

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

MARCELO VIANI RAULINO SANTOS

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM EMULADOR FOTOVOLTAICO DE BAIXO
CUSTO UTILIZANDO O CONVERSOR BUCK**

FLORIANÓPOLIS, 2024.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

MARCELO VIANI RAULINO SANTOS

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM EMULADOR FOTOVOLTAICO DE BAIXO
CUSTO UTILIZANDO CONVERSOR BUCK**

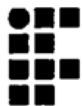
Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro
Eletrônico.

Orientador:
Prof. Joabel Moia, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2024.

Santos, Marcelo Viani Raulino
Implementação de um emulador fotovoltaico de baixo
Custo utilizando conversor Buck / Marcelo Viani Raulino
Santos;
orientação de Joabel Moia. - Florianópolis, SC,
2024.
80 p.
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto
Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis.
Bacharelado em Engenharia Eletrônica. Departamento
Acadêmico de Eletrônica.
Inclui Referências.

1. Emulador fotovoltaico. 2. Conversor Buck. 3.
Curva IV de módulo fotovoltaico. I. Moia, Joabel. II.
Instituto Federal de Santa Catarina. III. Implementação
De um emulador fotovoltaico de baixo custo utilizando
conversor Buck.



**ATA DA BANCA FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA
ELETRÔNICA DO INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS Nº 53**

Aos 23 dias do mês de agosto, de 2024, às 14h e 30min o (a) estudante Marcelo Viani Raulino Santos, apresentou o seu Trabalho de Conclusão de Curso para julgamento à Banca Examinadora constituída pelos seguintes integrantes: Prof. Joabel Moia (orientador/presidente da banca/IFSC), Prof. Flávio Alberto Bardemaker Batista (IFSC) e Prof. Mauro Tavares Peraça (IFSC). A sessão pública de defesa foi aberta pelo Presidente da Banca, que apresentou a Banca Examinadora e deu continuidade aos trabalhos, fazendo uma breve referência ao TCC que tem como título Implementação de um Emulador Fotovoltaico de Baixo Custo Utilizando o Conversor Buck. Na sequência, o(a) estudante teve 30 minutos para a exposição de seu trabalho, e cada integrante da Banca Examinadora fez a arguição após a apresentação do mesmo. Finalmente, foi aberto um espaço aos presentes para eventuais perguntas ou comentários sobre o trabalho apresentado. Ouvidas as explicações do(a) estudante, a Banca Examinadora, reunida em caráter sigiloso, para proceder à avaliação final, deliberou pela nota 8,0 com () sem (X) restrições. Foi dada ciência ao(a) estudante que a versão final do trabalho deverá ser entregue em até 20 dias corridos a partir da data da defesa (excluindo recesso e férias docentes), sendo os primeiros 10 dias para a entrega ao(a) orientador(a) e os outros 10 para a entrega à Coordenação do Curso, com as devidas alterações sugeridas pela banca, após o aval do orientador. Nada mais havendo a tratar, a sessão foi encerrada às 16 h 20 min., dela sendo lavrada a presente ata, que, uma vez aprovada, foi assinada por todos os membros da Banca Examinadora e pelo(a) estudante.

Prof(a). Orientador(a) / Presidente: Dr. Joabel Moia

Prof(a). Avaliador(a) 1: Dr. Flávio Alberto Bardemaker Batista

Prof(a). Avaliador(a) 2: Dr. Mauro Tavares Peraça

Marcelo Viani Raulino Santos, Estudante:

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Eleane e Ricardo, por terem me dado todo o apoio e as melhores condições de estudos.

À minha namorada, Caroline, agradeço o amparo e por estar sempre ao meu lado durante a escrita deste trabalho.

Agradeço aos meus colegas de curso e da equipe de fórmula SAE do IFSC, em especial ao Bruno, que me deu grande incentivo e motivação.

Ao meu orientador, Joabel Moia, agradeço por ter me proporcionado todo o suporte necessário para o desenvolvimento deste projeto.

Agradeço também à instituição IFSC e aos professores, pela dedicação e pela estrutura ofertada ao longo do curso.

RESUMO

O presente estudo apresenta um projeto de um emulador fotovoltaico de baixo custo e baixa potência, tendo como objetivo replicar as condições operacionais de um módulo solar. Este dispositivo foi projetado para, através do uso de um conversor Buck, fornecer variações de corrente e de tensão em sua saída, ajustando-se à carga conectada, emulando um módulo fotovoltaico, o que permite a análise do desempenho do sistema em diferentes cenários. Além de simular o comportamento típico de módulos fotovoltaicos, o emulador permite testar diversas configurações do sistema, ajudando a identificar possíveis falhas e limitações. A proposta é criar uma solução econômica e acessível, que ofereça uma alternativa aos modelos comerciais disponíveis no mercado, contribuindo para o desenvolvimento e a avaliação de sistemas fotovoltaicos. Ao final, são apresentados os resultados obtidos em comparação aos resultados teóricos e à um emulador fotovoltaico comercial.

Palavras-chave: Emulador fotovoltaico. Conversor Buck. Curva IV de módulo fotovoltaico.

ABSTRACT

This study presents a low-cost and low-power photovoltaic emulator designed to replicate the operational conditions of a solar panel. The device employs a Buck converter to provide output variations in current and voltage, adjusting to the connected load, emulating a photovoltaic module, which allows for the analysis of system performance under different scenarios. In addition to simulating the typical behavior of photovoltaic panels, the emulator enables testing various system configurations, aiding in the identification of potential failures and limitations. The aim is to create an economical and accessible solution that offers an alternative to commercially available models, contributing to the development and evaluation of photovoltaic systems. The study concludes by presenting the results obtained in comparison to theoretical outcomes and a commercial photovoltaic emulator.

Keywords: Photovoltaic emulator, Buck converter, IV curve of photovoltaic module.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico da geração de potência fiscalizada no Brasil em 2024.....	13
Figura 2 - Ilustração simplificada dos sistemas <i>off grid</i> (a) e <i>on grid</i> (b)	14
Figura 3 – Representação do estágio de saída da fonte CC Chroma 62000H	17
Figura 4 - Imagem do módulo fotovoltaico KC200GT	21
Figura 5 – Curva IV de um módulo fotovoltaico.....	23
Figura 6 – Silício dopado do tipo P (a) e do tipo N (b).....	24
Figura 7 – Junção PN em uma célula fotovoltaica	25
Figura 8 – Comparação entre célula, módulo e painel fotovoltaico	26
Figura 9 – Modelo equivalente de uma célula fotovoltaica.....	27
Figura 10 - Corrente lida x tensão de saída de sensor de corrente.....	29
Figura 11 – Representação do transdutor de tensão LV 25-P	30
Figura 12 – Estágios de funcionamento do conversor Buck (a), com circuito equivalente para chave fechada (b) e para chave aberta (c)	31
Figura 13 - Diagrama de blocos do emulador fotovoltaico proposto	40
Figura 14 - Representação do conversor Buck projetado	43
Figura 15 – RDS (on) normalizado x temperatura de junção	45
Figura 16 - Linearização da curva IV em 125°C do diodo MUR1660	47
Figura 17 - Esquema de ligação do transdutor LV 25-P.....	50
Figura 18 - Representação do filtro RC passa-baixas ativo	51
Figura 19 – Resultados da simulação da Ponte Retificadora.....	53
Figura 20 - Resultado de simulação de tensão e corrente de saída do conversor Buck	54
Figura 21 - Correntes no indutor e no capacitor do conversor Buck	55
Figura 22- Correntes no MOSFET e no diodo do conversor Buck	55
Figura 23 - Simulação da resposta em frequência do filtro RC ativo passa-baixas...57	
Figura 24 – Representação do esquemático da placa de potência projetada	58
Figura 25 - Esquemático de funcionamento do driver isolador DRO100S25A.....	59
Figura 26 – (a) Representação em 3D da placa de potência projetada e (b) placa de potência após a montagem dos componentes eletrônicos	60
Figura 27 - Diagrama da placa de comando projetada	60
Figura 28 – (a) Representação em 3D da placa de comando projetada e (b) placa de comando após a montagem dos componentes eletrônicos....	61
Figura 29 - Medição de tensão na saída do <i>buffer</i> de PWM	62

Figura 30 - Amostra de tensão no <i>MOSFET</i> (a) e no diodo (b).....	63
Figura 31 - Realização de ensaios no emulador fotovoltaico	64
Figura 32 - Curvas de tensão e corrente de saída do emulador	64
Figura 33 – Comparação entre as curvas IV (a) geradas através do emulador e (b) as curvas geradas através de cálculos	65
Figura 34 - Software para uso da fonte IT6000C-300-75 como emulador fotovoltaico.....	67
Figura 35 - Curvas IV de comparação entre o emulador comercial e o projetado, com (a) $S=1000 \text{ W/m}^2$; $t=25 \text{ }^\circ\text{C}$, (b) $S=1000 \text{ W/m}^2$; $t=60 \text{ }^\circ\text{C}$ e (c) $S=700 \text{ W/m}^2$; $t=25 \text{ }^\circ\text{C}$	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais normas aplicadas para sistemas on-grid.....	34
Quadro 2 – Comparação de preços entre emuladores fotovoltaicos comerciais.....	36
Quadro 3 – Especificações módulo fotovoltaico KC200GT	39
Quadro 4 - Parâmetros definidos para o conversor Buck.....	42
Quadro 5 - Relação entre corrente e conexão recomendada para sensor de corrente LTS 25-NP	49
Quadro 6 – Comparação entre medidas da Ponte Retificadora	53
Quadro 7 – Comparação entre medidas do conversor Buck.....	56
Quadro 8 – Relação de componentes projetados para a placa de potência	58
Quadro 9 - Comparação entre tensões calculadas e medidas no emulador fotovoltaico	66
Quadro 10 - Comparação entre tensões medidas no emulador fotovoltaico comercial e no projetado	69

Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
A/D	Analógico-digital
CA	Corrente alternada
CC	Corrente continua
I2C	Inter-Integrated Circuit (Circuito Inter-Integrado)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional)
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
MMGD	Micro e minigeração distribuída
NBR	Norma Brasileira
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
RAM	<i>Random Access Memory</i> (memória de acesso randômico)
ROM	<i>Read-Only Memory</i> (memória somente de leitura)
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> (Interface Serial de Periféricos)
STC	Condições padrão de ensaio
USART	<i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver and Transmitter</i> (Transmissor/Receptor Universal Síncrono e Assíncrono)

SUMÁRIO

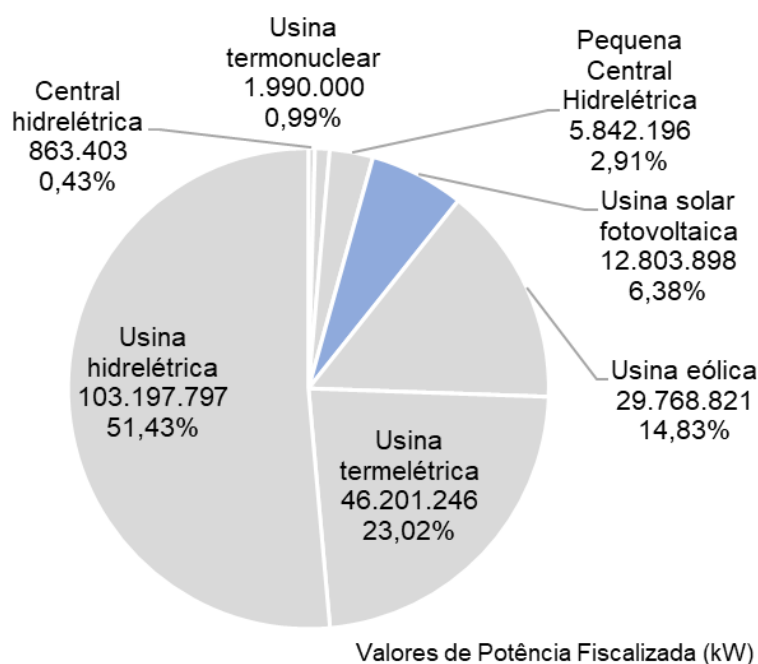
1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	15
1.2	Definição do Problema	18
1.3	Objetivo Geral.....	18
1.4	Objetivos Específicos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1	Módulo fotovoltaico	20
2.1.1	Radiação solar (S)	21
2.1.2	Temperatura (T)	22
2.1.3	Composição das células fotovoltaicas	23
2.1.4	Arranjos de módulos fotovoltaicos	25
2.2	Circuito equivalente da célula fotovoltaica.....	26
2.3	Sensor de corrente elétrica	28
2.4	Sensor de tensão elétrica.....	29
2.5	Conversor CC-CC.....	30
2.6	Microcontrolador.....	32
2.7	Normas para inversores	33
2.8	Emuladores fotovoltaicos comerciais.....	35
3	METODOLOGIA	37
4	DESENVOLVIMENTO	39
4.1	Dimensionamento dos componentes	40
4.1.1	Dimensionamento de dissipadores	44
4.1.2	Circuito para a leitura de corrente	48
4.1.3	Circuito para a leitura de tensão	49
4.1.4	Dimensionamento do filtro passa-baixas	50
4.2	Resultados da simulação dos circuitos	52
4.3	Desenvolvimento da placa eletrônica	57
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	62
5.1	Plotagem da curva IV	65
5.2	Comparação com emulador comercial	67
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	72

1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento na demanda por energia elétrica e a busca por fontes de energia renováveis que reduzam a dependência de combustíveis fósseis e minimizem a poluição têm impulsionado a procura de novas fontes de energia limpa e sustentável. Mesmo que usinas hidrelétricas e termelétricas continuem sendo a grande parte da geração de eletricidade mundial, os sistemas fotovoltaicos têm aumentado sua participação, junto a outras alternativas, que em sua maioria são formadas de fontes de energia renováveis (VILLALVA, 2018).

De acordo com dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2024), a geração de energia solar representa atualmente 6,38% da potência gerada nas usinas em operação no Brasil, com 12,8 GW de potência fiscalizada, como é mostrado na Figura 1. Além disso, ainda há 168 unidades geradoras de energia solar em construção e mais 2.828 unidades planejadas. Somadas, essas futuras instalações alcançam uma potência outorgada total de 132 GW, representando a capacidade autorizada para operação dessas usinas.

Figura 1 - Gráfico da geração de potência fiscalizada no Brasil em 2024.

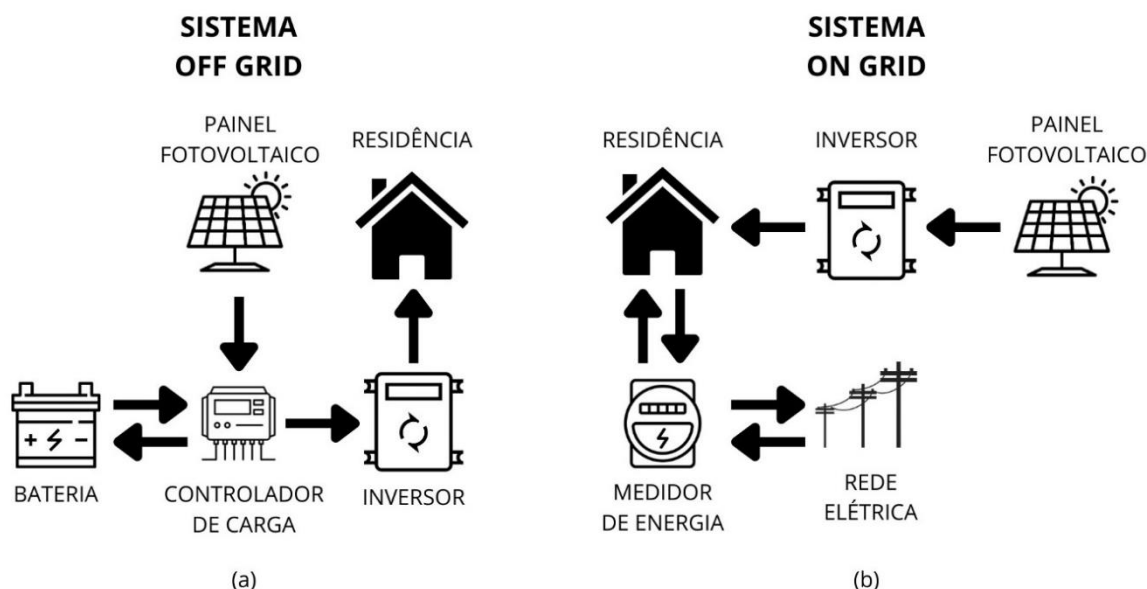


Fonte: Elaboração própria (2024).

De 2020 para 2021 foi visto um aumento de 55,9% da potência de fontes solares fotovoltaicas na matriz elétrica brasileira instalada. Sendo a energia solar fotovoltaica a principal forma de micro e minigeração distribuída (MMGD), que são centrais geradoras com potência instalada de até 3 MW de fontes renováveis, correspondendo a mais de 88% da MMGD (EPE, 2022).

Sistemas de geração ligados diretamente à rede elétrica são compostos de módulos fotovoltaicos, que possibilitam a geração da energia através dos raios solares e de inversores, que convertem a corrente contínua em corrente alternada de mesma frequência da rede. Em sistemas *off grid*, que não são conectados à rede elétrica, se adiciona controladores de carga e baterias, responsáveis pelo armazenamento e controle da energia ao sistema, conforme o esquema de funcionamento simplificado do sistema *off grid*, mostrado na Figura 2 (a). Já o sistema *on grid*, onde a energia consumida em uma residência é balanceada entre a energia solar gerada e a energia da rede elétrica, é mostrado ao lado direito da Figura 2 (b).

Figura 2 - Ilustração simplificada dos sistemas *off grid* (a) e *on grid* (b)



Fonte: Elaboração própria (2024).

Diante do aumento da adesão à energia fotovoltaica, torna-se necessária a realização de pesquisas e o desenvolvimento de novas tecnologias para

aprimoramento desses sistemas. Nesse contexto, o emulador fotovoltaico é uma ferramenta importante para o avanço de tecnologias fotovoltaicas mais eficientes. Visto que tal emulador pode substituir módulos ou arranjos fotovoltaicos pesados e volumosos, por dispositivos de menor escala, que possibilitam ensaios independentemente de fatores externos.

O emulador fotovoltaico é um dispositivo capaz de reproduzir curva de corrente-tensão (IV) de um módulo ou um arranjo fotovoltaico. Aplicado na fase experimental de sistemas de geração de energia solar proporciona a realização de recorrentes testes em condições padronizadas, sem a necessidade de ter o módulo/arranjo fotovoltaico, podendo ser empregado, inclusive, quando não há incidência de radiação solar. Com o uso do emulador fotovoltaico, variáveis como irradiância e temperatura podem ser controladas de forma simplificada, o que acelera e otimiza os ensaios de sistemas fotovoltaicos (AYOP; TAN, 2017).

No entanto, os emuladores comerciais atuais apresentam um preço relativamente alto para aquisição, o que pode, em algumas situações, trazer algum empecilho ao desenvolvimento e inovação de sistemas fotovoltaicos, em especial, na pesquisa em instituições de ensino.

Dessa forma, propõe neste trabalho o desenvolvimento de um emulador fotovoltaico de baixo custo e baixa potência, que tem como objetivo a simulação das diversas condições operacionais de um módulo fotovoltaico. O dispositivo deve ser capaz de fornecer na sua saída as variações adequadas de corrente e tensão, de acordo com a carga conectada, permitindo a avaliação do desempenho do sistema diante dessas variações. Além disso, o emulador tem a capacidade de testar diferentes configurações do sistema e identificar possíveis falhas e limitações, bem como o emulador deve apresentar um custo inferior em relação aos modelos comerciais disponíveis.

1.1 Justificativa

Publicada no ano de 2022, a portaria de número 140 de 03/2022 do INMETRO define os requisitos que equipamentos voltados para a geração,

condicionamento e armazenamento de energia elétrica, vindos de sistemas fotovoltaicos devem seguir (INMETRO, 2022). Entre os equipamentos contemplados pela portaria, estão inversores, que viabilizam o uso da energia obtida dos módulos fotovoltaicos, convertendo a corrente contínua para corrente alternada.

De acordo com a portaria 140 de 2022, inversores conectados à rede elétrica (*on-grid*) ou isolados (*off-grid*) com bateria, devem seguir as normas ABNT NBR 16149:2013, ABNT NBR 16150:2013, ABNT NBR IEC 62116:2012, IEC 62109-2:2011 e IEC 62891:2020. Estas normas definem ensaios que os inversores devem ser submetidos, dos quais, têm-se testes em diferentes níveis de irradiância e temperatura. Para isso, a utilização de um emulador fotovoltaico torna-se essencial, uma vez que facilita e possibilita os ensaios necessários para aprovação de um inversor (RIBEIRO *et al.*, 2018), sem a necessidade de sistema de módulos ou arranjos fotovoltaicos e de condições climáticas favoráveis.

Nesse sentido, um emulador fotovoltaico se torna relevante, sendo um dispositivo necessário em projetos de pesquisa e inovação, na certificação de inversores e que pode contribuir para o aprimoramento de tecnologias fotovoltaicas mais eficazes. A partir da inserção de dados fornecidos pelos fabricantes de módulos fotovoltaicos, o emulador gera em sua saída as mesmas tensões e correntes de um módulo fotovoltaico real. A Figura 3 ilustra o estágio de saída de uma fonte de alimentação CC com simulação de módulo solar, que possui o funcionamento através de uma ponte completa, onde as chaves são acionadas em dois pares, para inverter o sentido da corrente no transformador de alta frequência, seguido por uma ponte retificadora e um filtro LC. Na função de emulador fotovoltaico, o sinal PWM que controla as chaves é calculado através das leituras de tensão e de corrente na carga.

1.2 Definição do Problema

Um dos principais desafios enfrentados por pesquisadores que buscam desenvolver novos projetos para sistemas fotovoltaicos é o alto custo de equipamentos necessários para a validação de seus protótipos, antes de irem para os ensaios oficiais de certificação. Isso se deve ao fato de que, muitas vezes, o equipamento utilizado possui uma capacidade superior ao necessário, visando um uso mais amplo.

Sem ferramentas adequadas para testar e validar os projetos, os projetistas podem enfrentar dificuldades para garantir que o sistema atenda às expectativas de desempenho e eficiência, o que pode resultar na não homologação nos primeiros ensaios e em custos extras.

Este estudo busca fornecer respostas para a seguinte questão: De que forma pode ser desenvolvido um produto de baixo custo que emule um módulo fotovoltaico, simulando diferentes condições de operação?

1.3 Objetivo Geral

Desenvolver um emulador fotovoltaico simples e de baixo custo, construído com componentes eletrônicos acessíveis e amplamente disponíveis no mercado, buscando reproduzir o comportamento de sistemas fotovoltaicos e validar o emulador em testes experimentais.

1.4 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, são necessários os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar estudos para entender a geração de energia elétrica através de células fotovoltaicas;
- b) Desenvolver um conversor estático capaz de reproduzir a curva IV de módulos solares fotovoltaicos;

- c) Programar o controlador para que gere um sinal PWM (Modulação por largura de pulso), com base no que é lido em duas entradas A/D (conversor analógico-digital).
- d) Realizar testes com a variação da carga de saída;
- e) Validar se os resultados na geração de curvas IV pelo emulador são os esperados, em relação a um módulo fotovoltaico real e um emulador comercial.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda os conceitos teóricos essenciais para o projeto de um emulador fotovoltaico. Inicialmente, serão apresentados os princípios de funcionamento da energia solar, através do uso de módulos solares. Em seguida, é mostrado o embasamento para a aplicação de um circuito equivalente à célula solar. Por fim, são mostrados componentes utilizados na construção do emulador.

2.1 Módulo fotovoltaico

Foi no ano de 1839, que Edmond Becquerel constatou a ocorrência do efeito fotovoltaico, ao mergulhar placas de platina ou prata em um eletrólito e notar uma pequena diferença de potencial ao receber luz. No final do século XIX, o fundador da empresa Siemens AG, Werner Siemens, começou a comercializar células de selênio como fotômetros, dispositivos que já utilizavam energia provinda luz, porém, com uma eficiência próxima a 0,5% (VALLÊRA; BRITO, 2006).

Um marco importante para o efeito fotoelétrico foi a explicação dada por Albert Einstein, sobre a física dos semicondutores e técnicas de purificação e dopagem. Já o químico Calvin Fuller, da Bell Laboratories, foi o responsável pela primeira célula solar, chegando a obter uma eficiência de 6%, ao utilizar arsênio e boro, e tendo sua primeira aplicação prática em 1955, na alimentação de uma rede telefônica (VALLÊRA; BRITO, 2006).

Módulos solares receberam destaque com o seu primeiro uso no espaço, no satélite Vanguard 1, em 1958. Inicialmente descartada, a instalação de células solares foi feita após esforço de cientistas. Com a falha do sistema original de alimentação, de baterias químicas, ocorrida nos primeiros dias em órbita, a energia solar se tornou a única fonte de energia no Vanguard, garantindo que continuasse em operação durante anos (PERLIN, 2002).

Os módulos solares comerciais atuais possuem taxa de eficiência média entre 15% e 20%, como por exemplo o módulo fotovoltaico mostrado na Figura 4,

modelo KC200GT, que possui eficiência de conversão superior a 16 %, fabricado pela empresa Kyocera.

O custo de implantação pode ter uma grande variação, de acordo com o tamanho do local de instalação, do material dos módulos, do inversor utilizado e da complexidade da instalação. O tempo de retorno do investimento feito depende da quantidade de energia gerada, custo da eletricidade convencional e dos incentivos oferecidos.

Figura 4 - Imagem do módulo fotovoltaico KC200GT



Fonte: KYOCERA (2008).

Segundo um estudo feito por Santos, Souza e Dalfior (2016), um sistema projetado para atender uma residência de dois moradores, tendo um consumo médio de 138 kWh/mês, teria um retorno positivo no investimento feito após o décimo primeiro ano. O estudo considera um período de manutenção de 25 anos, que é o tempo médio da vida útil do sistema indicado pelo fabricante e apresenta uma situação hipotética em uma determinada localidade, demonstrando o potencial retorno da instalação de um sistema fotovoltaico.

2.1.1 Radiação solar (S)

A energia emitida pelo Sol, e que se propaga em todas as direções por meio de ondas eletromagnéticas pelo espaço, é chamada de radiação solar. Ela se

propaga no vácuo à velocidade da luz, e influencia direta e indiretamente situações diárias, como a temperatura da superfície terrestre e a fotossíntese de plantas.

A radiação solar pode ser dividida entre o tipo visível, ultravioleta e infravermelha, de acordo com o comprimento de onda da radiação. A do tipo infravermelha é a que concentra a maior parte da energia solar, tendo um maior comprimento de onda e possuindo grande agitação térmica como característica.

Outra forma que pode se classificar é de acordo com a forma em que chega à Terra, podendo ser de forma direta, difusa ou refletida. A forma direta é a principal para a geração da energia fotovoltaica, pois passa pela atmosfera sem sofrer desvios em sua trajetória.

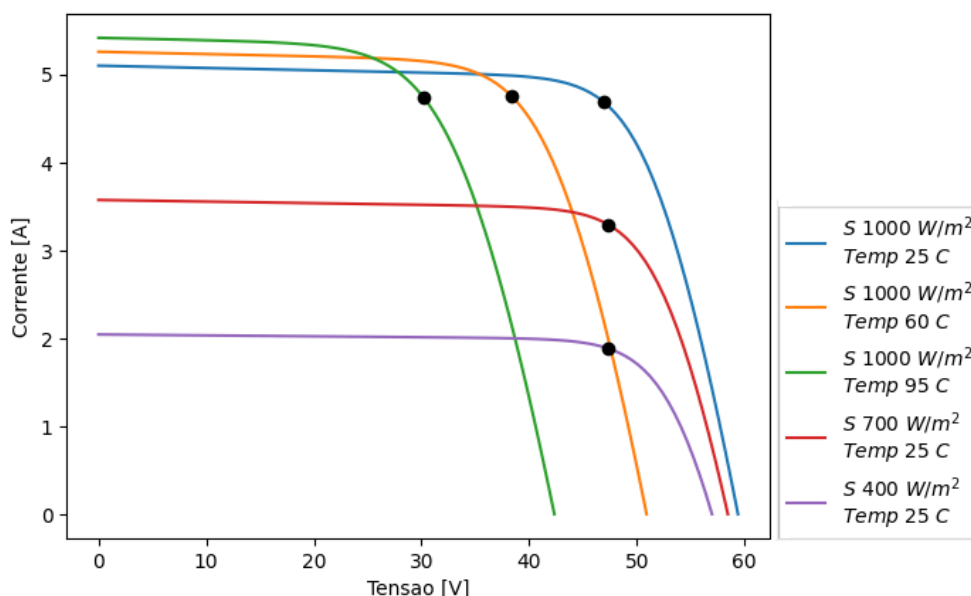
Com isso, a radiação solar que pode ser obtida de forma efetiva é de aproximadamente 1.000 W/m^2 , valor estimado para locais próximos a linha do equador, em condições de céu aberto e próximo ao meio dia. Esse é um parâmetro fundamental para o cálculo da foto-corrente gerada.

2.1.2 Temperatura (T)

A temperatura é um aspecto que influencia a geração de energia dos módulos solares, pois o aumento da temperatura provoca uma redução na eficiência da conversão de energia. Isso ocorre devido à mudança no nível de agitação das moléculas. O valor de temperatura utilizado como valor de referência em folha de dados (*datasheets*) de módulo fotovoltaico é de 25°C .

A Figura 5 exibe a interferência da radiação e da temperatura na curva IV de um módulo fotovoltaico. Observa-se que a curva correspondente à maior radiação e menor temperatura, em azul, exibe um ponto de máxima potência mais elevado. O aumento da temperatura resulta em uma redução na tensão máxima, enquanto a diminuição da radiação leva a uma menor corrente de pico.

Figura 5 – Curva IV de um módulo fotovoltaico



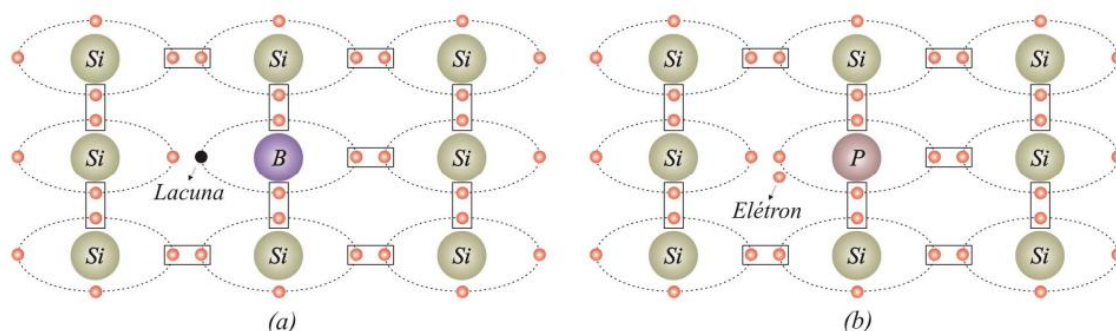
Fonte: Elaboração própria (2024).

2.1.3 Composição das células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são formadas de materiais semicondutores, tradicionalmente feitas de silício, dopado com impurezas, e tendo características de tensão e corrente variando conforme os elementos utilizados. São compostas de duas camadas, com a camada superior dopada tipicamente com fósforo, o que a torna negativamente carregada, sendo tipo N, e a camada inferior dopada com boro, tornando-a positivamente carregada, tipo P. No substrato de tipo N, a adição de fósforo ao silício leva à sobra de elétrons, enquanto no substrato tipo P, a dopagem de Boro leva à lacuna de elétrons (COELHO, 2008).

A Figura 6 (a) mostra uma camada do tipo P, dopada com boro para formar uma lacuna de elétrons e a Figura 6 (b) mostra uma camada de tipo N, que possui adição de fósforo, e faz com que se tenha a sobra de elétrons.

Figura 6 – Silício dopado do tipo P (a) e do tipo N (b)



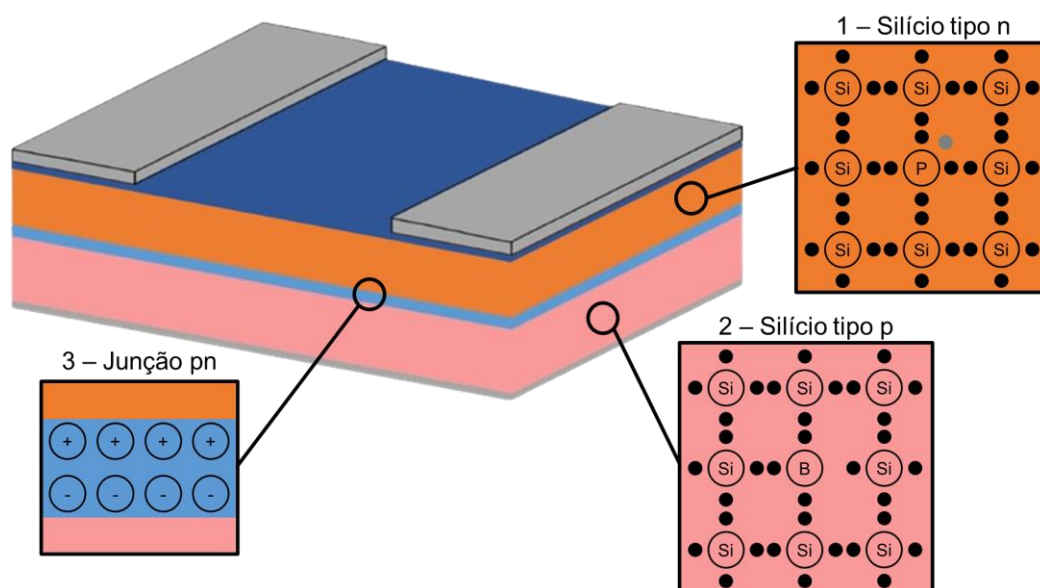
Fonte: Coelho (2008).

Essas duas camadas formam uma junção PN, e entre elas há uma zona de depleção, formada de lacunas e elétrons que se recombinaram. Essa separação leva a um acúmulo de cargas negativas no lado P e de cargas positivas no lado N, o que gera uma Diferença de Potencial, devido ao campo elétrico que surge.

Quando a luz solar atinge a junção PN formada, os fótons, que são partículas de luz, transmitem sua energia para os elétrons do material semiconductor. Os elétrons excitados pela energia dos fótons passam da camada N para a camada P. Porém, para isso ocorrer, é preciso que haja um caminho para os elétrons se movimentarem, sendo esse o circuito elétrico conectado às células fotovoltaicas. O movimento desses elétrons pelo circuito gera uma corrente elétrica contínua (PINHO; GALDINO, 2014).

A Figura 7 exemplifica a composição interna de um módulo fotovoltaico. O ponto 1 representa a camada N, dopada com fósforo, o ponto 2 representa a camada P, dopada com boro, e o ponto 3 destaca a junção PN.

Figura 7 – Junção PN em uma célula fotovoltaica



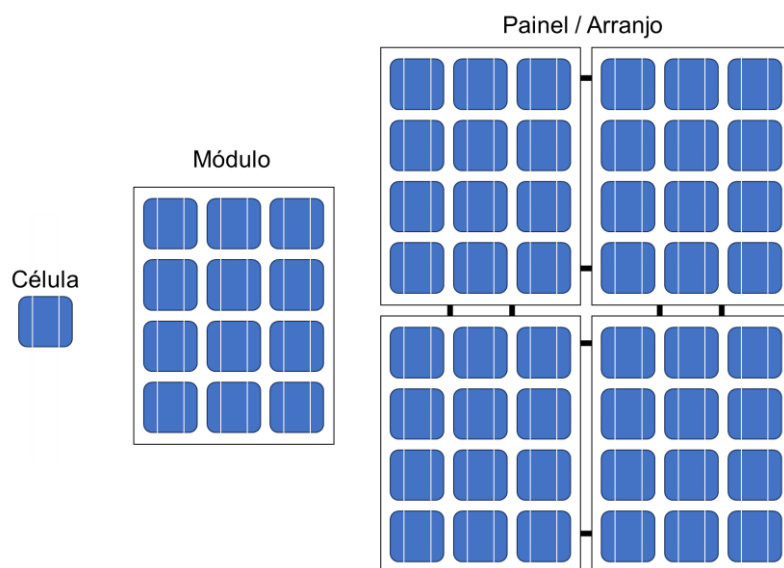
Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014).

2.1.4 Arranjos de módulos fotovoltaicos

No sistema fotovoltaico, os módulos ou arranjos solares são conectados em inversores, esses responsáveis por buscar o ponto onde é emitida a maior potência e por alternar a corrente contínua, gerada pelos módulos, em corrente alternada, para poder ser conectada à rede elétrica.

A Figura 8 mostra a comparação entre célula, módulo e painel fotovoltaico, onde, um módulo fotovoltaico é composto internamente de células fotovoltaicas, responsáveis por converter a luz solar em eletricidade. A eficácia do módulo pode ser aprimorada por arranjos de células fotovoltaicas dispostas em série e paralelo. A associação em série aumenta a tensão do sistema, enquanto a associação em paralelo amplifica a corrente. Dessa forma, os módulos fotovoltaicos são feitos pela ligação de módulos, buscando a eficiência e o aproveitamento máximo da energia solar disponível.

Figura 8 – Comparação entre célula, módulo e painel fotovoltaico



Fonte: Adaptado de Coelho (2008).

2.2 Circuito equivalente da célula fotovoltaica

O Circuito equivalente é uma representação utilizada para mostrar o comportamento de um sistema eletrônico, de forma que seja possível mensurar parâmetros de corrente e tensão que o circuito original irá resultar. Isso possibilita a sua simplificação, tornando a análise mais didática e eficaz. O emprego desse método possibilita a análise de sistemas fotovoltaicos, com a aplicação de técnicas tradicionais de análise de circuitos elétricos para avaliar o desempenho da célula.

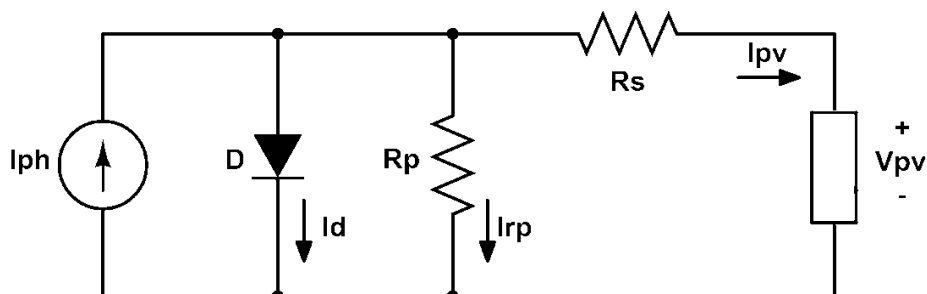
Uma célula fotovoltaica pode ser representada de diversas maneiras, a depender do nível de precisão necessário. O circuito equivalente que é constantemente utilizado é retratado por uma fonte de corrente, que corresponde a corrente fotogerada e um diodo. Também são apresentadas as perdas internas da célula, representadas por duas resistências, uma em série e outra em paralelo (SOUZA FILHO, 2019).

Dessa forma, circuito que descreve o comportamento elétrico da célula é composto por quatro componentes, mostrados na Figura 9:

- Fonte de corrente fotovoltaica (I_{ph});
- Resistência em série (R_s);

- Resistência em paralelo (R_p);
- Diodo em paralelo com a fonte de corrente (D).

Figura 9 – Modelo equivalente de uma célula fotovoltaica



Fonte: Elaboração própria (2024).

Apresentada na Figura 9, a fonte de corrente fotovoltaica (I_{ph}) é referente à corrente gerada pela célula fotovoltaica quando exposta à luz, sendo diretamente proporcional à irradiância solar. A resistência interna (R_s), diz respeito às perdas devido a contatos elétricos, que é um fator limitante da corrente gerada pela célula fotovoltaica. A resistência em paralelo (R_p) retrata as perdas por correntes de fuga, devido a pontos de curto-circuito na junção PN.

O comportamento não linear em baixas irradiações é mostrado na forma de um diodo em paralelo com a fonte de corrente (D). Quando ocorre, leva a célula fotovoltaica a não ser capaz de gerar corrente suficiente para manter a sua própria operação. O diodo em paralelo com a fonte de corrente permite que a célula fotovoltaica continue a operar mesmo em baixas irradiações.

O circuito equivalente pode ser usado para estudar o comportamento da célula fotovoltaica em diferentes condições de operação, como temperatura, irradiação e ângulo de incidência da luz. Sendo importante para a construção de um emulador fotovoltaico, em que esses parâmetros devem ser calculados e introduzidos para que o equipamento seja capaz de obter em sua saída os valores esperados de um módulo.

2.3 Sensor de corrente elétrica

A corrente elétrica é a movimentação de forma ordenada de cargas elétricas, em circuitos que apresentem um diferencial de potencial elétrico (ddp) e que possibilite o fluxo das cargas, com a intensidade medida em ampère (A), no Sistema Internacional de Unidades (SI). Pode ser obtida na forma contínua ou alternada. A corrente contínua é aquela na qual os elétrons se deslocam em sentido único, enquanto na corrente alternada, o sentido do movimento dos elétrons é invertido em um determinado período de tempo.

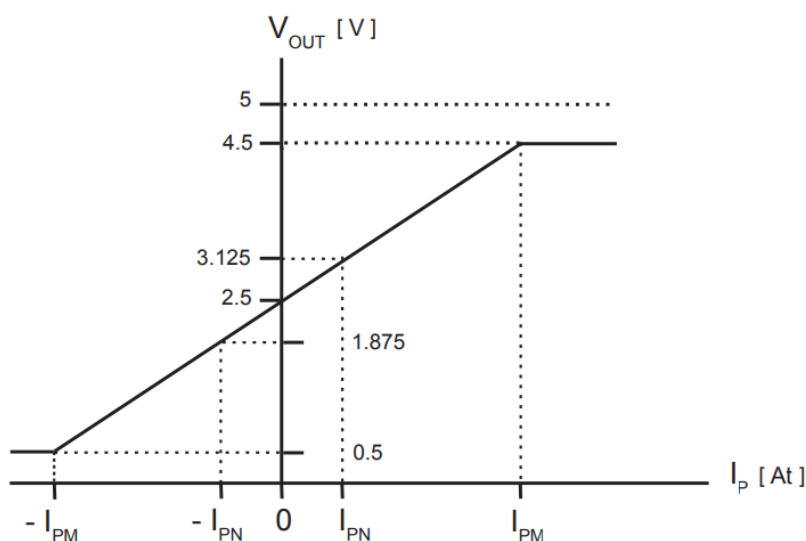
Um dispositivo que emule o comportamento de um módulo fotovoltaico deve ser capaz de fornecer uma corrente da mesma faixa de intensidade das células ou módulos solares utilizados como base de dados. Além disso, é feita a leitura da corrente gerada, para que seja verificado se está de acordo com as condições especificadas.

Há diversos modelos de sensores de corrente, dentre eles, os sensores de efeito Hall permitem medir a corrente elétrica em circuitos sem interromper o fluxo de corrente. Ele funciona com base no princípio do efeito Hall, o qual descreve a geração de uma diferença de potencial elétrico perpendicular a um fluxo de corrente e um campo magnético perpendicular à corrente.

Quando uma corrente elétrica passa na parte do circuito onde o sensor atua, por meio do campo magnético gerado, resulta-se em uma corrente ou tensão de saída equivalente à corrente elétrica medida, podendo ser lida e processada por um microcontrolador, por exemplo.

A Figura 10 mostra a relação entre a corrente elétrica que passa nas bobinas do transdutor de corrente modelo LTS 25-NP, do fabricante LEM, e a tensão de saída resultante, que varia entre 0,5 V e 4,5 V. Podendo ser medida na entrada uma corrente de -25 A ($-I_{PM}$) até 25 A (I_{PM}).

Figura 10 - Corrente lida x tensão de saída de sensor de corrente



Fonte: LEM (2022).

2.4 Sensor de tensão elétrica

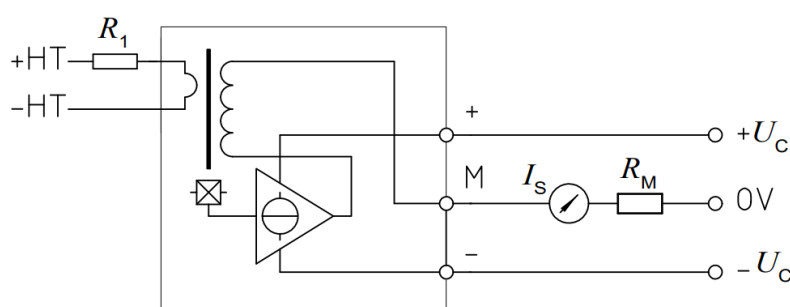
Em um sistema fotovoltaico, a tensão elétrica surge quando ocorre o efeito fotovoltaico. A tensão elétrica surge da diferença entre o potencial elétrico de dois pontos. No Sistema Internacional a unidade de medida utilizada para a tensão é o Volt (V).

Um emulador fotovoltaico deve ser capaz de gerar tensões de saída no mesmo intervalo que as células de referência, necessitando ser capaz de realizar a medida em tempo real para que reproduza o mesmo comportamento quando há uma variação de carga.

Para que seja medida por um microcontrolador, a tensão contínua não deve afetar e nem ser afetada pelo funcionamento do circuito que se deseja ler a tensão, e também deve ser limitada à tensão máxima de entrada do controlador. Existem diversas formas de medidas de tensão, como o uso de divisores resistivos, aplicação de circuitos com amplificadores operacionais ou sensores de efeito Hall, que medem através da detecção de alterações em um campo eletromagnético, para que seja feita a medida de tensão.

Na Figura 11, é apresentado o esquema de ligação do transdutor de tensão modelo LV 25-P, do fabricante LEM, que retorna a corrente I_s , de acordo com a tensão medida entre as entradas +HT e -HT. O *datasheet* do componente mostra que pode ser lida uma tensão de até 600 V, com o resistor R_1 sendo dimensionado para que o transdutor receba uma corrente de até 10 mA (LEM, 2021).

Figura 11 – Representação do transdutor de tensão LV 25-P



Fonte: LEM (2021).

2.5 Conversor CC-CC

Conversores CC-CC são circuitos eletrônicos que convertem o valor de amplitude de uma tensão contínua. Na década de 60, iniciou-se o desenvolvimento de conversores com funcionamento através de fontes chaveadas, que surgiram visando o emprego em programas espaciais, onde deveriam substituir as grandes e pesadas fontes reguladas convencionais (BARBI, 2014).

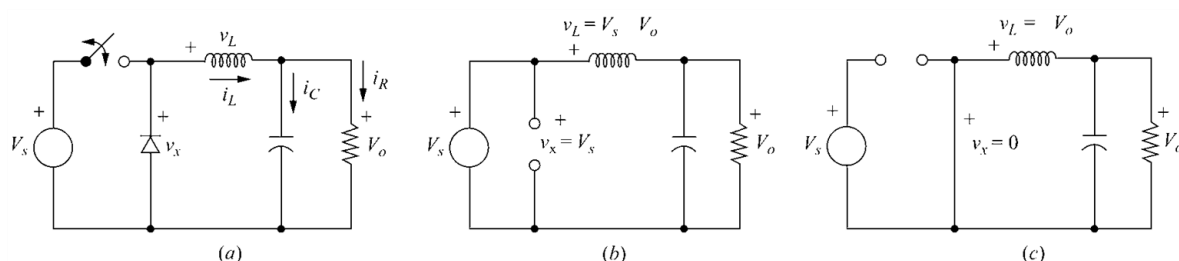
Entre os tipos de conversores CC-CC está o conversor Buck, utilizado para a redução de tensão, o conversor Boost, que é um conversor elevador de tensão e o conversor Buck-Boost, que possibilita elevar e abaixar a tensão de saída. Possuem em suas estruturas elementos passivos, como resistores, indutores e capacitores, que são responsáveis pelo armazenamento temporário de energia e pela redução de ruídos e ondulações, além de elementos ativos, como semicondutores, que influenciam ao controlar as formas de tensão e de corrente do conversor.

Outro componente fundamental é a chave controlada, responsável por abrir e fechar um determinado ponto do circuito. Transistores bipolares de junção (BJT), transistores de efeito de campo de metal-óxido (*MOSFET*) e transistores bipolares de porta isolada (IGBT) são exemplos de semicondutores que podem ser utilizados para realizar a comutação.

Por ser um conversor eficiente, de baixo custo e que possibilita uma ampla faixa de ajuste de tensão de saída, o conversor Buck torna-se uma opção viável para o projeto de um emulador fotovoltaico, uma vez que se deseja alimentar o sistema a partir da rede elétrica e que o valor da tensão de saída do módulo solar é menor que o valor da tensão de pico da rede. Sua capacidade de emular um módulo fotovoltaico real permite a validação de modelos matemáticos de módulos fotovoltaicos.

Os conversores CC-CC supracitados costumam operar em dois estágios de funcionamento, quando a chave está fechada e quando está aberta. Em conversores Buck, mostrado na Figura 12 (a), no estágio em que a chave está conduzindo, a corrente passa pelo indutor e pela saída, com a tensão de entrada alimentando a magnetização do indutor e a saída, esse estágio é apresentado na Figura 12 (b). Já durante a segunda etapa, visto na Figura 12 (c), com a chave bloqueada, o diodo entra em condução, e o indutor se desmagnetiza ao transferir sua energia para a carga.

Figura 12 – Estágios de funcionamento do conversor Buck (a), com circuito equivalente para chave fechada (b) e para chave aberta (c)



Fonte: Hart (2010).

O conversor Buck pode ser utilizado em emuladores de diversos sistemas, pois a comutação e a razão cíclica da modulação por largura de pulso (PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*), responsáveis por definir o valor da tensão

de saída, podem ser controlados e facilmente implementados através de um microprocessador, programado com o funcionamento desejado. Pode ainda, ser feito um sistema controlado em malha fechada, com o valor de saída atual influenciando na geração do valor de saída futuro, através de um sistema de realimentação, com uso de sensores e comparado com o valor de referência.

2.6 Microcontrolador

Microcontroladores são dispositivos que unem em um circuito integrado o núcleo de processador, memórias e barramentos de ligações de entradas e saídas. As memórias utilizadas são divididas entre ROM (memória somente de leitura, do inglês *Read-Only Memory*) e RAM (memória de acesso randômico, do inglês *Random Access Memory*), a memória ROM é responsável por dados para serem lidos, onde o programa e os dados importantes são gravados. Já a memória RAM possui uma velocidade maior e armazena dados temporários, que se perdem após o sistema ser desenergizado.

Os microcontroladores entregam uma grande variedade de funcionalidades que ajudam no desenvolvimento de sistemas eletrônicos embarcados. Como conversores A/D (Analógico para Digital), que permitem a conversão de sinais analógicos para valores digitais. Contadores e temporizadores, que calculam intervalos de tempo para gerar sinais periódicos e eventos. Saídas PWM, que permitem o controle de diversos dispositivos, como o brilho de LEDs, a velocidade de motores e a tensão de fontes chaveadas, visto que é possível determinar uma tensão média igual ou inferior à tensão de saída padrão do microcontrolador.

Outra tecnologia que microcontroladores possuem são as interfaces seriais, como USART (Transmissor/Receptor Universal Síncrono e Assíncrono, do inglês *Universal Synchronous Asynchronous Receiver and Transmitter*), I2C (Circuito Inter-Integrado, do inglês *Inter-Integrated Circuit*) e SPI (Interface Serial de Periféricos, do inglês *Serial Peripheral Interface*), que permitem a comunicação com outros dispositivos e componentes eletrônicos. A interface serial estabelece uma

ordem para comunicação entre dispositivos através de bits, assim, sendo possível identificar a correta ordem para o envio e recebimento de dados.

A família de controladores AVR, que utiliza uma arquitetura RISC avançada e núcleo de 8 bits. Possuem eficiência de processamento, são compatíveis com uma ampla variedade de periféricos e com estrutura para códigos em C (LIMA; VILLAÇA, 2012).

Entre os microcontroladores AVR está o Atmega328P, que é um microcontrolador de baixa potência, e apresenta um custo relativamente baixo, um consumo mínimo de energia e facilidade de programação. De acordo com a folha de dados (Atmel, 2015) 121 instruções, 32 registradores e pode operar a até 20 MIPS a 20 MHz. Também dispõe de 32 kbytes de memória de programa flash, 1 kbytes de memória EEPROM e 2 kbytes de memória SRAM.

A utilização de um microcontrolador na construção de um emulador fotovoltaico é necessária devido à capacidade de receber dados de sensores e emitir pulso PWM, responsável pelo chaveamento do conversor Buck. Assim, torna-se possível a realização do comando do sistema, com o controlador, ao ler a corrente e tensão de saída, realizando o ajuste e emitindo o sinal necessário para que o conversor entregue a saída esperada de um módulo fotovoltaico.

2.7 Normas para inversores

Publicada em 2022, a Portaria INMETRO de número 140 de 21 de março de 2022, regula os aspectos para avaliação de conformidade e qualidade de equipamentos de geração, condicionamento e armazenamento de energia por sistemas fotovoltaicos. Ela está em vigor, e tem como objetivo unir e atualizar regulamentos que constituíam portarias anteriores, e serão revogadas até o ano de 2025.

Essa portaria serve para garantir que equipamentos utilizados em todo o sistema de energia fotovoltaico, comercializados no Brasil, atendam a requisitos de eficiência, segurança, qualidade e compatibilidade eletromagnética. A portaria se

baseia em normas da ABNT e da IEC, visto que o Brasil é um membro pleno deste comitê.

As principais normas aplicadas para sistemas on-grid são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Principais normas aplicadas para sistemas on-grid.

Norma	Descrição
RTQ	Regulamento Técnico da Qualidade para Equipamentos para Geração, Condicionamento e Armazenamento de Energia Elétrica em Sistemas Fotovoltaicos.
ABNT NBR 16149:2013	Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição.
ABNT NBR 16150:2013	Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição — Procedimento de ensaio de conformidade.
ABNT NBR IEC 62116:2012	Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.
IEC 62109-2:2011	Segurança de conversores de energia para uso em sistemas de energia fotovoltaica - Parte 2: Requisitos particulares para inversores.
IEC 62891:2020	Eficiência de rastreamento do ponto de máxima potência de inversores fotovoltaicos conectados à rede
IEC 61000	Compatibilidade eletromagnética (EMC): Normas genéricas de Padrão de emissão e Limites
IEC 62920:2017	Sistemas geradores de energia fotovoltaica - Requisitos e métodos de teste EMC para equipamentos de conversão de energia.
ABNT NBR IEC/CISPR 11:2020	Equipamentos industriais, científicos e médicos - Características das perturbações de radiofrequência - Limites e métodos de medição.

Fonte: Elaboração própria (2024).

Essas normas são importantes porque garantem que os inversores usados em sistemas fotovoltaicos sejam seguros, eficientes e cumpram os requisitos da rede elétrica. Eles fornecem diretrizes para testar e avaliar inversores para garantir que atendam a determinados critérios, como medidas anti-ilhamento, requisitos de segurança e eficiência do rastreamento do ponto de máxima potência.

Os emuladores fotovoltaicos também podem ser aplicados para ensaios na norma IEC 61683, que estabelece requisitos mínimos de eficiência de inversores

voltados para o uso em sistemas fotovoltaicos. A norma exige que dispositivos capazes de realizar a busca pelo ponto de máxima potência sejam ensaiados com módulos fotovoltaicos reais ou com o uso de emuladores que reproduzam as características dos módulos fotovoltaicos (OLIVEIRA, 2019).

2.8 Emuladores fotovoltaicos comerciais

Com o aumento de empresas que investem no mercado do sistema fotovoltaico, tais como em módulos solares, inversores, no estudo e na venda de cotas de energia solar, é possível encontrar emuladores fotovoltaicos disponíveis para a venda. Observa-se que fabricantes de fontes controladas aproveitaram seu conhecimento e projetos para adaptar a possibilidade de importação de dados de módulos fotovoltaicos.

Dessa forma, são desenvolvidos softwares específicos para a aplicação de fontes CC na emulação de módulos fotovoltaicos, oferecendo a possibilidade de o usuário realizar a emulação em diferentes configurações de tensão, corrente, temperatura e irradiância. Assim, são geradas curvas de tensão e corrente e são mostradas as melhores aplicações para o módulo solar que se procura fabricar ou operar.

Para efeito de comparação, o Quadro 2 apresenta o preço comparativo entre 4 modelos comerciais de emuladores fotovoltaicos pesquisados neste trabalho, sendo que dois foram cotados em empresas com venda nacional (Supplier e Itech) e outros 2 cotados no exterior (Chroma e Keysight), o que significa que o preço poderá ser ainda maior, devido as taxas no momento de realizar a importação. Nota-se que possuem um preço elevado, com todos ultrapassando o valor de 40 mil reais.

Quadro 2 – Comparação de preços entre emuladores fotovoltaicos comerciais

	SUPPLIER FONTE CC ISOLADA FCCT 400-50-I	ITECH IT6006C-300-75	CHROMA 62020H-150S	KEYSIGHT E4361A
Tensão	500 V	300 V	150 V	65 V
Corrente	8 A	75 A	40 A	8,5 A
Potência	4 kW	6 kW	5 kW	0,51 kW
Preço	R\$ 55.150,00	R\$ 42.500,00	€ 10.050,00	US\$ 8.800,00
Data da Consulta	08/2024	11/2022	01/2024	01/2024

Fonte: Elaboração própria (2024).

Destaca-se que, apesar do emulador da fabricante Keysight ser o mais similar com o emulador desenvolvido neste trabalho, ele acaba tendo o pior custo-benefício, pois tem a menor potência entre os modelos comparados e o segundo maior preço.

O emulador fotovoltaico projetado busca utilizar componentes de fácil aquisição no mercado, de baixo custo, e com ampla disponibilidade. O valor total do projeto foi estimado para não ultrapassar R\$ 1.500,00, mantendo-se acessível para replicação em ambientes acadêmicos. Permitindo futuras adaptações, para que seja ajustado conforme a necessidade de diferentes pesquisas.

3 METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo a implementação de um emulador fotovoltaico de baixo custo, utilizando um conversor Buck, alimentado a partir da rede elétrica, empregando um retificador monofásico. A metodologia adotada para este projeto, conforme Gil (2017), é uma pesquisa qualitativa, do tipo exploratória. Para uma compreensão mais profunda de conceitos e princípios, foi feita uma pesquisa bibliográfica, sobre a construção e o funcionamento de módulos fotovoltaicos, emuladores fotovoltaicos e conversores aplicados a emuladores fotovoltaicos, em especial, o conversor Buck.

Na sequência, foi feito o projeto eletrônico do emulador, realizadas simulações numéricas computacionais para comprovar o funcionamento do mesmo, utilizando o *software* de simulação PSIM (demo 9.3), desenvolvida a placa eletrônica, com uso de software CAD de desenho de layout de placa de circuito impresso (PCI), Kicad (2021), criado o esquemático elétrico do circuito e desenhado o leiaute da PCI, que foi construído com base nos componentes calculados e disponíveis para o uso. Para melhor aproveitamento e redução de riscos, foram feitas duas placas de circuito impresso, sendo uma para a parte de potência e outra para realizar o comando e o condicionamento dos sinais das medidas elétricas realizadas.

A placa para o comando foi feita com uso de uma fresadora CNC, disponível no Laboratório de Pesquisa Avançada em Eletrônica (LPAE) do IFSC. Já a placa de potência, devido às suas grandes dimensões, foi feita pelo método de transferência térmica e corrosão, no Laboratório de Protótipos (LPT). Ambas foram feitas com placas de cobre de face única, e aplicado verniz isolante após a furação.

Com os componentes soldados na placa, foram realizados ensaios, com o uso dos seguintes equipamentos:

- 3 fontes reguláveis 0-30V/3A Icel, modelo PS-4100;
- 1 fonte de alimentação CA monofásica 0-440V, 2,5kVA, Supplier, modelo FCAMH 250-44-50;
- 1 varivolt monofásico 0-250V, 2kVA, JNG, modelo TDGC2;
- 1 osciloscópio digital Tektronix, modelo TDS 1012-C EDU;

- 1 ponteira de medição de corrente para osciloscópio, Tektronix, modelo A622;
- 2 multímetros digitais Fluke, modelo 115;
- 1 alicate digital amperímetro, Fluke, modelo 325;
- 2 bancos de cargas resistivas Supplier, modelo BCR 600-15;
- 1 fonte de alimentação CC programável bidirecional modelo IT6000C-300-75, da fabricante ITECH, com módulo de emulação fotovoltaica.

Os testes foram realizados no Laboratório de Processamento Eletrônico de Energia (LPEE), e serviram para realizar a medição de parâmetros de tensão, corrente e temperatura, podendo assim, verificar se o sistema estava funcionando conforme o esperado.

4 DESENVOLVIMENTO

Para desenvolver o emulador fotovoltaico, foi necessário especificar os valores de tensão e de corrente de saída que o mesmo poderia fornecer. Para isso, o módulo fotovoltaico KC200GT, da empresa Kyocera, apresentado anteriormente na Figura 4, serviu como referência de dados que o emulador deveria reproduzir. As principais especificações, para condições padrão de ensaio (STC - *standard test conditions*), com irradiância de 1.000W/m^2 , massa de ar de 1,5 e temperatura de 25°C (INMETRO, 2022), extraídas da folha de dados do módulo, são apresentadas no Quadro 3.

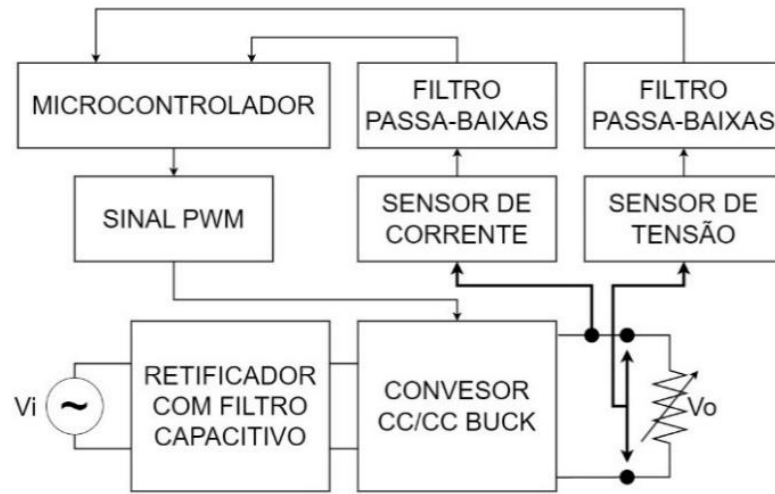
Quadro 3 – Especificações módulo fotovoltaico KC200GT

Potência Máxima	200 W
Tensão de Máxima Potência	26,3 V
Corrente de Máxima Potência	7,61 A
Tensão de Circuito Aberto	32,9 V
Corrente de Curto-Circuito	8,21 A

Fonte: Elaboração própria (2024).

A Figura 13 apresenta um diagrama em blocos das principais partes do circuito eletrônico do emulador fotovoltaico, que será descrito neste capítulo. A operação do sistema baseia-se nas leituras de tensão e corrente, que, após serem filtradas para remoção de ruídos, permitem ao microcontrolador calcular a carga na saída. Com esse valor determinado, o sinal PWM é atualizado de acordo com uma tabela pré-definida, que relaciona a carga calculada ao ciclo de trabalho necessário, conforme verificado nos ensaios realizados previamente.

Figura 13 - Diagrama de blocos do emulador fotovoltaico proposto



Fonte: Elaboração própria (2024).

4.1 Dimensionamento dos componentes

Para a alimentação do sistema, foi dimensionada uma fonte para uso em uma rede de 220 V eficaz monofásica, com frequência de 60 Hz e com ondulação de tensão após a retificação de 1,5 %. Na equação 1, (BARBI, 2006), obteve-se o valor da capacitância de 2.024 μF , que foi ajustada para 2.400 μF , com o uso de dois capacitores em paralelo com valor comercial de 1.200 μF cada.

$$C = \frac{P_{in}}{f * (V_{in_{\max_cap}}^2 - V_{in_{\min_cap}}^2)} = \frac{350}{60 * (311,127^2 - 306,460^2)} = 2.024 \mu\text{F} \quad (1)$$

Onde:

C – Valor de capacitância do capacitor (F)

P_{in} – Valor de potência de entrada do retificador (W)

f – Valor de frequência da rede (Hz)

$V_{in_{\max_cap}}$ – Valor de tensão máxima no capacitor (V)

$V_{in_{\min_cap}}$ – Valor de tensão mínima no capacitor (V)

Na sequência, calculou-se o período da tensão alternada da rede elétrica, na equação 2, e o tempo de condução dos capacitores, na equação 3. Com esses valores, foi possível obter a corrente máxima em cada diodo da ponte retificadora,

com o uso da equação 4, após, chegar ao valor da corrente eficaz no capacitor, mostrada na equação 5.

$$t_r = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} = 0,0167 \text{ s} \quad (2)$$

$$t_c = \frac{\arccos\left(\frac{V_{in_{min}}}{V_{in_{max}}}\right)}{2 * \pi * f} = 422 \mu\text{s} \quad (3)$$

$$I_{Db1_{max}} = \frac{2C1}{t_c} * (V_{in_{max}} - V_{in_{min}}) = 44,7 \text{ A} \quad (4)$$

$$I_{c_{ef}} = \frac{I_{Db1_{max}}}{3t_r} * \sqrt{3t_c(2t_r - 3t_c)} = 5,697 \text{ A} \quad (5)$$

Onde:

t_r – Valor do período do ciclo da rede elétrica (s)

t_c – Valor do tempo condução (s)

$I_{Db1_{max}}$ – Valor da corrente máxima no diodo (A)

$I_{c_{ef}}$ – Valor da corrente eficaz no capacitor (A)

Para a definição da ponte retificadora, foram realizados os cálculos de valor da corrente média e eficaz que cada diodo necessita suportar, nas equações 6 e 7, respectivamente.

$$I_{Db1_{med}} = \frac{\frac{1}{2} * I_{Db1_{max}} * t_c}{t_r} = 0,566 \text{ A} \quad (6)$$

$$I_{Db1_{ef}} = \frac{I_{Db1_{max}}}{3} * \sqrt{3 \frac{t_c}{t_r}} = 4,107 \text{ A} \quad (7)$$

Onde:

$I_{Db1_{med}}$ – Valor da corrente média no diodo (A)

$I_{Db1_{ef}}$ – Valor da corrente eficaz no diodo (A)

Visando os parâmetros do módulo fotovoltaico KC200GT, o conversor Buck foi dimensionado para operar na potência próxima de 200 W, com valor da tensão de saída de 26,3 V e corrente de 7,61 A. A frequência de operação foi definida para ser de 31,25 kHz, buscando obter a melhor relação entre frequência e precisão que o microcontrolador utilizado possibilita operar, a variação do valor de tensão de 0,5 V e a variação do valor de corrente de 0,4 A. O valor da tensão de entrada será a tensão média após a retificação, de aproximadamente 309,00 V. Para obter uma menor ondulação (*ripple*) na corrente de saída, o conversor deve funcionar em modo de condução contínua, onde a corrente no indutor nunca será nula. Os valores definidos para os cálculos do conversor Buck são apresentados no Quadro 4.

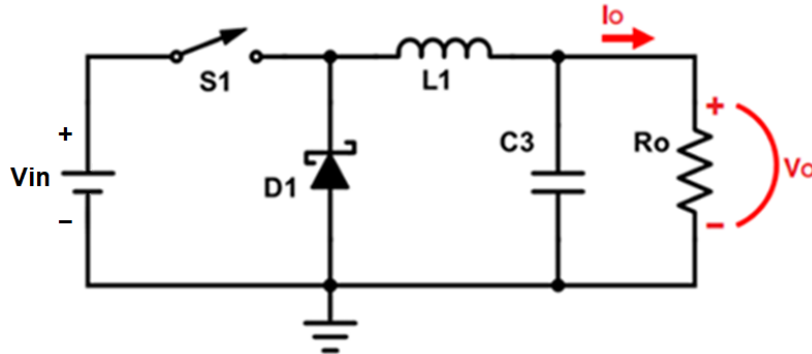
Quadro 4 - Parâmetros definidos para o conversor Buck

V_i	309 V
V_o	26,3 V
I_o	7,61 A
f	31,25 kHz
ΔV_o	0,5 V
ΔIL	0,4 A

Fonte: Elaboração própria (2024).

Seguindo Hart (2010), foram utilizadas as equações de 10 a 18, onde para dimensionar o indutor L1 e o capacitor C3, apresentados na Figura 14, primeiro é necessário se obter a razão cíclica. Como o valor da corrente média no capacitor é nula, o valor da corrente média do indutor possui o mesmo valor que a corrente de saída. Já o valor da corrente máxima no indutor será o valor da corrente média mais a metade da variação de corrente dimensionada.

Figura 14 - Representação do conversor Buck projetado



Fonte: Elaboração própria (2024).

$$D = \frac{V_o}{V_i} = 0,085 \quad (8)$$

$$L1 = \frac{V_o * (1 - D)}{\Delta IL * f} = 1,93 \text{ mH} \quad (9)$$

$$C3 = \frac{V_i}{31 * L1 * \Delta V_o * f^2} = 10,6 \text{ } \mu\text{F} \quad (10)$$

$$IC3_{ef} = \frac{\Delta IL}{2 * \sqrt{3}} = 115,5 \text{ mA} \quad (11)$$

$$IC3_{max} = \frac{\Delta IL}{2} = 200 \text{ mA} \quad (12)$$

$$IL1_{ef} = \sqrt{IC3_{ef}^2 + I_o^2} = 7,61 \text{ A} \quad (13)$$

$$IL1_{max} = I_o + \frac{\Delta IL}{2} = 7,81 \text{ A} \quad (14)$$

Onde:

D – Valor da razão cíclica

$L1$ – Valor de indutância do indutor do conversor Buck (H)

V_o – Valor de tensão de saída (V)

ΔIL – Valor da variação de corrente no indutor (A)

$C3$ – Valor da capacitância do capacitor do conversor Buck (F)

ΔV_o – Valor da variação da tensão de saída (V)

$IC3_{ef}$ – Valor da corrente eficaz no capacitor (A)

$IC3_{max}$ – Valor da corrente máxima no capacitor (A)

$IL1_{ef}$ – Valor da corrente eficaz no indutor (A)

I_o – Valor da corrente de saída (A)

$IL1_{max}$ – Valor da corrente máxima no indutor (A)

O diodo D1 e o transistor do tipo *MOSFET* S1, utilizado como interruptor, foram dimensionados nas equações 15, 16, 17 e 18, com o cálculo do valor de corrente média e eficaz que cada um necessita suportar. O valor da corrente máxima em ambos será o valor da corrente máxima calculada para o indutor L1.

$$IS1_{med} = D * I_o = 0,648 \text{ A} \quad (15)$$

$$IS1_{ef} = \frac{1}{2} * \sqrt{\frac{D}{3} * (12 * I_o^2 + \Delta IL^2)} = 2,22 \text{ A} \quad (16)$$

$$ID1_{med} = (1 - D) * I_o = 6,96 \text{ A} \quad (17)$$

$$ID1_{ef} = \frac{1}{2} * \sqrt{\frac{(1 - D) * (12 * I_o^2 + \Delta IL^2)}{3}} = 7,23 \text{ A} \quad (18)$$

Onde:

$IS1_{med}$ – Valor da corrente média no interruptor (A)

$IS1_{ef}$ – Valor da corrente eficaz no interruptor (A)

$ID1_{med}$ – Valor da corrente média no diodo (A)

$ID1_{ef}$ – Valor da corrente eficaz no diodo (A)

4.1.1 Dimensionamento de dissipadores

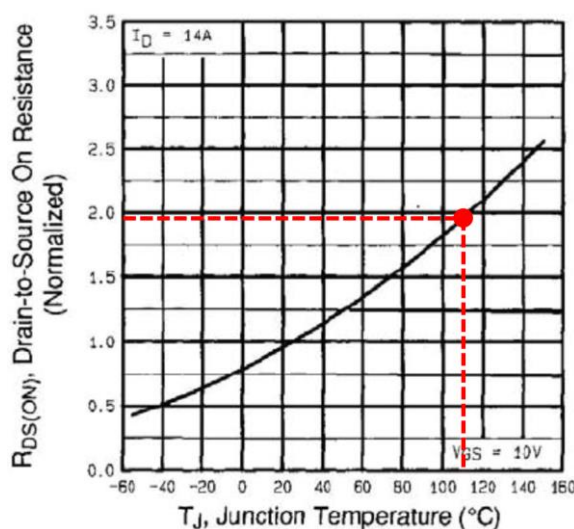
Tendo os valores de correntes e tensões para o conversor Buck, definiu-se o uso do *MOSFET* IRFP450 e do diodo MUR1660, baseando-se em suas especificações, que atendem aos parâmetros calculados. No entanto, é preciso analisar a necessidade de dissipadores térmicos para garantir o desempenho esperado do circuito, evitar o superaquecimento e falha prematura dos componentes.

Portanto, a escolha de dissipadores apropriados foi determinada com base nos cálculos térmicos, apresentados nas equações de 19 a 34, de acordo com Barbi (2014), visam garantir que a temperatura de junção dos componentes permaneça abaixo dos limites especificados. Visando trabalhar em uma temperatura de junção inferior a 75% ao sugerido pelos fornecedores, foi definida a temperatura de 110 °C como temperatura de junção (T_j) e temperatura ambiente de 50 °C (T_a).

Inicialmente, realizou-se o dimensionamento do dissipador para o *MOSFET*, sendo apresentado na equação 19. O cálculo de resistência de Condução, R_d , com uso do valor de $R_{DS(on)}$, da folha de dados do componente (Vishay, 2022) e o valor de f_n , encontrado a partir da temperatura T_j na Figura 15.

$$R_d = R_{PS(on)} * fn = 0,4 * 1,95 = 0,78 \Omega \quad (19)$$

Figura 15 – RDS (on) normalizado x temperatura de junção



Fonte: Adaptado de Vishay Siliconix (2022).

A perda de condução é representada por P_{cond} e é dada pela equação 20.

$$P_{\text{cond}} = R_d * IS1_{\text{ef}}^2 = 0,78 * 2,22^2 = 3,845 \text{ W} \quad (20)$$

A perda de comutação é representada por P_{com} e pode ser calculada pela equação 21, utilizando os tempos de subida (t_r) e de descida (t_f) apresentados na folha de dados (Vishay, 2022).

$$P_{com} = \frac{f}{2} * (t_r + t_f) * V_o * IL1_{max} = 31250 * (47 + 44)10^{-9} * 309 * \frac{7,81}{2} = 3,43 \text{ W} \quad (21)$$

A perda total de potência no *MOSFET* é denotada P_t e é determinada pela equação 22. Esta perda total considera tanto a perda de condução quanto a de comutação.

$$P_t = P_{cond} + P_{com} = 3,845 + 3,43 = 7,276 \text{ W} \quad (22)$$

Para verificar a necessidade do uso de dissipador, calcula-se T_{js} (23), a partir do valor de R_{thJA} , encontrado na tabela de informações do *MOSFET* IRFP450. Para que não seja preciso o uso de dissipador, o valor calculado não deve ser superior à temperatura de junção definida.

$$T_{js} = P_t * R_{thJA} + T_a = 7,276 * 40 + 50 = 341,04 \text{ °C} \quad (23)$$

Após a confirmação da necessidade de dissipador, para o dimensionamento do mesmo são calculados: Resistência térmica de junção ambiente, R_{ja} (24); Resistência térmica que o dissipador deve prover, R_{da} (25), utilizando a resistência térmica entre a junção e a cápsula R_{jc} , e a resistência térmica entre a cápsula e a dissipador R_{cd} , dados estes encontrados na folha de dados (HS, 2024).

$$R_{ja} = \frac{T_j - T_a}{P_t} = \frac{110 - 50}{7,276} = 8,246 \text{ °C/W} \quad (24)$$

$$R_{da} = R_{ja} - R_{jc} - R_{cd} = 8,246 - 0,65 - 0,24 = 7,356 \text{ °C/W} \quad (25)$$

A Resistência térmica do dissipador selecionado, R_{da_1} (26), é determinada a partir da resistência térmica por altura de 4 polegadas do dissipador (2,5 °C/W) e do fator de correção, baseado no comprimento de 30 mm do dissipador, sendo estes dados obtidos no catálogo do fabricante HS Dissipadores, para o modelo escolhido, HS 10526.

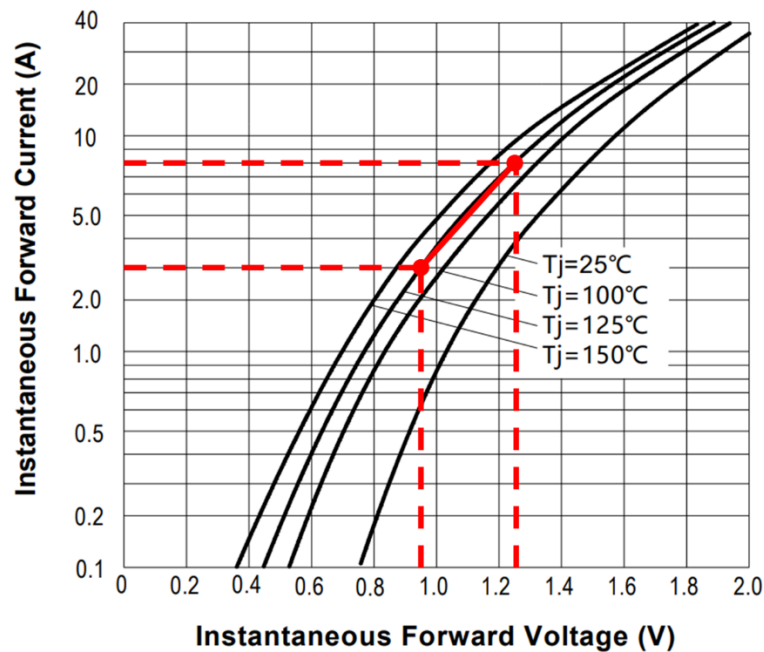
$$R_{da_1} = 2,5 * 1,82 = 4,55 \text{ °C/W} \quad (26)$$

Dessa forma, é validado que o dissipador atende as especificações necessárias, visto que possui um valor de resistência térmica inferior ao valor necessário.

Na sequência, dimensionou-se o dissipador para o diodo MUR1660, com a queda do valor de tensão no diodo, V_{to} , de 0,45 V, e resistência interna do diodo, R_{d_d} , apresentada na equação 27, sendo calculadas a partir da curva IV deste componente, mostrada na Figura 16.

$$R_{d_d} = \frac{V_{F2} - V_{F1}}{I_{F2} - I_{F1}} = \frac{1,25 - 0,95}{8,00 - 3,00} = 0,06 \, \Omega \quad (27)$$

Figura 16 - Linearização da curva IV em 125°C do diodo MUR1660



Fonte: Adaptado de Yangzhou Yangjie (2022).

A perda de condução no diodo é representada por P_{cond_d} e calculada na equação 28.

$$P_{cond_d} = V_{to} * ID1_{med} + R_d * ID1_{ef}^2 = 0,45 * 6,96 + 0,06 * 7,23^2 = 6,27 \, W \quad (28)$$

As equações 29 e 30, apresentam, respectivamente, a perda por comutação P_{com_d} , e a perda total de potência no diodo, P_{t_d} , com o valor de Q_{rr} sendo encontrado na folha de dados do componente (YANGJIE, 2022).

$$P_{com_d} = Q_{rr} * E * f = 262,2 * 10^{-9} * 309 * 31250 = 2,54 \text{ W} \quad (29)$$

$$P_{t_d} = P_{cond_d} + P_{com_d} = 6,27 + 2,54 = 8,81 \text{ W} \quad (30)$$

Depois, analisou-se a necessidade de uso de dissipador no diodo MUR 1660 e resistência térmica necessária, sendo verificados: Resistência térmica de junção ambiente do diodo, R_{ja_d} (31); Resistência térmica que o dissipador do diodo deve prover, R_{da} (32), utilizando a resistência térmica entre a junção e a cápsula R_{jc} , e a resistência térmica entre a cápsula e a dissipador R_{cd} , dados estes encontrados na folha de dados.

$$R_{ja_d} = \frac{T_j - T_a}{P_{t_d}} = \frac{110 - 50}{8,81} = 6,81 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (31)$$

$$R_{da_d} = R_{ja_d} - R_{jc_d} - R_{cd_d} = 6,81 - 2 - 0 = 4,81 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (32)$$

Confirmada a necessidade de dissipador, optou-se pelo uso do mesmo modelo utilizado para no *MOSFET*, o HS 10526, que possui resistência térmica de 4,55 $^\circ\text{C/W}$, calculada na equação 28, sendo menor que a resistência térmica necessária para o diodo, logo, sendo viável a sua utilização.

4.1.2 Circuito para a leitura de corrente

Para ser possível a emulação de um módulo fotovoltaico, a leitura da corrente de saída foi feita através do transdutor LTS 25-NP. Escolhido por realizar a conversão de leitura de corrente elétrica contínua de até 25 A, para uma saída de até 4,5 V, possibilitando a leitura pelo conversor A/D do microprocessador utilizado.

Devido ao valor da corrente máxima de saída projetada para o emulador fotovoltaico, ser de 8,21 A, o transdutor para a leitura da corrente foi configurado, seguindo a folha de dados do componente, como mostrado no Quadro 5, para o uso

de duas espiras no primário. Assim, tendo como valor de corrente nominal 12 A, e possibilitando uma leitura mais precisa. O valor da tensão resultante da leitura de corrente feita, é calculada através da equação 33.

Quadro 5 - Relação entre corrente e conexão recomendada para sensor de corrente LTS 25-NP

Número de espiras no enrolamento primário	Corrente nominal RMS no primário	Resistência Rp no primário	Conexão recomendada
1	± 25 A	0,18 mΩ	
2	±12 A	0,81 mΩ	
3	±8 A	1,62 mΩ	

Fonte: Adaptado de LEM (2022).

$$V_{out} = 2,5 - \left(\frac{0,625 * I_p}{12} \right) \quad (33)$$

Onde:

I_p – Valor da corrente nominal (A)

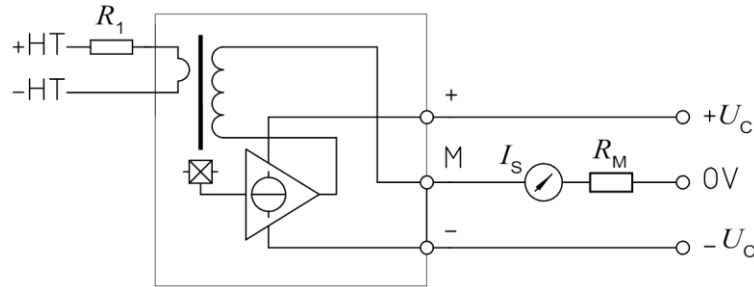
V_{out} – Valor de tensão de saída do transdutor (V)

4.1.3 Circuito para a leitura de tensão

Tendo o valor da tensão máxima de saída projetada para 32,9 V, foi escolhido o transdutor LV 25-P para a leitura de tensão. Este transdutor possibilita a leitura de tensões de até 500 V, sendo convertido em um valor de corrente para a leitura. Os cálculos de dimensionamento dos resistores, R1 e Rm, apresentados na Figura 17, que servem, respectivamente, para garantir precisão da leitura de tensão, servindo como um shunt, e para transformar o sinal de corrente em sinal de tensão,

são apresentados nas equações 34 e 35, com base na folha de dados do componente (LEM, 2021).

Figura 17 - Esquema de ligação do transdutor LV 25-P



Fonte: LEM (2021).

$$R_1 = \left(\frac{V_{out_{max}}}{I_{in_{LV25P}}} \right) = \frac{33}{0,01} = 3,3 \text{ k}\Omega \quad (34)$$

$$R_M = \left(\frac{V_{uc}}{I_{S_N}} \right) = \frac{2,5}{0,025} = 100 \text{ }\Omega \quad (35)$$

Onde:

$V_{out_{max}}$ – Valor de tensão máxima de saída do emulador (V)

$I_{in_{LV25P}}$ – Valor da corrente nominal de entrada do transdutor (A)

R_1 – Valor do resistor para leitura de tensão (V)

V_{uc} – Valor de tensão de saída do transdutor (V)

I_S – Valor da corrente nominal no secundário do transdutor (mA)

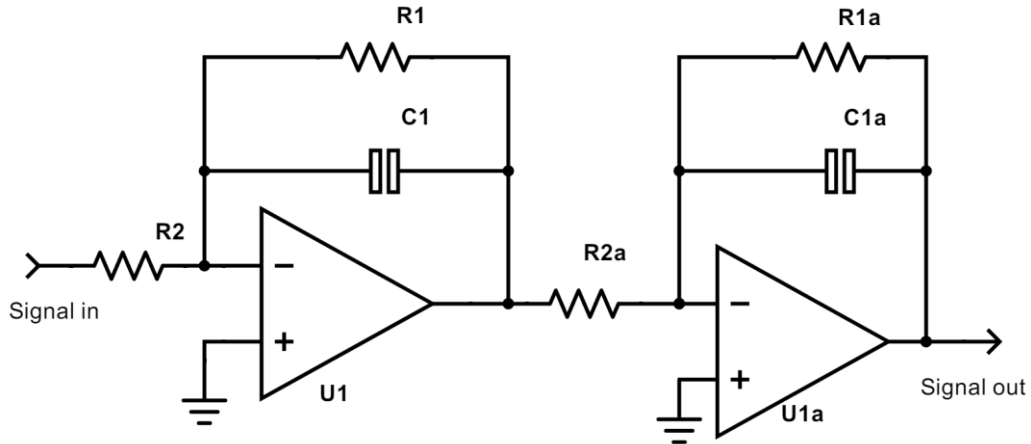
$V_{out_{max}}$ – Valor de tensão de saída do transdutor (V)

4.1.4 Dimensionamento do filtro passa-baixas

Os sinais de leitura de tensão e corrente são processados cada um por dois filtros RC passa-baixas ativos em série, com o objetivo de eliminar os ruídos gerados pelo chaveamento dos semicondutores. O filtro, apresentado na Figura 18, conta com amplificadores operacionais, além de capacitores e resistores calculados para um ganho de 1 e frequência de corte em 8 kHz, sendo definida por ser ligeiramente inferior à metade de 20 kHz, que é a taxa de amostragem utilizada.

Conforme Lathi (2007), desta forma será evitada a ocorrência de *aliasing*, que é a distorção causada pela amostragem inadequada de sinais de alta frequência.

Figura 18 - Representação do filtro RC passa-baixas ativo



Fonte: Elaboração própria (2024).

Os filtros de sinais foram calculados conforme Boylestad e Nashelsky (2012), e apresentados nas equações 36 e 37, sendo arbitrado o valor de 10 k Ω para o resistor R2a. Como o ganho seria negativo, foi necessária a utilização de dois filtros em série, permitindo que a saída mantivesse um ganho de 1 e resultando em uma redução de 6 dB na frequência de corte calculada.

Foi utilizado um capacitor com valor de 2,2 nF de capacitância, sendo o valor comercial mais próximo ao calculado, resultando em uma frequência de corte de 7,2 kHz.

O filtro

$$C1 = \frac{1}{2 * \pi * R2 * f_{OH}} = 1,99 \text{ nF} \quad (36)$$

$$R2 = \frac{R1}{A} = 10 \text{ k}\Omega \quad (37)$$

Onde:

f_{OH} – Valor da frequência de corte (kHz)

A – Valor do ganho

4.2 Resultados da simulação dos circuitos

Com os componentes principais dimensionados, os circuitos desenvolvidos foram simulados com uso do *software* PSIM, que permite a medição dos valores calculados e exibição em forma gráfica.

Inicialmente, foi simulada a ponte retificadora projetada, para validação dos cálculos mostrados da equação 1 até a 7. Essa simulação é apresentada na Figura 19, onde é possível observar a forma de onda em vermelho, um ciclo da tensão de entrada, de 220 Vac. Já na forma de onda na cor azul, é mostrada a tensão retificada e com a ondulação da tensão do capacitor.

Ainda na Figura 19, em verde e em roxo, são mostradas, respectivamente, as formas de onda da corrente de um diodo da ponte retificadora e da corrente no capacitor. No

Quadro 6 é mostrada a diferença entre os valores calculados e os valores medidos na simulação.

Figura 19 – Resultados da simulação da Ponte Retificadora



Fonte: Elaboração própria (2024).

Quadro 6 – Comparação entre medidas da Ponte Retificadora

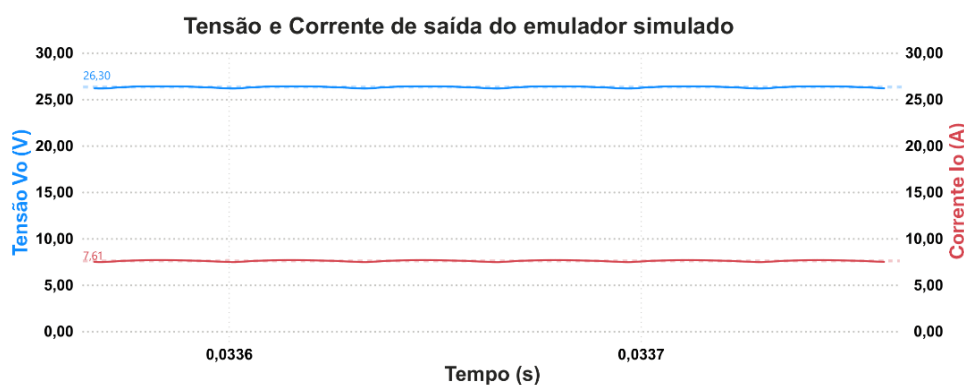
Medida	Valor Calculado	Valor Medido	Diferença
Vin_max	311,127 V	311,127 V	0,000%
Vin_min	307,196 V	307,202 V	0,002%
Tc	422 μ S	426 μ S	0,939%
Ic_ef	5,697 A	5,909 A	3,588%
Id_max	44,700 A	45,606 A	1,987%
Id_med	0,566 A	0,594 A	4,714%
Id_ef	4,107 A	4,262 A	3,637%

Fonte: Elaboração própria (2024).

Pode-se observar que os valores obtidos através da simulação validam os cálculos realizados, com a maior diferença entre o valor calculado e o valor simulado sendo de apenas 5%.

Partindo para a simulação do conversor, a Figura 20 mostra as formas de onda resultantes na saída do conversor Buck, quando configurado para a máxima potência, de 200 W. Com as formas de onda de tensão e corrente de saída validando os cálculos realizados, resultando na tensão média de 26,3 V e corrente de 7,61 A.

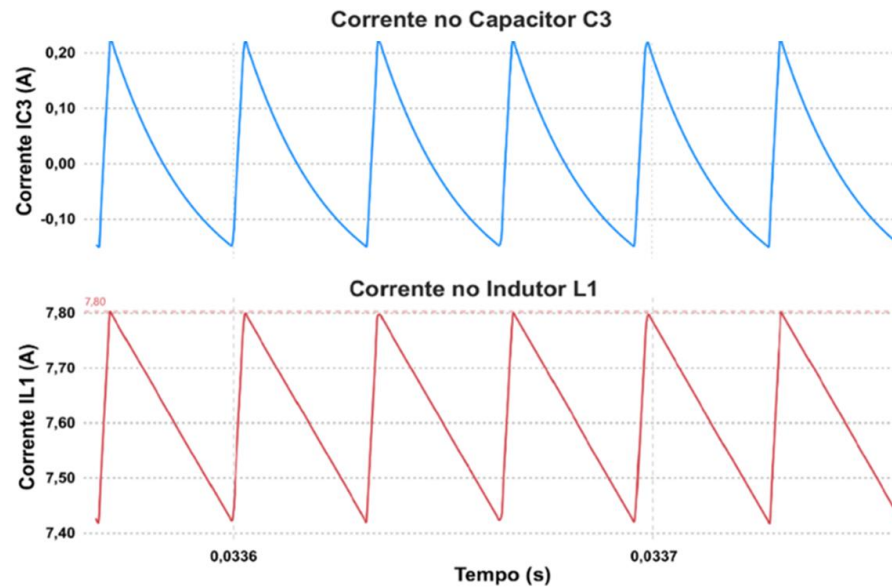
Figura 20 - Resultado de simulação de tensão e corrente de saída do conversor Buck



Fonte: Elaboração própria (2024).

Na sequência, a Figura 21 mostra as formas de onda da corrente consumidas no capacitor C3 e no indutor L1 do conversor. A curva em azul representa a corrente no capacitor de saída C3, apresentando picos durante o ciclo de carregamento e quedas durante o ciclo de descarregamento. Na curva em vermelho, do indutor L1, nota-se que o conversor Buck opera no modo de condução contínua, no qual o indutor começa a se recarregar antes que a corrente se anule completamente.

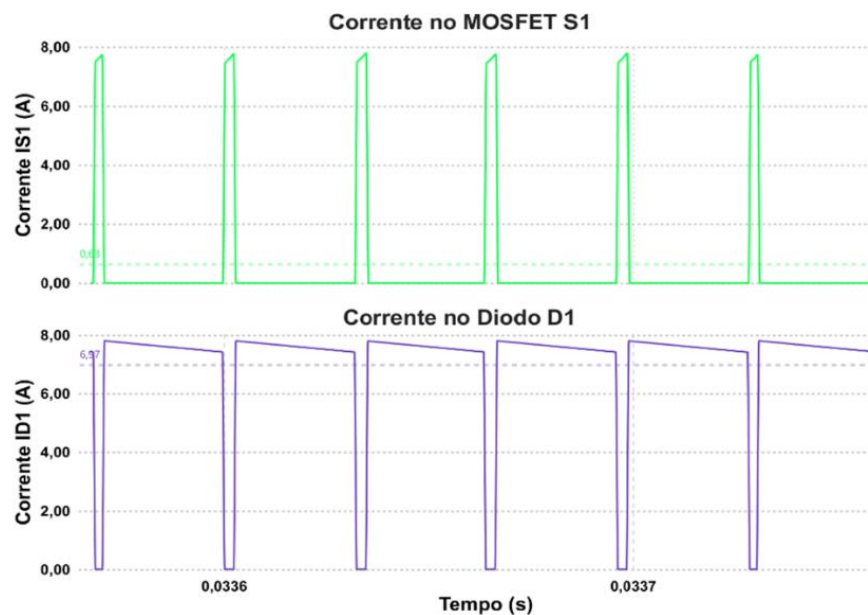
Figura 21 - Correntes no indutor e no capacitor do conversor Buck



Fonte: Elaboração própria (2024).

A Figura 22 apresenta as formas de onda da corrente no *MOSFET* S1 e no diodo D1 do conversor. A curva verde indica que o *MOSFET* atua como uma chave, conduzindo quando está ligado e caindo para zero quando desligado. A curva na cor roxa mostra a corrente no diodo D1, que conduz quando a chave é aberta e possui corrente nula quando a chave é fechada.

Figura 22- Correntes no MOSFET e no diodo do conversor Buck



Fonte: Elaboração própria (2024).

Com os resultados obtidos na simulação, foi elaborado o Quadro 7, que os compara aos valores calculados para o conversor. Observa-se que apenas os valores medidos no capacitor em paralelo com a carga a diferença entre o calculado e o simulado ultrapassou 1%.

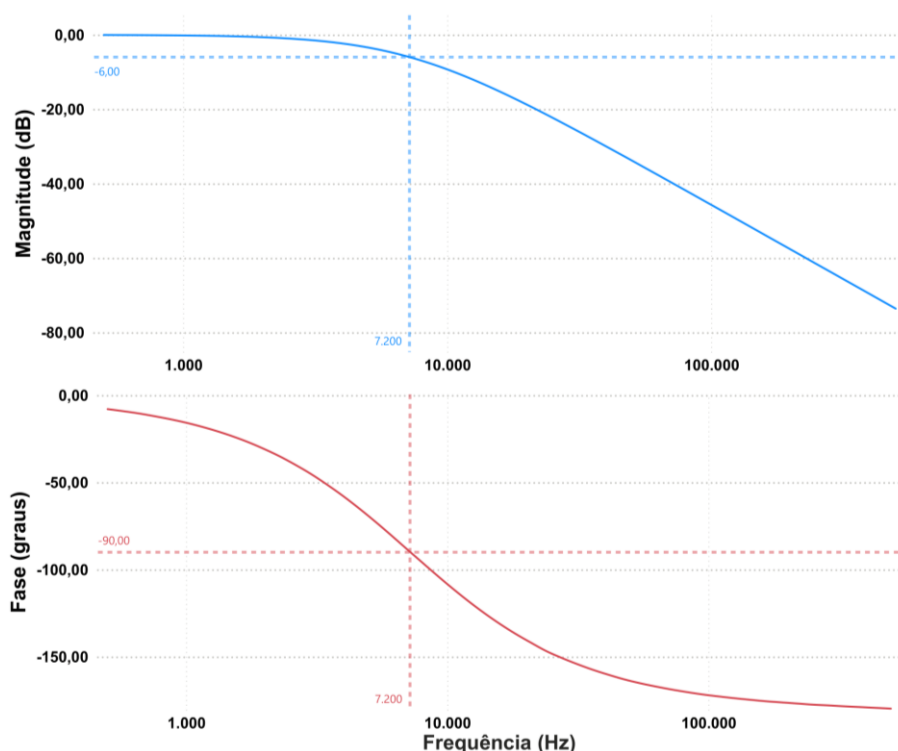
Quadro 7 – Comparação entre medidas do conversor Buck

Medida	Valor Calculado	Valor Simulado	Diferença
Vo	26,300	26,338	0,146%
Io	7,610	7,621	0,146%
Ic3_ef	0,116	0,113	2,533%
IL1_ef	7,610	7,608	0,026%
IL1_max	7,810	7,809	0,017%
Is_med	0,648	0,646	0,251%
Is_ef	2,200	2,220	0,894%
Id1_med	6,960	6,974	0,204%
Id1_ef	7,230	7,291	0,845%

Fonte: Elaboração própria (2024).

Em seguida, foi representado no *software* de simulação PSIM o filtro RC ativo passa-baixas projetado. A Figura 23, que mostra o diagrama de Bode, apresenta a resposta em frequência do filtro, exibindo a variação ocorrida na saída do filtro ao se ajustar a frequência de 0,5 kHz até 0,5 MHz. Pode-se observar que em 7,2 kHz há uma redução de 6 dB, comprovando que a frequência de corte está em tal valor.

Figura 23 - Simulação da resposta em frequência do filtro RC ativo passa-baixas



Fonte: Elaboração própria (2024).

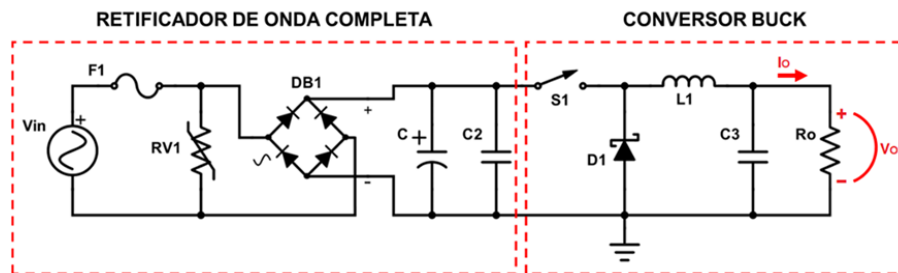
4.3 Desenvolvimento da placa eletrônica

Tendo os componentes dimensionados e validados, o projeto foi dividido em duas placas, visando alcançar maior facilidade de fabricação e modularidade. Uma das placas destina-se à parte que demanda maior consumo de energia, apresentando trilhas e espaçamentos mais amplos. A segunda placa possui dimensões reduzidas, concentrando os componentes responsáveis pelo condicionamento dos sinais medidos pelos transdutores de tensão e corrente e gerando o chaveamento para o conversor.

A Figura 24 mostra um diagrama esquemático simplificado do circuito de potência para ser construído em uma placa de circuito impresso, elaborada com base no retificador de onda completa e no conversor Buck. A variação da tensão de saída é realizada pela variação do acionamento da chave S1, através do sinal enviado pelo microcontrolador. Este último recebe a leitura de corrente e tensão de saída do conversor, obtida por meio de transdutores que utilizam o efeito Hall.

Ainda foram inseridos o fusível F1 e o varistor RV1, para atuarem na proteção do sistema em caso de corrente ou tensão acima do projetado na entrada. Além do capacitor C2, que atua para filtrar ruídos de alta frequência.

Figura 24 – Representação do esquemático da placa de potência projetada



Fonte: Elaboração própria (2024).

Os componentes da placa de potência foram escolhidos para atender aos critérios de tensão, corrente e frequência, calculados e simulados neste capítulo, e estão listados no Quadro 8.

Quadro 8 – Relação de componentes projetados para a placa de potência

Componente	Referência
Fusível (F1)	3 A
Varistor (RV1)	S20K250
Ponte Retificadora (DB1)	VS-KBPC810
Capacitor eletrolítico (C)	1200 μ F x 360 V (2 un)
Capacitor poliéster (C2)	2,2 μ F x 630V
Transistor (S1)	IRFP450
Diodo (D1)	MUR1660
Indutor (L1)	1 mH (2 un)
Capacitor (C3)	3,3 μ F (2 un)

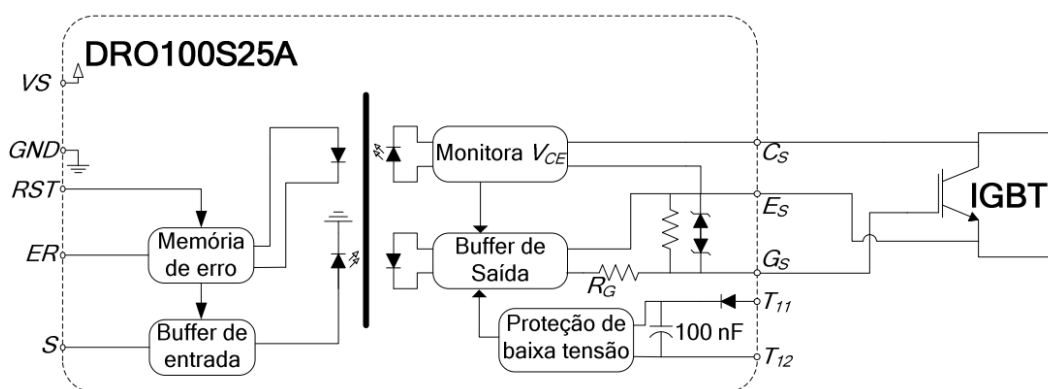
Fonte: Elaboração própria (2024).

Foi necessário incluir na placa de potência um *buffer*, com uso do circuito integrado 7407, para elevar a tensão de PWM oriunda da placa de comando, de 5 V, para 15 V. Este sinal segue para o driver isolado para transistor *t*, modelo DRO100S25A, da fabricante brasileira Supplier, que é responsável por aplicar o sinal PWM adequado para o *MOSFET* IRFP450. Este driver utiliza o optoacoplador

HCPL-316J como elemento isolador, e é projetado para realizar o chaveamento de MOSFETs e IGBTs de até 100 kHz e 1.200 V.

Na Figura 25 é apresentado o esquema simplificado de funcionamento do driver utilizado. O esquema mostra que o sinal no *buffer* de entrada, que aciona o *buffer* de saída, pode ser controlado pelo sinal de erro gerado a partir do monitoramento de V_{ce} . O *buffer* de saída, por sua vez, pode ser controlado tanto pelo sinal de falha em V_{ce} quanto pela proteção contra baixa tensão na fonte isolada. Esses mecanismos impedem o funcionamento do driver em caso de falhas ou quando os limites de operação são excedidos.

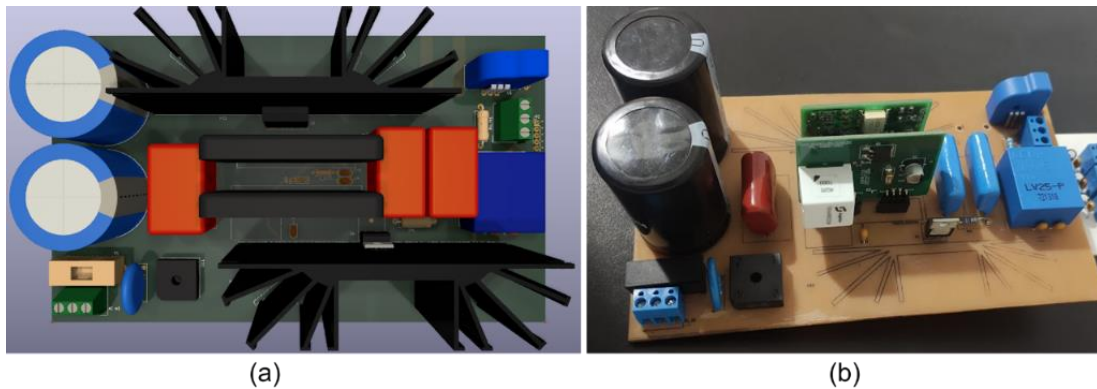
Figura 25 - Esquemático de funcionamento do driver isolador DRO100S25A



Fonte: Supplier (2012).

Após o desenvolvimento do layout da PCI, uma representação em 3D da placa de potência foi obtida e é apresentada na Figura 26 (a), a partir da renderização feita no *software* Kicad. É mostrada Figura 26 (b) a placa eletrônica de potência após a montagem dos componentes eletrônicos, restando ainda conectar o indutor e a fixação dos dissipadores. O esquema elétrico completo da placa de potência é apresentado no apêndice A e o *layout* da placa de circuito impresso pode ser visto no apêndice C.

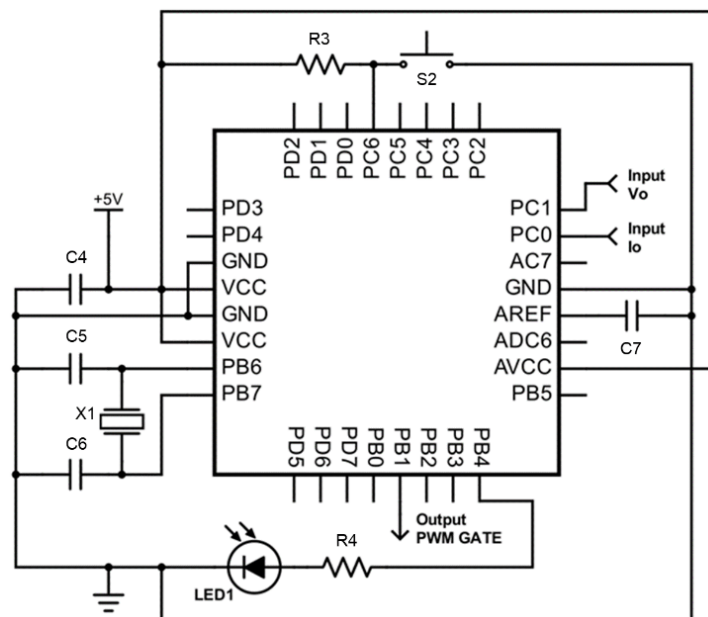
Figura 26 – (a) Representação em 3D da placa de potência projetada e (b) placa de potência após a montagem dos componentes eletrônicos



Fonte: Elaboração própria (2024).

O processamento é realizado pelo microcontrolador Atmega328p, de 8 bits, mostrado na Figura 27. Nele, duas portas com conversores A/D são utilizadas para a entrada do sinal analógico de leitura de corrente e tensão, enquanto uma porta atua como saída em PWM para o acionamento da chave S1. Para o seu funcionamento, emprega-se um cristal de 16 MHz, uma chave para reinicialização, um Led indicativo e capacitores de desacoplamento, visando eliminar ruídos de altas frequências.

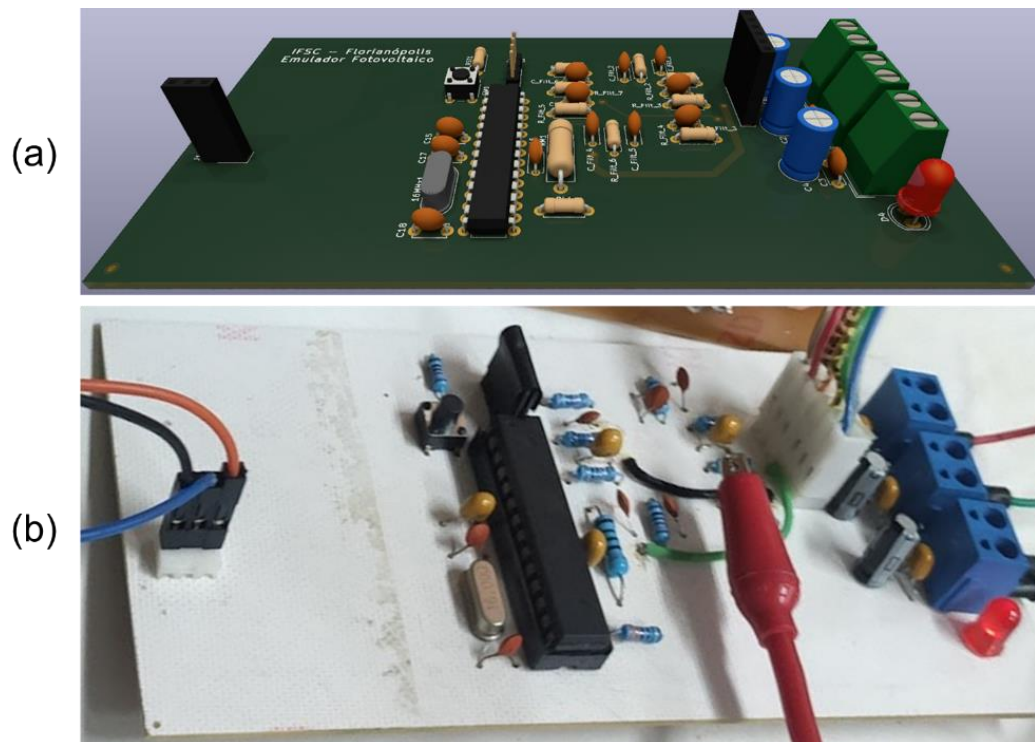
Figura 27 - Diagrama da placa de comando projetada



Fonte: Elaboração própria (2024).

O filtro passa-baixas projetado foi inserido na placa de comando, sendo responsável por receber os sinais vindos dos sensores de tensão e de corrente. Também foram inseridos na placa de comando as entradas de tensão necessárias para o funcionamento do emulador, de 5 V, 15 V e -15 V. Uma renderização em 3D da placa de comando é mostrada na Figura 28 (a) e o resultado após a fabricação e montagem dos componentes na Figura 28 (b). O diagrama completo da placa de comando está disponível no apêndice B, e o *layout* da placa de circuito impresso pode ser encontrado no apêndice D.

Figura 28 – (a) Representação em 3D da placa de comando projetada e (b) placa de comando após a montagem dos componentes eletrônicos

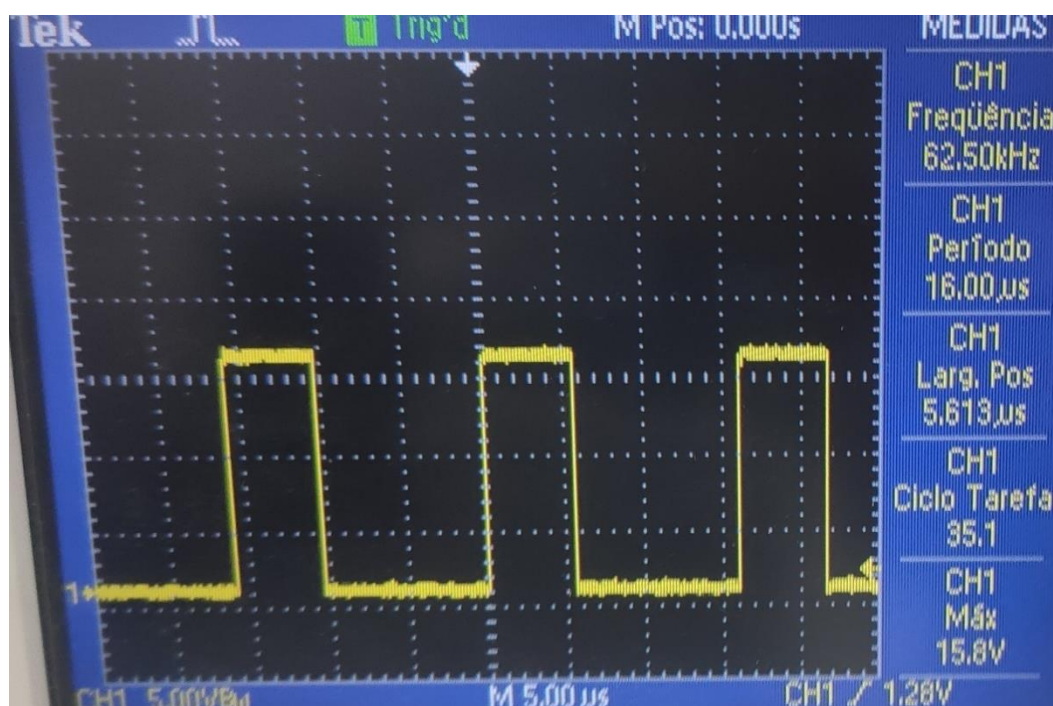


Fonte: Elaboração própria (2024).

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com as placas montadas e conectadas, os testes práticos foram realizados ao programar o microcontrolador e testar a saída PWM, inicialmente com a tensão de 5 V acionada. Em seguida, atingiu-se a tensão de 15 V, para validar o *buffer*, com uso do circuito integrado 7407 e com a tensão de saída sendo elevada de 5 V para 15 V, mantendo o funcionamento adequado, que é mostrado na Figura 29. Os testes iniciais foram realizados com frequência de 62,5 kHz, sendo posteriormente ajustado para 31,25 kHz para se obter uma maior resolução de PWM.

Figura 29 - Medição de tensão na saída do *buffer* de PWM

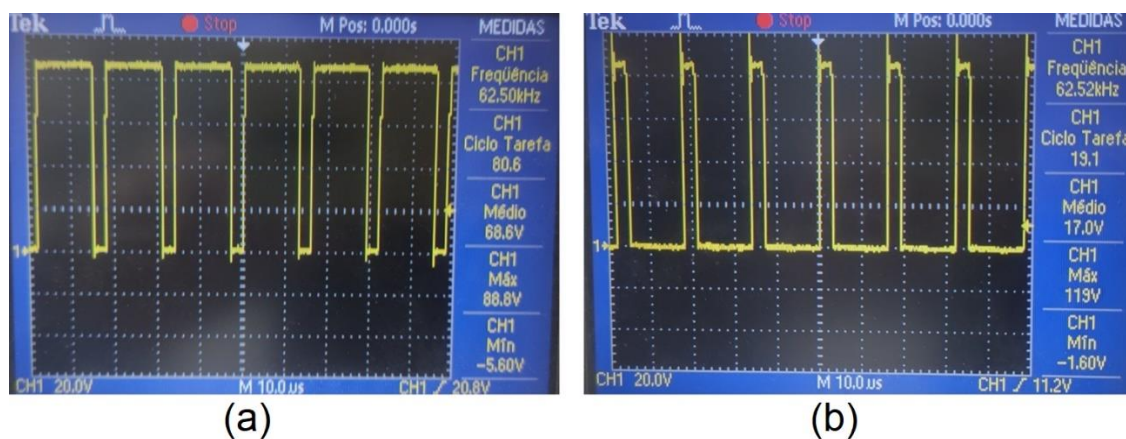


Fonte: Elaboração própria (2024).

Na sequência, para validar a etapa de retificação e do conversor Buck, com o uso de um variador de tensão, conectou-se a placa na rede elétrica, iniciando com uma tensão baixa e aumentando gradualmente. Foi utilizada a tensão máxima de 80 V de pico por ser possível observar que o conversor opera de forma correta e para evitar ultrapassar o limite de tensão de entrada do osciloscópio e da ponteira utilizada, com ambos possuindo o limite de 300 V.

A Figura 30 (a) mostra a leitura de tensão entre dreno e *source* do *MOSFET*, sendo possível observar que quando ele está conduzindo a tensão é baixa, e ao não conduzir a tensão aumenta para próximo do valor de entrada. Já a Figura 30 (b), mostra a tensão entre os terminais do diodo, com a tensão alta enquanto o *MOSFET* atua como chave fechada e, ao atuar como chave aberta, a tensão é baixa.

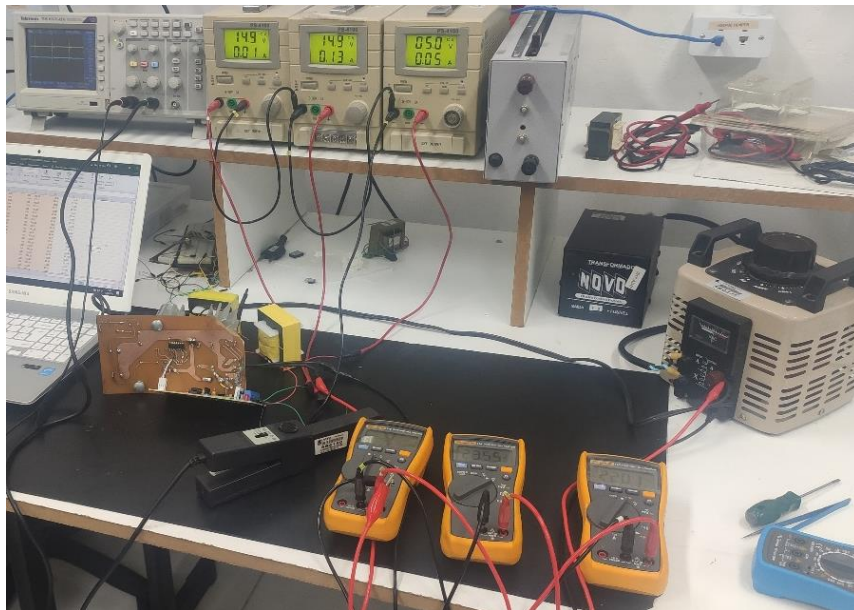
Figura 30 - Amostra de tensão no *MOSFET* (a) e no diodo (b)



Fonte: Elaboração própria (2024).

Com o sistema de retificação funcional, foi validado o uso do emulador com carga, buscando-se obter um ponto próximo ao de máxima potência em condições padrão de ensaio do módulo fotovoltaico KC200GT. A Figura 31 apresenta a realização dos ensaios na placa projetada, verificando-se a tensão alternada de entrada e a tensão constante de saída com uso de multímetros e com uso de osciloscópio verifica-se a saída de tensão e de corrente.

Figura 31 - Realização de ensaios no emulador fotovoltaico



Fonte: Elaboração própria (2024).

A Figura 32 mostra a medida de tensão e de corrente de saída no osciloscópio ao se obter um valor próximo ao valor de máxima potência esperada, resultando em uma corrente de 7,15 A e tensão de 28,2 V, gerando desta forma, uma potência de saída de 201,63 W.

Figura 32 - Curvas de tensão e corrente de saída do emulador



Fonte: Elaboração própria (2024).

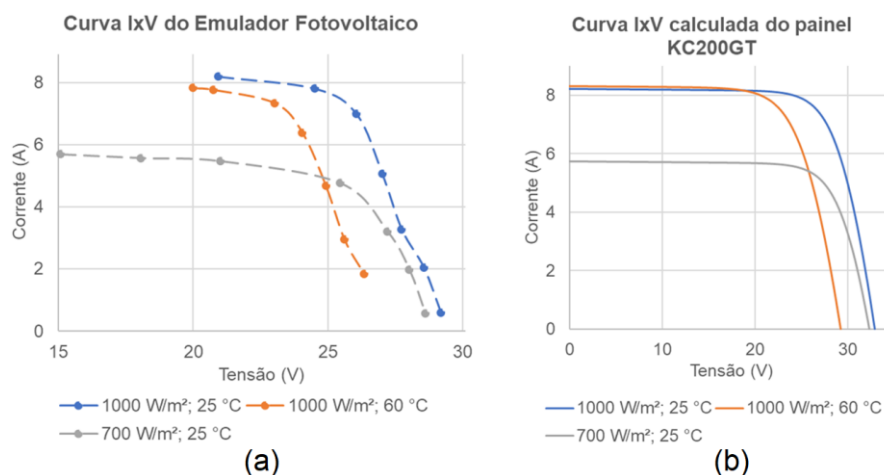
Além disso, foram analisadas as tensões geradas pelo conversor ao se variar a carga e o ciclo de trabalho da saída PWM. Dessa forma, foi possível criar uma tabela de comparação de valores lidos para que o emulador pudesse realizar o ajuste de tensão e corrente ao se variar a carga.

5.1 Plotagem da curva IV

Ao extrair as informações da folha de dados do módulo fotovoltaico KC200GT e através do programa elaborado para o software Matlab, por Casaro e Martins (2008), foi possível determinar os pontos e traçar as curvas de corrente e tensão esperadas para o módulo solar. E, desta forma, inserir no *software* do emulador fotovoltaico os pontos em que ele deve operar, ao obter o valor da carga conectada no sistema, por meio da leitura dos sensores de corrente e de tensão.

Para validar o efetivo funcionamento do emulador, variou-se o valor da carga utilizada, visando gerar pontos de medição de tensão e corrente na saída do emulador, e com eles, traçar uma curva IV. Foram analisados 3 casos, com 1000 W/m² e 25 °C, com 1000 W/m² e 60 °C e 700 W/m² e 25 °C, sendo traçados 7 pontos em cada caso. As curvas geradas a partir do emulador fotovoltaico são apresentadas na Figura 33 (a), e as curvas plotadas a partir de cálculos na Figura 33 (b).

Figura 33 – Comparação entre as curvas IV (a) geradas através do emulador e (b) as curvas geradas através de cálculos



Fonte: Elaboração própria (2024).

Ainda na Figura 33, pode-se observar que o emulador apresentou o comportamento esperado, buscando ajustar a tensão e corrente de saída para os valores esperados de um módulo fotovoltaico. No entanto, devido à limitação dos bancos de carga utilizados, não foi realizada uma varredura até pontos de menor tensão. Além disso, nota-se que, da forma que este emulador foi projetado, ainda são necessários ajustes na calibração, para que os pontos fiquem mais próximos dos valores calculados, visto que os valores de corrente e tensão lidos necessitam de pequenas correções feitas no programa do microcontrolador para garantir a correta leitura.

No Quadro 9, é realizada a comparação entre os pontos de corrente e tensão gerados pelo emulador fotovoltaico e os pontos calculados, verificando-se a diferença entre as tensões para um mesmo ponto de corrente através do cálculo do erro percentual. Observa-se que os maiores erros ocorrem nos pontos em que há uma pequena variação de corrente, associada a uma grande variação de tensão, resultando em um erro percentual mais elevado.

Quadro 9 - Comparação entre tensões calculadas e medidas no emulador fotovoltaico

Irradiância e Temperatura	Corrente (A)	Tensão Calculada (V)	Tensão medida (V)	Erro %
1000 W/m ² ; 25°C	7,80	25,45	24,42	4,0%
1000 W/m ² ; 25°C	6,98	27,76	25,96	6,5%
1000 W/m ² ; 25°C	5,05	29,92	26,92	10,0%
1000 W/m ² ; 25°C	3,27	31,16	27,64	11,3%
1000 W/m ² ; 25°C	2,03	31,87	28,47	10,7%
1000 W/m ² ; 25°C	0,58	32,42	29,1	10,2%
1000 W/m ² ; 60°C	7,82	21,62	19,89	8,0%
1000 W/m ² ; 60°C	7,76	21,88	20,67	5,5%
1000 W/m ² ; 60°C	7,33	23,13	22,94	0,8%
1000 W/m ² ; 60°C	6,37	24,73	23,96	3,1%
1000 W/m ² ; 60°C	4,66	26,39	24,83	5,9%
1000 W/m ² ; 60°C	2,94	27,58	25,52	7,5%
1000 W/m ² ; 60°C	1,84	28,23	26,25	7,0%
700 W/m ² ; 25°C	5,68	20,15	14,99	25,6%
700 W/m ² ; 25°C	5,56	24,36	17,96	26,3%
700 W/m ² ; 25°C	5,46	25,38	20,92	17,6%

700 W/m ² ; 25°C	4,75	27,99	25,37	9,4%
700 W/m ² ; 25°C	3,19	30,06	27,12	9,8%
700 W/m ² ; 25°C	1,98	31,05	27,92	10,1%
700 W/m ² ; 25°C	0,56	31,97	28,52	10,8%

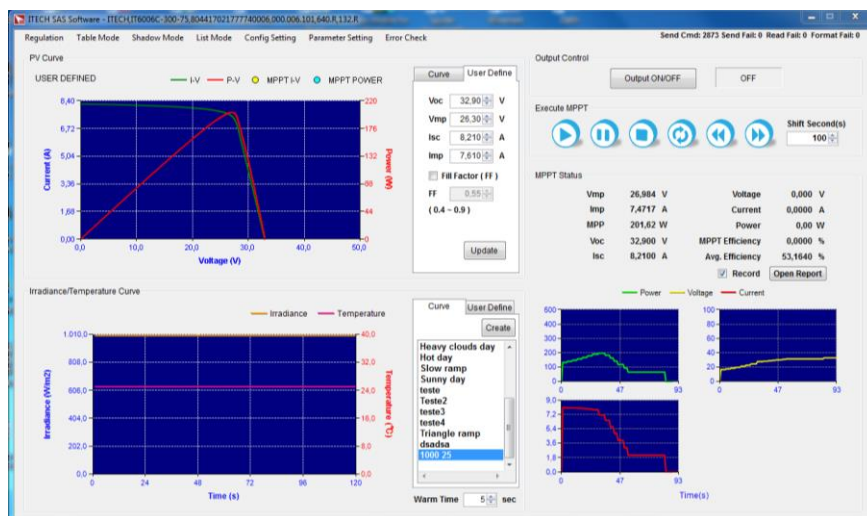
Fonte: Elaboração própria (2024).

5.2 Comparação com emulador comercial

Além das curvas de IV calculadas, verificou-se também desempenho do emulador fotovoltaico de baixo custo desenvolvido em comparação a um emulador vendido comercialmente. Sendo utilizada a fonte de alimentação CC programável bidirecional IT6000C-300-75, da fabricante ITECH, para essa análise.

A fonte em questão possui uma capacidade de entrega máxima de 300 V e 75 A, com potência de até 6 kW. Uma de suas aplicações é o uso como emulador fotovoltaico, utilizando o *software* próprio da marca, mostrado na Figura 34, onde são inseridos os dados de tensão de circuito aberto, corrente de curto circuito e a corrente e tensão de máxima potência. Ainda devem ser inseridos os valores de irradiância e de temperatura, podendo variar de forma automática durante o ensaio. Por fim, antes de iniciar o teste, é escolhido o tempo em que a fonte irá operar como emulador e se os dados medidos devem ser armazenados em formato de planilha.

Figura 34 - Software para uso da fonte IT6000C-300-75 como emulador fotovoltaico

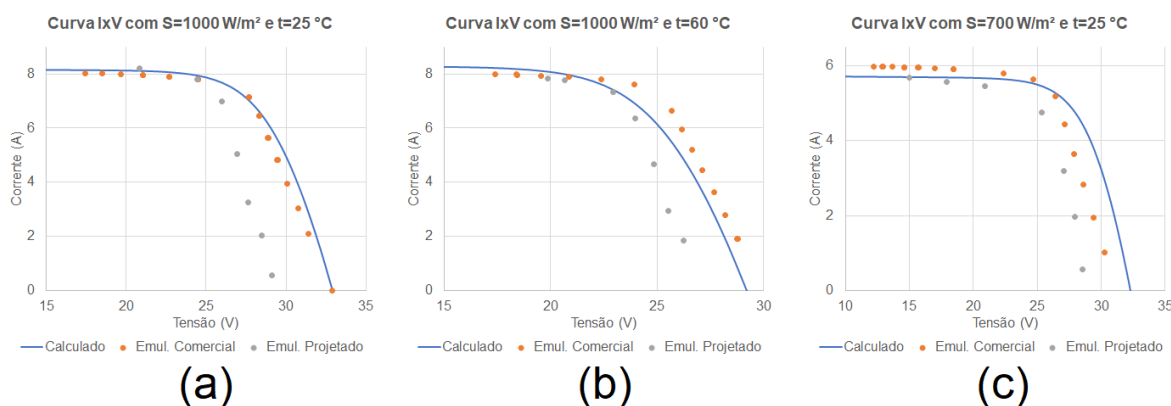


Fonte: Elaboração própria (2024).

É mostrado na figura a comparação entre os pontos de corrente e tensão, estando na cor laranja os pontos resultados do emulador comercial, em cinza as medições feitas no emulador projetado neste trabalho e a curva na cor azul os valores calculados. A Figura 35 (a) mostra uma a comparação nas condições padrão de ensaio, com irradiância de 1000 W/m^2 e 25°C , sendo a curva onde os pontos medidos no emulador comercial mais se aproximam do calculado e o emulador projetado entregando uma tensão abaixo do esperado, como visto anteriormente.

A Figura 35 (b) e a Figura 35 (c), mostram respectivamente as curvas nas condições de $S = 1000 \text{ W/m}^2$, com $t = 60^\circ\text{C}$ e de $S = 700 \text{ W/m}^2$ com temperatura de 25°C . Observa-se que os emuladores reproduzem a curva IV de forma adequada, com o emulador comercial possuindo uma maior precisão.

Figura 35 - Curvas IV de comparação entre o emulador comercial e o projetado, com (a) $S=1000 \text{ W/m}^2$; $t=25^\circ\text{C}$, (b) $S=1000 \text{ W/m}^2$; $t=60^\circ\text{C}$ e (c) $S=700 \text{ W/m}^2$; $t=25^\circ\text{C}$



Fonte: Elaboração própria (2024).

É apresentada no Quadro 10 a comparação entre os pontos de corrente e tensão gerados no emulador fotovoltaico comercial e no emulador fotovoltaico projetado, de forma similar à comparação feita com as curvas calculadas. No entanto, foi necessário aproximar valores de corrente, visto que os dois emuladores não utilizaram os mesmos pontos de valor de corrente. Desta forma, pode-se verificar um comportamento parecido ao visto na comparação anterior, com os pontos em que há uma grande variação de tensão, em uma curta faixa de corrente, resultando nos maiores erros percentuais.

A curva mostrada na Figura 35 (b) é a que apresenta as menores porcentagens de erro, possivelmente devido a uma maior assertividade com os dados inseridos no microcontrolador para a geração da curva nas condições de irradiância de 1000 W/m² e temperatura de 60 °C.

Quadro 10 - Comparação entre tensões medidas no emulador fotovoltaico comercial e no projetado

Irradiância e Temperatura	Corrente (A)	Tensão medida no emulador comercial (V)	Tensão medida emulador projetado (V)	Erro %
1000 W/m ² ; 25°C	8,19	17,45	20,83	19,4%
1000 W/m ² ; 25°C	7,80	24,49	24,42	0,3%
1000 W/m ² ; 25°C	6,98	27,7	25,96	6,3%
1000 W/m ² ; 25°C	5,05	29,46	26,92	8,6%
1000 W/m ² ; 25°C	3,27	30,74	27,64	10,1%
1000 W/m ² ; 25°C	2,03	31,41	28,47	9,4%
1000 W/m ² ; 25°C	0,58	32,89	29,1	11,5%
1000 W/m ² ; 60°C	7,82	20,86	19,89	4,7%
1000 W/m ² ; 60°C	7,76	22,36	20,67	7,6%
1000 W/m ² ; 60°C	7,33	23,92	22,94	4,1%
1000 W/m ² ; 60°C	6,37	25,7	23,96	6,8%
1000 W/m ² ; 60°C	4,66	27,13	24,83	8,5%
1000 W/m ² ; 60°C	2,94	28,21	25,52	9,5%
1000 W/m ² ; 60°C	1,84	28,78	26,25	8,8%
700 W/m ² ; 25°C	5,68	22,38	14,99	33,0%
700 W/m ² ; 25°C	5,56	24,72	17,96	27,3%
700 W/m ² ; 25°C	5,46	26,42	20,92	20,8%
700 W/m ² ; 25°C	4,75	27,13	25,37	6,5%
700 W/m ² ; 25°C	3,19	28,62	27,12	5,2%
700 W/m ² ; 25°C	1,98	29,41	27,92	5,1%
700 W/m ² ; 25°C	0,56	30,27	28,52	5,8%

Fonte: Elaboração própria (2024).

A geração das curvas IV no pelo emulador fotovoltaico projetado também foram prejudicadas devido a presença de ruídos nas placas, possivelmente gerados

após a necessidade de ajustes na placa de comando, como a mudança da forma de fixação dos conectores e a oxidação do cobre da placa de fenolite utilizada. Estes ruídos além de prejudicar a leitura de tensão e corrente, acabavam levando o *driver* isolador do *MOSFET* a entrar no modo de proteção, sendo preciso reiniciar o processo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi desenvolvido um emulador fotovoltaico em escala reduzida com o objetivo de oferecer uma solução econômica para simular as condições de operação de um módulo fotovoltaico. O dispositivo foi projetado para reproduzir com as características dos módulos solares, permitindo a validação de modelos e a análise de sistemas de captação de energia.

A funcionalidade do emulador foi verificada por meio de simulações e testes. As simulações, realizadas com o *software* PSIM, resultaram em valores e formas de onda próximos aos esperados, apresentando diferenças percentuais mínimas em relação aos valores calculados.

No conversor Buck, foram validados o *buffer* para o PWM e o acionamento dos *MOSFETs*, por meio do *driver* isolador, garantindo o correto funcionamento.

Os testes confirmaram que o emulador é capaz de simular as condições reais dos módulos solares, desde que os dados corretos sejam inseridos no programa gravado no microcontrolador e com uma carga capaz de variar conforme dos valores necessários para que sejam adquiridos os valores de corrente e tensão necessários para a plotagem da curva IV.

Apesar de funcional, foram vistas falhas que podem ser corrigidas no futuro para que o processo de emulação seja melhorado. Durante os ensaios houve a necessidade de alteração na forma de conexão entre a placa de potência e placa de comando, devido ao formato anterior ser frágil, com risco de quebra. No entanto, essa mudança fez com que as placas sofressem mais com ruídos, estes que em determinadas ocasiões levavam o *driver* isolador do *MOSFET* a entrar em modo de proteção, necessitando reiniciar o processo de emulação.

Além disso, a utilização do conversor Buck em conjunto com o controlador ATmega328P resultou em uma faixa de operação PWM limitada, o que contribuiu para os erros observados. Essa limitação ocorre devido à significativa queda de tensão no conversor e à restrita faixa de variação do controlador, o que impede a obtenção de pontos de operação mais precisos.

Por fim, o objetivo geral foi atingido, com o emulador sendo desenvolvido, em sua maior parte, de componentes acessíveis e de baixo custo. Além disso, os objetivos específicos também puderam ser alcançados, exceção do último, que foi realizado parcialmente, uma vez que não se chegou a utilizar um módulo fotovoltaico real para obter dados de comparação. Assim, foi possível ir desde os estudos sobre a geração de energia elétrica através de células fotovoltaicas até a comparação do uso com um emulador fotovoltaico comercial.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se para trabalhos futuros as seguintes melhorias:

- a) Atualização para uso de um microcontrolador voltado a controle de sistemas;
- b) Projetar um sistema de controle completo para o emulador;
- c) Automatizar a geração da curva IV;
- d) Adicionar a possibilidade de ajuste dinâmico dos valores de irradiância e de temperatura;
- e) Realizar testes em inversores e em cargas eletrônicas.
- f) Utilizar uma forma mais eficaz e robusta de ligação entre as placas de potência e de comando;
- g) Desenvolver um *driver* isolador de *MOSFET* próprio, integrado com a placa.
- h) Projetar um conversor CC-CC isolado, com saída de menor tensão, que otimize a variação de ciclo de trabalho na faixa de tensão do módulo fotovoltaico a ser emulado.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA**. 2024. Disponível em:
<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzd kNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5Yz AxAzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 05 ago. 2024.

ATMEL. **ATmega328P**: 8-bit avr microcontroller with 32k bytes in-system programmable flash. ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash. 2015. Disponível em:
https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf. Acesso em: 05 ago. 2024.

AYOP, Razman; TAN, Chee Wei. **A comprehensive review on photovoltaic emulator**. Renewable And Sustainable Energy Reviews, Skudai, v. 80, p. 430-452, dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.217>. Acesso em: 20 maio 2023.

BARBI, Ivo. **PROJETOS de FONTES CHAVEADAS**. 3. ed. Florianópolis: 2014. 304 p.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência**. 6. ed. Florianópolis: 2006. 315 p.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Electronic Devices and Circuit Theory**. 11. ed. [S. L.]: Pearson Education, 2012. 944 p. ISBN 978-0-13-262226-4.

BRASIL. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2022 – ano base 2021**. 2022. Disponível em:
https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. Acesso em: 30 abr. 2023.

CASARO, Marcio Mendes; MARTINS, Denizar Cruz. **Modelo De Arranjo Fotovoltaico Destinado A Análises Em Eletrônica De Potência Via Simulação**. Eletrônica de Potência, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 141–146, 2008. DOI: 10.18618/REP.2008.3.141146. Disponível em:
<https://journal.sobraep.org.br/index.php/rep/article/view/714>. Acesso em: 13 aug. 2024.

COELHO, Roberto Francisco. **ESTUDO DOS CONVERSORES BUCK E BOOST APLICADOS AO RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS**. 2008. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91051>. Acesso em: 05 ago. 2024.

GIL, Antônio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017. 192 p.

HART, Daniel W.. **Power Electronics**. Valparaíso, Indiana: McGraw-Hill, 2010. 496 p. ISBN 9780073380674.

INMETRO. **PORTARIA Nº 140, DE 21 DE MARÇO DE 2022**. 122 p. Disponível em: <http://sistema-sil.inmetro.gov.br/rtac/RTAC002957.pdf>. Acesso em: 27 maio 2023.

KYOCERA. **KC200GT**: high efficiency multicrystal photovoltaic module. Disponível em: <https://www.energymatters.com.au/images/kyocera/KC200GT.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2024.

LATHI, B.P.; NASHELSKY, Louis. **Principles of LINEAR SYSTEMS and SIGNALS**. 2. ed. Nova Délhi: Oxford University Press, 2009. 992 p.

LIMA, Charles Borges de; VILLAÇA, Marco V. M.. **AVR e Arduino Técnicas de Projeto**. 2. ed. Florianópolis: Ed. dos Autores, 2012. 632 p.

LEM. **Current Transducer LTS 25-NP**. 2022. Disponível em: <https://www.farnell.com/datasheets/1683366.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2024.

LEM. **Voltage Transducer LV 25-P**. 2021. Disponível em: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lv_25-p.pdf. Acesso em: 05 ago. 2024.

OLIVEIRA, Ramon Albino de. **ESTUDOS E MEDIÇÕES DA EFICIÊNCIA DE INVERSORES DE PEQUENO E MÉDIO PORTE PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**. 2019. 64 f. Monografia (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/34525/1/Estudos%20e%20medi%C3%A7%C3%B5es%20da%20efici%C3%Aancia%20de%20inversores%20de%20pequeno%20e%20m%C3%A9dio%20porte%20para%20aplica%C3%A7%C3%A3o%20em%20sistemas%20fotovoltaicos.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2024.

PERLIN, John. **From Space to Earth**: the story of solar electricity. Cambridge: Harvard University Press, 2002. 240 p. ISBN 0-674-01013-2.

RIBEIRO, Wesley Venancio et al. Comparação entre topologias de painel solar artificial para teste de inversores fotovoltaicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7, 2018, Gramado. **Anais [...]** Gramado: 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/287/287>. Acesso em: 27 maio 2023.

SOUZA FILHO, Idomeneu Gomes de. **Diodos e dispositivos fotovoltaicos flexíveis**. 2019. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais da

Universidade, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. Disponível em: doi:10.11606/T.18.2019.tde-06082019-111003. Acesso em: 22 abr. 2024.

SUPPLIER. **Drivers para Transistores de Potência**: DRO100S25A - Driver Isolado Simples. 2012. Disponível em: http://www.supplier.ind.br/produtos_img/dro100s25a_11012016112313.pdf. Acesso em: 05 ago. 2024.

VALLÊRA, António M.; BRITO, Miguel Centeno. MEIO SÉCULO DE HISTÓRIA FOTOVOLTAICA. **Gazeta de Física**, Lisboa, v. 111, n. 111, p. 111-111, nov. 2011. Disponível em: <https://www.spf.pt/magazines/GFIS/76/article/472/pdf>. Acesso em: 05 ago. 2024.

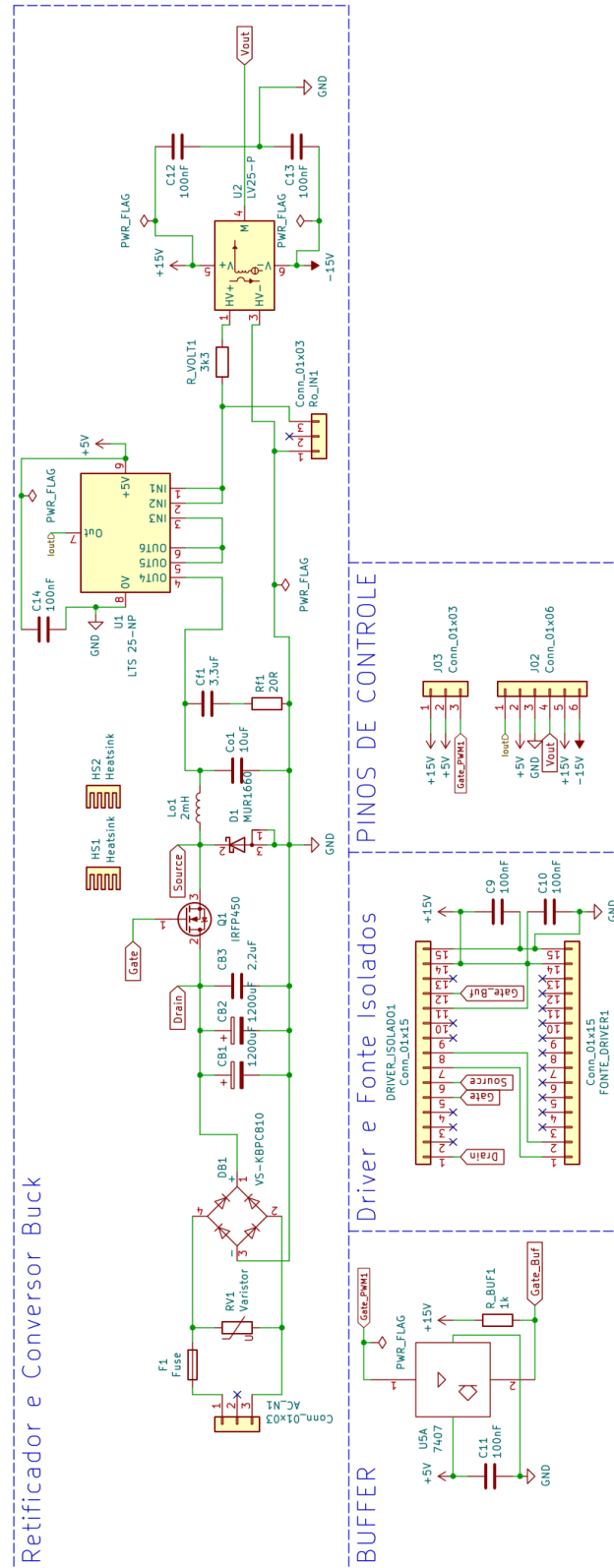
VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia Solar Fotovoltaica**: conceitos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Érica, 2018.

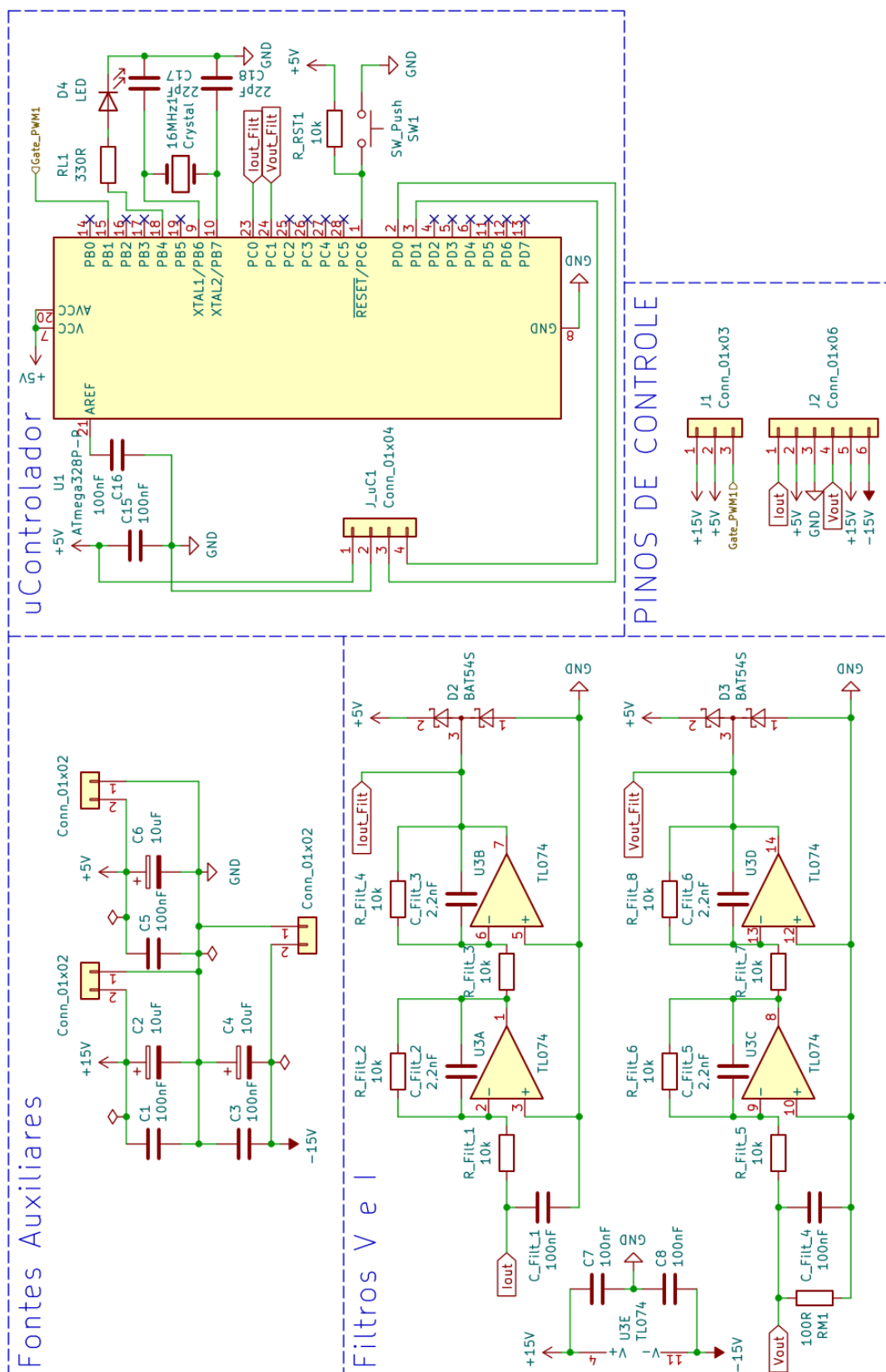
VISHAY SILICONIX. **IRFP450**: power mosfet. Power MOSFET. 2022. Disponível em: <https://www.vishay.com/docs/91233/91233.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2024.

YANGZHOU YANGJIE ELECTRONIC TECHNOLOGY CO., LTD.. **MUR1660CT**: Ultra-Fast Recovery Diodes 8A*2 FRED. 2022. Disponível em: <https://www.21yangjie.com/pdf/ztqj/ckfhejg/MUR1660CT.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2024.

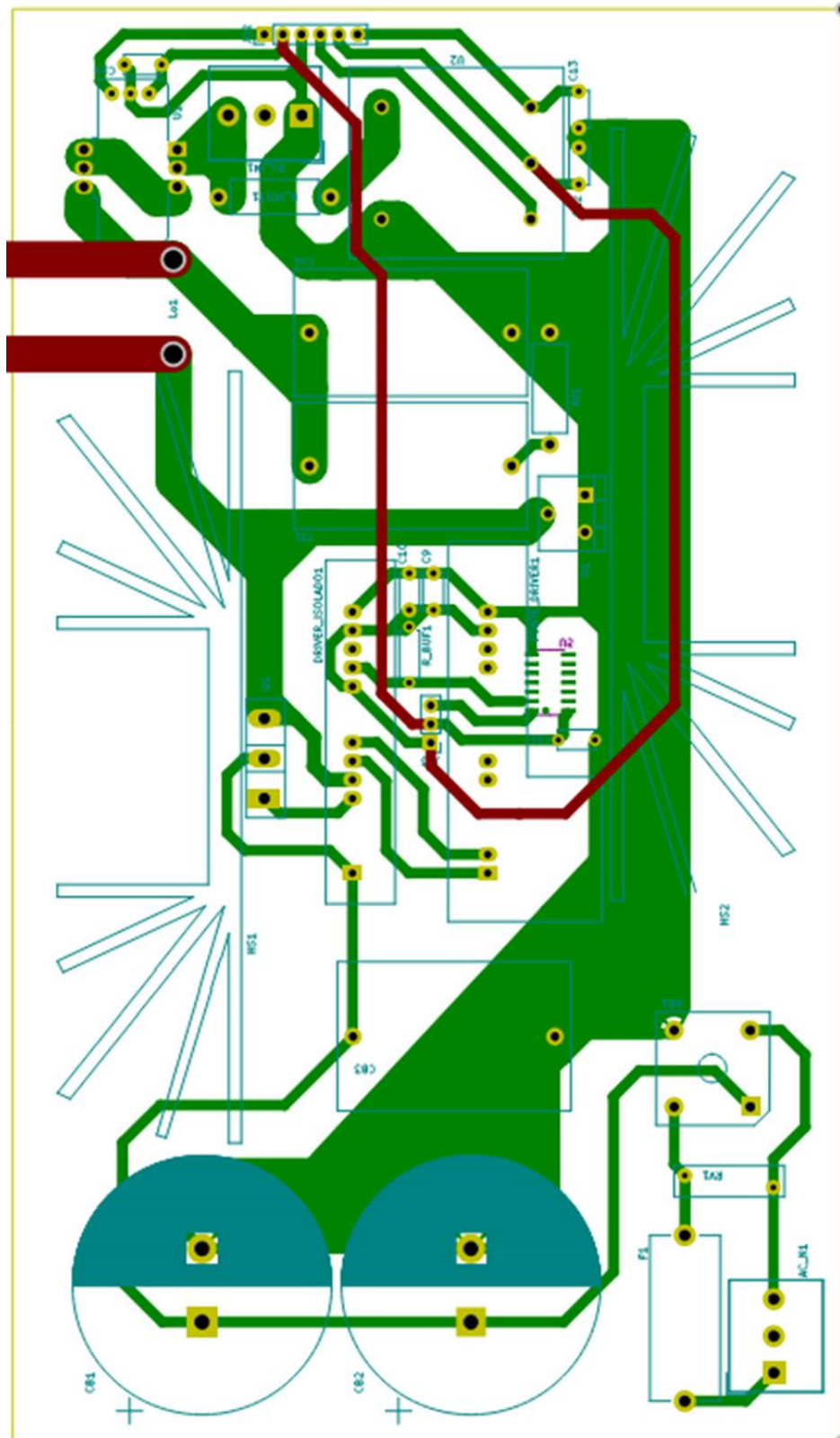
APÊNDICES

APÊNDICE A – Esquema elétrico completo da placa de potência





APÊNDICE C – Projeto da placa de circuito impresso da parte de potência



APÊNDICE D – Projeto da placa de circuito impresso da parte de comando

