

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

AMERSON ANDRÉ DAPPER

**ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE COMUNICAÇÃO E
PARAMETRIZAÇÃO DE LUMINÁRIAS INTELIGENTES
PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ERECHIM - RS
2021**

AMERSON ANDRÉ DAPPER

**ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE COMUNICAÇÃO E
PARAMETRIZAÇÃO DE LUMINÁRIAS INTELIGENTES
PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.

Orientador: Prof. Cássio Luciano Baratieri

AMERSON ANDRÉ DAPPER

**ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE COMUNICAÇÃO E
PARAMETRIZAÇÃO DE LUMINÁRIAS INTELIGENTES
PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica como requi-
sito parcial à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Elétrica, Departamento de
Engenharias e Ciência da Computação da
Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.**

Erechim, 15 de dezembro de 2021.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri (Orientador)
URI Erechim



Prof.^a Ma. Camila Sampaio dos Reis (Examinadora)
URI Erechim



Prof. Me. Clemerson Alberi Pedroso (Examinador)
URI Erechim

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade e força espiritual, por iluminar minha mente em momentos difíceis, além da coragem e força para seguir, mesmo quando tudo parecia perdido.

À minha namorada Tauana Magda Fernandes, por todo apoio, amor, companheirismo e compreensão nestes anos, principalmente nos momentos de ausência.

À minha avó, que com sua partida trouxe reflexão sobre a vida, que aliada à bravura e ao amor ensinado conduziu toda força de vontade e determinação alcançada.

À minha família, em especial pais e irmãos, que mesmo nos momentos mais difíceis não abandonaram e me mantiveram motivado, oferecendo aporte e sustentação para aliviar o peso da Graduação.

Aos companheiros Diana de Bastos, Fabiola Facioli Carbonera, Fernando Carbonera e Magda Tebaldi, por permitirem evoluir juntos e por me ensinarem, cada um da sua maneira, a enfrentar os desafios diários.

Aos colegas Cezar Tonin Jr., Jean Brondani, Junior Vendruscolo, Lucas Serrano e Marcos Zortea, que de todas maneiras ajudaram a alavancar o nível didático e intelectual, alcançado com muito empenho.

Ao orientador Cássio Luciano Baratieri, pelos ensinamentos, conselhos, preocupação, disposição e incentivo nos momentos mais complicados.

A todos professores e funcionários da Instituição, pela maneira respeitosa e pela dedicação demonstrada, principalmente em debates e cursos que elevaram e fomentaram a busca pelo saber.

*Pedras no caminho? Eu guardo todas. Um dia
vou construir um castelo...*

(Nemo Nox)

RESUMO

O crescimento das pesquisas sobre energias utilizadas de maneira inteligente tem propiciado diversas ações e aplicações práticas. Uma destas formas tem como objetivo parametrizar um sistema público de iluminação. Neste modo de análise, o trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de luminárias inteligentes com a finalidade de instalação em ambientes públicos, bem como sua comunicação e acionamento automáticos, trazendo segurança e comodidade. Sintetizando, destacou-se a evolução da iluminação em termos de instalação, utilização e performance de LED (*Light Emitting Diode*), integrando sistemas e soluções. Para esta finalidade, revisões de literatura tornam-se fundamentais para avanço de novas ferramentas, como uma fonte de corrente ajustável, direcionada especialmente ao nível de luminância desejada em determinado local, assim como sua comunicação, fácil e remota, trazendo conforto e agilidade ao usuário. Respeitando as normas vigentes brasileiras, bem como suas instituições técnicas, estipulou-se um produto eletrônico variável, buscando atender um mercado consumidor exigente e com muito acesso à informação. Projetado e simulado nos *softwares* PSIM, MATLAB e Autodesk EAGLE e implementado em bancada, aplicou-se um sistema de controle em malha aberta para um conversor *Buck*, com possibilidade de aplicação em malha fechada, a partir de um controlador proporcional-integral (PI). Em vista dos resultados, constata-se que o controle da corrente de saída torna-se viável, satisfazendo aplicação prática e futuro equipamento comercial.

Palavras-chave: LED. Solução. Controle. Buck.

ABSTRACT

The growth of research on energies used intelligently has provided several actions and practical applications. One way aims to parameterize a public lighting system. In this mode of analysis, the work proposes the development of a system of intelligent lighting fixtures for installation in public environments, as well as their automatic communication and activation, bringing safety and convenience. In short, the evolution of lighting in terms of installation, use and performance of LEDs (Light Emitting Diode) stood out, integrating systems and solutions. Therefore, literature reviews become fundamental for the advancement of new tools, such as an adjustable current source, especially directed to the desired luminance level in a specific area, as well as its easy and remote communication, bringing comfort and agility to the user. Respecting current Brazilian standards, as well as its technical institutions, a variable electronic product was stipulated, seeking to serve a demanding consumer market with a lot of access to information. Designed and simulated in PSIM, MATLAB and Autodesk EAGLE software and implemented on a bench, an open-loop control system applied to a Buck converter, with the possibility of application in closed-loop, from an proportional-integral (PI) controller. In view of the results, it appears that the control of the output current becomes viable, satisfying practical application and future commercial equipment.

Keywords: LED. Solution. Control. Buck.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de fluxo luminoso.	20
Figura 2 – Exemplo de iluminância.	21
Figura 3 – Etiqueta para identificação de parâmetros luminosos.	23
Figura 4 – Exemplo de formação de ondas eletromagnéticas.	23
Figura 5 – Amplitude e comprimento de onda.	24
Figura 6 – Exemplo do experimento de Thomson, século XIX.	24
Figura 7 – Exemplo de referência LED.	25
Figura 8 – Índice de reprodução de cor com TCC 2700K.	25
Figura 9 – Índice de reprodução de cor com comparação entre fontes.	26
Figura 10 – Curva de saída do ponto de luz.	26
Figura 11 – Arquivos do tipo .IES representados na simulação.	27
Figura 12 – Espectro visível do olho humano.	27
Figura 13 – Conceito breve de localização.	27
Figura 14 – Transição mesópica.	28
Figura 15 – Liberação de um fóton.	33
Figura 16 – Esquema básico de funcionamento do LED.	33
Figura 17 – Conversor CC-CC básico.	35
Figura 18 – Conversor CC-CC <i>Buck</i>	36
Figura 19 – Forma de onda do conversor CC-CC <i>Buck</i>	36
Figura 20 – Conversor CC-CC <i>Boost</i>	37
Figura 21 – Forma de onda do conversor CC-CC <i>Boost</i>	37
Figura 22 – Forma de onda do conversor CC-CC <i>Buck-Boost</i>	38
Figura 23 – Forma de onda do conversor CC-CC <i>Buck-Boost</i>	38
Figura 24 – Fluxograma de trabalho.	39
Figura 25 – Modelo conversor <i>Buck</i>	40
Figura 26 – Etapa 1 de condução do conversor <i>Buck</i>	41
Figura 27 – Etapa 2 de condução do conversor <i>Buck</i>	42
Figura 28 – Razão cíclica do conversor <i>Buck</i>	43
Figura 29 – Principais formas de onda do conversor <i>Buck</i>	43
Figura 30 – Principais formas de onda do indutor do conversor <i>Buck</i>	44
Figura 31 – Principais formas de onda do capacitor do conversor <i>Buck</i>	45
Figura 32 – Principais formas de onda média e eficaz da chave S do conversor <i>Buck</i>	46
Figura 33 – Controle em Malha Aberta do conversor <i>Buck</i>	48
Figura 34 – Diagrama de blocos do controle em Malha Aberta do conversor <i>Buck</i>	49
Figura 35 – Diagrama de blocos do controle em Malha Fechada do conversor <i>Buck</i>	49
Figura 36 – Operação com malha na saída do conversor.	50
Figura 37 – Parâmetros <i>MATLAB</i>	50
Figura 38 – Controle em Malha Fechada do conversor <i>Buck</i>	51
Figura 39 – Implementação da discretização do controlador.	52

Figura 40 – Parametrização inicial <i>software</i> PIC C COMPILER.....	54
Figura 41 – Ligação Arduino/ESP.....	55
Figura 42 – Logo utilizada na simulação.....	55
Figura 43 – Simulação computacional do conversor <i>Buck</i> utilizando <i>software</i> PSIM.....	56
Figura 44 – Implementação prática.....	57
Figura 45 – Forma de onda da corrente de saída I_o igual à corrente média no indutor L (Simulado).	59
Figura 46 – Forma de onda da tensão de saída V_o igual à tensão no indutor L (Simulado).	59
Figura 47 – Tensão e corrente de saída prático parcial.....	60
Figura 48 – Tensão e corrente de saída prático final.....	60
Figura A.1 – Diagrama de controle do protótipo.....	67
Figura B.1 – Diagrama de potência do protótipo.....	68
Figura C.1 – Apresentação e dados LED OSRAM DURIS S8.....	69
Figura C.2 – Gráfico corrente x tensão LED OSRAM DURIS S8.....	70
Figura C.3 – Desenho dimensional do LED OSRAM DURIS S8.....	71
Figura D.1 – Código microprocessador - Primeira parte.....	72
Figura D.2 – Código microprocessador - Segunda parte.....	73
Figura E.1 – Código Arduino/ESP-01 - Primeira parte.....	74
Figura E.2 – Código Arduino/ESP-01 - Segunda parte.....	75
Figura E.3 – Código Arduino/ESP-01 - Terceira parte.....	75
Figura E.4 – Código Arduino/ESP-01 - Quarta parte.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de lâmpadas existentes no Brasil em 2008.....	19
Tabela 2 – Iluminância média e uniformidade para cada classe de iluminação.....	21
Tabela 3 – Comparativo entre tecnologias existentes no Brasil antes do LED.....	30
Tabela 4 – Especificações do projeto do conversor <i>Buck</i>	47
Tabela 5 – Especificações dos semicondutores do conversor <i>Buck</i>	48
Tabela 6 – Especificações dos componentes do conversor <i>Buck</i>	57
Tabela 7 – Especificações dos componentes da placa de controle projetada.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
ABRASI	<i>Associação Brasileira de Empresas de Serviços de Iluminação Urbana</i>
ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
CIE	<i>Comissão Internacional de Iluminação</i>
COPEL	<i>Companhia Paranaense de Energia</i>
IES	<i>Illuminating Engineering Society</i>
INMETRO	<i>Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia</i>
IRC	<i>Índice de Reprodução de Cor</i>
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PROCEL	<i>Programa Nacional de Iluminação Pública Eficiente</i>
RGE	<i>Rio Grande Energia</i>
TCC	<i>Temperatura de Cor Correlata</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$CC - CC$	Corrente contínua-corrente contínua
D	Razão cíclica
$D.T_s$	Produto razão cíclica e tempo
f_s	Frequência
IC	Corrente capacitor
ID_{ef}	Corrente eficaz diodo
ID_{max}	Corrente máxima diodo
ID_{med}	Corrente média diodo
I_i	Corrente entrada
IL	Corrente indutor
ΔIL	Ondulação corrente indutor
ΔQ	Ondulação carga
IL_{med}	Corrente média indutor
I_M	Corrente máxima
i_m	Corrente mínima
I_o	Corrente na saída
IS_{ef}	Corrente eficaz chave
IS_{max}	Corrente máxima chave
IS_{med}	Corrente média chave
Ki	Ganho integral
Kp	Ganho proporcional
L	Indutor estado permanente
L_o	Indutor estado inicial
P_i	Potência entrada
P_o	Potência saída
R_o	Resistência na saída
S	Chave
T_s	Período
$V1$	Fonte entrada
$V2$	Fonte saída
VC	Tensão capacitor
ΔVC	Ondulação tensão capacitor

VD_{max}	Tensão máxima diodo
Vi	Tensão na entrada
VL	Tensão no indutor
Vo	Tensão na saída
VS_{max}	Tensão máxima chave

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivo Geral	16
1.2 Organização do Trabalho	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 Sistema de Iluminação Pública atual	18
2.2 Conceitos básicos para Iluminação Pública	19
2.2.1 Fluxo Luminoso	19
2.2.2 Iluminância	20
2.2.3 Luminância	21
2.2.4 Eficiência Luminosa	22
2.3 Conceitos físico-técnicos para Iluminação Pública	22
2.3.1 Ondas de luz	23
2.3.2 Temperatura de Cor Correlata	24
2.3.3 Índice de Reprodução de Cor	25
2.3.4 Fotometria	26
2.3.5 Sistema visual humano	27
2.4 Iluminação Pública e seus elementos	28
2.4.1 Fontes luminosas	28
2.4.1.1 Lâmpadas incandescentes	29
2.4.1.2 Lâmpada Vapor de Mercúrio em Alta Pressão	29
2.4.1.3 Lâmpada Vapor de Sódio em Alta Pressão	29
2.4.1.4 Lâmpada Multivapores Metálicos	29
2.4.1.5 Lâmpada fluorescente de Indução Magnética	29
2.4.2 Reatores	30
2.4.3 Circuitos de Comando	31
2.4.4 Luminárias públicas e braços de fixação	31
2.5 Tecnologia em LED	32
2.5.1 Funcionamento do LED	32
2.5.2 Eficiência energética do LED	33
2.5.3 Economia de custos	34
2.5.4 Controlabilidade	34
2.5.5 Proteção ao Meio Ambiente	35

2.6 Principais tipos de conversores de Energia	35
2.6.1 Conversor <i>Buck</i>	36
2.6.2 Conversor <i>Boost</i>	37
2.6.3 Conversor <i>Buck-Boost</i>	38
3 METODOLOGIA	39
3.1 Etapas de operação do conversor <i>Buck</i>	40
3.1.1 Análise dos semiciclos de operação	40
3.1.1.1 Etapas de operação e primeiras equações	41
3.2 Projeto do circuito de potência	42
3.2.1 Razão cíclica ou <i>Duty Cycle</i> do conversor <i>Buck</i>	42
3.2.2 Projeção do Indutor L	43
3.2.3 Projeção do capacitor C	44
3.2.4 Dimensionamento dos semicondutores	45
3.3 Especificações do conversor <i>Buck</i>	46
3.3.1 Dimensionamento dos componentes do conversor <i>Buck</i>	47
3.4 Modelagem e simulação do Controle	48
3.5 Discretização do Controlador	51
3.6 Criação dos códigos de controle e comunicação	53
3.6.1 Código microcontrolador	53
3.6.2 Código Arduino Uno/ESP-01	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1 Etapa de Simulação do sistema	56
4.2 Implementação Prática do Sistema	56
4.2.1 Placa de potência	57
4.2.2 Placa de controle	57
4.3 Validação da saída do conversor <i>Buck</i>	58
4.3.1 Tensão e corrente de saída	58
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
REFERÊNCIAS	62
APÊNDICES	67

1 INTRODUÇÃO

A iluminação pública tem grande importância na sociedade moderna, em especial em centros urbanos, proporcionando segurança, bem estar, melhora visual no trânsito de pessoas e veículos, além de possibilitar deslocamentos de maneira rápida e confiável (FARIA, 2014). Passível de mudanças positivas, tem seu limite atingido, sem modernização e conectividade necessárias para o advento das novas tecnologias existentes, como os conceitos de *Smart City* e *Internet of Things* (PINTO, 2020).

Neste contexto, surge como uma das áreas propícias às mudanças em termos de progresso, estrutural e funcional. Com o desenvolvimento do LED (Diodo Emissor de Luz), estes alocados em luminárias de alta potência, instaladas no alto dos postes, permitem autonomia e ajustes de luminância, atuando com funcionalidade inovadora (SERRAO, F. M.; OLIVEIRA, L. S.; NASCIMENTO, 2019). Um grande número de pesquisas e contribuições científicas nortearam a evolução da iluminação inteligente, esta idealizada e efetuada a partir do controle, acionamento e processamento de dados.

Com o avanço e viabilidade da comunicação entre coisas e da internet, possibilitou-se que sistemas inteiros implementassem comunicação embarcada (RAMOS et al., 2018), ou seja, surgiu a interlocução inteligente entre objetos. Protocolos de comunicação tiveram inúmeros avanços ao longo dos últimos anos, sendo utilizados para melhorar de maneira significativa qualidade de vida da população ao redor do mundo (JAWHAR; MOHAMED; AL-JAROODI, 2018).

Pela possibilidade de melhoria na Iluminação Pública, averiguou-se na Literatura aspectos para este trabalho, com identificação de parâmetros técnicos básicos físicos e de iluminação, tipos de conversores para implementação e síntese de tecnologias que permitem comunicação e dimerização de LED. Ademais, projetou-se e implementou-se de maneira prática o conversor *Buck* CC-CC, a malha aberta, adequação da malha fechada e a discretização do sistema para utilização de microcontrolador e módulo de comunicação, com análise do sistema proposto e de seus resultados.

1.1 Objetivo Geral

O Objetivo Geral deste trabalho busca desenvolver um conversor *Buck* em Modo de Condução Contínuo com aplicação em *driver* dimerizável para utilização em luminárias públicas com tecnologia LED.

Objetivos específicos darão respaldo à esta implementação, elucidados abaixo:

- Implementar conversor estático adequado à carga direcionada aos LEDs;
- Validar conversor *Buck* proposto de maneira prática;
- Determinar componentes eletrônicos do projeto;
- Projetar e desenvolver placas de circuito impresso de controle e potência;
- Controlar sistema em malha aberta, com possibilidade de controle em malha fechada;
- Avaliar resultados obtidos.

1.2 Organização do Trabalho

A motivação deste trabalho, bem como seus objetivos gerais e específicos tratam-se neste Capítulo.

No Capítulo 2, a ênfase volta-se ao sistema de iluminação atual, seus conceitos básicos e físicos, bem como fenômenos e bases para o projeto, unindo o antigo modo de Iluminação Pública no país com uma nova forma de tratativa de adequação do sistema público brasileiro, apresentando as luminárias de diodo emissor de luz (LED). Em paralelo, apresenta-se os principais conversores de Energia, sintetizando a aplicação breve de cada um.

No Capítulo 3, apresenta-se a Metodologia para elaboração deste trabalho. Elucida-se as etapas de operação do conversor *Buck*, o projeto do circuito de potência para um conversor estático, levando em consideração parâmetros adotados previamente conforme demanda na indústria e no mundo corporativo. Define-se os elementos passivos e semicondutores do projeto ideal, bem como suas simulações, modelagens matemáticas e implementação para controle em malha aberta e fechada, tendo o conversor adaptado-se para controle de corrente fixa na saída. Relacionado ao projeto, busca-se organizar a parte de comunicação, esta a ser implementada no futuro, porém vislumbrada com módulo com acesso à Internet, plataforma *online* e microcontrolador.

No Capítulo 4, expõe-se os resultados da validação da saída do conversor *Buck*, a análise dos códigos de implementação do Arduino UNO e do microcontrolador, evidenciando a possibilidade de implementação.

No Capítulo 5, as considerações finais do trabalho foram expostas e sugeriram-se tópicos de continuação do trabalho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A iluminação pública em centros urbanos, essencial ao desenvolvimento e bem-estar social, atravessa um momento de progresso e automatização. No passado, utilizou-se luz artificial não apenas para a segurança, mas para destaque aos espaços verdes e marcos históricos (MASCARO, 2006). Seguindo este caminho, áreas bem iluminadas e controladas contribuem para o impulsionamento do turismo e comércio, benefícios fundamentais à economia.

No Brasil, o primeiro registro da iluminação pública deu-se na cidade do Rio de Janeiro, no ano de 1794, sendo movida à óleo de azeite (TEIXEIRA, 2011). Em 1874, implementa-se iluminação a gás na cidade de Porto Alegre, tendo desencadeado a construção de uma usina elétrica, dissipando-se para outras regiões (LIMA, LEANDRO C.; GOUVEIA, 2019). Evolui de maneira exponencial no início do século XX, crescendo vertiginosamente a partir do uso de lâmpadas de descarga por volta dos anos 60 (ROSITO, 2009). Em 1963, surgem as lâmpadas LED, utilizadas inicialmente para indicação de funcionamento de aparelhos, evoluindo suas cores ao passar dos anos (LIMA, 2018).

2.1 Sistema de Iluminação Pública atual

A responsabilidade de supervisão e delegação de serviços de iluminação pública, serviço essencial à sociedade, fica a cargo dos poderes municipais e distritais, de acordo com a Resolução Normativa nº 888, de 30 de junho de 2020 (ANEEL, 2020). Para articulação e contextualização com setores administrativos municipais, visando melhora energética e tecnológica (BRUDEKI, 2013), surge o Programa Nacional de Iluminação Pública Eficiente (PROCEL), no ano de 1985. No ano 2000, surge o PROCEL Reluz, com objetivo de prover incentivos para iluminação eficiente por lâmpadas LED (PROCEL, 2021).

Os pontos de energia possuem dados mais recentes no ano de 2008, caracterizando um enorme parque da iluminação pública no Brasil, com aproximadamente 14,7 milhões de instalações, sendo estas abastecidas em quase 95% dos casos com lâmpadas vapor de sódio e vapor de mercúrio (ABRASI, 2008). Na Tabela 1 são mostradas os tipos de lâmpadas existentes no Brasil no ano de 2008, precedente à tecnologia LED atual.

Tabela 1 – Tipos de lâmpadas existentes no Brasil em 2008.

Lâmpada	Quantidade	Quantia (%)
Vapor de sódio	9.294.611	62,90%
Vapor de mercúrio	4.703.012	31,80%
Mistas	328.427	2,20%
Incandescentes	210.417	1,40%
Fluorescentes	119.535	0,80%
Multi-Vapor Metálico	108.173	0,70%
Outras	5.134	0,03%

Fonte: PROCEL (2008)

Os reparos devem ser agendados junto à concessionária responsável. Caso sejam luminárias instaladas em passarelas, viadutos ou praças, a manutenção fica a cargo da Prefeitura (RGE, 2021). Portanto, o sistema não obtém 100% de eficácia de manutenção preventiva, tendo em vista os problemas de ordem técnica e de agendamento.

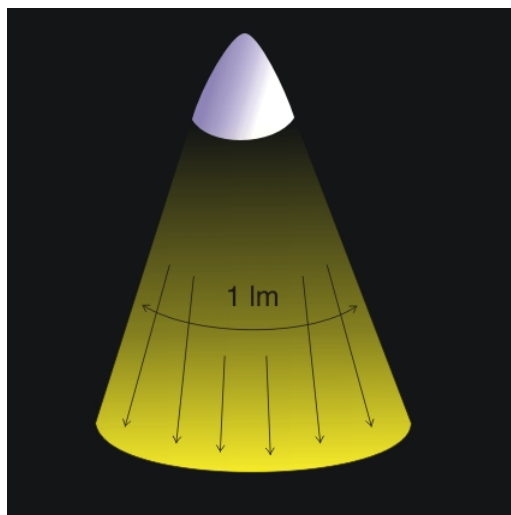
2.2 Conceitos básicos para Iluminação Pública

A pontualização de conceitos torna-se fundamental para entendimento do processo de IP. A norma NBR 5461 prevê grandezas e unidades de Iluminação, objetivando padronizar e balizar projetos e medidas. Os conceitos básicos serão apresentados.

2.2.1 Fluxo Luminoso

Contando com unidade de medida em lúmen (lm), o fluxo luminoso define-se como radiação de uma fonte de iluminação em comprimento de onda entre 380 e 780 nm (OSRAM, 2012), ou seja, quantidade de luz emitida por um ponto (CAMPOS, 2017), conforme Figura 1.

Figura 1 – Exemplo de fluxo luminoso.



Fonte: Adaptado de Lima (2018)

O fluxo luminoso efetivo refere-se ao aproveitamento total da iluminação, descontando assim lúmens que são desperdiçados ou que não contribuem para iluminação de uma área (REA, 2000). Sombreamento, filtros, lentes e vidros são exemplos de elementos contribuintes à perda de fluxo (IES, 2008). O fluxo luminoso efetivo deve ser levado em consideração desde desenvolvimento de novas pontos de luz, projetos e análises laboratoriais, prevendo demanda e assertividade de produtos. Usualmente, para fins de projeto, utiliza-se um fator de manutenção de 70% para 50.000h de uso de luminárias LED (INMETRO, 2017), ou seja, garante-se que após o total de horas utilizadas a depreciação estimada do fluxo luminoso do diodo emissor de luz será de 30%.

2.2.2 Iluminância

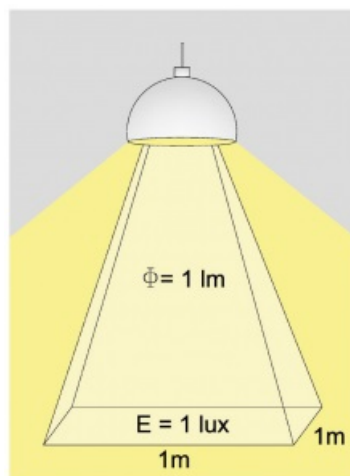
Possuindo como unidade de medida lux (lx) e símbolo E, a Iluminância indica o quanto fluxo luminoso reflete sobre uma área (OSRAM, 2012), a qual independente de quem observa e de onde está posicionado (MELO, 2018), conforme Figura 2.

Geralmente utiliza-se fatores de iluminância para medição de condição de luminosidade em ambientes de trabalho, podendo ser complementada por uma iluminação extra, conforme plano de uso (PARANHOS, 2018). Abaixo a fórmula matemática.

$$E = \frac{\phi}{A} \quad (2.1)$$

Segue-se a norma ABNT NBR:5101 para projetos e execuções de IP, com iluminância

Figura 2 – Exemplo de iluminância.



Fonte: Adaptado de Paranhos (2018)

média e fator de uniformidade descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Iluminância média e uniformidade para cada classe de iluminação.

Classe	Iluminância Média	Uniformidade
V1	30	0,4
V2	20	0,3
V3	15	0,2
V4	10	0,2
V5	5	0,2

Fonte: Adaptado de norma ABNT 5101 (2018)

2.2.3 Luminância

Representada pela letra L, determina-se luminância como quantidade de emissão de luz que reflete numa determinada área, como por exemplo, o asfalto (GLIGHT, 2019). Extremamente importante para projeções em *softwares*, tendo Termos de Referência em licitações públicas se baseando neste dado para comprovar a eficácia da luminária disposta pela Contra-

tada, possuindo este item essencial participação no cálculo da uniformidade global do projeto, dada pela Equação (2.2).

$$U_o = \frac{L_{min}}{L_{med}} \quad (2.2)$$

Ou seja, utiliza-se luminância mínima medida num padrão de simulação, assim como luminância média na trama de cálculo (ABNT, 2018).

2.2.4 Eficiência Luminosa

Simboliza a medida de energia convertida de uma fonte em luz, relacionando fluxo luminoso em lúmens com potência de alimentação em Watt (BLATT, 2014). Diversos fatores implicam para que seja alcançado o máximo de eficiência, tais como formato da lâmpada, tipo de luminária e tecnologia utilizada na fabricação (ARAUJO, 2019). Quanto maior a eficiência, melhor o benefício e aproveitamento da luz, reduzindo a conta de energia. Equação (2.3) característica:

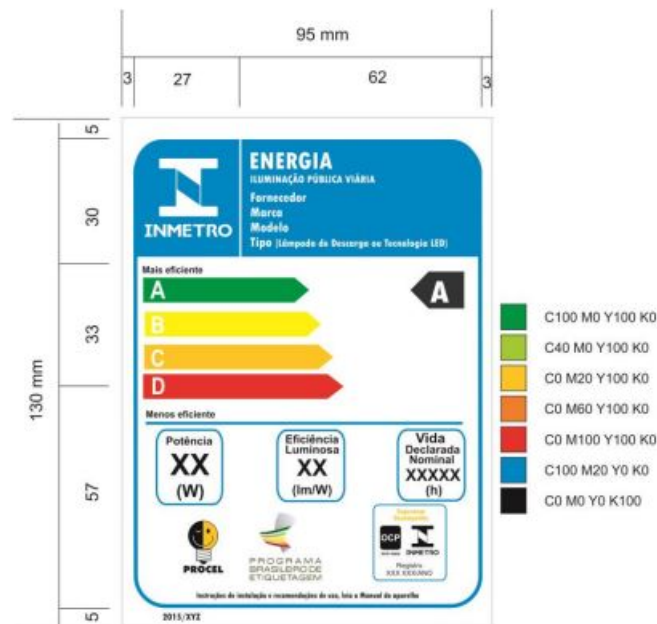
$$\eta = \frac{\phi}{P} \quad (2.3)$$

Em 1993, para comercialização de produtos, criou-se o selo PROCEL, tomando resultados de ensaios do INMETRO como base para declaração de eficiência energética e luminosa (PROCEL, 2021). Para base de medições, a mesma ocorre após um período de estabilização de tensão na luminária (INMETRO, 2017). Para identificação e certificação da eficiência declarada em luminárias do tipo LED, a Portaria n° 20 do INMETRO, anexo III, prevê Selo de Identificação da Conformidade, conforme Figura 3.

2.3 Conceitos físico-técnicos para Iluminação Pública

A transição do básico para o técnico na iluminação pública fundamenta-se na complementação de fatores, o entendimento do foco de luz, o destino da luminosidade em uma via, calçada ou área de lazer, angulação do trajeto luminotécnico, dentre outros. Princípios que passam despercebidos em alguns casos, porém são determinantes para conforto e segurança do cidadão.

Figura 3 – Etiqueta para identificação de parâmetros luminosos.

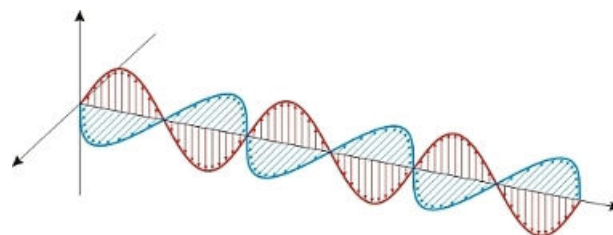


Fonte: Adaptado de INMETRO (2017)

2.3.1 Ondas de luz

Sendo uma onda eletromagnética visível, a luz forma-se pela propagação de um campo elétrico associado a um campo magnético num determinado espaço (JUNIOR, 2021), conforme Figura 4.

Figura 4 – Exemplo de formação de ondas eletromagnéticas.

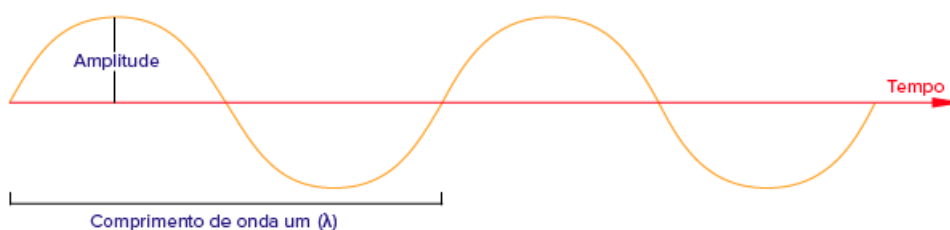


Fonte: Adaptado de JUNIOR (2021)

Possui algumas propriedades básicas, como amplitude, comprimento de onda, frequência e período. A amplitude define-se como a distância vertical do ponto mais alto de uma onda e o eixo central da mesma. O comprimento de onda tem como descrição a distância horizontal entre dois pontos mais altos consecutivos (HELERBROCK, 2021). A Figura 5 elucida o comportamento.

A variação das ondas em uma posição conforme passagem de tempo chama-se frequência, medida em Hertz (Hz), ou seja, quantos comprimentos de onda passam por um espaço de tempo

Figura 5 – Amplitude e comprimento de onda



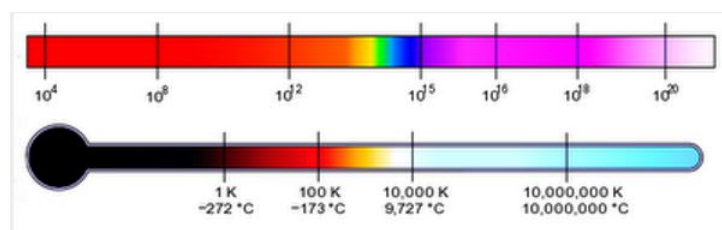
Fonte: Adaptado de HELERBROCK (2015)

a cada segundo. O período da onda, por sua vez, tem como delimitação quantos comprimentos de onda passam por um determinado espaço, sendo inversa à frequência matematicamente, com unidade em segundos (s) (ZUMDAHL, 2003).

2.3.2 Temperatura de Cor Correlata

A temperatura de cor correlata (TCC), possui como unidade de medida o Kelvin (K). A definição da temperatura de cor inicia-se no século XIX, baseando-se nas leis da Termodinâmica, buscando a resposta sobre o zero absoluto, encontrado em $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$, momento que as partículas de um corpo param de vibrar (LIMA, 2018). Os estudos para descoberta das cores iniciou-se aquecendo uma barra de ferro, com nome de corpo negro, até o ponto de fusão do material. Conforme este corpo negro era aquecido, diversos comprimentos de onda eram gerados, começando com tons vermelhos e chegando a cor violenta (AZUOS, 2015), como demonstrado na Figura 6.

Figura 6 – Exemplo do experimento de Thomson, século XIX

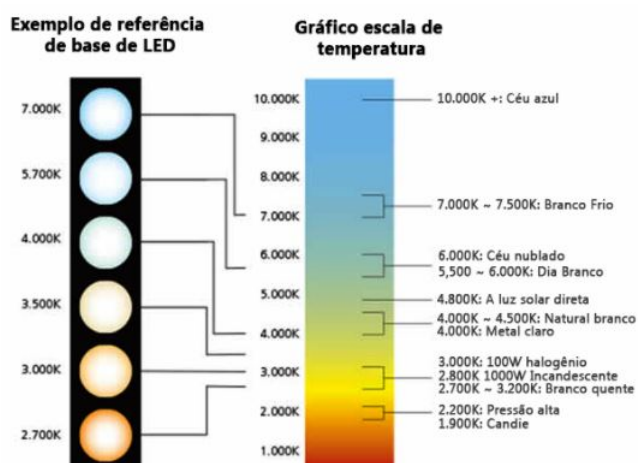


Fonte: Adaptado de AZUOS (2015)

Os valores em Kelvin indicam cores quentes, frias e neutras. Cores quentes até 3000K, cores neutras entre 3000K e 4000K e cores frias maiores que 4000K (MELO, 2018). As escalas de temperatura e exemplos de aplicações com base de referência em LED exibem-se na Figura 7.

Nota-se, quanto mais alta a temperatura de cor, mais branca será a luz emitida. As

Figura 7 – Exemplo de referência LED.



Fonte: Adaptado de Nova eletrônica (2018)

denominadas temperaturas de cor que resultam na "luz branca" são indicadas para estações de trabalho. Quanto menos temperatura de cor, a luz emitida será mais amarelada, própria para ambientes mais aconchegantes e relaxantes, denominadas "luz quente" (MUXENERGIA, 2020).

2.3.3 Índice de Reprodução de Cor

Correspondente a relação entre cor real de um objeto iluminado pela luz artificial e o mesmo objeto iluminado pela luz do Sol (ROSITO, 2009). Este parâmetro, adimensional, varia entre 0 e 100. Quanto mais próximo de 100, mais fiel e preciso será seu resultado (MELO, 2018), como no índice de TCC de 2700K da Figura 8.

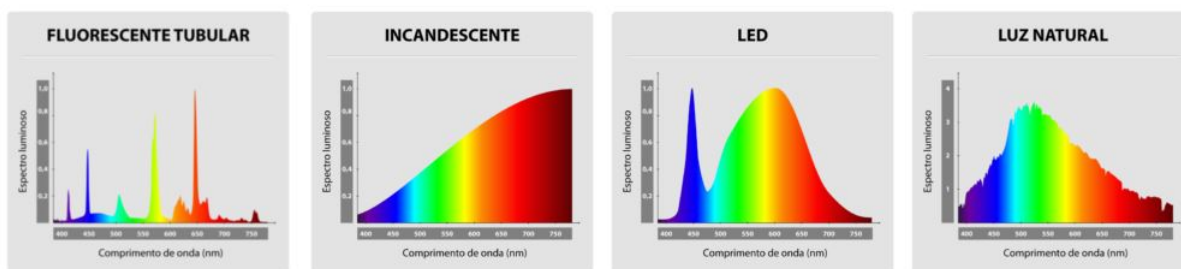
Figura 8 – Índice de reprodução de cor com TCC 2700K.



Fonte: Adaptado de Melo (2018)

Atualmente com IRC 100, utiliza-se a lâmpada incandescente como parâmetro para análise. As lâmpadas LED possuem reprodução de cores muito melhor em comparação a outros modelos de lâmpadas, mesmo com mesmo IRC, pois o espectro de cores tem ótimos índices de reprodução (LUMICENTER, 2017), conforme Figura 9.

Figura 9 – Índice de reprodução de cor com comparação entre fontes.

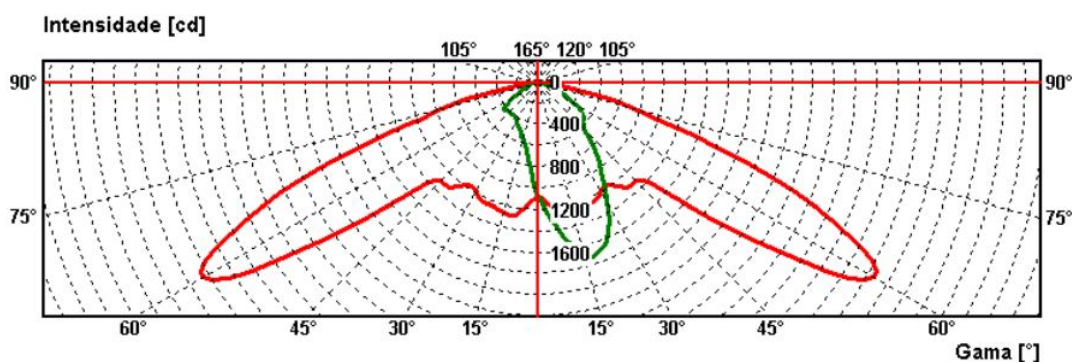


Fonte: Adaptado de LUMICENTER (2017)

2.3.4 Fotometria

A fotometria, ou medição da luz visível para diversos comprimentos de onda, utiliza grandezas para seu cálculo de distribuição, tais como iluminância, intensidade luminosa, fluxo luminoso, potência, dentre outros (INMETRO., 2013). Os resultados podem ser apresentados numa trama de 180°, ilustrando a trajetória de saída do ponto de luz, como na Figura 10.

Figura 10 – Curva de saída do ponto de luz.

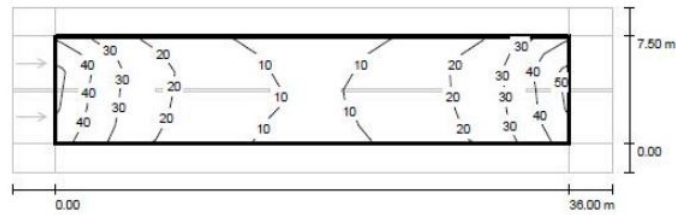


Fonte: Adaptado de INMETRO (2013)

Estes resultados, para fins de simulação, são compactados em arquivos do tipo .IES, posteriormente utilizados no *software* DiaLux, responsável por representar parâmetros e definições de iluminação mínima, como na Figura 11.

Em termos de Referência, documentos que entidades públicas dispõem para compras de luminárias de IP, todos requisitos de simulação devem seguir a norma NBR 5101, para fatores mínimos, ou seja, todos dados devem atender, por meio de simulação, parâmetros mínimos de iluminação para serem aprovados, tendo uso de *softwares* papel fundamental nesta aprovação. A fotometria, através de documento em arquivo .IES, aprovado por laboratórios credenciados ao INMETRO, busca uma melhor luminária para determinado espaço, tendo sempre como

Figura 11 – Arquivos do tipo .IES representados na simulação.



Fonte: Adaptado de INMETRO (2013)

preferência o equipamento com melhor desempenho comprovado (INMETRO., 2013).

2.3.5 Sistema visual humano

Penetrando nos olhos e levando informação ao cérebro, a luz permite que haja cores, com os objetos a refletindo. O sensível olho humano possui espectro visível entre 400 e 700nm (NAKAYAMA, 2012), conforme Figura 12.

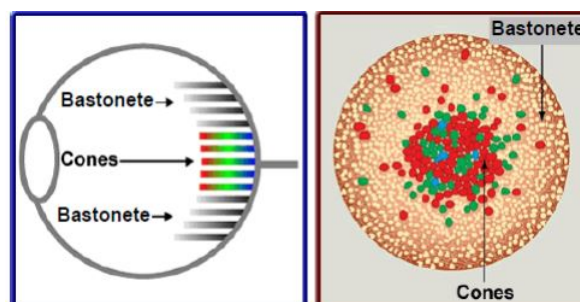
Figura 12 – Espectro visível do olho humano.



Fonte: Adaptado de NAKAYAMA (2012)

Simplificando, existem dois fotorreceptores no olho humano: cones e bastonetes. Os cones tem controle na luz fotópica (visão diurna) e os bastonetes controlam a visão escotópica (luz noturna), criando a visão. Para empresas de iluminação e normas, conta-se como parâmetro medições fotópicas para descrição de brilho de uma fonte de luz, estes responsáveis por detalhes finos e cores (LUMINOENERGY, 2015). A Figura 13 proporciona um conceito breve da localização dos cones e bastonetes:

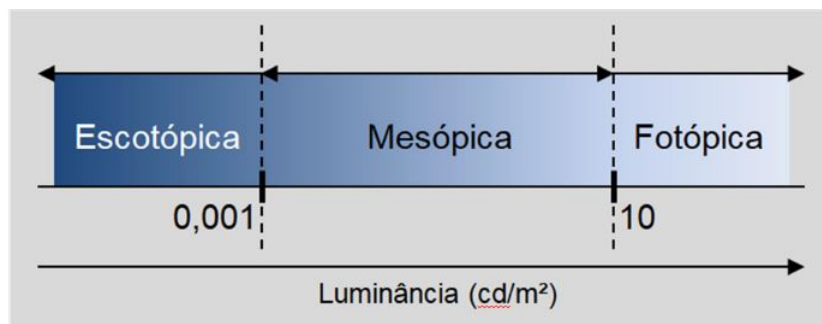
Figura 13 – Conceito breve de localização.



Fonte: Adaptado de LUMINOENERGY (2015)

No período de transição entre a visão fotópica e escotópica, surge a visão mesópica, geralmente experimentada ao anoitecer, ocorrendo uma mudança espectral, adaptando-se às condições de luminância a qual está inserido (GRANDO, 2018), como na Figura 14.

Figura 14 – Transição mesópica.



Fonte: Adaptado de GRANDO (2018)

Segundo (GRANDO, 2018), medições fotométricas podem ser realizadas em períodos fotópicos (sensibilidade à luminância maior) e mesópicos (sensibilidade à luminância menor), sendo escolhidos por aplicações de maneira exclusiva. As condições mesópicas podem ser utilizadas para nas iluminações externas, como túneis e iluminação pública (MELO, 2018). A CIE 191:2010 tem previsão de estabelecimento para sensibilidade mesópica, sugerindo uma gama de condições visuais de fornecimento para período noturno (CIE, 2021). Mesmo não estando aprovada, a mesma deve ser considerada.

2.4 Iluminação Pública e seus elementos

Exigindo dispositivos duráveis, com baixa manutenção, baixo custo, eficientes e sustentáveis, a iluminação pública possui elementos característicos para seu funcionamento pleno (ILUMININ, 2019). De maneira simplificada, serão apresentados os principais equipamentos e funcionamentos para especificação dos conjuntos utilizados antes da adequação à tecnologia LED.

2.4.1 Fontes luminosas

Conhecidas como fontes de luz artificial, utiliza-se para iluminação de vias e calçadas, buscando qualidade, segurança, preservação, orientação e destaque (SANTOS, 2005).

2.4.1.1 Lâmpadas incandescentes

Com funcionamento a partir do aquecimento do filamento de tungstênio pela corrente elétrica, gera-se luz onde há vácuo, podendo conter gás raro na composição. Com baixa eficiência, cerca de 12l/W, aliada a baixa vida útil, cerca de 1.000h, emite calor somado a energia luminosa, em tom amarelado (DAMBINSKI, 2007). Após a década de 1960, sua utilização em vias públicas diminuiu (ULTRALUZ, 2020), restringindo seu uso apenas às residências.

2.4.1.2 Lâmpada Vapor de Mercúrio em Alta Pressão

Com operação a partir da ionização de um gás, provoca-se um aquecimento em seu bulbo, evaporando o mercúrio. Deste processo, ioniza-se o mercúrio, gerando colisão entre elétrons livres, gerando uma luz azulada como resultado do processo (LUZ, 2014). Não necessitam de ignitores para partida.

2.4.1.3 Lâmpada Vapor de Sódio em Alta Pressão

Com princípio de funcionamento similar à lâmpada vapor de mercúrio, adiciona-se sódio ao processo, exigindo um ignitor com alta tensão em alguns microssegundos para funcionamento, gerando uma cor amarelada ao sistema, mais utilizada no sistema de IP porém menos eficiente que outras tecnologias (COPEL DISTRIBUIÇÃO, 2012).

2.4.1.4 Lâmpada Multivapores Metálicos

Desenvolvida a partir de um aperfeiçoamento da lâmpada vapor de mercúrio, que num tubo de quartzo mistura-se iodetos ao mercúrio, gerando rendimento luminoso e qualidade superior, reproduzindo melhor as cores, sendo utilizadas em ginásios de esportes, estádios e pontos arquitetônicos que necessitam maior destaque (FELICISSIMO, 2006).

2.4.1.5 Lâmpada fluorescente de Indução Magnética

Desenvolvida para funcionamento com excitação do mercúrio e gases nobres dentro de um tubo por meio de um campo de magnético oscilante de alta frequência (em torno de 250KHz), utilizada principalmente em túneis, porém existem alguns registros de utilização em IP mas seu

alto custo inviabiliza a operação (COPEL Distribuição, 2012).

Na Tabela 3, sugere-se um estudo comparativo entre as tecnologias, com temperatura de cor, IRC, eficiência luminosa e vida útil agregadas.

Tabela 3 – Comparativo entre tecnologias existentes no Brasil antes do LED.

Tecnologia	Temperatura de cor (K)	IRC (%)	Eficiência (lm/W)	Vida média (h)
Incandescente	2.600-2.700	99-100	10-20	1.000-1.100
Vapor de mercúrio	3.000-4.000	40-55	45-58	9.000-15.000
Vapor de sódio	1.900-2.000	20-22	80-150	18.000-32.000
Vapor metálico	3.000-6.000	65-85	65-90	8.000-12.000
Indução	3.800-4.000	80-90	80-110	55.000-60.000

Fonte: Adaptado de (GUERRINI, 2007) e (SILVA, 2006)

O descarte correto de todos tipos de lâmpadas apresentados deve ser levado em conta. As lâmpadas podem gerar contaminações e prejuízos à saúde, com componentes do tipo antimônio, sódio, mercúrio, bário, tungstênio, chumbo, dentre outros nas suas composições, o que pode causar imensuráveis prejuízos ambientais e físicos (CAMPOS, 2017).

2.4.2 Reatores

Utilizados para auxílio de partida e estabilização da luminosidade, limita a corrente elétrica, sendo indispensável para bom funcionamento dos modelos antigos de luminárias públicas, sendo as mesmas de mercúrio, sódio, fluorescentes ou metálicas, podendo ser compostos de dois modelos: eletromagnéticos ou eletrônicos (DEMAPE, 2013). Enquanto os eletromagnéticos utilizam enrolamento de cobre e núcleo magnético para funcionamento, os eletrônicos possuem circuitos eletrônicos em estado sólido para compensar características elétricas e proporcionar a atividade normal das lâmpadas (LUMINOENERGY, 2015). Devem atender às normas ABNT NBR 5114, NBR 5172 e NBR 5125.

2.4.3 Circuitos de Comando

No início da IP, o acionamento e desligamento das luminárias eram feitas por operadores, uma por uma. O surgimento do acionamento automático ocorreu pela necessidade de atender uma quantidade maior de pontos, surgindo então os circuitos de comando. Comumente chamados de relés fotoelétricos, possuem três tipos: térmicos, magnéticos e eletrônicos.

Os relés térmicos possuem, principalmente, um sensor LDR (*Light Dependent Resistor*), ou seja, um resistor dependente de luz e um resistor de aquecimento. Dá-se o funcionamento pela variação de resistência ôhmica proporcional à luz incidente no LDR, com mais ou menos corrente de fluência na resistência de aquecimento, habilitando uma lâmina bimetálica para acionamento, tendo como desvantagem o desligamento do sistema pela grande sensibilidade à qualquer luminosidade (STIELETRONICA, 2019).

Os relés magnéticos operam por uma força de atração gerada por uma corrente de passagem em uma bobina, criando um campo magnético. No acionamento ou desligamento, há uma compensação entre forças, criando uma instabilidade mecânica e ocorrendo uma vibração. Como desvantagens tem-se uma destruição dos contatos (DAMBINSKI, 2007).

Os relés eletrônicos utilizam como sensor de luminosidade um fotodiodo, que compõe um sistema em placa de circuito impresso que recebe, geralmente 12 ou 24V contínua, suportando assim os surtos de tensão de uma melhor maneira que as opções anteriores devido à proteção eletrônica anterior à operação (STIELETRONICA, 2019).

Utiliza-se base para ligação entre luminária e relé para instalação. Existem dois modelos de base: tipo 3 pinos e tipo 7 pinos. A base tipo 3 pinos tem composição com cabo fase (vermelho), neutro (preto) e linha (branco). A base tipo 7 pinos, utilizada principalmente para sistema de telegestão, possui ainda as cores de cabos laranja, marrom, cinza e roxo, preparando a luminária para futuras dimerizações e parametrizações (INMETRO, 2017). Para atendimento de homologações, devem atender à norma ABNT NBR 5123.

2.4.4 Luminárias públicas e braços de fixação

As luminárias, além de abrigar a lâmpada e outros acessórios, possui como principais funções a fixação na estrutura e proteção à lâmpada, tendo a interação entre as partes papel fundamental na qualidade e na eficiência energética, respeitando propriedades ópticas e resistência a sinistros de ordem natural (MUSE, 2019). Os braços de fixação fazem o elo entre poste e luminária, tendo estes papel fundamental na estrutura de iluminação, sendo que sua má

instalação pode resultar em perda de qualidade de luminosidade. Devem possuir resistência mecânica, sustentação ao peso e esforços por condições naturais, geralmente com comprimento entre 1 e 3m (COPEL DISTRIBUIÇÃO, 2012).

2.5 Tecnologia em LED

A troca global por tecnologia LED reduziria o consumo em 35%, contemplando redução de 9% em acidentes de trânsito noturno (ROSITO, 2015), além das inestimáveis questões de segurança, confiabilidade de sistema e automatização dos recursos.

O LED, dispositivo semicondutor que emite luz por passagem de corrente elétrica, possui facilidade de fabricação, não necessitando enorme estrutura para criação e adaptação desta tecnologia, como ocorre com as lâmpadas tradicionais, trazendo grandes benefícios, como eficiência energética, economia de custos, controlabilidade, segurança, tempo de vida e proteção ao meio ambiente (MME, 2020). Diferem-se das lâmpadas comuns por não utilizarem filamento, vidros ou partes móveis.

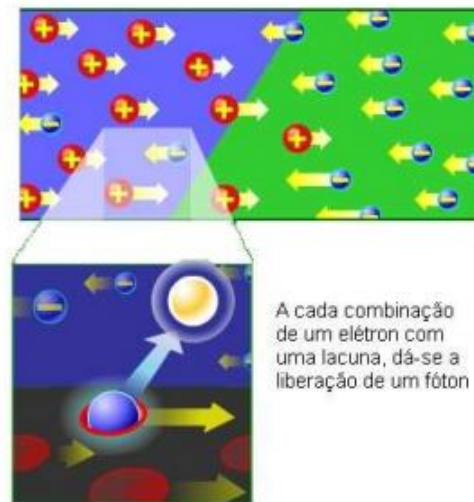
2.5.1 Funcionamento do LED

Considera-se dois cristais semicondutores para construção do LED, que recebem dopagem distinta. Um deles possui elétrons em demasia (tipo N), e outro lacunas em excesso (tipo P). Adicionando-se corrente elétrica ao processo, excita-se o sistema, com movimentação geral do ciclo e os elétrons, que possuem mais carga que as lacunas, liberam uma quantidade de energia, denominada fóton. Quanto mais elétrons com grande energia, mais fótons e maior a frequência das combinações (PIMENTA, 2008). A Figura 15 abaixo ilustra a combinação de lacuna e elétron, formando um fóton:

O LED de potência, com melhor *performance* e mais confiável, possui um chip semicondutor fixado por solda numa base de silício e com silicone em sua cápsula, com fios condutores, terminais de anodo e catodo e dissipação de calor, irradiando luz em todas as direções (RANGEL, MARCELLE G.; SILVA, PAULA B.; GUEDE, 2009), como elucidado na Figura 16.

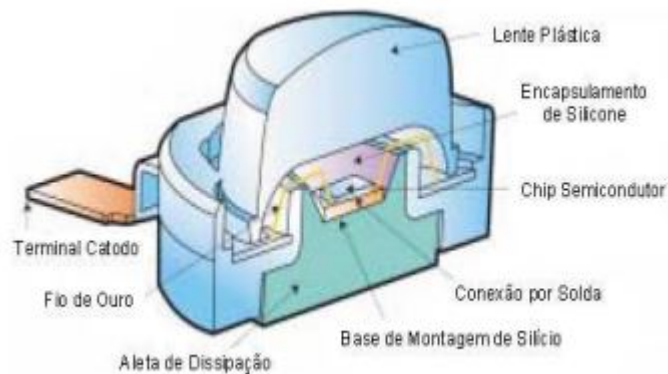
Geralmente, utiliza-se Gálio (Ga), Arsênio (As), Índio (In), Alumínio (Al) e Nitrogênio para construção do LED, permitindo que a combinação dos materiais produzam cores, buscando o arranjo das cores vermelha, âmbar, azul, verde e ciano, com comprimentos de onda da ordem de 380 a 770nm, completamente visíveis ao olho humano (GUARINELLO, 2013).

Figura 15 – Liberação de um fóton.



Fonte: Adaptado de PIMENTA (2008)

Figura 16 – Esquema básico de funcionamento do LED.



Fonte: Adaptado de RANGEL, SILVA e GUEDE (2009)

2.5.2 Eficiência energética do LED

Enquanto uma lâmpada fluorescente gera uma eficiência entre 50 e 90lm/W, a composição para iluminação LED concebe, no mínimo, 150lm/W, ou seja, há maior produção e estabilidade com a nova tecnologia. No ano de 2021, esta eficiência pode chegar a 190lm/W, devido à compactação das placas PCB, recebendo um maior número de LEDs em sua composição. Para conferir a eficiência energética de um produto, basta observar na Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) o seu valor, bem como a certificação do laboratório credenciado.

2.5.3 Economia de custos

Considerando a mesma quantidade de luz emitida, as luminárias LED são, em média, 80% mais econômicas que as lâmpadas incandescentes e 30% mais econômicas que as fluorescentes. Com vida útil maior que 50.000 horas, as luminárias em LED geram uma economia na manutenção pois há menos emissão de calor e reduz problemas de curto-circuito (ZAGONEL, 2021).

2.5.4 Controlabilidade

Comumente chamada de sistema de telegestão, a controlabilidade abre uma nova gama de funcionalidades no sistema público. No sistema antigo, utiliza-se apenas um controle simples, por relé fotoelétrico. Nos novos modelos, ocorre dimerização, permitida por controle de corrente, leituras de potência, fator de potência, consumo, dentre outros por sensores e mapas, além da manutenção preventiva permitida por *softwares* que mostram pontos de falha. Cita-se alguns estágios para evolução do controle, observado para organização do serviço, conforme instrui guia estratégico (GARTNER, 2021).

- Estágio 0: Simples troca para economia de energia;
- Estágio 1: Dimerização simples, para áreas com alta criminalidade ou em caso de emergência;
- Estágio 2: Luminárias com comunicação em rede e monitoramento, podendo servir como pontos de acesso à Internet;
- Estágio 3: Ponto de acesso à rede em banda larga, como provedor de serviço público além da iluminação.

Quanto à conectividade, surge o termo Cidades Inteligentes ou *Smart Cities*, elemento de interação provido para desenvolver a qualidade de vida, serviços e inovações pela utilização inteligente e eficiente da energia, material ou serviço, levando à estimativa de 50 bilhões de dispositivos conectados, com movimentação de quase 30 trilhões de reais em 2020 (EXATI, 2020).

Segundo (PINTO, 2021), a telegestão proporciona os seguintes benefícios:

- Economia de energia;

- Possibilidade de dimerização, acionamento e desligamento à distância;
- Mensuração de *performance* e gastos;
- Menos poluição e maior conforto visual;
- Aperfeiçoamento do espaço público;
- Fomento à inovação tecnológica, abrindo portas ao desenvolvimento;
- Antecipação da manutenção em pontos de luminosidade.

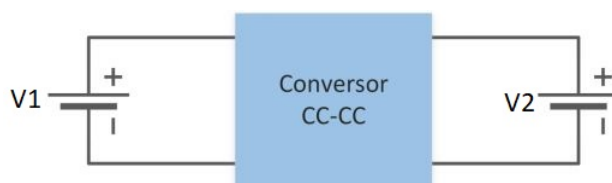
2.5.5 Proteção ao Meio Ambiente

Cidades inteligentes buscam modelos de gestão sustentável, boas práticas e bons exemplos de aplicabilidade de meios tecnológicos no ambiente, com utilização de equipamentos eficientes, com planejamento e gestão (SALVIA, 2016). A instalação de luminárias com tecnologia LED evitam contaminação por mercúrio em aterros e lixões, pois possuem grande vida útil e não há materiais tóxicos ao Meio Ambiente, como estrôncio, bário, ítrio, chumbo e vanádio, como nos modelos antigos (CAMPOS; SANTOS; ROBERTO, 2012).

2.6 Principais tipos de conversores de Energia

Segundo (ROSOT, 2017), conceitua-se como sistemática de controle de fluxo de energia entre uma fonte de entrada (V1), para uma fonte de saída (V2), com controle por chaves e elementos passivos, como capacitores e indutores, visualizado na Figura 17.

Figura 17 – Conversor CC-CC básico.

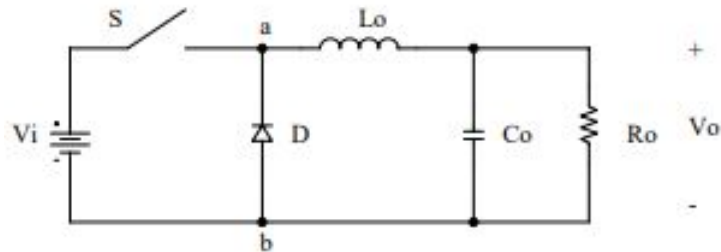


Fonte: Adaptado de Rosot (2017)

2.6.1 Conversor *Buck*

Caracteriza-se por um conversor abaixador de tensão, com entrada em tensão e saída em corrente (PETRY, 2001), com Figura 18 ilustrando sua configuração básica:

Figura 18 – Conversor CC-CC *Buck*



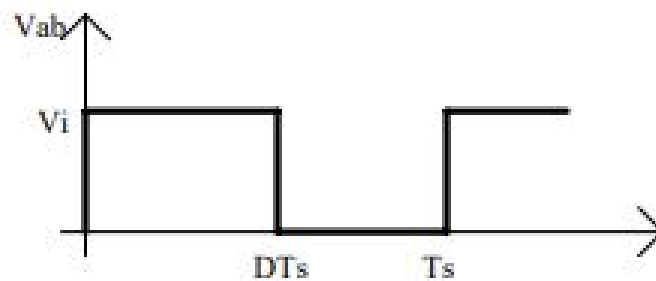
Fonte: Adaptado de Petry (2001)

Para funcionamento, possui duas etapas, descritas abaixo:

- Etapa 1 (Início em 0 até $D.T_s$): Com condução da chave S, a corrente circula no indutor L_o e pela saída do conversor, com fornecimento de energia pela entrada V_i ;
- Etapa 2 (Início em $D.T_s$ até $(1-D).T_s$): No instante de abertura da chave S, o diodo D conduz, tendo a energia no indutor L_o transferida para a carga.

A Figura 19 demonstra o formato de onda do conversor, representando seu modo de condução:

Figura 19 – Forma de onda do conversor CC-CC *Buck*



Fonte: Adaptado de Petry (2001)

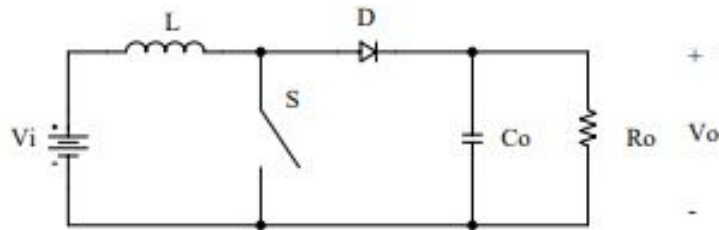
Apresenta-se a equação característica do conversor *Buck* abaixo:

$$D = \frac{V_o}{V_i} \quad (2.4)$$

2.6.2 Conversor *Boost*

Possuindo como característica elevar a tensão, o conversor *Boost* tem entrada em corrente e saída em tensão (PETRY, 2001), com Figura 20 elucidando a síntese de montagem:

Figura 20 – Conversor CC-CC *Boost*



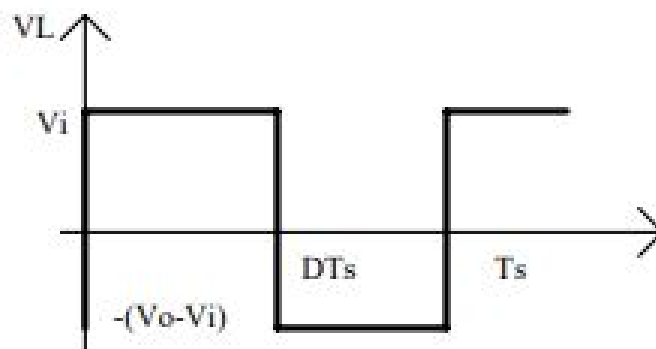
Fonte: Adaptado de Petry (2001)

Em seu funcionamento, observa-se duas etapas:

- Etapa 1 (Início em 0 até $D \cdot T_s$): Com condução da chave S, a corrente circula no indutor L_o e pela saída do conversor, com fornecimento de energia pela entrada V_i ;
- Etapa 2 (Início em $D T_s$ até $(1-D) \cdot T_s$): No instante de abertura da chave S, o diodo D conduz, tendo a energia no indutor L_o e a energia da fonte V_i transferidas para a saída, com aumento de tensão na carga.

A Figura 21 demonstra o formato de onda do conversor no indutor L:

Figura 21 – Forma de onda do conversor CC-CC *Boost*



Fonte: Adaptado de Petry (2001)

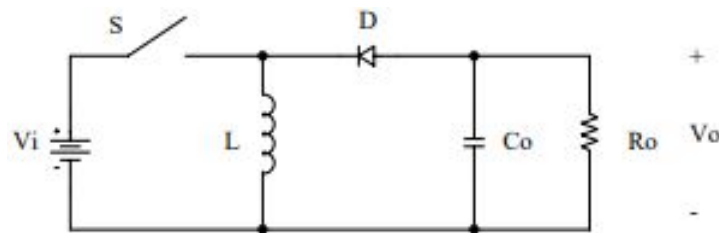
Sua equação característica:

$$\frac{1}{1 - D} = \frac{V_o}{V_i} \quad (2.5)$$

2.6.3 Conversor *Buck-Boost*

Apresenta-se como um conversor com qualidade para abaixar e elevar a tensão, com entrada e saída em tensão (PETRY, 2001), conforme Figura 22.

Figura 22 – Forma de onda do conversor CC-CC *Buck-Boost*



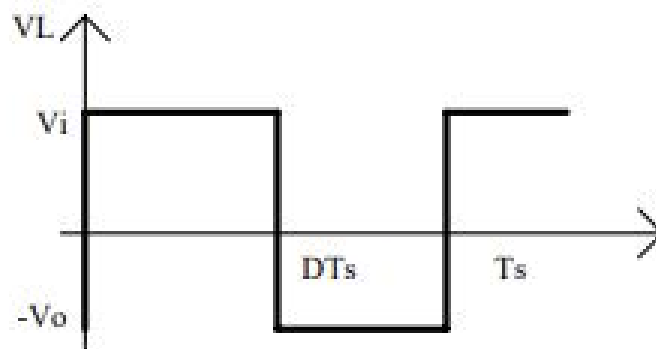
Fonte: Adaptado de Petry (2001)

Possui duas etapas de operação:

- Etapa 1 (Início em 0 até $D.T_s$): Com condução da chave S , a corrente circula no indutor L_o , com fornecimento de energia pela entrada V_i ;
- Etapa 2 (Início em $D.T_s$ até $(1-D).T_s$): No instante de abertura da chave S , o diodo D recebe a energia armazenada no Indutor L e a transfere para a saída.

Na Figura 23, o formato de onda no indutor L :

Figura 23 – Forma de onda do conversor CC-CC *Buck-Boost*



Fonte: Adaptado de Petry (2001)

Tem como equação característica:

$$\frac{D}{1-D} = \frac{V_o}{V_i} \quad (2.6)$$

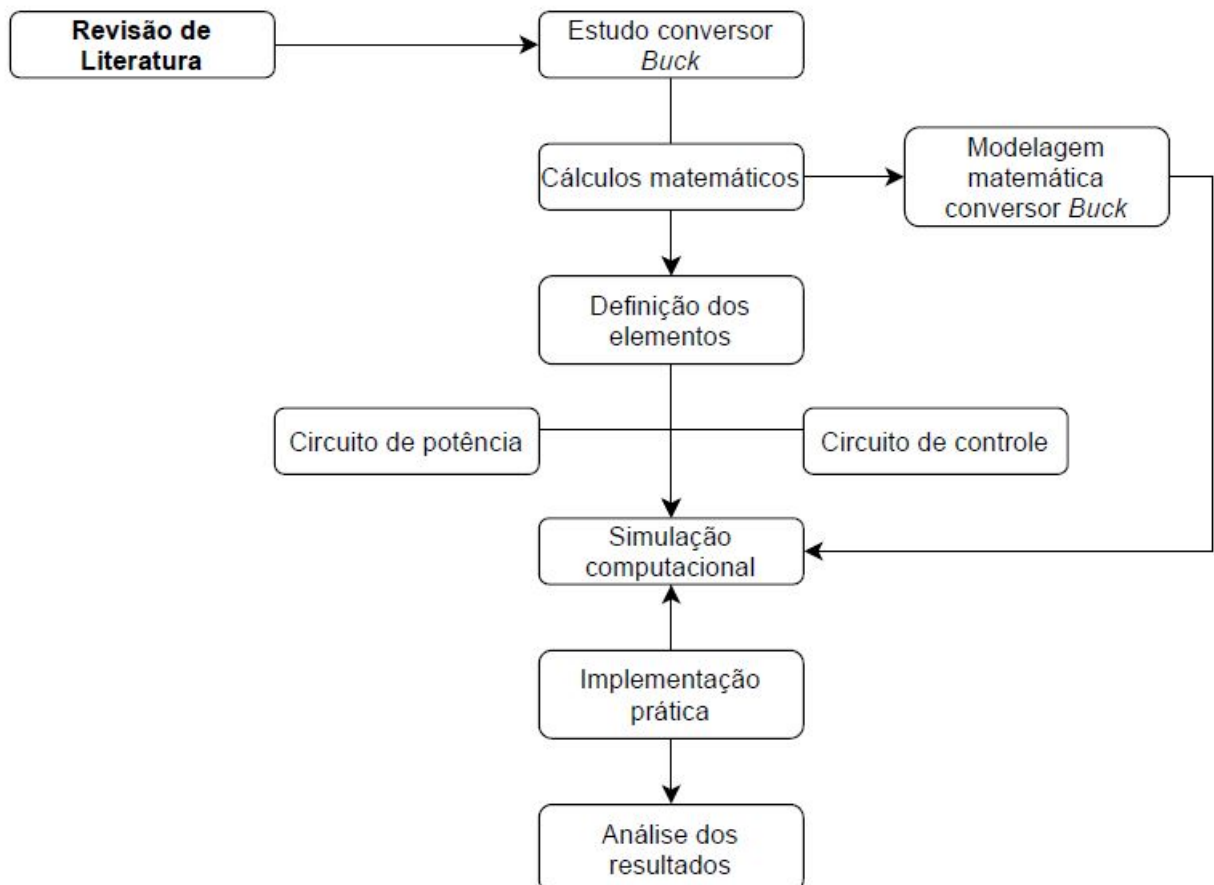
3 METODOLOGIA

Neste capítulo realiza-se a análise das etapas de operação do conversor *Buck*, equacionamento dos componentes e aplicação em circuito, abordagem de comunicação entre módulo ESP e microcontrolador, controle do *Gate Driver* e amostragem de parametrização do sistema.

O conversor *Buck*, definido em vista pela análise bibliográfica, possui baixo custo, fácil implementação, redução dos riscos de operação em seus componentes, aplicabilidade, alto fator de potência e uso comum para fins de dimerização, buscando ofertar alternativa viável em termos comerciais.

Na Figura 24 ilustra-se o fluxograma básico de trabalho com evidência para as principais etapas.

Figura 24 – Fluxograma de trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos estudos de Moraes (2018) e Hart (2012), abordou-se a análise do conversor *Buck* em Modo de Condução Contínua (MCC), apresentando as etapas de operação do conversor, a síntese de componentes, corrente e tensão média nos elementos passivos e parâmetros para

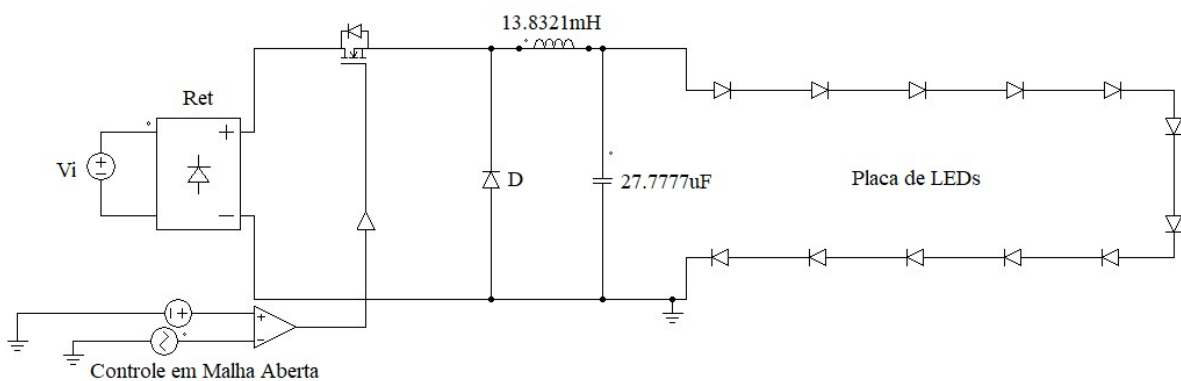
projeto do circuito de potência. A segunda parte teve o aprimoramento e definição dos elementos passivos, com amostragem de formas de onda média e de operação. Na terceira parte, utilizou-se definições de projeto, com aplicação dos valores definidos para demonstração do conversor *Buck* e demonstração dos esforços nos semicondutores. Na quarta parte demonstra-se o projeto do controlador para gerenciamento da corrente de saída.

Na parte da validação das equações e simulações, os *softwares* usados foram PSIM e MATLAB, demonstrando todos valores de implementação e resultados para análise e tomada de decisões. Na etapa de projeto das placas de circuito impresso, utilizou-se o *software* Autodesk EAGLE.

3.1 Etapas de operação do conversor *Buck*

O conversor *Buck* analisado está exposto na Figura 25 e pode ser apresentado observando o modo de modelagem matemática. O método de cálculo para o conversor abaixador utilizado neste trabalho será o circuito médio equivalente, tendo em vista sua facilidade para interpretação e cálculo dos elementos físicos do projeto ideal.

Figura 25 – Modelo conversor *Buck*



Fonte: Elaborado pelo autor

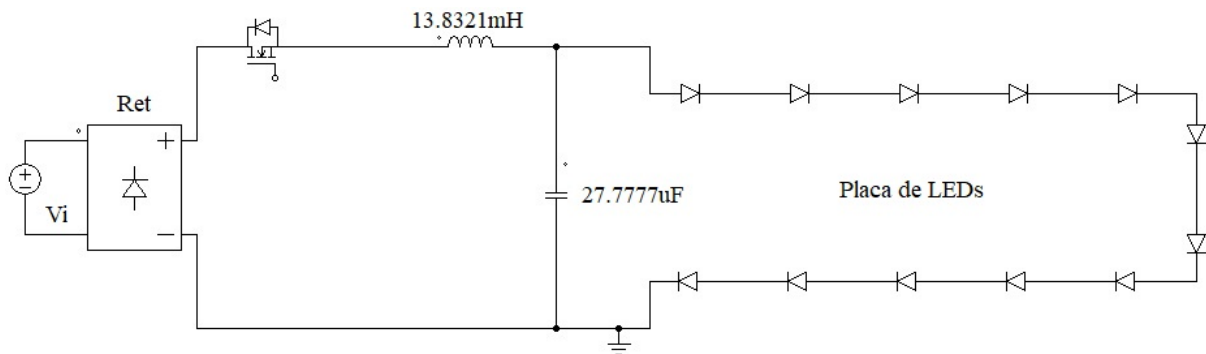
3.1.1 Análise dos semiciclos de operação

No primeiro semiciclo de operação, ocorre o início da operação, com a chave S fechada. No segundo semiciclo de operação, abre-se a chave S e o indutor fica desmagnetizado.

3.1.1.1 Etapas de operação e primeiras equações

A Figura 26 mostra que a chave S, fechada, permite ocorrer condução pelo circuito, abstendo apenas o diodo D que está em modo não operacional. O indutor L magnetiza-se, pois a fonte V_i fornece energia para o mesmo e para a saída do conversor, na resistência de carga R_o , ou seja, diretamente para a placa de LED.

Figura 26 – Etapa 1 de condução do conversor *Buck*



Fonte: Elaborado pelo autor

Tem equações aproximadas médias, ou seja, por baixa mobilidade matemática dos componentes:

$$V_L = V_i - V_o \quad (3.1)$$

$$I_C = I_L - I_o = I_L - \frac{V_o}{R_o} \quad (3.2)$$

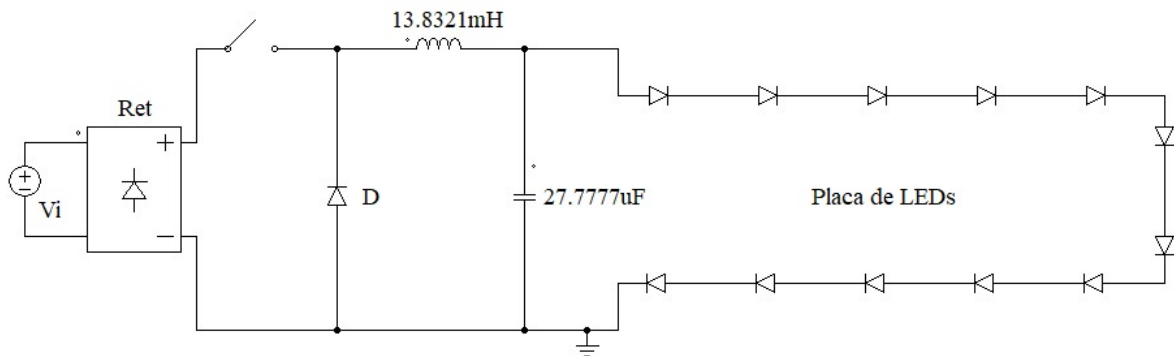
A Figura 27 mostra que, com a chave S aberta, o diodo D entra na condução, com a energia armazenada no indutor L sendo transferida para carga, imaginando-se o indutor L ligado ao terra virtual, até que a chave seja fechada novamente para recarregar o indutor L.

Tem como equações aproximadas médias:

$$V_L = -V_o \quad (3.3)$$

$$I_C = I_L - \frac{V_o}{R_o} \quad (3.4)$$

Calcula-se uma média entre os dois resultados, afim de encontrar a verdadeira tensão no

Figura 27 – Etapa 2 de condução do conversor *Buck*

Fonte: Elaborado pelo autor

indutor L e corrente no capacitor C.

3.2 Projeto do circuito de potência

Para projeto do circuito de potência, abordou-se algumas equações características utilizadas como embasamento para resultados finais, respeitando limitações e critérios de cada item.

3.2.1 Razão cíclica ou *Duty Cycle* do conversor *Buck*

Pelo método da conservação de energia, define-se a tensão média como nula em regime permanente, tendo a equação abaixo como demonstrativo:

$$\frac{1}{T_s} = \int_0^{T_s} V_{med} dt \longrightarrow (V_i - V_o) \cdot D - V_o \cdot (1 - D) \quad (3.5)$$

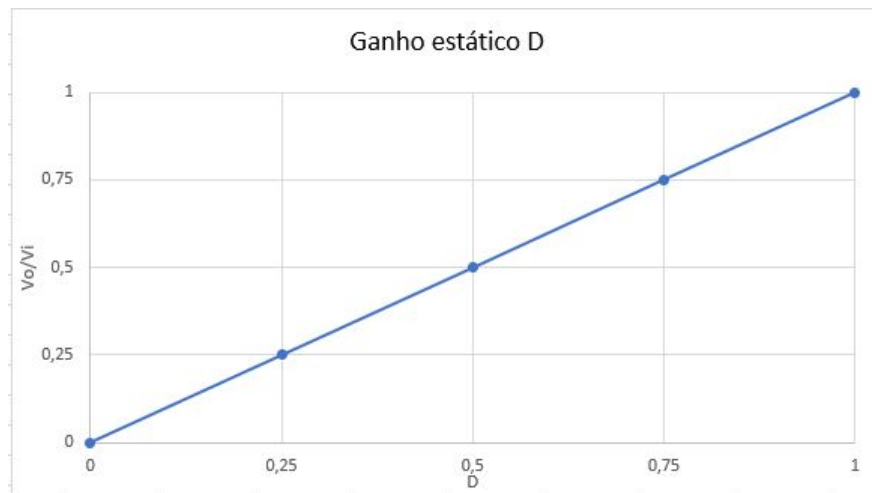
Como resultado, temos:

$$(V_i - V_o) \cdot D = V_o \cdot (1 - D) \longrightarrow D = \frac{V_o}{V_i} \quad (3.6)$$

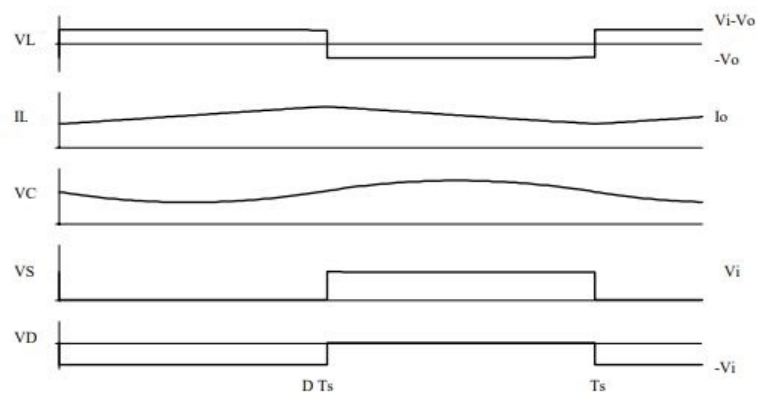
Portanto, obtém-se um gráfico linear de ganho estático linear em função da razão cíclica ou *Duty Cycle* D, exposto na Figura 28.

As principais formas de onda dos principais componentes do circuito na Figura 29.

Para um conversor ideal, a potência de entrada é igual a potência de saída, representada abaixo:

Figura 28 – Razão cíclica do conversor *Buck*

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29 – Principais formas de onda do conversor *Buck*

Fonte: Adaptado de PETRY (2001)

$$P_i = P_o \rightarrow V_i \cdot I_i = V_o \cdot I_o \rightarrow \frac{I_o}{I_i} = \frac{V_i}{V_o} \rightarrow \frac{1}{D} \quad (3.7)$$

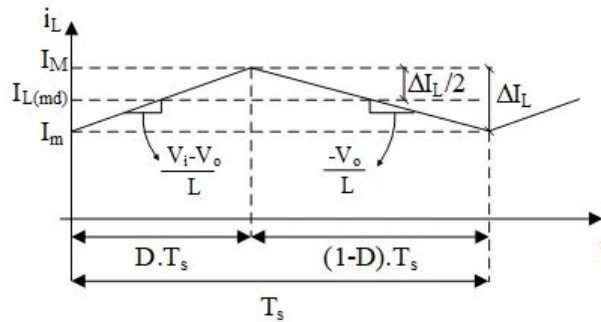
Portanto, as correntes de entrada e saída são inversas e as relações de entrada e saída das tensões são proporcionais, devido a Lei de Conservação das Energias, onde potência de saída tem como igualdade a potência de entrada, ou seja, se há uma corrente fixa na saída, a tensão de saída será maior para compensá-la.

3.2.2 Projeção do Indutor L

Para caracterização do projeto do indutor, antes deve-se observar as formas de onda do mesmo, na Figura 30.

Partindo da equação característica do indutor:

Figura 30 – Principais formas de onda do indutor do conversor *Buck*



Fonte: Adaptado de HART (2012)

$$VL = L \cdot \frac{diL}{dt} = Vi - Vo \quad (3.8)$$

Compondo a malha para cálculo, com o valor de I_m sendo corrente mínima que passa pelo indutor:

$$IL = \frac{Vi - Vo}{L} \cdot t + Im \quad (3.9)$$

A corrente máxima no instante $t = D \cdot Ts$:

$$IM = \frac{Vi - Vo}{L} \cdot D \cdot Ts + Im \quad (3.10)$$

A ondulação de corrente tem como fundamento a diferença entre a corrente máxima e a mínima:

$$\Delta IL = IM - Im = \frac{Vi - Vo}{L} \cdot D \cdot Ts \quad (3.11)$$

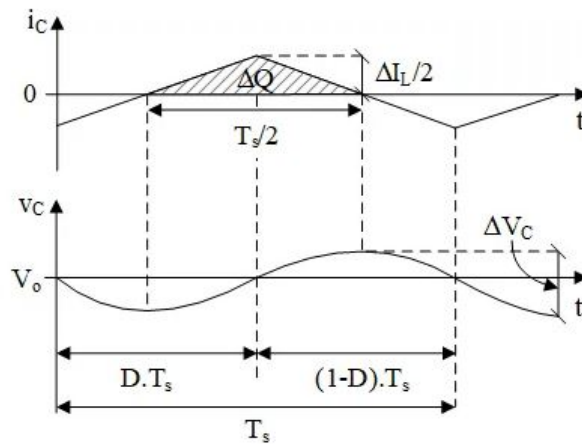
Após todas equações, isola-se o componente L da equação (3.11) e obtem-se a seguinte equação:

$$L = \frac{(Vi - Vo) \cdot D}{fs \cdot \Delta IL} \quad (3.12)$$

3.2.3 Projeção do capacitor C

Considera-se um capacitor ideal, considera-se que a ondulação de corrente no indutor passa pelo capacitor, unicamente, conforme formas de onda de tensão e corrente da Figura 31.

Figura 31 – Principais formas de onda do capacitor do conversor *Buck*



Fonte: Adaptado de HART (2012)

Quando a corrente no capacitor fica positiva, o mesmo tem sua carga total, representada pela variação da carga ΔQ :

$$\Delta Q = C \cdot \Delta V_C \quad (3.13)$$

Porém, como Q torna-se uma área, pode-se integrar o mesmo onde tem-se corrente em determinado tempo, como elucidado abaixo:

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta I_L}{2} \cdot \frac{T_s}{2} \rightarrow \frac{\Delta I_L \cdot T_s}{8} \quad (3.14)$$

Igualando as equações (3.13) e (3.14), temos:

$$C = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_s \cdot \Delta V_C}, \text{ considerando : } f_s = \frac{1}{T_s} \quad (3.15)$$

3.2.4 Dimensionamento dos semicondutores

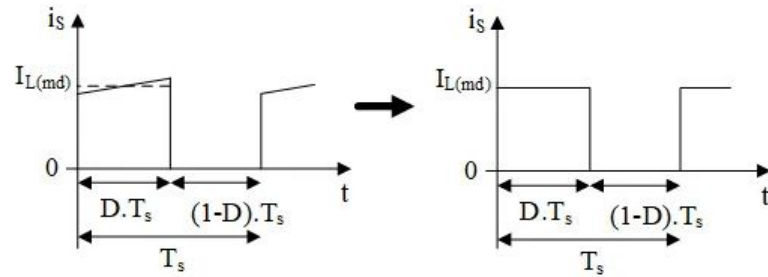
Prevendo perdas por condução, dimensionou-se os parâmetros que sustentam os semicondutores. A tensão máxima da chave S e do diodo D , no modo de operação da Etapa 2, quando a chave S encontra-se bloqueada, relaciona-se abaixo:

$$V_{S_{max}} = V_{D_{max}} = V_i \quad (3.16)$$

Para corrente média e eficaz na chave S , estipula-se as formas de onda da Figura 32.

Assim, os valores médios se apresentam abaixo:

Figura 32 – Principais formas de onda média e eficaz da chave S do conversor *Buck*



Fonte: Adaptado de HART (2012)

$$IS_{med} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} IS dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{D.T_s} IL_{med} dt \longrightarrow D \cdot IL_{med} \quad (3.17)$$

$$IS_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} IS^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{D.T_s} IL_{med}^2 dt} \longrightarrow \sqrt{D} \cdot IL_{med} \quad (3.18)$$

Pela analogia mencionada acima, obtém-se as equações de corrente média e corrente eficaz no diodo:

$$ID_{med} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} ID dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{(1-D).T_s} IL_{med} dt \longrightarrow (1 - D) \cdot IL_{med} \quad (3.19)$$

$$ID_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} I_D^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{(1-D).T_s} IL_{med}^2 dt} \longrightarrow \sqrt{(1 - D)} \cdot IL_{med} \quad (3.20)$$

Os valores médios utilizados aproximam-se dos valores reais. Para calcular os valores de corrente máxima na chave e no diodo, considera-se o índice de ondulação no indutor, sendo que possuindo o valor de pico de corrente no indutor, o mesmo equivale ao valor de pico de corrente na chave e no diodo, apresentado abaixo:

$$IS_{max} = ID_{max} = IL_{med} + \frac{\Delta IL}{2} \quad (3.21)$$

3.3 Especificações do conversor *Buck*

Nesta seção, a metodologia e as especificações do projeto são validadas, obtendo-se valores dos elementos passivos e dos esforços nos semicondutores.

O conversor *Buck* foi projetado pelas especificações da Tabela 4 abaixo, com posterior simulação e futura implementação prática, definindo suas grandezas.

Tabela 4 – Especificações do projeto do conversor *Buck*

Definições do projeto	Valores
Tensão de entrada (V_i)	311V
Resistência dos diodos na saída (R_o)	26.4 Ω
Frequência de chaveamento (f_s)	50kHz
Corrente de saída (I_o)	0.8A
Tensão de saída estimada (V_o)	72V
Ondulação da tensão de saída (ΔV_c)	1%
Ondulação da corrente no indutor (ΔiL)	10%

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.1 Dimensionamento dos componentes do conversor *Buck*

Primeiramente, define-se a razão cíclica do conversor, conforme (3.7):

$$D = \frac{V_o}{V_i} \longrightarrow D = \frac{72}{311} \longrightarrow D = 0,2315 \quad (3.22)$$

A potência de saída está relacionada conforme (3.8):

$$P_o = I_o.V_o \longrightarrow P_o = 0,8.72 \longrightarrow P_o = 57,6W \quad (3.23)$$

Com os valores encontrados acima, projeta-se o indutor L, conforme (3.13):

$$L = \frac{(V_i - V_o).D}{f_s.\Delta iL} \longrightarrow L = \frac{(311 - 72).0,2315}{50000.(0,10,8)} \longrightarrow L = 13,8321mH \quad (3.24)$$

Para comprovação do valor de 10% da ondulação da corrente de saída i_o (3.12):

$$\Delta iL = \frac{(V_i - V_o).D}{f_s.L} \longrightarrow \Delta iL = \frac{(311 - 72).0,2315}{50000.(13,8321m)} \longrightarrow \Delta iL = 0,0800A \quad (3.25)$$

Finalmente, o valor do capacitor, conforme equação (3.16):

$$C = \frac{\Delta iL}{8.f_s.\Delta V_c} \rightarrow C = \frac{0,0800}{8.50000.0,01.72} \rightarrow C = 27,7777\mu F \quad (3.26)$$

Os valores dos esforços nos semicondutores calculados estão contidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações dos semicondutores do conversor *Buck*

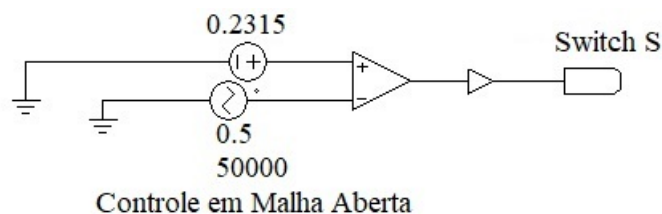
Parâmetros	Valores	Equação
Tensão máxima $VS_{max} = VD_{max}$	311V	(3.16)
Corrente média chave IS_{med}	0,1852A	(3.17)
Corrente eficaz chave IS_{ef}	0,3849A	(3.18)
Corrente média diodo ID_{med}	0,6148A	(3.19)
Corrente eficaz diodo ID_{ef}	0,7013A	(3.20)
Corrente máxima $IS_{max} = ID_{max}$	0,84A	(3.21)

Fonte: Elaborado pelo autor

3.4 Modelagem e simulação do Controle

Para projetar o conversor *Buck* para controle de um *driver*, deve-se controlar a variável de corrente, que aciona e gera brilho aos LEDs. Para controle em malha aberta, o mais simples e prático, valida-se a primeira etapa de controle. Porém, este sistema caracteriza-se por sua variação, principalmente se aplicado um distúrbio, este não corrigido por não haver um sensor na saída do conversor. Apresenta-se um diagrama simplificado do processo na Figura 33.

Figura 33 – Controle em Malha Aberta do conversor *Buck*.

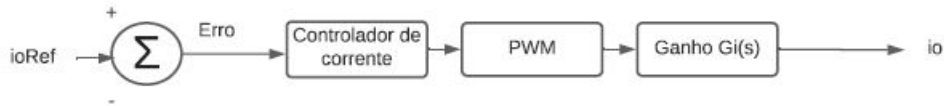


Fonte: Elaborado pelo autor

Em paralelo, obtém-se o diagrama de blocos do controle em malha aberta, não empre-

gando sensor, com possibilidade de alternâncias de variável de saída, conforme Figura 34.

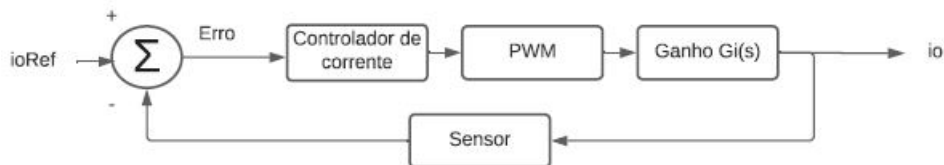
Figura 34 – Diagrama de blocos do controle em Malha Aberta do conversor *Buck*.



Fonte: Elaborado pelo autor

Por identificarem-se falhas, adotou o sistema de controle em malha fechada, implementando um sistema de controle de corrente eficaz. A Figura 35 apresentou o diagrama de blocos do controle em malha fechada.

Figura 35 – Diagrama de blocos do controle em Malha Fechada do conversor *Buck*.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para fins de projeto, iniciou com a definição da Função de Transferência de malha aberta a partir para controle da corrente no indutor pela razão cíclica, representando a Função de Transferência do conversor *Buck*:

$$G_i(s) = \frac{V_i \cdot (C \cdot s + \frac{1}{R_o})}{L \cdot C \cdot s^2 + \frac{L}{R_o} + 1} \quad (3.27)$$

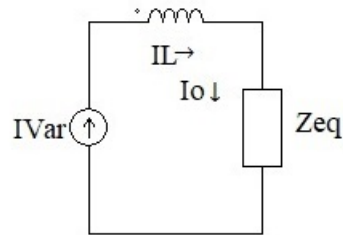
A abordagem pela corrente no indutor tornou-se necessária pela Lei de Kirchoff das Correntes, uma vez que tratou-se a corrente que atua na placa de LEDs a mesma que opera no indutor. Na malha apresentada abaixo, considerou-se o valor da resistência de carga equivalente como na equação, seguida da Figura 36.

$$Z_{eq}(s) = \frac{1}{s \cdot C} // R_o = \frac{R_o}{R_o \cdot C \cdot s + 1} \quad (3.28)$$

Com utilização do *software* MATLAB, sintonizou-se os ganhos do controlador para projeto da Função de Transferência. Descreve-se os parâmetros na Figura 37.

Captando os ganhos K_p e K_i do *software*, definiu-se o controlador de corrente da Figura 38.

Figura 36 – Operação com malha na saída do conversor.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 37 – Parâmetros *MATLAB*

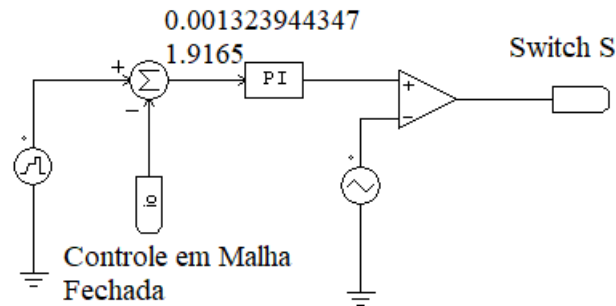
Controller Parameters	
	Tuned
Kp	1.9165
Ki	1447.5684
Kd	n/a
Tf	n/a
Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	4.87e-05 seconds
Settling time	7.95e-05 seconds
Overshoot	0.903 %
Peak	1.01
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	89 deg @ 4.32e+04 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Fonte: Elaborado pelo autor

$$H(s) = \frac{1,9165s + 1447,5684}{s} \quad (3.29)$$

A planta, representada no diagrama de blocos da Figura 35 por $G_i(s)$, possui como definição o processo de interesse, no caso o conversor em conjunto com o ganho de corrente, tendo na sua saída a variável a ser controlada. O sensor representa a medição da variável, tendo seu erro comparado ao sinal de referência e enviado ao controlador. O controlador determina o sinal de controle ou variável manipulada a ser enviada ao atuador, no caso o sinal *Pulse Width Modulation* (PWM), pois sendo um conversor chaveado, necessita-se pulsos para acionamento da chave. Demonstrou-se o controle em malha fechada na Figura 38.

Figura 38 – Controle em Malha Fechada do conversor Buck.



Fonte: Elaborado pelo autor

3.5 Discretização do Controlador

Conforme definições anteriores, possibilitou-se realização do processo de discretização do controlador para implementação em microcontrolador, com método de transformação bilinear (método de Tustin), mapeando variáveis matematicamente, transformando variáveis $H(s)$ de domínio no tempo em domínio no tempo discreto $H(z)$. Definiu-se equação do método de Tustin na Equação (3.30).

$$s = \frac{2}{Ta} \cdot \frac{(z - 1)}{(z + 1)} \quad (3.30)$$

Em seguida, substituindo os valores conforme Equação 3.30, obtém-se o seguinte resultado para taxa de amostragem Ta de 0,2ms.

$$H(z) = \frac{2,06125684z - 1,77174316}{z - 1} \quad (3.31)$$

Para comprovação de simulação no *PSIM*, deve-se formular a Equação de Diferenças, que permite construção de modelos matemáticos de modelos físicos como o conversor. Origina-se pela Equação 3.31, seguindo conforme passos.

$$H(z) = \frac{2,06125684z - 1,77174316}{z - 1} \cdot \frac{(z^{-1})}{(z^{-1})} \quad (3.32)$$

Para facilitar o cálculo, define-se as variáveis abaixo.

$$a_0 = 2,06125684; a_1 = -1,77174316; b_0 = 1; b_1 = -1.$$

Continua-se com o cálculo igualando à função de Y por X para utilização no tempo discreto.

$$\frac{Y[n]}{X[n]} = \frac{a_0[n-1] + a_1[n]}{b_0[n-1] + b_1[n]} \quad (3.33)$$

Multiplicando cruzado, obtém-se:

$$Y[n].(b_0[n-1] + b_1[n]) = X[n].(a_0[n-1] + a_1[n]) \quad (3.34)$$

Isola-se $Y[n]$ para posterior implementação:

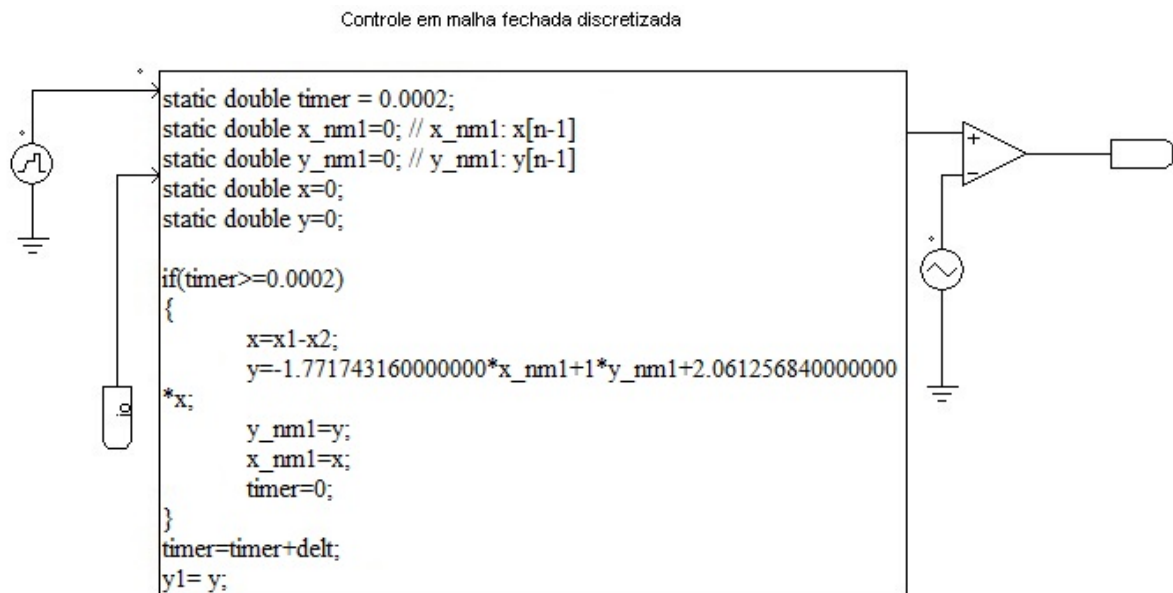
$$Y[n] = X[n].a_1[n-1] + X[n].a_0[n] - Y[n].b_1 \quad (3.35)$$

Recolocando as variáveis no seu respectivo espaço, tem-se a equação completa.

$$Y[n] = -1,77174316X[n-1] + 1Y[n-1] + 2,06125684X[n] \quad (3.36)$$

No *software* PSIM, implementa-se um bloco que permite inserir um algoritmo de controle de forma simplificada chamado *Simplified C Block*, conforme Figura 39.

Figura 39 – Implementação da discretização do controlador.



Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que o bloco *Simplified C Block* possui duas entradas, uma para a referência de

corrente do indutor, representada pela *Label* I_o e outra com a função rampa unitária discreta, que possui função de suavizar o início de operação do circuito, retendo picos de corrente indesejados, protegendo circuito de distúrbios. Para ocorrer o funcionamento, compara-se dois sinais, um com baixa frequência (sinal modulante), dada pela corrente de saída somada à função rampa e outro com alta frequência (sinal da portadora), dada pela variação da onda triangular. Como resultado, gera-se um sinal com frequência fixa e largura de pulso variável. A função encontrada na Equação (3.36) está descrita no código, como sua taxa de amostragem de 10% da frequência para tornar viável a implementação, levando informações à parte positiva do comparador.

3.6 Criação dos códigos de controle e comunicação

Utilizaram-se dois *softwares* para criação dos códigos de implementação no microcontrolador e no Arduino Uno: PIC C COMPILER e Arduino IDE. A utilização do Arduino permite a criação de códigos interativos, facilitando a transmissão de dados com o microcontrolador e o módulo ESP-01.

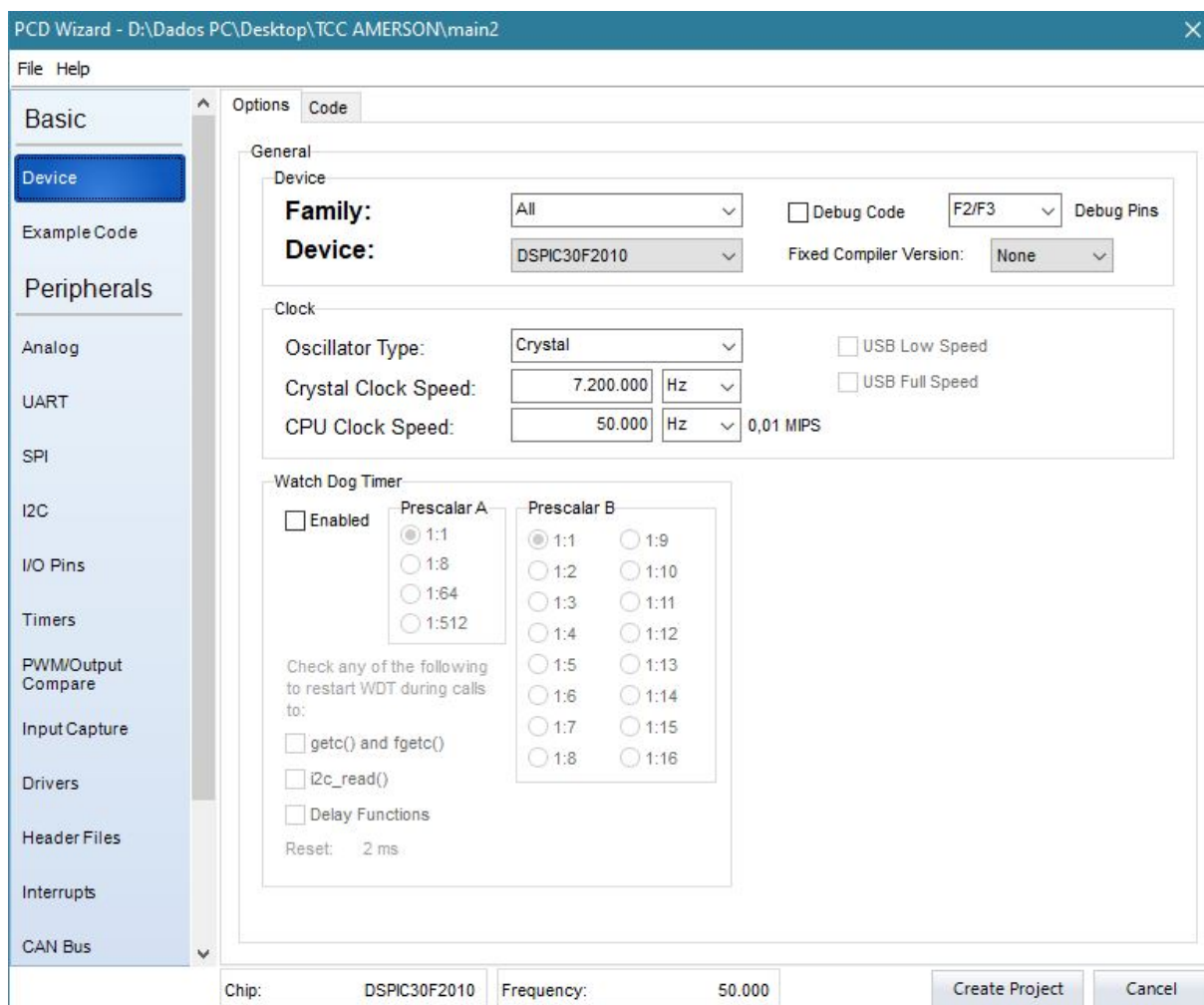
3.6.1 Código microcontrolador

Com a validação em malha aberta, a criação do código do microcontrolador torna-se necessária. Utilizando o *software* PIC C COMPILER, define-se os parâmetros iniciais, os adequando ao projeto conforme Figura 40.

Disponível no Apêndice D, nos primeiros ajustes, escolhe-se o tipo de microprocessador utilizado no projeto, configurando valor do cristal e frequência. Nota-se que a frequência interna deve ser configurada num valor de quatro vezes da frequência externa, para maior precisão e melhor funcionamento do sistema oscilatório. A seguir, habilita-se a comunicação serial e introduz uma interrupção para implementar a função calculada conforme Equação (3.36) descrita na discretização, respeitando um período de capacidade física do controlador. Por fim, define-se as conversões analógico-digitais e habilitam-se as interrupções para controle do sistema.

3.6.2 Código Arduino Uno/ESP-01

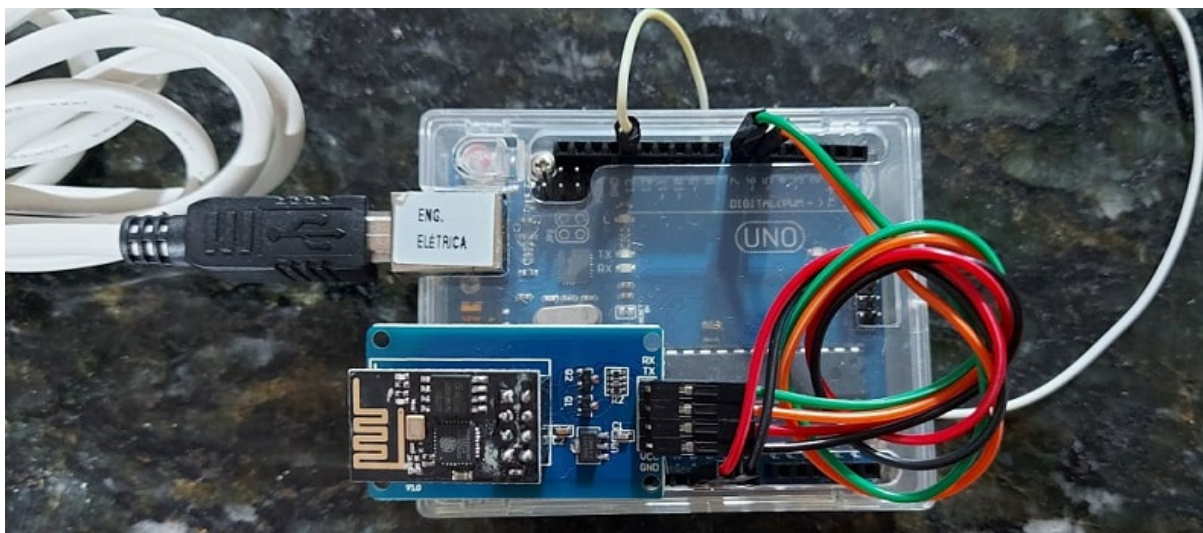
Devendo estar conectado ao ESP-01 para adquirir sinal de internet, o Arduino Uno possui vantagens como facilidade de escrita em códigos, interface limpa e usual e bibliotecas

Figura 40 – Parametrização inicial *software* PIC C COMPILER

Fonte: Elaborado pelo autor

que permitem controlar qualquer objeto interativo. No código, mostrado no Apêndice E, inicia-se adicionando a biblioteca do módulo ESP e a comunicação, feita de maneira serial pelos pino 6 (receptor) e pino 7 (transmissor). Configura-se o controle de acesso ao sistema com solicitação de usuário e senha, com estabelecimento de conexão e estado atual do sistema, ligado ou desligado. Emprega-se ao pino 13 (saída digital), a função de enviar os dados ao sistema, comunicação serial. Alimenta-se todo sistema com 5V, utilizando um adaptador conversor para o módulo ESP-01 que possui tensão de 3,3V. A Figura 41 mostra a ligação utilizada.

Figura 41 – Ligação Arduino/ESP



Fonte: Elaborado pelo autor

Após conectado à internet, inicia-se o *Webserver*, com leitura de requisição do usuário e os *frames* pré-definidos, utilizando a logomarca do curso da Elétrica e da Universidade, conforme Figura 42.

Figura 42 – Logo utilizada na simulação



Fonte: Elaborado pelo autor

As atualizações ocorrem conforme definições do usuário, com *delay* de 10 milisegundos para obter tempo de resposta satisfatório.

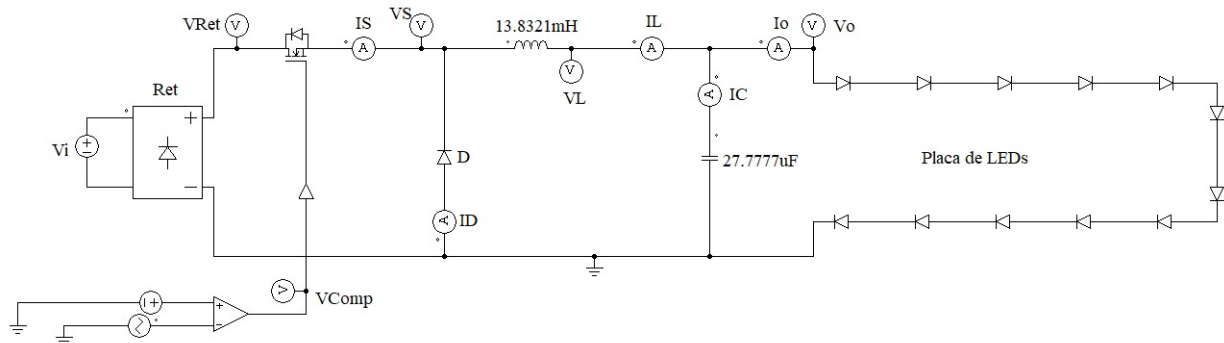
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo abordou-se os resultados obtidos seguindo procedimentos do Capítulo 3. Inicialmente, avalia-se a corrente e tensão na saída do conversor *Buck*, demonstrando sua viabilidade em malha aberta. Após, comparou-se os valores de entrada e de saída, parametrizando relação de potência. Por fim, analisou-se questões pertinentes à implementação não demonstrada, afim de estabelecer critérios e justificativas para futuro funcionamento pleno.

4.1 Etapa de Simulação do sistema

Para validação dos cálculos, utilizou-se o *software* PSIM. A Figura 43 mostra o circuito montado para simulação.

Figura 43 – Simulação computacional do conversor *Buck* utilizando *software* PSIM.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Implementação Prática do Sistema

Com base nas fórmulas descritas neste capítulo, especificou-se os componentes com valores comerciais para fabricação do conversor *Buck* e a placa de controle. Em seguida, iniciou o projeto no *software* Autodesk EAGLE, dividindo esta etapa em três partes: potência, controle e aquisição de dados. Nos apêndices A e B os diagramas elétricos das placas são apresentados.

4.2.1 Placa de potência

A quantidade e modelo dos componentes de valores comerciais utilizados para a etapa de potência podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6 – Especificações dos componentes do conversor *Buck*

Componente	Modelo
Retificador Ret	01 x D2SB60, 600V, 1,5A
Capacitor entrada C1	01 x 220 uF, 305V, Eletrolítico
Chave de potência S	01 x IRF840, 500V, 8A
Diodo de roda livre D	01 x MUR460, 600V, 40A
Indutor L	01 x 13,8321mH, 0,8A
Capacitor de saída C2	01 x 33uF, 185V, Eletrolítico

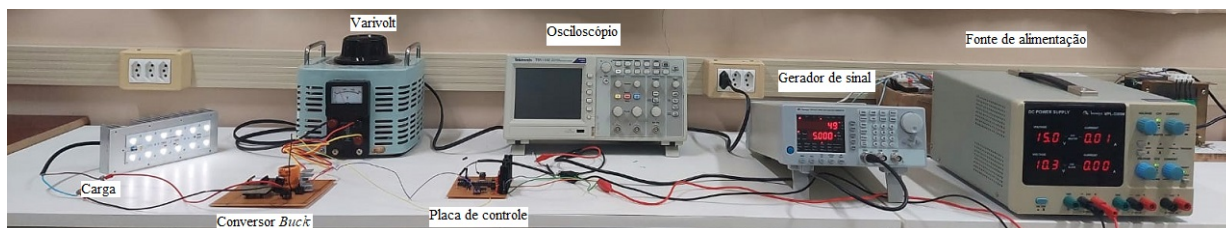
Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.2 Placa de controle

Na etapa de controle de chaveamento, regulação de tensão e aquisição de dados, desenvolveu-se uma placa de controle, com seus componentes descritos na Tabela 7.

Como implementação de projeto final, as placas foram fabricadas, como demonstrado na Figura 44.

Figura 44 – Implementação prática



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 7 – Especificações dos componentes da placa de controle projetada

Componente	Modelo
Regulador de tensão 5V	01 x LM7805
Regulador de tensão 12V	01 x LM7812
Microcontrolador	01 x dsPIC30F2010
Sensor de corrente	01 x ACS712ELCTR-05B-T
<i>Gate driver</i> de acionamento	01 x IR2110
Capacitor <i>bootstrap</i>	01 x 4,7 uF, Eletrolítico

Fonte: Elaborado pelo autor

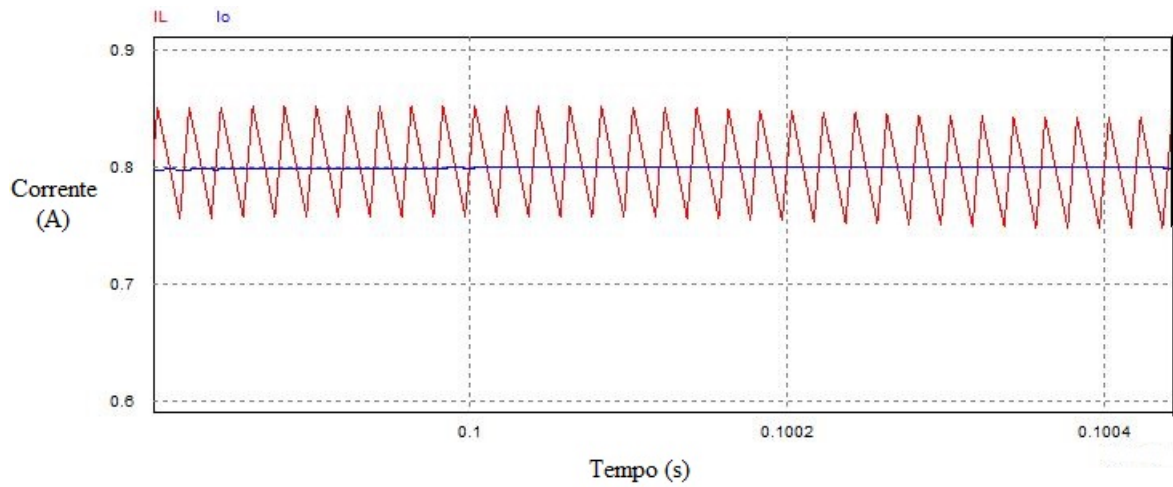
4.3 Validação da saída do conversor *Buck*

Nesta seção valida-se a tensão e corrente de saída no conversor *Buck*, demonstrando os valores simulados em comparação ao implementado.

4.3.1 Tensão e corrente de saída

Demonstrou-se na simulação que a corrente no elemento passivo indutor L deve ser similar aos resultados da saída I_o . A corrente de saída, estável em 0,8A, serve como referência da corrente do indutor I_L , esta representada pela média entre o valor mais baixo e o valor mais alto, atingindo um valor de 0,8122A, ou seja, para a corrente I_o continuar fixa, a corrente no indutor I_L deve possuir um pequeno ganho para compensação no final, conforme comportamento ilustrado na Figura 45.

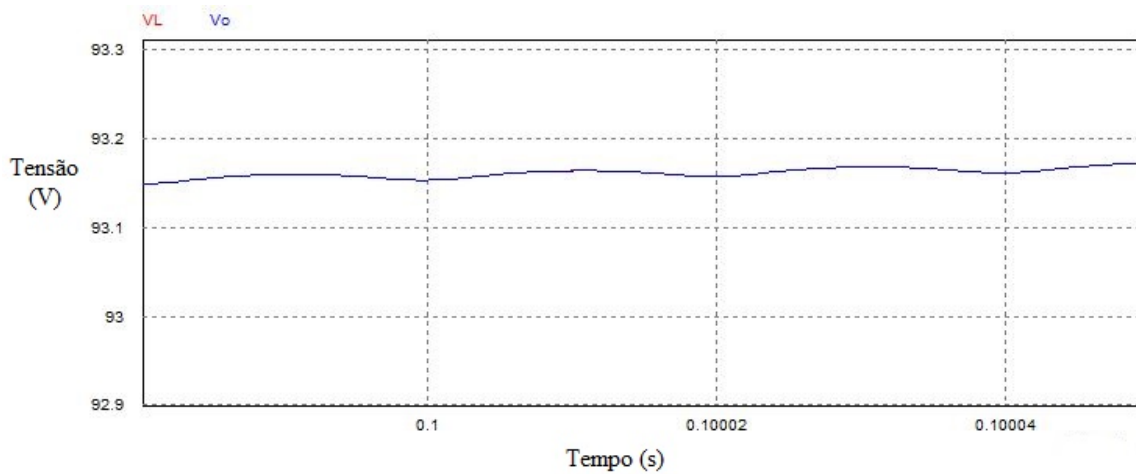
Figura 45 – Forma de onda da corrente de saída I_o igual à corrente média no indutor L (Simulado).



Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores de tensão simulada no indutor L são apresentados na Figura 46.

Figura 46 – Forma de onda da tensão de saída V_o igual à tensão no indutor L (Simulado).

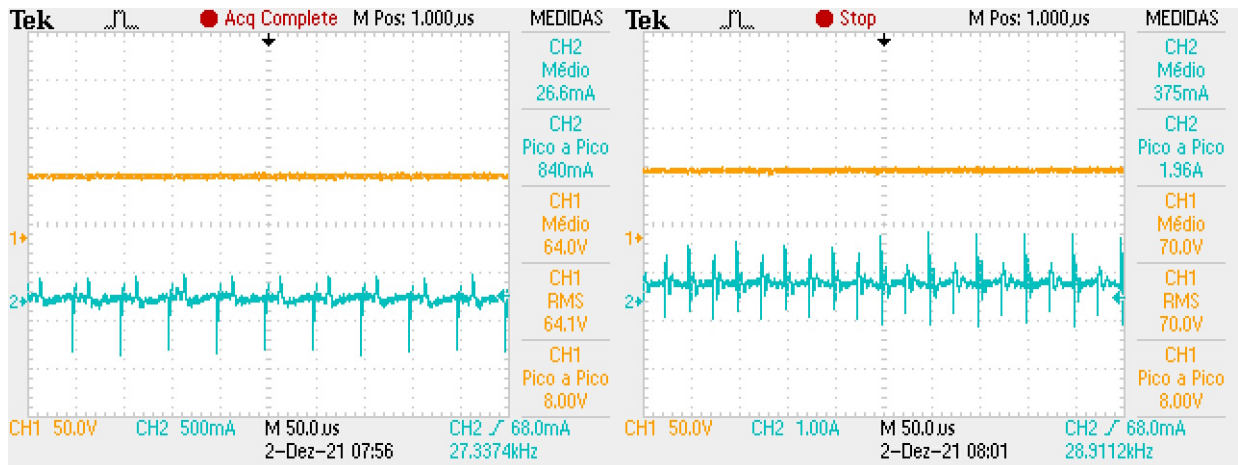


Fonte: Elaborado pelo autor

Notou-se que a tensão no indutor e na saída ficam com valor maior que o estimado pela modelagem matemática na simulação. Como controlou-se corrente no sistema, com uma potência de saída fixa, a tensão deve adaptar-se para manter os valores de interesse contidos no padrão estabelecido. Como os diodos utilizados possuem característica não-linear, ou seja, conduz por tensão e tem saída em corrente, justifica-se tal valor de tensão na saída.

Na Figura 47 representou-se as formas de onda de tensão e corrente na saída do conversor *Buck* implementado, alimentando a carga.

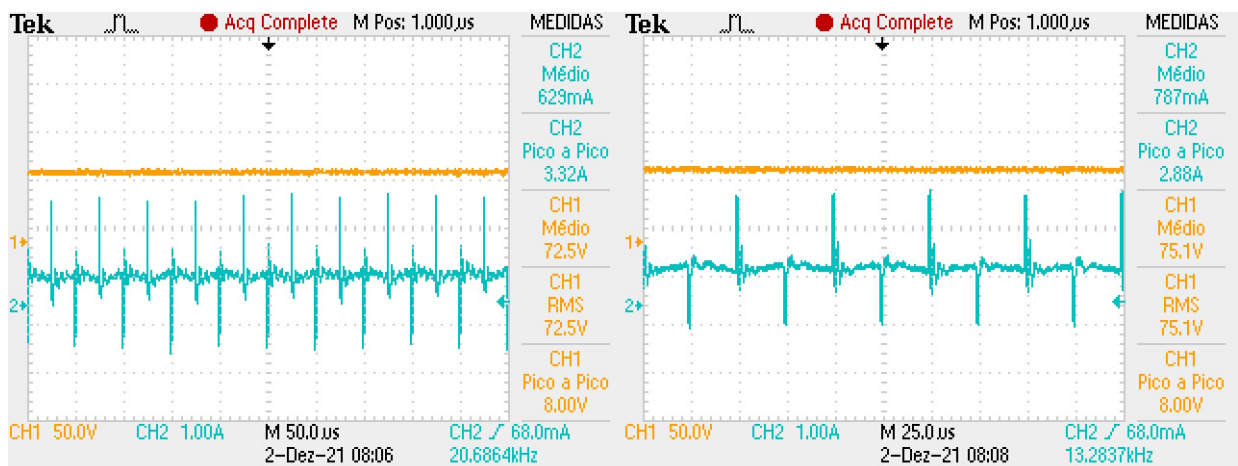
Figura 47 – Tensão e corrente de saída prático parcial



Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que há estabilidade na forma de onda de tensão na saída, sendo esta ajustada e fixa. Para a forma de onda de corrente, ocorrem *ripples*, corrigidas com a redução da frequência, aumentando os intervalos que ocorre a variação de corrente na saída, considerando o modo de condução contínuo. Porém, na prática, o circuito possui capacitâncias e indutâncias parasitas nos componentes, provocando ressonâncias relativas na forma de onda. A Figura 48 elucida o aumento da tensão e corrente, chegando próximo ao máximo estabelecido em projeto para malha aberta, ou seja, sem controle das variáveis de saída, resultando em tensão adicional de 3,1V em relação aos valores calculados previamente.

Figura 48 – Tensão e corrente de saída prático final



Fonte: Elaborado pelo autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral proposto foi projetar e implementar um conversor *Buck* operando em Modo de Condução Contínuo com aplicação em *driver* dimerizável com tecnologia LED, apontado para utilização em luminárias públicas, com espaço para mudanças e inovações.

Inicialmente, buscou-se contextualizações para entendimento do projeto, baseando-se em pesquisas literárias e científicas com resultados assertivos. Optou-se pela utilização de um conversor *Buck* com operação em MCC, garantindo que as características para este trabalho sejam satisfatórias. Com base no referencial teórico, definiu-se um modelo de conversor estático e componentes com custo baixo de aquisição, tornando possível uma implementação prática. Deste modo, simulou-se o comportamento do sistema para ligação de uma luminária como um todo, desde a carga dos elementos até o amostragem de corrente de saída, ligando a carga. Após, desenvolveu-se os projetos de controle, potência e modelagem matemática do conversor e controlador com auxílio dos *softwares* MATLAB e PSIM.

Em seguida, desenvolveu-se os projetos das placas de controle e potência, com auxílio do *software* Autodesk EAGLE. Estabeleceram-se critérios para escolha dos componentes com valor comercial, assim como a discretização do controlador para implementação digital.

Os resultados foram obtidos com testes em bloco. Primeiramente, utilizou-se uma resistência de carga na saída do conversor *Buck* afim de analisar o comportamento do circuito, realizar medições e testar componentes. Após, trocou-se a resistência de carga linear pela luminária, afim de verificar o comportamento da corrente nos LEDs, elementos não-lineares. Com a amostragem alcançada, avaliaram-se as placas de controle e potência interligadas, empregando nos testes equipamentos do laboratório. Ocorreu uma limitação da corrente de saída quando utilizada as placas interligadas, devido ao *Gate Driver* possuir duas saídas de controle e o sistema ser abastecido com apenas uma saída. Ainda assim, em malha aberta, os resultados foram satisfatórios, tendo em vista que a potência alcançada foi condizente com o calculado como parâmetro inicial de projeto, apresentado no Capítulo 3. Os códigos de implementação da comunicação e do controlador tornam-se condizentes, podendo ser ajustados conforme testes práticos.

Propõe-se como continuação do trabalho a implementação do sistema em malha fechada do conversor e aquisição de dados por sensor de corrente e tensão, formulando a potência do sistema. Sugere-se o desenvolvimento de uma rede de comunicação em protocolo LoRa, com maior alcance e segurança de dados. Por fim, recomenda-se comparação dos resultados em malha aberta e fechada, aplicando surtos na saída do sistema para comprovação de eficácia.

REFERÊNCIAS

- ABNT. ABNT 5101:2018. 2018. Disponível em: <<http://universidadeniltonlins.com.br/wp-content/uploads/2019/04/NBR-5101-OK.pdf>>.
- ABRASI. **Dados do Setor - Cadastro Nacional de Pontos de Iluminação Pública**. 2008. Disponível em: <<http://www.abrasi.org.br/iluminacao-urbana/2/dados-do-setor>>.
- ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 888, 30 DE JUNHO DE 2020. p. 1–3, 2020.
- ARAUJO, J. F. **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS (EMI) PRODUZIDAS POR LÂMPADAS LED: UMA ANÁLISE MULTICRITÉRIO**. 121 p. Tese (Doutorado) — UFF - Universidade Federal Fluminense, 2019.
- AZUOS, A. **LUMINOTÉCNICA: TEMPERATURA DE COR E REPRODUÇÃO DA COR DA LUZ**. 2015. Disponível em: <<http://alessandroazuos.blogspot.com/2015/04/luminotecnica-parte-0308-temperatura-de.html>>.
- BLATT, R. **Eficiência Luminosa e Energética**. 2014. Disponível em: <<https://administradores.com.br/artigos/eficiencia-luminosa-e-energetica>>.
- BRUDEKI, N. M. et al. **Gestão de Serviços Públicos Municipais**. Primeira e. Curitiba/PR: [s.n.], 2013. 344 p.
- CAMPOS, É. T. **Luminosidade, cores e fotometria**. Tese (Doutorado) — UnB - Universidade de Brasília, 2017.
- CAMPOS, L. D.; SANTOS, G. C.; ROBERTO, J. T. S. Redução no Consumo de Energia Utilizando Tecnologia LED. p. 24, 2012.
- CIE. **RECOMMENDED SYSTEM FOR MESOPIC PHOTOMETRY BASED ON VISUAL PERFORMANCE**. 2021. Disponível em: <<https://cie.co.at/publications/recommended-system-mesopic-photometry-based-visual-performance>>.
- COPEL Distribuição. Manual de Iluminação Pública. p. 39, 2012. Disponível em: <[https://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/F5F8DB1E97503339032574F1005C8FF9/\\$FILE/MANUAL_IP_20120816.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/F5F8DB1E97503339032574F1005C8FF9/$FILE/MANUAL_IP_20120816.pdf)>.
- COPEL DISTRIBUIÇÃO. Manual de Iluminação Pública - Superintendência de Engenharia de Distribuição. p. 40, 2012.
- DAMBINSKI, L. P. **Aplicação Do Programa Nacional De Iluminação Pública Eficiente (Procel-Reluz)**. 79 p. Tese (Doutorado) — UFPR - Universidade Federal do Paraná, 2007.
- DEMAPE. Manual do Reator. 2013.
- EXATI. **IoT: Internet das Coisas será adiantada com iluminação pública**. 2020. Disponível em: <<https://blog.exati.com.br/iot-internet-das-coisas/>>.

FARIA, A. C. **Iluminação Sustentável : Os Benefícios Do Uso Da Tecnologia Led Nos Projetos De Iluminação**. 131 p. Tese (Doutorado) — PUC - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2014.

FELICISSIMO, A. **Lâmpadas de Multivapores Metálicos**. 2006. 6 p. Disponível em: <http://www.lumearquitetura.com.br/pdf/ed03/ed_03_Aula.pdf>.

GARTNER. **How to Streamline Strategic Planning for Your Function**. 2021. Disponível em: <<https://www.overleaf.com/project/604510916fb0ac81da0e1b67>>.

GLIGHT. **Diferença entre Luminância e Iluminância**. 2019. Disponível em: <<https://www.glight.com.br/blog/diferenca-entre-luminancia-e-iluminancia/>>.

GRANDO, F. O. **Avaliação Comparativa de Sistemas de Iluminação Pública em Caminho de Pedestres Considerando Efeitos Mesópicos**. 237 p. Tese (Doutorado) — UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

GUARINELLO, T. Q. **TECNOLOGIA DE ESTADO SÓLIDO: IMPACTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS**. 85 p. Tese (Doutorado) — UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

GUERRINI, D. P. **Iluminação: Teoria e Projeto**. Primeira e. São Paulo/SP: [s.n.], 2007.

HART, D. W. **Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos**. Primeira e. Porto Alegre: [s.n.], 2012.

HELERBROCK, R. **O que é onda?** 2021. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-onda.htm>>.

IES. LM79:2008. 2008.

ILUMININ. **Tipos de Iluminação Pública**. 2019. Disponível em: <<https://blog.iluminim.com.br/tipos-de-iluminacao-publica/>>.

INMETRO. **Goniofotometria e Suas Contribuições para a Iluminação Pública**. 2013.

INMETRO. **Lâmpada LED**. 2017.

JAWHAR, I.; MOHAMED, N.; AL-JAROODI, J. **Networking and Communication for Smart City Systems**. **2017 IEEE SmartWorld Ubiquitous Intelligence and Computing, Advanced and Trusted Computed, Scalable Computing and Communications, Cloud and Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation, SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCOM/IOP/SCI 2017** -, IEEE, p. 1–7, 2018.

JUNIOR, J. S. S. **O que é a luz?** 2021. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-a-luz.htm>>.

LIMA, LEANDRO C.; GOUVEIA, L. S. **ILUMINAÇÃO PÚBLICA: HISTÓRIA , TECNOLOGIAS E APLICAÇÕES**. 96 p. Tese (Doutorado) — UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

- LIMA, R. F. **As Lâmpadas LED – História do LED**. 2018. Disponível em: <<https://blog.borealled.com.br/historia-das-lampadas-led/>>.
- LUMICENTER. **Reprodução de cores: Métodos de avaliação das fontes luminosas**. 2017. Disponível em: <<https://www.lumicenteriluminacao.com.br/reproducao-de-cores-irc-e-tm-30/>>.
- LUMINOENERGY. O que os olhos veem : a melhor iluminação é a iluminação que lhe dá a visão mais clara. p. 1–4, 2015.
- LUZ, J. M. **LUMINOTÉCNICA**. 36 p. Tese (Doutorado), 2014.
- MASCARO, L. A Iluminação do Espaço Urbano. p. 20–27, 2006.
- MELO, Í. Z. **AVALIAÇÃO DA LUMINÂNCIA NAS VIAS PÚBLICAS COMO JUSTIFICATIVA PARA APLICAÇÃO DA VISÃO MESÓPICA**. 49 p. Tese (Doutorado) — UFJF - Universidade Federal de Juiz de Fora, 2018.
- MME. Plano Nacional de Energia 2050. p. 230, 2020. Disponível em: <<https://tinyurl.com/yaw7e5aa>>.
- MORAES, C. **MODELO DINÂMICO DO CONVERSOR BUCK**. 2018. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/modelagem-dinamica-do-conversor-buck/>>.
- MUSE, L. P. **Iluminação Pública no Contexto das Cidades Inteligentes**. 218 p. Tese (Doutorado) — UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.
- MUXENERGIA. Norma Técnica Iluminação Pública. 2020.
- NAKAYAMA, M. **Luz, visão e saúde**. 2012. 6 p. Disponível em: <<http://www.lumearquitetura.com.br/pdf/ed28/ed28-Aula-Rapida-Luz-visao-e-saude-Mecanismos-da-visao-e-influencias-da-luz.pdf>>.
- OSRAM. Manual Luminotécnico Prático. p. 28, 2012.
- PARANHOS, A. **NBR 5413 - Iluminação de Interiores**. 2018. Disponível em: <<https://engplanilhas.com.br/nbr-5413/>>.
- PETRY, C. A. **Introdução aos Conversores CC-CC**. 17 p. Tese (Doutorado) — UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- PIMENTA, J. L. Uma Fonte de Luz Promissora. **Revista LAPRO**, 2008.
- PINTO, G. **COMO A INTERNET DAS COISAS VIABILIZA AS SMART CITIES?** 2021. Disponível em: <<https://v2com.com/2021/01/17/smart-cities-330-bilhoes-dolares-sustentabilidade/>>.
- PINTO, G. L. **ILUMINAÇÃO PÚBLICA INTELIGENTE: IOT PELA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**. 2020. Disponível em: <<https://v2com.com/2021/02/07/iluminacao-publica-inteligente-iot-eficiencia/>>.

PROCEL. **PROCEL SELO - Eficiência Energética em Equipamentos**. 2021. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMIDF05F4A2E14D84958AAEE698B55F104EAPTBRIE.htm>>.

RAMOS, S. N. et al. Sistema Supervisório para Luminárias Empregadas na Iluminação Pública. 2018.

RANGEL, MARCELLE G.; SILVA, PAULA B.; GUEDE, J. A. G. LED - ILUMINAÇÃO DE ESTADO SÓLIDO. p. 5, 2009.

REA, M. S. **The IESNA Lighting Handbook: reference and application**. Nona edição. New York: [s.n.], 2000.

RGE. **Reparos de Iluminação Pública**. 2021. Disponível em: <<https://www.rge-rs.com.br/atendimento-a-consumidores/produtos-e-servicos/paginas/reparos-de-iluminacao-publica.aspx>>.

ROSITO, L. Desenvolvimento da Iluminação Pública no Brasil. 2009.

ROSITO, L. H. Tecnologia LED e inovações em Iluminação pública. **Philips**, 2015. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/ciebrasil/docs/Tecnologia-LED-e-Inovacoes-em-Iluminacao-Publica.pdf>>.

ROSOT, C. **Análise Comparativa de Conversores CC-CC Elevadores de Tensão Aplicados a Sistemas Fotovoltaicos de Duplo Estágio de Conversão de Energia Conectados à Rede Elétrica Monofásica**. 163 p. Tese (Doutorado) — UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

SALVIA, A. L. **Eficiência Energética em Iluminação Pública na Gestão Sustentável de Cidades: Estudo de Multicasos**. 160 p. Tese (Doutorado) — UPF - Universidade de Passo Fundo, 2016.

SANTOS, E. R. **A ILUMINAÇÃO PÚBLICA COMO ELEMENTO DE COMPOSIÇÃO DA PAISAGEM URBANA**. 109 p. Tese (Doutorado) — UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

SERRAO, F. M.; OLIVEIRA, L. S.; NASCIMENTO, D. A. Melhoria na Iluminação Pública Substituindo Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão por Lâmpadas de Led em um Órgão Federal na Amazônia - SIPAM. p. 22, 2019.

SILVA, L. L. F. **ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL: ASPECTOS ENERGÉTICOS E INSTITUCIONAIS**. 161 p. Tese (Doutorado) — UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

STIELETRONICA. **Relés STI**. 2019. Disponível em: <<https://stieletronica.com.br/n/reles/>>.

TEIXEIRA, M. M. História da Iluminação no Rio de Janeiro - Séculos XVI ao XX. p. 60, 2011. ISSN 1098-6596.

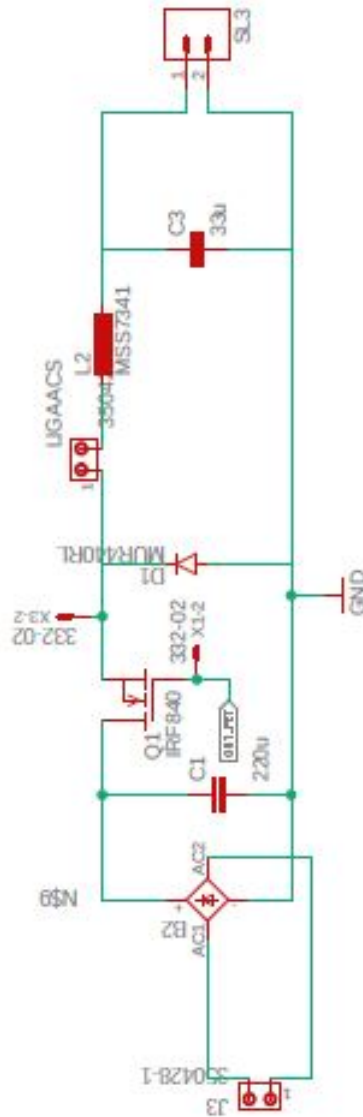
ULTRALUZ. A EVOLUÇÃO DA ILUMINAÇÃO NO BRASIL: DAS VELAS DE SEBO ÀS LÂMPADAS DE LED. 2020. Disponível em: <<https://ultraluz.com.br/a-evolucao-da-iluminacao-no-brasil-das-velas-de-sebo-as-lampadas-de-led/>>.

ZAGONEL. Luminárias LED: as vantagens de investir nesta tecnologia. 2021. Disponível em: <<https://www.zagonel.com.br/iluminacao/blog/show/luminarias-led-as-vantagens-de-investir-nesta-tecnologia/>>.

ZUMDAHL, S. Z. S. Atomic Structure and Periodicity. p. 290–294, 2003.

APÊNDICE B – DIAGRAMA DE POTÊNCIA DO PROTÓTIPO

Figura B.1 – Diagrama de potência do protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE C – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS LED DURIS OSRAM

Figura C.1 – Apresentação e dados LED OSRAM DURIS S8

GW P9LR35.PM Gen5

DURIS® S 8

The latest Duris® S 8 generation of LEDs offers an impressive efficacy performance combined with DLC Premium Lifetime achievement. This 5050 leadframe package offers customers a perfect solution for High Efficacy and Compact Luminaire designs for Outdoor Professional lighting; High-Bays, Streetlights, Area Lights, Flood Lights.



— Lumen maintenance: Testing according to IESNA LM-80 in progress

Type	Color temperature	Luminous Flux [®] $I_F = 180 \text{ mA}$ Φ_V	Ordering Code
GW P9LR35.PM-M1M7-XX58-1-G5	2700 K	180 ... 250 lm	Q65113A0904
GW P9LR35.PM-M3M7-XX57-1-G5	3000 K	200 ... 250 lm	Q65112A8662
GW P9LR35.PM-M4MF-XX55-1-G5	4000 K	210 ... 280 lm	Q65112A8660
GW P9LR35.PM-M4MF-XX53-1-G5	5000 K	210 ... 280 lm	Q65112A8364
GW P9LR35.PM-M3MF-XX52-1-G5	5700 K	200 ... 280 lm	Q65113A0278
GW P9LR35.PM-M3M9-XX51-1-G5	6500 K	200 ... 270 lm	Q65112A8661

Electro - Optical Characteristics [®]

$T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; CRI = 70; 4000 K

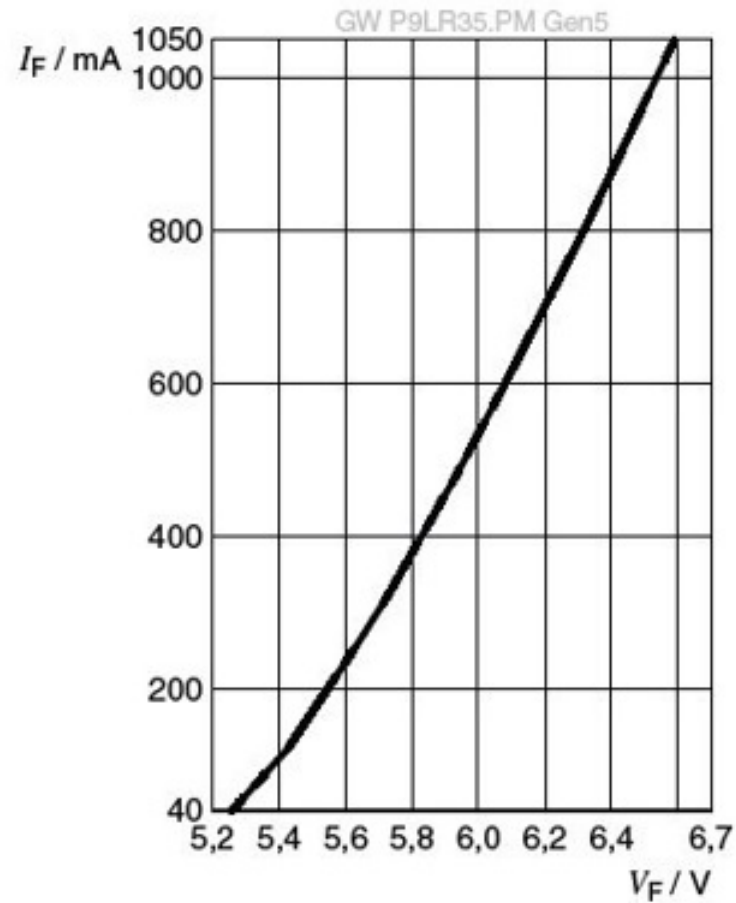
Forward Current I_F	Forward Voltage typ. V_F	Power typ. P	Luminous Flux typ. Φ_V	Luminous efficacy typ. η
180 mA	5.55 V	1.0 W	215 lm	215 lm/W
360 mA	5.82 V	2.1 W	415 lm	198 lm/W
600 mA	6.11 V	3.7 W	666 lm	180 lm/W
640 mA	6.19 V	4.0 W	702 lm	176 lm/W
800 mA	6.35 V	5.1 W	860 lm	169 lm/W
1050 mA	6.59 V	6.9 W	1085 lm	157 lm/W

Fonte: Adaptado de OSRAM (2020).

Figura C.2 – Gráfico corrente x tensão LED OSRAM DURIS S8

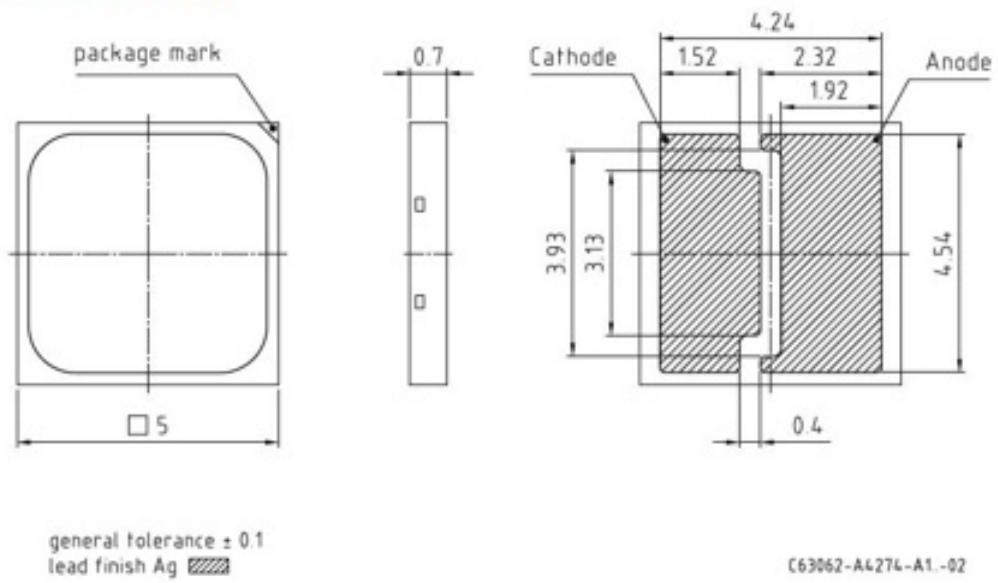
Forward current 5)

$$I_F = f(V_F); T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$



Fonte: Adaptado de OSRAM (2020).

Figura C.3 – Desenho dimensional do LED OSRAM DURIS S8

Dimensional Drawing ⁸⁾

Fonte: Adaptado de OSRAM (2020).

APÊNDICE D – CÓDIGO DE IMPLEMENTAÇÃO MICROCONTROLADOR

Figura D.1 – Código microprocessador - Primeira parte

```

#include <30F2010.h> //BIBLIOTECA DO dsPIC
#device ADC=10 //CONVERSOR ANALOGICO DIGITAL EM 10 BITS

#FUSES NOWDT //NO WATCH DOG TIMER
#FUSES CKSFSM //CLOCK SWITCHING IS ENABLED, FAIL SAFE CLOCK MONITOR IS ENABLED
#FUSES NOBROWNOUT //NO BROWNOUT RESET

#device ICSP=1 //PROTOCOLO SERIAL H
#use delay(clock=28.8MHz,crystal=7.2MHz) //OSCILAÇÃO INTERNA EM 4X
#use rs232(UART1, baud=9600, stream=UART_PORT1) //COMUNICAÇÃO SERIAL PORTA 1

#INT_TIMER1
void timer1_isr(void)
{
    static double timer = 0.0002; //PERIODO
    static double x_nm1=0; // x_nm1: x[n-1]
    static double y_nm1=0; // y_nm1: y[n-1]
    static double x=0;
    static double y=0;

    x=x1-x2;
    y=-1.771743160000000*x_nm1+1*y_nm1+2.061256840000000*x; //FUNÇÃO CALCULADA
    y_nm1=y;
    x_nm1=x;
}

```

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura D.2 – Código microprocessador - Segunda parte

```
void main()
{
    setup_timer1(TMR_INTERNAL | TMR_DIV_BY_1, 1439); //CONFIGURAÇÃO TIMER
    setup_timer2(TMR_INTERNAL | TMR_DIV_BY_1, 143); //CONFIGURAÇÃO TIMER

    setup_adc_ports(sAN0 | sAN1, VSS_VDD); //SETA PORTAS ADC
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_32 | ADC_TAD_MUL_0); //ANALOGICO PARA DIGITAL

    setup_compare(1, COMPARE_PWM | COMPARE_TIMER2);
    set_pwm_duty(1, 0);

    enable_interrupts(INT_TIMER1); //HABILITA INTERRUPÇÕES
    enable_interrupts(INTR_GLOBAL); //HABILITA INTERRUPÇÕES

    while(TRUE)
    {
        //TODO: User Code
    }
}
```

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE E – CÓDIGO DE IMPLEMENTAÇÃO ARDUINO - ESP-01

Figura E.1 – Código Arduino/ESP-01 - Primeira parte

```
#include "WiFiEsp.h" //BIBLIOTECA ESP-01
#include "SoftwareSerial.h"//BIBLIOTECA COMUNICAÇÃO
SoftwareSerial Serial1(6, 7); //PINOS DE COMUNICAÇÃO - PINO 6 (RX), PINO 7 (TX)
char ssid[] = "NOME_REDE_WIFI"; //VARIÁVEL QUE ARMAZENA O NOME DA REDE SEM FIO
char pass[] = "SENHA_REDE_WIFI"; //VARIÁVEL QUE ARMAZENA A SENHA DA REDE SEM FIO
int status = WL_IDLE_STATUS; //ESTABELECIMENTO DE CONEXÃO (INICIALIZAÇÃO WIFI)
WiFiEspServer server(80); //CONEXÃO DE PORTA
RingBuffer buf(8); //REDUÇÃO DE NECESSIDADE DE MEMÓRIA E AUMENTO DE VELOCIDADE
int statusSystem = LOW; //STATUS ATUAL DO SISTEMA (LIGADO OU DESLIGADO)
void setup() {
  pinMode(SYSTEM_BUILTIN, OUTPUT); //PINO DE SAÍDA PARA O SISTEMA - PINO 13
  digitalWrite(SYSTEM_BUILTIN, LOW); //PINO 13 COMEÇA DESLIGADO
  Serial.begin(9600); //INICIALIZAÇÃO DA SERIAL
  Serial1.begin(9600); //INICIALIZAÇÃO DA SERIAL PARA O ESP-01
  WiFi.init(&Serial1); //INICIALIZAÇÃO DA COMUNICAÇÃO SERIAL COM O ESP-01
  WiFi.config(IPAddress(192,168,0,108)); //FAIXA DE IP DISPONÍVEL
  //INICIALIZAÇÃO DO SISTEMA - VERIFICAÇÃO DE CONEXÃO DO ESP-01 AO ARDUINO,
  //CONEXÃO A INTERNET E INICIALIZAÇÃO DO WEBSERVER DO ESP-01
  if(WiFi.status() == WL_NO_SHIELD){
    while (true);
  }
  while(status != WL_CONNECTED){
    status = WiFi.begin(ssid, pass); //STATUS WIFI
  }
}
```

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura E.2 – Código Arduino/ESP-01 - Segunda parte

```

server.begin();
//FINALIZAÇÃO DO SISTEMA - VERIFICAÇÃO DE CONEXAO DO ESP-01 AO ARDUINO, CONEXAO A
//INTERNET E INICIALIZAÇÃO DO WEBSERVER DO ESP-01
}
void loop(){
  WiFiEspClient client = server.available(); //VERIFICAÇÃO DE ATENDIMENTO DO CLIENTE
  if (client) { //SE HOUVER TENTATIVA DE CONEXÃO DO CLIENTE ATENDE
    buf.init(); //INICIALIZAÇÃO DO BUFFER
    while (client.connected()){ //SE CLIENTE ESTIVER CONECTADO ATENDE
      if(client.available()){ //SE CLIENTE SOLICITAR ATENDE
        char c = client.read(); //LEITURA DA REQUISIÇÃO
        buf.push(c); //ARMAZENAMENTO DA REQUISIÇÃO
        //FINALIZAÇÃO DO HTML E ENVIO DE RESPOSTA
        if(buf.endsWith("\r\n\r\n")) {
          sendHttpResponse(client);
          break;
        }
        if(buf.endsWith("GET /H")){ //SE CLIENTE DEFINIR COMO "H"
          digitalWrite(SYSTEM_BUILTIN, HIGH); //100% LIGADO
          statusSystem = 1; //VARIÁVEL COM VALOR = 1, SISTEMA 100% LIGADO
        }
        else{ //SENÃO
          if (buf.endsWith("GET /L")) { //SE CLIENTE DEFINIR COMO "L"
            digitalWrite(SYSTEM_BUILTIN, LOW); //0% DESLIGADO

```

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura E.3 – Código Arduino/ESP-01 - Terceira parte

```

        statusSystem = 0; //VARIÁVEL COM VALOR = 0, SISTEMA DESLIGADO
      }
    }
  }
  client.stop(); //DESCONEXÃO DO CLIENTE
}
//MÉTODO DE RESPOSTA A REQUISIÇÃO HTTP DO CLIENTE
void sendHttpResponse(WiFiEspClient client){
  client.println("HTTP/1.1 200 OK"); //VERSÃO DO HTTP
  client.println("Content-Type: text/html"); //TIPO DE CONTEÚDO(texto/html)
  client.println("");
  client.println("<!DOCTYPE HTML>"); //INFORMA AO NAVEGADOR A ESPECIFICAÇÃO DO HTML
  client.println("<html>"); //ABRE A TAG "html"
  client.println("<head>"); //ABRE A TAG "head"
  client.println("<link rel='icon' type='image/png' href='https://i.postimg.cc/FLSLT0yz/logo-eletrica-e-uri.jpg'/>");
  //FIGURA DA PÁGINA
  client.println("<title>Parametrização Iluminação Inteligente</title>"); //TEXTO DO HTML
  client.println("</head>"); //FECHA A TAG "head"
  //CRIAÇÃO HTML
  client.println("<body>"); //ABRE A TAG "body"
  client.println("<img alt='esblight' src='https://i.postimg.cc/FLSLT0yz/logo-eletrica-e-uri.jpg' height='121' width='415' />");
  //LOGO ELÉTRICA URI E TAMANHO

```

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura E.4 – Código Arduino/ESP-01 - Quarta parte

```

client.println("<p style='line-height:2'><font>Modulo WiFi ESP-01 para Arduino</font></p>"); //TEXTO DA PÁGINA
client.println("<font>ESTADO ATUAL DO SISTEMA</font>"); //TEXTO NA PÁGINA
if (statusLed == HIGH){ //SE VARIÁVEL = 1 (HIGH)
  client.println("<p style='line-height:0'><font color='green'>LIGADO</font></p>"); //"LIGADO" NA PÁGINA
  client.println("<a href=\"/L\">DESLIGAR</a>"); //COMANDO PARA DESLIGAR O SISTEMA (/L)
}else{ //SENÃO, FAZ
  if (statusLed == LOW){ //SE VARIÁVEL = 0 (LOW)
    client.println("<p style='line-height:0'><font color='red'>DESLIGADO</font></p>"); //"DESLIGADO" NA PÁGINA
    client.println("<a href=\"/H\">ACENDER</a>"); //COMANDO PARA LIGAR O SISTEMA (/H)
  }
}
client.println("<hr />"); //LINHA NA PÁGINA
client.println("<hr />"); //LINHA NA PÁGINA
client.println("</body>"); //FECHA A TAG "body"
client.println("</html>"); //FECHA A TAG "html"
delay(10); //INTERVALO DE 10 MILISSEGUNDOS
}

```

Fonte: Elaborado pelo autor