



**Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Unidade Araxá**

Matheus de Souza Silva

Sistema de gerenciamento de iluminação a LED via bateria

Araxá-MG
2020

Matheus de Souza Silva

Sistema de gerenciamento de iluminação a LED via bateria

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Automação Industrial, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Henrique José Avelar

Coorientador: Prof. Dr. Kleber Lopes Fontoura

Araxá-MG
2020



ATA Nº 12/2020 - DFGAX (11.57.03)

Nº do Protocolo: 23062.032027/2020-94

Araxá-MG, 30 de novembro de 2020.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL / ARAXÁ
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC - ATA DE DEFESA

ATA DA DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL
do aluno **MATHEUS DE SOUZA SILVA**

Às quatorze horas e trinta minutos do dia trinta de novembro de dois mil e vinte, reuniu-se, pelo Microsoft Teams, na turma "Trabalho de Conclusão de Curso", do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG/ Unidade Araxá, a Comissão Examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso para julgar, em exame final, o trabalho intitulado "Sistema de gerenciamento de iluminação a LED via bateria", como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Prof. Dr. Henrique José Avelar, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, concedeu a palavra ao candidato, Matheus de Souza Silva, para a exposição de seu trabalho. Após a apresentação, seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Ultimada a arguição, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Após a reunião da Comissão Examinadora, o candidato foi considerado: **APROVADO**, obtendo nota final de: 92/100 (noventa e dois pontos). O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. O aluno, abaixo assinado, declara que o trabalho ora identificado é da sua autoria material e intelectual, excetuando-se eventuais elementos, tais como passagens de texto, citações, figuras e datas, desde que devidamente identificada a fonte original. Declara ainda, neste âmbito, não violar direitos de terceiros. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou os trabalhos. A Profa. Dra. Érica Araújo, responsável pela disciplina "Trabalho de Conclusão de Curso II", lavrou a presente ATA, que, após lida e aprovada, será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora. Araxá, trinta de novembro de dois mil e vinte.

(Assinado digitalmente em 02/12/2020 10:28)

ADMARCO VIEIRA DA COSTA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matrícula: 1073830

(Assinado digitalmente em 11/12/2020 09:01)

ERICA DANIELA DE ARAUJO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DFGAX (11.57.03)
Matrícula: 1019759

(Assinado digitalmente em 30/11/2020 22:56)

HENRIQUE JOSE AVELAR
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DCAX (11.57)
Matrícula: 392234

(Assinado digitalmente em 01/12/2020 10:08)

KLEBER LOPES FONTOURA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matrícula: 2330904

(Assinado digitalmente em 01/12/2020 09:23)

MATEUS ANTUNES OLIVEIRA LEITE
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matrícula: 3138470

(Assinado digitalmente em 30/11/2020 19:43)

MATHEUS DE SOUZA SILVA
DISCENTE
Matrícula: 201514550342

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **12**, ano: **2020**, tipo: **ATA**, data de emissão: **30/11/2020** e o código de verificação: **1dfcf94d47**

Aos meus pais, aos amigos e à minha namorada,
que sempre me fizeram acreditar na realização dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

À Deus por fornecer saúde e todas as condições para realização dessa jornada.

Aos meus pais, Valter da Silva e Sirley Euclides de Souza Silva, que sempre me deram amor, apoio e incentivo para estudar e me tornar uma boa pessoa. À minha namorada e futura esposa Karoline Andrade Bueno que esteve sempre ao meu lado.

Aos professores Henrique José Avelar e Kleber Lopes Fontoura pela a grande dedicação, empenho em suas atividades acadêmicas e pela enorme ajuda em fazer com que este trabalho se tornasse realidade.

Ao grupo PET da engenharia de Automação Industrial do CEFET-MG, Araxá por apoiar e incentivar o desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao servidor e técnico de laboratório de eletrônica do CEFET-MG, Araxá Gilberto Pereira Leonel pela grande ajuda e contribuição para o desenvolvimento dessa pesquisa e por sempre ajudar todos os alunos.

À Instale Tecnologia Ltda que sempre traz novas ideias de projetos e problemas de engenharia aos alunos do CEFET-MG Araxá, promovendo assim, pesquisas como esta.

Aos professores Admarço Vieira da Costa e Mateus Antunes Oliveira Leite por aceitarem o convite para participar da banca de defesa desta monografia.

Aos meus colegas de trabalho por compartilhar ideias e incentivar a pesquisa e desenvolvimento desse projeto.

“Quality is not an act, it is a habit.”

Aristóteles

RESUMO

Com este trabalho, objetiva-se desenvolver um conversor CC/CC capaz de gerir e de supervisionar a luminosidade de um LED de 10 W, para tanto, detalha-se os principais métodos e instrumentos necessários para a sua construção. Os conversores CC/CC são dispositivos capazes de reduzir ou de ampliar a tensão de alimentação, com o intuito de fornecer a tensão adequada para a carga. Controlando o ciclo de trabalho desses conversores, é possível coordenar o fornecimento de energia baseado em variáveis externas, como a claridade do ambiente no qual se localiza o LED. Dessa forma, pode-se ligá-lo quando não houver luz natural e desligá-lo proporcionalmente à medida em que o ambiente for clareando, obtendo, assim, economia de energia. Com sensores de corrente e de tensão, é possível transmitir o *status* do conversor para um aplicativo por meio, por exemplo, do adaptador Bluetooth HC-05 embutido no sistema. Técnicas de controle, como o Controlador PI são apresentadas como métodos para se administrar a intensidade de tensão fornecida pelo LED. Ao final, na apresentação dos resultados, percebeu-se a correlação entre os resultados simulados com os experimentais, fato que demonstra não somente a coerência entre eles, como também a validação do modelo usado para simulação.

Palavras-chave: Gerenciador de energia. Conversor CC/CC. Controlador PI. LED.

ABSTRACT

In this work, the objective is to develop a DC / DC converter capable of managing and supervising the brightness of a 10 W LED. For this purpose, the main methods and relative instruments for its construction are detailed. DC / DC converters are devices capable of reducing or increasing the supply voltage, with the intention of supplying the appropriate voltage for the load. By controlling the duty cycle of these devices, it is possible to coordinate the energy supply based on external variables, such as the brightness of the environment in which the LED is located. That way, you can turn it on when there is no natural light and turn it off proportionally as the environment clears, thus obtaining energy savings. With current and voltage sensors, it is possible to transmit the status of the converter to an application through, for example, the Bluetooth adapter HC-05 built into the system. Control techniques, such as the PI controller are methods for managing the intensity of demand by the LED. At the end, when presenting the results, notice the correlation between the simulated and experimental results, demonstrating not only the coherence between them but also validating the model used for simulation.

Keywords: Power manager. DC / DC converter. PI controller. LED.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Circuito eletrônico de um conversor BUCK.....	20
Figura 2 - Circuito eletrônico do conversor BOOST.	21
Figura 3 - Circuito de um conversor BUCK-BOOST.	21
Figura 4 - Circuito do conversor BUCK-BOOST levando em consideração as resistências internas.....	24
Figura 5 – Controlador Proporcional.....	26
Figura 6 - Controlador Proporcional Integral.....	29
Figura 7- Comparativo entre tipos de lâmpadas.....	35
Figura 8 - Resposta ao degrau para o sistema em malha fechada com o controlador PI (a) e os parâmetros de controle do sistema (b).	39
Figura 9 - Resposta ao degrau com diferentes ganhos de K_i	40
Figura 10 – Desenho esquemático do projeto no <i>software</i> PSIM.	41
Figura 11 - Desenvolvimento do <i>layout</i> das PCBs: (a) placa de potência e (b) placa de comando e sensores.	43
Figura 12 – Processo de produção das PCBs: (a) placas durante a corrosão do cobre e (b) placas após a transferência do <i>layout</i>	44
Figura 13 - Placas após a furação e a soldagem dos componentes.	44
Figura 14 – Exemplo com as diferenças entre os ciclos de trabalho de 10% (a) e de 60% (b).	47
Figura 15 - Tensão de entrada da carga (multímetro à esquerda) e a tensão de saída (multímetro à direita) com ciclo de trabalho igual a 10% (a) e tensão de saída com sua respectiva entrada com 60% de ciclo de trabalho (b).	47
Figura 16 - Tensão de saída na carga após uma entrada em degrau (a) e o conversor BUCK-BOOST em pleno funcionamento (b).....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC/CC	Corrente Contínua para Corrente Contínua
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Intelectual
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>
LED	<i>Light Emitter Diode</i>
MCC	Modo de Condução Contínua
MCD	Modo de Condução Descontínua
MCL	Modo de Condução Limite
MOSFET	<i>Metal-oxide-semiconductor-field-effect transistor</i>
P	Controlador Proporcional
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PD	Controlador Proporcional Derivativo
PI	Controlador Proporcional Integral
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
Si	Silício
SiC	Carbeto de Silício
VCC	Tensão de Corrente Contínua

LISTA DE SÍMBOLOS

T_s	Período do PWM
T_{on}	Período de condução do MOSFET
T_{off}	Período em não condução do MOSFET
D	<i>Duty Cycle</i> ou Ciclo de Trabalho
W	Watts
V_{out}	Tensão de saída
V_{in}	Tensão de entrada
L	Indutor
ΔL	Variação na corrente do indutor
f_s	Frequência de chaveamento
C	Capacitor
ΔV_c	Variação de tensão na carga
R_{load}	Valor da resistência da carga
R_L	Valor da resistência interna do indutor
R_C	Valor da resistência interna do capacitor
$O(n)$	Ordem de um algoritmo
D_{max}	Valor máximo do <i>Duty Cycle</i>
$V_{out_{max}}$	Valor máximo de tensão na saída
lm	Lúmens
cm	Centímetro
mm	milímetro
dB	decibel
D/A	Conversor digital para analógico
K_p	Ganho do Proporcional
K_i	Ganho do Controlador Integral
K_d	Ganho do Derivativo
$R(s)$	Referência do sistema no domínio da frequência
$E(s)$	Erro do sistema no domínio da frequência
$U(s)$	Sinal de entrada na planta do sistema no domínio da frequência
$G(s)$	Função de transferência da planta do sistema no domínio da frequência
$Y(s)$	Saída do sistema no domínio da frequência
$H(s)$	Realimentação do sistema no domínio da frequência

$G(s)_{MA}$	Função de transferência da planta do sistema no domínio da frequência em malha aberta
Hz	Hertz
A	Ampere
mA	miliampère
Ω	Ohms
m Ω	Microohms
F	Farad
μ F	Microfarad
H	Henry
mH	Milihenry
V	Volt
mV	Milivolt
ms	Milisegundos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	Conversores CC/CC	18
2.1.1	Conversor BUCK-BOOST	21
2.1.2	Função de transferência	23
2.1.3	A influência da resistência interna em conversores CC/CC.....	24
2.2	Teoria de controle	25
2.2.1	Controlador P.....	26
2.2.2	Controlador PI	28
2.2.3	O erro em regime permanente	29
2.2.4	Influência do Controlador Integral no erro	31
2.2.5	A importância da modelagem de sistemas	34
2.3	LED	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	Requisitos de projeto	36
3.2	Leitura de <i>datasheets</i>	37
3.3	A escolha do microcontrolador.....	37
3.4	Módulo Bluetooth e do sensor de luz	37
3.5	Cálculos dos parâmetros do controlador PI.....	38
3.6	Simulação	40
3.7	Testes em bancada	42
3.8	Local e condições do ambiente.....	42
3.9	Construção do protótipo	42
3.9.1	Itens necessários para a construção do protótipo.....	42
3.9.2	Desenvolvimento do protótipo	43
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	Resultados da simulação.....	45
4.2	Resultados experimentais	46
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

A eletrônica de potência constitui um dos principais campos de estudo e de pesquisa da Eletrônica. Nesse campo, os estudiosos da área propõem aplicações da Eletrônica na produção de potência, no controle e na conversão de energia por meio do ligamento e do desligamento de dispositivos semicondutores (RASHID, 2014). Conforme esse autor o campo tem evoluído bastante nos últimos anos, dado que, a cada dia, novas aplicações, em diversos setores, são propostas e/ou realizadas graças ao avanço e ao desenvolvimento de novos componentes semicondutores.

Ainda de acordo com Rashid (2014), apesar de os dispositivos a base de Silício (Si) estarem quase no limite de suas evoluções, uma outra base para a fabricação de semicondutores, que utiliza o Carbetto de Silício (SiC), surgiu e, com ela, diversas pesquisas estão sendo propostas visando melhorias em relação aos componentes de Silício. Ante a esse cenário, de acordo com o autor, com as melhorias provenientes de novos e mais rápidos semicondutores, com o adjunto de novos modelos de microcontroladores, com as melhorias no processamento digital e com as estratégias de controle, a eletrônica de potência certamente se tornará cada vez mais importante para o controle e a conversão da energia elétrica no mundo.

Essas melhorias na área de eletrônica de potência, juntamente com os diversos avanços tecnológicos obtidos nos últimos anos, conforme Schwab (2016), propiciaram o surgimento da denominada Quarta Revolução Industrial. Com o intuito de aprimorar processos e produtos, a fim de criar fábricas inteligentes, a Quarta Revolução Industrial oportunizou o surgimento de diversos conceitos e tecnologias inovadoras, como: *Big Data*, *Internet of Things* (IOT), computação em nuvem, inteligência artificial no âmbito industrial, entre outros. Com o passar dos anos, conforme salienta Schwab (2016), essas tecnologias inovadoras começaram a fazer parte de diversos setores da economia, os quais passaram a contar com sistemas eletrônicos e embarcados, integrando e comunicando com outros sistemas, propiciando, assim, a aplicação de conceitos da Indústria 4.0. Entre os setores da economia em que é possível notar a presença da Quarta Revolução Industrial, cita-se a mineração.

No setor da mineração é comum o emprego de torres de iluminação a LED que auxiliam as operações noturnas. Essas torres, as quais são empregadas em ambientes que necessitam de luz e que não contam com rede elétrica disponível para a alimentação, são compostas basicamente por: baterias, um sistema eletrônico para fornecimento de energia e LEDs de alta potência. Nesses casos, os LEDs são alimentados com uma Tensão de Corrente Contínua (VCC). Contudo, constata-se dois problemas técnicos na operação desse equipamento: (i) a

Tensão de Corrente Contínua (VCC) que alimenta os LEDs possui nível superior ao nível fornecido pelas baterias e (ii) o acionamento do equipamento, em geral, ocorre por meio de temporizadores baseados em horas específicas do dia, desconsiderando a presença de luz natural em algumas estações do ano.

Para solucionar o problema de conversão de energia da fonte até os LEDs, é preciso criar um conversor capaz de converter um valor de Corrente Contínua para outro valor de Corrente Contínua (CC/CC). Buscando adequar seus equipamentos, as empresas podem utilizar até dois conversores para desenvolver esse sistema, já que os LEDs são vendidos com um driver e estes são usualmente conversores de Corrente Alternada para Corrente Contínua (CA/CC), logo para acioná-los de uma fonte contínua pode ser necessário um conversor de Corrente Contínua para Corrente Alternada (CC/CA). Dessa forma, haveriam dois conversores os quais geram perdas e maior custo de operação. Por isso, a melhor opção seria a remoção do driver do LED e o uso de um único conversor CC/CC.

No que se refere ao problema de acionamento da iluminação, em muitos casos, são empregados temporizadores que ligam e desligam os LEDs, baseados somente na hora do dia. Diante disso, pode ocorrer de o sistema acionar os LEDs em períodos inoportunos, no quais hajam a presença de luz natural, visto que sua incidência varia de acordo com a estação do ano.

Em vista desses problemas, buscou-se, assim, soluções que pudessem saná-los no mercado, no Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI) e no departamento de Propriedade Intelectual do CEFET-MG. No primeiro, percebeu que havia sim vários modelos, contudo nenhum deles contemplava todas as demandas específicas citadas acima. No segundo, percebeu-se a falta de pesquisas relacionadas aos conversores CC/CC aplicados ao gerenciamento de iluminação. No último, descobriu-se que havia apenas duas patentes relacionadas ao tema, não abordando especificamente a problemática aqui exposta, sendo, ao todo, quatorze no mundo. Portanto, diante desse baixo número de patentes, o desenvolvimento desta pesquisa se justifica, haja vista apresentar uma nova alternativa para o gerenciamento de iluminação a LED. Ademais, se confirmada a hipótese que aqui se aventa, o sistema criado poderá ser aplicado em outros locais, para além das mineradoras, nos quais não se conta com rede elétrica disponível e que necessitem de iluminação a LED, por exemplo, fazendas e campos de futebol, facilitando a supervisão e diminuindo o gasto de energia, por ser acionado somente em situações em que haja a necessidade.

Apesar de os conversores CC/CC serem largamente conhecidos na literatura, o sistema de controle de luzes LED que se intenta desenvolver com este estudo contempla mais funcionalidades, as quais permitem melhorar bastante os sistemas atuais. Dentro dessas

funcionalidades, destaca-se: controle da potência nos LEDs de forma autônoma ou manual; supervisão da tensão da bateria; leitura da corrente elétrica e da tensão nos LEDs; leitura da luminosidade ambiente; corte de energia em casos de algum problema e emissão de alertas e de dados, via Bluetooth, ou alguma rede de comunicação à qual o sistema esteja interligado, para o operador do sistema.

Sobre a teoria de controle desses conversores, há oportunidades de melhorias, haja vista o emprego de novas técnicas criadas por pesquisadores, as quais auxiliam na otimização dos controladores aplicados a conversores CC/CC, tornando viável a aplicação deste estudo.

Ante a essa contextualização, verifica-se que as soluções até aqui propostas para a operacionalização das torres de iluminação a LED não são eficientes. Em decorrência disso, surge o questionamento de pesquisa que embasa esta proposta, qual seja: é possível desenvolver um sistema, com conversor CC/CC microcontrolado, que gerencie a corrente elétrica e a tensão das torres de iluminação a LED, bem como acione remotamente ou localmente o equipamento, controlando a intensidade da luz? Ante a esse questionamento, avança-se como hipótese de pesquisa que é possível elaborar esse sistema, solucionando os problemas apresentados de forma eficaz e com custo reduzido. Para tanto, objetiva-se, com este trabalho, desenvolver e implementar um sistema, por meio de um conversor CC/CC microcontrolado, com sensores de corrente e luminosidade, que: (i) gerencie a iluminação a LED com o uso de baterias, a fim de automatizar e de supervisionar LEDs de alta potência, e (ii) controle, local ou remotamente, a intensidade de luz e de consumo de energia.

Isso posto, estabeleceu-se como objetivos específicos desta pesquisa:

- Desenvolver um conversor CC/CC BUCK-BOOST para solucionar o problema da conversão de energia da bateria para vários níveis de tensão nos LEDs;
- Selecionar um microcontrolador para controlar: o sistema, os sensores de luminosidade, a corrente, o módulo de comunicação Bluetooth e os demais componentes necessários ao desenvolvimento desta pesquisa;
- Desenvolver um compensador que controle a tensão nos LEDs;
- Realizar a simulação do circuito eletrônico de potência e controle;
- Desenvolver o código para o microcontrolador;
- Construir o protótipo;
- Verificar sua funcionalidade.

Dito isso, a fim de realizar a investigação aqui apresentada, este trabalho está estruturado em três capítulos, além desta introdução e das considerações finais. No segundo capítulo,

apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os principais conceitos implicados nesta proposta de pesquisa, entre eles, cita-se definições e conceitos sobre conversores CC/CC, LEDs, teoria de controle, entre outros. No terceiro capítulo, detalha-se os materiais e métodos utilizados neste estudo. No quarto capítulo, analisa-se os dados coletados com a aplicação do estudo e discute-se os resultados obtidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, discute-se os principais tópicos necessários à compreensão do sistema desenvolvido utilizando conversor CC/CC microcontrolado. No primeiro subtópico, detalha-se os conversores CC/CC, suas aplicações e suas principais topologias. Ainda nesse subtópico, apresenta-se as definições sobre o *metal-oxide-semiconductor-field-effect transistor* (MOSFET), os microcontroladores e sobre a função de transferência. No segundo subtópico, expõe-se os principais aspectos sobre a teoria de controle dos conversores CC/CC e a importância da modelagem do circuito para o controle do sistema. No terceiro e último subtópico, especifica-se o elemento final de controle, o LED.

2.1 Conversores CC/CC

Uma grande área de estudo dentro do campo da eletrônica de potência é certamente os conversores CC/CC. Esses podem ser definidos como circuitos eletrônicos compostos por: fontes, indutores, diodos, capacitores, chaves de comutação, entre outros componentes auxiliares. De acordo com a disposição desses componentes, é possível criar sistemas que elevem e/ou abaixem a tensão elétrica. Essa variação na disposição dos componentes é conhecida como topologias de conversores.

Esses conversores são controlados, geralmente, pela técnica de Modulação da Largura de Pulso, do inglês *Pulse Width Modulation* (PWM). O PWM é um sinal de onda quadrada, emitido a uma frequência fixa e que possui um período (T_s) composto pela soma do tempo ligado (T_{on}) e do tempo desligado (T_{off}) - Equação (1). A razão entre o T_{on} e o T_s é conhecida como *Duty Cycle* ou ciclo de trabalho - Equação (2).

$$T_s = T_{on} + T_{off} \quad (1)$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (2)$$

O *Duty Cycle* é responsável por determinar a tensão de saída do conversor. Fisicamente, no circuito, esse ciclo deve ser enviado a um elemento chaveador que, nesta pesquisa, é o MOSFET. Segundo Boylestad e Nashelsky (1996), o MOSFET é um transistor de efeito de

campo composto por três terminais conhecidos como: *drain*, *gate* e *source*, o qual tem como característica fundamental controlar a corrente por meio da tensão. Isso ocorre quando se aplica uma tensão no terminal *gate* superior ao limiar de ativação, descrito em seu *datasheet*. Com isso, o MOSFET faz com que haja um fluxo de corrente entre os terminais *drain* e *source*. Por esse motivo, foi escolhido como o elemento chaveador nesta pesquisa, responsável pela comutação do conversor e pelo fornecimento de energia para a carga, dado que apresenta uma alta impedância de entrada no *gate*.

Contudo, para que o MOSFET receba o sinal do *Duty Cycle*, ele precisa ser previamente enviado por um microcontrolador. Sabe-se que o microprocessador, em um circuito de um conversor, é responsável por, além de enviar informações e realizar leituras de sensores, calcular o *Duty Cycle*. Nessa medida, o microcontrolador pode ser definido, conforme Nicolosi (2013), como um sistema eletrônico constituído por um microprocessador capaz de executar comandos específicos a partir de uma linguagem de programação. De acordo com o autor, com o uso de memórias internas, o microcontrolador é capaz de ler instruções, realizar operações matemáticas e lógicas, ler sensores e emitir sinais elétricos, tornando-se bastante útil em projetos eletrônicos.

Ante a isso, há uma grande gama de aplicações possíveis para esses conversores, tais como as citadas por Arrabaça e Gimenez (2014), a saber: em fontes de alimentações de dispositivos eletrônicos como celulares e notebooks; em fontes de alimentação de LEDs; em carregadores de pilhas recarregáveis; em acionamentos de motores de corrente contínua; em reguladores de tensão elétrica a fontes chaveadas; em motores automotivos elétricos de corrente contínua e meios de transporte afins. Assim, é possível afirmar, conforme Mello (2011), que os conversores CC/CC

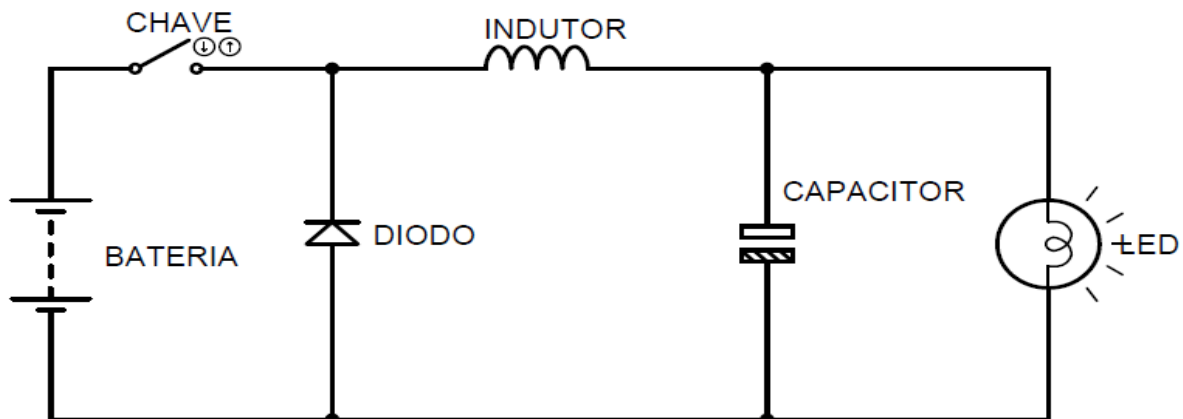
[...] são utilizados quando a fonte de alimentação disponível é de corrente contínua (barramento CC), que, na maioria dos casos, é proveniente de um conversor CA/CC fixo (circuito constituído por diodos retificadores ou por um banco de baterias), cuja função é alimentar uma carga que necessita de alimentação de energia CC ajustável (MELLO, 2011).

Na literatura, encontram-se muitas pesquisas acerca de conversores CC/CC e como desenvolvê-los. Chaves et al. (2015) demonstram como o aperfeiçoamento técnico de controle é importante para o bom funcionamento do conversor e também apresentam a importância da saturação do *Duty Cycle* em sistemas reais. Lacerda (2012), por seu turno, elabora um estudo com o uso da topologia BUCK, topologia empregada para diminuir a tensão de entrada. Em seu trabalho, a topologia é utilizada para a diminuição da tensão proveniente de painéis solares para

alimentar um satélite. O autor ratifica a grande necessidade de se controlar as principais variáveis do sistema - tensão e corrente elétrica - para um bom desenvolvimento do conversor.

O conversor BUCK, conhecido como abaixador de tensão, é, de acordo com Mello (2011), formado por: um elemento chaveador, um diodo *Schottky*, um indutor, um capacitor e uma carga. De acordo com a distribuição dos componentes na saída, composta por um indutor e um capacitor, forma-se um filtro passa-baixa, o qual impede que ruídos de alta frequência cheguem à carga. Contudo, ainda de acordo com o autor, a tensão de entrada recebe constantemente pulsos do elemento chaveador, gerando, assim, alto ruído na tensão de entrada, o que é indesejável em um conversor CC/CC, pois o ruído causa falhas no funcionamento do sistema. Confira, na Figura 1, a topologia de um conversor BUCK, principal topologia aplicada em conversores CC/CC.

Figura 1 - Circuito eletrônico de um conversor BUCK.



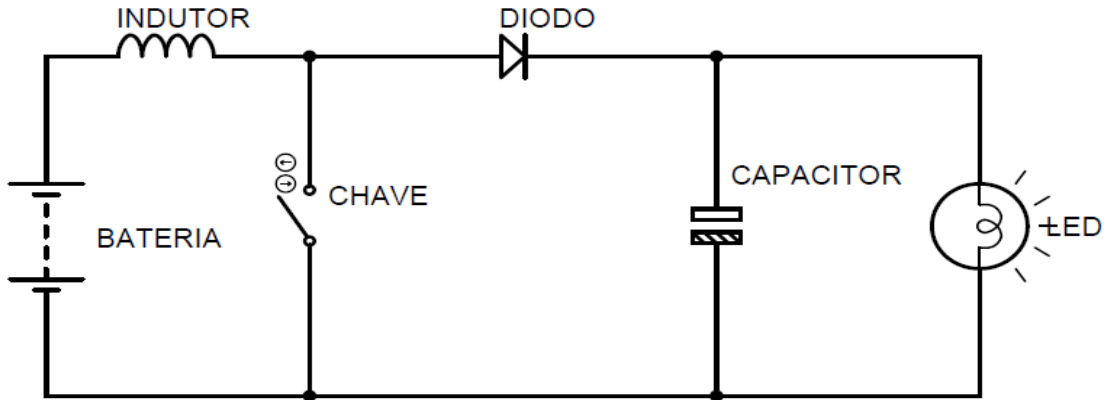
Fonte: Elaborada pelo autor.

Outra topologia bastante utilizada para controlar cargas CC é a topologia BOOST. Sobre essa, cita-se o trabalho de Vilela (2011), no qual o autor desenvolve um conversor BOOST, controlado por tensão, com o objetivo de elevar de 20 VCC para 40 VCC em uma carga de potência de 10W. Nessa pesquisa, é apresentado um dos fatores mais importantes na construção de um conversor CC/CC: a influência da resistência interna do indutor.

O BOOST, conhecido como elevador de tensão, é um conversor CC/CC que possui como principal característica prover, na tensão de saída, um valor igual ou maior que a tensão de alimentação. Assim como o conversor BUCK, a topologia BOOST possui dois elementos armazenadores de energia, o indutor e o capacitor. O indutor é conectado diretamente à fonte de energia do sistema; a chave fica em série entre o indutor e o polo positivo ou negativo da fonte. A malha indutor, a fonte e a chave são conectadas à malha capacitor e à carga por meio de um diodo. Já o capacitor é inserido em paralelo com a carga com o objetivo de filtrar o sinal

da tensão. A tensão de saída segue a mesma polaridade do conversor BUCK (RASHID, 2014). Na sequência, na Figura 2, detalha-se a disposição dos componentes nesse circuito.

Figura 2 - Circuito eletrônico do conversor BOOST.

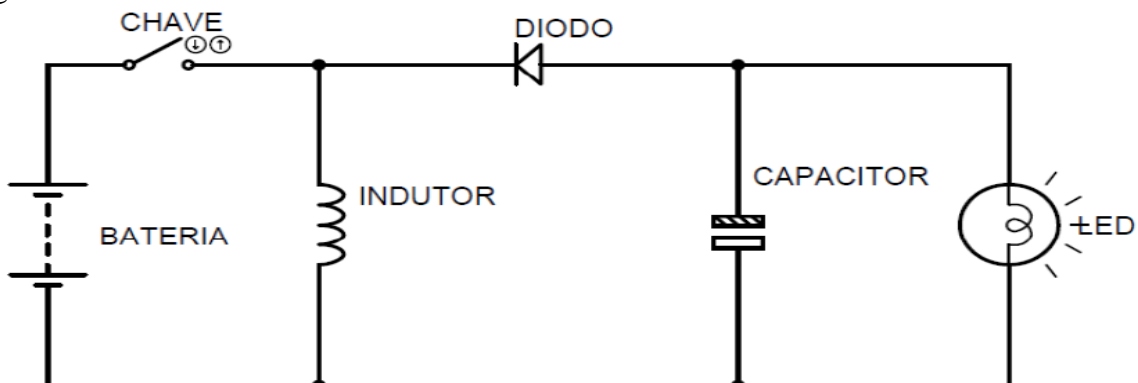


Fonte: Elaborada pelo autor.

2.1.1 Conversor BUCK-BOOST

O conversor BUCK-BOOST é uma topologia de conversor capaz tanto de reduzir a tensão de entrada como de aumentá-la, conforme Arrabaça e Gimenez (2014). Quando o elemento chaveador fecha, ele inicia o processo de carga do indutor. Após o tempo de fechamento acabar e a chave condutora se abrir, a corrente tende a seguir seu fluxo natural de maior potência para a menor. Contudo, ainda de acordo com Arrabaça e Gimenez (2014), o diodo localizado no sistema impede que a corrente siga pela trilha de cima do circuito, então, o caminho percorrido é pela trilha de baixo. Com isso, a polaridade do capacitor e da carga, nesse tipo de topologia, é invertida. Esse sistema também é conhecido como regulador inversor. Confira, na Figura 3, a topologia de um conversor BUCK-BOOST.

Figura 3 - Circuito de um conversor BUCK-BOOST.



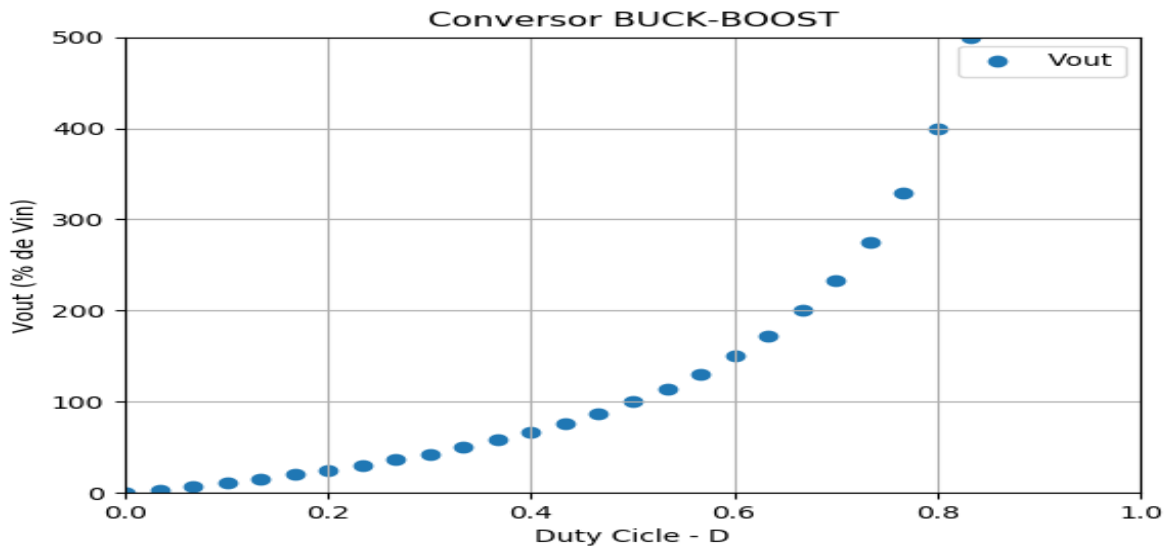
Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim como nas demais topologias, esse conversor apresenta dois estados de operação: (i) chave conduzindo e (ii) chave não conduzindo. Portanto, ele possui um *Duty Cycle* e apresenta também uma tensão na carga que segue a Equação (3), segundo Arrabaça e Gimenez (2014):

$$V_{out} = \frac{V_{in} \cdot D}{1 - D} \quad (3)$$

Baseado na equação acima, o ganho de tensão depende diretamente na razão do *Duty Cycle*, conforme mostrado no Gráfico 1. Quando D é menor que 0,5, o sistema atua como abaixador de tensão; quando é maior que 0,5, ele atua como elevador de tensão; e quando o *Duty Cycle* está em 0,5, ele não altera a tensão de entrada. Dessa forma, o conversor BUCK-BOOST é capaz de atingir uma maior faixa de valores na tensão de saída, diferentemente das outras topologias citadas, tornando-se, assim, a melhor opção no desenvolvimento do sistema desejado com esta pesquisa.

Gráfico 1 - Tensão de saída \times *Duty Cycle* do conversor BUCK-BOOST.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Salienta-se, ainda sobre o conversor BUCK-BOOST, que ele apresenta três modos de condução: (i) o Modo de Condução Contínua (MCC); (ii) o Modo de Condução Limite (MCL); e (iii) o Modo de Condução Descontínua (MDC). O MCC ocorre quando a corrente do indutor não se anula em nenhum momento. O MCL, por sua vez, ocorre quando a corrente do indutor

chega a zero no final do período de condução T_s . Por fim, o MCD ocorre quando a corrente do indutor chega a zero antes do período de condução T_s acabar (MELLO, 2011).

Destaca-se que outros autores, na literatura, também desenvolveram trabalhos com conversores CC/CC aplicados a LEDs, como Almeida (2012). Esse autor, por exemplo, demonstrou, com sua pesquisa, que o uso dos conversores CC tanto para acionar LEDs quanto para corrigir fator de potência é eficiente. Segundo ele, sistemas conectados à rede alternada, visando o alto rendimento, a diminuição de harmônicos na corrente de entrada, a redução do número de componentes e o aumento na confiabilidade, promovem uma vida útil mais longa para os LEDs.

Detalhadas as topologias citadas, é importante frisar que existem outras topologias de conversores CC/CC, as com quatro elementos de armazenamento de energia, tais como: CUK, SEPIC e o ZETA (MELLO, 2011). Porém, como nesta pesquisa focaliza-se os conversores com dois elementos de armazenamento, devido à simplicidade de construção, as principais topologias com quatro elementos de armazenamento não são citadas neste estudo.

2.1.2 Função de transferência

Função de transferência pode ser definida, conforme Nise (2013, p. 723), como “a razão entre a transformada de Laplace da saída de um sistema e a transformada de Laplace da entrada”. Através da função de transferência de um sistema é possível detalhar, entender e aprender o comportamento do mesmo, é possível prever se o sistema é estável, controlável e quais devem ser os ganhos de um controlador para obter determinados parâmetros de controle como tempo de acomodação, tempo de subida, presença e valor de *overshoot* entre outros (NISE, 2016). Devido a sua grande aplicabilidade o conversor BUCK-BOOST já possui sua função de transferência detalhada na literatura. De acordo com Pomílio (2017), a função de transferência deste conversor pode ser visualizada na Equação (4) no domínio da frequência e sem a presença de perdas por grandezas parasitas e é estudada detalhadamente na seção Cálculos dos parâmetros do controlador PI da metodologia.

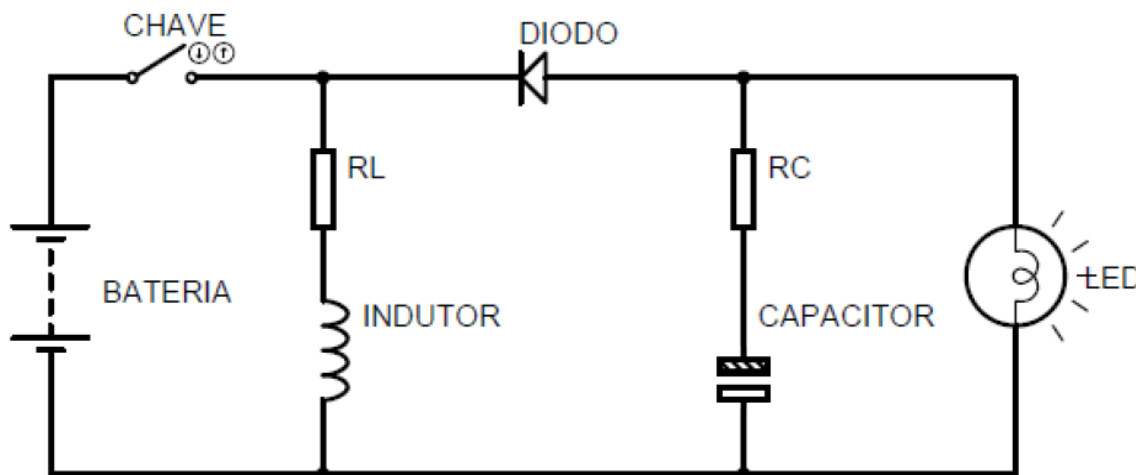
$$\frac{V_o(s)}{d(s)} = \frac{V_i}{(1-D)^2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{D}{(1-D)^2} \cdot \frac{s \cdot L}{R_{load}}\right)}{1 + \frac{s \cdot L}{R_{load}} \cdot \left(\frac{1}{1-D}\right)^2 + s^2 \cdot L \cdot C \left(\frac{1}{1-D}\right)^2} \quad (4)$$

2.1.3 A influência da resistência interna em conversores CC/CC

Conforme explicado por Vilela (2011) e por Mello (2011), em teoria, é possível alcançar qualquer valor de tensão elétrica durante a elevação ou diminuição de energia em um conversor baseando-se somente em suas respectivas equações. Como exemplo, caso se utilize a Equação (3) referente ao conversor BUCK-BOOST, na qual, para um *Duty Cycle* igual a 0,5, a tensão de saída seria igual à tensão de entrada. Outro exemplo, para um ciclo de trabalho igual a 0,95, a tensão seria 19 vezes a tensão de entrada, o que, no entanto, não é possível na prática, pois há a presença de resistências internas, capacitâncias e indutâncias parasitas em todos os componentes do sistema.

Quando inicia-se um processo com altos ganhos de tensão, inicia-se também um processo de dissipação de energia nesses componentes parasitas que tornam o sistema não ideal e, por isso, passa a ser necessário um modelo detalhado do sistema. Um exemplo pode ser visto na Figura 4, em que um circuito de um conversor BUCK-BOOST é representado com suas resistências internas, aproximando-se mais da realidade, sendo que R_L é a resistência interna do indutor e R_C a resistência interna do capacitor¹.

Figura 4 - Circuito do conversor BUCK-BOOST levando em consideração as resistências internas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com Mello (2011), a Equação (5) determina o ciclo de trabalho máximo suportado pelo conversor BUCK-BOOST, levando em consideração apenas a resistência parasita do indutor.

¹ As indutâncias internas do resistor e do capacitor são ignoradas nesta pesquisa, uma vez que se busca tornar as equações mais simples. Ademais, esse fato não gera perda de conteúdo significante.

$$D_{max} = \frac{1 - \sqrt{\frac{R_L}{R_L + R_{Load}}}}{1 - \frac{R_L}{R_L + R_{Load}}} \quad (5)$$

Portanto, o valor máximo do ciclo de trabalho, D_{max} , se torna um dos fatores mais importantes no desenvolvimento do conversor, pelo fato de limitar a aplicação do conversor somente a casos em que a tensão de trabalho, obtida pelo ciclo de trabalho máximo, é menor ou igual à tensão de trabalho na carga. Logo, tem-se:

$$V_{out\ máxima} = \frac{V_{in} \cdot D_{max}}{1 - D_{max}} \quad (6)$$

Analisando a Equação (6), pode-se confirmar que qualquer sistema que precise de uma tensão maior que $V_{out\ máxima}$ deverá aumentar a tensão de entrada, V_{in} , até que o requisito seja satisfeito, pois a outra variável, que também aumenta $V_{out\ máxima}$, está saturada.

Dada a explicação acerca dos conversores, a próxima seção aborda a teoria de controle do sistema, necessária para garantir a estabilidade da tensão na carga devido as mudanças de luminosidade do ambiente e da tensão bateria.

2.2 Teoria de controle

Em sua maioria, os sistemas de controle não possuem uma resposta natural adequada para os tipos de exigências da planta ou do processo. Um exemplo disso é enviar uma entrada degrau a um sistema e verificar se ele consegue estabilizar ou, até mesmo, alcançar o valor da entrada. Na maioria dos casos, os sistemas podem estabilizar - mas apresentar um erro em regime permanente - ou nem sequer estabilizar em certo valor. Por isso, é necessário o uso de controladores, os quais têm como principais funções: corrigir os problemas presentes na resposta natural do sistema e adequar a resposta à necessidade da planta.

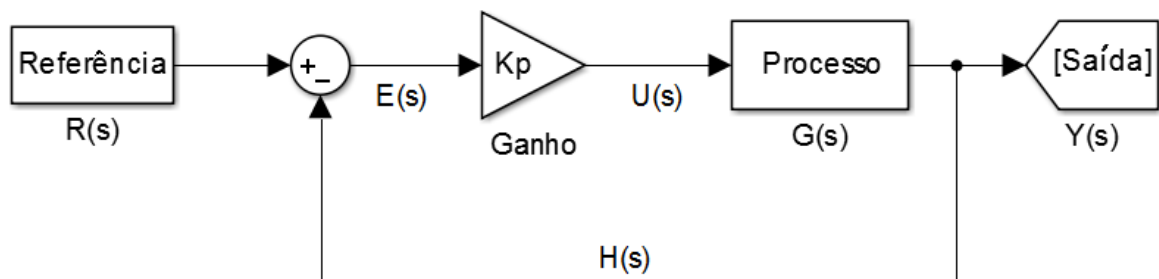
Assim, é necessário programar ganhos ao sistema, a fim de mitigar ao máximo o erro em regime permanente. Para tanto, existem diversas formas de se controlar um processo industrial. Dentre essas formas, a mais comum é por meio do Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID). Esse controlador é composto por três ações que atuam de modos diferente sobre a variável de erro: Proporcional, Integral e Derivativo, como explícito em seu nome.

Conforme Ogata (1994), o Controlador Proporcional (P) atua de forma direta no erro existente, multiplicando o valor atual por uma constante K_p . O Controlador Integral (I) atua também neste sinal, porém, ao contrário do ganho proporcional, ele acumula o erro em função do tempo em que ele ocorre. O ganho do controlador Integral é representado por K_i . Por fim, o Derivativo (D) também atua no erro, mas, por sua vez, opera na presença de uma variação do sinal em um sistema. O seu ganho é representado por K_d . Cada um desses controladores são apresentados em detalhes a seguir.

2.2.1 Controlador P

Um exemplo de sistema genérico em malha fechada com Controlador Proporcional é mostrado na Figura 5. Vale a pena ressaltar que, quando se fecha a malha de um sistema e se acrescenta um ganho proporcional, a função de transferência é alterada e sua estabilidade passa a depender também do valor do ganho proporcional (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013).

Figura 5 – Controlador Proporcional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A função de transferência Equação (7), de acordo com Franklin, Powell e Emami-Naeini (2013), é uma função que relaciona a saída de um sistema com um sinal de entrada ou de referência. Ela pode ser determinada algebricamente da seguinte forma²:

Malha Aberta:

$$Y(s) = U(s)G(s) \quad (7)$$

² Foi admitido que a realimentação $H(s)$ é unitária, portanto, ela não aparece nas equações.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

Malha Fechada:

$$Y(s) = E(s)G(s) \quad (8)$$

$$E(s) = R(s) - Y(s) \quad (9)$$

Substituindo (9) em (8), tem-se:

$$Y(s) = R(s) - Y(s)G(s)$$

$$Y(s) = G(s)R(s) - G(s)Y(s)$$

$$Y(s) + G(s)Y(s) = G(s)R(s)$$

$$Y(s) (1 + G(s)) = G(s)R(s)$$

$$Y(s) = \frac{G(s)R(s)}{1 + G(s)}$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)} \quad (10)$$

Malha fechada com ganho proporcional:

$$Y(s) = U(s)G(s)$$

$$U(s) = E(s)Kp \quad (11)$$

$$E(s) = R(s) - Y(s)$$

Substituindo (9) em (11), tem-se:

$$U(s) = R(s) - Y(s)Kp$$

$$U(s) = KpR(s) - KpY(s) \quad (12)$$

Substituindo (12) em (7), obtém-se:

$$Y(s) = [KpR(s) - KpY(s)]G(s)$$

$$Y(s) = G(s)KpR(s) - G(s)KpY(s)$$

$$Y(s) + G(s)Kp Y(s) = G(s)KpR(s)$$

$$Y(s) (1 + G(s)Kp) = G(s)KpR(s)$$

$$Y(s) = \frac{G(s)KpR(s)}{1 + G(s)Kp}$$

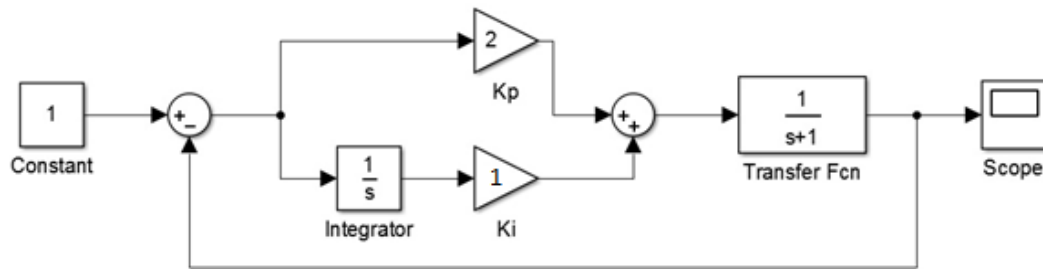
$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s) Kp}{1 + G(s) Kp} \quad (13)$$

Pode-se notar, portanto, que existe uma influência do ganho Kp no sistema, dado que esse altera a função de transferência, intervindo em aspectos importantes, como: a fase transitória, o erro em regime permanente e a estabilidade. Logo, seu valor deve ser estudado e apropriado para que o sistema tenha: (i) uma fase transitória ideal para o tipo de processo; (ii) erro em regime permanente próximo a zero e (iii) seja estável.

2.2.2 Controlador PI

O Controlador Proporcional Integral tem como função corrigir o principal problema que o Controlador Proporcional sozinho não conseguia resolver: o erro em regime permanente. O seu sistema genérico é mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Controlador Proporcional Integral.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme Ogata (1994), com a implementação de um ganho integral, sempre que houver um erro que persistir por um determinado tempo, o Controlador Integral atuará na variável manipulada, aumentando-a ou diminuindo-a, fazendo com que seja enviado um sinal maior para a variável da planta, alterando a variável controlada. Portanto, segundo o autor, com a presença do Controlador Integral, sempre que existir um erro, ele atuará com o intuito de eliminá-lo. Logo, o erro de regime permanente, presente no sistema quando se utiliza o Controlador Proporcional, Equação (14), é eliminado com a implementação do Controlador Integral.

$$u(t) = K_p \cdot e + \int_{T_0}^T e(t) \cdot dt \quad (14)$$

Transformando (14) para o domínio da frequência, tem-se a Equação (15):

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (15)$$

Pode-se notar que, após incluir o Controlador PI, é acrescentado um polo na origem do sistema e um zero em $-K_i/K_p$. Esse polo e esse zero faz com que altere o lugar das raízes. Por isso, muda a resposta do sistema, tanto no regime transitório quanto no regime permanente.

2.2.3 O erro em regime permanente

De acordo com Nise (2013, p. 506), “[...] o erro em regime permanente é a diferença entre a entrada e a saída para uma entrada de teste prescrita quanto $t \rightarrow \infty$ ”. Esse erro não é uma particularidade do sistema e do seu controle. Ele depende do tipo de entrada, ou seja, um mesmo

sistema pode ter erro zero em regime permanente, haja vista uma entrada em degrau; como também pode ter um erro infinito, em vista de uma entrada em parábola. Esclarecido isso, como em conversores CC/CC usualmente utiliza-se entradas em degrau como referência de *set-point*, o erro em função do tempo e em malha aberta, Equação (16), pode ser definido como:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (16)$$

Logo, o erro, a longo prazo, pode ser calculado utilizando o teorema do valor final, Equação (17):

$$e(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} r(t) - y(t)$$

$$e(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) \quad (17)$$

O erro em frequência e em malha aberta, Equação (18), pode ser definido como:

$$E(s) = R(s) - Y(s) \quad (18)$$

$$Y(s) = E(s) G(s)_{MA} \quad (19)$$

Substituindo (19) em (18), forma-se (20):

$$E(s) = R(s) - E(s)G(s)_{MA}$$

$$E(s) = \frac{R(s)}{1 + G(s)_{MA}} \quad (20)$$

Aplicando o valor final, obtém-se:

$$e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} U(s) \frac{sR(s)}{1 + G(s)_{MA}} \quad (21)$$

Logo, aplicando-se uma entrada degrau, Equação (22), fica:

$$U(s) = \frac{1}{s} \quad (22)$$

$$e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} \frac{sR(s)}{1 + G(s)_{MA}}$$

$$e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{R(s)}{1 + G(s)_{MA}}$$

Admitindo R(s) sendo igual 1, tem-se:

$$e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + G(s)_{MA}}$$

$$e(\infty) = \frac{1}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} G(s)_{MA}} \quad (23)$$

Ante ao exposto, por meio da Equação (23), observa-se que, para que ocorra um erro em regime permanente, o limite de G(s), quando s tende a zero, deve tender a infinito.

2.2.4 Influência do Controlador Integral no erro

Buscando demonstrar a influência desse controlador, exemplifica-se, na sequência, o estudo do sistema sem a presença de controladores, depois com o Controlador P e, por último, com o Controlador PI.

2.2.4.1 Sem a presença de controladores

Dada a função de transferência G(s) abaixo, o regime permanente, de uma entrada em degrau, em malha fechada, pode ser calculado usando a Equação (23).

$$G(s) = \frac{1}{s + 1}$$

$$e(\infty) = \frac{1}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} G(s)_{MA}}$$

$$e(\infty) = \frac{1}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s+1}}$$

$$e(\infty) = \frac{1}{1 + \frac{1}{0+1}}$$

$$e(\infty) = \frac{1}{2}$$

2.2.4.2 Com o Controlador Proporcional

Com a adição de um Controlador P, com ganho K_p igual a 2, o regime permanente, dada uma entrada em degrau, em malha fechada, pode ser calculado a partir das Equações (23) e Equação (24) descrita abaixo:

$$G(s)_{MA} = G(s)K_p \quad (24)$$

Inserindo $G(s)$, forma-se:

$$G(s)_{MA} = \frac{K_p}{s+1}$$

Substituindo a Equação (24) em (23), tem-se:

$$e(\infty) = \frac{1}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K_p}{s+1}}$$

$$e(\infty) = \frac{1}{1 + K_p}$$

Substituindo K_p por 2, obtém-se:

$$e(\infty) = \frac{1}{1 + 2} = 0,33$$

Portanto, com a adição do Controlador proporcional, consegue reduzir o erro em regime permanente, mas não fazê-lo igual a zero.

2.2.4.3 Com o Controlador Proporcional Integral

Agora, adicionando um Controlador Integral com $K_i = 1$, junto com um Controlador P com ganho K_p de 2, o regime permanente, conforme Nise (2013), dada um entrada em degrau, em malha fechada, pode ser calculado usando as Equações (24) em (23):

$$G(s)_{MA} = \frac{1}{s + 1} \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right)$$

$$G(s)_{MA} = \frac{K_p + \frac{K_i}{s}}{s + 1}$$

$$G(s)_{MA} = \frac{K_p s + K_i}{s^2 + s}$$

$$e(\infty) = \frac{1}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} G(s)_{MA}}$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} G(s)_{MA} = \infty$$

$$e(\infty) = 0$$

Portanto, com a adição do Controlador Integral, criando um polo na origem do sistema, o erro em regime permanente se torna zero. Assim, comprova-se a eliminação do erro em regime permanente.

2.2.5 A importância da modelagem de sistemas

Para se controlar, de forma eficaz, um sistema, segundo Ogata (1994), é necessário obter a função de transferência do sistema em questão. Conforme o autor, por meio dessa função, é possível: (i) encontrar o tempo de acomodação, o tempo de subida do sistema, permitindo determinar se o sistema é subamortecido, criticamente amortecido ou sobreamortecido; (ii) se existe *overshoot* (sobressinal), é possível saber qual o seu valor e em que momento ele ocorre; (iii) determinar se existe erro permanente, se houver, qual o valor desse erro e quais os melhores parâmetros do controlador para eliminar tal erro; e (iv) se o sistema é estável ou instável, e, caso seja instável, quais ganhos no controlador devem ser inseridos para torná-lo estável.

Modelando o conversor e encontrando a função de transferência do sistema, conforme Nise (2013), pode-se determinar parâmetros de funcionamento e implementá-los no código do microcontrolador, de forma a se conseguir alcançar os objetivos de controle. Ainda segundo Nise (2013), essa modelagem pode ser feita por meio de equações diferenciais, provenientes das equações físicas, que ditam o comportamento dos componentes que compõe o sistema.

2.3 LED

O LED foi criado em 1962 por um engenheiro da *General Electric* chamado Nick Holoniak Jr. Essa sigla significa *Light Emitter Diode*, a qual pode ser traduzida como diodo emissor de luz. Segundo Silva (2012), LED é um dispositivo semicondutor que emite luz em um determinado comprimento de onda, quando polarizado corretamente. Existem basicamente dois tipos principais de LED: o LED de sinalização e o LED de potência.




O LED de sinalização pode ser encontrado em dispositivos eletrônicos, como televisão, celular, som, sistemas de alarmes, sistemas de liga/desliga e sinalizações de saída em prédios e escritórios. Por seu turno, o LED de potência, proveniente do LED de sinalização, usado em âmbito comercial, industrial ou doméstico, pode ser encontrado em iluminações em geral, como varandas, calçadas, ruas etc. Nesse caso, o termo “potência” define a alta intensidade de luz gerada.

Conforme dito por Silva (2012), o LED tem como principal característica o baixo consumo de energia, se comparado com outras formas de iluminação, como a fluorescente, a comum e a de mercúrio; isso pode ser confirmado quando se analisa a eficiência luminosa de diferentes tipos de fontes de luz. Ainda de acordo com Silva (2012), o LED, por exemplo, possui

uma eficiência de 150-200 lúmens para cada Watt de energia gasto, enquanto as lâmpadas fluorescentes e as halógenas possuem, respectivamente, 60-100 e 15-20 lm/W. Essa eficiência se deve, principalmente, ao modo de construção do LED e aos seus respectivos componentes internos.

Há vários estudos, como Santos et al. (2015) e Gianelli et al. (2009), que demonstram, por meio de experimentos físicos, como testes de eficiência energética, de luminosidade e de durabilidade, as diferenças entre as principais formas de iluminação. Na Figura 7 apresenta-se um comparativo entre as principais características de três tipos diferentes de lâmpadas. Dentre os principais itens destacados estão: durabilidade, consumo, economia, emissão de calor, se são ecológicas e eficiência.

Figura 7- Comparativo entre tipos de lâmpadas.

	Comum	Fluorescente	LED
Tipo			
Durabilidade	1 ano	5 anos	15 anos
Consumo	50 W	10 W	5 W
Economia	x	até 80%	até 95%
Emissão de calor	ALTA	MÉDIA	BAIXA
Ecológica	Não contém mercúrio	Contém mercúrio	Não contém mercúrio
Eficiência	Pouca	Mediana	Muita

Fonte: Vantagens de utilizar lâmpadas LED (2016).

Conforme Silva (2012), para um bom funcionamento, o LED precisa de alguns componentes auxiliares, como o *driver* e o dissipador. O *driver* é o equipamento responsável por controlar a tensão e a corrente que chegam ao LED; ele também impede a chegada de oscilações e de ruídos da bateria ou da rede elétrica. Logo, é crucial para a vida útil do LED. Já o dissipador atua diretamente na redução da temperatura de funcionamento, com o objetivo de ampliar a área de contato entre o LED e o ar, melhorando, assim, a convecção térmica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme delineado na fundamentação teórica deste trabalho, os conversores CC/CC possuem, entre várias vantagens, diversas limitações e dificuldades. Parâmetros como frequência de comutação, valor da indutância e capacitância são primordiais para o bom desenvolvimento de um conversor. Dito isso, a fim de desenvolver e implementar, com esta pesquisa, um sistema, por meio de um conversor CC/CC microcontrolado, com sensores de corrente e de luminosidade, estabeleceu-se 9 etapas de projeto, quais sejam: (i) requisitos de projeto; (ii) leitura dos *datasheets*; (iii) escolha do microcontrolador; (iv) escolha do módulo Bluetooth e sensor de luz; (v) cálculo dos parâmetros do controlador PI; (vi) simulação; (vii) teste de bancada; (viii) condições do ambiente e (ix) construção do protótipo. Salienta-se, antes de descrevê-las especificamente, que: as etapas de 1 a 5 correspondem somente ao desenvolvimento do projeto do conversor; as etapas de 6 a 8 referem-se aos testes de validação e correções do projeto e a etapa 9 desenvolve-se o protótipo final do sistema.

3.1 Requisitos de projeto

A pesquisa em tela tem como principais requisitos e parâmetros o controle de potência de um LED de 10 W de energia. Esse LED tem como tensão nominal 52 VCC e uma corrente nominal de 170 mA. A tensão de entrada estabelecida foi de 24 VCC e a frequência de chaveamento do conversor foi de 62,5 kHz. Determinou-se esses dados em vista da frequência padrão do microcontrolador utilizado, o Arduino, e também pelo fato de o ruído da comutação do MOSFET ficar fora da faixa de frequência da audição humana, que é entre 20 Hz a 20 kHz, segundo Santos (1999) e Mello (2011). Para uma melhor visualização, a Tabela 1 esquematiza todas essas informações:

Tabela 1 - Tabela de parâmetros do sistema.

Variável	Valor
Tensão de entrada	24 VCC
Tensão de saída	0 a 52 VCC
Corrente de saída	170 mA
Ondulação da corrente	50 mA
Ondulação da tensão	1 mV
Potência do LED	10 W
Resistência do LED	$\cong 313 \Omega$
Frequência de chaveamento do MOSFET	62,5 kHz
Tempo de acomodação do controlador	3 s

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como a tensão de saída deve ser ora menor que a tensão de entrada ora maior, a topologia que utilizada foi a BUCK-BOOST.

3.2 Leitura de *datasheets*

Para a realização desta pesquisa, foi necessário estudar o comportamento de todos os componentes utilizados, por meio dos *datasheets* de seus fabricantes, pois cada componente apresenta características, tolerâncias e faixas de aplicações diferentes. Segundo Catsoulis (2005), nos *datasheets* encontram-se todas as informações primordiais para o bom funcionamento do circuito eletrônico, tais como: corrente máxima, tensão máxima, temperatura de funcionamento, tensão mínima para funcionamento, capacitância parasita, componentes auxiliares e exemplos de aplicações, facilitando, assim, o desenvolvimento de projetos. A partir da leitura e da interpretação desses documentos, iniciou-se o projeto físico.

3.3 A escolha do microcontrolador

O microcontrolador utilizado neste estudo é o Arduino Nano, que possui baixo custo financeiro, o qual consegue satisfazer e fornecer as necessidades técnicas do projeto, por exemplo, o número grande de pinos para a comunicação dos sensores, conversores Digitais para Analógicos (D/A) internos de 10 bits e a modulação de frequência na faixa de trabalho do conversor. Outro fator que foi analisado nessa escolha refere-se à sua dimensão física, que é compacta, cerca de apenas 43,2 por 17,8 mm.

3.4 Módulo Bluetooth e do sensor de luz

O módulo Bluetooth que foi utilizado é o HC-05. Ele é composto por 6 pinos: *State*, Rx, Tx, GND, VCC e *Key*. Esse módulo pode ser utilizado tanto como mestre ou como escravo, logo é possível utilizá-lo em uma rede de comunicação com outros dispositivos. Sua alimentação é de 3,3 V e possui suporte para diferentes valores de *baud rate* como: 9600, 19200, 38400, 57600, 115200, 230400, 460800. Foi escolhido utilizar 9600 neste trabalho, pois se trata de uma velocidade adequada para a quantidade de informações que são transmitidas do microcontrolador para o módulo, sendo que, a comunicação se dá através de *strings* de até 20 bytes.

Já o sensor de luz escolhido foi o *Light Dependent Resistor* (LDR). Esse sensor é um resistor que varia sua resistência com a intensidade da luz. Sua saída é um sinal analógico que é lido pela porta analógica do Arduino Nano, gerando um sinal de 0 a 1023 (10 bits).

3.5 Cálculos dos parâmetros do controlador PI

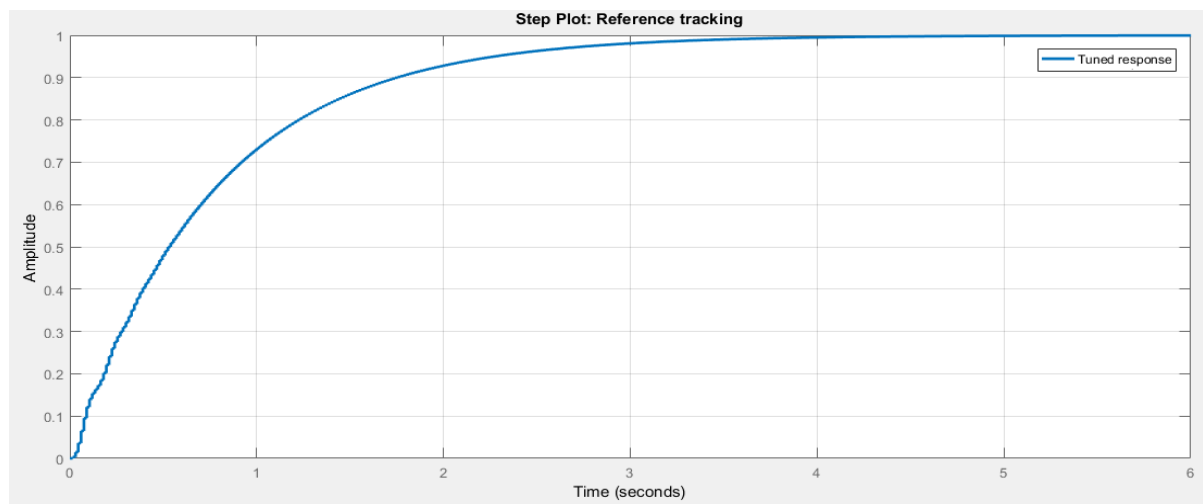
Devido à própria natureza do sistema e à sua aplicação, faz-se necessário algumas características específicas presentes no controlador, tais como: (i) o sistema ser controlável; (ii) não apresentar sobressinal, pois uma sobrevoltagem queimaria o LED; (iii) a correção do erro em regime permanente e (iv) o tempo de acomodação de 3 segundos, conforme a Tabela 1. Outros fatores igualmente importantes são: (v) a taxa de variação da tensão de entrada proveniente da bateria que, devido às características de fabricação, não apresentam grandes variações em curtos períodos de tempo e (vi) o *set-point* também não apresenta variações bruscas, logo, não serão necessárias mudanças em curtos intervalos de tempo no ciclo de trabalho do conversor. Dito isso, foi escolhido, para o desenvolvimento do protótipo, o controlador PI, visto que ele consegue lidar com todos os requisitos acima descritos.

Utilizando a função de transferência do BUCK-BOOST, a Equação (4), e realizando substituição dos valores do projeto na função de transferência com um ciclo de trabalho igual a 0,6 obtém-se:

$$\frac{Vo(s)}{d(s)} = \frac{-0,006038s + 150}{4,62E - 06 s^2 + 6,709E - 05 s + 1}$$

Através do *software* Matlab, com o auxílio da ferramenta sisotools foi testado a estabilidade da planta em malha aberta e foi possível determinar os ganhos do controlador PI para que sejam atendidos os requisitos de controle. Utilizando a *toolbox* PID Tuner do Matlab foi possível especificar parâmetros de ganho do controlador PI. A Figura 8 (a) apresenta a entrada degrau para o sistema e (b) os parâmetros do controlador no sistema com tempo de amostragem do controlador de 15 ms.

Figura 8 - Resposta ao degrau para o sistema em malha fechada com o controlador PI (a) e os parâmetros de controle do sistema (b).



(a)

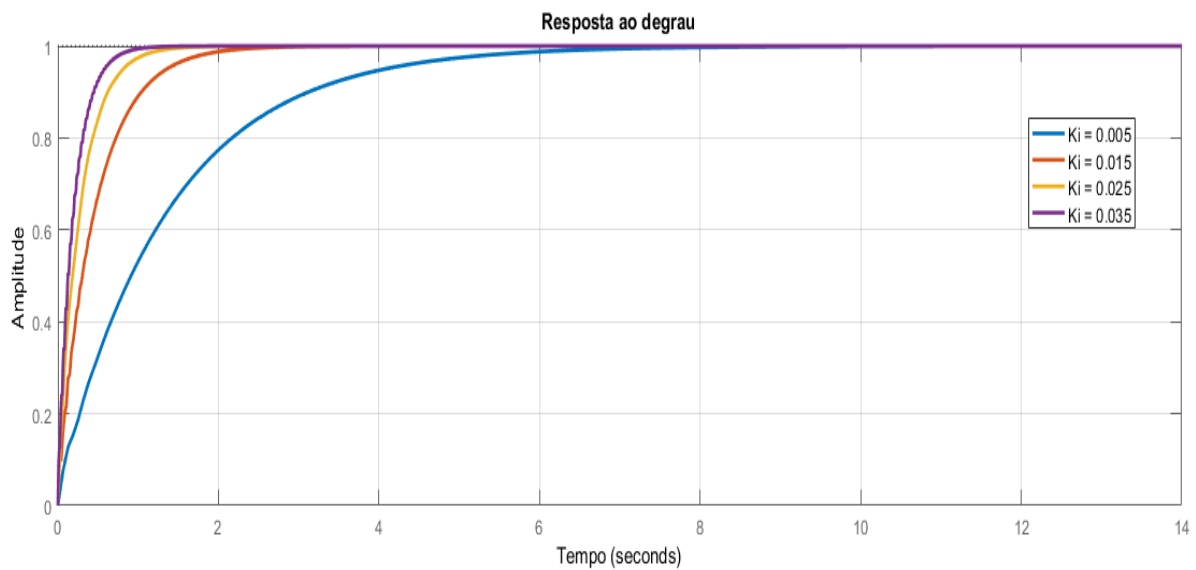
Controller Parameters	
	Tuned
P	6.5263e-05
I	0.0087017
D	n/a
N	n/a
Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	1.66 seconds
Settling time	2.97 seconds
Overshoot	0 %
Peak	1
Gain margin	21 dB @ 45.5 rad/s
Phase margin	89.2 deg @ 1.31 rad/s
Closed-loop stability	Stable

(b)

Pode-se notar que com o ganho $K_p = 6,52E-06$ e $K_i = 0,0087$ o sistema se comportou conforme os parâmetros do projeto apresentando estabilidade, sem *overshoots* e com margem de ganho de 21 dB e de margem de fase com 89,2 graus.

Por fim, foi realizado mais um teste para averiguar o comportamento do ganho K_i no sistema, a Figura 9 apresenta a resposta degrau da planta em malha fechada como ganho $K_p = 0,0002$ fixo e K_i sendo variado de 0,005, 0,015, 0,025 e 0,035.

Figura 9 - Resposta ao degrau com diferentes ganhos de Ki.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Dados todas essas informações, os ganhos escolhidos para o sistema foram $K_p = 0,0002$ e $K_i = 0,015$, de acordo com a equação do controlador no domínio da frequência (15).

$$C_G = K_p \frac{K_i}{s}$$

$$C_G = 0,0002 \frac{0,015}{s}$$

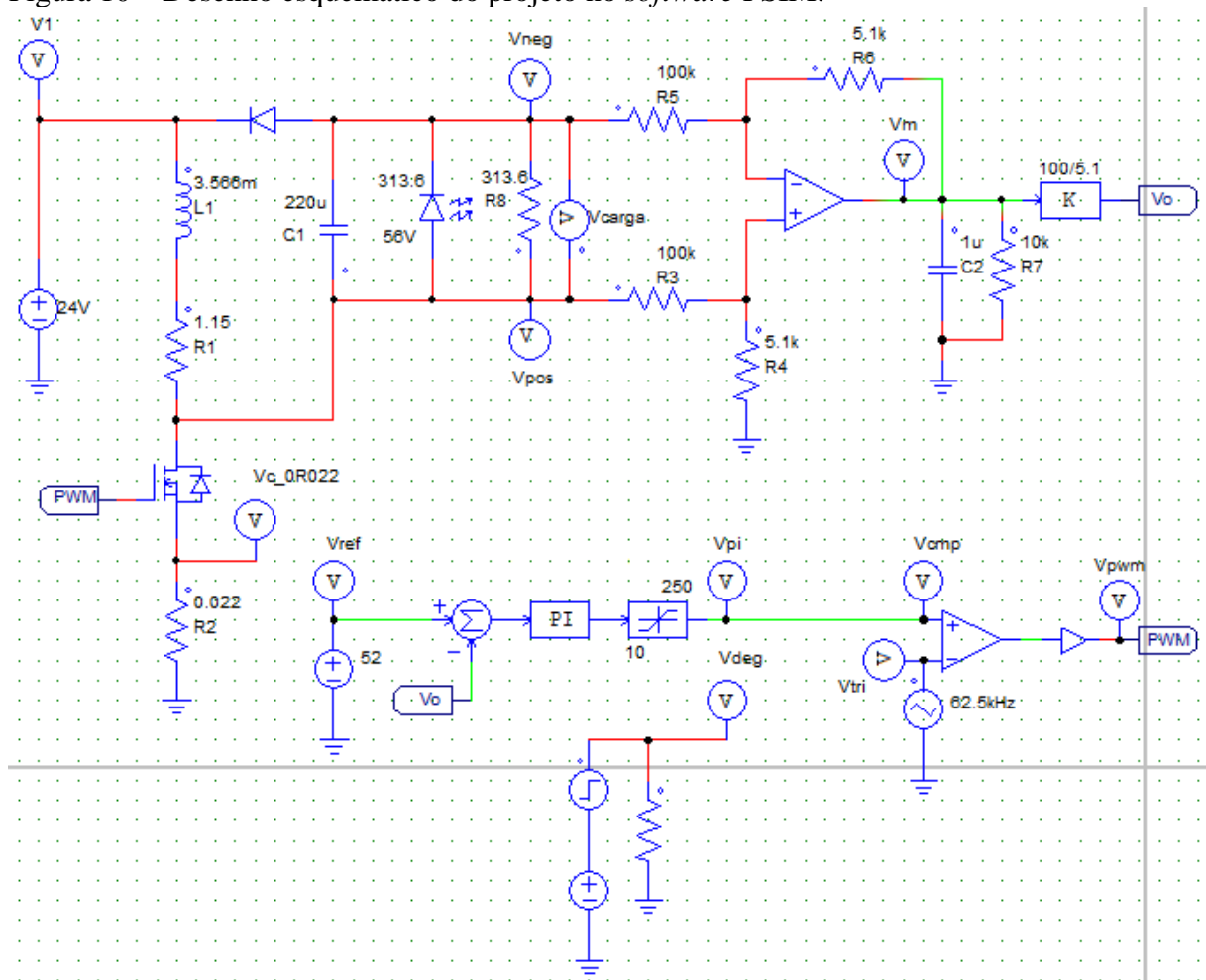
3.6 Simulação

Após a escolha do microcontrolador, do controlador e dos demais componentes, realizou-se a simulação do circuito do conversor. Com uma simulação via *softwares* Proteus e PSIM, foi possível prever falhas, confirmar hipóteses de funcionamento e testar a implementação da programação do microcontrolador no *software* Proteus. Dessa forma, simulou-se, através do PSIM, não só o circuito eletrônico - controle e potência - Figura 10, como também toda a lógica de funcionamento do microcontrolador. Com isso, as técnicas de controle, utilizadas nesta pesquisa, também foram simuladas. Vale ressaltar que a tensão na carga não possui referência com a entrada, logo foi fundamental adequar o sinal da carga com o *ground* por meio de um amplificador operacional como subtrator. Contudo, foi necessário colocar na saída do amplificador um capacitor para filtrar o sinal. O capacitor escolhido foi de pequena capacitância, 1 μF , para não alterar o comportamento natural do sistema.

A etapa inicial da simulação consistiu em inserir todos os componentes eletrônicos que constituem a topologia BUCK-BOOST. Depois testou-se, alterando o *Duty Cycle*, se a tensão de saída variou conforme estipulado pela Equação (3). Fez-se ensaios na simulação com diversos tipos de entrada no sistema. Foi analisado também o comportamento do sistema com uma variação na tensão de entrada, simulando a queda e o carregamento na tensão de alimentação do sistema. Os resultados desses testes estão na seção 4.1 deste estudo. Por último, implementou-se o código do microcontrolador em seu formato hexadecimal, para realizar o controle do conversor, no *software* Proteus, analisando, assim, o processo mais próximo da realidade.

A simulação, portanto, teve um papel fundamental no desenvolvimento deste trabalho, já que, ao se obter bons resultados na simulação, aumentou-se a confiabilidade no desenvolvimento das próximas etapas da pesquisa.

Figura 10 – Desenho esquemático do projeto no *software* PSIM.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.7 Testes em bancada

Para realizar os testes feitos no simulador, utilizou-se equipamentos eletrônicos, como multímetros, fontes de energia, osciloscópios, protoboard, prensa térmica e fios. Após a finalização da simulação e a escolha dos componentes, iniciou-se os testes em bancada. Nesses, testou-se todos os componentes individualmente e coletivamente, a fim de garantir suas funcionalidades e operabilidades. Ainda nessa etapa, verificou-se a possibilidade de se alcançar os valores obtidos na Tabela 1 e no simulador antes do início da etapa de prototipagem.

Salienta-se, ainda, que, para desenvolver a placa de circuito eletrônico na qual o sistema foi montado, empregou-se o *software* Eagle. Por meio do seu ambiente, criou-se um esquemático eletrônico, colocando todos os componentes necessários e, a partir do circuito esquemático, desenvolveu-se todo o traçado das trilhas que levam os sinais eletrônicos para o funcionamento do protótipo.

3.8 Local e condições do ambiente

Todo o protótipo foi realizado nas dependências do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), unidade Araxá ou em casa. Esses ambientes não interferiram eletromagneticamente no desenvolvimento do trabalho. Notou-se também que o protótipo não sofreu alterações provenientes da temperatura. Logo, se necessário, deve-se incluir um dissipador de calor no MOSFET para mitigar a temperatura de trabalho do conversor.

3.9 Construção do protótipo

Para realizar o desenvolvimento do protótipo, realizou-se uma lista completa de todos os componentes necessários e, posteriormente, sua fabricação. Foi desenvolvido o *layout* por meio do esquemático para fabricação da placa de circuito impresso (*Printed Circuit Board - PCB*). O *software* utilizado para tal aplicação foi o Eagle.

3.9.1 Itens necessários para a construção do protótipo

Na Tabela 2, são indicados todos os componentes que foram utilizados no protótipo, com suas respectivas descrições e quantidades.

Tabela 2 - Componentes necessários para a construção do protótipo.

Componente	Descrição	Quantidade
Microcontrolador	Arduino Nano	1
Indutor	3,56 mH e 1,5Ω	1
Capacitor na carga	220 μF	1
Capacitor no amplificador 741	1 μF	1
Diodo Schottky	SB3200	1
LED	10 W	1
Placa de Fenolite	10x15 cm	1
Bornes para conexão	2 pinos	2
Sensor de Luz	Módulo LDR	1
Sensor de Corrente	ACS712 -5A a +5A	1
Módulo Bluetooth	HC-05	1
Circuito Integrado 741	Amplificador Operacional	1
MOSFET de Potência	IRFZ44N	1
Socket	4 pinos	1
Percloroeto de Ferro	Corroer o cobre	0,1 Litro
Prensa Térmica	Prensa térmica para a transferência da tinta para PCB	1

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.9.2 Desenvolvimento do protótipo

Com todos os itens listados, desenvolveu-se o sistema eletrônico do sistema gerenciador de energia a LED. O *layout* das placas podem ser visto na Figura 11, sendo (a) a placa de potência e (b) circuito de comando.

Figura 11 - Desenvolvimento do *layout* das PCBs: (a) placa de potência e (b) placa de comando e sensores.



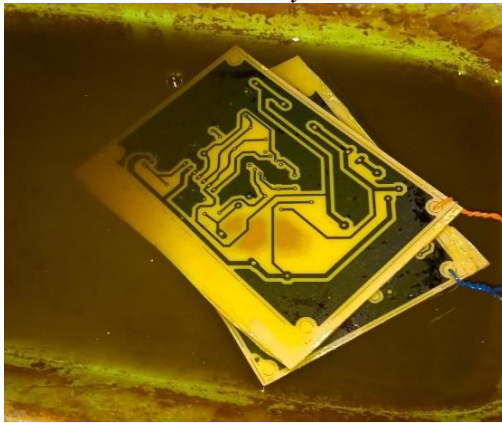
(a)

(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida, foi impresso, em uma folha de papel fotográfico, o *layout* de ambas as placas e, através de uma prensa térmica, o desenho do projeto foi transferido para as placas de fenolite. Posteriormente, as placas foram inseridas em uma solução de perclorato de ferro. Essa solução tem como objetivo corroer o cobre que estiver em contato com ela, logo, ao final de aproximadamente 25 minutos, todo o cobre que ficou exposto à solução foi consumido e apenas o desenho do *layout* ficou intacto. Observe, na Figura 12, o resultado:

Figura 12 – Processo de produção das PCBs: (a) placas durante a corrosão do cobre e (b) placas após a transferência do *layout*.



(a)

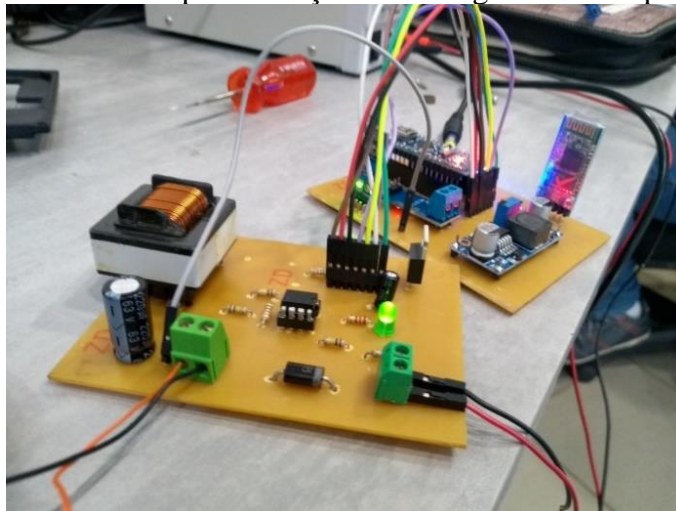


(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao término da etapa anterior, as placas foram retiradas da solução, limpadas com água e, então, deu-se início à furação e à soldagem dos componentes. Ao final de todo esse processo, foi finalizado a construção do protótipo, ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Placas após a furação e a soldagem dos componentes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

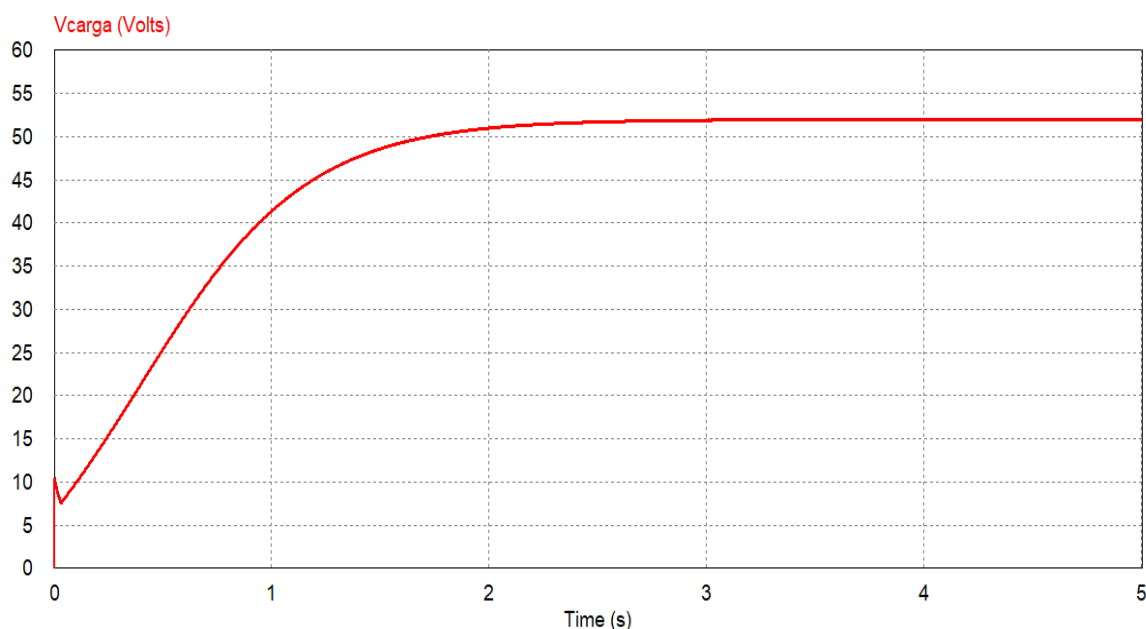
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, ante ao objetivo geral desta pesquisa, qual seja: desenvolver e implementar um sistema, por meio de um conversor CC/CC microcontrolado, com sensores de corrente e luminosidade, que: (i) gerencie a iluminação a LED com o uso de baterias, a fim de automatizar e de supervisionar LEDs de alta potência, e (ii) controle, local ou remotamente, a intensidade de luz e de consumo de energia, apresenta-se as principais discussões sobre os resultados obtidos tanto na simulação quanto no uso do protótipo.

4.1 Resultados da simulação

A fim de se validar o controle e a potência do sistema desenvolvido no PSIM, cf. Figura 10, testou-se diferentes situações. No Gráfico 2 ilustra-se a fase transitória do controle até sua estabilidade, com os ganhos de $K_p = 0,0002$ e $K_i = 0,015$, haja vista uma entrada de 24 V. Com esse Gráfico, percebe-se que o regime transitório dura aproximadamente 3,0 segundos. Após esse período, o regime se torna estacionário.

Gráfico 2 - Fase transitória do sistema do sistema.

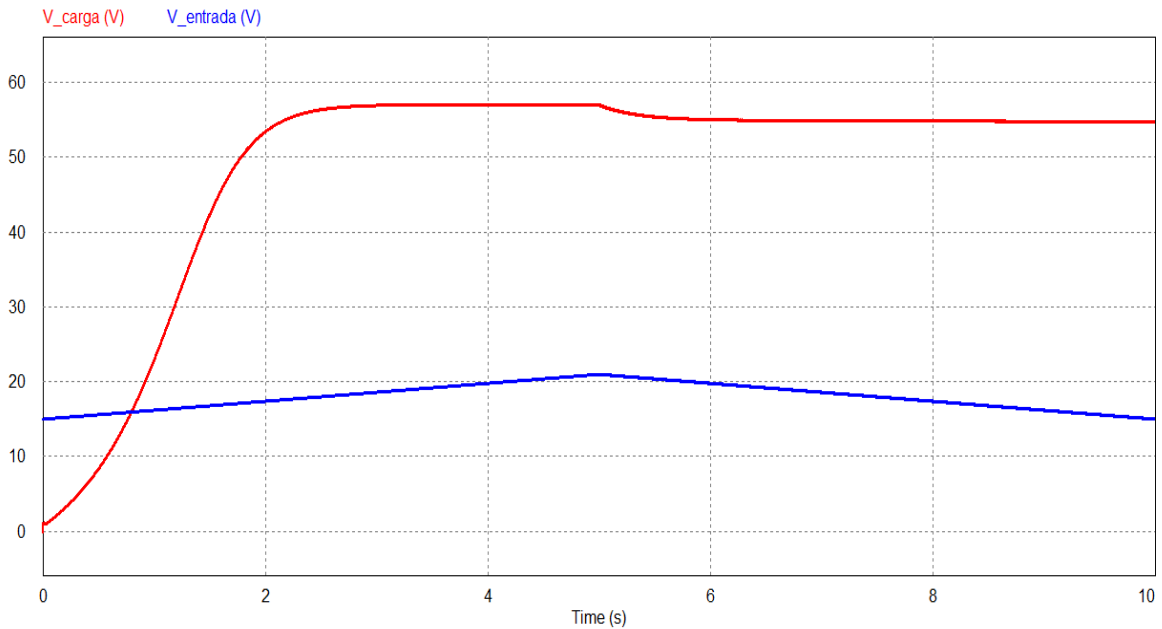


Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o fito de averiguar o comportamento do sistema com variações na tensão de alimentação entre 16 e 24 V, obteve-se o Gráfico 3. Tal oscilação ocorre com a frequência de 0,2 Hz. Pode-se notar que, mesmo com essa variação, a tensão na carga continua próxima da

faixa de 52 V apesar de apresentar um *offset*, uma vez que o controlador PI apresenta um erro em regime permanente dado uma entrada em rampa.

Gráfico 3 - Comportamento do sistema com a variação da tensão de entrada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

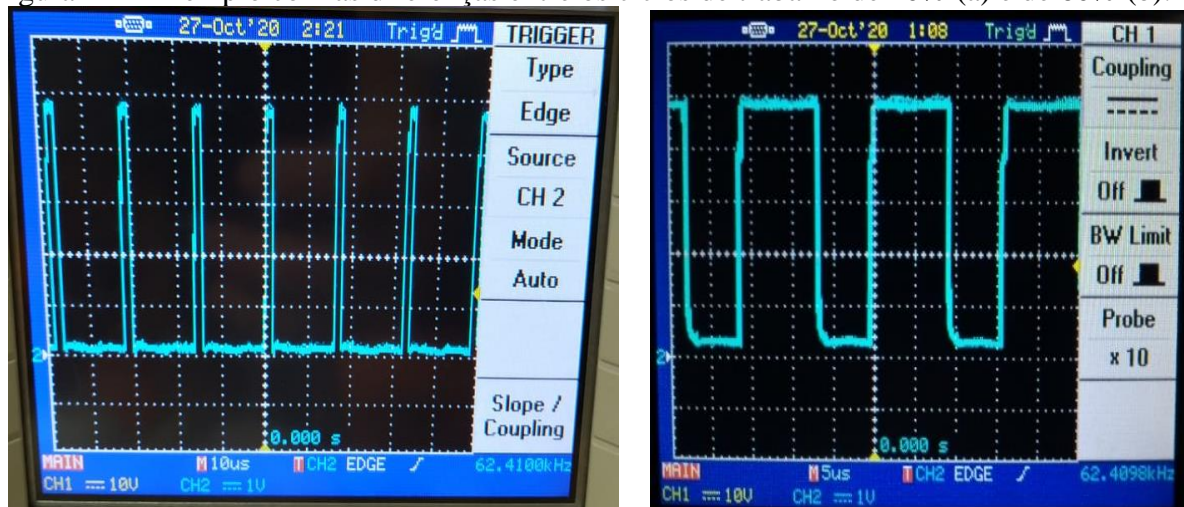
Conforme apresentado anteriormente, a resistência interna do indutor possui um papel importante no projeto do conversor. Quanto maior for a dissipação de energia no indutor, menor a capacidade do conversor BUCK-BOOST elevar a tensão.

4.2 Resultados experimentais

Para realizar os testes experimentais e devido à própria natureza do conversor, foram estipulados limites para atuação do ciclo de trabalho sendo 10% o valor mínimo e 75% o valor máximo. O sistema discretizado possui um tempo de amostragem de 15 ms. A tensão de entrada utilizada no teste foi entre 21 e 24 V. A potência enviada à carga varia de acordo com as condições do ambiente. São apresentados nessa seção dois exemplos com demandas diferentes.

Para uma situação na qual há certa deficiência de luminosidade no ambiente, o sistema atuou elevando a razão cíclica de 10% para 60%. Confira Figura 14.

Figura 14 – Exemplo com as diferenças entre os ciclos de trabalho de 10% (a) e de 60% (b).



(a)

(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o aumento de 10 para 60% no ciclo de trabalho, devido a demanda exigida pelo sensor de luz, houve também aumento da tensão na carga de 35 V³ para 46 V e, conseqüentemente, intensificou-se a potência dissipada no LED. Na Figura 15 ilustra-se essa ocorrência.

Figura 15 - Tensão de entrada da carga (multímetro à esquerda) e a tensão de saída (multímetro à direita) com ciclo de trabalho igual a 10% (a) e tensão de saída com sua respectiva entrada com 60% de ciclo de trabalho (b).



(a)

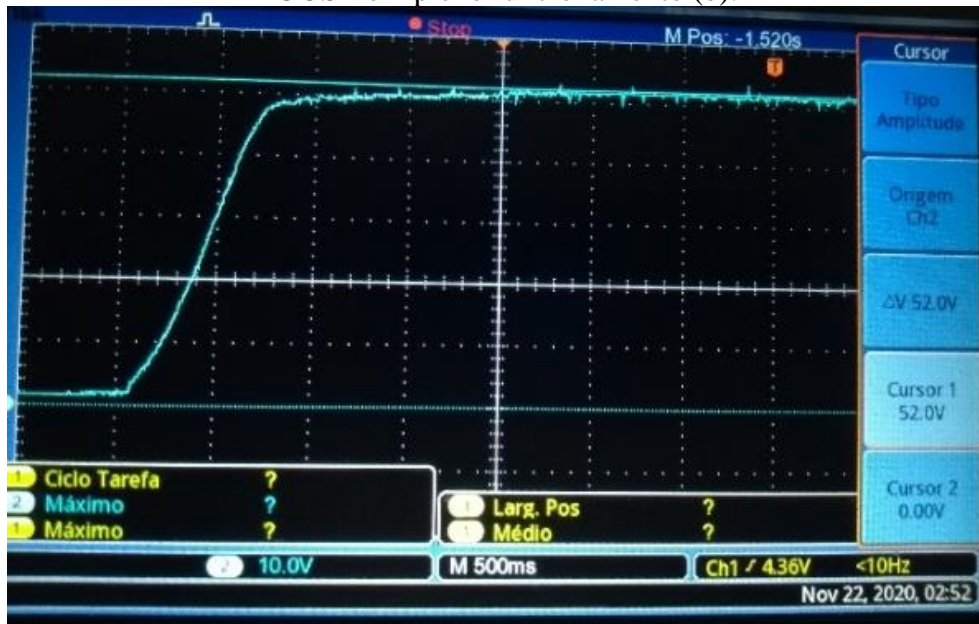
(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

³ Por se tratar de LEDs, o ciclo de trabalho do conversor de 10% consegue elevar a tensão de 21 para 35 V. Contudo, não há fluxo de corrente no sistema, fazendo com que não haja potência dissipada nos LEDs. Logo, os LEDs não acionam nessa faixa de ciclo de trabalho.

Já em uma segunda situação, foi simulado um ambiente totalmente sem luz. Uma entrada degrau nessas condições é ilustrada na Figura 16. Nota-se, além disso, a ausência do *overshoot*, o que causaria uma sobrevoltagem no sistema, que é indesejável. O conversor elevou a tensão na carga de 35 V para 52 V com um tempo de acomodação de aproximadamente 3 segundos.

Figura 16 - Tensão de saída na carga após uma entrada em degrau (a) e o conversor BUCK-BOOST em pleno funcionamento (b).



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema gerenciador de energia construído figura como uma nova opção para o gerenciamento de energia para os LEDs, visando resolver o problema do consumo de energia excessivo das baterias, que entram em descarga profunda, e da entrega fixa de energia para os LEDs, independentemente das condições de luminosidade do ambiente.

O sistema construído é constituído por um conversor BUCK-BOOST, que se mostrou uma ótima opção entre as diversas topologias de conversores CC/CC existentes. O microcontrolador Arduino Nano apresentou-se como uma boa opção custo-benefício, dado que ele é capaz de realizar leituras analógicas, digitais e possui uma boa gama de frequências de chaveamento para o MOSFET. Devido a presença do sensor LDR foi possível detectar a intensidade da luz presente no ambiente e, assim, gerenciar, da melhor forma, o envio de potência aos LEDs. Por meio do módulo Bluetooth HC-05 houve uma ganho na operabilidade do sistema, em virtude dele poder ser supervisionado e acionado por meio dessa tecnologia, através de um dispositivo móvel, promovendo, praticidade aos usuários.

Sobre os resultados obtidos, verificou-se as semelhanças entre os resultados simulados e os experimentais. O problema do descarregamento profundo da bateria também foi resolvido, aplicando uma condição no código do microcontrolador, fazendo com que o sistema atue somente em tensões acima do valor instruído pela fabricante da bateria, melhorando, assim, sua vida útil.

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de pesquisas detalhadas que visem melhorias no rendimento do conversor, em razão desse sistema ser aplicado em LEDs de potência e da utilização de baterias no fornecimento de energia. Como o estudo das perdas de chaveamento do MOSFET, o efeito Miller, a necessidade de incluir *snubbers* em paralelo ao MOSFET. Outra sugestão é o desenvolvimento de um aplicativo com interface para o gerenciamento do sistema e um estudo de viabilidade de outros microcontroladores que já possuem internamente a comunicação Wi-Fi e Bluetooth, como o Raspberry Pi, que facilitaria a prototipagem e aumentaria a gama de comunicações com outros sistemas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, P. S. **Conversor integrado SEPIC BUCK-BOOST aplicado ao acionamento de LEDs de potência em iluminação pública**. Orientador: Henrique Antônio Carvalho Braga. 2012. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

ARRABAÇA, D. A.; GIMENEZ, S. P. **Conversores de energia elétrica CC/CC para aplicações em eletrônica de potência: conceitos, metodologia de análise e simulação**. São Paulo: Érica, 2014.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuito**. 6. ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1996.

CATSOULIS, J. **Designing Embedded Hardware**. 2. ed. Sebastopol: O'Reilly, 2005.

CHAVES, E. N. *et al.* Projeto de um controlador baseado no modelo interno utilizado em P&O-MPPT e conversor CC-CC boost quadrático. **Eletrônica de Potência - SOBRAEP**, Campo Grande, v. 20, n. 4, p. 383-394, mar./mai. 2015. Disponível em: <http://sobraep1.tempsite.ws/site/uploads/2018/06/rvol20no2p14.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2019.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. **Sistema de Controle para Engenharia**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

GIANELLI, B. F. *et al.* O emprego de tecnologia LED na iluminação pública – seus impactos na qualidade de energia e no meio ambiente. *In: The 8th Latin American Congress On Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE*, 2009. LATQEEE - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG – UNESP), out. 2009. Disponível em: https://hosting.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/Ilumina%E7%E3o%20P%FAblica/Artigos/o_emplo_de_tecnologia_led_na_iluminacao_publica_seus_impactos_na_qualidade_de_energia_e_no_meio_ambiente.pdf. Acesso em: 15 nov. 2019.

LACERDA, G. S. **Proposta de unidade de controle de potência do satélite universitário ITASAT-1 baseada na Topologia Buck**. Orientador: Geraldo José Adabo. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Curso de Engenharia Eletrônica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2012.

MAMIZADEH, A. *et al.* Optimal Tuning of PI Controller for Boost DC-DC Converters Based on Cuckoo Optimization Algorithm. *In: 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Paris, 2018, pp. 677-680.

MELLO, L. F. P. **Projetos de fontes chaveadas**. São Paulo: Érica, 2011.

NICOLOSI, D. E. C. **Microcontrolador 8051: Detalhado**. 9. ed. São Paulo: Érica, 2013.

NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

OGATA, K. **Discrete-Time Control Systems**. 2. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1994.

POMÍLIO, J. A. **Fontes Chaveadas**. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo. 2017.

RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência: dispositivos, circuitos e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Makron Books, 2014.

SANTOS, T. S. *et al.* Análise da eficiência energética, ambiental e econômica entre lâmpadas de LED e convencionais. *In: Engenharia Sanitnitária e Ambiental*, São Paulo, v. 20, n. 4, p. 595-602, out./dez. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/esa/v20n4/1413-4152-esa-20-04-00595.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2019.

SANTOS, U. P. S. Exposição a ruído: avaliação de riscos, danos à saúde e prevenção. *In: MATOS, M. P. et al. Ruído riscos e prevenção*. São Paulo: Hucitec, 1999. 3-6.

SCHWAB, K. **A Quarta Revolução Industrial**. 1. ed. São Paulo: Edipro, 2016.

SILVA, M. L. **LED: A luz dos novos projetos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2012.

Vantagens de utilizar lâmpadas LED. **Arquitetize**. , 15 abr. 2016. Disponível em: <https://arquitetize.com.br/saiba-quais-sao-as-vantagens-de-utilizar-lampadas-led/>. Acesso em: 5 dez. 2018.

VILELA, A. O. R. **Projeto e construção de um conversor Boost controlado em modo de tensão**. Orientador: Heverton Augusto Pereira. 2011. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2011.