no transistores durante ensaios de performance elétrica.

Figura 24: Osciloscópio Lecroy 6030A 350 Mhz



Fonte: Laboratório de Engenharia de Desenvolvimento.

A Figura 25 a seguir mostra um Luxímetro, o principal aparelho utilizado neste trabalho, sua função é medir a intensidade de luz, pela grandeza LUX.

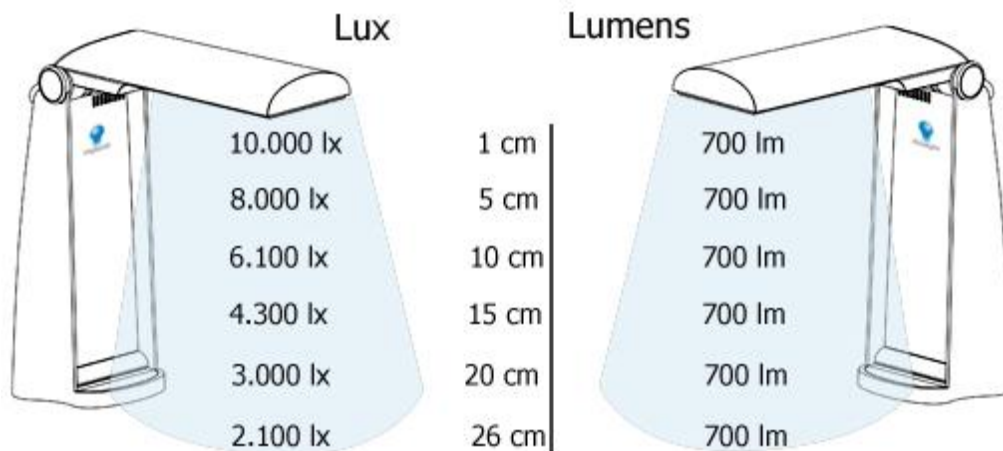
Figura 25: Luxímetro



Fonte: Laboratório de Engenharia de Desenvolvimento

Sabemos que existe certa confusão entre os termos Lux e Lumens, por isso resumidamente pode-se definir Lux como a medida da intensidade da luz, que depende da distância entre a fonte e o ponto de medição. Por exemplo, para uma fonte de luz a 1 metro de distância a medição será muito maior quando comparada a mesma fonte com a 100 metros distantes. Enquanto Lumens, ou fluxo luminoso, descreve o nível geral de luz emitido por uma fonte, desconsiderando quanto distante está o ponto de medição. A relação direta entre lux e lumens pode ser expressa por $1\text{lx} = 1\text{Lm}/\text{m}^2$. Então, por exemplo, um fluxo luminoso em lumens permanece constante enquanto a intensidade em lux, varia com a distância e a área, conforme demonstra-se na Figura 26:

Figura 26: Diferença entre lux e lumens.

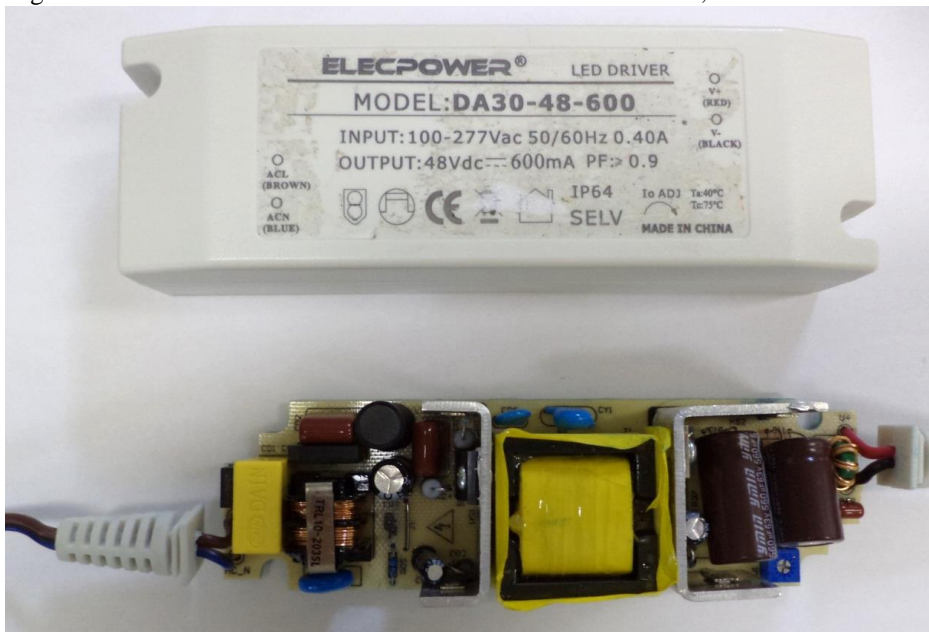


Fonte: Adaptada pelo autor de My local Eletrician (2013) apud DayLight Company (2009)

4 ENSAIOS E RESULTADOS

As amostras de engenharia utilizadas nos ensaios são o *Driver LED* tensão constante *ELECPower* 100-277VAC / 48VDC – 0,6A, e o *Driver LED* de corrente constante *OPTRONIC* OT 9/10 24V-350. Primeiramente apresentamos uma análise mecânica das amostras de *drivers* e inspeção visual dos componentes utilizados. Observamos na Figura 26 uma fotografia da vista superior do *driver LED ELECPower* 100-277VAC/ 48VDC - 0,6A, onde acima temos o “housing” que contém as especificações técnicas do fabricante, e abaixo observamos o circuito interno do dispositivo. Na Figura 27 tem-se os aspectos mecânicos do *driver* testado.

Figura 27: *Driver LED ELECPower* 100-277VAC/ 48VDC - 0,6A.



Fonte: O autor (amostra de engenharia usada nos testes)

Na Figura 28 destaca-se o uso de um varistor para o circuito de proteção do *driver*, e a presença de um dissipador térmico próximo aos transistores e capacitores eletrolíticos, visando proporcionar melhor condição de temperatura. Na Figura 29, tem-se a vista inferior da PCI do *driver*, o qual possui dois circuitos integrados e diversos componentes SMC.

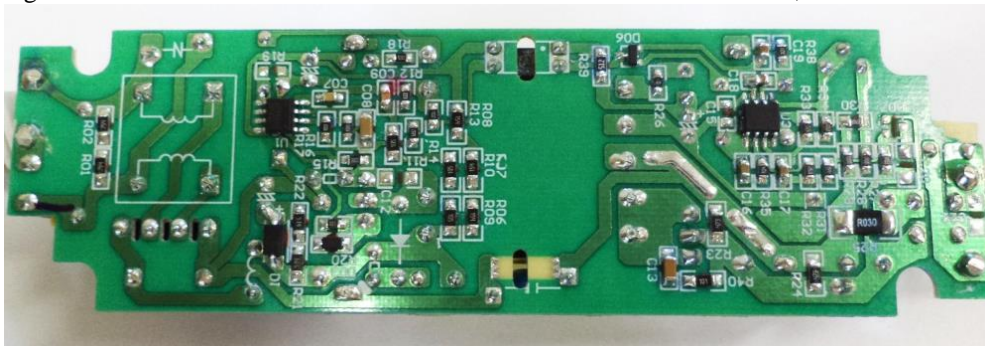
Em seguida realiza-se uma inspeção visual no *driver* de corrente constante *OPTRONIC* OT 9/10 24-350 OSRAM, em que na Figura 30 tem-se vista do housing do produto, que informa as especificações de operação fornecidas pelo fabricante. Logo após temos na Figura 31 a vista superior do mesmo *driver*, mostrando os principais componentes do circuito. E por fim na Figura 32, vê-se a vista inferior da PCI, na qual observa-se a ausência de componentes SMC e baixa qualidade do processo de soldagem do *driver*.

Figura 28: Vista lateral do *Driver ELECPOWER 100-277VAC/ 48VDC -0,6A.*



Fonte: O autor (amostra de engenharia usada nos testes).

Figura 29: Vista inferior *Driver ELECPOWER 100-277VAC - 48VDC - 0,6A.*



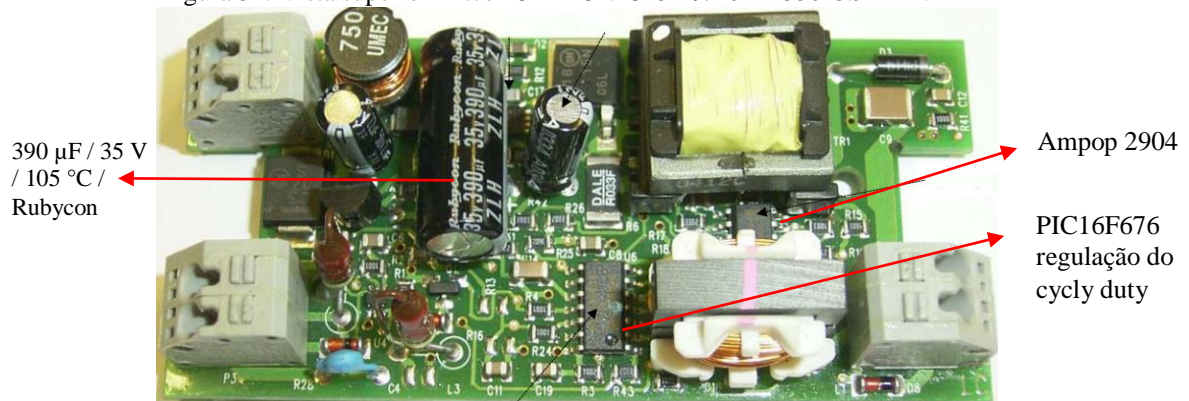
Fonte: o autor (fotografia da amostra de engenharia usada nos testes).

Figura 30: *Driver de corrente constante OPTRONIC OT 9/10 24-350 OSRAM.*



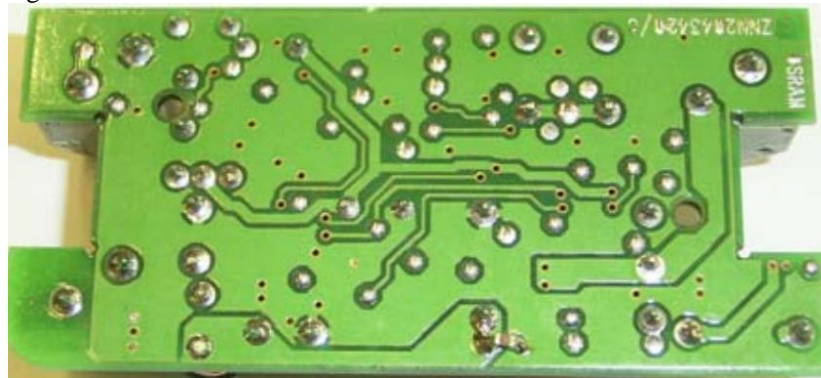
Fonte: o autor (fotografia da amostra de engenharia usada nos testes).

Figura 31: Vista superior *Driver OPTRONIC OT 9/10 24-350 OSRAM*.



Fonte: o autor (fotografia da amostra de engenharia usada nos testes).

Figura 32: Vista inferior *Driver OPTRONIC OT 9/10 24-350 OSRAM*.



Fonte: o autor (fotografia da amostra de engenharia usada nos testes).

O ponto forte deste *driver* de corrente é ser muito compacto, com grande densidade de componentes relacionado a sua funcionalidade, pois é um *driver* pequeno que possui interface de controle programável com protocolo DALI, sendo uma solução interessante para aplicações híbridas, ou seja uma aplicação não profissional mas com interface avançada de controle. Além disso, ele ainda inclui proteções eletrônicas reversíveis contra sobrecarga, sobreaquecimento e curto circuito.

O termo SELF (*Safety Extra-Low Voltage*) que aparece no “housing” do *driver OPTRONIC* refere-se a especificação definida pela IEC (do inglês, *International Electrotechnical Commission*). Nessa norma, para determinado sistema elétrico sob condições normais de operação ou sob “*single-fault conditions*”¹² (condição de falta), a tensão não poderá exceder ao limite máximo definido por norma quando considerada uma instalação de baixo

¹² Single-fault condition é um termo técnico cuja tradução literal para português não expressa seu real sentido. Na verdade, consiste em condições de falha de operação específicas, que ocorrem com frequência e para a qual o circuito conta com uma autoproteção, tais como interrupção do conector de aterramento ou de um dos cabos de entrada, alguma falta de isolamento. Ou seja, são condições de falhas esperadas para a qual o circuito deve se autodesligar e quando iniciado novamente supõe-se que esteja em perfeito funcionamento.

risco. O Quadro 5 a seguir mostra as classificações de risco segundo norma de segurança da IEC 60079-10-1.

Quadro 5: Níveis de tensão e correspondentes classificações de segurança.

IEC Faixa de tensão	CA	CC	Definição de Risco
Alta tensão (Entrada de energia)	> 1000 Vrms	>1500 V	Risco de arco elétrico
Baixa tensão (Entrada de energia)	50 - 1000 Vrms	120 - 1500 V	Risco de choque elétrico
Extra baixa tensão (Entrada de energia)	< 50 Vrms	< 120 V	Baixo risco

Fonte: Requisitos de segurança da IEC 60079-10-1.

O *driver OPTRONIC OT 9/10 24-350* apresenta dimerização da carga pelo método PWM, atendendo a variação de potência de saída de 0,6 a 9,0W. Também fornece corrente constante eletronicamente estabilizada de 350mA para a carga.

4.1 Resultados do Ensaio de performance elétrica

O ensaio de performance elétrica, também chamado de ensaio de desempenho, é o principal teste realizado em laboratório para analisar se as características elétricas do produto atendem aos valores previamente declarados pelo fabricante em datasheets e sobretudo verificar se especificações técnicas definidas estão em conformidade com a normatização técnica correspondente.

O *Driver LED* testado possui topologia para fornecer tensão constante a carga, sendo do fabricante *ELECPOWER*, com especificação “*Full range*”¹³, ou seja, pode ser operado dentro da faixa de tensão de 100V até 277V. Essa característica é muito interessante não somente por atender tanto a instalações monofásicas, como bifásica, mas principalmente porque o *driver* foi projetado para apresentar correto funcionamento quando submetido as ocorrentes variações de tensão da rede elétrica, como as subtensões e sobretensões,[...] “as quais são consideradas adequadas se estiverem dentro das margens de -7% e +5%”(ANEEL 2010, p.30).

Os valores medidos durante ensaio de performance encontram-se sintetizados na Tabela 01. Nela compara-se a especificação declarada pelo fabricante em contraste com as medições realizadas pelo autor em laboratório. Os equipamentos utilizados na medição foram um analisador de energia Yokogawa WT210, luxímetros e termopares tipo K.

¹³ Full range é um termo técnico em inglês, que significa que um equipamento eletroeletrônico funciona dentro de uma determinada faixa de tensão especificada. Não devendo ser confundido com o termo ‘Multitensão’, que na verdade significa que pode ser operado em 110 e 220, mas não para qualquer valor intermediário entre esses.

Tabela 1: Performance elétrica *Driver ELECPOWER 48VDC - 0,6A*

Ensaio performance Elétrica Driver Tensão contante ELECPOWER LED Driver 48VDC - 0,6A				
Parâmetros medidos	Valores declarados fabricante		Valores medidos em laboratório	
Tensão de entrada [V]	100,00	277,00	110,00	220,00
Corrente de entrada [A]	0,40	Não declarado	0,42	0,17
Potência de Entrada [W]	36,00	Não declarado	34,00	33,20
Fator de Potencia (PF)	>0,90	>0,90	0,75	0,88
THD da corrente [%]	Não declarado	Nd	6,45	14,5
Eficácia de fluxo luminoso [%]	Não declarado	Nd	0,84	0,87
Tensão de saída [V]	48,00	48,00	48,00	48,00
Corrente de saída [A]	0,600	0,600	0,600	0,610
Potência de saída [W]	29,00	29	28,8	29,2
Rendimento/ Eficiência [%]	Não declarado	Não declarado	84,71	87,95
Temperatura ambiente Ta [°C]	40	40	25	25
Temperatura da carcaça Tc [°C]	75	75	72,6	66,1

Fonte: O autor.

A partir do ensaio podemos inferir que o *Driver* apresentou melhor rendimento (relação entre potência de saída dividida pela potência de entrada) quando operando na tensão de 220V, isso pode ser justificado pelo fato de que a corrente de entrada reduziu pela metade, e consequentemente os componentes eletrônicos estavam submetidos a um menor esforço. E conforme demonstrado até o momento, os componentes críticos como transistores (comutadores), diodos, indutores e capacitores apresentaram menor aquecimento, inclusive demonstrado na medição da temperatura de carcaça do *Driver*, a qual foi 6,5°C inferior ao valor medida para tensão 110V. Essa diferença na eficiência energética do *driver* também refletiu na medição da eficácia de fluxo luminoso¹⁴ (F.F.) que foi 3% maior, provavelmente devido as menores perdas de potência por efeito joule.

Por fim, justificamos o foco principal de nossa análise durante o ensaio, ou seja, por tratar-se de um *driver* de tensão constante, observamos que em ordem de manter a tensão fornecida a carga constante, durante a operação o *driver* apresentou variações na corrente. Mesmo que o valor apresentado tenha sido pequeno, cerca de 10 a 20mA, ainda assim torna-se significativa para análise. Considerando que o procedimento para realizar essas medições exige que o referente módulo de *LEDs* seja substituído por uma resistência de carga equivalente, no caso foi utilizado 15Ω, isso garante que não houve variação na carga. Então como o *driver* em questão foi operado por poucas horas, no máximo 20 horas em operação, não justificaria considerável variação de corrente uma vez que a carga pode ser dada como constante.

¹⁴ Eficácia de fator de fluxo luminoso ou simplesmente F.F. é a relação percentual entre fluxo luminoso obtido em medição em Lux/m² e o fluxo luminoso nominal especificado (geralmente 0,90).

No entanto, na operação de campo, sabemos que o *LEDs* quando conduzindo diretamente podem ser simplesmente considerados como cargas resistivas (devido as resistências parasitas), e com o decorrer do seu tempo de vida útil, a recombinação de lacunas e elétrons vai aumentando sua região de depleção e a tensão no diodo (V_D) tende a aproximar-se da tensão limiar (V_{th}). Sendo que quando V_{th} for aproximadamente igual a V_D , conforme a equação de Shockley, a corrente irá variar exponencialmente com as variações de tensão. Assim pequenas variações na tensão, provocadas por transientes, interferências eletromagnéticas ou pelo próprio funcionamento interno do circuito irão provocar uma brusca variação na corrente nos *LEDs*. E esses por serem sensíveis a essas flutuações, irão sobreaquecer e conseqüentemente reduzir de forma prematura sua vida útil.

Além da performance foi realizado teste para medir o THD do *driver LED* para diferentes tensões de operação, para verificar se o *driver* irá prejudicar ou não a qualidade de energia da instalação. A Tabela 5 mostra as o resultado das medições realizadas, e conclui-se que o *driver* atende aos requisitos de especificação.

Tabela 2: Medição do THD com carga

Tesão de entrada	THD	Especificação	Resultado do teste
100Vac/50Hz	7.5%	< 30%	Aprovado
139Vac/50Hz	10.3%	< 30%	Aprovado
200Vac/50Hz	15%	< 30%	Aprovado
250Vac/50Hz	17%	< 30%	Aprovado

Fonte: O autor.

Como citado anteriormente, para *driver* com topologia de tensão constante geralmente ocorre variação significativa da corrente entregue a carga. Por isso alguns *drivers* possuem uma especificação relacionada a regulação de corrente na saída. Foi realizado o teste de regulação em diferentes tensões de entrada para o *ELECPower 48VDC - 0,6A*, conforme a Tabela 3, e constatou-se que ele apresenta uma boa regulação de corrente, permanecendo abaixo do valor especificado de 5%. Essa característica geralmente se perde para a topologia de tensão constante a medida em que a temperatura de operação do *driver* e módulo *LED* aumentam.

Tabela 3: Regulação da corrente de saída

Tensão de entrada	Corrente De saída	Tensão de Saída	Especificação	Resultado
100Vac/50Hz	630mA	45,9	Regulação de carga <5%	Aprovado
139Vac/50Hz	625mA	45,8		Aprovado
200Vac/50Hz	615mA	45,7		Aprovado
250Vac/50Hz	590mA	45,9		Aprovado

Fonte: O autor.

A Tabela 4 demonstra a análise isolada entre a eficiência do *driver* e a variação da tensão de entrada. Nela podemos constatar que o *driver* quando operando com a mesma carga, apresentará melhor rendimento para maiores tensões de entrada, devido ao motivo previamente explicado de que os componentes estarão submetidos a menores esforços elétricos e consequentemente haverá menores perdas de potência.

Tabela 4: Eficiência do *driver* x tensão de entrada

Tensão entrada	100Vac	139Vac	200Vac	250Vac
Carga máxima	79,2%	83,1%	83%	82,3%

Fonte: O autor.

A Tabela 5 e Tabela 6 apresentam as medições do teste de verificação do fator de potência (PF) do *driver* ELECPOWER 48VDC - 0,6A ao variar a tensão de entrada. Note que foi realizado o teste separadamente para a frequência de 60 e 50Hz pois segundo Cunha (2010) experiências realizadas mostraram que 1% de abaixamento na frequência determina abaixamento de 0,7% na carga e 1% na diminuição na tensão diminuiu a carga em 1,6%. Ou seja uma mínima variação na frequência prejudica o funcionamento do *driver* LED. Lembrado que a usina de Itaipu fornece energia em ambas as frequências.

Tabela 5: Fator de potência para frequência de 60Hz.

Input voltage	PF	Especificação	Resultado
100Vac/60Hz	0,80	>0,90	Reprovado
139Vac/60Hz	0,92	>0,90	Aprovado
200Vac/60Hz	0,91	>0,90	Aprovado
250Vac/60Hz	0,85	>0,90	Reprovado

Fonte: O autor.

Tabela 6: Fator de potência para frequência de 50Hz.

Tensão entrada	PF	Especificação	Resultado
100Vca/50Hz	0,82	>0,90	Reprovado
139Vca/50Hz	0,93	>0,90	Aprovado
200Vca/50Hz	0,92	>0,90	Aprovado
250Vca/50Hz	0,86	>0,90	Reprovado

Fonte: O autor.

Na Tabela 7 seguir mostramos a análise dos níveis de “ripple”(valores de pico no sinal) e ruídos de tensão e corrente fornecida a carga para a topologia de tensão constante, a qual é considerada muito importante para os objetivos deste estudo. Pois conforme mencionado, a tecnologia de LEDs orgânicos aparece como o futuro das aplicações de iluminação, e estes polímeros são extremamente sensíveis a variações de corrente, sendo que a regulação de potência e carga desta topologia demonstra não atender às necessidades dessa nova tecnologia.

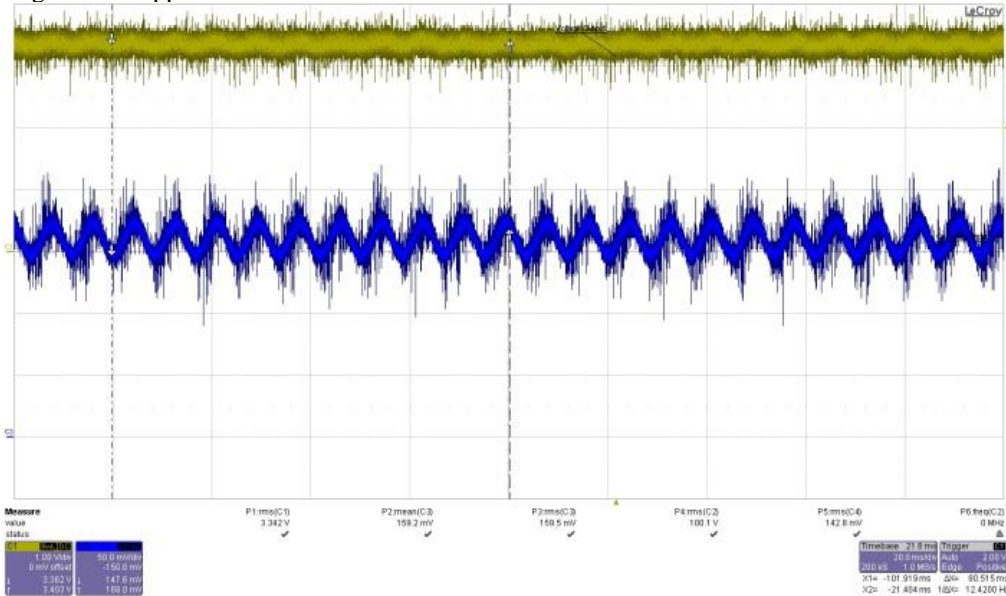
Para este teste foi utilizado uma carga de 2 x16 LEDs em série (3,1Vdc x 0,160A). Nas formas de onda apresentadas a tensão está em amarelo e a corrente em azul.

Tabela 7: Ripple e ruídos na corrente e tensão da carga.

Tensão entrada	Corrente no LED	Tensão Saida	Forma de onda
100Vca/60Hz	0,159mA	3,3 Vcc	Figura 33
139Vca/60Hz	0,164mA	3,3 Vcc	Figura 34
200Vca/60Hz	0,166mA	3,3 Vcc	Figura 35
250Vca/60Hz	0,175mA	3,2 Vcc	Figura 36

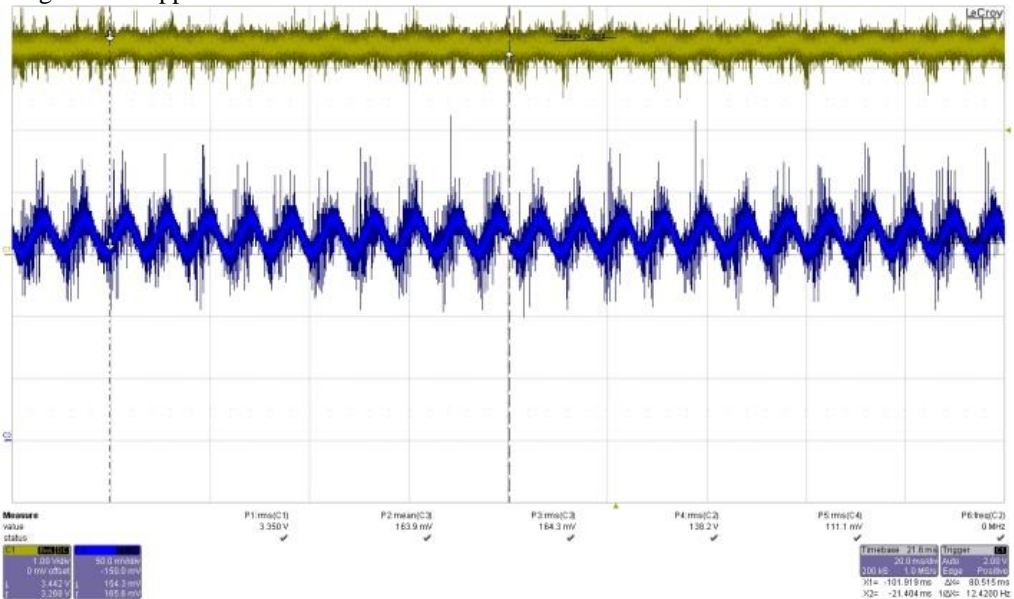
Fonte: O autor.

Figura 33: Ripple e ruídos na tensão e corrente - 100Vca.



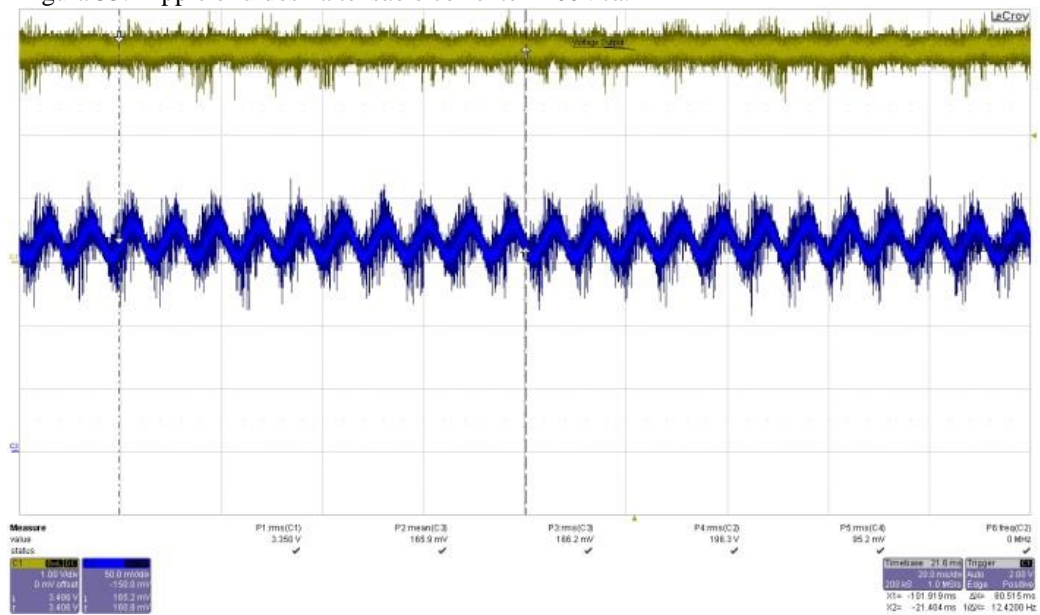
Fonte: O autor (osciloscópio LECROY 6030A).

Figura 34: Ripple e ruídos na tensão e corrente - 139Vca.



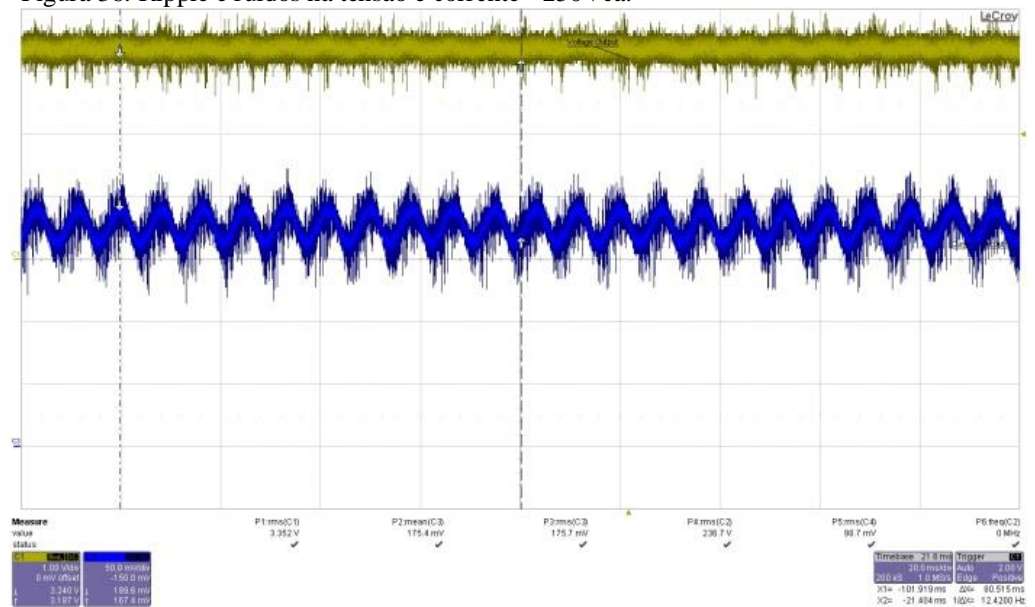
Fonte: O autor (osciloscópio LECROY 6030A).

Figura 35: Ripple e ruídos na tensão e corrente - 200Vca.



Fonte: O autor (osciloscópio LECROY 6030A).

Figura 36: Ripple e ruídos na tensão e corrente - 250Vca.



Fonte: O autor (osciloscópio LECROY 6030A).

A partir da análise das formas de onda da corrente e tensão fornecida a carga de *LEDs*, observamos que embora este *driver* possua uma boa regulação de carga (inferior a 5%) ainda assim os “ripples” na corrente são prejudiciais para a vida útil do sistema *LED* por acelerar a degradação dos semicondutores conforme equação de Shockley. Sendo recomendável o uso de um *driver* com corrente constante e um bom controle e regulação de carga e potência.

A seguir apresenta-se no Quadro 6 e na Tabela 8, os resultados do mesmo procedimento de ensaio de performance elétrica para o *driver LED* de corrente constante *OPTRONIC OT 9/10 24-350*. Este *driver* pode ser utilizado apenas para tensão de entrada contínua, ou seja, foi

projetado para aplicações onde o estágio prévio de conversão CA para CC é realizado por uma fonte auxiliar. Tal característica torna-se interessante para isolar a análise das perdas de potência exclusivamente no estágio de conversão CC-CC do *driver*.

Quadro 6: Performance *OPTRONIC 9/10 -24/350*

Referência e parâmetros	OPTRONIC 9/10 - 24/350 DIM
Carga	DRAGON LED ou quaisquer outros LEDs operados a 350mA
Topologia	Corrente constante
Faixa de tensão de entrada nominal	10 - 24 Vcc
Máxima faixa de tensão de entrada	9 - 32 Vcc
Máxima corrente de entrada	1,1 Acc
Tensão de saída	0 - 24,5Vcc
Controle de tensão	1...10 Vcc
Máximo controle de corrente	0,6 mA
Modo de dimerização	PWM
Frequência de operação	244Hz
Faixa de dimerização	0-100%
Máxima saída de corrente	Corrente CC 350 +/-17mA controlada
Perdas (DIM = 95% da carga)	Máximo de 2,5W
Norma de segurança	EN61347-2-2, EN60598, IEC 61347-2-13
Norma de performance	IEC 62384
Norma rádio interferência	EN55015
Norma contra humidade	EN61547
Faixa de temperatura operação	-20 a 50°C
Teste de circuito aberto	Sim
Proteção curto circuito	Sim, com desligamento automatico e reversível
Proteção sobrecarga	Sim, com desligamento automatico e reversível
Proteção sobreaquecimento	Sim, com desligamento automatico e reversível

Fonte: O autor.

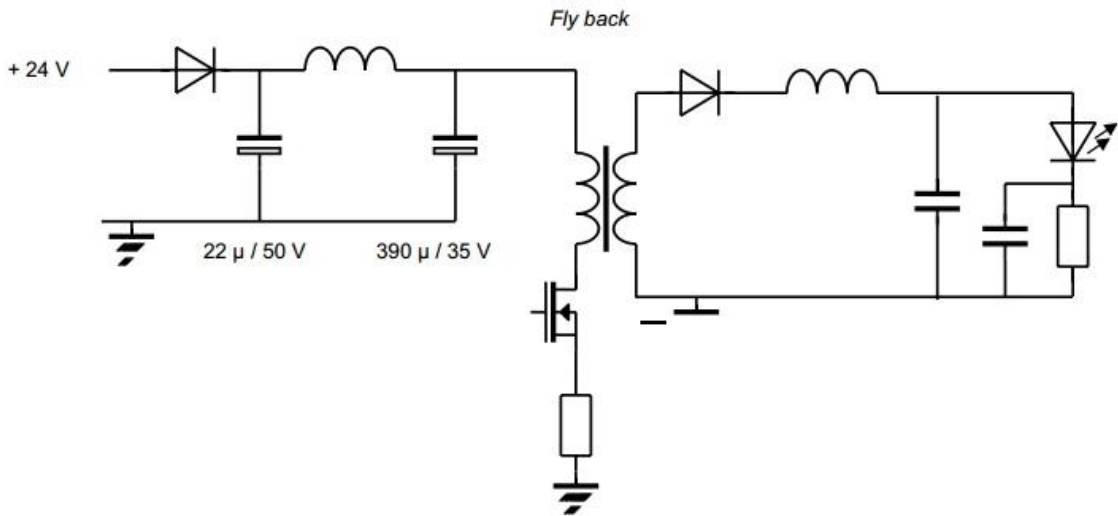
Tabela 8: Performance *OPTRONIC 9/10 - 24/350*.

Nº de LEDs	Tensão DIM	Vin	Iin	Win	VLED	ILED	WLED	Eficiência
1	10,00	24,00	0,079	1,87	3,2	0,352	1,10	59,00%
2	10,00	24,00	0,124	3,00	6,1	0,351	2,10	70,00%
3	10,00	24,00	0,159	4,00	8,9	0,350	3,10	77,50%
4	10,00	24,00	0,217	5,10	11,8	0,350	4,10	80,50%
5	10,00	24,00	0,263	6,30	14,8	0,350	5,10	81,00%
6	10,00	24,00	0,311	7,40	18,8	0,349	6,10	82,50%
7	10,00	24,00	0,36	8,60	20,7	0,350	7,20	83,50%
8	10,00	24,00	407	9,70	23,5	0,349	8,10	84,00%

Fonte: O autor.

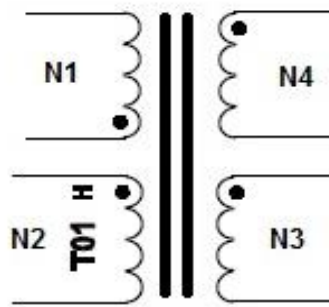
A Figura 37 mostra o esquemático da topologia de conversor CC-CC adotada pelo *driver* de corrente constante, denominada de “flyback”. A Figura 38 e a Tabela 9 apresentam o esquema de ligação do transformador isolador do circuito e suas indutâncias, respectivamente.

Figura 37: Topologia ‘flyback’ do *OPTRONIC OT 9/10 24-350*.



Fonte: O autor.

Figura 38: Esquemático do transformador isolador do Flyback.



Fonte: O autor.

Tabela 9: Especificação do transformador isolador usado no Flyback

Enrolamento	Material	Indutância	Núcleo do Ferrite
N1	0.3Ø * 2	550uH	EE30
N2	0.2Ø * 2	58uH	EE30
N3	0.2Ø * 2	33uH	EE30
N4	0.35Ø * 2	225uH	EE30

Fonte: O autor.

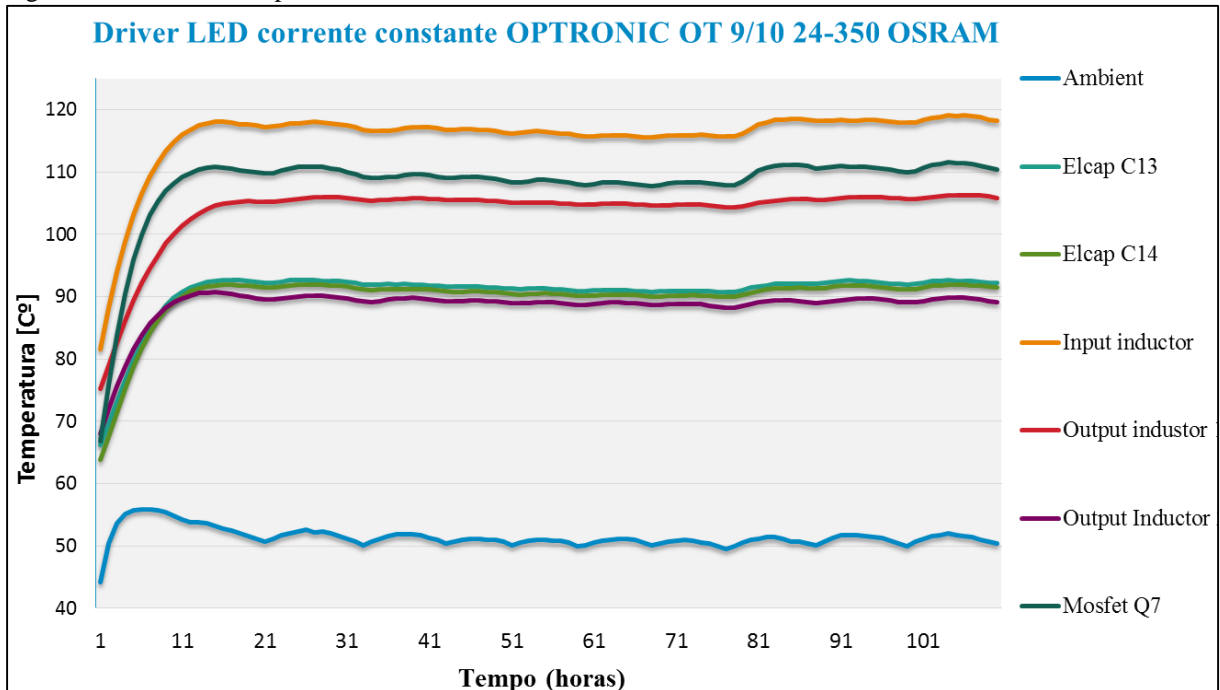
4.2 Resultados do ensaio de mapeamento térmico

O ensaio de mapeamento térmico dos componentes é fundamental para analisar os esforços aos quais estão sendo submetidos. Sabemos que a temperatura é um fator crítico no dimensionamento e operação dos circuitos eletrônicos, sendo diretamente proporcional a quantidade de corrente em condução. Esse ensaio consiste em conectar diversos termopares sob cada um daqueles componentes críticos para a operação do *driver*, no caso transistores, indutores, capacitores eletrolíticos, e a PCB em geral. Coloca-se o *driver* dentro de uma estufa térmica específica para este tipo de ensaio, com objetivo de isolar a transferência de calor do

driver para o ambiente externo, fornecendo assim uma medida mais precisa de como seria a operação do *driver* quando instalado dentro da luminária. Em seguida, a medição inicia-se ao ligar o *driver*, para valor de tensão de entrada nominal de 110V, e mantê-lo em operação por no mínimo 2 horas, para que a temperatura em todos os componentes entre em estabilidade. Após esse período, passamos a coletar os dados pertinentes de medição da temperatura a cada intervalo de 1 hora.

A Figura 39 e Figura 40 mostram os gráficos de mapeamento térmico dos *drivers* analisados, com medição das temperaturas hora a hora. Destacou-se a temperatura dos componentes mais críticos para a operação, como indutores, transistores e principalmente os capacitores eletrolíticos.

Figura 39: Gráfico do mapeamento térmico *DRIVER OPTRONIC OT 9/1024-350*



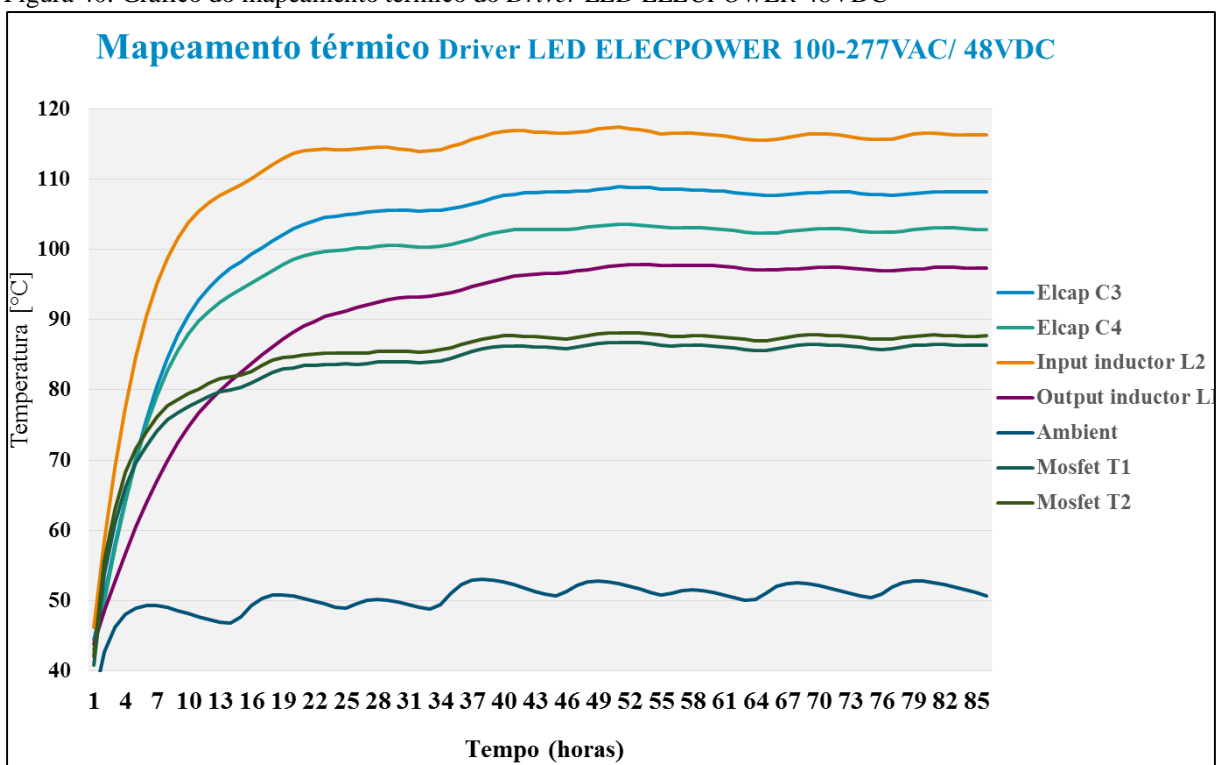
Fonte: O autor. Medição em laboratório utilizando a estufa Nova Técnica e termopares tipo K.

A Tabela 5 a seguir resume as principais informações obtidas no mapeamento térmico, ou seja, a temperatura dos componentes mais críticos após alcançado estabilidade.

Tabela 10: Medições de temperatura *LED OPTRONIC OT 9/10 24/350*

Termopar-componente	Temperatura [°C]
AMBIENTE	50,4
ELCAP C13	92,2
ELCAP C15	91,4
MOSFET Q7	110,4
INPUT INDUCTOR	118,2
OUTPUT INDUCTOR	105,9

Fonte: O autor. Dados extraídos do gráfico da Figura 39.

Figura 40: Gráfico do mapeamento térmico do *Driver LED ELECPOWER 48VDC*

Fonte: O autor. Medição em laboratório utilizando a estufa Nova Técnica e termopares tipo K.

A Tabela 6 a seguir resume as medições de temperatura dos principais componentes do *driver ELECPOWER 48VDC 0,6A*, que foram obtidas no durante o ensaio de mapeamento térmico, ou seja, a temperatura dos componentes mais críticos após alcançado estabilidade.

Tabela 11: Medições de temperatura do *Driver ELECPOWER 48VDC*

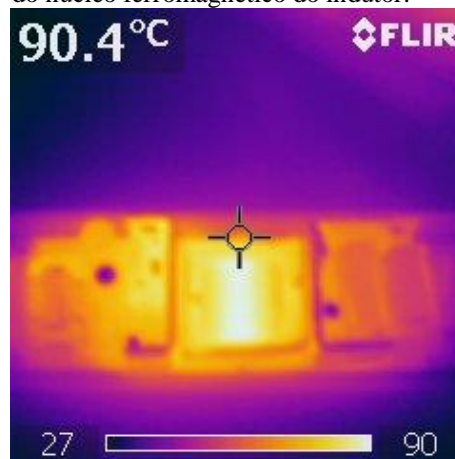
Termopar-componente	Temperatura [°C]
AMBIENTE	50,7
ELCAP C3	108,2
ELCAP C4	103,0
MOSFET T1	86,4
MOSFET T2	88,0
INPUT INDUCTOR	116,3
OUTPUT INDUCTOR	97,4

Fonte: O autor. Dados extraídos do gráfico da Figura 40.

Conforme observamos no mapeamento térmico comparativo entre os dois *drivers*, a temperatura dos capacitores eletrolíticos para aquele *driver* que utiliza topologia de tensão constante foi muito maior, uma diferença de aproximadamente 16°C. Isso representa que a expectativa de vida útil do *Driver ELECPOWER* será inferior a esperada para o *driver* de corrente constante *OPTRONIC OT 9/10 24/350*. Demonstrando através de ensaios a superioridade da topologia de corrente constante sobre aquela de tensão constante.

Para obter uma rápida medição da temperatura dos diversos componentes do *driver* utiliza-se uma câmera térmica FLIR modelo SE-18211, assim pode-se identificar quais componentes apresentam temperaturas críticas em operação, e portanto são escolhidos para fixação do termopar e acompanhamento em regime durante o mapeamento térmico dentro da estufa. A Figura 41 mostra a fotografia térmica do *driver LED ELECPOWER* em operação a temperatura ambiente de 25°C e tensão de entrada de 100V. Medição no núcleo ferromagnético do indutor de saída, ou seja indutor do estágio de conversão CC-CC.

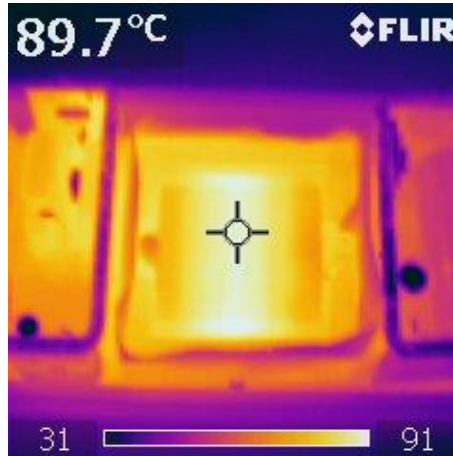
Figura 41: Medição de temperatura do núcleo ferromagnético do indutor.



Fonte: O autor (Câmera térmica FLIR).

Na Figura 42 temos a fotografia térmica do *driver LED ELECPOWER* em operação a temperatura ambiente de 25°C e tensão de entrada de 100V, com a medição no enrolamento do indutor de saída, ou seja indutor do estágio de conversão CC-CC. A temperatura do enrolamento é importante para preservar a isolamento dos fios esmaltados.

Figura 42: Medição da temperatura no enrolamento do indutor de saída.



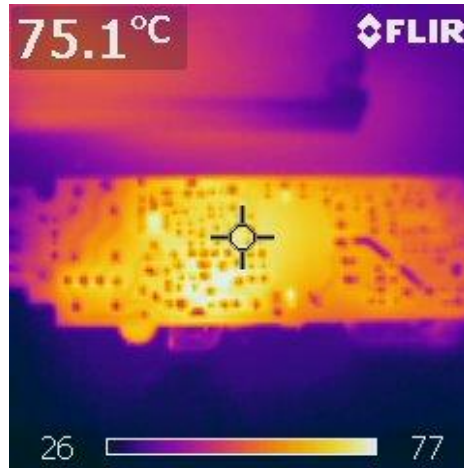
Fonte: O autor (Câmera térmica FLIR E8).

Na Figura 43 apresentamos a fotografia térmica do *driver LED ELECPOWER* em operação a temperatura ambiente de 25°C e tensão de entrada de 100V com a medição do “bottom” da PCB para verificar se existe sobreaquecimento nos CIs (circuito integrado), e nos componentes SMC (do inglês, *Surface Mount Component*). Além disso, por ser um *driver* de baixo custo o material usado na PCI (placa de circuito impresso) foi um fenolite FR2 Segundo Mehl (2009, p.2) o principal problema das placas de fenolite decorre justamente do uso da carga à base de celulose, que a torna higroscópica, ou seja, em um ambiente úmido as placas de fenolite absorvem a umidade, o que além de prejudicar as suas características de isolamento elétrica e térmica, frequentemente também faz com que as placas empenem. Por isso após um teste “HALT” (do inglês, *Highly accelerated tests*) a placa estará oxidada e muito danificada.

De acordo com Mehl (2009 ,p.3) as placas de circuito impresso fabricadas em MCPCB (do inglês, *metal clad printed circuit board*) se tornaram muito comum nos últimos anos. Elas consistem de uma placa de alumínio com 2 mm a 3 mm de espessura, sobre a qual é depositada uma camada de material isolante (como óxido de alumínio Al_2O_3) e uma camada condutora de cobre. Este tipo de placa é indicado quando se necessita uma boa dissipação de calor. Sua principal aplicação é na montagem de diodos emissores de luz (*LED*) de alta potência, e na placa de conversores CC-CC dos *drivers*. Porém este material não foi usado para nenhuma das

amostras ensaiadas neste trabalho, e constatou-se que poucos produtos no mercado atendem a tais requisitos de técnicos.

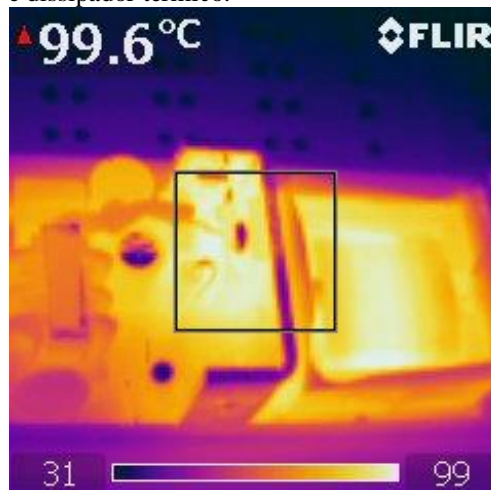
Figura 43: Medição temperatura “bottom” da PCB.



Fonte: Câmera térmica FLIR).

A Figura 44 mostra a medição da temperatura nos dissipadores térmicos do *driver*. Este componente do sistema de gerenciamento térmico é fundamental, pois ele evita o sobreaquecimento dos transistores e *MOSFETs*, que comutam em altíssima frequência e por isso gera muito calor, além de auxiliar a diminuir a temperatura de operação dos capacitores eletrolíticos próximos no circuito. Devemos destacar que o dimensionamento do dissipador térmico não é aleatório e sim equacionado pelas leis da termodinâmica, sendo realizado sob critérios rigorosos, desde a escolha do material metálico de boa condutividade térmica e determinação da área a partir de cálculos de transmissão de calor por condução e convecção.

Figura 44: Medição nos transistores de comutação e dissipador térmico.



Fonte: O autor (Câmera térmica FLIR).

4.3 Resultados da estimativa de vida útil e Eficiência

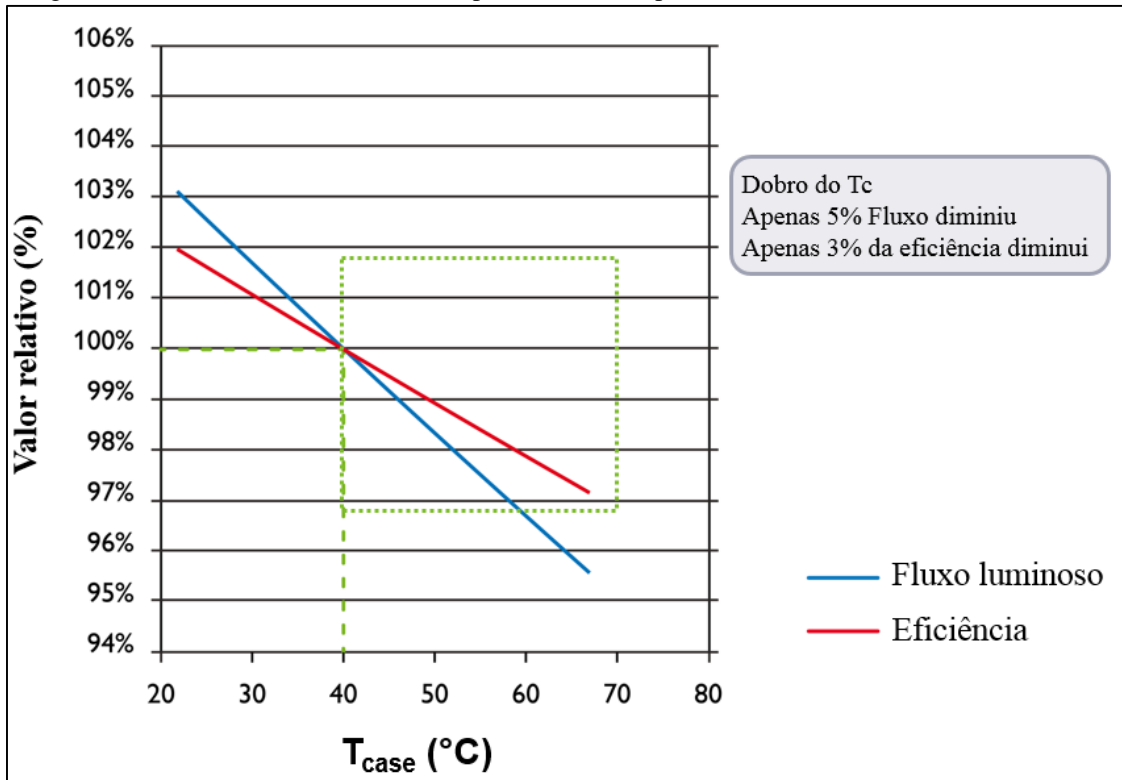
O ensaio de performance elétrica dos principais componentes eletrônicos foi realizado com objetivo de demonstrar que a regulação de corrente e tensão na carga, seguindo a equação de Shockley. Por isso demonstramos a medição dos valores de pico a pico da corrente e tensão no *driver LED* de tensão constante *ELECPOWER*, pois a corrente no *LED* irá variar exponencialmente com as variações de tensão na carga. Assim, conforme foi demonstrado nas medições a temperatura de operação pra esse *driver* é consideravelmente maior (16°C) do que a temperatura apresentada pelo *driver* de corrente constante *OPTRONIC*.

A partir das análises realizadas anteriormente, as quais os ensaios sob variáveis controladas demonstraram que a temperatura de operação dos principais componentes do circuito do *driver*, influenciam diretamente na eficiência energética, eficácia luminosa e tempo de vida útil desse dispositivo eletrônico. Também pôde-se concluir que os *drivers* de corrente constante são mais recomendados para aplicações em sistemas *LED* devido a sua excelente regulação de potência e corrente na carga e principalmente devido a sua capacidade de flexibilidade de carga, ou seja, pode-se projetar um *driver* que atenda a uma faixa de corrente de 200mA a 600mA por exemplo, que o mesmo garantirá a correta operação dos módulos *LED*. Enquanto para uma *driver* de tensão constante variações na tensão de saída são críticas para a operação do módulo. Tendo isto em vista, foi realizado um levantamento de dados através de medições, com cálculos estimados de vida útil utilizando capacitor eletrolítico sob condições de teste aceleradas, ou seja controlando as variáveis temperatura e umidade dentro da estuda para demonstrar a relação direta entre as variáveis que foram propostas como objetivo deste trabalho, dito a relação entre temperatura e variação de corrente na carga para a eficiência e vida útil do sistema (medida através da intensidade de fluxo luminoso).

A Figura 45 mostra o resultado de que dobrando a temperatura de operação da carcaça do *driver* de corrente constante, reduz apenas 5% fluxo luminoso e diminui em 3% a eficiência do sistema, porém deve-se ressaltar que essas condições apenas se mantem enquanto o sistema está estável, pois quando a temperatura atinge valores mais altos que isso, o sistema pode facilmente alcançar a instabilidade e a temperatura e corrente do *driver* podem fugir ao controle e danificar o circuito eletrônico.

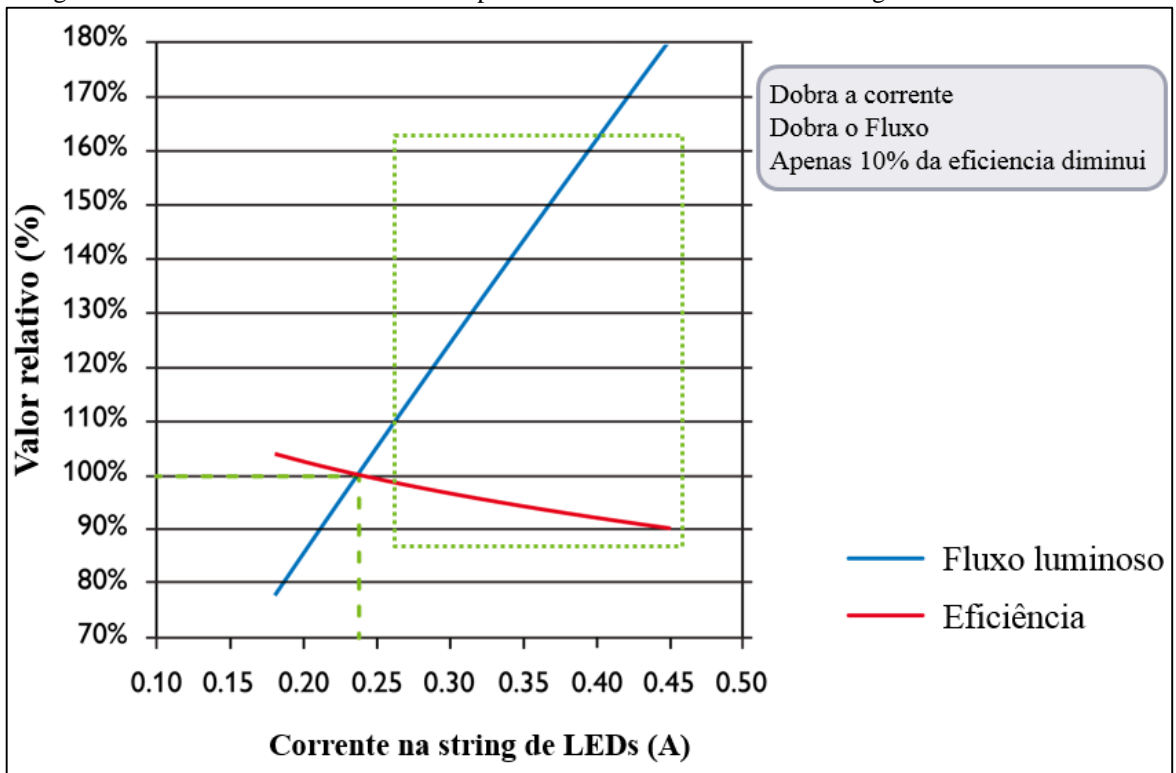
Figura 46 mostra a relação direta entre variação da corrente na carga e o percentual de fluxo luminoso e eficiência no decorrer do tempo de medição. Para a topologia de *driver* de corrente constante observou que ao dobrar a corrente de 220mA para 440mA, houve um aumento de 100% no fluxo luminoso e uma queda de apenas 10% na eficiência.

Figura 45: Fluxo luminoso e eficiência dependendo da temperatura.



Fonte: Philips LumiLED (Ensaio de laboratório, não publicado)

Figura 46: Fluxo luminoso e eficiência dependendo da corrente fornecida a carga.



Fonte: Philips LumiLED (Ensaio de laboratório, não publicado)

A tendência das aplicações *LED* recentes é a constante busca por flexibilidade, assim os módulos *LED*, por característica própria são projetados para atender uma determinada eficácia luminosa (Lúmens por watt) diretamente proporcional a magnitude da corrente fornecida pelo *driver* a carga. Exemplo disso é o módulo “*LED FastFlex*” desenvolvido pela Philips LumiLED (não publicada), cujo resultados dos ensaios com regulação de corrente são mostrados na Figura 47.

Figura 47: Variação da eficácia luminosa com a corrente.

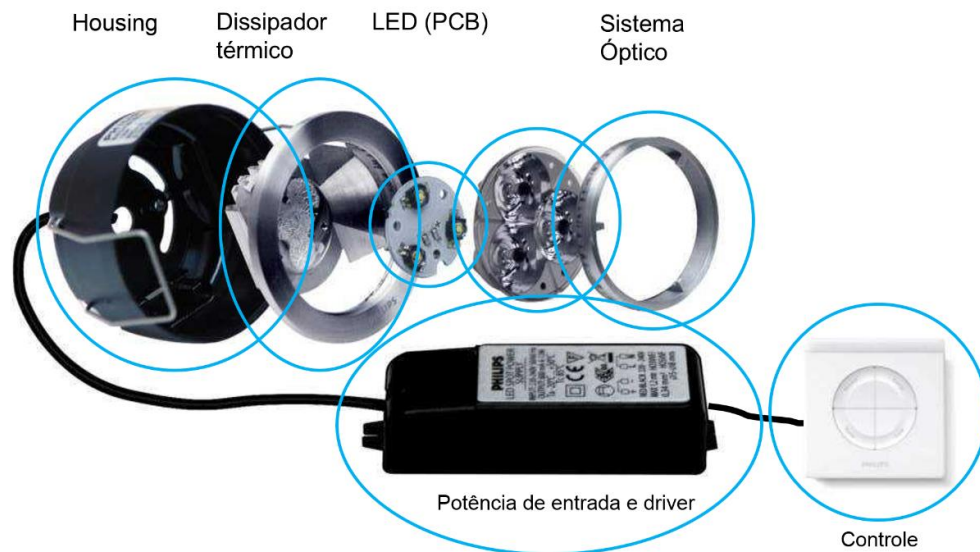


Fonte: Philips LumiLED (Ensaio de laboratório, não publicado)

A Confiabilidade dos sistemas *LED* são determinadas pelo teste “HALT” (do inglês, Highly accelerated tests), que consistem em teste simulando altas temperaturas e alta humidade, com objetivo de tornar o processo de degradação dos componentes mais rápido, e a partir da manipulação dessas variáveis determinar a expectativa de vida útil dos sistemas.

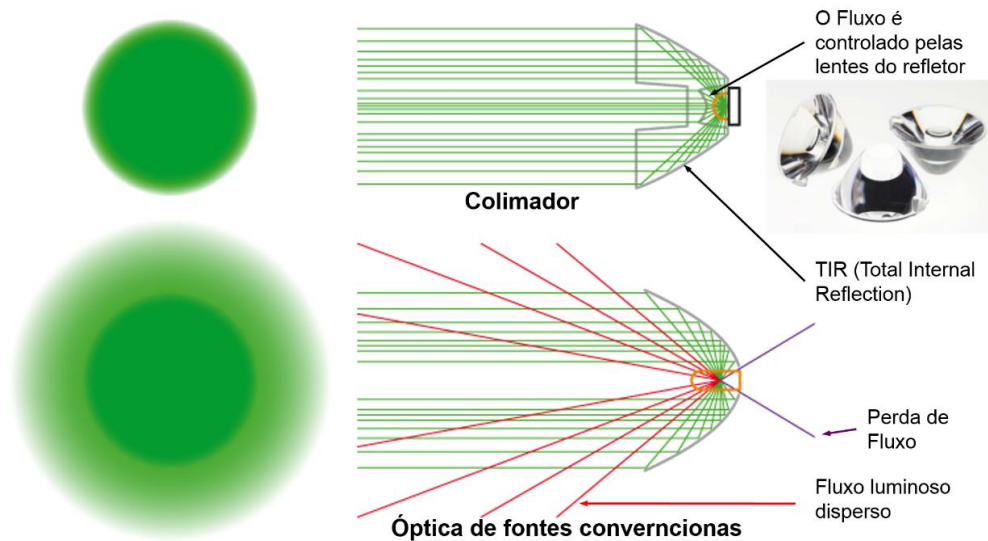
O sistema de iluminação *LED* é composto por diversos subsistemas, conforme Figura 48, a qual mostra o housing mecânico, dissipador térmico, PCB de *LEDs*, sistema óptico, *driver* de acionamento e controle através dos protocolos de programação. A Figura 49 apresenta como ocorrem as perdas de potência no sistema óptico, sendo dos outros subsistemas já foi demonstrado antes.

Figura 48: Sistema de iluminação *LED* e seus subsistemas.



Fonte: Adaptada pelo autor de Philips LumiLED (não publicado).

Figura 49: Exemplo de perdas do sistema óptico.



Fonte: Adaptada pelo autor de Philips Lumiled (fonte não publicada).

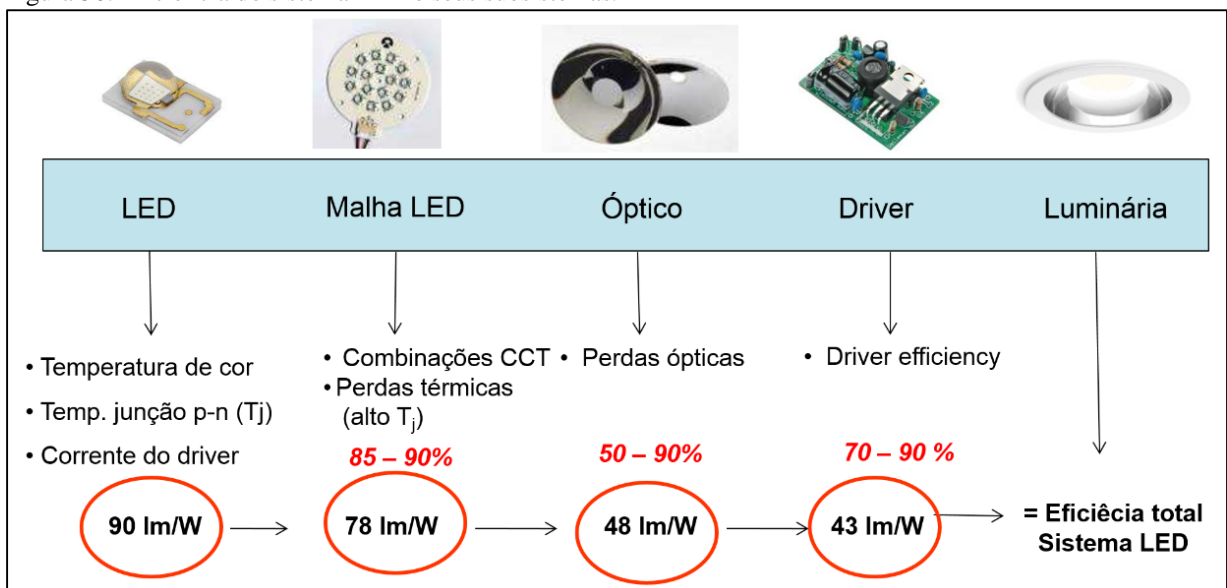
Confiabilidade de sistemas *LED* depende da durabilidade de cada subsistema que o compõe, assim o sistema como um todo mantém-se em operação enquanto seu componente mais crítico não falhar. A Tabela 11 a seguir apresenta um levantamento da expectativa de vida útil do sistema de iluminação *LED* considerando os subsistemas. Sendo a durabilidade definida pelo componente mais crítico, no caso o *driver* de tensão constante *ELECPOWER* 48VDC 0,6A analisado neste estudo. A vida útil em horas do *driver* foi estimada de acordo com a temperatura de operação estável dos capacitores eletrolíticos.

Tabela 12: Tempo de vida do sistema *LED*

Componente	Tempo de vida [hrs x 1000]
LED	60 @ 70% LM
Optico	180
Housing	2 200
Driver	30
Controle	48
Sistema LED	30

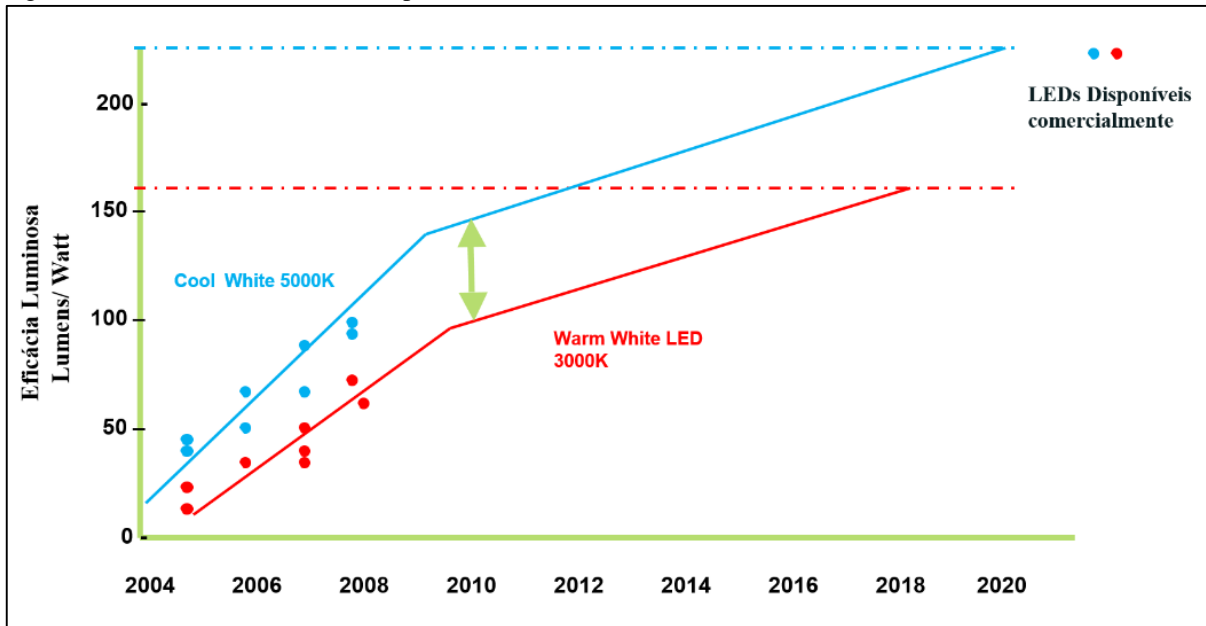
Fonte: O autor.

Conforme explicamos nos tópicos anteriores, cada subsistema da instalação *LED* contribui com uma porcentagem de perda de potência, e o rendimento final do sistema irá depender do desempenho individual de cada um deles. Conforme apresenta na Figura 50.

Figura 50: Eficiência do sistema *LED* e seus subsistemas.

Fonte: O autor.

No ano de 2009 elaborou um levantamento dentre os produtos *LED* em catalogo por um fabricante do setor de iluminação e produzida a projeção de eficácia luminosa dos sistemas *LED* disponíveis comercialmente, conforme a Figura 51. Constatou-se que essa projeção vem de encontro com a eficácia projetada por pesquisas recentes (de acordo com referencial bibliográfico apresentado, que produziram sistemas *LED* com eficácia de 150 lúmens por watt.

Figura 51: Eficácia Luminosa *LED* e previsão futura

Fonte: Adaptado pelo autor de Relatório DOE 2009 (não publicado)

Conforme demonstrado inicialmente pelo estudo de referencial bibliográfico e posteriormente comprovado através de ensaios de *drivers LED* de diferentes topologias em laboratório, constatou-se que o capacitor eletrolítico é um componente crítico e que prejudica a vida útil do *driver*. A partir dessas constatações, o autor sugere como proposta de pesquisa futura, o desenvolvimento e adaptação de uma topologia de conversor CC-CC que reduza as capacitâncias de filtragem da comutação em alta frequência, o que consequentemente possibilitaria a substituição dos inconvenientes capacitores eletrolíticos por capacitores de filme metálico.

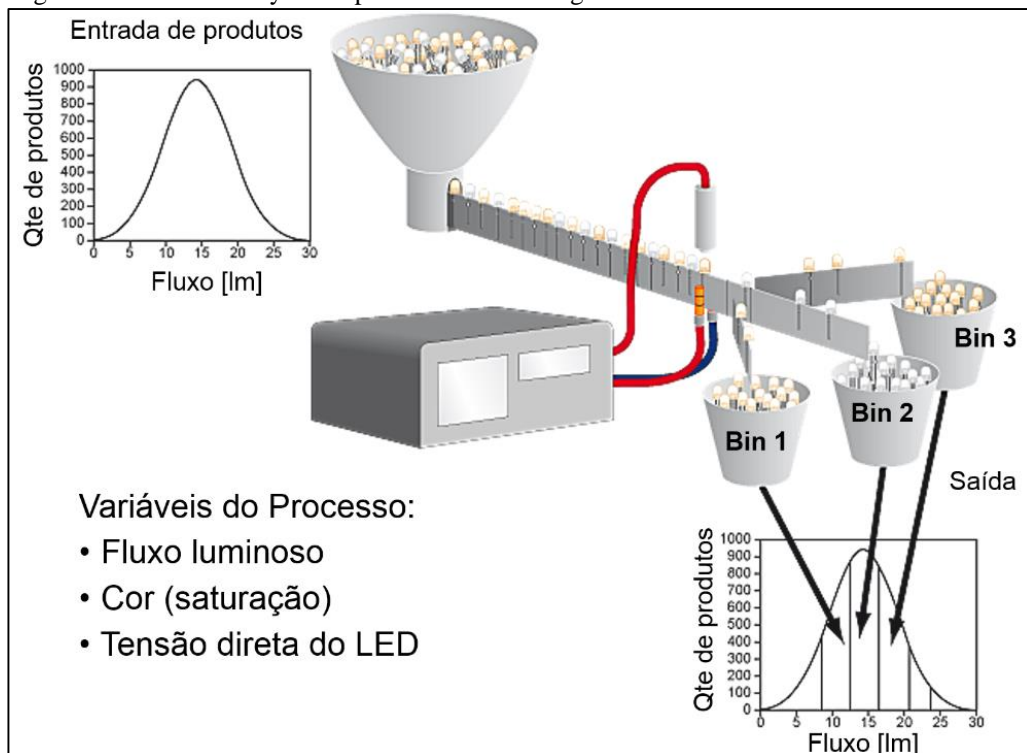
Uma outra proposta considerando um entre os principais problemas que elevam o custo de produção dos módulos de *LED*, os quais apresentam variação de cor (depende da composição do material semiconductor), fluxo luminoso e tensão direta de operação durante a produção. Esse problema obriga as empresas montadoras de dispositivos eletrônicos a comprar lotes restritos de produção dos fabricantes de semicondutores *LED*. Isso provoca uma enorme dificuldade no gerenciamento de demanda, pois uma vez que a matéria prima do *LED* é comprada para um projeto (com especificações luminotécnicas específicas), caso haja queda da demanda inicial dificilmente a matéria prima poderá ser reaproveitada em outra aplicação.

Portanto os *LED* poderiam ser medidos e entregues no mercado divididos em subclasses, ou “bins”, desde que as diferenças em seus parâmetros sejam significativas. O processo denominado Binning, torna possível a seleção dos *LEDs* conforme uma especificação determinada, conforme mostra a Figura 524. Uma importante meta para fabricantes de soluções

em iluminação é justamente selecionar os *LEDs* em *bins* de uma maneira que minimize as diferenças de cor que possam ser visíveis. E esse ajuste dependeria da saturação de cor exigida pela aplicação.

Quando olhamos para a curva do corpo negro. Alterações na temperatura de cor ficam ao longo da linha do corpo preto, mas as variações de cor do *LED* também ocorrem acima e abaixo da linha do corpo preto. *LEDs* com pontos de cor acima da BBL são esverdeados em matiz, enquanto aqueles abaixo são rosados. Portanto, especificando uma temperatura de cor específica por si só não garante uniformidade de cor.

Figura 52: Modelo de layout de processo de "Binning".



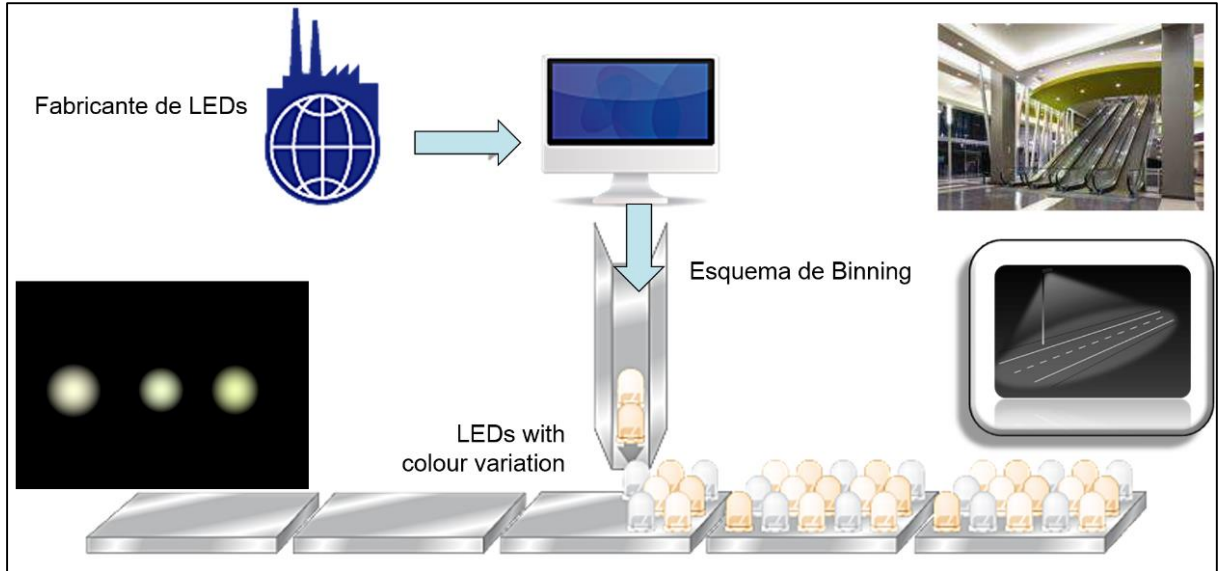
Fonte: Adaptada pelo autor de Philips LumiLED (não publicado).

A consistência é um indicador da qualidade de emissão de luz para *LEDs* brancos e com saturação avermelhada. Sendo que o índice de temperatura de cor (CCT do inglês, correlated color temperature), descreve se a luz aparece com saturação neutra, avermelhada ou azulada. O padrão definido para o CCT permite a variação dentro de uma faixa de cromaticidade que pode ser prontamente separada separada por inspeção visual mesmo quando o valor informado de CCT é o mesmo. Devido a necessidade atual de uma redução no custo dos módulos *LED* um meio de gerenciamento que garanta maior consistência de cor é um objetivo fundamental para fabricantes que pretendem tornar-se mais competitivos nesse mercado.

Como proposta de pesquisa futura o autor propõe a elaboração de um algoritmo computacional que possibilite a separação dos *LEDs* de diferentes bins sejam distribuídos um

a um por um dentro de uma faixa de saturação de cor, tensão direta e capacidade de emissão de fluxo luminoso. A Figura 53 demonstra um modelo simplificado para layout do processo de de “Binning” sugerido para futuras implementações na indústria.

Figura 53: Ilustração representativa do processo sugerido.



Fonte: Adaptada pelo autor de Philips LumiLED (não publicada).

5 CONCLUSÃO

Conclui-se através do ensaio de mapeamento térmico, no qual as variáveis estão sendo controladas, de que a temperatura de operação nos principais componentes eletrônicos influencia diretamente na durabilidade do *driver*. Essa relação entre temperatura e tempo de vida útil do produto é sobretudo determinada pelo capacitor eletrolítico, que é o componente mais crítico do circuito. Portanto, conclui-se que o desenvolvimento e aplicação de uma topologia de conversor CC-CC para *drivers*, a qual possibilite a redução das capacitâncias de filtragem no inversor é fundamental para que os eletrolíticos possam ser substituídos por capacitores de filme metálico ou poliestireno. Assim a vida útil do *driver* aumentaria drasticamente, podendo alcançar o potencial de durabilidade de outros subsistemas como o módulos de *LED*, que atualmente está estimado para atingir o ponto L70 com 100.000 horas de operação para aqueles módulos que apresentam correto gerenciamento térmico.

Com relação a variação de corrente na carga, através dos ensaios em ambas as topologias pode-se concluir que os *drivers LED* de corrente constante são mais vantajosos para serem aplicados a nova tecnologia de *LEDs* orgânicos, pois os *OLEDs* possuem maior sensibilidade a variações de corrente e por isso podem ser facilmente danificados mesmo que com as pequenas variações de tensão pico a pico (Equação Shockley) dos módulos de tensão constante, enquanto a topologia de *driver* de corrente constante garante uma boa regulação de potência e corrente na carga, além de oferecer maior flexibilidade de carga para as novas aplicações de iluminação de superfície que surgem com os *OLEDs*.

Enfim, pode-se dizer que o aumento da demanda por iluminação a *LED* leva ao natural aumento de concorrentes e uma forte disputa pelo mercado, e para alavancar vendas em um mercado que cresce exponencialmente, muitos fabricantes e importadores, em busca de preços mais agressivos, abrem mão da qualidade e reduzem custos onde não deveriam. Observa-se que *drivers* que não atendem as especificações declaradas, e cujas topologias não fornecem adequada regulação de carga e potência, estão sendo comercializados livremente e sem uma fiscalização adequada. Assim os distribuidores estão lançando no mercado sistemas de iluminação *LED* que acendem cada vez com maior intensidade, sendo uma forma de tentar compensar a acelerada degradação da eficácia luminosa, porém estão sujeitos a alto risco de falha devido à baixa confiabilidade, e apresentam durabilidade muito inferior com relação ao tempo esperado e declarado para a tecnologia *LED*.

REFERÊNCIAS

- AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. Pearson Brasil: Rio de Janeiro, 2000.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL),. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST** . Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Normas Técnicas: São Paulo, 2010.
- BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência**. 6ª Edição; Edição dos Autores: Florianópolis, 2006.
- BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar Cruz. **Eletrônica de potência: conversores CC-CC básicos não isolados**. Edição dos Autores p. 377: Florianópolis,2000.
- BARBI, Ivo, Fabiana Pottker de SOUZA. **Conversores CC-CC isolados de alta frequência com comutação suave**. Edição dos Autores: Florianópolis, 1999.
- BRAGA, Newton. **Controles PWM de LEDs**. Disponível em <<http://www.newtonbraga.com.br/index.php/electronica/57-artigos-e-projetos/6006-art1318> > Acesso em 07 de outubro de 2016.
- CHUNG, H. S.-H. et al. **Comparison of dimmable electromagnetic and electronic ballast systems:an assessment on energy efficiency and lifetime**. Industrial Electronics, IEEE Transactions p. 3145- 3154: Hong Kong, 2007.
- CUNHA, Livia. **Padrões brasileiros: Portal o setor elétrico**: São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/component/content/article/58-artigos-e-materias-relacionadas/244-padroes-brasileiros.html>>. Acesso em 07 de novembro de 2016.
- DUPUIS, R. D, e M. R. KRAMES. **History, development, and applications of highbrightness visible light-emitting diodes**. Journal of Lightwave Technology,p. 1154 - 1171: Atlanta, 2008.
- FROSCH, Rick. **Constant-voltage vs. constant-current LED drivers**. Development Engeneering, Phihong Company: Fremont, 2014. Disponível em <http://btbmarketing.com/staging/phihong/Phihong_CC_vs_CV_LED_Drivers_White_Paper.pdf>. Acesso em 28 de setembro de 2016.
- GULES, Roger; PIMENTEL Carlos E. Ferreira; CAVALCANTE,Thayani T. **Projeto e desenvolvimento de um conversor CC-CC SÉPIC**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento acadêmico de eletrotécnica. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica: Curitiba, 2010. Disponível em: <http://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/doc-equipe/2010_2_29/2010_2_29_artigo.pdf>. Acesso em 10 de agosto de 2016.
- HART, Daniel W. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos**. 1ª. McGraw-Hill Brasil: São Paulo, 2012.
- LEUNG, W. Y., T. Y. MAN, e M. CHAN.A **high-power LED driver with power efficient LED current sensing circuit**. European Solid-State Circuits Conference, :p 354-357: Edinburgh, 2008.

MALVINO, Albert, e David J. BATES. **Princípios de eletrônica**. 7ª. Vol. 2. Mcgraw Hill, p. 598: Porto Alegre, 2007.

MARUSKA, H. P., e D. A STEVENSON. **Mechanism of light production in metal-insulator-semiconductor diodes; GaN:Mg violet light-emitting diodes**. Mueller G. Electroluminescence I Semiconductors and Semimetals, p.17-64: Califórnia, 2006.

MEHL, Ewaldo Luiz de; Mattos. **Conceitos fundamentais sobre placas de circuito impresso**, p.2: Curitiba, 2009. Disponível em:<<http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads.html>>. Acesso em 01 de novembro de 2016.

NOGUEIRA, Fernando J.; SILVA Edmar S.; RODRIGUÊS, Cláudio R. B. S.; CAMPOS, Marco F. C.; PINTO, Danilo P.; BRAGA Henrique A. C. **Influência da temperatura no desempenho de luminárias LED**. Núcleo de Iluminação Moderna: São Paulo, 2012.

OLIVEIRA, André Barros de Mello. **Introdução ao estudo da interferência (EMI) no projeto de placas de circuito Impresso (PCBs) de fontes chaveadas**: Belo Horizonte, 2009.

OSRAM. **User guideline for operation of OLEDs with electronic driver systems**. Disponível em:< www.osram-LED.com>. Acesso em 19 de julho de 2015.

POMILIO, José Antenor. “**Fontes chaveadas: Topologias básicas de conversores não isolados. Capítulo 1**”. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP: São Paulo, 2014.

RODRIGUES, C., e G. A. J. AMARATUNGA. **Long-lifetime power inverter for photovoltaic**; IEEE Transactions on Industrial Electronics 55: 2008.

SCHUBERT, E. Fred. **Lighting emitting diodes**. 2ª Edição; Cambridge Troy: New York:, 2006.

SOARES, Guilherme Marcio. **Driver de longa vida e alta eficiência para acionamento de LEDs em iluminação pública**. Monografia para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica. UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA: Juiz de Fora, 2012.

The Online Electrician Magazine [S. I.]. **Know Your Lux From Your Lumens**: Londres, 2013. Disponível em < <http://mylocalelectrician.uk/blogs/gazza/tue-21052013-1404/know-your-lux-your-lumens>>. Acesso em 06 de novembro de 2016.

VALENTIM, Alexandre A., FERREIRA Helder S., COLETTI e Matheus. **Lâmpadas vde LED: impacto no consumo e fator de potência**. Cinências do Ambiente On-line Volume: São paulo, 2010.

XU, R. B., Y. Z. LI, L. X. ZHONG, e J. M. LIU. **Research of an efficient LED lighting driver based on boost-buck converter**; Circuits and Systems, p. 153-159: Changsha, 2014.