

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELETRÔNICA

FABIO PEREIRA DE LIMA

**DESENVOLVIMENTO DE UM REATOR ELETRÔNICO DE BAIXO
CUSTO PARA ILUMINAÇÃO A LED**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2015

FABIO PEREIRA DE LIMA

**DESENVOLVIMENTO DE UM REATOR ELETRÔNICO DE BAIXO
CUSTO PARA ILUMINAÇÃO A LED**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Eletrônica como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel no Curso Superior de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Moacyr Aureliano Gomes de Brito

CAMPO MOURÃO

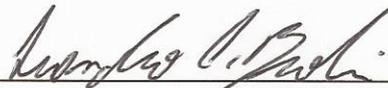
2015

TERMO DE APROVAÇÃO
DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO INTITULADO
Desenvolvimento de um Reator Eletrônico de Baixo Custo para
Iluminação a Led

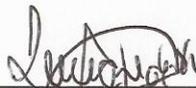
por

Fabio Pereira de Lima

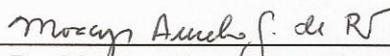
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no dia 13 de Julho ao Curso Superior de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Campo Mourão. O Candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO
(aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).



Prof. Msc. Leandro Castilho Brolin
(UTFPR)



Prof. Msc. Luciane Agnoletti dos Santos
(UTFPR)



Prof. Dr. Moacyr Aureliano Gomes de Brito
(UTFPR)
Orientador

Campo Mourão, 13 de Julho de 2015.

RESUMO

LIMA, Fabio Pereira de. Desenvolvimento de um Reator Eletrônico de Baixo Custo para Iluminação a LED. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso Superior de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.

A exploração dos recursos vem aumentando junto com o crescimento das populações. Isso tem motivado o ser humano a buscar formas de minimizar o impacto do consumo de recursos, sendo a energia elétrica um desses. A iluminação artificial por exemplo, hoje representa cerca de 20% de todo o consumo energético no mundo. A lâmpada que iniciou o marco do uso de fontes luminosas, a incandescente, tem baixa eficiência e aos poucos, está sendo banida; por isso, faz-se necessário estudos da sua substituição por outras fontes mais eficientes. De início, as lâmpadas fluorescentes foram as primeiras que ganharam aceitação no mercado, porém essas possuem o elemento mercúrio em sua composição, o qual também deve ser banido, pois é um grande agente contaminador. Estima-se que apenas 6% dos quase 300 milhões de fluorescentes produzidas no Brasil ao ano são recicladas. Em virtude disso, as lâmpadas de LED, mais precisamente os LEDs de potência, vêm se tornando atrativos, pois, além de não serem poluentes, promovem uma economia muito expressiva em relação às demais, tanto na economia de energia quanto na sua aquisição, pois possuem vida média de cerca de 50.000 horas (cinco vezes a das lâmpadas fluorescentes e cinquenta vezes a das lâmpadas incandescentes). A peculiaridade dos LEDs, é que estes são alimentados com baixa tensão e corrente contínua e deve-se monitorar a temperatura e a sua corrente, o que pode danificá-los e reduzir a sua vida útil. Nessa frente, procurou-se neste trabalho fazer uma revisão bibliográfica sobre o funcionamento e características dos LEDs e a implementação e pesquisa do uso de conversores (topologias básicas) para o desenvolvimento de um reator de baixo custo realimentado (monitoramento da corrente elétrica) para sugerir a substituição dos demais tipos de lâmpadas. Com isto, concluí-se que um conversor de topologia Buck atenderia essa demanda de forma satisfatória através de realimentação por sensor de corrente.

Palavras-chave: Iluminação Artificial, Iluminação de LED, Conversores CC-CC, Conversor Buck

ABSTRACT

LIMA, Fabio Pereira de. Development of a Low Cost LED Electronic Ballast. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso Superior de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.

The exploitation of resources is increasing along with the growth of populations. This has motivated human beings to seek ways to minimize the impact of resource consumption, electricity is one of those. Artificial lighting for example, now accounts for about 20% of all energy consumption in the world. The lamp that started the mark of using light sources, the incandescent has low efficiency and gradually is being banished, so it is necessary to study its replacement by more efficient sources. Initially, fluorescent lamps were the first that gained acceptance in the market, but these have the elemental mercury in its composition, which should also be banned because it is a major contaminant. It is estimated that only 6% of the nearly 300 million fluorescent lamp produced in Brazil per year are recycled. As a result, the LED, specifically the power LEDs, have become attractive because, besides not being pollutants, promote a very significant savings over the others, both in power consumption, as in its acquisition, because they have an average life of about 50,000 hours (five times that of fluorescent lamps and fifty times that of incandescent bulbs). The peculiarity of LEDs is that these are fed with low voltage and direct current and must monitor its temperature and current, which can damage it and reduce its useful life. On that front, this study sought to do a literature review on the operation and characteristics of the LEDs and the implementation and research of the use of converters (basic topologies) for the development of a low cost ballast to suggest the replacement over other types of lamps. With these, the Buck converter topology would meet this demand satisfactorily through current sensor feedback.

Keywords: Artificial Lighting, LED Lighting, DC-DC converters, Buck Converter

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Espectro visível e seus respectivos comprimentos de ondas	19
Figura 2	– Temperatura de cor de alguns tipos de lâmpadas	21
Figura 3	– Detalhes construtivos de uma lâmpada incandescente	23
Figura 4	– Detalhes construtivos de uma lâmpada fluorescente	24
Figura 5	– Alguns dos tipos de LEDs disponíveis	25
Figura 6	– Recombinação de pares de elétrons e lacunas com a liberação de fótons	26
Figura 7	– Faixa do espectro visível determinado por cada cristal	28
Figura 8	– Obtenção da cor branca através LED azul recoberto por fósforo amarelo	29
Figura 9	– Obtenção da cor branca através LED UV recoberto por fósforo	30
Figura 10	– Obtenção da cor branca através a recombinação do RGB	30
Figura 11	– Absorção parcial da luz pela camada metálica da camada P	31
Figura 12	– Nova disposição a fim de minimizar a absorção pela camada metálica	31
Figura 13	– Polarização direta e indireta de uma junção PN	33
Figura 14	– Curva característica da junção PN	33
Figura 15	– Perdas ôhmicas de um LED	34
Figura 16	– Modelo elétrico simplificado do LED	34
Figura 17	– Curva característica dada pelo fabricante do modelo pretendido	35
Figura 18	– Reta obtida através da regressão linear da curva característica do LED	36
Figura 19	– Modelo simplificado final para utilização em simulação	36
Figura 20	– Limitador de corrente utilizando um resistor em série com o LED	38
Figura 21	– Limitador de corrente utilizando um conversor linear LM317	39
Figura 22	– Conversor CC-CC básico modulado por PWM	40
Figura 23	– Conversor Buck	41
Figura 24	– Conversor Boost	42
Figura 25	– Conversor Buck-Boost	43
Figura 26	– Conversor Ćuk	43
Figura 27	– Conversor SEPIC	44
Figura 28	– Conversor Zeta	45
Figura 29	– Conversor Flyback	45
Figura 30	– Arranjos em série propostos para este trabalho	47
Figura 31	– Utilização de DIACs no arranjo em série	48
Figura 32	– Conversor Buck do projeto	49
Figura 33	– Formas de ondas no MCC e no MCD do conversor Buck	50
Figura 34	– Relação entre as áreas (tensão no indutor) nos dois instantes	51
Figura 35	– Variação da corrente no instante em que a chave troca de estado	51
Figura 36	– Variação da tensão em relação a corrente média	53
Figura 37	– Núcleo do carretel do tipo E	54
Figura 38	– Ocupação dos enrolamentos da janela do carretel	55
Figura 39	– Circuito projetado do reator	59
Figura 40	– Disposição dos Diacs na carga	59
Figura 41	– Circuito de dimerização	60

Figura 42 – Curva IxV do LED dada pelo fabricante	61
Figura 43 – Modelo do LED do projeto	62
Figura 44 – Circuito montado para simulação via MatLab/Simulink	62
Figura 45 – Simulação com 116 V na entrada do conversor Buck	63
Figura 46 – PWM da Simulação com 116 V na entrada do conversor Buck	64
Figura 47 – PWM da Simulação com 180 V na entrada do conversor Buck	64
Figura 48 – Largura de pulso e corrente na carga em 38 V	65
Figura 49 – Largura de pulso e corrente na carga em 55 V	66
Figura 50 – Tensão no resistor shunt e corrente na carga em 55 V	66
Figura 51 – Tensão medida no shunt da carga sem o filtro snubber	67
Figura 52 – Tensão medida no shunt da carga com o filtro snuber	67
Figura 53 – Largura do pulso na chave em diferentes tensões na entrada do Buck ..	68
Figura 54 – PWM com circuito ligado a rede de 127 VAC	68
Figura 55 – Tensão apenas com o filtro capacitivo e corrente de entrada	69
Figura 56 – Tensão após a retificação e corrente de entrada com o filtro Valley-Fill .	69
Figura 57 – Modulação resultante de quatro diferentes ajustes de dimerização	70
Figura 58 – Circuito montado (placa de circuito e arranjo de LEDS)	70
Figura 59 – Circuito desenvolvido em funcionamento	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Comparativo entre as lâmpadas e sua eficiência luminosa	19
Tabela 2	– Iluminância recomendada de acordo com a tarefa visual	20
Tabela 3	– Comparativo entre as lâmpadas e seu IRC	21
Tabela 4	– Temperaturas de cor e sua sensação assimilada	22
Tabela 5	– Comparativo de tempo de vida média das lâmpadas estudadas	22
Tabela 6	– Comparativo de eficiência luminosa e vida média entre as lâmpadas	27
Tabela 7	– Comparativo de investimento entre as lâmpadas em 30.000 horas	27
Tabela 8	– Relação e medidas dos carretéis padrão tipo E	55
Tabela 9	– Especificações do projeto pretendido	57
Tabela 10	– Valores encontrados para o conversor Buck	58
Tabela 11	– Valores encontrados para o indutor	58

LISTA DE ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

AlInGaP	Alumínio Gálio Fosfeto de Índio
InSb	Antimoneto de Índio
GaAs	Arseneto de Gálio
CI	Circuito Integrado
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
LED	Diodo Emissor de Luz (<i>Light Emitting Diode</i>)
DIAC	Diodos para Corrente Alternada (<i>Diode for Alternating Current</i>)
InP	Fosfeto de Índio
IRC	Índice de Reprodução de Cor
MCC	Modo de Condução Contínua
MCCr	Modo de Condução Crítica
MCD	Modo de Condução Descontínua
PWM	Modulação por Largura de Pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>)
Ni	Níquel
GaN	Nitreto de Gálio
InGaN	Nitreto de Índio Gálio
Au	Ouro
CdS	Sulfeto de Cádmi
PbS	Sulfeto de Chumbo
CdTe	Teruleto de Cádmi
UV	Ultra Violeta
RGB	Vermelho, Verde e Azul (<i>Red, Green and Blue</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Voltagem
W	Watts
lm	Lúmen
Cd	Candela
lux	Lux
K	Kelvin
h	Horas
$^{\circ}C$	Grau Celsius
$R\$$	Real
η	Nano
$I_{d(max)}$	Máxima corrente direta
V_d	Tensão da camada de depleção
V_{br}	Tensão de ruptura
I_{br}	Corrente de ruptura
R_s	Resistência série parasita
I_{LED}	Corrente no LED
V_{LED}	Tensão sobre o LED
Ω	Ohm
A	Ampère
V_{IN}	Tensão de entrada
S	Chave
Di	Diodo
L	Indutor
C	Capacitor

R_L	Carga
γ	Corrente normalizada de carga
I_S	Corrente na chave
V_S	Tensão sobre a chave
I_{Di}	Corrente no diodo
V_{Di}	Tensão sobre o diodo
I_L	Corrente no indutor
V_L	Tensão sobre o indutor
I_C	Corrente no capacitor
V_C	Tensão sobre o capacitor
I_{OUT}	Corrente de saída
V_{OUT}	Tensão de saída
t_{ON}	Tempo de chave ligada
t_{OFF}	Tempo de chave desligada
G	Ganho estático
D	Razão cíclica
T	Período
ΔI_L	Variação da corrente no indutor
Δt_{ON}	Variação do tempo de chave ligada
f	frequência
Q	Carga elétrica
ΔQ	Variação da carga elétrica
k	Quilo
A_e	Área da seção do núcleo
A_e	Área da janela do carretel
I_{pico}	Corrente de pico
I_{eficaz}	Corrente eficaz

B_{max}	Máxima densidade de fluxo
J_{max}	Máxima densidade de corrente
K_w	Fator de ocupação da janela
N	Número de espiras
l_g	Entreferro
μ_o	Permeabilidade do ar
S_{fio}	Seção transversal do fio
Δ	Profundidade de penetração
$n_{condutores}$	Número de condutores
S_{cond}	Seção transversal do condutor
S_{skin}	Seção transversal do efeito pelicular
$A_{w_{min}}$	Área da janela mínima
$Exec$	Possibilidade de execução
$A_{w_{nucleo}}$	Área da janela do núcleo
Hz	Hertz
cm	Centímetro
mm	Milímetro
m	Mili
RS	Resistor shunt
$RSENSE$	Resistor sensor de corrente
CT	Capacitor de oscilação
RT	Resistor de oscilação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	14
3	JUSTIFICATIVA	15
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
4.1	GRANDEZAS E UNIDADES UTILIZADAS EM ILUMINAÇÃO E COMPARATIVO ENTRE AS LÂMPADAS INCANDESCENTE, FLUORESCENTE E LED	17
4.1.1	Fluxo luminoso	17
4.1.2	Eficiência luminosa	18
4.1.3	Intensidade luminosa	19
4.1.4	Iluminância	19
4.1.5	Índice de reprodução de cor	19
4.1.6	Temperatura de cor	20
4.1.7	Tempo de vida média	21
4.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DAS LÂMPADAS INCANDESCENTE, FLUORESCENTE E LED	21
4.2.1	Lâmpadas incandescentes	22
4.2.2	Lâmpadas fluorescentes	22
4.2.3	Lâmpadas de LED	24
4.3	SIMULAÇÃO DE ECONOMIA ENTRE AS LÂMPADAS	25
4.4	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS LEDS	26
4.4.1	Obtenção de diferentes cores em LEDs	27
4.4.2	Obtenção de luz branca em LEDs	28
4.4.3	Potência máxima de um LED	29
4.4.4	Perdas nos LEDs	31
4.5	CURVA CARACTERÍSTICA E MODELO MATEMÁTICO SIMPLIFICADO DO LED31	
4.6	CARACTERÍSTICAS NECESSÁRIAS DAS FONTES DE ALIMENTAÇÃO UTILIZADAS EM LEDS DE POTÊNCIA	35
4.7	CIRCUITOS ACIONADORES DE LEDS	36
4.7.1	Resistor em série	37
4.7.2	Conversor linear	38
4.7.3	Conversor chaveado	38
4.8	CONVERSORES CC-CC	39
4.8.1	Conversor Buck	39
4.8.2	Conversor Boost	40
4.8.3	Conversor Buck-Boost	41
4.8.4	Conversor Ćuk	41
4.8.5	Conversor SEPIC	43
4.8.6	Conversor Zeta	43
4.8.7	Conversor Flyback	43
5	MATERIAIS E MÉTODOS	45

5.1	DEFININDO A CARGA.....	45
5.2	PROJETO DO CONVERSOR BUCK.....	48
5.3	CÁLCULO FÍSICO DO INDUTOR PARA O CONVERSOR BUCK.....	52
5.4	PRIMEIRAS ESCOLHAS E RESULTADOS OBTIDOS.....	56
6	RESULTADOS.....	60
6.1	SIMULAÇÃO.....	60
6.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	63
7	CONCLUSÕES.....	71
	REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, muitas das atividades desenvolvidas pela humanidade são realizadas sob a regência de um ambiente iluminado de forma artificial. Desde a antiguidade, quando foram realizadas as primeiras explorações em cavernas até os dias de hoje, no ambiente doméstico, público e industrial, a iluminação representa não apenas conforto mas também segurança e mobilidade (JUNIOR, 2010).

O primeiro contato do homem com a iluminação artificial foi com a descoberta do fogo ainda na Era Pré-Histórica. Até então, o trabalho era desenvolvido apenas enquanto houvesse a luz do sol. Nos primórdios, a luz na forma portátil, que foi a grande responsável pelas primeiras explorações e descobertas, consistia em um pedaço de madeira incendiada ou uma tocha, o que eram carregados até o interior de cavernas. Devido as condições que era submetido, o homem foi impelido a buscar o desenvolvimento de novas fontes de iluminação que propiciasse maior eficiência em seu trabalho. Nesta busca, houve a familiarização do fenômeno da combustão e a descoberta de novos materiais, como a queima de óleos, parafina (BOWERS, 1980; COSTA, 2004b), gases e querosene (ZUKAUSKAS; SHUR; CASKA, 2002).

Do ponto de vista elétrico, o uso da iluminação artificial teve início em 1709, onde através de máquinas de fricção, pode se observar descargas elétricas que geravam luz no vácuo. Apenas em 1879 que se obteve a primeira lâmpada com filamento incandescente, a qual emitia luz através do aquecimento do seu filamento. A descoberta desta lâmpada foi patenteada por Thomas Edison (nos Estados Unidos) que de fato foi quem a inventou, porém esta lâmpada utilizava filamento de carbono, o qual não era tão viável pois não resistia a utilizações prolongadas e não entregava uma boa potência luminosa. Baseado no mesmo princípio, Swan (na Inglaterra), inventou a lâmpada que utilizava filamento de tungstênio. Esta permitia além de uma vida útil maior, uma potência luminosa também superior comparada a lâmpada de Thomas Edison (HARRIS, 1993; CREDER, 1995).

Essas novas descobertas, principalmente devido a utilização da energia elétrica, a qual também permite uma maior mobilidade e facilidade de operação, foram responsáveis em pro-

porcionar ao homem aumentar a sua jornada ativa além do pôr-do-sol e isso, em contrapartida, colaborou com o desenvolvimento econômico, cultural e científico social (COSTA, 2005).

Quanto a geração de luz, historicamente os fenômenos associados têm sido divididos em incandescência e luminescência (JUNIOR, 2008). Em ambos os fenômenos, a causa da emissão de luz está ligada a transição eletrônica de um estado de energia mais alto para um mais baixo. O que difere um do outro é apenas o modo de excitação; o primeiro consiste no processo de emissão de radiação eletromagnética (luz visível) por um corpo sob alta temperatura provocada pela passagem de corrente elétrica. Já no segundo, a emissão de luz por uma substância é provocada quando esta é submetida a algum tipo de estímulo, seja esse a própria luz, uma reação química ou uma radiação ionizante (SCHUBERT, 2006; JUNIOR, 2008).

No primeiro grupo, é listada a própria lâmpada incandescente e no segundo, são listadas as lâmpadas fluorescentes, lâmpadas de vapor de mercúrio, de vapor de sódio, vapor metálico sob alta pressão e os Diodos Emissores de Luz (*Light Emitting Diode* - LED).

Será dado ênfase às lâmpadas incandescentes, fluorescentes e lâmpadas de LED, com enfoque especial para as lâmpadas de LED, uma vez que uma consequência natural desse trabalho é sugerir a substituição das duas primeiras pela lâmpada de LED e em especial, atingir o ambiente doméstico/residencial (as lâmpadas de alta pressão não costumam ser utilizadas nesse ambiente).

Sendo o detalhamento das características das três principais fontes de iluminação artificial escopo do capítulo 4. A outra frente do estudo, os conversores CC-CC, serão abordados no decorrer deste documento, pois os LEDs, devem ser alimentados com corrente contínua e tensão de baixo valor (isto quando verificado um único LED). Logo, estes dispositivos não podem ser diretamente conectados a rede CA de 127 V ou 220 V. O uso dos conversores CC-CC também se justifica pela necessidade de limitar a corrente que passa pelo componente para manter as características nominais desejáveis do dispositivo. Essas características competem a intensidade luminosa, a reprodução da cor e a temperatura de junção, que quando muito alta, é responsável pela degradação da vida útil dos LEDs (JUNIOR, 2010). Para o controle e manutenção dessas características, é importante que haja o projeto adequado do sistema de iluminação de LED.

Além das principais fontes de iluminação, o capítulo 4 apresenta as grandezas comumente utilizadas em dispositivos e sistemas de iluminação; o princípio de funcionamento e características das lâmpadas incandescente, fluorescente e de LED; uma breve simulação de economia entre essas três lâmpadas num período máximo de vida útil do LED; algumas das características construtivas dos LEDs com relação a sua cor e a sua potência; a curva característica

e o método de obtenção de um modelo simplificado de um LED para eventual simulação; as características desejáveis em uma fonte de alimentação para LEDs; os circuitos acionadores de LEDs mais utilizados e as principais topologias de conversores chaveados.

No capítulo 5 tem-se os passos para a escolha e projeto de um conversor para um sistema de iluminação a LEDs, como a definição da carga, o cálculo do conversor Buck e o projeto físico do indutor do projeto. Também, é apresentado um circuito proposto projetado para o acionamento da luminária de LEDs.

No capítulo 6, são apresentados os resultados da simulação via MatLab e das respostas do projeto físico coletado via osciloscópio.

Finalmente, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões e as propostas de continuidade do trabalho.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral, desenvolver um sistema de iluminação à LED compacto e de baixo custo, capaz de substituir o uso da lâmpada incandescente tanto na sua instalação quanto nas características luminosas.

Também espera-se atingir alguns objetivos específicos como:

- Estudar o funcionamento e as características requeridas dos LEDs de potência para serem utilizados em sistemas de iluminação.
- Estudar e propor uma topologia de conversor CC-CC para o acionamento do LED de potência.
- Desenvolver a modelagem do sistema e posterior simulação via MatLab.
- Propor um circuito de dimerização para o sistema de iluminação desenvolvido.
- Analisar os resultados obtidos.

3 JUSTIFICATIVA

O crescimento das populações do mundo tem em contrapartida criado também um crescente aumento na exploração dos recursos. O aumento do consumo de energia é um deles, onde o consumo devido a iluminação representa cerca de 20% do total (JUNIOR, 2010). Diversas iniciativas têm sido impulsionadas e praticadas para contornar esse elevado consumo. Podemos citar, por exemplo, um maior controle na produção de eletrodomésticos mais eficientes, onde os mesmos ganham selos de classificação de consumo e avaliações dos órgãos fiscais, podendo dessa forma incentivar ou inibir a escolha de compra do consumidor entre determinados itens (INMETRO, 2014).

Essa prática, tem sido estendida à diversas áreas do sistema energético, onde o uso de lâmpadas cada vez mais eficientes é apenas mais um deles. A partir disso, políticas nacionais têm incentivado a descontinuação do uso de lâmpadas menos eficientes, em especial, das lâmpadas incandescentes (as que possuem o menor de todos os rendimentos). Prevê-se que em 2016, não será mais possível encontrar nas prateleiras dos mercados esse tipo de lâmpada. As lâmpadas com mais de 100 W foram as primeiras a serem banidas, tanto a sua produção nacional quanto sua importação. Na sequência, as lâmpadas entre 60 e 100 W e depois as lâmpadas entre 40 e 60 W. Neste momento, é possível encontrar apenas as lâmpadas abaixo de 40W (ABILUX, 2010).

A lâmpada fluorescente, que foi a primeira substituta sugerida para as lâmpadas incandescentes tem uma ótima eficiência, porém, utilizam o mercúrio no seu funcionamento. A toxicidade do mercúrio já é conhecida de longa data. Classificado como metal pesado, uma vez ingerido ou inalado pode causar efeitos desastrosos ao sistema nervoso humano e grande impacto no ambiente contaminado (JUNIOR; WINDÖLLER, 2008).

A grande preocupação da administração das lâmpadas fluorescentes está no seu descarte. Quando uma destas se rompe, esta emite vapores de mercúrio que são absorvidos pelos organismos vivos contaminando-os. Quando lançadas em aterros sanitários, contaminam o solo, que posteriormente atingem os cursos de água e dessa forma voltando para os seres vivos através

da cadeia alimentar, onde através de efeito cumulativo, os níveis de contaminação são mais intensos no fim da cadeia. Apesar do impacto de uma única lâmpada ser desprezível (cerca de 20mg de mercúrio). Estima-se que, anualmente, no Brasil é produzido cerca de 190 milhões dos modelos fluorescentes compactas e 95 milhões das fluorescentes tubulares (MOURAO; SEO, 2012). Segundo a recicladora Ambiensys, destas, apenas 6% passam por algum processo de reciclagem (AMBIENSY, 2007).

Os LEDs são atrativos comparados às lâmpadas incandescentes e às fluorescentes pois possuem uma alta taxa de eficiência energética e tempo de vida útil elevado (SILVA, 2002; PINTO, 2008).

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica apresentada neste capítulo é tratada de forma sequencial, pois as sessões posteriores dependem de conceitos tratados nas sessões anteriores. Sendo assim, são apresentados inicialmente as grandezas de interesse mais utilizadas em projetos de iluminação, na sequência é mostrado o princípio de funcionamento das lâmpadas incandescente, fluorescente e de LED para a explanação feita na sequência sugerindo a equivalência entre elas e uma simulação de gastos promovida por cada uma dessas. Nas duas sessões seguintes o LED é explorado com mais ênfase, já que este é o objeto de estudo do trabalho. Então são apresentadas as características construtivas e a sua respectiva curva característica para a obtenção de um modelo simplificado fiel, o qual será utilizado na simulação. Por fim, nas últimas sessões são listadas as características desejáveis em uma fonte para acionar LEDs e um breve estudo das topologias clássicas de conversores CC-CC para que seja dado algumas premissas de escolha.

4.1 GRANDEZAS E UNIDADES UTILIZADAS EM ILUMINAÇÃO E COMPARATIVO ENTRE AS LÂMPADAS INCANDESCENTE, FLUORESCENTE E LED

As principais grandezas e unidades utilizadas para o estudo de sistemas de iluminação são listadas na sequência.

4.1.1 Fluxo luminoso

É a quantidade de luz (radiação) emitida em todas as direções por uma fonte luminosa capaz de produzir um estímulo visual humano (RODRIGUES, 2002). Ou seja, os comprimentos de onda estão compreendidos entre 380 nm e 780 nm como mostra a figura 1. Sua unidade é o lúmen (*lm*) (EMPALUX, 2015).

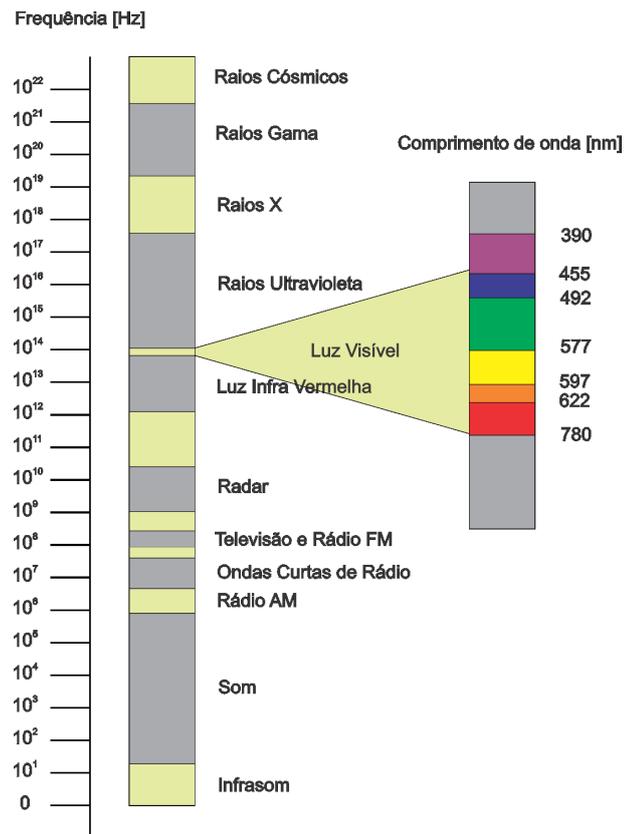


Figura 1: Espectro visível e seus respectivos comprimentos de ondas.

Fonte: Adaptado de Empalux (2015).

4.1.2 Eficiência luminosa

Representa a capacidade de emissão do fluxo luminoso em relação à potência necessária para realizar este processo (COSTA, 2005). Sua unidade é o lúmen por watt (*lm/W*). A Tabela 1 mostra um comparativo das eficiências luminosas das lâmpadas do tipo incandescente, fluorescente e de LED. Podemos notar que as lâmpadas de LEDs possuem a maior das eficiências.

Tabela 1: Comparativo entre as lâmpadas e sua eficiência luminosa.

Fonte luminosa	Eficiência Luminosa (<i>lm/W</i>)
incandescente	10 - 15
fluorescente tubular	55 - 75
fluorescente compacta	50 - 80
LEDs	40 - 130

Fonte: Adaptado de Pinto (2008).

4.1.3 Intensidade luminosa

É a quantidade de luz que é emitida pela fonte luminosa em uma direção específica. Sua unidade é o candela (*Cd*) (EMPALUX, 2015).

4.1.4 Iluminância

Este representa o fluxo luminoso que incide numa determinada área (é a quantidade de luz que chega a um dado ponto). Sua unidade é o Lux (*lux*) (EMPALUX, 2015).

A Norma Brasileira **P-NB-57/69**, recomenda os níveis mínimo de iluminância para diferentes classes de tarefas visuais conforme mostra a Tabela 2 (NETO, 1980).

Tabela 2: Iluminância recomendada de acordo com a tarefa visual.

Classe	Tarefa visual	lux
Mínimo	Ambientes não destinados a trabalho	100
	Ambientes de trabalho	150
I	Tarefas visuais simples e variadas (escritórios, salas de aula, bibliotecas, etc)	500 - 250
II	Observações contínuas de detalhes médios e finos (salas de cálculo, desenho, etc)	1000 - 500
III	Tarefa visual contínua e precisa (desenho arquitetônico e mecânico, etc)	2000 - 1000
IV	Trabalhos muitos finos (conserto de relógio, usinagem de precificação, etc)	Acima de 2000

Fonte: Adaptado de Neto (1980).

4.1.5 Índice de reprodução de cor

Este, especifica a relação entre a cor real de um objeto com a aparência percebida diante de uma fonte luminosa. Ou seja, é o grau de fidelidade com que as cores são reproduzidas por uma determinada fonte de luz (RODRIGUES, 2002; EMPALUX, 2015).

Esse índice varia de 0 a 100. Um IRC entre 75 e 100 é considerado excelente, um IRC entre 65 e 75 é considerado bom, um IRC entre 55 e 65 é considerado moderado e um IRC entre 0 a 55 é considerado ruim (LUXSIDE, 2013). A Tabela 3 mostra o IRC das lâmpadas do tipo incandescente, fluorescente e de LED. Podemos notar que as lâmpadas de LED não possuem o melhor IRC; no entanto, seu IRC está na escala entre bom e excelente.

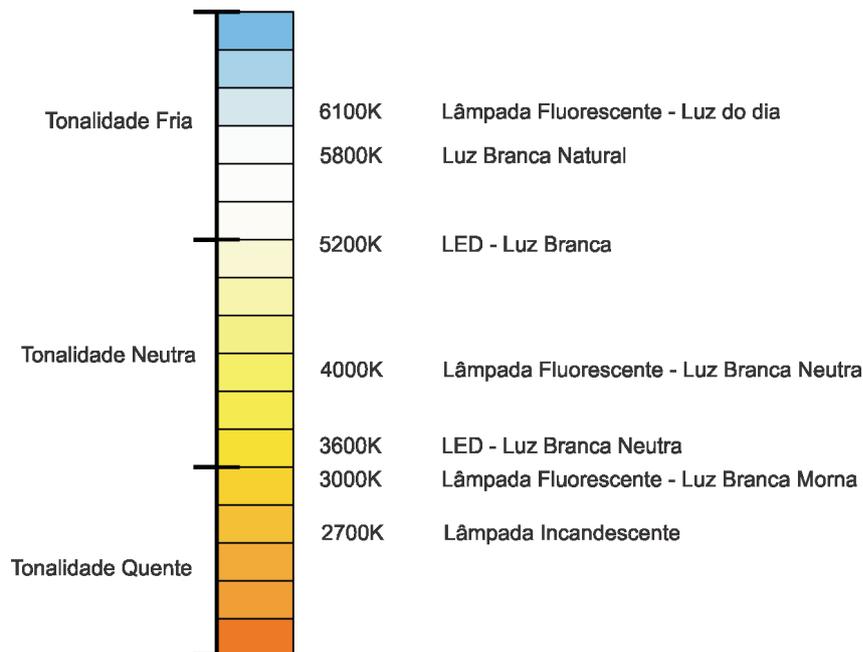
Tabela 3: Comparativo entre as lâmpadas e seu IRC.

Fonte de luz	IRC (%)
incandescente	100
fluorescente compacta	80
LEDs	70 - 90

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2002) e Pinto (2008).

4.1.6 Temperatura de cor

Esta grandeza expressa a aparência cromática da luz emitida pela fonte. Sua unidade é o Kelvin (K). A luz branca natural do sol do meio dia, possui uma temperatura de cor próxima de 5800K. A figura 2 mostra algumas temperaturas de cor das lâmpadas do tipo incandescente, fluorescente e de LED.

**Figura 2: Temperatura de cor de alguns tipos de lâmpadas.**

Fonte: Adaptado de Pinto (2008).

Quanto mais alta a temperatura de cor de uma fonte luminosa, mais branca (mais fria) será a sensação visual por ela emitida e quanto mais baixa a temperatura de cor, mais quente será a sensação que temos do ambiente (RODRIGUES, 2002; ALMEIDA, 2003) como mostra a Tabela 4.

A cor da luz pode afetar o corpo humano ressaltando sensações de fome, sono, ansiedade, entre outras. Um ambiente iluminado com cores de tonalidade fria induz a produtividade,

Tabela 4: Temperaturas de cor e sua sensação assimilada.

Temperatura de cor	sensação visual	Energia radiante emitida
Baixa	Quente	Baixa
Média	Morno	Média
Alta	Frio	Alta

Fonte: Adaptado de Alves (2001).

pois a luz branca desperta o ser humano. Já a iluminação com tonalidades mais quente (luz amarela), deixa o ambiente mais relaxante e agradável (SILVA, 2002; ASSIST, 2007). Dessa forma, fica claro que a escolha da lâmpada não é algo trivial. De acordo com a figura 2, uma vantagem do LED com relação às outras lâmpadas, é o fato de o mesmo possuir diferentes modelos com ampla faixa de variação de cor (de 2.670K a 10.000K) (PINTO, 2008).

4.1.7 Tempo de vida média

Este parâmetro calcula a média aritmética do tempo de duração de cada lâmpada mediante ensaios. Fazendo um pequeno comparativo, pode-se notar na Tabela 5 a vida média dessas fontes de luz (SILVA, 2002; PINTO, 2008), com destaque para as lâmpadas de LED.

Tabela 5: Comparativo de tempo de vida média das lâmpadas estudadas.

Fonte luminosa	Vida média (h)
LEDs	50000
Fluorescente trifósforo T5	16000
Fluorescente compacta	8000
Incandescente	1000

Fonte: Adaptado de Silva (2002) e Pinto (2008).

4.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DAS LÂMPADAS INCANDESCENTE, FLUORESCENTE E LED

Das formas de se obter luz artificial, destacam-se basicamente dois grupos: a incandescência e a luminescência. Em ambos a causa da emissão é motivada por uma diferença de potencial, diferindo apenas pelo modo de excitação. Nesta subseção, serão tratadas as lâmpadas incandescentes, que correspondem ao primeiro grupo, e as lâmpadas do tipo fluorescente e de LED, que correspondem ao segundo grupo.

4.2.1 Lâmpadas incandescentes

As lâmpadas incandescentes são dentre as demais, as mais conhecidas e as que possuem a tecnologia mais antiga (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 1997). Basicamente, são constituídas de um filamento de tungstênio espiralado contido em um bulbo de vidro que pode conter vácuo no interior ou ainda, ser preenchido com gases não halógenos. Isso é necessário para evitar a oxidação do filamento e desgaste prematuro (SILVA, 2008).

A luz é obtida destas lâmpadas quando o filamento é percorrido por corrente elétrica devido ao efeito incandescente (aquecimento). Para que o filamento seja capaz de emitir luz de forma eficiente, este deverá possuir um elevado ponto de fusão e baixa evaporação. Atualmente, as lâmpadas incandescente são feitas de um fio de tungstênio trefilado com diâmetro menor do que 0,1mm e enrolado de forma helicoidal. Neste, quando percorrido por corrente elétrica, podem ser registradas temperaturas da ordem de 3000°C (DEMIAN, 2008). Na figura 3, pode ser visto os principais componentes de uma lâmpada incandescente.

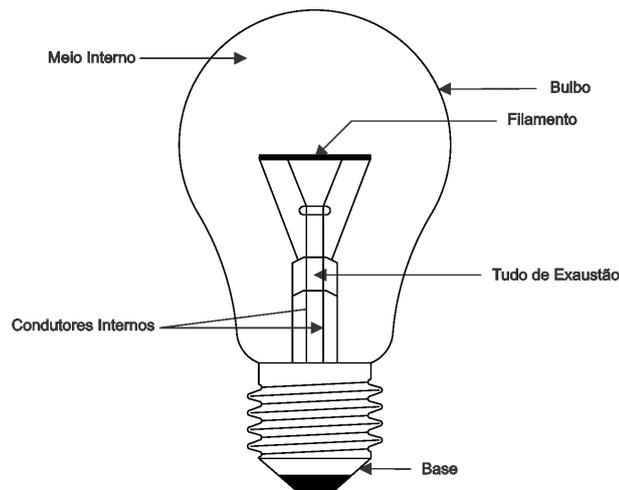


Figura 3: Detalhes construtivos de uma lâmpada incandescente.

Fonte: Adaptado de Demian (2008).

Esse tipo de lâmpada, além de produzir luz, também converte a energia na forma de calor. O grande inconveniente é que ela produz muito mais calor do que luz, fato observado pela relação lúmen/Watt.

4.2.2 Lâmpadas fluorescentes

As lâmpadas fluorescentes foram introduzidas no mercado entre 1933 e 1938 como uma alternativa mais eficiente às lâmpadas incandescentes (SEIDEL, 2004). Este tipo de lâmpada

tem como princípio de funcionamento a descarga elétrica em vapores metálicos (vapor de mercúrio ou vapor de sódio). Basicamente, estas são compostas de um tubo translúcido de vidro revestido internamente de fósforo e composto por gases de vapor metálico sob pressão, no qual nas suas extremidades, estão dispostos dois eletrodos que tem por função emitir elétrons com o aumento da temperatura (SILVA, 2008b).

Quando neste sistema é aplicada uma diferença de potencial, o eletrodo negativo emite elétrons que são acelerados em direção ao eletrodo positivo. Nesse movimento, os elétrons colidem com os átomos de vapor metálico contidos no tubo. A colisão provoca o fenômeno conhecido como ionização dos átomos (o mesmo pode ganhar ou perder elétrons, ou seja, os elétrons saltam de órbitas). E é justamente esta colisão que provoca a liberação de energia na forma de fótons no momento em que os elétrons retornam às suas órbitas originais, numa frequência correspondente a radiação ultravioleta (UV), porém, esta radiação não é sensibilizante ao olho humano como luz na forma visível. Esta é então convertida (revelada) em luz na forma visível quando incide no revestimento de fósforo da parede interna do tubo de vidro (HARRIS, 2015). O fósforo absorve a radiação UV e reemite em comprimentos de onda dentro do espectro visível ao olho humano. Esse fenômeno é conhecido como fluorescência (ALMEIDA, 2010). A figura 4 mostra a representação dos principais componentes de uma lâmpada fluorescente tubular.

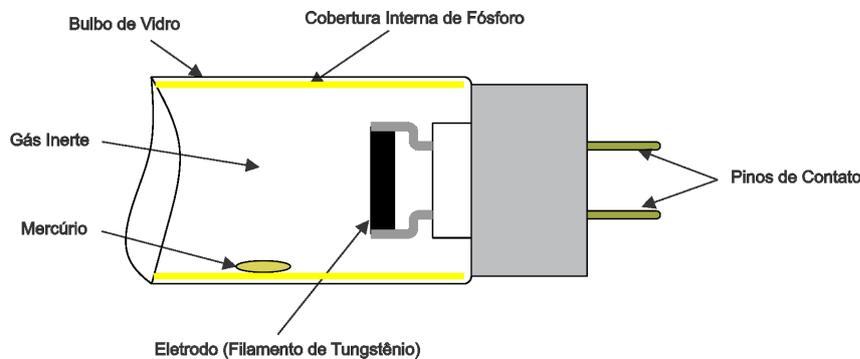


Figura 4: Detalhes construtivos de uma lâmpada fluorescente.

Fonte: Adaptado de Almeida (2010).

A pressão do gás ou do vapor dentro do bulbo nessas lâmpadas de descarga elétrica pode variar de fração até dezenas de atmosferas. Sendo assim, elas podem ser classificadas em baixa, média e de alta pressão. As lâmpadas de baixa pressão são as mais utilizadas, em especial nos ambientes domésticos. Essas são distribuídas na forma fluorescente tubular ou fluorescente compacta (MOREIRA, 1999).

O que difere uma da outra, além do tamanho, é que as lâmpadas fluorescentes tubulares são revestidas internamente por fósforo e necessitam da instalação conjunta de reatores (que

são comprados separadamente). Estes são responsáveis por limitar a corrente e adequar as tensões nas características nominais (SILVA, 2008b). As lâmpadas fluorescentes compactas são revestidas internamente com trifosfato e disposta num pequeno bulbo. São caracterizadas por já possuírem o reator incorporado ao seu invólucro, não precisando assim da aquisição e instalação do mesmo (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 1997). Estas vem ganhando mais mercado, pois além de serem compactas, elas já possuem o reator incorporado, o que facilita a sua instalação, além também, de a mesma ser montada no mesmo bocal padrão das lâmpadas incandescentes, o bocal E27, facilitando a sua respectiva substituição (BASTOS, 2011).

4.2.3 Lâmpadas de LED

São dispositivos semicondutores surgidos na década de 60 (BULLOUGH, 2003). Similar aos diodos tradicionais, esses dispositivos também permitem a passagem da corrente elétrica apenas em um sentido. Nesta polarização (direta), tem-se a emissão de luz pelo dispositivo. Os LEDs podem ser classificados em indicadores, de alto brilho ou então, de potência. A figura 5 mostra exemplares desses grupos.



Figura 5: Alguns dos tipos de LEDs disponíveis.

Fonte: Pinto (2008).

Os LEDs emitem luz através do fenômeno conhecido como eletroluminescência. O fenômeno da eletroluminescência consiste no processo de emissão gerado através de excitação eletrônica, pela passagem de uma corrente elétrica através do material. Este processo pode acontecer em materiais inorgânicos semicondutores, cristais orgânicos e polímeros orgânicos (BASTOS, 2011). Ao contrário das lâmpadas já mencionadas, os LEDs não possuem filamentos, eletrodos ou tubos de descarga e são atrativos quando analisados suas minúsculas dimensões. Este é comumente chamado de estado sólido, pois, a transformação de energia elétrica em luz é feita na matéria (SCOPACASA, 2008).

São formados pela junção de dois cristais semicondutores dopados com diferentes materiais, formando uma junção do tipo PN. Nesta junção, o lado P contém excesso de lacunas

(logo, a falta de elétrons) e, o lado N, contém excesso de elétrons. Sendo que os elétrons tem carga negativa, então o lado P carga positiva e o lado N tem carga negativa. Quando essa junção é polarizada diretamente, isto é, tensão positiva aplicada ao ânodo e tensão negativa ao cátodo, acontece a recombinação de elétrons e lacunas (movimento de ambos em direção ao mesmo ponto). A cada combinação de um elétron com uma lacuna, é liberado um fóton (BULLOUGH, 2003). A figura 6 mostra o processo de recombinação.

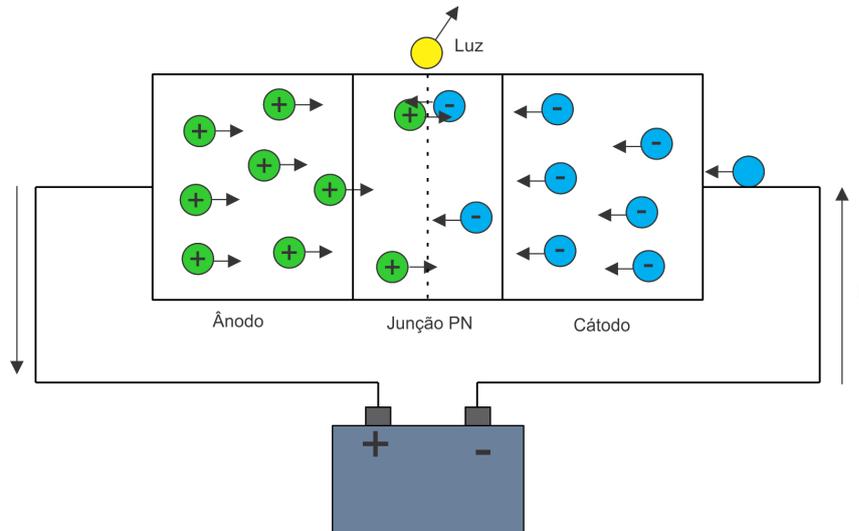


Figura 6: Recombinação de pares de elétrons e lacunas com a liberação de fótons.

Fonte: Adaptado de Pinto (2008).

A energia que é gerada por este dispositivo também é dissipada assim como nas outras lâmpadas, na forma de luz e de calor. No entanto, a luz que é emitida por este dispositivo é irradiada em todas as direções; já o calor gerado, é retido no interior do LED. Dessa forma, é necessário o uso de dissipadores para limitar este aquecimento a fim de se evitar falhas no mesmo (RANGEL; SILVA; GUEDE, 2009). Mesmo assim, os LEDs apresentam maior eficiência e maior vida útil média comparado às outras fontes de iluminação já mencionadas.

4.3 SIMULAÇÃO DE ECONOMIA ENTRE AS LÂMPADAS

Existe muita divergência nos valores reais das respectivas eficiências luminosas de cada um dos tipos de lâmpadas já abordados. Isto, devido aos diferentes tipos de tecnologias e materiais utilizados. Por isso, será considerada a média dos valores das respectivas eficiências luminosas já descritas. Ou seja, se a eficiência luminosa da lâmpada incandescente varia entre 10 e 15 lm/W, assume-se o valor de 12,5 lm/W. O mesmo procedimento é realizado para as demais lâmpadas. Também será considerado que o sistema à LED assumirá apenas 30.000 horas

de vida útil, pois na prática é muito difícil construir um circuito reator para uma luminária de LED que chegue a 50.000 horas (vida média do LED conhecida) de funcionamento sem que se danifique o circuito eletrônico. Dessa forma, esses dados são expressados na Tabela 6.

Tabela 6: Comparativo de eficiência luminosa e vida média entre as lâmpadas.

Lâmpada	Eficiência Luminosa (lm/W)	Vida média
incandescente	12,5	1.000
fluorescente compacta	65	8.000
LEDs	85	30.000

Fonte: Adaptado de Silva (2002) e Pinto (2008).

Considerando que, das lâmpadas do tipo incandescente a potência mais utilizada nos ambientes residenciais tem sido a de 100 W, com base na Tabela 6, pode-se afirmar que o seu fluxo luminoso é de cerca de 1250 lm. Ao substituir esta lâmpada por outras que desenvolvem o mesmo fluxo luminoso, ter-se-ia aproximadamente uma lâmpada de 19,2 W do tipo fluorescente e uma de 14,7 W de LED. Como esses valores não são usuais no comércio, para efeito de comparação será utilizado uma fluorescente de 20 W e uma de LED de 15 W.

Desta forma pode-se construir a Tabela 7, considerar também que o custo médio da energia fornecida por uma concessionária hoje, é de aproximadamente R\$ 0,66210 por kW/h (COPEL, 2015). Sendo o investimento inicial, o valor gasto na aquisição da lâmpada.

Tabela 7: Comparativo de investimento entre as lâmpadas em 30.000 horas.

Variável	incandescente 100 W	fluorescente 20 W	LED 15 W
investimento inicial (R\$)	2,50	10,00	35,00
reposições (R\$)	70,00	30,00	0
consumo de energia (R\$)	1.986,25	397,50	297,50
total de custo no período (R\$)	2.058,75	437,50	332,50

Fonte: Autoria própria.

Desta forma, se verifica o potencial do uso de lâmpadas de LED.

4.4 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS LEDS

Sendo o LED uma junção do tipo PN capaz de emitir luz na recombinação de cada par elétron-lacuna, este processo libera apenas um fóton. Dessa forma, o semicondutor é caracterizado por ter um *gap* direto. Caso o semicondutor nessa recombinação, além de fótons produzir também fônons, diz-se que ele tem *gap* indireto. O fônon é uma agitação da estrutura cristalina do semicondutor que gera calor e isso torna a emissão de luz pouco eficiente. Por isso, é

necessário utilizar semicondutores de *gap* direto como o arseneto de gálio (GaAs), antimoneto de índio (InSb), fosfeto de índio (InP), sulfeto de chumbo (PbS), sulfeto de cádmio (CdS) e teruleto de cádmio (CdTe) (RESENDE, 2004).

4.4.1 Obtenção de diferentes cores em LEDs

Os LEDs emitem luz monocromática e o seu comprimento de onda é definido pelo tipo de material que é empregado na composição do semicondutor. É comum que a dopagem do cristal possa ser feita de arsênico, índio, gálio, alumínio, fósforo ou nitrogênio. Esta variedade de elementos químicos combinados permitem a obtenção das mais diversas cores (BULLOUGH, 2003; CERVI et al., 2005a; JUNIOR, 2010), traduzindo-se na diversidade de aplicações que os LEDs podem abranger.

Os LEDs que emitem um comprimento de onda relativo às cores entre o vermelho e o amarelo, utilizam o composto AlInGaP (alumínio gálio fosfeto de índio). Já os LEDs que emitem um comprimento de onda relativo às cores entre o azul e o verde, utilizam o composto InGaN (nitreto de índio gálio). A cor exata, depende da sua dopagem (JUNIOR, 2010). A figura 7 mostra a faixa de cores que cada um desses compostos são usualmente aplicados e a relação das cores com o seu comprimento de onda do espectro de radiação visível.

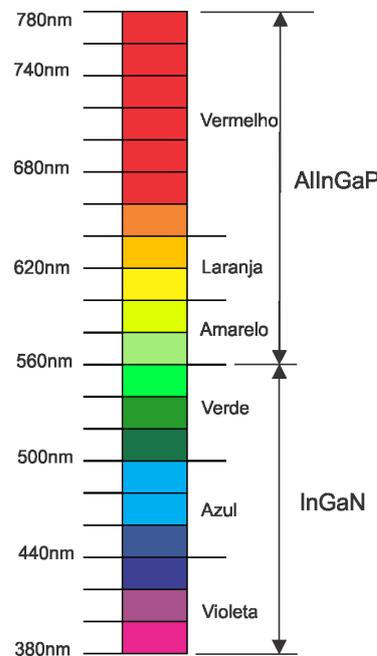


Figura 7: Faixa do espectro visível determinado por cada cristal.

Fonte: Adaptado de Sá Junior (2010) e Pinto (2008).

4.4.2 Obtenção de luz branca em LEDs

O processo de obtenção da luz branca, mais simples e mais utilizado dentre os três existentes, é com a utilização de LED azul recoberto por uma camada de fósforo de cor amarela. Esse é projetado de tal forma que, uma parcela da luz atravesse a camada de fósforo, deixando promover o espectro referente ao azul e a outra parcela de energia do LED é absorvida pela camada de fósforo amarela e convertida na faixa complementar do espectro. Essa combinação, promove a luz de cor branca com elevada temperatura de cor (JUNIOR, 2010). Esta combinação pode ser vista na figura 8.

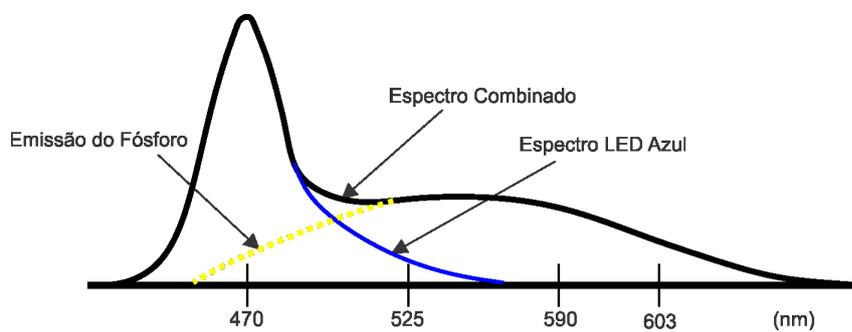


Figura 8: Método de obtenção da cor branca utilizando LED azul recoberto por fósforo amarelo.

Fonte: Adaptado de Sá Junior (2010).

Outro processo de obtenção de luz branca, muito similar ao das lâmpadas fluorescentes, utiliza LEDs que possuem um comprimento de onda relativo ao ultravioleta (UV) e são recobertos por uma camada de fósforo emissor dos espectros azul, vermelho e verde. Da mesma forma que nas lâmpadas fluorescentes, o ultravioleta é absorvido pelo fósforo e é convertido obtendo a luz branca. Esses tipos de LEDs possuem índice de reprodução de cor semelhante ao das lâmpadas fluorescentes tubulares (CERVI, 2005). O espectro resultante deste método pode ser visto na figura 9.

Por fim, o terceiro método de se obter luz branca, consiste em combinar LEDs de diferentes cores. É possível obter luz branca com a combinação de apenas duas cores; no entanto, é um branco com baixo IRC. Portanto, costuma-se utilizar o padrão combinando as cores vermelha, verde e azul (*Red, Green and Blue* - RGB). Controlando a intensidade de forma independente de cada uma dessas cores na verdade, é possível obter qualquer outra cor (BERNITZ; SCHALLMOSER; SOWA, 2006). O espectro desta combinação resultante pode ser visto na figura 10. É possível notar neste espectro, a existência de um vale próximo do comprimento de onda de 590 nm, que corresponde a cor âmbar. Quando se faz necessário um elevado IRC, a cor âmbar é adicionada (LIM et al., 2006).

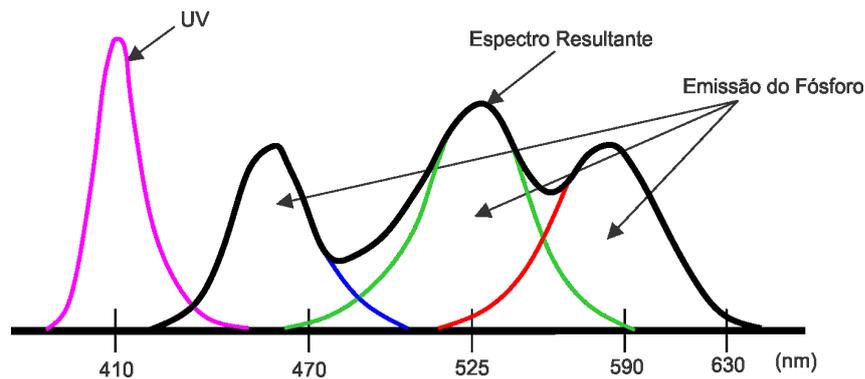


Figura 9: Método de obtenção da cor branca utilizando LED UV recoberto por fósforo.

Fonte: Adaptado de Sá Junior (2010).

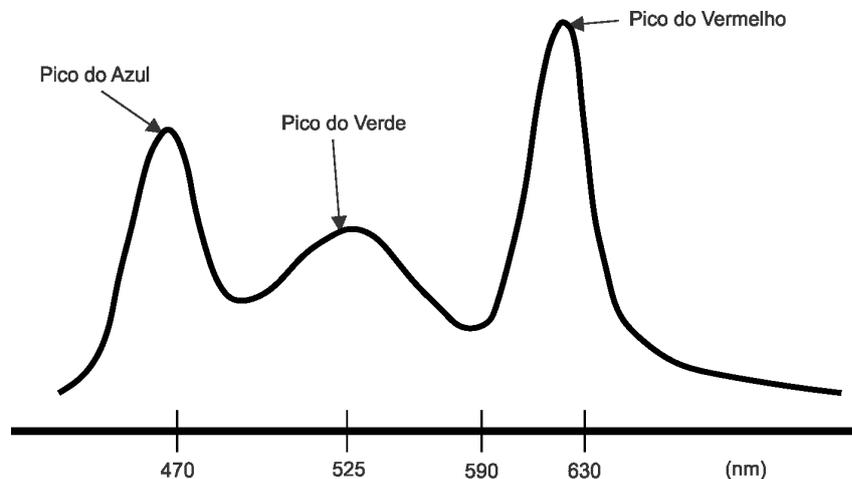


Figura 10: Método de obtenção da cor branca utilizando a recombinação do RGB.

Fonte: Adaptado de Sá Junior (2010).

4.4.3 Potência máxima de um LED

Ao fim da década de 90, a tecnologia de fabricação de LEDs evoluiu e os tornou mais eficientes. Estes levavam o nitreto de gálio (GaN), o qual tem um *gap* correspondente a cor azul. Isso foi um avanço, pois com este, era possível de se obter as três cores básicas do espectro visível, simulando a cor branca (JUNIOR, 2010). Em função disso, quase a totalidade dos LEDs hoje são feitos de GaN, o problema deste, é que a camada p-GaN tem pouca condutividade elétrica, fazendo necessário a deposição de uma camada metálica para melhorar a propagação dos elétrons (condução de corrente). Esta camada é composta de níquel (Ni) e ouro (Au), que absorvem parcialmente a luz. A absorção é diminuída com a redução da espessura dessa camada metálica o que, conseqüentemente, limita a corrente elétrica que propaga da camada p-GaN. Ou seja, o fator limitante da potência é dado pela camada P da junção semi-

condutora (STEIGERWALD et al., 2002). A figura 11 mostra a absorção parcial pelo contato metálico de um LED de GaN.

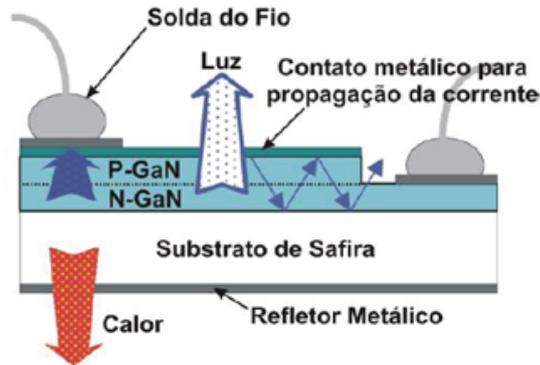


Figura 11: Absorção parcial da luz pela camada metálica da camada P.

Fonte: S Junior (2010).

Posteriormente, foi inventado uma outra forma de montagem para minizar o problema da absorção da luz e limitação da corrente. Neste, a pastilha semicondutora foi invertida e o substrato de safira, foi posicionado na parte superior. Isso permitiu uma troca mais eficiente de calor da pastilha semicondutora. Dessa forma, é possível aumentar a sua densidade de potência, podendo chegar de acordo com alguns autores ao dobro. Também é atribuído o aumento da extração de luz, pois uma das faces é livre (JUNIOR, 2010). Essa montagem pode ser vista na figura 12.

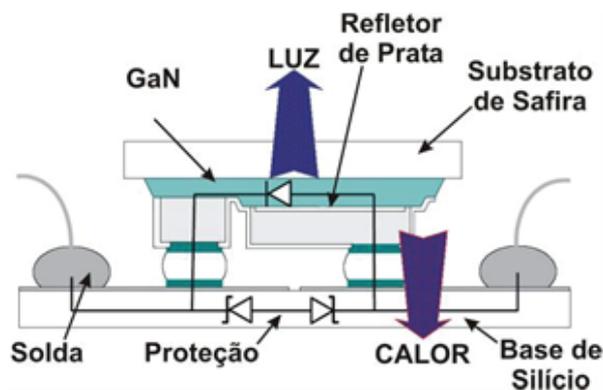


Figura 12: Nova disposição a fim de minimizar a absorção pela camada metálica.

Fonte: S Junior (2010).

4.4.4 Perdas nos LEDs

As perdas nos LEDs são causadas devido a camada P possuir uma baixa condutividade. Isso provoca um espalhamento da corrente gerando perdas ôhmicas. No modelo elétrico do LED, é possível notar uma resistência série intrínseca, a qual é responsável por delimitar a potência na qual o LED pode operar (STEIGERWALD et al., 2002). Porém com o aumento da temperatura, a condutividade da camada P aumenta, reduzindo dessa forma, o valor da resistência série. Ou seja, enquanto num condutor o aumento da temperatura provoca também o aumento da resistência, nesses semicondutores acontece o oposto (SCHUBERT, 2006). A lei de Ohm afirma que, para um condutor mantido à temperatura constante, a razão entre a tensão entre dois pontos e a corrente elétrica é constante, sendo essa constante a resistência elétrica. Então sendo a tensão o produto da corrente pela resistência, pode-se prever que quando o valor da resistência diminuí, a corrente irá aumentar.

4.5 CURVA CARACTERÍSTICA E MODELO MATEMÁTICO SIMPLIFICADO DO LED

Quando uma junção do tipo PN é criada, ou seja, um elemento do tipo P se junta com um elemento do tipo N, no ponto onde esses cristais se tocam, tende a haver uma migração de elétrons (da camada N) e de lacunas (da camada P) até que se estabeleça um equilíbrio. Essa camada em equilíbrio, chamada de camada de depleção (ou barreira de potencial), impede que se gere o equilíbrio completo da junção, pois os elétrons da camada N não encontram lacunas para se movimentar pela camada de depleção. O mesmo acontece ao contrário, as lacunas da camada P não encontram elétrons para se movimentar. A camada de depleção, é uma espécie de zona morta, a qual impede a movimentação dos elétrons e das lacunas pela junção (MARQUES; JUNIOR; CRUZ, 2001).

Se a junção PN for polarizada diretamente como mostra a figura 13(a) e se a diferença de potencial da fonte acoplada for maior que a o da camada de depleção, ocorre então a passagem de corrente elétrica pela junção. De forma contrária, se a junção for polarizada reversamente como mostra a figura 13(b), a fonte de alimentação acaba intensificando essa barreira de potencial, dificultando ainda mais a passagem da corrente elétrica pela junção.

Pode-se então transcrever este comportamento na forma gráfica (curva característica da junção PN), a partir disso é possível identificar três áreas distintas: região de polarização direta, região de polarização reversa e região de ruptura como mostra a figura 14.

Este gráfico mostra que, para tensões negativas (polarização reversa) a corrente é praticamente nula, o que caracteriza uma resistência elétrica elevada, e a tensão, é limitada por

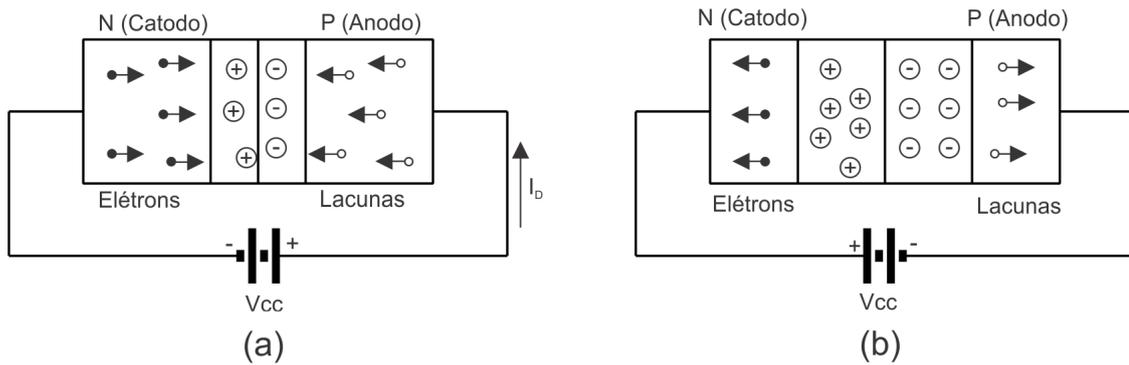


Figura 13: Polarização direta em (a) e indireta em (b) de uma junção PN.

Fonte: Adaptado de Marques et al. (2001).

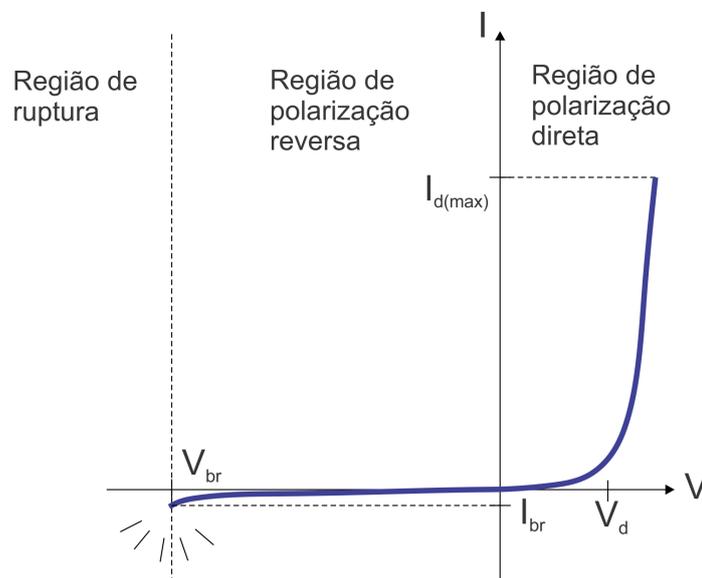


Figura 14: Curva característica da junção PN.

Fonte: Adaptado de Marques et al. (2001).

V_{br} (tensão de ruptura ou *breakdown voltage*). A partir dessa tensão (de ruptura), o dispositivo pode ser danificado. Para tensões positivas (polarização direta), enquanto a tensão for menor que V_d , a corrente é praticamente nula. Para tensões maior que V_d , a corrente cresce exponencialmente, o que caracteriza que nesta região, o dispositivo tem resistência elétrica muito baixa e a mesma é limitada por $I_{d(max)}$. Deve ser evitado valores maiores que $I_{d(max)}$ para não danificar o dispositivo (MARQUES; JUNIOR; CRUZ, 2001).

Ao contrário dos diodos comuns, que são capazes de suportar uma tensão reversa acima de 100 V, nos LEDs, é usual os valores limites da ordem de 4 à 6 V (BENEVIDES; BORTOLLOSO; OLIVEIRA, 2010).

Diferente dos diodos retificadores, os LEDs possuem elevadas perdas ôhmicas quando injetada corrente em sua junção. Estas perdas, costumam ser representadas por resistências parasitas, podendo estar em série e/ou em paralelo. Os efeitos dessas resistências são mostradas na figura 15 (JUNIOR, 2010). Neste, é possível perceber duas inclinações. Uma abaixo no valor de tensão de corte, causado pela resistência em paralelo e outra inclinação quando a tensão está acima do valor de corte, causado pela resistência série parasita. Enquanto a primeira pouco influencia na inclinação da curva acima da tensão de corte devido ao fato de possuir um valor elevado, a segunda exerce grande influência quando aplicado os valores nominais de corrente do dispositivo. Na prática, a corrente é praticamente nula em tensões abaixo da tensão de corte; logo, é usual a desconsideração da resistência em paralelo (JUNIOR, 2010).

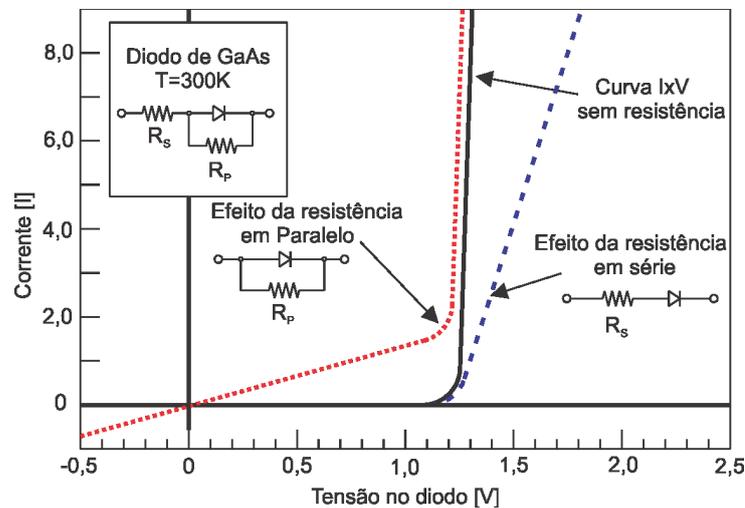


Figura 15: Perdas ôhmicas de um LED.

Fonte: Adaptado de Sá Junior (2010).

O modelo elétrico simplificado do LED que representa uma boa aproximação das características elétricas é mostrado na figura 16 e a expressão matemática que descreve o comportamento do LED é dado pela equação (1) (RODRIGUES; MORAIS, 2012).

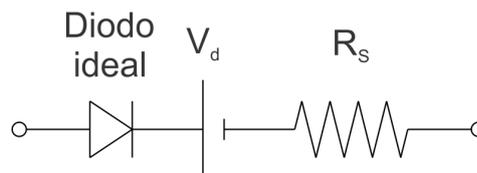


Figura 16: Modelo elétrico simplificado do LED.

Fonte: Adaptado de Rodrigues e Morais (2012).

$$V_{LED} = V_d + R_s \cdot I_{LED} \quad (1)$$

Onde:

V_{LED} - queda de tensão do LED;

V_d - fonte de tensão interna (camada de depleção);

R_s - resistência série parasita;

I_{LED} - corrente do LED;

Para a utilização deste modelo numa simulação e/ou no cálculo da fonte de alimentação, é necessário encontrar o valor da fonte de tensão interna e da resistência parasita em série do LED através da curva característica do modelo pretendido. Junior (2010) propôs o método que será mostrado a seguir:

Utilizando a curva característica dada pelo fabricante (ou fazendo um ensaio injetando uma tensão variável) no modelo pretendido (ex. LED LXHL-PW03 @ 25°C), para tensão direta x corrente, tem-se o gráfico da figura 17.

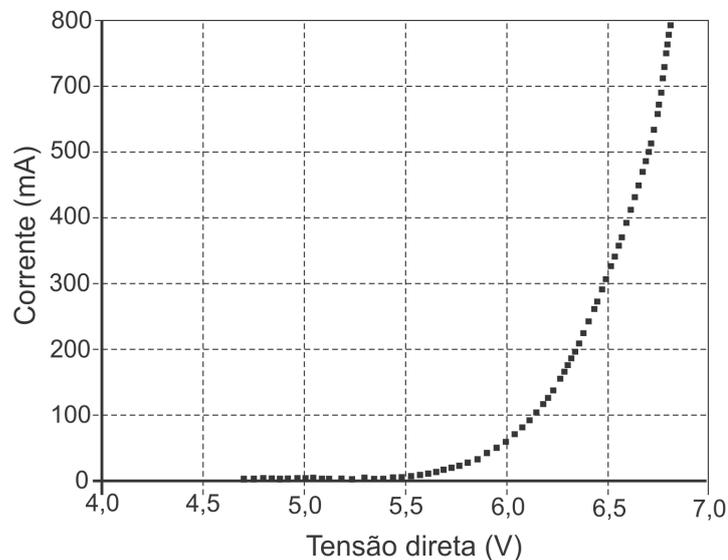


Figura 17: Curva característica dada pelo fabricante do modelo pretendido (exemplo).

Fonte: Adaptado de Sá Junior (2010).

Analisando a figura 17, observa-se que para uma corrente de operação entre 200 e 700 mA é possível obter um coeficiente angular de $0,98 \Omega$ e um coeficiente linear de $6,16 \text{ V}$. Fazendo a regressão linear, pode-se obter a reta mostrada na figura 18. Pode-se afirmar então, que a partir desse, que o modelo simplificado para simulação é dado pelo esquema da figura 19.

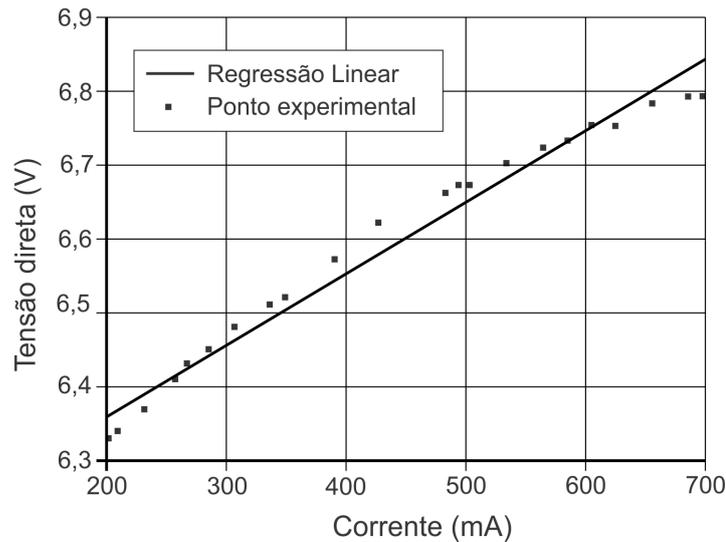


Figura 18: Retra obtida através da regressão linear da curva característica do LED.

Fonte: Adaptado de Sá Junior (2010).

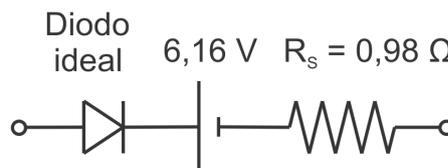


Figura 19: Modelo simplificado final para utilização em simulação.

Fonte: Sá Junior (2010).

4.6 CARACTERÍSTICAS NECESSÁRIAS DAS FONTES DE ALIMENTAÇÃO UTILIZADAS EM LEDS DE POTÊNCIA

Para um projeto visando a utilização de LEDs de potência é necessário observar algumas características segundo Junior (2010) e Pinto (2008):

- Operam com baixa tensão. Logo, a utilização em luminárias ligadas a rede elétrica, deve prever a utilização de uma fonte do tipo abaixadora;
- Operam com correntes elevadas se comparadas aos LEDs indicadores. Isso prevê a utilização de dispositivos limitadores de corrente que promovam baixas perdas;
- Possuem rápida resposta as variações de corrente, alterando dessa forma as suas propriedades ópticas (variações na cromaticidade). Dessa forma, utilizando um conversor por exemplo, é esperado que o mesmo possua baixa oscilação de corrente e de preferência,

opere no modo de condução contínua;

- A operação em altas temperaturas, provoca danos ao LED, podendo reduzir a sua vida útil. Logo a temperatura deve ser monitorada e controlada pelo dispositivo de alimentação. Isto também pode ser alcançado por um projeto adequado de dissipador de calor e limitação da corrente máxima;
- Os LEDs possuem elevada vida útil, o que faz necessário um projeto de fonte que também corresponda a esta elevada vida útil. O fator limitante para tal, costuma ser a utilização de capacitores eletrolíticos, por isso, se possível, a sua utilização é evitada;
- Deve ser alimentado por fonte de corrente, pois é possível grandes variações na sua tensão direta quando alimentado com fonte de tensão, acarretando assim, grandes variações de corrente. Isso também é útil para limitar picos de corrente;
- Quando utilizados em luminárias, a fonte (reator) costuma ser incorporada ao sistema, devendo assim ter as menores dimensões possíveis.

4.7 CIRCUITOS ACIONADORES DE LEDS

Como já mencionado, os LEDs são alimentados com baixa tensão e por corrente contínua. Sendo assim, é necessária a implementação de uma fonte de alimentação e para isso, são conhecidos basicamente dois tipos de fontes. O primeiro, é composto por uma fonte linear partindo de uma fonte CC e o segundo por uma fonte chaveada (CA-CC ou CC-CC).

Apesar do primeiro apresentar uma boa regulação e boa resposta a transitórios, seu rendimento é muito baixo, pois a diferença de tensão entre a entrada e a saída recaí sobre o elemento regulador (um transistor), sendo assim, a corrente da carga é a mesma que atravessa o regulador, logo, a sua potência é limitada em algumas dezenas de Watts (MOHAN; UNDE-LAND; ROBBINS, 2002).

No segundo grupo, existem ainda dois métodos, a conversão CA-CC que utiliza retificadores controláveis e a conversão CC-CC, este último utiliza um elemento regulador que trabalha como chave na região não linear. Ora em saturação, permitindo passagem de corrente com uma queda de tensão no componente de valor muito baixo quando comparado ao transistor operando em região ativa. Ora operando em corte, não permitindo passagem de corrente. Ambos possuem elevada eficiência; porém, no primeiro método, a tensão com baixa ondulação é conseguida através de elementos de filtragem de saída (capacitores e indutores) de valores elevados e tamanhos volumosos. A resposta dinâmica a transitórios é caracterizada como lenta,

devido a resposta do filtro. Já o segundo método opera em alta frequência de chaveamento e isso permite que os elementos do filtro de saída possuam valores menores e tamanhos reduzidos, o que faz com que se contribua para conseguir obter elevadas densidades de potência e melhores respostas dinâmicas (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2002; RASHID, 2010).

Usualmente, os LEDs costumam ser alimentados de três maneiras: Utilizando um resistor em série, utilizando um conversor linear ou utilizando um conversor chaveado.

4.7.1 Resistor em série

Apesar dos LEDs possuírem uma resistência série intrínseca, isso não é suficiente para limitar a corrente quando ligado a uma fonte de tensão, devido ao seu valor muito baixo (JUNIOR, 2010). Dessa forma, é necessário um circuito adicional para estabilizar esta corrente. A maneira mais simples e comumente utilizada em LEDs indicadores, os quais são alimentados por uma fonte de tensão, é a corrente limitada por um resistor em série conforme mostra a figura 20.

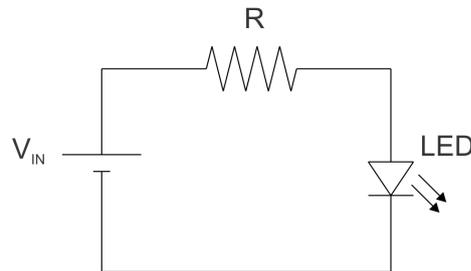


Figura 20: Limitador de corrente utilizando um resistor em série com o LED.

Fonte: Autoria própria.

Este sistema, apesar da fácil implementação apresenta problemas. Como por exemplo, qualquer oscilação na fonte de tensão é capaz de provocar alteração na tensão aplicada ao resistor. Também, devido às características construtivas do LED, é possível verificar variação da tensão de condução; dessa forma, a corrente circulante no LED não será constante. Isso, além de provocar alterações na luminosidade do LED é responsável também por danificá-lo. Talvez a maior desvantagem da utilização do resistor em série, seja o fato do sistema possuir baixa eficiência quando submetido a tensões elevadas ou na utilização de LEDs de potência, já que a corrente de um LED de potência é mais elevada do que a de um LED comum. Dessa forma, a potência dissipada pelo resistor torna-se muito elevada, podendo ultrapassar a potência do próprio LED (JUNIOR, 2010), tornando-se inviável sua utilização.

4.7.2 Conversor linear

Este também costuma ser bastante utilizado devido a sua simplicidade e ao seu baixo custo. Entre os circuitos integrados utilizados para realizar a alimentação apropriada dos LEDs, o Circuito Integrado (CI) LM317 é o mais conhecido. Este tem por função, regular a tensão de saída com base na realimentação desta tensão, onde o uso do resistor cria a característica de limitação de corrente para o LED. A queda de tensão no elemento resistivo, possui normalmente baixo valor para que a potência dissipada pelo mesmo não seja tão expressiva. Para seu uso, é necessário a utilização de uma fonte de tensão com o valor superior ao da saída (PINTO, 2008). Mesmo assim a tensão da fonte de alimentação não deve exceder 35V para os CIs reguladores de 5 a 18V e 40V para o CI de 24V; e a tensão mínima deve ser acima de 3V da tensão desejada pelo CI regulador. A sua implementação é mostrada na figura 21.

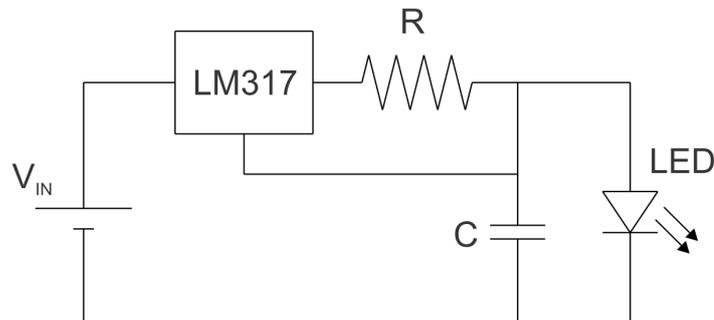


Figura 21: Limitador de corrente utilizando um conversor linear LM317.

Fonte: Autoria própria.

Apesar da sua fácil implementação, sua eficiência é baixa, principalmente quando a diferença de tensão entre a entrada e a saída for elevada (PINTO, 2008). Também, a sua utilização é fator limitante de corrente máxima no projeto (cerca de 1,5 A para o LM317), que dependendo do arranjo de LEDs, pode tornar seu uso inviável (FAIRCHILD, 2014).

4.7.3 Conversor chaveado

Enquanto os conversores lineares são utilizados em níveis de baixa potência, em alta potência é recomendado o uso de reguladores chaveados, os quais utilizam dispositivos semicondutores que operam em dois estados (ligado e desligado). Esses estados definidos, proporcionam baixas perdas (baixa tensão no estado ligado e corrente zero no estado desligado). A outra vantagem, é que estes operam em alta frequência e isso proporciona a utilização de filtros menores (quanto maior a frequência, menor e mais leve será o transformador, indutor e o capacitor

que integram a estrutura). Além disso, as características dinâmicas do conversor melhoram com o aumento da frequência (RASHID, 2010).

Os conversores chaveados (ou estáticos) de corrente contínua para contínua (CC-CC), utilizam a modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation*-PWM), que envolve a modulação de sua razão cíclica (*duty cycle*) para controlar o valor da corrente e tensão entregue à carga (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2002; RASHID, 2010).

Neste trabalho, serão apresentados apenas conversores comutados por PWM. Na figura 22, um exemplo básico de um conversores CC-CC modulado por PWM é apresentado.

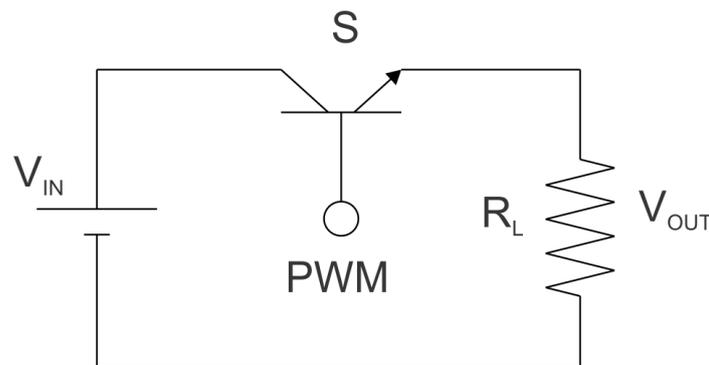


Figura 22: Conversor CC-CC básico modulado por PWM.

Fonte: Autoria própria.

4.8 CONVERSORES CC-CC

Nesta sessão, serão apresentadas as principais topologias de conversores CC-CC utilizados para realizar a alimentação de LEDs de potência, procurando-se evidenciar as vantagens e desvantagens de cada conversor para uma posterior seleção.

4.8.1 Conversor Buck

O conversor Buck, como mostrado na figura 23, consiste em um conversor do tipo abaixador, ou seja, permite alimentar cargas com valores médios de tensão de saída inferiores a tensão de entrada. Devido a sua simplicidade, ele é muito utilizado para alimentar LEDs. Possui um filtro passa-baixa LC, enquanto o indutor limita a ondulação da corrente o capacitor limita a ondulação de tensão na carga (RASHID, 2010). É interessante promover a retirada do capacitor, uma vez que ele é um fator limitante de vida útil do circuito de iluminação a LED, para isso, costuma-se aumentar o valor da indutância, a qual promoverá a redução da ondulação

de corrente e assim, o conversor passa a operar com características de fonte de corrente (PINTO, 2008). Outra alternativa é utilizar capacitores de polipropileno e de baixa capacitância.

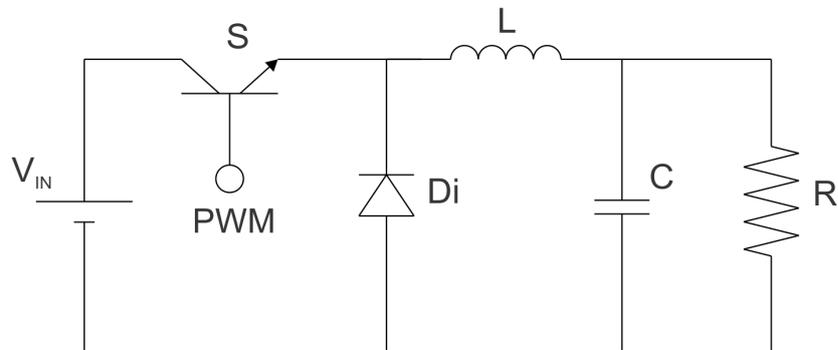


Figura 23: Conversor Buck.

Fonte: Adaptado de Rashid (2010).

O projeto deste conversor pode ser feito para operar tanto no modo de condução contínua (MCC), no modo de condução crítica (MCCr), ou no modo de condução descontínua (MCD). Se operando em MCC, a relação entre a tensão de saída pela tensão de entrada é determinada diretamente pela razão cíclica (tempo de condução do interruptor). Quando processando a mesma quantidade de energia, a corrente de pico no MCC é menor se comparado ao MCD (PINTO, 2008).

Em relação à análise da topologia, existe a dificuldade de implementação do circuito de comando, pois, o conversor Buck não compartilha ao mesmo tempo a mesma referência entre a fonte de entrada, a carga e o interruptor (PINTO, 2008).

4.8.2 Conversor Boost

O conversor Boost, mostrado na figura 24, consiste num conversor do tipo elevador, ou seja, a tensão de saída é maior do que a tensão de entrada. Assim como o Buck, topologicamente o circuito do conversor Boost é simples. Seu princípio básico de funcionamento consiste em armazenar energia no indutor enquanto o interruptor permanecer conduzindo. Posteriormente, quando o interruptor é aberto, o indutor libera esta energia para a carga. Devido ao fato do indutor operar como uma segunda fonte em série com a fonte de entrada, ocorre a elevação da tensão na carga (PINTO, 2008; RASHID, 2010).

No MCC, o ganho estático também é dado pela razão cíclica, já no MCD depende da corrente normalizada de carga (γ) (RASHID, 2010). Porém, tanto em MCC quanto em MDC, a corrente que circula pelo diodo é sempre descontínua, o que faz necessária a utilização de um

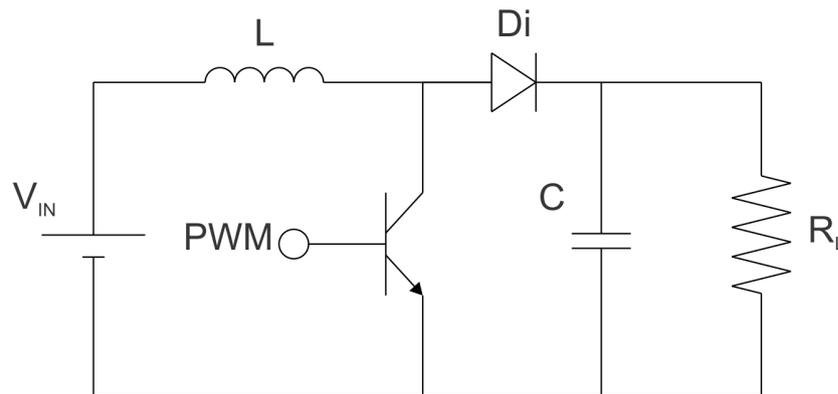


Figura 24: Conversor Boost.

Fonte: Adaptado de Rashid (2010).

capacitor na saída quando se pretende alimentar cargas com corrente contínua (PINTO, 2008).

Na análise topológica, este conversor tem a vantagem de compartilhar o mesmo referencial entre a fonte de entrada, carga e o interruptor.

4.8.3 Conversor Buck-Boost

O conversor Buck-Boost, como mostrado na figura 25, pode operar tanto como elevador quanto abaixador de tensão, porém, a tensão de saída tem polaridade invertida em relação a tensão de entrada. Quando se compara o conversor Buck-Boost aos conversores Buck e Boost, verifica-se que o mesmo possui maiores esforços de corrente no indutor Buck-Boost e maiores esforços de tensão nos semicondutores. Na primeira etapa de operação, o indutor armazena a energia da entrada e o diodo impede que a corrente circule pela carga (interruptor fechado). Quanto o interruptor é aberto, a energia que foi armazenado no indutor é transferida para a carga através do diodo (PINTO, 2008).

Da mesma forma que o conversor Boost, este conversor apresenta uma corrente pulsada no diodo, fazendo necessária a inserção de um filtro capacitivo quando se deseja utiliza-lo como fonte de corrente contínua (JUNIOR, 2010).

4.8.4 Conversor Ćuk

O conversor Ćuk é composto de um conversor Boost na entrada em série com um conversor Buck como mostra a figura 26. Quando a chave está fechada, a fonte armazena energia no indutor L_1 e o capacitor C_1 que estava previamente carregado transfere a sua energia

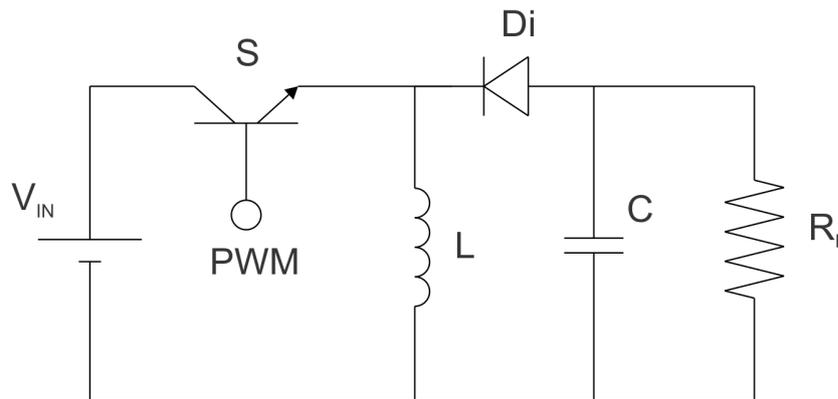


Figura 25: Conversor Buck-Boost.

Fonte: Adaptado de Rashid (2010).

para o indutor L_2 para suprir a carga. Neste instante, o diodo Di não conduz. No momento em que a chave é aberta, o diodo passa a conduzir corrente para o indutor L_1 que carrega o capacitor C_1 com uma tensão superior a da fonte. Nesse instante, a carga é suprida pelo indutor L_2 (RASHID, 2010). Neste conversor a polaridade de saída é oposta à da tensão de entrada.

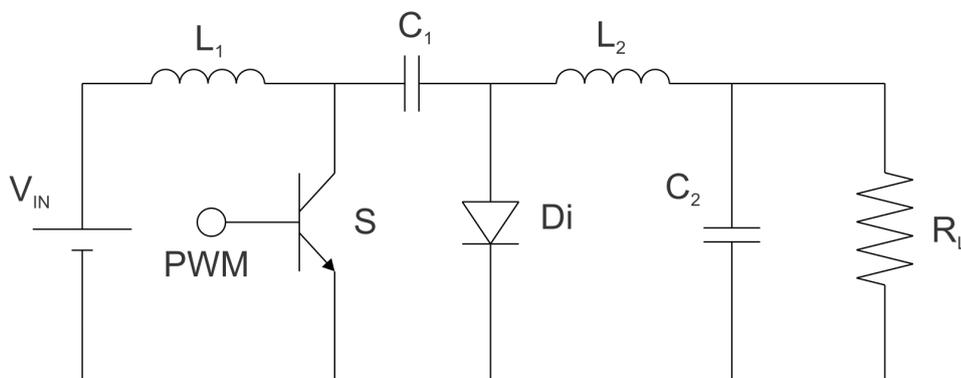


Figura 26: Conversor Ćuk.

Fonte: Adaptado de Pinto (2008).

Essa combinação, permite que a entrada e a saída possam operar em MCC e que o ganho estático seja o mesmo que o do conversor Buck-Boost, porém, tem a desvantagem da transferência de energia da fonte para a carga ser feita através do capacitor C_1 , fator limitante do projeto (JUNIOR, 2010). Além disso é um conversor de quarta ordem devido a presença de dois indutores e de dois capacitores na estrutura.

4.8.5 Conversor SEPIC

O conversor SEPIC é composto por um conversor Boost em série com um conversor Buck-Boost como mostra a figura 27. Este também possui característica abaixadora-elevadora. Comparado com o Buck-Boost, este tem a vantagem da tensão de saída não possuir a polaridade invertida, porém, tem a desvantagem da corrente de saída ser pulsada, necessitando assim de um filtro capacitivo (PINTO, 2008). Da mesma forma que o conversor Ćuk, este se apresenta com um sistema de quarta ordem.

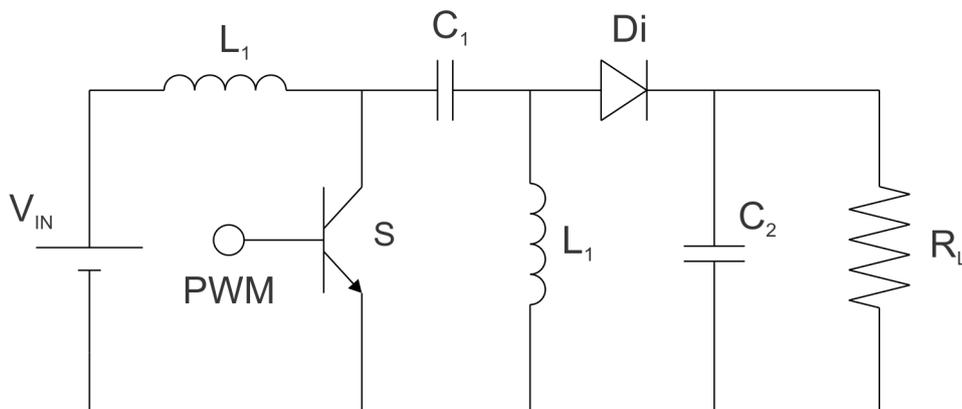


Figura 27: Conversor SEPIC.

Fonte: Adaptado de Pinto (2008).

4.8.6 Conversor Zeta

O conversor Zeta é formado por um conversor Buck-Boost em série com um conversor Buck como mostra a figura 28, também apresenta característica abaixador-elevador de tensão. Neste, a corrente de entrada é descontínua e a da saída contínua. Apesar de possuir um Buck na saída, o qual permite a retirada do capacitor por possuir uma baixa ondulação de corrente, a sua desvantagem é que a transferência de energia entre a fonte e a carga também se dá pelo capacitor C_1 (PINTO, 2008; JUNIOR, 2010).

4.8.7 Conversor Flyback

Até então, apresentou-se apenas as composições de conversores básicos do tipo não isolado, ou seja, a fonte de entrada não é isolada da carga. Existe entre outras topologias, também os conversores isolados. O conversor Flyback, o mais conhecido desses, tem as mesmas características do conversor Buck-Boost, a diferença principal consiste na adição de um indutor bifilar como mostra a figura 29 (PINTO, 2008).

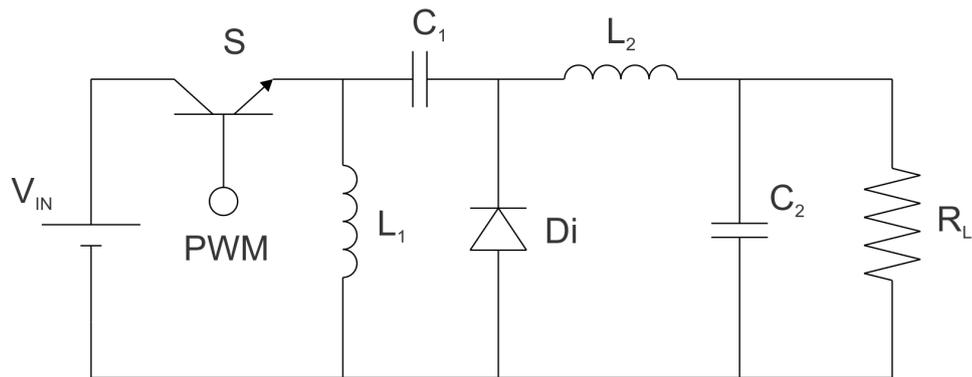


Figura 28: Conversor Zeta.

Fonte: Adaptado de Pinto (2008).

Uma das principais vantagens do uso de indutor bifilar é que o ganho de tensão pode ser atingido pela variação do número de espiras. Quando o interruptor é fechado, apenas o primário N_1 conduz, o secundário N_2 entra em condução no instante em que o interruptor é aberto (FUZATO, 2011).

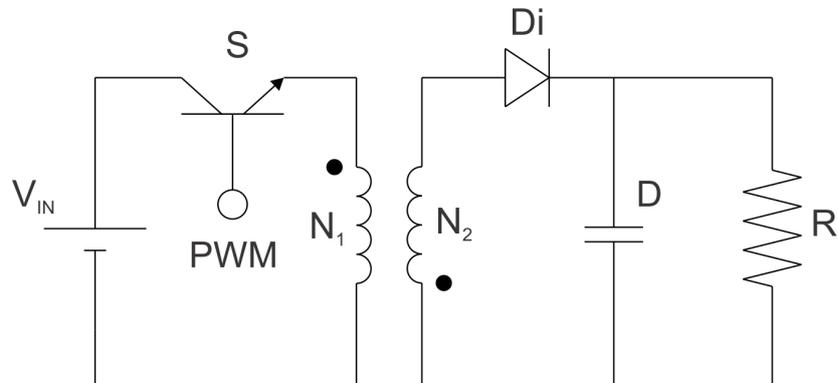


Figura 29: Conversor Flyback.

Fonte: Adaptado de Rashid (2010).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Antes da escolha do conversor para o projeto, estudou-se a respectiva carga e escolheu-se o melhor arranjo possível para realizar o projeto adequado do circuito acionador.

5.1 DEFININDO A CARGA

A intensidade luminosa emitida por uma luminária de LEDs é proporcional ao número de LEDs utilizados no sistema, desta forma, na maioria das vezes, ao invés de se utilizar um único dispositivo de alta potência capaz de entregar o fluxo luminoso desejado, é utilizado arranjos de elementos com potências menores.

Usualmente, num sistema de iluminação a LEDs, estes são conectados em série formando vetores. Os vetores podem ser conectados em paralelo formando matrizes. O problema da ligação em paralelo, é que LEDs de mesmo modelo, ainda assim, apresentam tensões diretas distintas, o que pode ocasionar diferenças de corrente entre os vetores e isso pode provocar alterações de luminosidade entre os LEDs do arranjo e também, pode provocar a redução da vida útil do sistema (matriz) (PINTO, 2008; JUNIOR, 2010).

Existem diversas técnicas segundo Sá Junior (2010) para contornar este problema o qual é capaz de fazer a equalização da corrente, como por exemplo:

- A utilização de LEDs com características semelhantes. Necessita de muitos testes, logo há elevação dos custos.
- A utilização de resistores em série com cada vetor, estes são dimensionados para que a maior diferença de potencial seja aplicado nestes, logo a variação da corrente é menor. O problema deste é a grande dissipação de energia provocada pelos resistores.
- É possível também a utilização de espelhos de corrente entre os vetores, os quais proporcionam um controle ativo. Este método, além de ter o custo elevado também provoca grandes perdas.

- Também é utilizada a alimentação dos LEDs por uma fonte de alta frequência, no qual a corrente é balanceada pela inserção de um capacitor (devido a sua impedância) em cada vetor de LEDs. O problema deste método é que obriga os LEDs a operarem com corrente muito próxima da admissível pelo dispositivo.

Para simplificação do projeto e redução de custos, será utilizada a disposição em série de apenas um vetor afim de se obter 15 W de potência total. Este tem a vantagem do controle da corrente garantir a mesma intensidade em todos os LEDs. O único inconveniente, é que, se por ventura um dos LEDs queimar, o funcionamento de todos os demais serão prejudicados. Dessa forma, teremos um dos dois arranjos mostrados na figura 30. O primeiro cogita a utilização de LEDs de 1 W e o segundo, de LEDs de 5 W.

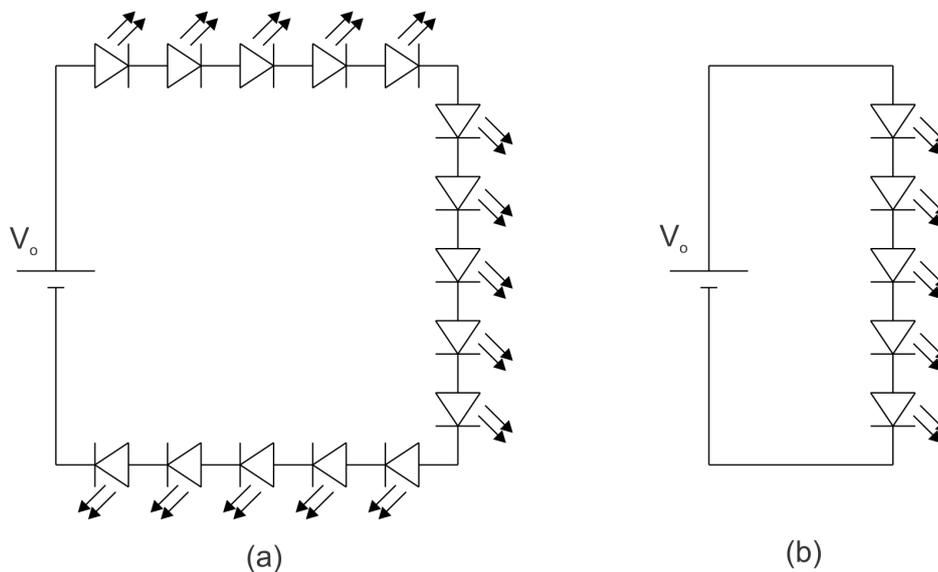


Figura 30: Arranjos em série propostos para este trabalho.

Fonte: Autoria própria.

É mais vantajoso utilizar o conversor para operar com menos corrente e mais tensão na carga. A menor corrente, implicada num indutor de menor volume, uma vez que a ondulação também acaba sendo menor e a operação de saída com maior tensão, facilita o projeto do conversor quando alimentado pela rede elétrica (PINTO, 2008), uma vez que o conversor deverá ser do tipo abaixador, logo a queda de tensão que o mesmo deverá proporcionar tem a sua razão cíclica aliviada quando a tensão de saída for a menor possível em relação a tensão da entrada. Este ponto é importante uma vez que existe uma maior dificuldade em se controlar o valor da corrente com valores baixos de razão cíclica. Por esse motivo, o primeiro arranjo (de quinze LEDs de 1W) será o escolhido.

A correção de uma possível falha de um LED no arranjo em série, pode ser feita com a introdução de Diodos para Corrente Alternada (*Diode for Alternating Current* - DIAC) em paralelo com os LEDs, formando assim grupos como mostra a figura 31, onde é representada a passagem da corrente na carga em duas diferentes situações: em (a) os LEDs estão todos funcionando normalmente, logo a corrente está sendo conduzida por eles e em (b), a passagem da corrente se dá pelo DIAC 2 pois o LED 2 encontra-se aberto (danificado).

Esta ligação permite que mesmo que um LED esteja danificado (o qual abriria o circuito), o sistema de iluminação continue operante até a substituição do LED defeituoso. A tensão de condução do LED ou do grupo de LEDs em paralelo com o DIAC deve ser inferior a tensão de disparo do mesmo (PINTO, 2008).

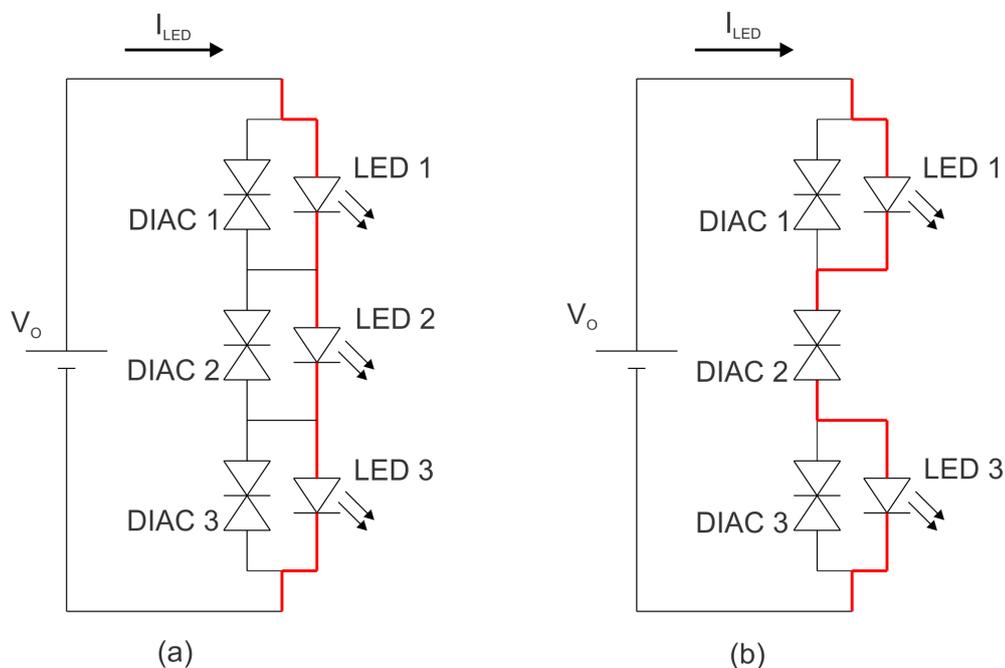


Figura 31: Utilização de DIACs no arranjo em série.

Fonte: Adaptado de Pinto (2008).

Com a carga definida, resta então escolher o conversor. Neste projeto, como já dito, pretende-se alimentar o arranjo de LEDs equivalente diretamente da rede elétrica de 127 VCA. O conversor deverá adequar esta tensão ao do arranjo de LEDs.

Os conversores mais utilizados para alimentar LEDs segundo Van der Broeck et al. (2007) são os conversores Buck, Boost, Flyback e suas modificações. Como foi mencionado, deseja-se ter um conversor do tipo abaixador, simples, compacto e de baixo custo. Os conversores do tipo Buck, Buck-Boost, Ćuk, Sepic e Zeta são capazes de fornecer uma tensão de saída inferior ao da entrada, porém, desses, o Buck é o que tem o circuito mais simples, logo este será

escolhido para este projeto a priori.

Em relação ao Flyback, este também permite que a tensão de saída seja inferior ao da entrada e teria a vantagem de ser isolado. No entanto, não é necessário essa vantagem, uma vez que o circuito permanecerá contido no interior do suporte, o circuito acionador não precisa ser isolado e a sua desvantagem é que ele possui um tamanho maior se comparado ao Buck.

5.2 PROJETO DO CONVERSOR BUCK

Basicamente, o conversor Buck como mostra a figura 32, recorta a tensão de entrada V_{IN} por uma chave S (um transistor) numa frequência fixa, mudando apenas (caso necessário) o tempo em que essa chave fica ligada ou desligada (razão cíclica). Logo, o funcionamento deste conversor se resume em duas etapas. Na primeira, a chave encontra-se fechada (conduzindo) com a fonte de entrada transferindo energia para o indutor e para o capacitor em paralelo com a carga, ou seja, a corrente do indutor I_L aumenta e quando ela se torna maior que a corrente da carga (V_{OUT}/R) o capacitor passa a receber esta energia da fonte.

No segundo instante, quando a chave é aberta, não há condução pela fonte de entrada. Porém o diodo Di passa a conduzir mantendo dessa forma a corrente pelo indutor. A energia que antes foi armazenada pelo indutor é então transferida ao capacitor e a carga. No momento que a corrente do indutor for menor que a corrente da carga, o carregamento de energia do capacitor é cessado, dessa forma, o capacitor passa a complementar essa diferença para manter a corrente constante.

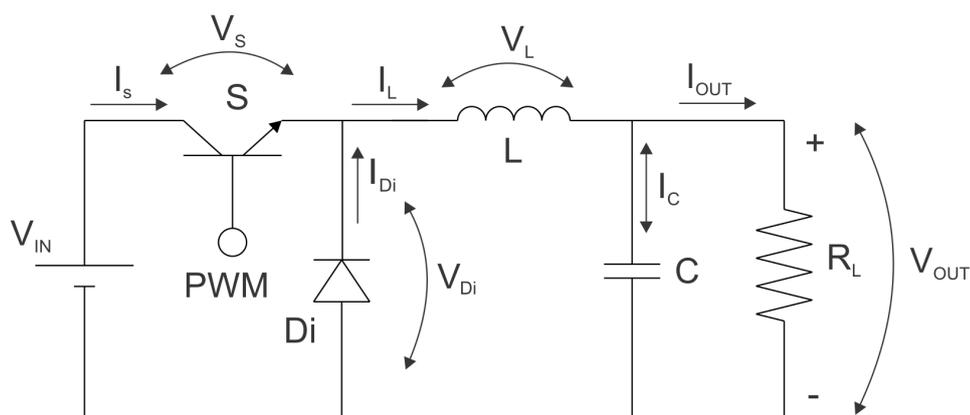


Figura 32: Conversor Buck do projeto.

Fonte: Adaptado de Rashid (2010).

Ainda, o conversor pode ser classificado de acordo com o modo de condução de corrente no indutor. Em MCD, a corrente do indutor vai a zero durante a condução do diodo (chave

aberta) e em MCC, o a corrente nunca vai a zero nesse mesmo instante. Pode ainda, operar no MCCr, que é o exato limiar entre o MCC e o MCD, onde a corrente toca o zero apenas uma vez em cada ciclo de chaveamento. Na figura 33, são apresentadas as formas de ondas observadas nos modos de condução contínua e descontínua. Para a utilização em LEDs, como a corrente influencia diretamente nas propriedades ópticas do LED, deseja-se que a fonte de alimentação, opere em MCC, para garantir a menor ondulação de corrente no indutor.

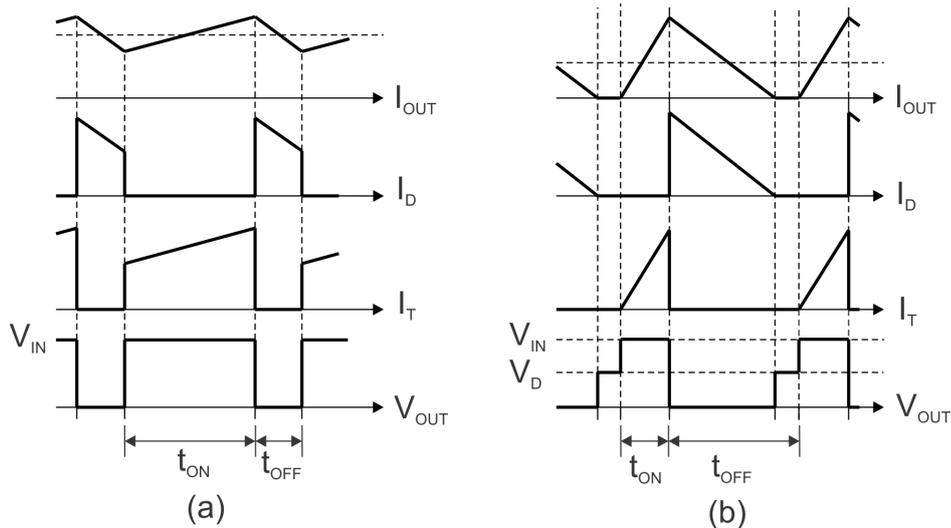


Figura 33: Formas de ondas no MCC em (a) e no MCD em (b) do conversor Buck.

Fonte: Adaptado de Pomílio (2014).

Seguindo as mesmas explicações de Pomílio (POMÍLIO, 2014), sendo a tensão média sobre um indutor igual a zero, podemos dizer então que em regime permanente teríamos uma relação de proporção entre as áreas obtidas dessa oscilação de tensão. Essas áreas são dadas pelo instante em que o transistor conduz (t_{ON}) e pelo instante em que o diodo conduz (t_{OFF}). Simplificando a forma de onda no indutor como mostra a figura 34, as áreas A_1 e A_2 em (2), onde a tensão máxima no indutor é dada pela diferença da tensão na entrada V_{IN} pela saída V_{OUT} ; e a tensão mínima é pela tensão de saída, tem-se a expressão (3), na qual é isolado o ganho estático G do conversor e obtém-se a expressão (4), que afirma que para o conversor Buck, o ganho estático é definido pela razão cíclica D , que é o tempo em que o transistor fica ligado em relação ao período do ciclo.

$$A_1 = A_2 \quad (2)$$

$$(v_i - v_o) \cdot t_{on} = v_o \cdot (T - t_{on}) \quad (3)$$

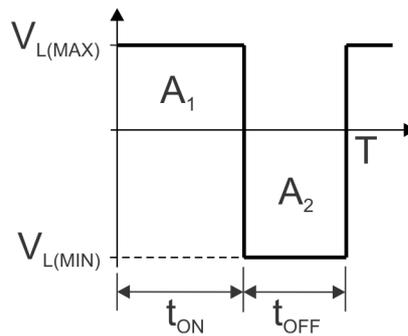


Figura 34: Relação entre as áreas (tensão no indutor) nos dois instantes.

Fonte: Adaptado de Pomílio (2014).

$$G = \frac{v_o}{v_i} = \frac{t_{on}}{T} = D \quad (4)$$

Pode-se notar então, que o ganho estático assume valores entre 0 e 1, evidenciando assim, que a tensão de saída é menor que a tensão de entrada, ou seja, tem características de um conversor do tipo abaixador de tensão.

No instante em que a chave encontra-se fechada, também podemos notar uma variação na corrente no indutor como mostra a figura 35, logo o indutor pode ser calculado conforme:

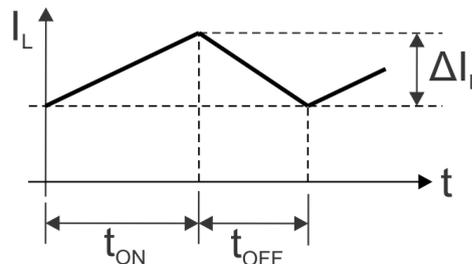


Figura 35: Variação da corrente no instante em que a chave troca de estado.

Fonte: Adaptado de Pomílio (2014).

Para encontrar o valor do indutor necessário para o projeto, pode ser aplicada a Lei das Malhas de Kirchhoff, onde obtém-se a expressão (5).

$$V_L = V_{IN} - V_{OUT} \quad (5)$$

A tensão sobre o indutor foi substituído pelo valor da indutância L multiplicado pela razão entre a variação da corrente pela variação do tempo em que a chave fica ligada (equação

básica da tensão sobre o indutor). Daí tem-se (6):

$$L \frac{\Delta I_L}{\Delta t_{on}} = V_{IN} - V_{OUT} \quad (6)$$

Porém a Δt_{on} pode ser substituída por $D.T$, tem-se então (7):

$$L \frac{\Delta I_L}{D.T} = V_{IN} - V_{OUT} \quad (7)$$

Na qual é isolado L chegando na expressão (8):

$$L = \frac{(V_{IN} - V_{OUT}) \cdot D \cdot T}{\Delta I_L} \quad (8)$$

Mas $T = \frac{1}{f}$, por fim, o indutor pode ser calculado pela expressão (9).

$$L = \frac{(V_{IN} - V_{OUT}) \cdot D}{\Delta I_L \cdot f} \quad (9)$$

Para encontrar o valor do capacitor, pode ser aplicada também a Lei das Malhas de Kirchoff, na qual obtém-se a expressão (10).

$$I_C = I_L - I_R \quad (10)$$

Na figura 36, verifica-se que a forma de onda de corrente sobre o indutor possui duas componentes. Uma componente contínua e outra alternada superposta. A parcela contínua é enviada para a carga e a parcela alternada para o capacitor. Dessa forma, a carga armazenada pelo capacitor pode ser calculado pela expressão (11).

$$Q = CV \Rightarrow \Delta Q = C\Delta V \Rightarrow C = \frac{\Delta Q}{\Delta V} \quad (11)$$

A variação da carga pode ser dada pela expressão (12):

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left(\frac{T}{2} \frac{\Delta I_L}{2} \right) = \frac{T \Delta I_L}{8} \quad (12)$$

Como $T = \frac{1}{f}$, substituindo (12) em (11), encontra-se a expressão (13).

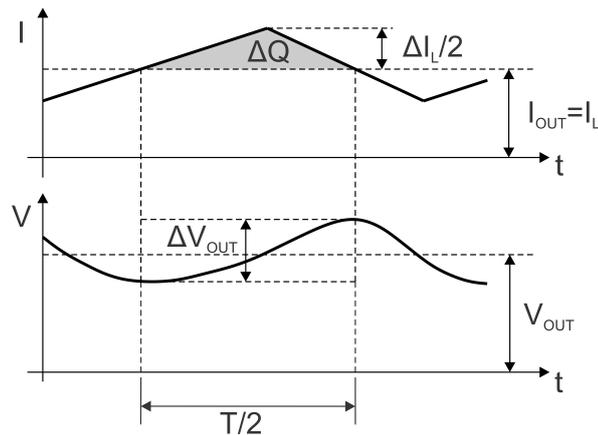


Figura 36: Variação da tensão em relação a corrente média.

Fonte: Autoria própria.

$$C = \frac{\Delta I_L}{\Delta V \cdot f \cdot 8} \quad (13)$$

5.3 CÁLCULO FÍSICO DO INDUTOR PARA O CONVERSOR BUCK

Segundo Barbi et al. (2002), o sucesso da construção de um conversor CC-CC, depende do projeto do elemento magnético. Isso posto, quando um desses elementos é submetido a altas frequências, é possível notar no circuito o aumento dos efeitos parasitas como a indutância de dispersão e capacitâncias entre os enrolamentos. Esses elementos indesejáveis refletem na maioria das vezes na forma de picos de tensões nos semicondutores, altas perdas e emissão de ruídos.

Portanto, o projeto do elemento magnético deve ser tratado com muita atenção. Para isso, é necessário fazer o uso de um núcleo magnético. O núcleo é responsável por fornecer um caminho para o fluxo magnético do enrolamento minimizando as dispersões. Os materiais mais utilizados para esse fim são as lâminas de ferro-silício e os núcleos de ferrite. Enquanto o primeiro é recomendado para baixas frequências, o segundo é utilizado em altas frequências, como nos conversores CC-CC, que na maioria das vezes operam com frequência de comutação acima de 20 kHz. A desvantagem do ferrite é que este possui baixa densidade de fluxo magnético se comparado com os de ferro-silício e baixa resistência mecânica, quebrando facilmente com choques mecânicos, mas por outro lado, são bem leves e pouco volumosos.

O projeto pretendido neste trabalho, sugere a construção do indutor utilizando núcleo de ferrite do tipo EE (padronizado) e por consequência, enrolado num carretel plástico equi-

valente. O primeiro passo para o cálculo físico do indutor é a determinação do produto $A_e A_w$ calculado pela expressão (14), que é o produto das áreas da sessão transversal do núcleo e da sessão da janela como mostra a figura 37. As explanações das equações utilizadas no cálculo físico do indutor podem ser consultadas nos dois trabalhos de Ivo Barbi (BARBI, 2001; BARBI; FONT; ALVES, 2002).

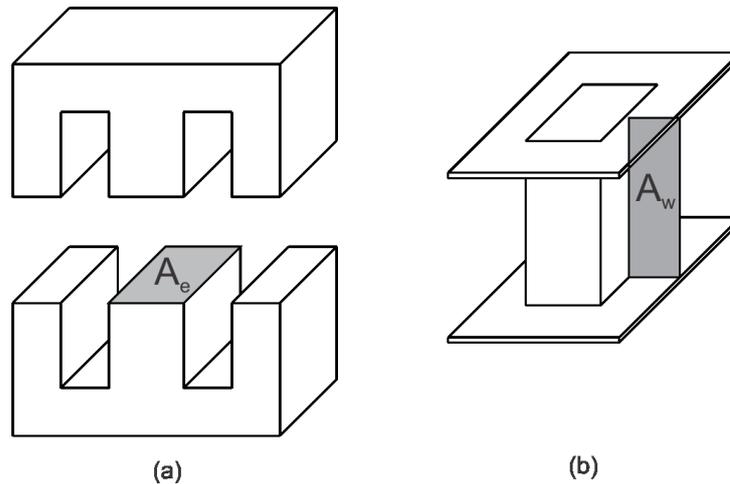


Figura 37: Núcleo do carretel do tipo E.

Fonte: Adaptado de Barbi (2001).

$$A_e \cdot A_w = \frac{L \cdot I_{pico} \cdot J_{eficaz}}{B_{max} \cdot J_{max} \cdot K_w} \cdot 10^4 \quad (14)$$

No qual B_{max} é a densidade máxima do núcleo (em núcleos de ferrite, costuma-se usar o valor de 0,3 T), J_{max} é densidade de corrente, ou seja, a capacidade de condução de corrente pela área, que depende diretamente do condutor utilizado no projeto (usualmente, admite-se o valor de 450 A/cm^2) e K_w é definido como o fator de utilização da área para o enrolamento como mostra a figura 38, ou seja, como os fios possuem uma geometria circular, espera-se que a área do carretel da bobina não seja totalmente preenchida pelo enrolamento. É comum adotar o valor de 0,7 (70% da área ocupada pelo enrolamento), o que pode variar em função da habilidade de quem confecciona o enrolamento.

Para pequenas ondulações de corrente, pode ser adotado $I_{pico} = I_{eficaz}$ (BARBI, 2001). Sendo assim, a equação para $A_e \cdot A_w$ resulta na equação (15).

$$A_e \cdot A_w = \frac{L \cdot (I_{pico})^2}{B_{max} \cdot J_{max} \cdot K_w} \cdot 10^4 \quad (15)$$

Calculado, a escolha do carretel deve ser feita optando pelo modelo logo acima do valor

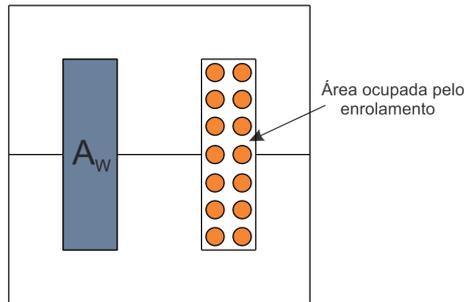


Figura 38: Ocupação dos enrolamentos da janela do carretel.

Fonte: Adaptado de Barbi et al (2002).

encontrado para $A_e \cdot A_w$, conforme sugere a tabela 8 de modelos de carretéis padrão disponíveis em fornecedores. A partir daí, as próximas equações assumem os valores de A_e e A_w do modelo de núcleo de ferro-silício escolhido.

Tabela 8: Relação e medidas dos carretéis padrão tipo E

Núcleo	$A_e(cm^2)$	$A_w(cm^2)$	$A_e \cdot A_w(cm^4)$
E-20	0,312	0,26	0,08
E-30/7	0,60	0,80	0,48
E-30/14	1,20	0,85	1,02
E-42/15	1,81	1,57	2,84
E-42/20	2,40	1,57	3,77
E-55	3,54	2,50	8,85

Fonte: Adaptado de Barbi (2001).

Tendo então um núcleo e o carretel, o próximo passo do projeto é, a partir desses, encontrar o número de espiras para o indutor já calculado. O número de espiras pode ser calculado pela equação (16) (BARBI; FONT; ALVES, 2002).

$$N = \frac{L \cdot I_{pico}}{B_{max} \cdot A_e} \cdot 10^4 \quad (16)$$

Por melhor que possa ser o material utilizado no núcleo do indutor, sempre existirá uma oposição a passagem de fluxo conhecida como relutância, e uma indutância sempre estará relacionada tanto ao número de espiras quanto à relutância total do circuito magnético. É comum, a utilização de um entreferro no núcleo, pois o entreferro aumenta a relutância do circuito, diminuindo a sua indutância.

Num circuito magnético sem entreferro, a sua indutância fica proporcional apenas a permeabilidade do núcleo, o que não é interessante, pois este parâmetro depende da tempera-

tura e do ponto de operação. Com a adição de um entreferro, consegue-se uma menor variação na indutância quando a permeabilidade do núcleo varia (BARBI; FONT; ALVES, 2002). O entreferro também é sugerido, quando pretende-se que pelo indutor passe correntes mais elevadas sem que ocorra a saturação do núcleo. Seu cálculo pode ser realizado através da equação (17).

$$l_g = \frac{N^2 \cdot u_0 \cdot A_e}{L} \cdot 10^{-2} \quad (17)$$

No qual $u_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (permeabilidade do ar) e l_g é dado em *cm*.

Para o cálculo da seção transversal do fio a ser utilizada em alta frequência, deve considerar o efeito pelicular (*skin effect*), no qual a corrente tende a migrar para a periferia do fio condutor e isso é responsável por limitar a área máxima do condutor empregado.

O cálculo da seção necessária é dependente da relação entre a corrente no enrolamento e a máxima densidade de corrente pelo mesmo como mostra a equação (18).

$$S_{fio} = \frac{I_{eficaz}}{J_{max}} \quad (18)$$

O valor da profundidade de penetração pode ser obtido pela equação (19). O condutor utilizado não deverá possuir um diâmetro superior a 2Δ .

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{f}} \quad (19)$$

É comum acontecer de o diâmetro ser superior, neste caso, se torna necessário associar outros condutores em paralelo afim de conduzir a corrente sem aquecimento dos condutores. Daí sendo, é possível obter o número de condutores necessários através da expressão (20).

$$n_{condutores} = \frac{S_{cond}}{S_{skin}} \quad (20)$$

Onde S_{skin} é a área do condutor, cujo diâmetro máximo é limitado por 2Δ .

Por fim, com os dados já obtidos, é reavaliada a possibilidade de execução, esta consiste basicamente em garantir que é possível colocar o enrolamento que foi calculado, na janela do núcleo (A_w). A janela mínima necessária pode ser calculada pela expressão (21).

$$A_{w_{min}} = \frac{N \cdot n_{condutores} \cdot S_{fio}}{K_w} \quad (21)$$

Daí então, tendo em mãos o $A_{w_{\min}}$, deve-se comparar ao A_w escolhido. A possibilidade de execução é dada quando esta relação for menor que 1 como mostra a equação (22).

$$Exec = \frac{A_{w_{\min}}}{A_{w_{nucleo}}} < 1 \quad (22)$$

Caso o resultado obtido não seja satisfatório, é necessário ajustar os parâmetros ou escolher outro núcleo.

5.4 PRIMEIRAS ESCOLHAS E RESULTADOS OBTIDOS

Para este projeto optou-se pelo arranjo de quinze LEDs em série, de 1 W cada. O LED escolhido é da empresa ZeMe CE& RoHS modelo ZM-P1W62110-J35T, de cor branco frio com temperatura de cor entre 6000 e 6500 K. Este opera com tensões entre 3,0 e 3,4 V para uma corrente de 350 mA a 25°C (ZEME, 2015).

Espera-se variações na tensão de entrada, uma vez que o circuito será ligado diretamente na rede alternada de 127 VCA, a qual pode variar entre 90 e 130 VCA. Se essa tensão for apenas retificada e inserido um filtro capacitivo, terá em sua saída, um valor entre 130 e 184 VCC.

A tensão de operação pretendida para os LEDs será de 3,2 V, logo o arranjo de 15 LEDs em série, necessitará de uma diferença de potencial de 48 V e assume o valor da tolerância dada pelo fabricante da tensão de $\pm 0,05$ V. Para a corrente, a variação admissível é de 5% , ou seja, 17,5 mA. Para a frequência de operação do PWM, é sugerido apenas que o mesmo seja utilizado em frequências acima da faixa audível (20 kHz) para que o seu ruído não seja desagradável, no entanto, será fixado o PWM operando em 100 kHz afim de reduzir ao máximo o tamanho do indutor. De forma resumida, os dados do projeto são dispostos na Tabela 9.

Tabela 9: Especificações do projeto pretendido.

Variável	Valor	Unidade
Tensão de saída	48	V
Riple de tensão	100	mV
Corrente de saída	350	mA
Riple de corrente	17,5	mA
Tensão de entrada (mínimo)	130	V
Tensão de entrada (máximo)	184	V
Frequência do PWM	100	kHz

Fonte: Autoria própria.

Para o conversor Buck e o seu respectivo indutor, os valores encontrados são mostrados nas Tabelas 10 e 11. Sendo o $A_e.A_w$ calculado em $0,275 \text{ cm}^4$, optou-se pela escolha do núcleo E-30/14 conforme a Tabela 8, o qual tem $A_e.A_w$ de $1,02 \text{ cm}^4$, ou seja, A_e de $1,20 \text{ cm}^2$ e A_w de $0,85 \text{ cm}^2$. Os demais valores foram encontrados utilizando esse A_e e A_w escolhido.

Tabela 10: Valores encontrados para o conversor Buck.

Componente/Variável	Valor	Unidade
Razão cíclica	0,260	
Indutor	20,21	mH
Capacitor	219	nF

Fonte: Autoria própria.

Tabela 11: Valores encontrados para o indutor.

Componente/Variável	Valor	Unidade
$A_e.A_w$	0,275	cm^4
N	202	espiras
l_g	0,0076	mm
S_{fio}	0,078	mm^2
$n_{condutores}$	1	

Fonte: Autoria própria.

O circuito projetado pode ser visto na figura 39. Com a mudança da posição da chave do conversor Buck evita-se a necessidade da isolação do circuito de acionamento.

A primeira etapa consiste num retificador e filtro capacitivo, o qual converte a tensão alternada da rede 127 VCA em 180 VCC. Na sequência, foi inserido um circuito Valley-Fill, que consiste num filtro passivo para melhoria do fator de potência da fonte chaveada. A alimentação do CI é provida por um curto instante ao ligar o circuito pela tensão pós retificada, depois pelo enrolamento auxiliar enrolado junto com o indutor do Buck, o qual é retificado e ajustado por um diodo zener.

O driver (PWM) foi realizado com base no CI UC3843. Como a intenção do projeto é controlar/limitar a corrente fornecida aos LEDs, este CI é capaz de promover o ajuste da largura do pulso monitorando a corrente da carga. A corrente limite é obtida através do resistor R_S , o seu cálculo é feito conforme a expressão (23) e a frequência do PWM, pela expressão (24) conforme dados do fabricante (TEXAS, 2015). Na carga, como os DIACs disponíveis possuem tensão de disparo de 28 V, os LEDs foram divididos em dois arranjos, um com oito LEDs e o outro com sete como mostra a figura 40.

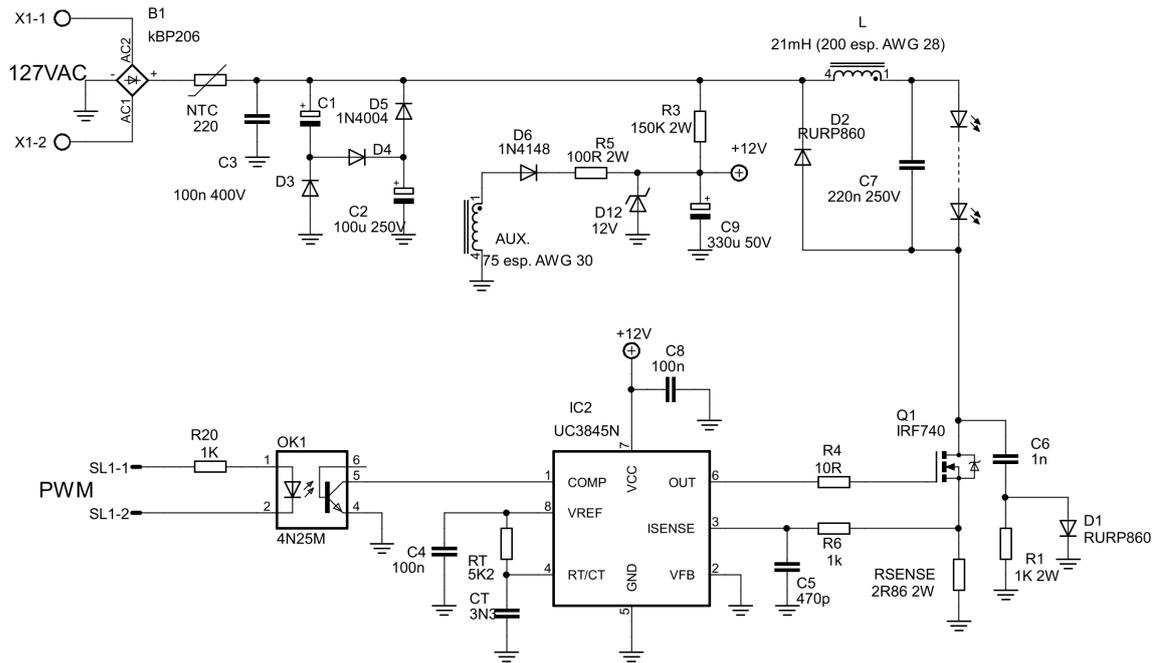


Figura 39: Circuito projetado do reator.
Fonte: Autoria própria.

$$I_{S_{\max}} = \frac{1.0V}{RS} \tag{23}$$

$$f = \frac{1.72}{R_T.C_T} \tag{24}$$

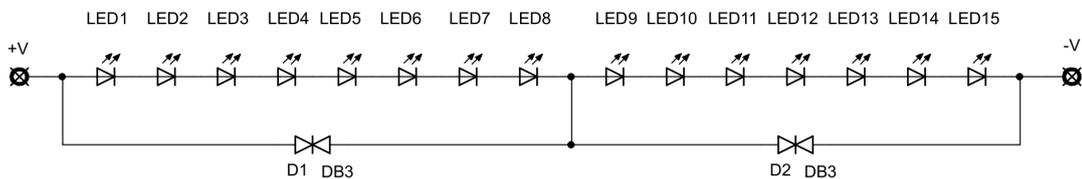


Figura 40: Disposição dos Diacs na carga.
Fonte: Autoria própria.

No pino 1 do circuito UC3843 é ligado um acoplador óptico, o qual leva o pino COMP ao terra quando acionado o LED do acoplador. Isso faz com que a saída tenha a sua alimentação ceifada nesse instante. Logo, é possível dimerizar a luminária de LED dessa forma. O circuito

PWM externo para tal, deve operar com frequências maiores que 147 Hz, pois estudos realizados comprovam que a sensibilização da retina cessa a partir desta frequência no olho humano. O que explica o fato da maioria dos sistemas a LED usarem frequência acima de 200 Hz (JUNIOR, 2010). O circuito de PWM dimerizador testado opera com frequências maiores que 3 kHz e duty cycle menor que 1. Seria recomendada a utilização de um circuito que pudesse variar o seu duty cycle entre 0,5 e 1 (50 a 100% de potência), mas para efeito de testes, foi utilizado o circuito mostrado na figura 41.

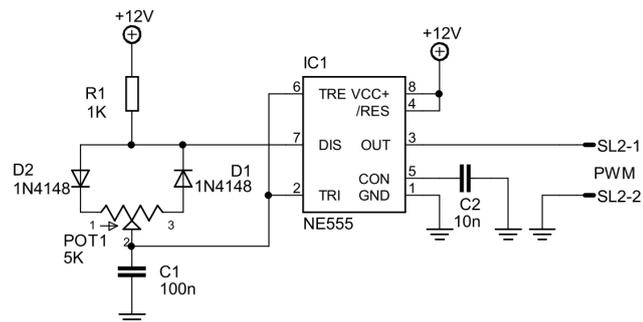


Figura 41: Circuito de dimerização.

Fonte: Autoria própria.

6 RESULTADOS

Buscou-se neste t3pico, apresentar primeiramente os resultados de simula33o, no qual foi poss33vel observar a partida e a respectiva estabiliza33o da corrente devido ao ajuste da raz33o c33clica pelo circuito PWM projetado.

6.1 SIMULA33O

Primeiramente, se calculou os coeficientes angular e linear com base na curva caracter33stica dada pelo fabricante conforme mostra a figura 42. A partir dessa curva, foi separada a regi33o mais linear, a qual 33 definida aproximadamente pelos pontos (2,8 V x 210 mA) e (3,32 V x 510 mA). Com esses, se conseguiu um coeficiente angular de 1,73 e um coeficiente linear de 2,55. Dessa forma, o modelo do LED utilizado no projeto pode ser representado como mostra a figura 43.

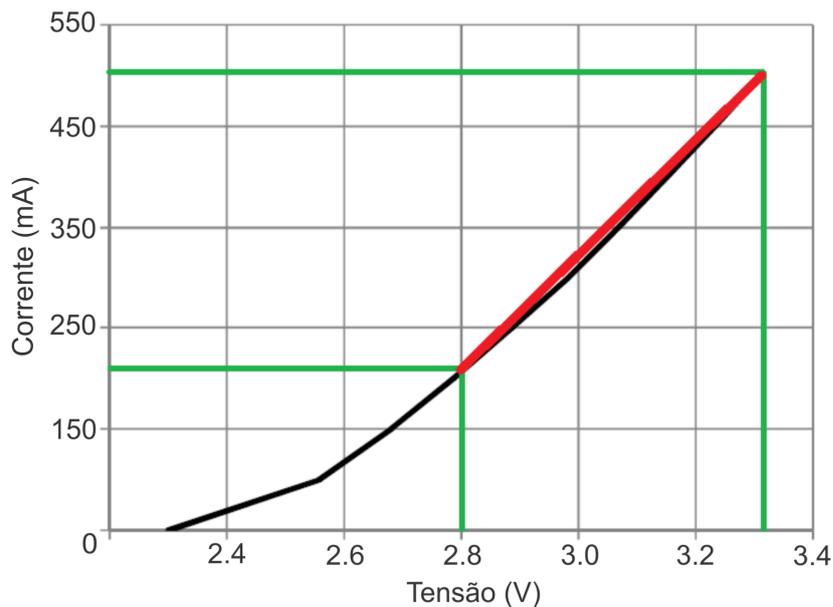


Figura 42: Curva IxV do LED dada pelo fabricante.

Fonte: ZeMe (2015).

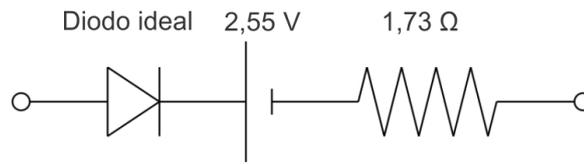


Figura 43: Modelo do LED do projeto.

Fonte: Autoria própria.

A partir desse modelo, pode-se então realizar uma prévia simulação no MatLab (Simulink) do conversor em malha fechada para análise da resposta na carga e no resistor shunt. Foi feito então a associação dos 15 LEDs da carga do projeto, sendo assim, a tensão total (coeficiente linear) assume 38,25 V e a resistência (coeficiente angular) assume 25,95 Ω. No modelo simulado, procurou-se medir a largura de pulso para avaliar o resultado com a medição posterior. O esquema montado no MatLab pode ser visto na figura 44.

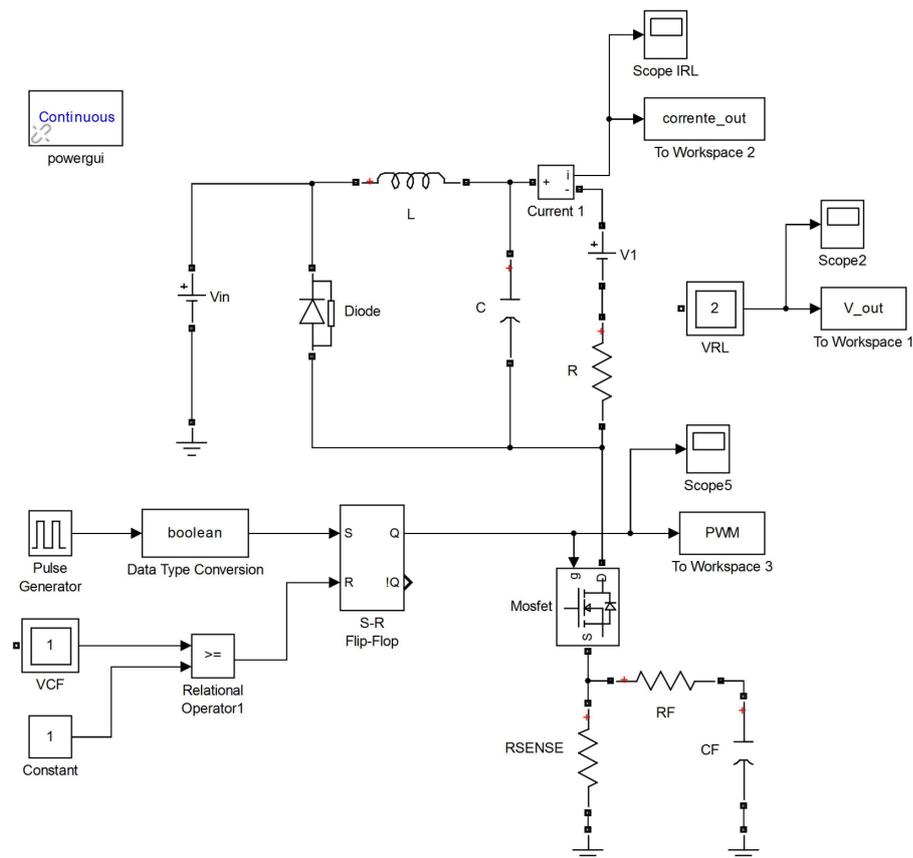


Figura 44: Circuito montado para simulação via MatLab/Simulink.

Fonte: Autoria própria.

Nesta simulação, o Pulse Generator foi configurado em 83 kHz (devido ao par R_T/C_T

disponíveis para a construção do protótipo), o RSENSE em $2,05 \Omega$ e a tensão da fonte em 116 V, sendo estes os valores da frequência, do resistor shunt e da tensão na entrada do Buck medidos no circuito montado e mostrado mais a frente nos resultados experimentais. A partir desse, obteve-se as respostas para o PWM, para a tensão e para a corrente na carga como mostra a figura 45.

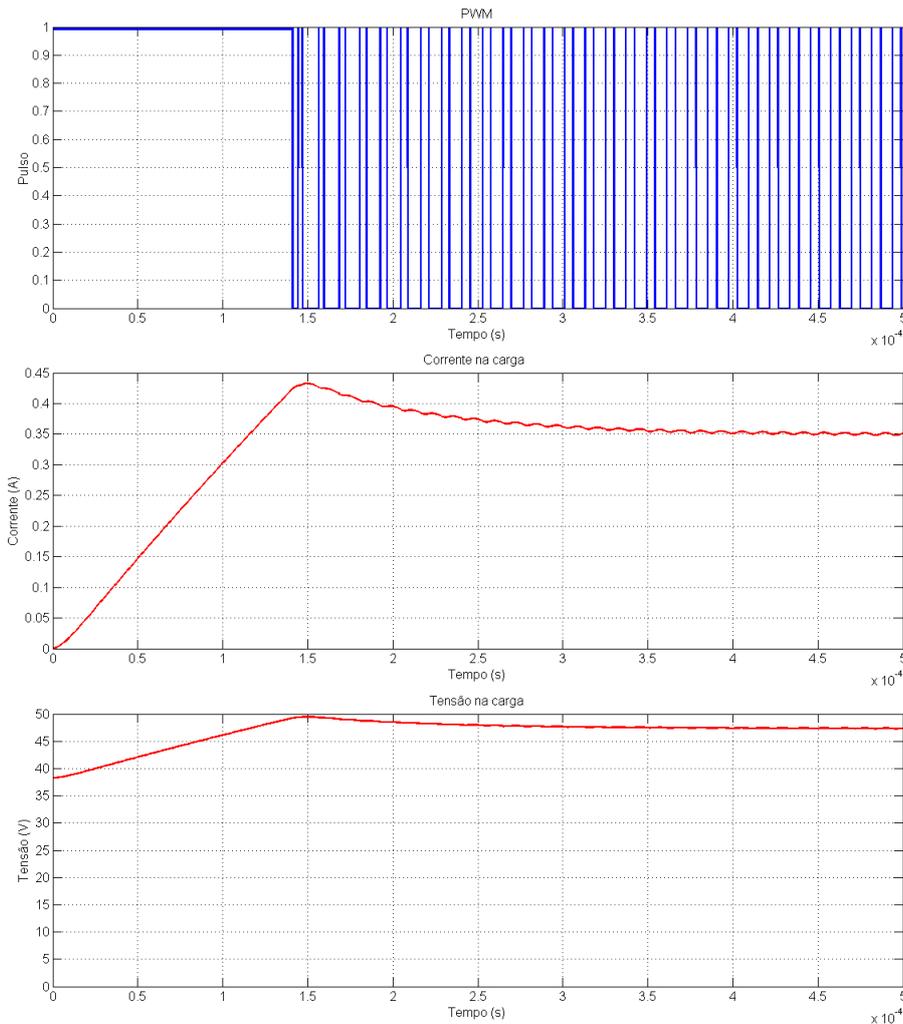


Figura 45: Simulação com 116 V na entrada do conversor Buck.

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que, ao ligar o circuito, o pulso estava em estado alto, pois o valor de corrente não havia atingido o valor limite de corrente (via resistor shunt). Assim sendo, a corrente, que inicialmente era zero, cresce até o instante que sensibiliza o sensor de corrente (aproximadamente com $140 \mu\text{s}$), no qual a nova largura de pulso começa a operar mantendo a corrente fixa em 350 mA. O que também justifica o modelo do arranjo de LEDs proposto, o qual apresentou uma tensão direta total de 38,25 V. Fica claro também neste, a baixa ondulação

de corrente e de tensão desejada pelo projeto.

Nas figuras 46 e 47, são mostradas as larguras de pulso ajustado pelo próprio circuito quando as tensões de entrada no Buck eram de 116 V e de 180 V. Essas larguras de pulso podem ser comparadas logo mais a frente nos resultados experimentais, nas quais percebe-se que na primeira, a largura de t_{on} é de $5 \mu s$ e na segunda, de $3 \mu s$. Sendo o período da frequência de 83 kHz de $12 \mu s$, seus respectivos *duty cycle* nesta faixa de tensão de entrada, ficam entre 41,6 % e 16,6 %.

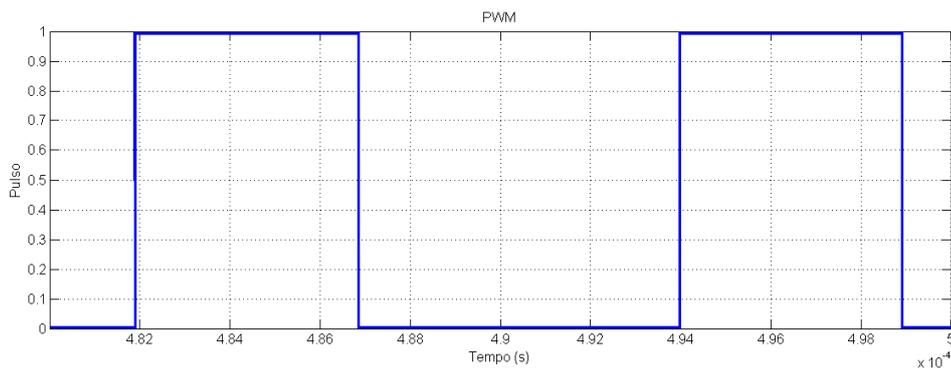


Figura 46: PWM da Simulação com 116 V na entrada do conversor Buck.

Fonte: Autoria própria.

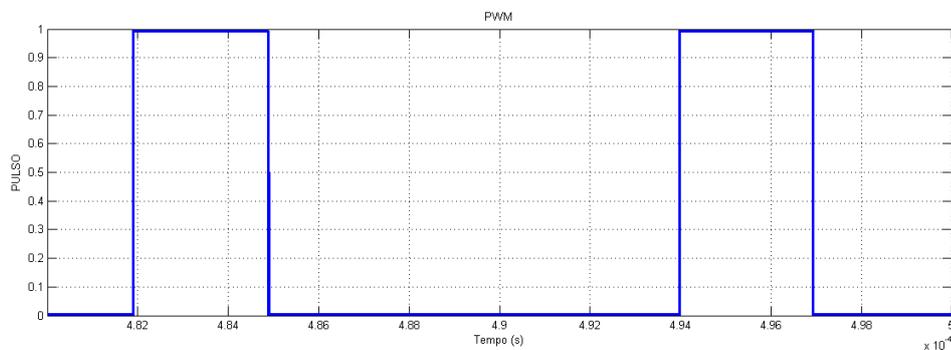


Figura 47: PWM da Simulação com 180 V na entrada do conversor Buck.

Fonte: Autoria própria.

6.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As medições realizadas no circuito montado, foram feitas utilizando um osciloscópio da Tektronix modelo TDS2002B, uma ponteira para medição de corrente da Tektronix modelo A622, uma ponte RLC portátil da Minipa modelo MX-1010, fontes variáveis de bancada da Instrutherm modelo FA-3030 e multímetro digital da Minipa modelo ET-204D.

Iniciou-se com a utilização de 3 fontes variáveis (60 V cada) ligadas em série de modo a ser possível obter uma tensão de 0 a 180 V na entrada do conversor Buck. Até os 38 V, a largura de pulso do driver PWM permaneceu praticamente com razão próximo de 1 e a corrente na carga baixa, de modo que os LEDs ainda não eram sensibilizados. Nesse instante, a largura de pulso do PWM e a forma de onda da corrente na carga pode ser visto na figura 48.

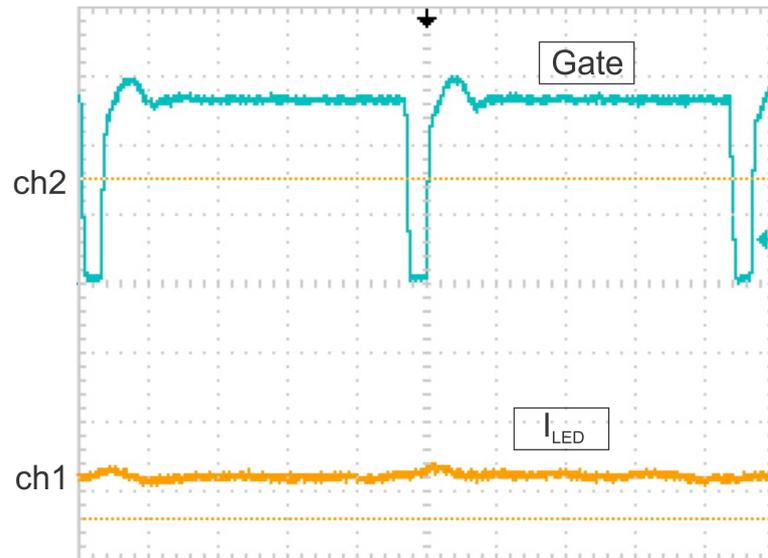


Figura 48: Largura de pulso (Ch 2) e corrente na carga (ch1) quando aplicado 38 V na entrada do Buck. Base de tempo: 2,50 us/div, Ch1: 0,50 A/div e Ch2: 5,00 V/div.

Fonte: Autoria própria.

A medida que a tensão de entrada foi sendo elevada, a largura do pulso que é aplicado no elemento chaveado foi se alterando, diminuindo assim a sua razão cíclica. Com o aumento da tensão na entrada, pode-se observar também que a variação da corrente na carga também é aumentada como podem ser vistos na figura 49.

Como a ponteira para medição de corrente disponível faz medições de até 100 kHz e espera-se harmônicos (presentes nos instantes de chaveamento) acima deste valor, a partir de um dado valor de tensão na entrada (55 V), as variações percebidas de corrente não eram mais condizentes, por isso, optou-se em medir a tensão no resistor shunt (RS), no qual é possível notar as perturbações causadas pelo efeito da comutação da chave como mostra a figura 50.

Para efeito de testes, inseriu-se também um outro resistor shunt de 3 Ω em série com a carga e mediu a sua tensão. Portanto, através da figura 51 é possível verificar a corrente real na chave e através da figura 52 verificar a corrente real na carga (grupo de LEDs). Nas quais podem ser vistas que as perturbações causadas no instante de comutação foram atenuadas com a inserção de um circuito de auxílio a comutação (snubber) junto da chave. Verifica-se que a



Figura 49: Largura de pulso (Ch 2) e corrente na carga (ch1) quando aplicado 55 V na entrada do Buck. Base de tempo: 2,50 us/div, Ch1: 0,50 A/div e Ch2: 5,00 V/div.

Fonte: Autoria própria.

corrente nos LEDs é constante, fato importante para manutenção de vida útil adequada e correta iluminação do ambiente.

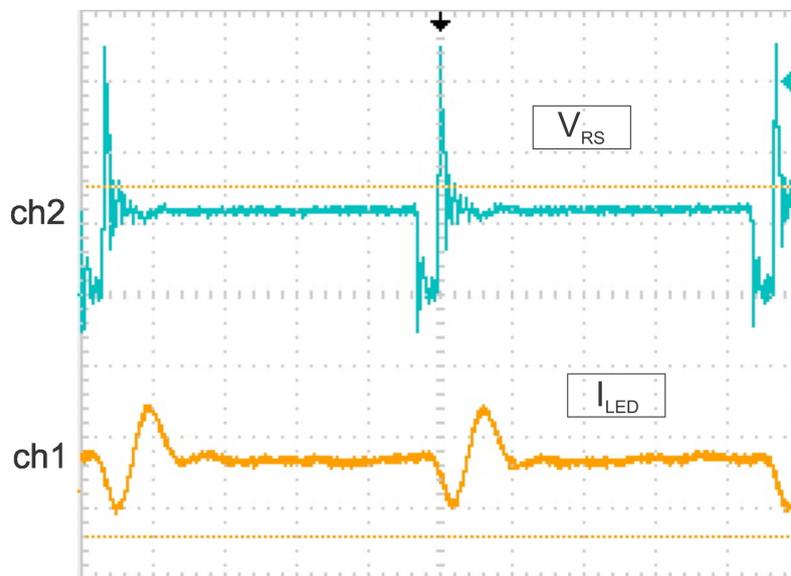


Figura 50: Tensão no resistor shunt (Ch 2) e corrente na carga (ch1) quando aplicado 55 V na entrada do Buck. Base de tempo: 2,50 us/div, Ch1: 0,50 A/div e Ch2: 1,00 V/div.

Fonte: Autoria própria.

Na sequência, a tensão de entrada foi monitorada com o auxílio do multímetro digital e foram medidas no osciloscópio a largura de pulso e as formas de ondas das tensões do circuito.

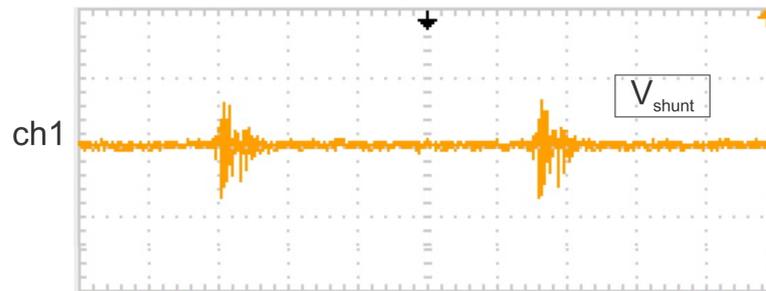


Figura 51: Tensão medida no shunt da carga sem o filtro snubber (ch1). Base de tempo: 2,50 us/div, Ch1: 500 mV/div.

Fonte: Autoria própria.

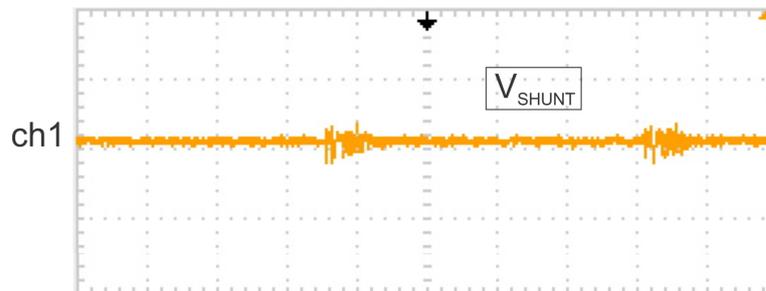


Figura 52: Tensão medida no shunt da carga com o filtro snuber (ch1). Base de tempo: 2,50 us/div, Ch1: 500 mV/div.

Fonte: Autoria própria.

Na figura 53, é mostrada a largura de pulso ajustada pelo circuito no instante em que é aplicada na entrada do conversor Buck as tensões de 81, 116, 160 e 180 V fornecidas pelas fontes em série. Na figura 54, o circuito foi alimentado direto da rede de 127 VAC.

Devido ao fato do conversor possuir baixa potência, dependendo da norma que é empregada, não é exigida a correção do fator de potência (JUNIOR, 2010). Porém, mediu-se a corrente drenada da fonte inicialmente com o filtro capacitivo apenas, após o circuito retificador, juntamente com a tensão do barramento CC como pode ser visto na figura 55. É possível notar uma alta Distorção Harmônica Total da Corrente (DHTi). Desta forma, adicionou-se uma medida corretiva para o Fator de Potência (FP) de forma passiva, através do uso do filtro *Valley-Fill* como pode ser visto na figura 56.

Na figura 57, são mostrados os pulsos PWM resultantes quando inserido o circuito de dimerização em quatro níveis diferentes (100, 50, 25 e 0% do curso do potenciômetro de ajuste). Nota-se nesse, que o sinal resultante do conversor buck com do dimerizador, é caracterizado por alguns instantes de pulso do driver do coversor Buck (T_{on} do dimerizador) e um instante de

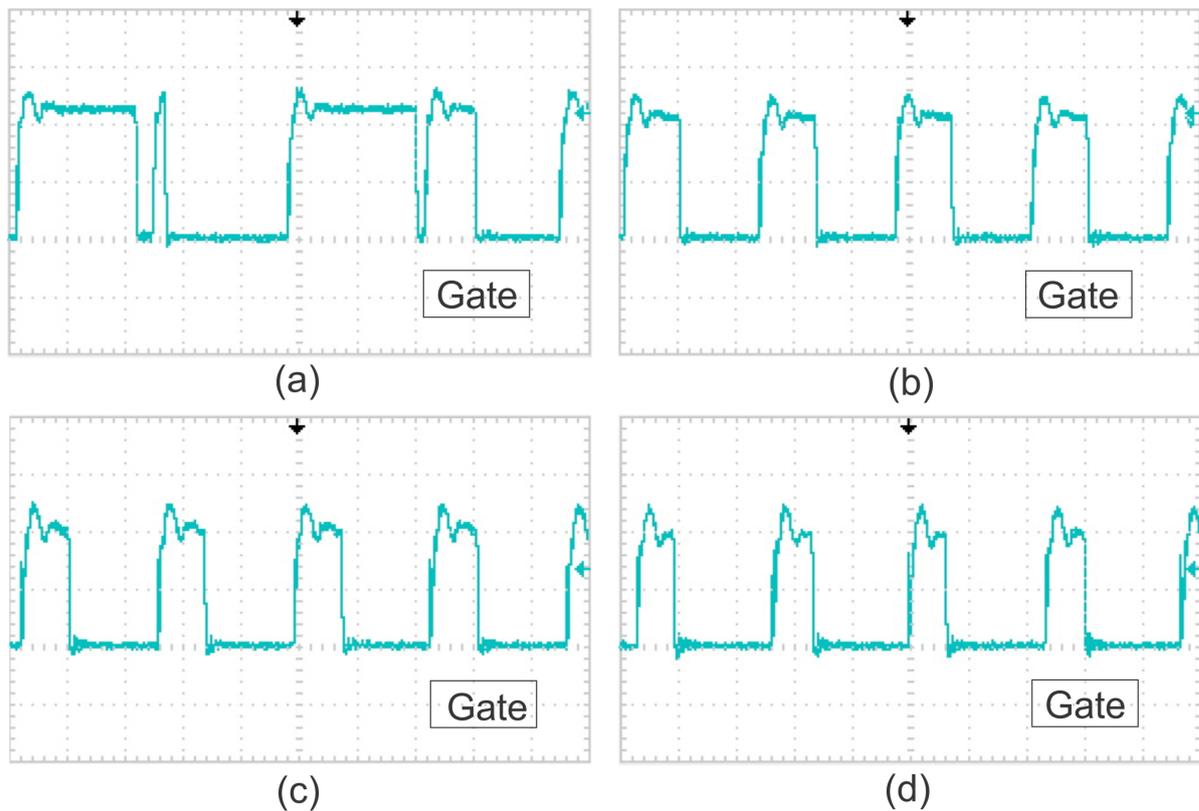


Figura 53: Largura do pulso na chave em diferentes tensões na entrada do Buck. 81 V em (a), 116 V em (b), 160 V em (c) e 180 V em (d). Base de tempo: 5,00 us/div e Ch2: 5,00 V/div.

Fonte: Autoria própria.

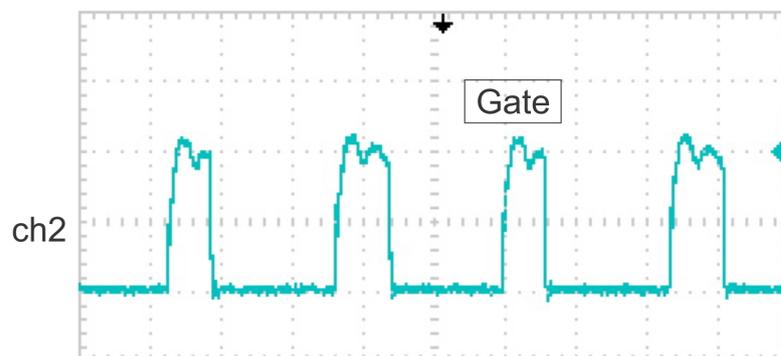


Figura 54: PWM com circuito ligado a rede de 127 VAC. Base de tempo: 5,00 us/div e Ch2: 1,00 V/div.

Fonte: Autoria própria.

pausa (t_{off} do dimerizador). Por fim, na figura 58, é mostrado o circuito montado, assim como o arranjo de LEDs disposto num dissipador de calor e a figura 59, o reator desenvolvido em funcionamento.

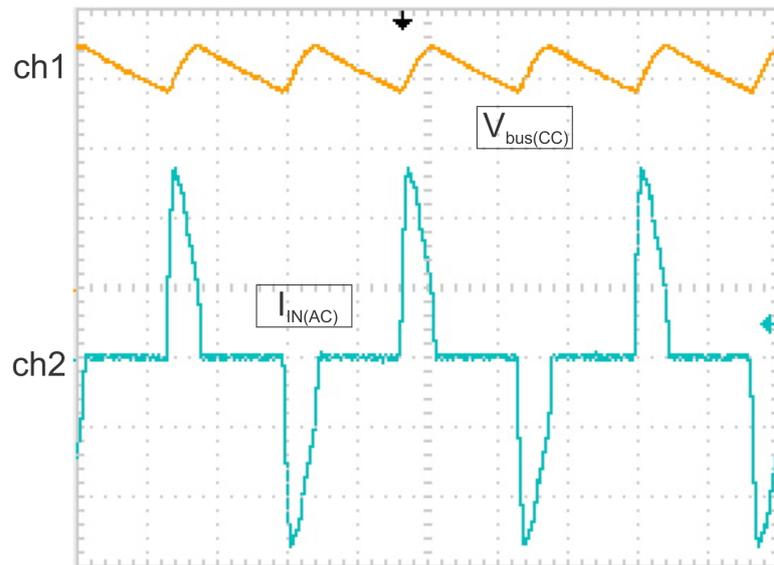


Figura 55: Tensão (ch1) apenas com o filtro capacitivo após a retificação e corrente (Ch2) de entrada. Base de tempo: 5,00 ms/div, Ch1: 50 V/div e Ch2: 1,00 A/div.

Fonte: Autoria própria.

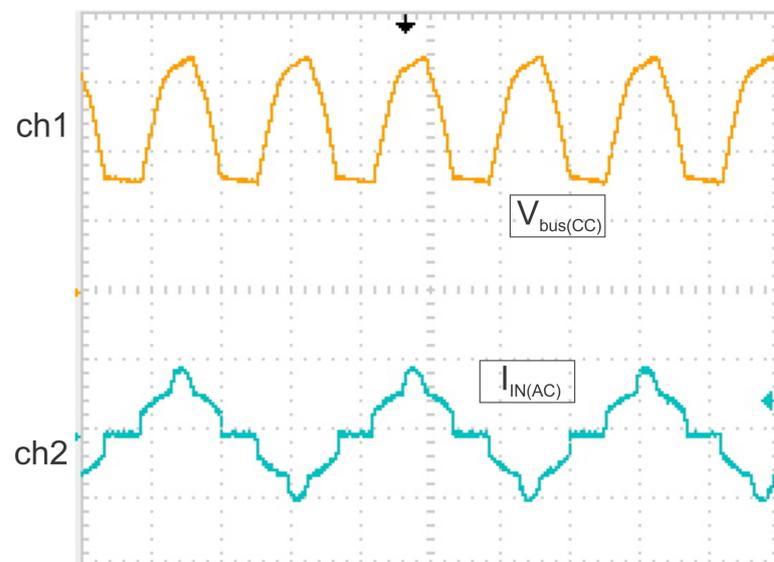


Figura 56: Tensão após a retificação (ch1) e corrente (Ch2) de entrada com o filtro Valley-Fill. Base de tempo: 5,00 ms/div, Ch1: 50 V/div e Ch2: 1,00 A/div.

Fonte: Autoria própria.

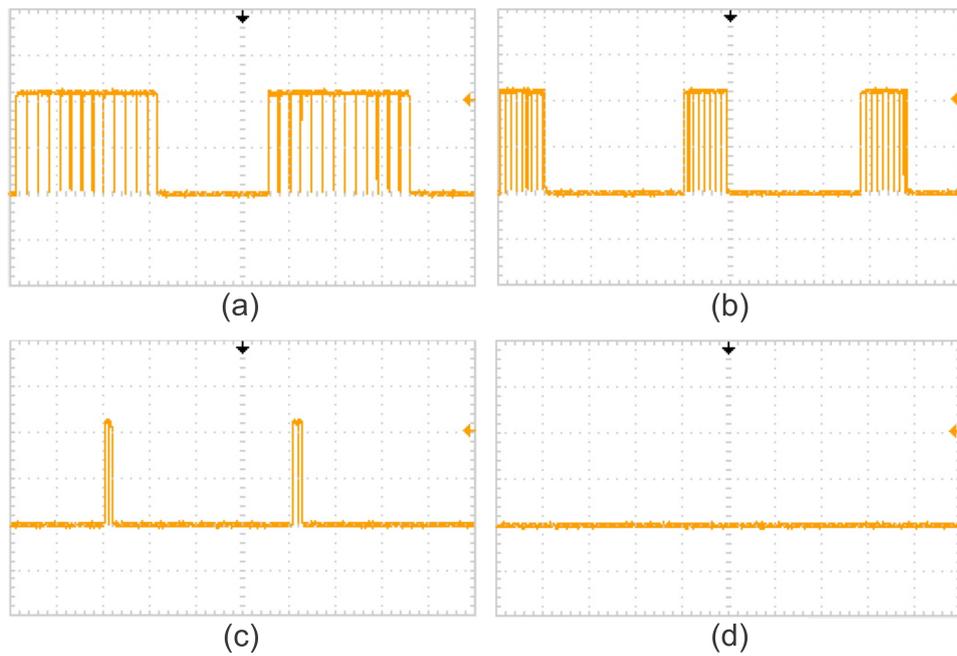


Figura 57: Modulação resultante de quatro diferentes ajustes de dimerização. Em (a) com o potenciômetro de ajuste à 100%, em (b) à 50%, em (c) à 25% e em (d) à 0% do seu curso. Base de tempo: 50 us/div e Ch1: 5 V/div.

Fonte: Autoria própria.

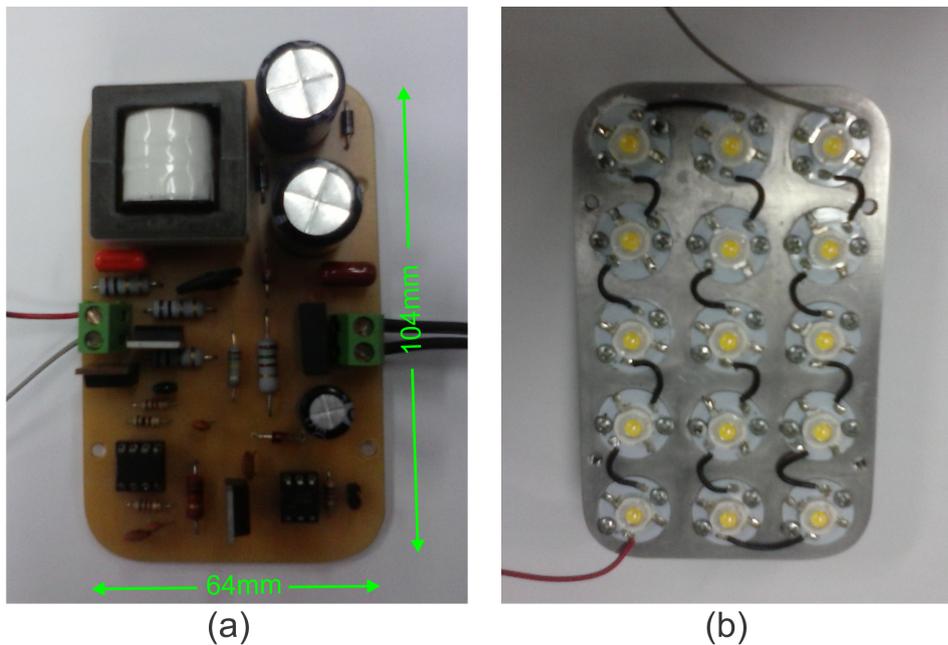


Figura 58: Circuito montado: em (a) placa de circuito e em (b) arranjo de LEDs montados no dissipador de calor.

Fonte: Autoria própria.

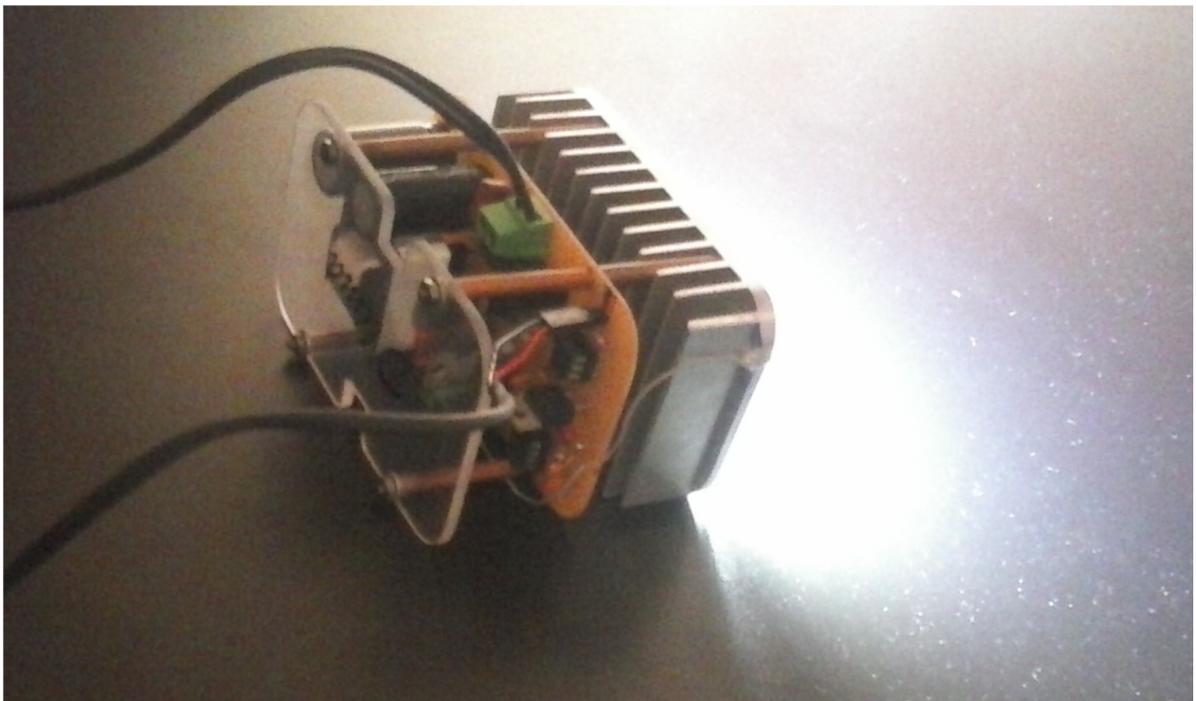


Figura 59: Circuito desenvolvido em funcionamento.

Fonte: Autoria própria.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a proposta de um reator eletrônico baseado em uma topologia básica de conversor CC-CC para ser utilizado na alimentação de sistemas de iluminação à LEDs de potência. A importância de se estudar novas estruturas de reatores para esta aplicação se deve ao fato de o consumo de energia devido à iluminação artificial ocupar uma importância significativa. Ao mesmo tempo em que se estuda as técnicas de alimentação de LEDs, como controle de corrente e temperatura, também se estimula a substituição das lâmpadas incandescentes e fluorescentes pelas lâmpadas de LED.

O LED é caracterizado por possuir elevada vida útil se mantido em condições nominais de temperatura, corrente e tensão. O circuito eletrônico do reator se torna o crivo para esse uso prolongado, principalmente pela utilização de capacitores eletrolíticos, que possuem vida útil fortemente inferior à dos LEDs. Logo, o projeto de reatores deve ser cuidadosamente desenvolvido preferindo a não utilização desses capacitores sempre que possível.

Para tal controle, deseja-se alimentar os LEDs como fonte de corrente, o qual também possui uma realimentação monitorando a corrente limite, pois os LEDs possuem uma resistência série intrínseca que altera o seu valor conforme a temperatura aumenta durante o seu uso. Neste trabalho, optou-se pelo conversor de topologia Buck por ser simples e possuir baixo custo. O driver de PWM escolhido, foi projetado com base no circuito integrado UC3845, pois este possui uma entrada que monitora a corrente configurada através de um sensor shunt. O mesmo possui um PWM fixo que tem sua razão cíclica alterada por este sensor de corrente (shunt) quando o mesmo é sensibilizado pela corrente máxima.

O conversor Buck com um driver monitorando a corrente se mostrou adequado quando opera com cargas de baixa potência. Porém, foi observada, a necessidade de uma partida suave. A priori, esta partida foi suavizada por um termistor, no entanto, a sua nova partida após desligamento, deve aguardar o resfriamento do termistor.

Finalmente, a obtenção de corrente contínua nos LEDs é premissa para maior vida útil e qualidade do sistema de iluminação.

REFERÊNCIAS

- ABILUX. **Cronograma do banimento das lâmpadas incandescentes de uso geral**. 2010. Disponível em: <<http://www.abilux.com.br/portal/>>. Acesso em: 13 de julho de 2015.
- ALMEIDA, P. S. **Reatores eletrônicos baseados numa topologia de inversor não ressonante de chave única: Aplicação em iluminação fluorescente tubular**. 2010. Monografia (Graduação). Universidade Federal de Juiz de Fora, MG.
- ALMEIDA, R. J. S. **Influência da iluminação artificial nos ambientes de produção: uma análise econômica**. 2003. Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto, MG.
- AMBIENSYS. **O lucrativo filão de reciclar lâmpadas**. 2007. Disponível em: <http://www.bulbox.com.br/news_02_03_07.html>. Acesso em: 21 de março de 2015.
- ASSIST. **Alliance for Solid-State Illumination System and Technologies. How to select residential LED directional light**. 2. ed. [S.l.]: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 2007.
- BARBI, I. **Eletrônica de potência: Projeto de fontes chaveadas**. [S.l.: s.n.], 2001.
- BARBI, I.; FONT, C. H. I.; ALVES, R. L. **Projeto físico de indutores e transformadores**. Março 2002. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC.
- BASTOS, F. C. **Análise da política de banimento de lâmpadas incandescentes no mercado brasileiro**. Dissertação (Mestrado) — UFRJ/COPPE, 2011.
- BENEVIDES, A. B. Y.; BORTOLOSSO, C.; OLIVEIRA, M. B. **Diodos emissores de luz (LEDs)**. julho 2010. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BERNITZ, F.; SCHALLMOSER, O.; SOWA, W. Advanced electronic driver for power leds with integrated colour management. **Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference, 41th IAS annual Meeting, Florida, USA**, v. 2604-2607, October 2006.
- BOWERS, B. Historical review of artificial light sources. **IEEE Proceedings**, v. 127, n. 3, april 1980.
- BULLOUGH, J. D. **Lighting answers: LED Lighting Systems**. 3. ed. [S.l.]: National Lighting Product Information Program, Lighting Research, Rensselaer Polytechnic Institute, 2003.
- CERVI, M. **Rede de Iluminação Semicondutora para Aplicação Automotiva**. Dissertação (Mestrado) — Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Maria, 2005.
- CERVI, M. et al. A semiconductor lighting system controlled through a lin network for automotive application. In: . [S.l.]: Conference Records of Industry Applications Society Annual Meeting, 2005a. v. 3, p. 1603–1608.
- COPEL. **Taxas e Tarifas (B1 - Residencial)**. 2015. Disponível em: <<http://www.copel.com>>.

- COSTA, G. J. C. **Iluminação econômica: cálculo e avaliação**. [S.l.]: EDIPUCRS, 2005. 561 p.
- COSTA, M. A. D. **Reator eletrônico auto-oscilante com alto fator de potência para alimentação de quatro lâmpadas fluorescentes independentes**. Dissertação (e) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004b.
- CREDER, H. **Instalações Elétricas**. 13. ed. [S.l.]: Editora LTC, 1995.
- DEMIAN, J. A. E. **Proposta de reatores eletrônicos para iluminação com alto desempenho**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- EMPALUX. **Luminotécnica**. 2015. Disponível em: <<http://www.empalux.com.br/?a1=1>>. Acesso em: 19 de março de 2015.
- FAIRCHILD. **KA317/LM317-3- Terminal Positive Adjustable Regulator**. September 2014. Fairchild Semiconductor Corporation.
- FUZATO, G. H. F. **Desenvolvimento de um conversor Flyback aplicado a um atuador piezoelétrico**. Dezembro 2011. Universidade de São Paulo, São Carlos.
- HARRIS, J. B. Electric lamps, past and present. **IEEE Engineering Science and Education Journal**, p. 161–170, agosto 1993.
- HARRIS, T. **How Fluorescent Lamps Work**. 2015. Disponível em: <<http://home.howstuffworks.com/fluorescent-lamp2.htm>>. Acesso em: 21 de março de 2015.
- INMETRO. **Programa Brasileiro de Etiquetagem: Selos de eficiência energética**. 2014. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbeselo.asp>>. Acesso em: 10 de julho de 2014.
- JUNIOR, A. E. D. **Proposta de reatores eletrônicos para iluminação com alto desempenho**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2008.
- JUNIOR, E. M. S. **Estudo das estruturas de reatores eletrônicos para LEDs de iluminação**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- JUNIOR, W. A. D.; WINDÖLLER, C. C. A questão do mercúrio em lâmpadas fluorescentes. **Química Nova na Escola**, n. 28, maio 2008.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. São Paulo. [S.l.]: PW Editores, 1997.
- LIM, K. et al. Illumination and color management in solid state lighting. **Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference, 41th IAS annual Meeting, 41th IAS annual Meeting, Florida, USA**, p. 2616–2620, October 2006.
- LUXSIDE. **Índice de Reprodução de Cor IRC**. 2013. Disponível em: <<http://www.luxside.com.br/blog/irc-indice-de-reproducao-de-cor-da-lampada/>>. Acesso em: 10 de março de 2015.
- MARQUES, A. E. B.; JUNIOR, S. C.; CRUZ, E. C. A. **Dispositivos semicondutores: diodos e transistores**. [S.l.]: Érica Ltda, 2001.

- MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power Electronics: Converters, Applications, and Design**. 3. ed. [S.l.]: John Wiley, 2002.
- MOREIRA, V. A. **Iluminação Elétrica**. 1999. Edgard Blucher, São Paulo.
- MOURAO, R. F.; SEO, E. S. M. Logística reversa de lâmpadas fluorescentes. **InterfacEHS Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 7, n. 3, 2012.
- NETO, E. P. **Cor e Iluminação nos Ambientes de Trabalho**. [S.l.]: São Paulo. Livraria Ciência e Tecnologia Editora, 1980.
- PINTO, R. A. **Projeto e Implementação de lâmpadas para Iluminação de Interiores Empregando Diodos Emissores de Luz (LEDs)**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2008.
- POMÍLIO, J. A. **Fontes chaveadas Cap. 1: Topologias básicas de conversores CC-CC não isolados**. Janeiro 2014. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/fontchav.html>>.
- RANGEL, G. M.; SILVA, P. B.; GUEDE, J. R. A. **LED- Iluminação de estado sólido**. 2009. XIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Americano de Pós-Graduação Universidade do Vale do Paraíba.
- RASHID, M. **Power Electronics Handbook**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2010.
- RESENDE, S. M. **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**. 2. ed. [S.l.]: Livraria da Física, So Paulo, 2004.
- RODRIGUES, P. **Manual da iluminação eficiente**. 1. ed. [S.l.]: PROCEL, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, 2002.
- RODRIGUES, W.; MORAIS, L. **Análise comparativa dos métodos de dimerização de LEDs de potência**. setembro 2012. Sistemas de iluminação. Capítulo IX. Edição 80.
- SCHUBERT, E. F. **Light-Emitting Diodes**. 2. ed. [S.l.]: Cambridge, 2006.
- SCOPACASA, V. A. Introdução à tecnologia de led. **Revista LA PRO, São Paulo**, p. 5–10, 2008.
- SEIDEL, A. R. **Técnicas de projeto para o reator eletrônico auto-oscilante empregando ferramentas de controle**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2004.
- SILVA, C. G. M. **Diagnóstico sobre a utilização de lâmpadas fluorescentes compactas promotoras de eficiência energética nos sistemas de iluminação do Brasil**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2008b.
- SILVA, L. L. A. **Marketing e produtos sustentáveis: Estudo de caso Philips**. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade de São Paulo, 2008.
- SILVA, M. L. **Luz, lâmpadas e iluminação**. [S.l.]: Porto Alegre: Gráfica e Editora Palloti, 2002.

STEIGERWALD, D. S. et al. Illumination with solid state lighting technology. **IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 8, p. 310–320, March/April 2002.

TEXAS, I. **UC3845 Current-Mode PWM Controller**. 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/product/uc3845>>. Acesso em: 10 de março de 2015.

ZEME. **China Dream Optoelectronic Technology Co., Ltd.** 2015. Disponível em: <<http://www.chinadreamled.com/en/index.asp>>. Acesso em: 10 de março de 2015.

ZUKAUSKAS, A.; SHUR, M. S.; CASKA, R. **Introduction to Solid-State Light**. 1. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2002.