



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JULIANA CARVALHO DE ALENCAR

**SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ALIMENTAR ELETRODOMÉSTICOS DE UMA
COZINHA COMUNITÁRIA**

FORTALEZA

2022

JULIANA CARVALHO DE ALENCAR

SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ALIMENTAR ELETRODOMÉSTICOS DE UMA
COZINHA COMUNITÁRIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. René Pastor Tor-
rico Bascope

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A353s Alencar, Juliana Carvalho de.

Sistema fotovoltaico para alimentar eletrodomésticos de uma cozinha comunitária / Juliana Carvalho de Alencar. – 2022.

107 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. René Pastor Torrico Bascopé.

1. Sistema fotovoltaico autônomo. 2. Energia solar. 3. Conversor CC-CC. 4. Cozinha comunitária. I. Título.

CDD 621.3

JULIANA CARVALHO DE ALENCAR

SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ALIMENTAR ELETRODOMÉSTICOS DE UMA
COZINHA COMUNITÁRIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. René Pastor Torrico Bascopé (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Dalton de Araújo Honório
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Me. José Willamy Medeiros de Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha mãe, Marisa, meu irmão, Carlos, e
minha querida avó, dona Mundica, sem os quais
eu não teria chegado até aqui.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. René Bascopé pela excelente orientação, por todo o conhecimento pacientemente repassado a mim com muita atenção e pela confiança que me foi dada. Com certeza, é um dos professores mais dedicados e competentes que já conheci.

Aos meus amigos Emanuel Mota, Vinícius Vasconcelos, Lucca Costa e Ranieri Paulino, alunos de graduação do curso de engenharia elétrica da UFC, pela amizade e ajuda direta na elaboração do projeto proposto neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Dalton Honório pela atenção e o suporte dado durante todo o período de execução deste trabalho, além dos esclarecimentos e incentivos para a carreira acadêmica.

À minha fiel amiga de infância, Eng. Raquel Rocha, pela amizade e por todas as vezes em que me ajudou com dificuldades que tive durante o curso.

À minha grande amiga, M.a Rayanne Moreira, por ser uma amiga tão prestativa e que trouxe tantas contribuições na minha vida pessoal e acadêmica.

Ao meu namorado Victor Teixeira, pela parceria e por me incentivar e apoiar tanto na minha vida acadêmica.

Ao meu amigo Wesley Barata por todo o auxílio e atenção que me deu desde o início do período de graduação.

Aos meus amigos Ilana Guedes, Gladson Renato, Sarah Guimarães, Davi Veras e Marcos Eugêncio, pela amizade, pela ajuda nas disciplinas do curso e pelos ótimos momentos que me proporcionaram que, com certeza, deixaram meu período de graduação mais leve e descontraído.

Ao meu amigo Juan Porto por toda a ajuda e apoio desde que entrei para engenharia.

Ao Prof. Dr. Demercil Souza pelos ensinamentos e atenção durante a orientação dada no período de Bolsa de Monitoria do DEE-UFC.

Ao Doutorando Willamy Araújo pela atenção e contribuição dada durante os testes de bancada realizados no Laboratório GPEC do DEE-UFC.

À secretária do DEE-UFC, M.a Adely Ribeiro, pelo auxílio e paciência dados desde que me tornei aluna do departamento.

Ao Doutorando em Engenharia Elétrica, Ednardo Moreira Rodrigues, e seu assistente, Alan Batista de Oliveira, aluno de graduação em Engenharia Elétrica, pela adequação do *template* utilizado neste trabalho para que o mesmo ficasse de acordo com as normas da biblioteca da Universidade Federal do Ceará (UFC).

"Estou entre aqueles que acham que a ciência tem uma grande beleza."

(Marie Curie)

RESUMO

Tendo em vista as adversidades encontradas por inúmeras pessoas para o cozimento de alimentos, devido questões econômicas, levando ao aumento do uso de lenha e outros combustíveis prejudiciais à sua saúde e ao meio ambiente, o presente trabalho visa propor um sistema de processamento fotovoltaico voltado para alimentar eletrodomésticos de uso culinário, no intuito de ser utilizado em cozinhas comunitárias. O sistema proposto não apresenta baterias de armazenamento de energia, devido a necessidade de um conversor adicional para controlar sua recarga e descarga. A ideia é aproveitar a energia fotovoltaica diretamente enquanto houver radiação solar disponível. O sistema é composto por dois estágios de processamento de energia elétrica, onde o primeiro estágio é um conversor CC-CC *Boost*, responsável por condicionar a tensão de entrada correspondente a quatro módulos fotovoltaicos em série com tensão variando entre 100 V a 160 V para conseguir uma tensão regulada no barramento CC de 250 V, que alimenta o segundo estágio formado por um inversor ponte completa com modulação assimétrica que proporciona uma tensão alternada de três níveis e valor de 220 V eficazes. A potência nominal de saída é de 2 kW, sendo suficiente para alimentar diferentes tipos de eletrodomésticos voltados para o preparo de alimentos.

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico autônomo. Conversor CC-CC. Energia solar. Cozinha comunitária.

ABSTRACT

Considering the adversities encountered by countless people for cooking food, due to economic issues, leading to the increase in the use of firewood and other fuels harmful to their health and the environment, the present work aims to propose a photovoltaic processing system to supply household appliances for culinary use, in order to be used in community kitchens. The proposed system does not have energy storage batteries, due to the need for an additional converter to control its charging and discharging. The idea is to take advantage of photovoltaic energy directly as long as solar radiation is available. It is composed of two stages of electrical energy processing, where the first stage is a DC-DC Boost converter, responsible for conditioning the input voltage from four photovoltaic modules in series connection with voltage varying between 100 V to 160 V, to achieve a regulated voltage on the DC bus of 250 V, which supplies the second stage is composed by a full bridge inverter with asymmetric modulation that provides an alternating voltage of three levels and a value of 220 Vrms. The rated output power is 2 kW, which is enough to feed different types of appliances intended for food preparation.

Keywords: Autonomous PV system. DC-DC converter. Solar energy. Community kitchens.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil	18
Figura 2 – Potencial de energia fotovoltaica no mundo.	19
Figura 3 – Sistema fotovoltaico instalado em comunidade pelo projeto Ilumina Pantanal.	19
Figura 4 – Concentrador solar sendo utilizado na Índia.	22
Figura 5 – Representação de incidência de raios solares em concentrador solar.	23
Figura 6 – Esquema de sistema fotovoltaico <i>Off-grid</i>	23
Figura 7 – Esquema de sistema fotovoltaico <i>On-grid</i>	24
Figura 8 – Esquema de sistema fotovoltaico Híbrido.	25
Figura 9 – Esquema de sistema fotovoltaico sem uso de baterias	25
Figura 10 – Baterias estacionárias	26
Figura 11 – Princípio de operação de uma célula de bateria.	27
Figura 12 – Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica.	30
Figura 13 – Células fotovoltaicas e módulos(painéis) solares.	32
Figura 14 – Geradores eólicos verticais.	32
Figura 15 – Gerador eólico.	33
Figura 16 – Diagrama de sistema fotovoltaico.	34
Figura 17 – Diagrama de processador de energia fotovoltaica com um estágio de processamento.	35
Figura 18 – Topologia de sistema de processamento fotovoltaico com um estágio.	35
Figura 19 – Diagrama de processador de energia fotovoltaica com dois estágios de processamento.	36
Figura 20 – Topologia de sistema de processamento fotovoltaico com dois estágios.	36
Figura 21 – Diagrama de processador de energia fotovoltaica com três estágios de processamento.	37
Figura 22 – Topologia de sistema de processamento fotovoltaico com três estágios.	38
Figura 23 – Arranjos fotovoltaicos	39
Figura 24 – Formas de onda de tensão e corrente para: (a) cargas lineares, (b) cargas não-lineares.	40
Figura 25 – Painel elétrica de pressão de 800 W: (a) modelo, (b) formas de onda de tensão e corrente.	41
Figura 26 – Sanduicheira de 750 W: (a) modelo, (b) formas de onda de tensão e corrente	41

Figura 27 – Topologia proposta.	42
Figura 28 – Conversor CC-CC <i>Boost</i> : (a) etapas de operação e (b) formas de onda básicas.	46
Figura 29 – Diagrama de blocos do controle por modo corrente média.	50
Figura 30 – Diagrama de blocos da malha de corrente.	57
Figura 31 – Diagrama de Bode de $G_i(s)=iL1/d$: (a) ganho e (b) fase.	59
Figura 32 – Diagrama de Bode de $FTL_{Asci}(s)$: (a) ganho e (b) fase.	59
Figura 33 – Curva de avanço de fase em função do fator K para o compensador Tipo 2	61
Figura 34 – Compensador Tipo 2	62
Figura 35 – Diagrama de Bode do compensador $C_i(s)$: (a) ganho e (b) fase.	63
Figura 36 – Diagrama de Bode de FTL_{Acci} : (a) ganho e (b) fase.	63
Figura 37 – Diagrama de blocos da malha de tensão.	64
Figura 38 – Diagrama de Bode de $FTL_{Asc v}(s)$: (a) ganho e (b) fase.	65
Figura 39 – Curva de avanço de fase em função do fator K para o compensador Tipo 2	66
Figura 40 – Diagrama de Bode do compensador $C_v(s)$: (a) ganho e (b) fase.	67
Figura 41 – Diagrama de Bode de $FTL_{Acc v}(s)$: (a) ganho e (b) fase.	68
Figura 42 – Esquemático simulado no PSIM.	69
Figura 43 – Formas de onda de tensão e corrente: (a) na entrada e (b) na saída.	70
Figura 44 – Corrente através do indutor L1.	71
Figura 45 – Tensão sobre a chave S1.	71
Figura 46 – Corrente através do diodo D1.	72
Figura 47 – Sinais de controle: portadora triangular e moduladora (gráfico superior) e sinal PWM (gráfico inferior).	72
Figura 48 – Sinais de tensão e corrente na saída do conversor <i>Boost</i> durante degrau de carga	73
Figura 49 – Topologia do inversor ponte completa.	76
Figura 50 – Etapas de operação do inversor.	77
Figura 51 – Modulação PWM assimétrica.	78
Figura 52 – Forma de onda quadrada de três níveis.	79
Figura 53 – Esquemático simulado no PSIM.	84
Figura 54 – Sinais de tensão e corrente: (a) na entrada e (b) na saída.	85
Figura 55 – Sinais na chave S2: (a) tensão e (b) corrente.	86
Figura 56 – Sinais de controle das chaves S2-S5	87
Figura 57 – Esquemático simulado no PSIM.	89

Figura 58 – Sinais de tensão e corrente: (a) na entrada, (b) no barramento CC e (c) na saída.	90
Figura 59 – Sinais de tensão e corrente durante degrau de carga: (a) no barramento CC e (b) na saída.	91
Figura 60 – Tensão de entrada e corrente através do indutor em regime transitório de partida.	92
Figura 61 – Esquemático do circuito de potência do conversor CC-CC <i>Boost</i>	93
Figura 62 – Esquemático do circuito de controle do conversor CC-CC <i>Boost</i>	93
Figura 63 – <i>Layout</i> PCB do circuito de potência do conversor CC-CC <i>Boost</i>	94
Figura 64 – <i>Layout</i> PCB do circuito de controle do conversor CC-CC <i>Boost</i>	94
Figura 65 – Circuito completo montado em bancada.	95
Figura 66 – Circuito completo montado em bancada com carga.	95
Figura 67 – Fonte utilizada para emular painéis.	96
Figura 68 – Tensão sobre a chave, S1, e corrente através do indutor, L1.	96
Figura 69 – Tensão e corrente no barramento CC.	97
Figura 70 – Tensão e corrente na saída.	97
Figura 71 – Tensão e corrente de entrada em regime transitório de partida.	98
Figura 72 – Listagem dos componentes comerciais utilizados no circuito de potência do conversor <i>Boost</i>	107
Figura 73 – Listagem dos componentes comerciais utilizados no circuito de controle do conversor <i>Boost</i>	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações de eletrodomésticos.	42
Tabela 2 – Especificações do conversor CC-CC <i>Boost</i>	50
Tabela 3 – Considerações do conversor CC-CC <i>Boost</i>	51
Tabela 4 – Considerações sobre o elemento magnético do indutor.	52
Tabela 5 – Comparação de resultados teóricos e simulados.	73
Tabela 6 – Especificações do inversor ponte completa.	81
Tabela 7 – Comparação de resultados teóricos e simulados.	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC-CA	corrente contínua em corrente alternada
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANP	Agência Nacional de Petróleo
GLP	gás liquefeito de petróleo
ONGs	Organizações Não Governamentais
SCI	<i>Solar Cookers International</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
VRLA	<i>Valve-Regulated Lead-Acid</i>
AGM	<i>Absorbent Glass Mat</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker</i>
MCC	modo de condução contínua
PWM	modulação por largura de pulso
PCB	placa de circuito impresso

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Introdução	20
2.2	Motivação	20
2.3	Programas de Alguns Países para Mitigar a Crise de Pessoas Carentes de Recursos para Comprar Gás de Cozinha	21
2.4	Definição de Sistemas Fotovoltaicos de Energia Elétrica	23
2.4.1	<i>Off-grid</i>	23
2.4.2	<i>On-grid</i>	24
2.4.3	<i>Híbrido</i>	24
2.4.4	<i>Sistema sem bateria</i>	25
2.5	Uso de Baterias de Armazenamento para Sistemas Off-grid	26
2.5.1	<i>Chumbo-ácido estacionárias</i>	26
2.5.2	<i>Lítio-íon</i>	27
2.5.3	<i>Outros</i>	28
2.6	Algumas Energias Elétricas Renováveis	29
2.6.1	<i>Energia fotovoltaica</i>	29
2.6.2	<i>Energia eólico-elétrica</i>	32
2.7	Sistemas de Conversão de Energia Elétrica	34
2.7.1	<i>Um estágio de processamento</i>	34
2.7.2	<i>Dois estágios de processamento</i>	35
2.7.3	<i>Três estágios de processamento</i>	36
2.8	Possíveis Arranjos Fotovoltaicos	38
2.9	Verificação de Cargas em Laboratório Usando Rede Elétrica	40
2.9.1	<i>Levantamento da potência consumida por alguns eletrodomésticos do mercado</i>	41
2.10	Proposta do TCC	42
2.11	Considerações	43
3	PROJETO DO CONVERSOR CC-CC BOOST PROPOSTO	45
3.1	Introdução	45
3.2	Análise Qualitativa	45

3.3	Análise Quantitativa	46
3.3.1	<i>Determinação de esforços de tensão e corrente nos componentes</i>	47
3.4	Estratégia de Controle	49
3.5	Exemplo de Projeto	50
3.5.1	<i>Especificações e considerações de projeto</i>	50
3.5.2	<i>Dimensionamento do circuito de potência</i>	51
3.5.3	<i>Dimensionamento do circuito de controle</i>	57
3.6	Resultados de Simulação	68
3.6.1	<i>Formas de onda em regime permanente</i>	69
3.6.2	<i>Formas de onda em regime transitório com carga linear</i>	73
3.7	Verificação de Resultados Teóricos e Simulados	73
3.8	Considerações	74
4	PROJETO DO INVERSOR PONTE COMPLETA DE ONDA QUADRADA DE TRÊS NÍVEIS	75
4.1	Introdução	75
4.2	Análise Qualitativa	75
4.2.1	<i>Topologia do inversor</i>	75
4.2.2	<i>Princípio de funcionamento</i>	76
4.2.3	<i>Técnica de modulação PWM</i>	77
4.3	Análise Quantitativa	78
4.3.1	<i>Determinação de esforços de tensão e corrente nos componentes</i>	78
4.4	Exemplo de Projeto	81
4.4.1	<i>Especificações e considerações de projeto</i>	81
4.4.2	<i>Dimensionamento do circuito de potência</i>	81
4.4.3	<i>Circuito de controle</i>	83
4.5	Resultados de Simulação	83
4.5.1	<i>Formas de onda em regime permanente</i>	84
4.6	Verificação de Resultados Teóricos e Simulados	87
4.7	Considerações	88
5	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS INTEGRANDO AMBOS OS ESTÁGIOS	89
5.1	Introdução	89

5.2	Resultados de Simulação Integrando Ambos os Estágios de Processamento	89
5.2.1	<i>Formas de onda em regime permanente</i>	90
5.2.2	<i>Formas de onda em regime transitório</i>	91
5.3	Resultados Experimentais Integrando Ambos os Estágios de Processamento	92
5.3.1	<i>Arquitetura integrada mostrando os circuitos de potência e controle</i>	92
5.3.2	<i>Formas de onda em regime permanente com carga</i>	96
5.3.3	<i>Formas de onda em regime transitório com carga</i>	97
5.4	Considerações	98
6	CONCLUSÃO GERAL	99
7	REFERÊNCIAS	101
APÊNDICES		107
	APÊNDICE A – LISTA DE COMPONENTES COMERCIAIS DO CON-	
	VERSOR CC-CC BOOST	107

1 INTRODUÇÃO GERAL

Com a crescente evolução da Eletrônica de Potência no início do século passado, os primeiros módulos fotovoltaicos da forma que se conhece hoje foram desenvolvidos ainda na década de 50 (JONES *et al.*, 2012). O aproveitamento da irradiação solar para geração de energia elétrica foi algo de extrema relevância para as áreas da engenharia elétrica e eletrônica, trazendo, entre outras coisas, economia e praticidade para obtenção dessa energia. Com isso, o desenvolvimento de sistemas de processamento de energia fotovoltaica vem sendo melhorado cada vez mais, com o aprimoramento de conversores de corrente contínua em corrente alternada (CC-CA), também conhecidos como inversores.

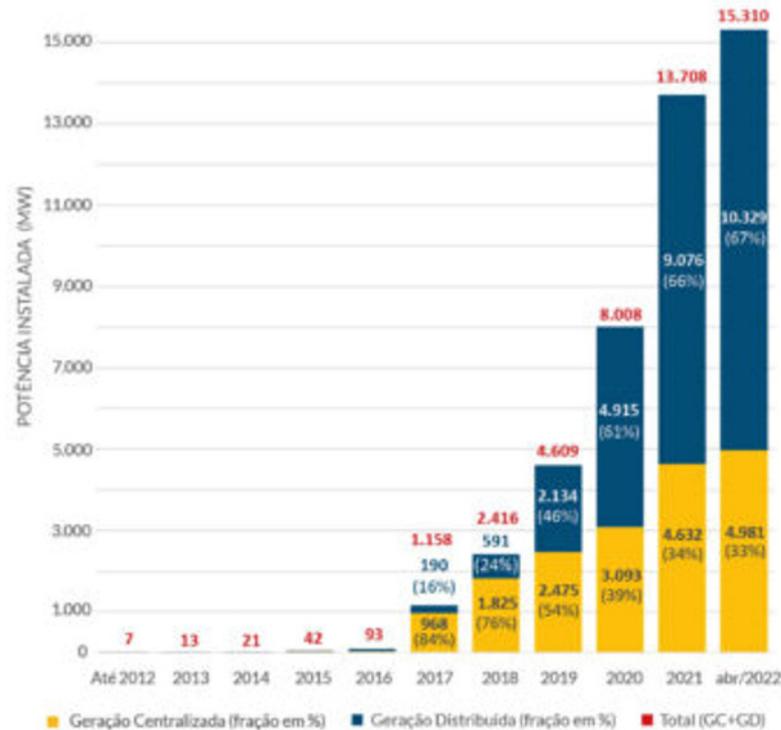
Atualmente, encontra-se no mercado módulos fotovoltaicos com eficiência acima de 20%, o que mostra uma grande evolução em comparação aos primeiros módulos comercializados, os quais possuíam eficiência acima de 4,5% (SOUZA, 2020). Enquanto isso, é possível encontrar inversores comerciais com eficiência próxima a 99%. Portanto, sabendo que esses são os principais componentes de um sistema de processamento fotovoltaico, é nítido que se pode utilizar tais sistemas obtendo um bom aproveitamento geral.

No entanto, sistemas fotovoltaicos ainda não são amplamente utilizados no mundo e o principal fator que contribui para isso são os custos dos equipamentos e da instalação dos mesmos. Apesar de esses valores estarem em constante redução até o início do ano de 2020, no contexto atual de pandemia causada pelo COVID-19, houve o aumento dos custos de instalação de usinas solares, que devem se manter mais elevados ao longo de 2022 e 2023. Contudo, os valores atuais continuam competitivos, já que os preços do gás natural e de outras alternativas de combustíveis fósseis sofreram um aumento ainda mais significativo (IEA, 2022).

Ainda assim, a quantidade de consumidores que utilizam sistemas fotovoltaicos em seus imóveis e indústrias cresce a cada ano. Entre os anos de 2017 e 2021, a energia fotovoltaica utilizada no Brasil, cresceu em torno de 150% ao ano, conforme dados apontados pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR). Além disso, atualmente o país conta com aproximadamente 15,31 GW de potência instalada proveniente de energia fotovoltaica, como pode-se observar no gráfico apresentado na Figura 1, o que representa 7,6% da matriz elétrica brasileira (ABSOLAR, 2022).

Alguns fatores principais explicam esse aumento considerável da instalação de sistemas fotovoltaicos, dentre os quais destacam-se: o aumento dos valores das tarifas cobradas pelas concessionárias de energia elétrica; a crescente busca por redução do uso de combustíveis

Figura 1 – Evolução da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil



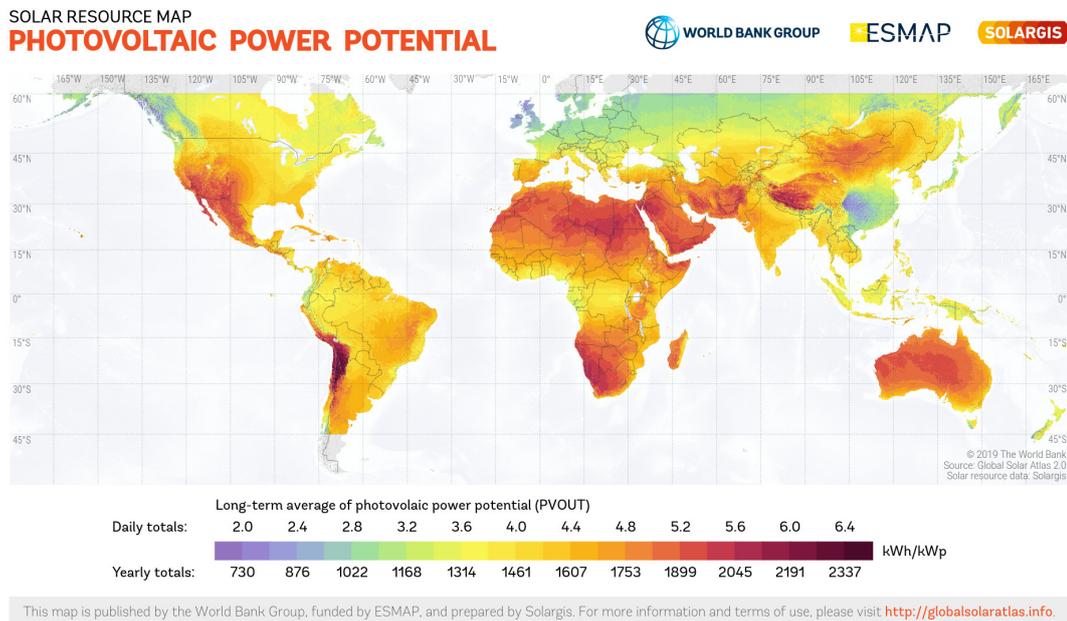
Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2022.

fósseis e o incentivo para maior utilização de fontes alternativas renováveis; bem como, a preocupação com os impactos ambientais causados por alguns tipos de geração de energia elétrica; o aumento da demanda de energia elétrica; e a diminuição dos preços dos componentes de sistemas fotovoltaicos (OTTONELLI *et al.*, 2020)(REN21, 2021).

Um outro fator importante é o alto potencial para energia fotovoltaica encontrado em muitos países, como é possível observar no mapa apresentado na Figura 2. O mapa fornece um resumo do potencial estimado de geração de energia solar fotovoltaica, mostrando valores médios do potencial de produção anual/diária de eletricidade em longo prazo considerando a geração de uma usina de energia solar fotovoltaica conectada à rede de 1 kWp sendo utilizada nas regiões ao redor do mundo (SOLARGIS, 2022).

Devido a sua relativa praticidade de instalação e pouca necessidade de manutenção, a energia fotovoltaica pode ser uma boa opção de fonte de energia para áreas remotas com alta incidência de radiação solar. Podendo ser uma alternativa tanto para agricultores como para população em geral que vivem em comunidades afastadas e que, muitas vezes, possuem pouco ou nenhum acesso a rede elétrica. Nesse contexto, sua utilização pode ser de grande amparo em comunidades carentes, para ajudar a mitigar dificuldades em realizar atividades básicas e necessárias, como, por exemplo, cozinhar alimentos.

Figura 2 – Potencial de energia fotovoltaica no mundo.



Fonte: SOLARGIS, 2022.

No Brasil, diferentes programas sociais envolvendo o uso de energia solar já foram criados e implementados com ajuda do governo, universidades e/ou iniciativa privada. Alguns desses programas são: Projeto Ilumina Pantanal (GRUPO ENERGISA, 2022); Projeto Casa Solar (ABSOLAR, 2017); Mais Luz para a Amazônia (BRASIL, 2022); Projeto Energia Solar para Bombeamento de Água no Semiárido Piauiense (UFPI, 2019), entre outros. Todos esses programas receberam financiamento de governos e/ou empresas privadas para sua elaboração, com o objetivo de trazer melhorias a qualidade de vida de muitas pessoas necessitadas. A Figura 3 mostra uma foto retirada em uma comunidade contemplada com o projeto Ilumina Pantanal.

Figura 3 – Sistema fotovoltaico instalado em comunidade pelo projeto Ilumina Pantanal.



Fonte: ENERGISA, 2022.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Na atualidade, é possível encontrar diversos estudos no âmbito de tecnologias voltadas para o aproveitamento da energia solar fotovoltaica. Com o aumento da procura por esse tipo de fonte de energia renovável, também crescem os investimentos para o desenvolvimento de pesquisas relacionadas a fim de melhorar o desempenho dos equipamentos, além de reduzir custos e dimensões dos mesmos.

Neste capítulo pretende-se esclarecer a motivação para a idealização e implementação do projeto intitulado nesta monografia. Assim como, apresentar modelos e tecnologias já desenvolvidas e bem estudadas que serviram de base para o desenvolvimento de tal projeto. Deste modo, serão explicadas algumas tecnologias relevantes para o meio em questão, bem como, três sistemas de processamento de energia possíveis para a aplicação em estudo e a proposta do TCC sendo descrita ao final.

2.2 Motivação

A situação econômica atual do Brasil, assim como de outros países subdesenvolvidos, é de instabilidade. Especificamente no Brasil, a população vêm enfrentando, também, uma crise energética, ocasionada por uma crise hídrica (ONS, 2021), o que implica em aumento dos custos cobrados pelas concessionárias de energia elétrica. Isso ocorre porque as hidrelétricas são a principal fonte da matriz energética brasileira, portanto, havendo uma escassez de água em seus reservatórios, é necessário recorrer à outras fontes de geração de energia elétrica, menos abundantes e mais caras, como as termoeletricas, o que afeta diretamente a precificação das tarifas utilizadas pelas concessionárias na cobrança de energia.

Um segundo ponto crítico da situação da crise econômica brasileira é o aumento do preço do gás de cozinha, o qual segundo dados da Agência Nacional de Petróleo (ANP), houve um aumento de quase 30% no valor do gás liquefeito de petróleo (GLP) desde o início do ano de 2021 (LIMA, 2021). Tendo em vista que esse é um dos itens mais necessários para o preparo de alimentos no país, o aumento de seu preço representa um grande impacto negativo para o povo brasileiro.

Nesse cenário, presume-se que os cidadãos mais afetados são aqueles com menor

poder aquisitivo. Por conseguinte, formas de mitigar esses problemas, promovendo suporte a essa parcela da população mais afetada, podem servir de medida paliativa. Ao invés da utilização de lenha para o cozimento de alimentos, fontes de energia renováveis poderiam ser mais eficientes e menos danosas a saúde das pessoas e do meio ambiente.

Haja vista o cenário supracitado, é possível vislumbrar um sistema de processamento de energia implementado com menor custo e maior eficiência possíveis a fim de ser aplicado em programas sociais destinados a população mais carente com objetivo de prover auxílio no preparo de alimentos.

Levando em consideração a abundância de radiação solar presente durante a maior parte do ano em todo o território brasileiro, principalmente na região Nordeste, a utilização de energia fotovoltaica para esse projeto se faz mais atrativa dentre as demais opções de energias renováveis disponíveis. Ademais, os preços dos painéis fotovoltaicos sofreram grande redução nos últimos anos, bem como o preço de instalação dos mesmos.

Atualmente existem diversas topologias de conversores CC-CA já estudadas e implementadas (BASCOPÉ *et al.*, 2022)(JAIN *et al.*, 2007)(XIE *et al.*, 2019)(WANG *et al.*, 2016), as quais podem ser adaptadas para que atendam a necessidade que essa aplicação exige, de forma simples e econômica.

2.3 Programas de Alguns Países para Mitigar a Crise de Pessoas Carentes de Recursos para Comprar Gás de Cozinha

Até hoje, alguns programas foram criados em países subdesenvolvidos no intuito de dar suporte e reduzir as consequências advindas de crises econômicas, onde, além da dificuldade de se ter acesso a alimentos, também há o empecilho de conseguir cozinhá-los, já que o preço do gás de cozinha também se torna abusivo em muitos desses países. Destacam-se os programas instituídos na Índia, os quais, muitos, partiram de iniciativas do governo juntamente com universidades, empresas e/ou Organizações Não Governamentais (ONGs) (VITAL BRAZIL *et al.*, 2008). No início da década de 80, o Ministério de Fontes de Energia Novas e Renováveis indiano promoveu, por meio de projetos sociais, o uso de fogões solares em áreas rurais do país, como o *Solar Cooking Subsidy Scheme* (Esquema de Subsídio para Cozimento Solar), os quais funcionam a partir da energia térmica solar. Atualmente a Índia é um país pioneiro no aproveitamento da energia solar, não apenas com a instalação de milhares de concentradores solares, como mostrado na Figura 4, mas, também, de usinas fotovoltaicas (SHAH, 2011).

Figura 4 – Concentrador solar sendo utilizado na Índia.



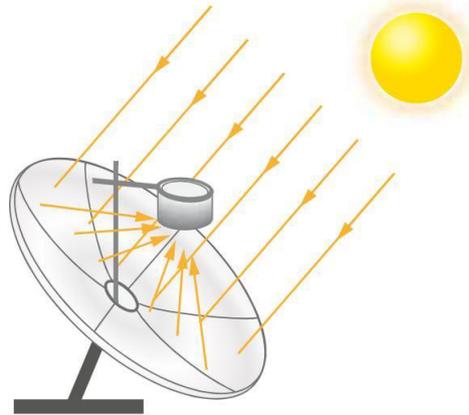
Fonte: SCI, 2021.

Através de projetos desenvolvidos por ONGs milhões de pessoas já foram auxiliadas ao redor do mundo para utilizar formas não poluentes de preparo de alimentos. A exemplo disso, tem-se a *Solar Cookers International* (SCI), a qual vem fornecendo fogões solares para milhares de comunidades carentes em países como Quênia, Senegal, Afeganistão, China, Peru, Bolívia, entre outros (SCI, 2022)(SANTOS, 2016).

Além de contornar a situação problemática ocasionada por crises econômicas, a substituição do uso de lenha contribui para a redução de riscos à saúde dessa população. Segundo o relatório de saúde mundial de 2022 da Organização Mundial da Saúde (OMS), cerca de 2,6 bilhões de pessoas utilizam tecnologias poluentes e pouco eficientes para cozinhar alimentos. O relatório também mostra que, anualmente, milhões de pessoas morrem de forma prematura devido a poluição doméstica, na maioria das vezes causada durante o preparo de alimentos na utilização de lenha, querosene, carvão, entre outros combustíveis poluentes (OMS, 2022) (FIOCRUZ, 2022). É possível concluir que a necessidade de ações rápidas e eficientes para contornar esse problema se faz urgente, e mais programas com essa finalidade podem trazer grande contribuição.

Apesar de concentradores solares possuírem uma tecnologia simples e de fácil implementação, ela pode não ser a mais eficiente e eficaz para substituir o uso de lenha. Esse tipo de fogão solar exige muito cuidado no manuseio, já que há o risco de obter queimaduras devido as altas temperaturas resultantes da concentração de raios solares no local onde se posiciona a panela no concentrador, o que pode ser observado na Figura 5. Diante disso, a energia fotovoltaica pode ser uma maneira mais segura e eficaz para tal aplicação, apesar de ter um custo mais alto.

Figura 5 – Representação de incidência de raios solares em concentrador solar.



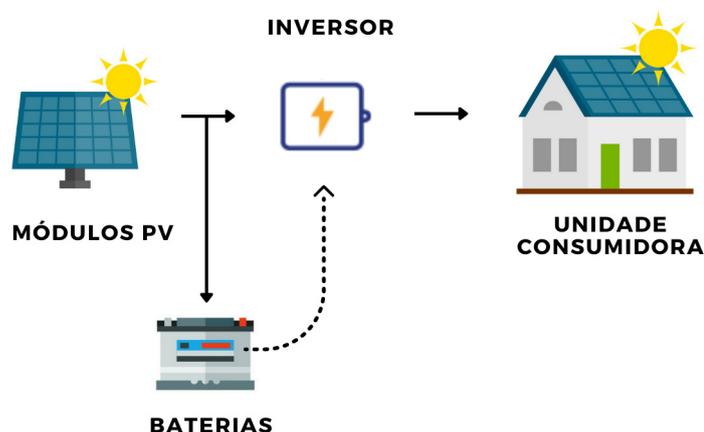
Fonte: BRAINLY, 2021.

2.4 Definição de Sistemas Fotovoltaicos de Energia Elétrica

2.4.1 *Off-grid*

Sistemas Fotovoltaicos *Off-grid* não possuem conexão com a rede elétrica, ou seja, são isolados do sistema de distribuição da concessionária de energia local, como mostrado no esquema da Figura 6. Em resumo, a energia elétrica proveniente desse tipo de sistema é diretamente utilizada para alimentar cargas presentes no local em que se encontra instalado. A produção de energia excedente é armazenada em baterias, com a utilização de um controlador de carga, e podendo ser aproveitada em momentos com pouca ou nenhuma incidência de radiação solar.

Figura 6 – Esquema de sistema fotovoltaico *Off-grid*.



Fonte: O próprio autor.

2.4.2 *On-grid*

Ao contrário dos sistemas citados na seção anterior, sistemas fotovoltaicos *On-grid* são conectados com a rede elétrica, como apresenta a Figura 7. Dessa forma, a energia elétrica produzida é parte utilizada para alimentar as cargas presentes no local da instalação, e o excedente é injetado na rede elétrica da concessionária, podendo ser utilizada em outro momento em forma de créditos na fatura de energia elétrica ou mesmo ser transferida para um outro local desejado. Portanto, não há necessidade de utilização de baterias para esse tipo de sistema.

Figura 7 – Esquema de sistema fotovoltaico *On-grid*.

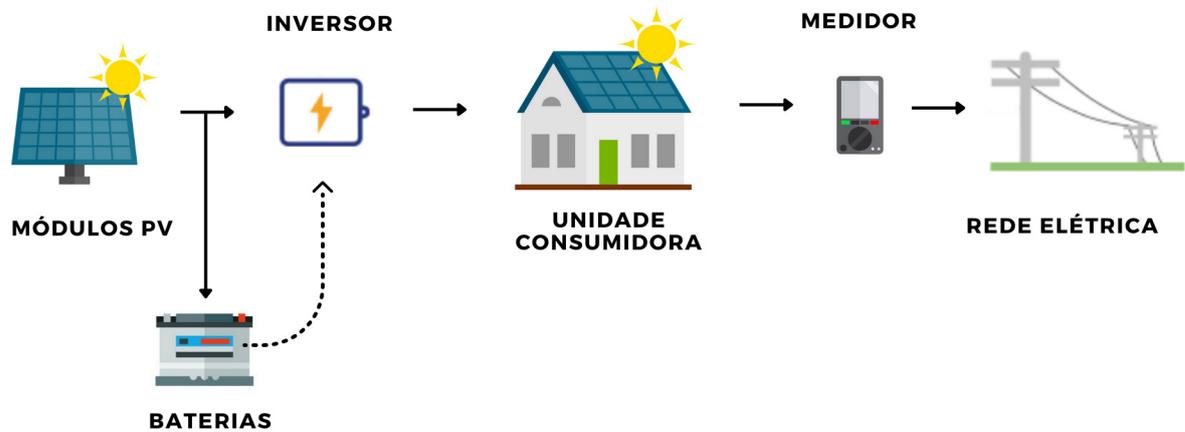


Fonte: O próprio autor.

2.4.3 *Híbrido*

Um sistema fotovoltaico híbrido, basicamente, é a junção dos sistemas *Off-grid* e *On-grid* (Figura 8). Na utilização de tais sistemas tem-se uma conexão com a rede elétrica integrada a um sistema de armazenamento de energia. Com isso, tem a capacidade de fornecer energia elétrica mesmo em momentos de falhas na rede e, até mesmo, funcionar em períodos sem radiação solar.

Figura 8 – Esquema de sistema fotovoltaico Híbrido.

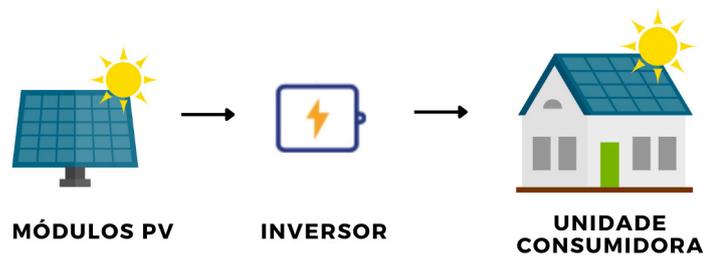


Fonte: O próprio autor.

2.4.4 Sistema sem bateria

É possível, também, utilizar um sistema fotovoltaico sem conexão com a rede elétrica e sem armazenamento em banco de baterias, como mostra a Figura 9. Nesse caso, o sistema só pode operar em períodos com luz solar e a energia gerada é instantaneamente aproveitada para alimentar cargas a serem utilizadas naquele momento. Normalmente, esse tipo de sistema é usado em aplicações como bombeamento de água, cozimento de alimentos, passadeira de roupa a vapor, etc.

Figura 9 – Esquema de sistema fotovoltaico sem uso de baterias



Fonte: O próprio autor.

2.5 Uso de Baterias de Armazenamento para Sistemas Off-grid

Baterias podem ser utilizadas para armazenamento da energia gerada por sistemas fotovoltaicos autônomos. Essa energia pode ser aproveitada em momentos de pouca ou nenhuma incidência de radiação solar, ou mesmo em situações nas quais a potência demandada pelas cargas é superior a potência fornecida pelos módulos fotovoltaicos.

As baterias mais convenientes para essa finalidade são as classificadas como secundárias e do tipo estacionárias, que possuem como principal característica ciclos de descargas profundas, onde são capazes de fornecer uma quantidade de corrente constante por longos períodos, e serem recarregáveis, assim, alguns exemplos estão mostrados na Figura 10.

Figura 10 – Baterias estacionárias



Fonte: Adaptado pelo autor ¹.

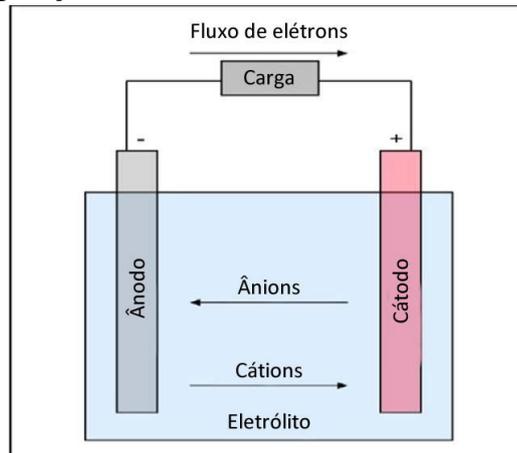
2.5.1 Chumbo-ácido estacionárias

As baterias de chumbo-ácido são o tipo mais antigo e mais comum de baterias recarregáveis (BRIVIO, 2017). São constituídas por células, contendo um eletrodo positivo e outro negativo, e eletrólito. Os eletrodos normalmente são compostos por chumbo e dióxido de chumbo, enquanto o eletrólito é uma solução de ácido sulfúrico diluído em água. Dessa forma, a partir de reações químicas que ocorrem entre eletrodos e eletrólito, cargas são geradas e armazenadas, assim, surgindo uma diferença de potencial. A Figura 11 apresenta um esquema básico de uma célula de chumbo-ácido alimentando uma carga.

Comercialmente são encontrados três tipos de bateria de chumbo-ácido: inundadas, e as *Valve-Regulated Lead-Acid* (VRLA), que podem ser do tipo VRLA Gel ou VRLA AGM.

¹ Imagens retiradas dos sites da Freedom, Unipower e Secpower (2022).

Figura 11 – Princípio de operação de uma célula de bateria.



Fonte: Adaptado de BISWAS *et al*, 2013.

No caso das inundadas, também conhecidas como ventiladas, em seu processo de reação eletroquímica há a emissão de gases que podem gerar corrosão, como oxigênio e hidrogênio, sendo jogados no ambiente. Além disso, necessitam de reabastecimento periódico de água e ácido sulfúrico, e possuem uma vida útil entre 15 e 20 anos (DEMETINO, 2014)(MCCLUER, 2011).

Por outro lado, as baterias reguladas por válvula, VRLA, possuem uma tecnologia que controla os gases gerados durante as reações eletroquímicas, onde os mesmos se recombinam gerando água. Portanto, essas baterias não emitem gases corrosivos e não têm a necessidade de adição de água periodicamente. Como não há liberação de gases, a pressão interna dentro delas é maior, por isso existe a utilização de uma válvula para controlar a pressão em uma faixa segura.

O eletrólito presente em baterias VRLA pode ser em forma de gel, VRLA Gel, ou líquido com a utilização de separadores, VRLA AGM, no processo conhecido como *Absorbent Glass Mat* (AGM). Em ambas as formas, os gases migram entre os eletrodos das células, dessa maneira, não sendo expelidos da bateria. Ademais, possuem vida útil de três a cinco anos para descargas leves (MCCLUER, 2011).

2.5.2 *Lítio-íon*

Baterias lítio-íon são, atualmente, o tipo de de bateria estacionária secundária mais promissoras, sendo responsáveis por cerca de 92% da capacidade de armazenamento global em 2020 (REN21, 2021). Isso ocorre devido sua maior durabilidade, menores tamanho e peso, maior capacidade de armazenamento de energia e maior vida útil em relação aos outros tipos de

baterias citados anteriormente. Em contrapartida, possuem um custo elevado em comparação com os demais tipos de baterias estacionárias. As mesmas são compostas por células constituídas de um eletrodo positivo, um eletrodo negativo e eletrólito em seu interior, com a presença de um separador poroso, o qual tem função de absorver o eletrólito permitindo a passagem apenas de íons de lítio entre os eletrodos e atuando também como isolante eletrônico.

O princípio de funcionamento dessas baterias é baseado em um fenômeno conhecido como intercalação iônica, onde, durante o processo de carga, os íons lítio se deslocam do eletrodo negativo em direção ao eletrodo positivo, fazendo com que o eletrodo negativo perca elétrons, gerando corrente elétrica. Já no processo de descarga, ocorre o inverso, os íons se deslocam do eletrodo positivo para o negativo, liberando elétrons nesse momento, ocasionando na passagem de corrente elétrica (FALQUETO, 2017).

Existem diferentes variações desse tipo de bateria, com diferentes combinações com os íons de Lítio. Algumas delas são: Óxido de Lítio Cobalto; Óxido Lítio Manganês; Fosfato de Ferro Lítio; Titanato de Lítio, entre outras.

2.5.3 Outros

Além das baterias citadas nos itens anteriores, existem hoje no mercado algumas outras opções de baterias estacionárias recarregáveis, sendo menos utilizadas. Tem-se como exemplo a bateria de Níquel Cádmio, a qual possui uma tecnologia antiga, com uma densidade de energia relativamente baixa e é utilizada em aplicações onde se requer vida útil longa, alta corrente de descarga e baixo custo. Se armazenada em condições favoráveis pode chegar a 1000 ciclos de carga e descarga. Contudo, possuem metais tóxicos e não podem ser descartadas no meio ambiente, além de uma alta taxa de autodescarregamento e se faz necessário um carregamento periódico (MICHELINE, 2017)(STA, 2017).

Outro exemplo, é a bateria de Níquel-Metal Hidreto que possui até 100% a mais de densidade de energia em comparação com de Níquel Cádmio, no entanto, podem ter uma autodescarga até 50% mais rápida em relação a mesma. Tem sua vida útil muito reduzida com descargas profundas, com seu desempenho deteriorado após 200 a 300 ciclos, além de possuírem um alto preço no mercado. Apesar disso, não apresentam metais tóxicos, sendo mais seguras para o meio ambiente (STA, 2017). Sua utilização é muito comum em aparelhos portáteis eletroeletrônicos.

2.6 Algumas Energias Elétricas Renováveis

Com a recorrente redução do uso de combustíveis fósseis, a obtenção de energia elétrica a partir de fontes de energias renováveis cresce a cada ano. Em 2020, mais de 80% de toda a nova capacidade de eletricidade adicionada foi obtida a partir de energias renováveis (IRENA, 2021).

Dentre as energias renováveis exploradas até o momento, a fotovoltaica e a eólica se destacam sendo as mais amplamente aplicadas no mundo. No ano de 2020, a potência instalada proveniente de fontes de energias renováveis no mundo atingiu o valor de 2.799 GW, onde cerca de 50% desse valor é resultante da utilização de energia eólica e fotovoltaica (IRENA, 2021).

2.6.1 Energia fotovoltaica

Essa energia se caracteriza pelo aproveitamento da energia vinda do Sol a partir da utilização de módulos fotovoltaicos, os quais tem a capacidade de aproveitar a radiação solar para gerar corrente elétrica. Um módulo é composto por várias células de material semicondutor, comumente silício (Si) dopado, onde ocorre o processo conhecido como efeito fotovoltaico.

a) Efeito fotovoltaico:

O efeito fotovoltaico acontece quando fótons da energia solar atingem a superfície do material semicondutor, excitando seus elétrons e gerando uma movimentação ordenada dos mesmos. O material semicondutor presente em células fotovoltaicas deve ter passado por processo de dopagem, que consiste na adição de átomos de impurezas em uma quantidade predeterminada, obtendo-se um material extrínseco, a fim de se atingir as propriedades elétricas necessárias para geração de corrente elétrica.

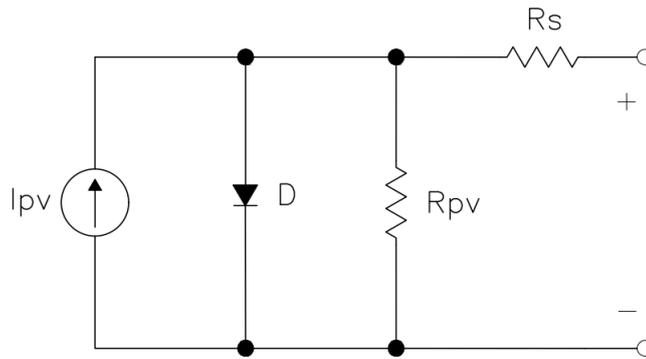
É possível obter dois tipos de materiais extrínsecos, tipo *n*, no qual existe um excesso de elétrons, e tipo *p*, onde há uma ausência de elétrons. Portanto, materiais tipo *n* caracterizam-se por possuírem elétrons como portadores majoritários e lacunas como portadores minoritários, enquanto em materiais do tipo *p* a lacuna é o portador majoritário e o elétron, o portador minoritário. Utilizando-se os dois tipos de materiais, e com a presença de um *gap* ou camada de depleção entre eles, obtém-se uma junção *p-n*. Dessa forma, quando o material com excesso de elétrons for excitado por fótons, acarretará no deslocamento de elétrons em direção ao material

com maior presença de lacunas, e, assim, gerando uma corrente elétrica (BOYLESTAD, 2013).

b) Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica:

Uma célula fotovoltaica pode ser representada por um circuito elétrico como mostrado na topologia da Figura 12. Essa topologia é composta por uma fonte de corrente (I_{pv}) na entrada, representando a corrente gerada pelo efeito fotovoltaico; um diodo (D), sendo equivalente a junção *p-n* citada anteriormente; uma resistência (R_{pv}), que representa a resistência do material semiconductor devido as impurezas presentes; e uma resistência (R_s), representando as possíveis perdas do circuito (LACERDA *et al*, 2010).

Figura 12 – Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica.



Fonte: O próprio autor.

Por análise das malhas do circuito da Figura 12 chega-se no equacionamento do modelo elétrico da célula fotovoltaica, expressão (2.1).

$$I_s = I_{pv} - I_p \cdot \left[e^{\frac{V + I_s \cdot R_s}{n \cdot k \cdot T / q}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_s \cdot R_s}{R_p} \quad (2.1)$$

Onde:

I_{pv}, V_{pv} : tensão e corrente nos terminais de saída de uma célula fotovoltaica;

I_{ph} : fotocorrente;

I_p : corrente de saturação reversa da célula;

q : Carga do elétron, $1,6 \times 10^{-19}$ C;

n : fator de qualidade da junção p-n;

k : Constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23}$ J/K;

T : temperatura ambiente, K.

Tem-se que I_{pv} e I_p são termos dependentes da temperatura e da radiação solar, e são dados pela equações (2.2) e (2.3) (SOBREIRA, 2011)(LACERDA *et al.*, 2010).

$$I_{pv}(T, G) = I_{pv,0} - K_1 \cdot (T - T_0) \cdot \frac{G}{G_0} \quad (2.2)$$

$$I_p = I_{p,0} - \left(\frac{T}{T_0}\right)^3 \cdot e^{\frac{q \cdot E_g}{n \cdot k}} \cdot \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \quad (2.3)$$

Em que:

$I_{p,0}$: Corrente de saturação reversa nominal;

K_1 : Coeficiente de temperatura;

G : Radiação solar;

G_0 : Radiação solar nominal;

T_0 : Temperatura nominal;

E_g : Gap de energia do dispositivo.

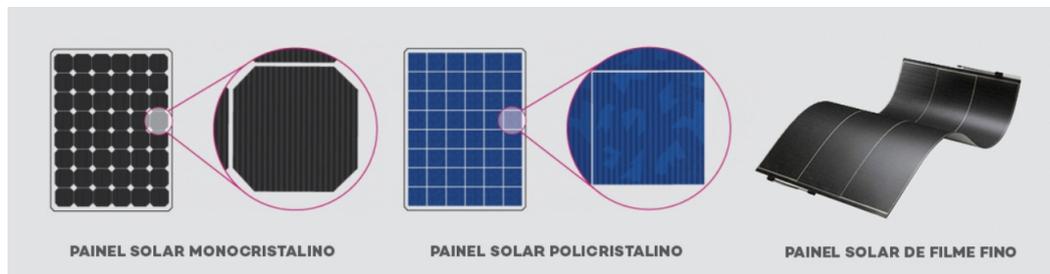
A partir desse modelo matemático é possível reproduzir adequadamente o comportamento elétrico da geração de energia a partir de módulos fotovoltaicos, como demonstrado em (SOBREIRA, 2011).

A partir de uma célula fotovoltaica se alcançam potências muito baixas, na faixa de 2 W. Para formar um módulo fotovoltaico, células fotovoltaicas são conectadas entre si, em ligações série e paralelo, a fim de obter uma tensão e uma corrente com valores suficientes para atingir uma capacidade relevante de geração de energia (BERWANGER, 2019)(SEGUEL, 2009).

Os principais materiais utilizados na fabricação de células fotovoltaicas são o silício monocristalino (m-Si); o silício policristalino (p-Si); e os filmes finos, como o CIGS (cobre-índio-gálio-selênio) (TONIN, 2017). Módulos compostos por silício são os mais encontrados no mercado atualmente, sendo as células policristalinas a partir de um bloco composto de muitos pequenos cristais de silício, por isso é chamado de policristalino, esse bloco é fatiado em lâminas e dopado, ficando em um formato final quadrado. Enquanto os módulos formados de material monocristalino, possuem células fabricadas a partir de um único cristal de silício, que também é fatiado e dopado, e são caracterizadas por possuir cortes em seus cantos, ficando em uma

forma octogonal, além disso têm maior eficiência (FADIGAS, 2019). A Figura 13 mostra uma representação das células descritas e sua associação, formando módulos fotovoltaicos.

Figura 13 – Células fotovoltaicas e módulos(painéis) solares.



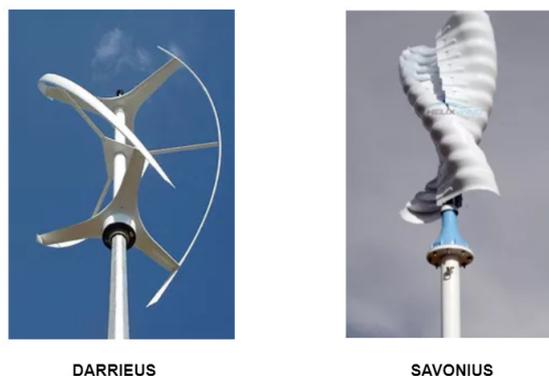
Fonte: NEOSOLAR, 2022.

2.6.2 Energia eólico-elétrica

Diferentemente da energia fotovoltaica, a energia eólica, em resumo, é obtida a partir do aproveitamento direto da energia cinética proveniente dos ventos, sendo convertida em energia mecânica que aciona um rotor conectado a outros equipamentos, sendo capazes de transformar essa energia em energia elétrica. Os geradores eólicos podem ser de dois tipos: vertical e horizontal.

Geradores eólicos verticais são indicadas para áreas urbanas, por poderem ser de pequeno porte e apresentam um melhor comportamento quando submetidas a ventos turbulentos, que são causados por obstáculos na área ao redor, como prédios e árvores. Em contrapartida possuem menor desempenho em comparação com os geradores de eixo horizontal. Existem três tipos principais de aerogeradores verticais: Darrieus, Savonius e Darrieus-Savonius, sendo os dois primeiros mais utilizados e estão representados na Figura 14.

Figura 14 – Geradores eólicos verticais.



Fonte: EÓLICA FÁCIL, 2022.

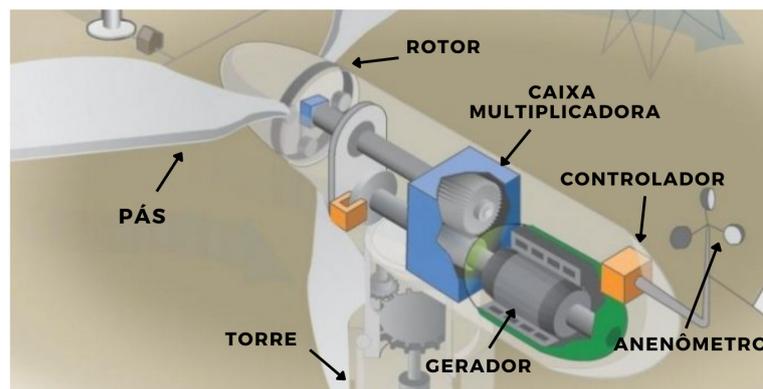
Por outro lado, aerogeradores horizontais usualmente possuem grande porte em relação aos verticais, mas também podem ter pequeno porte, além de maior eficiência e maior custo. Esse tipo de gerador é muito utilizado em regiões distantes de grandes cidades, longe de prédios ou árvores, podendo ser instalado tanto em terra (*On-shore*) ou em mar (*Off-shore*).

A estrutura básica de um gerador eólico horizontal é composta por:

- Pás: com formatos aerodinâmicos, são responsáveis por captar a energia cinética dos ventos e transformar em energia mecânica;
- Rotor: localizado na parte frontal das pás, é o elemento responsável por transferir a energia mecânica das pás para o eixo central do gerador;
- Nacele: compartimento alocaado no alto da torre que comporta os principais equipamentos para a geração, como caixa multiplicadora, conversores e sistema de controle;
- Torre: estrutura de sustentação do gerador, com uma altura que permita que as pás capturem o movimento dos ventos com maior eficiência;
- Gerador: responsável pela conversão de energia mecânica em energia elétrica.
- Anemômetro: coleta dados importantes a serem lidos pelo sistema de controle implementado, como intensidade, velocidade e direção do vento.

A Figura 15, representa a estrutura básica de um gerador eólico indicando alguns dos componentes de sua estrutura básica.

Figura 15 – Gerador eólico.



Fonte: Adaptado de Portal Energia Energias Renováveis, 2016.

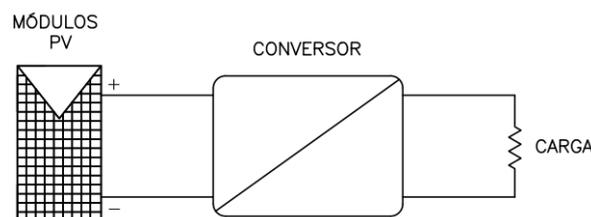
Assim como ocorre com a energia elétrica gerada pelo efeito fotovoltaico, a eletricidade obtida com a energia eólica pode ser utilizada diretamente para alimentar cargas, ser injetada na rede da concessionária elétrica e/ou ser armazenada em banco de baterias para ser

aproveitada posteriormente.

2.7 Sistemas de Conversão de Energia Elétrica

A estrutura básica de um sistema de processamento fotovoltaico autônomo é composta por três elementos: o arranjo de módulos fotovoltaicos (PV), o processador de energia elétrica (conversor(es)) e a carga a ser alimentada, como mostra a Figura 16. O elemento de processamento de energia elétrica pode ser composto por um ou mais conversores, sendo cada um considerado um estágio de processamento. Um maior número de estágios pode ocasionar na diminuição da eficiência total do sistema (SOBREIRA, 2011), tendo em vista a maior quantidade de elementos de potência, o que ocasiona mais perdas.

Figura 16 – Diagrama de sistema fotovoltaico.



Fonte: O próprio autor.

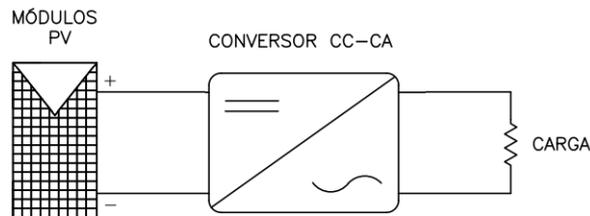
Grande parte dos eletrodomésticos com a finalidade de cozinhar alimentos tem comportamento de carga linear, devido sua característica de converter a energia elétrica em calor. Dessa maneira, para fins de estudos, podem ser considerados como uma carga resistiva, como será apresentado nos exemplos discutidos nos próximos subtópicos.

2.7.1 Um estágio de processamento

Com apenas um estágio de processamento é possível obter uma tensão senoidal de saída do sistema com um valor eficaz que seja capaz de alimentar um eletrodoméstico. Para isso, é necessária a utilização de um conversor que desempenhe a função de um inversor, transformando um sinal contínuo em sua entrada em um sinal alternado em sua saída, como apresentado na Figura 17. O valor de tensão proveniente dos módulos, o qual é a entrada do lado CC do conversor, deve ser de acordo com o necessário para se obter a tensão de saída desejada, lado CA.

Portanto, nesse caso, o arranjo de módulos fotovoltaicos a ser utilizado deve realizar a soma das tensões de cada módulo, de forma a atingir o valor intencionado, já que essa tensão é aplicada diretamente ao estágio inversor.

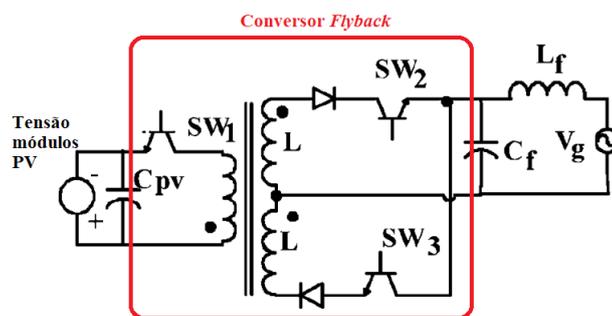
Figura 17 – Diagrama de processador de energia fotovoltaica com um estágio de processamento.



Fonte: O próprio autor.

A Figura 18 apresenta um exemplo de circuito aplicado em sistemas fotovoltaicos proposto por (JAIN *et al*, 2007). A topologia que desempenhará o papel de converter o sinal contínuo em alternado é baseada na configuração do conversor *Flyback*, a qual recebe a tensão gerada pelos módulos em sua entrada, enquanto sua saída é responsável por alimentar a carga.

Figura 18 – Topologia de sistema de processamento fotovoltaico com um estágio.



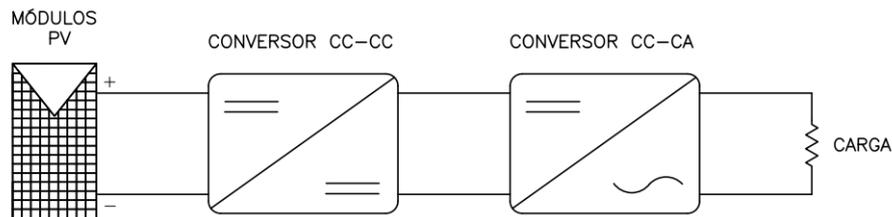
Fonte: Fonte: Adaptado de JAIN *et al*, 2007.

2.7.2 Dois estágios de processamento

Na adição de mais um estágio de processamento, a tensão dos módulos pode ser aplicada primeiramente em um conversor CC-CC, usualmente um conversor com característica elevadora, com o objetivo de se aumentar essa tensão antes que ela seja direcionada ao segundo estágio de processamento, um inversor. Dessa maneira, é possível usar um arranjo de módulos

que ocasionem uma soma de tensões de menor valor, já que tal valor será aumentado pelo ganho do primeiro estágio de processamento. Um esquema que exemplifica tal sistema está apresentado na Figura 19.

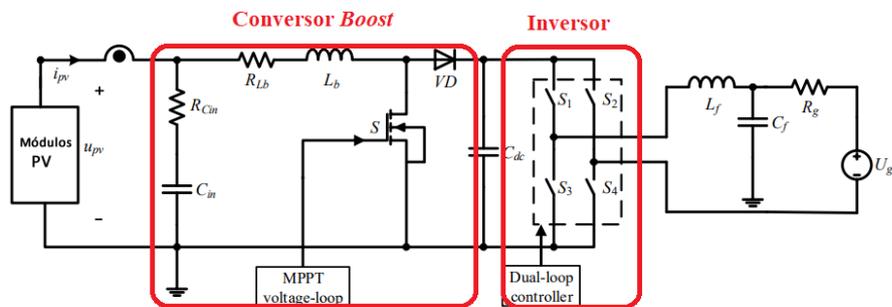
Figura 19 – Diagrama de processador de energia fotovoltaica com dois estágios de processamento.



Fonte: O próprio autor.

Em (XIE *et al*, 2019) foi proposta uma topologia composta por dois estágios de processamento de energia fotovoltaica, como apresentado na Figura 20. Verifica-se a utilização de um conversor CC-CC *Boost* no primeiro estágio e de um Inversor no segundo estágio.

Figura 20 – Topologia de sistema de processamento fotovoltaico com dois estágios.



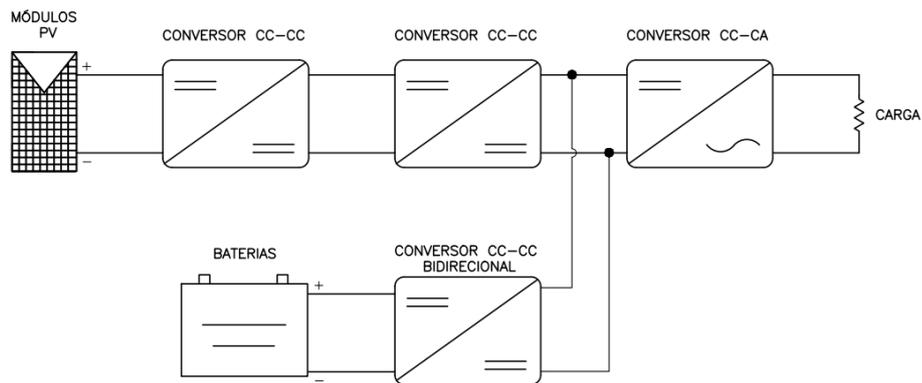
Fonte: Adaptado de XIE *et al*, 2019

2.7.3 Três estágios de processamento

Usualmente, três estágios de processamento de energia podem ser utilizados em sistemas fotovoltaicos, tanto *On-grid* como autônomos, no intuito de se obter um *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) eficiente e adicionar um sistema de armazenamento da energia elétrica gerada, sendo capaz de realizar o carregamento e descarregamento de baterias (SOBREIRA, 2011).

Na Figura 21 tem-se uma representação dos três estágios e a adição do conversor CC-CC bidirecional responsável por processar a energia armazenada em baterias. Com isso, nos momentos em que há geração de energia em excesso, esse conversor irá transferir a energia para as baterias, e quando a geração for insuficiente, o mesmo conversor irá transferir a energia armazenada nas baterias diretamente para o estágio inversor.

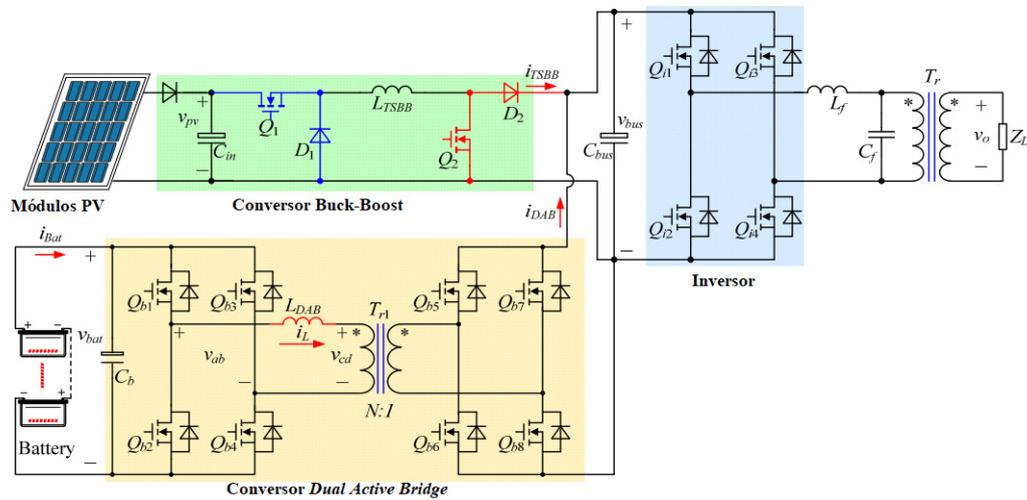
Figura 21 – Diagrama de processador de energia fotovoltaica com três estágios de processamento.



Fonte: O próprio autor.

Como exemplo encontrado na literatura tem-se o circuito mostrado na Figura 22 proposto por (WANG *et al.*, 2016). O mesmo é composto por um conversor *Buck*, seguido de um conversor *Boost* e, por fim, um inversor, os quais definem os três estágios de processamento entre módulos e carga. Enquanto isso, no trecho entre baterias e carga, pode-se observar dois estágios, compostos pelo conversor *Dual Active Bridge* e o inversor.

Figura 22 – Topologia de sistema de processamento fotovoltaico com três estágios.



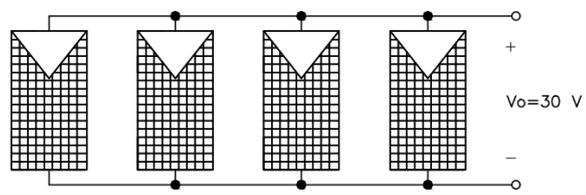
Fonte: Adaptado de WANG *et al*, 2016

2.8 Possíveis Arranjos Fotovoltaicos

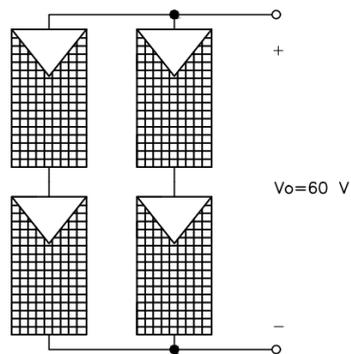
Os módulos fotovoltaicos podem ser conectados entre si em ligação série, paralela ou ambas. Para que se obtenha na saída do processador fotovoltaico uma tensão de aproximadamente 220 Vrms (tensão de alimentação para diversas cargas em diferentes estados do Brasil), é interessante que a tensão de entrada do primeiro estágio de processamento não seja muito baixa para que o conversor não precise de um ganho elevado, acima de 0,8, por exemplo. Portanto, os módulos devem ser arrançados de forma a alcançar uma tensão na faixa desejada, sendo pensados para atingir a tensão de entrada necessária do processador de energia fotovoltaica.

A Figura 23 indica a representação de três possíveis arranjos de módulos fotovoltaicos. Tomando como exemplo módulos com tensão máxima de operação de 30 V, observa-se que na Figura 23(a), onde todos os módulos estão ligados em paralelo, a tensão obtida na saída dos mesmos seria de 30V. Enquanto que na Figura23(b), onde existe um paralelo de duas séries contendo dois módulos, a tensão resultante seria de 60 V. Já na Figura 23(c), existem quatro módulos em série, obtendo-se uma tensão máxima de 120 V.

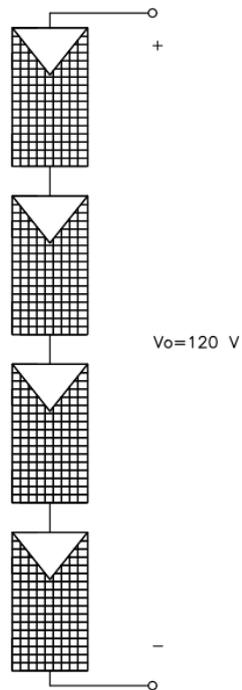
Figura 23 – Arranjos fotovoltaicos



(a)



(b)



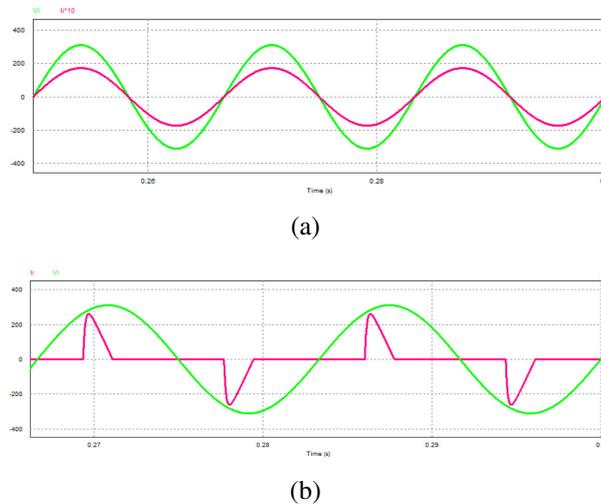
(c)

Fonte: O próprio autor.

2.9 Verificação de Cargas em Laboratório Usando Rede Elétrica

Cargas não-lineares se caracterizam por conduzir uma corrente com alto conteúdo harmônico, além de se encontrar defasada em relação a tensão sobre a carga. Enquanto cargas lineares possuem corrente em fase com a tensão e pouco ou nenhum conteúdo harmônico. Os gráficos da Figura 24 exemplificam esse comportamento da tensão e corrente para os dois tipos de carga.

Figura 24 – Formas de onda de tensão e corrente para: (a) cargas lineares, (b) cargas não-lineares.

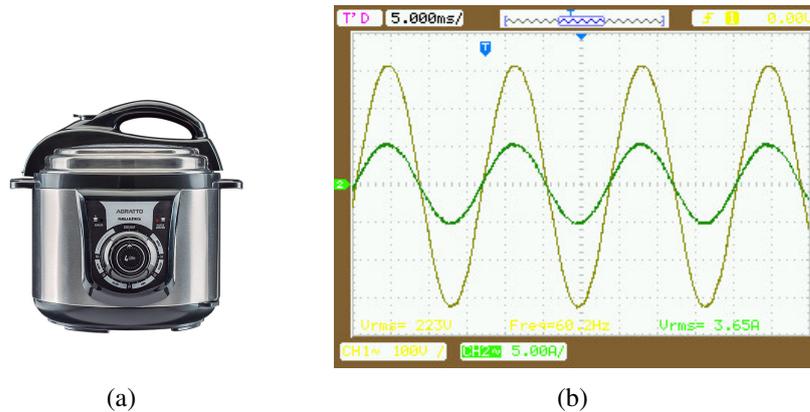


Fonte: O próprio autor.

Como mencionado anteriormente, muitos eletrodomésticos voltados para o uso culinário tem característica de carga resistiva devido sua finalidade de aquecer alimentos. A fim de verificar tal comportamento de forma prática, uma panela de pressão elétrica e uma sanduicheira foram testadas em laboratório para que suas formas de onda pudessem ser observadas.

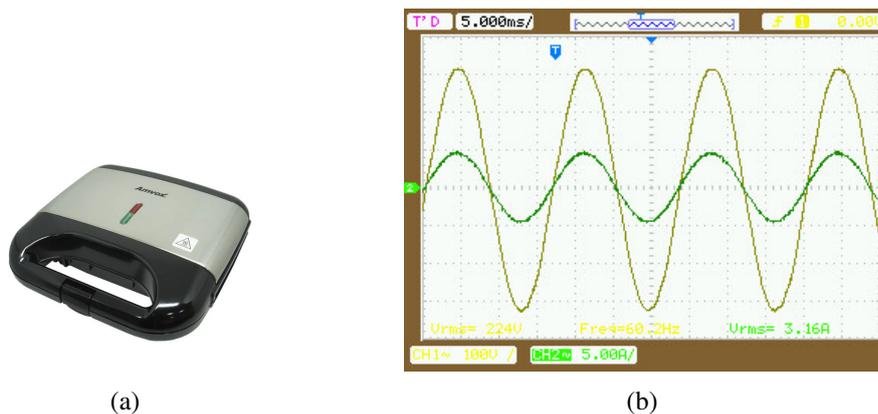
Os eletrodomésticos em questão foram alimentados com tensão fornecida pela rede elétrica, e, com o auxílio de um osciloscópio, as formas de onda de tensão e corrente na carga foram colhidas, como pode-se observar nas Figuras 25 e 26. Nota-se que, para ambas as cargas testadas, a tensão e a corrente estão em fase e a corrente possui característica de carga linear.

Figura 25 – Painel elétrico de pressão de 800 W: (a) modelo, (b) formas de onda de tensão e corrente.



Fonte: O próprio autor.

Figura 26 – Sanduicheira de 750 W: (a) modelo, (b) formas de onda de tensão e corrente



Fonte: O próprio autor.

2.9.1 Levantamento da potência consumida por alguns eletrodomésticos do mercado

Atualmente, são encontrados diversos modelos de aparelhos eletrodomésticos voltados para uso culinário. Tais aparelhos apresentam a vantagem de poderem ser alimentados com fontes de energia limpa. É importante ter conhecimento das potências consumidas pelos eletrodomésticos utilizados no preparo de alimentos mais habituais, como arroz, feijão, carne, entre outros, a fim de se fazer um estudo das fontes de energia mais viáveis para seu acionamento. Na Tabela 1 estão apresentadas as principais informações de tais equipamentos eletrônicos, alimentados em 220 V_{rms}, além da potência ativa consumida.

Observa-se que com uma potência de 1500 W é possível alimentar diferentes tipos de eletrodomésticos de cozinha, com capacidades distintas. Dessa forma, conclui-se que com um sistema de processamento de energia que forneça uma potência de até 2000 W pode-se conseguir

Tabela 1 – Informações de eletrodomésticos.

Eletrodoméstico	Capacidade (L)	Marca	Potência (W)	Referência (site)
Panela elétrica	4	Philco	1200	Mercado Livre
Panela elétrica de arroz	1,8	Electrolux	630	Magazine Luiza
Panela elétrica de pressão	4	Agratto	800	Mercado Livre
Fritadeira elétrica sem óleo	3,5	Mondial	1500	Magazine Luiza
Sanduicheira	-	Britânia	750	Extra
Chaleira elétrica	1,8	Agratto	1500	Amazon

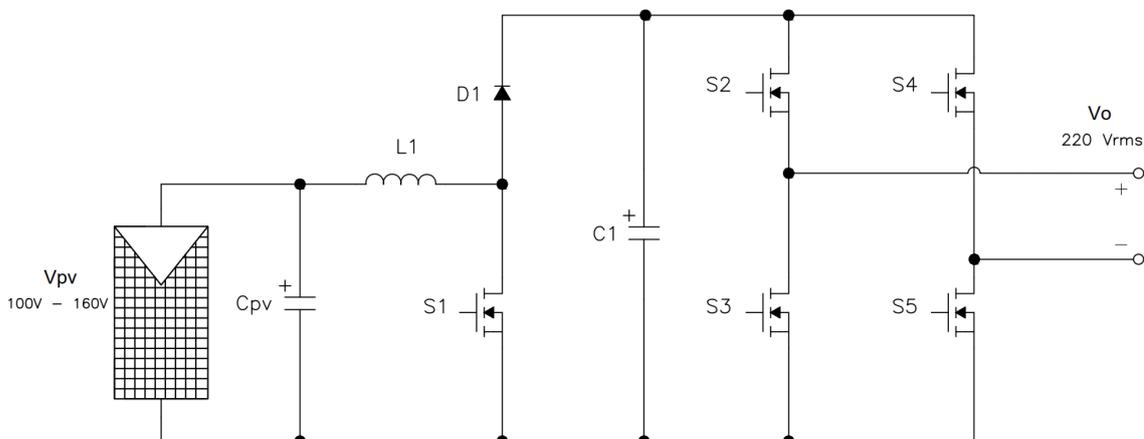
Fonte: Dados coletados de *sites da internet*.

com facilidade o cozimento de alimentos básicos, feitos em panelas elétricas de pressão, por exemplo.

2.10 Proposta do TCC

O projeto proposto por este trabalho de conclusão de curso envolve a análise, o dimensionamento e a implementação de um sistema de processamento fotovoltaico, composto por dois estágios, de baixo custo com a finalidade de ser aplicado em cozinhas comunitárias. A Figura 27 apresenta a topologia escolhida para o estudo. Observa-se que o primeiro estágio de processamento é composto por um conversor CC-CC *Boost* e o segundo estágio, por um conversor CC-CA em ponte (inversor).

Figura 27 – Topologia proposta.



Fonte: O próprio autor.

No primeiro estágio a fonte de alimentação principal é formada por *strings* de quatro painéis fotovoltaicos associados em série e um capacitor eletrolítico (C_{pv}) em paralelo para proporcionar a característica de fonte de tensão (V_i); indutor de armazenamento (L_1); chave controlada (S_1); diodo de transferência (D_1) e capacitor (C_1) no barramento CC funcionando como fonte de tensão. O segundo estágio é constituído por quatro chaves controladas (S_2 - S_5) e a carga representado por R_o .

A aplicação em cozinhas comunitárias foi pensada devido aos fatores discutidos nos itens 2.2 e 2.3 deste trabalho. Essa seria uma forma de aproveitar o potencial energético vindo da radiação solar existente no Brasil para contribuir na melhora da qualidade de vida de pessoas que vivem em situações degradantes.

2.11 Considerações

O presente capítulo discutiu assuntos relacionados ao projeto proposto nesta monografia, como os motivos que levaram a escolha do projeto, apresentação de diferentes tecnologias encontradas na atualidade que podem fazer parte ou trazer contribuições para sua implementação, além de apontar trabalhos já existentes que remetem a tais tecnologias.

Primeiramente, é possível concluir a urgência e necessidade de programas sociais que visem auxiliar pessoas em situação de instabilidade financeira, ou mesmo de pobreza extrema, no preparo de alimentos. Os dados citados mostram que milhões de pessoas ao redor do mundo utilizam lenha e outras maneiras poluentes para a cocção de refeições, o que representa grande risco a saúde e ao meio ambiente (OMS, 2022)(FIOCRUZ, 2022).

Outrossim, nota-se que existem tecnologias com grande potencial para serem aplicadas em tais programas sociais, se forem adaptadas com o objetivo de se conseguir um menor custo e boa eficiência. Nesse sentido, o uso de baterias para armazenamento de energia diverge de tal objetivo, devido seus altos preços e vida útil relativamente baixa. Enquanto isso, a geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos demonstra melhor possibilidade de uso para essa aplicação em relação a sistemas de energia eólica, haja vista questões abordadas como custo de instalação e manutenção.

Além disso, levando em consideração as potências ativas necessárias para o funcionamento de eletrodomésticos culinários, é nítido que um sistema dimensionado para potências relativamente baixas é suficiente para suprir o uso de mais de um desses equipamentos. Consequentemente, um sistema de processamento fotovoltaico simples e pouco robusto pode ser

vislumbrado para a aplicação almejada.

Por fim, percebe-se a viabilidade e as vantagens de se implementar a topologia proposta, composta por apenas dois estágios de processamento, resultando em menores perdas e descartando, inicialmente, o uso de baterias, já que um sistema de armazenamento poderia ser incorporado a essa topologia, sem grandes dificuldades. Dessa maneira, no caso da redução de preços de baterias estacionárias, fazendo com que a utilização das mesmas seja mais viável, em um futuro próximo, poderiam ser adicionadas ao sistema proposto.

3 PROJETO DO CONVERSOR CC-CC *BOOST* PROPOSTO

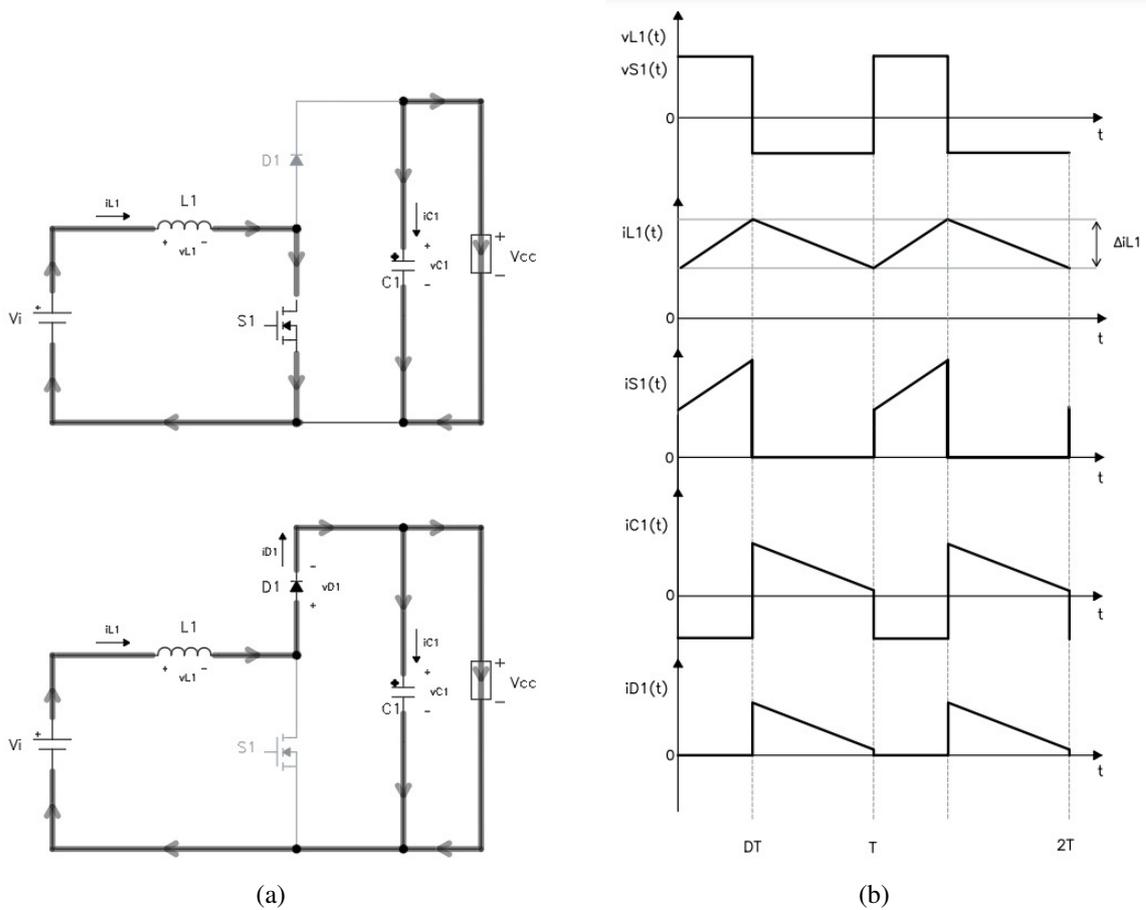
3.1 Introdução

A fim de se definir um sistema de processamento de energia fotovoltaica com melhor eficiência global, melhores respostas ao sistema de controle e melhor custo benefício alcançados com sua implementação, é necessário fazer a análise do desempenho e dos valores teóricos e simulados obtidos com seu estudo. O presente capítulo expõe detalhadamente os estudos para o primeiro estágio de processamento de energia, sendo um conversor CC-CC *Boost*, apresentando as análises qualitativa e quantitativa, exemplo de projeto e resultados de simulação para o mesmo.

3.2 Análise Qualitativa

O conversor CC-CC *Boost* utilizado no estágio elevador do processador de energia elétrica proposto deve operar em modo de condução contínua (MCC) sendo controlado por corrente com modulação por largura de pulso (PWM). O mesmo apresenta como características: fonte de corrente na entrada; fonte de tensão na saída; e a tensão de saída maior que a tensão de entrada. Os arranjos fotovoltaicos que alimentam o conversor somam uma potência ativa de 1960 W, além disso, o processador de energia não terá o uso de baterias, dessa forma, não se faz necessário um algoritmo de MPPT (do inglês *Maximum Power Point Tracking*) no controle, pois, levando em consideração que os aparelhos a serem alimentados serão semelhantes aos apresentados em (2.9.1), a potência instalada fotovoltaica sempre será maior em relação à potência consumida pela carga a ser utilizada. Deste modo, o conversor opera em malha fechada usando o controle por modo corrente média.

Figura 28 – Conversor CC-CC *Boost*: (a) etapas de operação e (b) formas de onda básicas.



Fonte: O próprio autor.

As duas etapas de operação básicas do conversor operando em condução contínua são ilustradas na Figura 28(a), e suas formas de onda equivalentes estão apresentadas na Figura 28(b). A descrição detalhada das etapas de operação do conversor em questão é facilmente encontrada na literatura acadêmica, como em (HART, 2012) e (RASHID, 2017).

3.3 Análise Quantitativa

Na análise quantitativa são determinados os esforços de tensão e corrente necessários para dimensionar os componentes do conversor. As expressões utilizadas são obtidas a partir da análise das formas de onda resultantes de cada etapa de operação do conversor.

3.3.1 Determinação de esforços de tensão e corrente nos componentes

a) Indutor, $L1$:

Pelo facto do conversor operar em MCC, a corrente eficaz através do indutor, $IL1_{ef}$, é igual a corrente média máxima, $Ii_{md_{max}}$, de entrada do conversor.

$$IL1_{ef} = Ii_{md_{max}} \quad (3.1)$$

Enquanto a corrente de pico através do indutor, $IL1_{pico}$, é dada pelo valor de corrente média máxima e da variação na corrente, $\Delta IL1$.

$$IL1_{pico} = Ii_{md_{max}} + \frac{\Delta IL1}{2} \quad (3.2)$$

b) Chave, $S1$:

Para encontrar as correntes eficaz, $IS1_{ef}$, e média, $IS1_{md}$, através da chave, pode-se utilizar (3.3) e (3.4).

$$IS1_{ef} = Ii_{md_{max}} \cdot \sqrt{D_{max}} \quad (3.3)$$

$$IS1_{md} = Ii_{md_{max}} \cdot D_{max} \quad (3.4)$$

Enquanto que a tensão máxima que surge sobre a chave, $VS1_{max}$, é maior ou igual a tensão do barramento CC na saída do conversor.

$$VS1_{max} \geq V_{cc} \quad (3.5)$$

c) Diodo, $D1$:

As correntes eficaz, $ID1_{ef}$, e média, $ID1_{md}$, através do diodo, $D1$, também dependem da corrente média máxima de entrada, $Ii_{md_{max}}$, e da razão cíclica máxima, D_{max} , como mostrado em (3.6) e (3.7).

$$ID1_{ef} = Ii_{md_{max}} \cdot \sqrt{1 - D_{max}} \quad (3.6)$$

$$ID1_{md} = Ii_{md_{max}} \cdot (1 - D_{max}) \quad (3.7)$$

A tensão reversa sobre o diodo é dada por (3.8).

$$VD1_{rev} \geq V_{cc} \quad (3.8)$$

d) Capacitor, C_{pv} :

O cálculo da capacitância do capacitor C_{pv} , depende da variação de carga do capacitor, dada pela expressão (3.9).

$$\Delta Q = \frac{T \cdot \Delta IL1}{8} \quad (3.9)$$

Onde:

ΔQ : variação de carga do capacitor;

T : período (apresentado no gráfico da Figura 28).

A ondulação de tensão sobre o capacitor, ΔV_{pv} deve ser adotada pelo projetista. Por fim, a capacitância é encontrada através da Equação 3.10.

$$C_{pv} = \frac{\Delta Q}{\Delta V_{pv}} \quad (3.10)$$

A resistência série equivalente, $R_{se_{pv}}$, do capacitor escolhido deve ser menor ou igual ao valor encontrado com a Equação 3.11.

$$R_{se_{pv}} = \frac{\Delta V_{pv}}{\Delta IL1} \quad (3.11)$$

e) Capacitor, $C1$:

Considerando a carga não linear (inversor) na saída do conversor *Boost*, baseado em (TODD, 1999) a capacitância é dada pela expressão (3.12).

$$C1 = \frac{2 \cdot P_{cc} \cdot \Delta t}{V_{cc}^2 - V_{ccmin}^2} \quad (3.12)$$

O capacitor encontra-se em paralelo com o barramento CC de saída, portanto, a tensão sobre o mesmo é dada por (3.13).

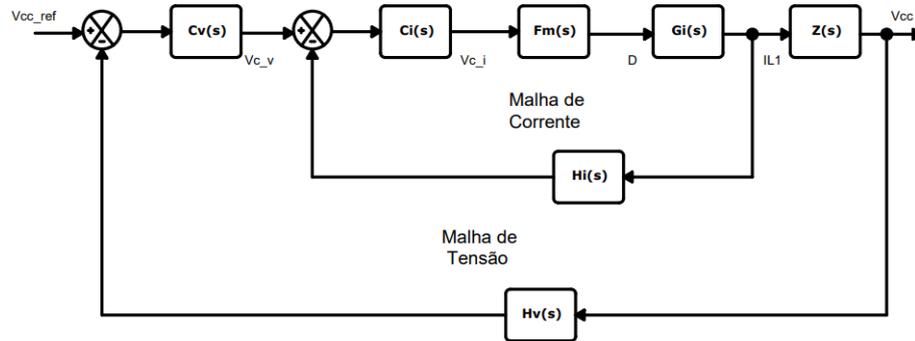
$$VC1_{max} \geq V_{cc} \quad (3.13)$$

3.4 Estratégia de Controle

A técnica de controle escolhida para o conversor *Boost* foi por modo corrente média. Essa técnica consiste em controlar a corrente através do indutor e da tensão de saída. São utilizadas uma malha de corrente interna e uma malha de tensão externa, onde a malha de corrente recebe uma amostra da corrente do indutor e compara com uma referência proveniente da malha de tensão. A malha de tensão, por sua vez, monitora a tensão de saída que é comparada a um valor de referência fixo. Assim, a saída do compensador da malha de corrente gera o sinal modulante a ser comparado com a portadora, resultando no sinal PWM que irá controlar a chave do conversor. Dessa forma, a corrente através do indutor é alterada de forma a manter a tensão de saída em uma regulação correta.

A Figura 29 apresenta o diagrama de blocos que representa o controle por modo corrente média utilizado.

Figura 29 – Diagrama de blocos do controle por modo corrente média.



Fonte: Adaptado de BASCOPE, 2021.

3.5 Exemplo de Projeto

3.5.1 Especificações e considerações de projeto

O conversor CC-CC *Boost* sob análise obedece às especificações e considerações apresentadas nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Especificações do conversor CC-CC *Boost*.

Entrada	
Tensão de entrada mínima	$V_{pv_{min}} = 100 \text{ V}$
Tensão de entrada máxima	$V_{pv_{max}} = 160 \text{ V}$
Saída	
Potência ativa de saída	$P_{cc} = 2105 \text{ W}$
Tensão de saída	$V_{cc} = 250 \text{ V}$

Fonte: O próprio autor

Tabela 3 – Considerações do conversor CC-CC *Boost*.

Considerações	
Frequência de comutação	$f_s = 20000 \text{ Hz}$
Ondulação de corrente no indutor	$\Delta IL1 = 0,15 \cdot I_{md}$
Tensão de saída mínima	$V_{ccmin} = 210 \text{ V}$
Rendimento do conversor	$\eta_b = 0,95$
Tempo de manutenção (<i>hold-up time</i>)	$\Delta t = 8,33 \text{ ms}$

Fonte: O próprio autor

3.5.2 Dimensionamento do circuito de potência

A potência média de entrada, P_i , do circuito pode ser encontrada por (3.14).

$$P_i = \frac{P_{cc}}{\eta_b} = \frac{2105}{0,95} = 2216 \text{ W} \quad (3.14)$$

Considerando a potência nominal, a corrente média de entrada máxima será atingida quando a tensão de entrada for mínima.

$$I_{i_{md_{max}}} = \frac{P_i}{V_{pv_{min}}} = \frac{2216}{100} = 22,16 \text{ A} \quad (3.15)$$

A partir do ganho estático do conversor operando em MCC, determina-se a razão cíclica. Para a tensão de entrada mínima tem-se a razão cíclica máxima, e para tensão máxima tem-se a razão cíclica mínima, como mostram (3.16) e (3.17).

$$D_{max} = 1 - \frac{V_{pv_{min}}}{V_{cc}} = 1 - \frac{100}{250} = 0,6 \quad (3.16)$$

$$D_{max} = 1 - \frac{V_{pv_{max}}}{V_{cc}} = 1 - \frac{160}{250} = 0,36 \quad (3.17)$$

Os esforços de corrente e tensão dos componentes são dimensionados nos itens a seguir utilizando as expressões apresentadas no item 3.3.1.

a) Indutor, $L1$

A indutância do indutor é dada por (3.18).

$$L1 = \frac{V_{pvmin} \cdot D_{max}}{\Delta IL1 \cdot f_s} = \frac{100 \cdot 0,6}{3,33 \cdot 20000} = 900,9 \mu H \quad (3.18)$$

As correntes eficaz e de pico são encontradas a partir de (3.1) e (3.2).

$$IL1_{ef} = 22,16 A$$

$$IL1_{pico} = 23,83 A$$

Cálculo do Elemento Magnético

Para o projeto do elemento magnético do indutor tomou-se como base o dimensionamento apresentado por (BASCOPE, 2000). Os parâmetros encontrados na Tabela 4 foram considerados para os cálculos.

Tabela 4 – Considerações sobre o elemento magnético do indutor.

Considerações	
Densidade de fluxo magnético	$B_{max} = 0,3 T$
Densidade de corrente	$J_{max} = 400 A/cm^2$
Fator de utilização da janela do núcleo	$K_w = 0,7$

Fonte: BASCOPE, 2000

- Núcleo de ferrite:

O produto das áreas do núcleo é encontrado a partir da equação (3.19).

$$A_e \cdot A_w = \frac{L1 \cdot IL1_{pico} \cdot IL1_{ef}}{K_w \cdot B_{max} \cdot J_{max}} \cdot 10^4 \quad (3.19)$$

Onde:

A_e : área da seção;

A_w : área da janela.

Dessa forma, obtém-se,

$$Ae \cdot Aw = 54,445 \text{ cm}^4$$

Para o produto de áreas calculado o núcleo NEE-80/38/20 de material IP12R da Thornton possui dimensões próximas, cujos parâmetros geométricos são:

$$Ae = 7,8 \text{ cm}^2; Aw = 8,5 \text{ cm}^2; Ae \cdot Aw = 66,3 \text{ cm}^4$$

- Número de espiras:

O número de espiras é obtido através da expressão (3.20).

$$NL1 = \frac{L1 \cdot L1_{pico}}{B_{max} \cdot Ae} \cdot 10^4 \quad (3.20)$$

Portanto, o número de espiras necessário é $NL1 = 88,205 \text{ espiras}$.

- Entreferro do núcleo:

O comprimento do entreferro do núcleo é dado pela equação (3.21).

$$lg = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot NL1^2}{L1} \cdot 10^{-2} \quad (3.21)$$

Onde:

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$: permeabilidade do vácuo;

$\mu_r = 1$: permeabilidade relativa do ar.

Substituindo os valores conhecidos na expressão (3.21), tem-se,

$$lg = 0,88 \text{ cm}$$

Para um núcleo do tipo EE o entreferro deve possuir metade do valor calculado por (3.21), já que o fluxo magnético circula pelo entreferro central e os laterais (BARBI *et al.*, 2002). Por conseguinte, o comprimento do entreferro deve ser ajustado em,

$$\frac{lg}{2} = 0,44 \text{ cm}$$

Além disso, o número de espiras também deve ser ajustado a fim de compensar o efeito do fenômeno de espraçamento (MCLYMAN, 2016). Esse fenômeno ocorre devido a distribuição não uniforme do fluxo magnético na região do entreferro. O fator de espraçamento é calculado por (3.22), em que $G = 5,58 \text{ cm}$ (altura da janela do núcleo adotado).

$$F = 1 + \frac{lg}{\sqrt{Ae}} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot G}{lg}\right) \quad (3.22)$$

Portanto, o fator de espraçamento resulta em:

$$F = 1,8$$

O novo número de espiras é encontrado em (3.23).

$$NL1_{novo} = \sqrt{\frac{lg \cdot L1}{0,4 \cdot \pi \cdot Ae \cdot F \cdot 1 \cdot 10^{-8}}} = 65,73 \text{ espiras} \quad (3.23)$$

- Seção do condutor:

A seção total do condutor a ser utilizado é calculada por (3.24).

$$SL1 = \frac{IL1_{ef}}{J_{max}} = 0,05539 \text{ cm}^2 \quad (3.24)$$

Para esta aplicação foram escolhidos fios de 26AWG pelo fato de serem mais flexíveis. Sua seção tem valor de $0,001287 \text{ cm}^2$, logo, os fios precisam ser dispostos em paralelo para atingir o valor de seção total encontrado em (3.24).

O número de fios em paralelo é:

$$Nf_{L1} = \frac{SL1}{S26AWGS} = 44 \text{ fios} \quad (3.25)$$

A área do cobre dos fios é dada em (3.26).

$$A_{Cu} = Nf_{L1} \cdot S26AWG \cdot NL1_{novo} = 4,833 \text{ cm}^2 \quad (3.26)$$

Enquanto a relação entre a área do cobre e a área da janela é encontrada por (3.27)

$$RelA = \frac{A_{Cu}}{A_w} = 0,569 \quad (3.27)$$

b) Chave, S1

Das equações (3.3),(3.4) e (3.5) tem-se,

$$IS1_{ef} = 17,17 \text{ A}$$

$$IS1_{md} = 13,3 \text{ A}$$

$$VS1_{max} \geq 250 \text{ V}$$

Para o projeto é adotado o MOSFET FQA38N30 (ON SEMICONDUCTOR, 2014) pelo fato de ser facilmente encontrado comercialmente e com baixa resistência de condução.

c) Diodo, D1

Os parâmetros dimensionados para o diodo ultra rápido foram calculados a partir de (3.6) e (3.7).

$$ID1_{ef} = 14,02 \text{ A}$$

$$ID1_{md} = 8,87 \text{ A}$$

$$VD1_{max} \geq 250 \text{ V}$$

Será utilizado um diodo ultrarrápido VS-30EPH06HN3 (VISHAY, 2018).

d) Capacitor, Cpv

Considerando $T_s = 50 \mu s$, a variação de carga do capacitor é:

$$\Delta Q = \frac{T_s \cdot \Delta IL}{8} = \frac{0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 3,33}{8} = 27,7 \mu C$$

Então, escolhendo 0,2% de V_{pv} , a partir de 3.10, encontra-se,

$$C_{pv} = \frac{\Delta Q}{\Delta V_{pv}} = \frac{27,7 \cdot 10^{-6}}{0,002 \cdot 160} = 86,55 \mu F$$

Já a resistência série equivalente, do capacitor é calculada por 3.11.

$$R_{se_{pv}} = \frac{\Delta V_{pv}}{\Delta IL} = \frac{0,32}{4,432} = 0,072 \Omega$$

De acordo com a capacitância encontrada, são adotados 4 capacitores de 1000 uF/250V em paralelo, sendo valores achados comercialmente. Assim, tem-se:

$$C1 = 4000 \mu F$$

$$R_{se} = 0,04 \Omega$$

e) Capacitor, C1

O valor da capacitância calculada para C1 é dado por:

$$C1 = \frac{2 \cdot P_{cc} \cdot \Delta t}{V_{cc}^2 - V_{cc_{min}}^2} = 2 \cdot 2105 \cdot 8,33 \cdot 10^{-3} = 1916 \mu F \quad (3.28)$$

Já a tensão máxima sobre o capacitor é,

$$VD1_{max} \geq 250 V$$

Conforme o valor de capacitância calculado, foram considerados 4 capacitores de 470uF/400V em paralelo, os quais são valores encontrados comercialmente. Desta maneira, obtém-se:

$$C1 = 1880 \mu F$$

$$R_{se} = 0,05 \Omega$$

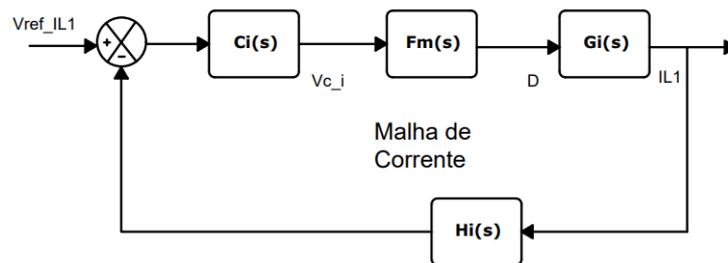
3.5.3 Dimensionamento do circuito de controle

Como já mencionado, a técnica de controle escolhida é a por modo de corrente média. Para o projeto dos controladores foi utilizado o método do fator K (VENABLE, 1983), onde amplificadores operacionais são usados como compensadores. Os mesmos utilizam um sinal proporcional ao erro entre a referência e o sinal realimentado, produzindo a tensão de controle necessária.

a) Projeto da Malha de Corrente:

O diagrama de blocos da Figura 30 representa a malha de corrente a ser dimensionada. Pode-se observar que existem as funções de transferência $Ci(s)$, $Fm(s)$, $Gi(s)$ e $Hi(s)$, referentes, respectivamente, ao compensador de corrente, o modulador PWM, a relação entre corrente do indutor e razão cíclica e o ganho de medição da corrente.

Figura 30 – Diagrama de blocos da malha de corrente.



Fonte: Adaptado de BASCOPÉ, 2021.

- Amplificador de diferenças:

Primeiramente, é necessário escolher um sensor de corrente, responsável por colher a amostra de corrente. Tendo em vista a finalidade do projeto, foi escolhido um resistor do tipo *shunt*, o qual possui baixo custo e é de fácil utilização. A queda de tensão sobre o resistor *shunt* tem um valor muito baixo, por isso, se faz necessário o uso de um amplificador diferencial com o objetivo de gerar a tensão de comparação a ser utilizada pelo compensador da malha de corrente.

Sendo a resistência do resistor *shunt* $R_{sh} = 0,011\Omega$, e considerando a corrente de pico através do indutor dada por (3.2), a queda de tensão sobre o mesmo pode ser encontrada como mostra (3.29).

$$V_{Rsh} = R_{sh} \cdot IL1_{pico} = 11 \cdot 10^{-3} \cdot 23,83 = 0,26213 \text{ V} \quad (3.29)$$

A tensão de comparação usada pelo circuito de controle é $V_{comp} = 2,5 \text{ V}$. Dessa forma, o ganho necessário para o amplificador diferencial é:

$$K_{dif} = \frac{V_{comp}}{V_{Rsh}} = \frac{2,5}{0,26213} = 9,53725 \quad (3.30)$$

Sendo esse o ganho de medição de corrente, $Hi(s) = K_{dif}$.

- Modulador PWM:

A amplitude da onda portadora, triangular ou dente de serra, é $V_s = 2,4 \text{ V}$, e a função de transferência do modulador PWM é dada por (3.31).

$$Fm(s) = \frac{1}{V_s} \quad (3.31)$$

- Compensador de corrente:

A função de transferência exata da planta que relaciona a corrente no indutor com a razão cíclica ($Gi(s)=iL/d$) é igual a (3.32), e a aproximada é dada por (3.33)

$$Gi(s) = \frac{\frac{V_{pvmax}}{D_{linha}} \cdot [s \cdot C1 \cdot (Ro + Rse) + 1 + \frac{Ro \cdot D_{linha}}{Ro \cdot D_{linha} + Rse}]}{s^2 \cdot L1 \cdot C1 \cdot (L1 + C1 \cdot Rse \cdot Ro \cdot D_{linha}) + Ro \cdot D_{linea} \cdot \frac{Ro \cdot D_{linha} + Rse}{Ro + Rse}} \quad (3.32)$$

$$Gii(s) = \frac{V_{cc}}{s \cdot L1} \quad (3.33)$$

Onde:

$$Ro = \frac{V_{cc}^2}{Po} = \frac{250^2}{2105} = 29,69 \text{ } \Omega: \text{ resist\^encia de carga do conversor;}$$

$$D_{linha} = (1 - D_{min}) = (1 - 0,36) = 0,64: \text{ complemento da raz\~ao c\^iclica m\^inima.}$$

$$s = j \cdot \omega \quad (3.34)$$

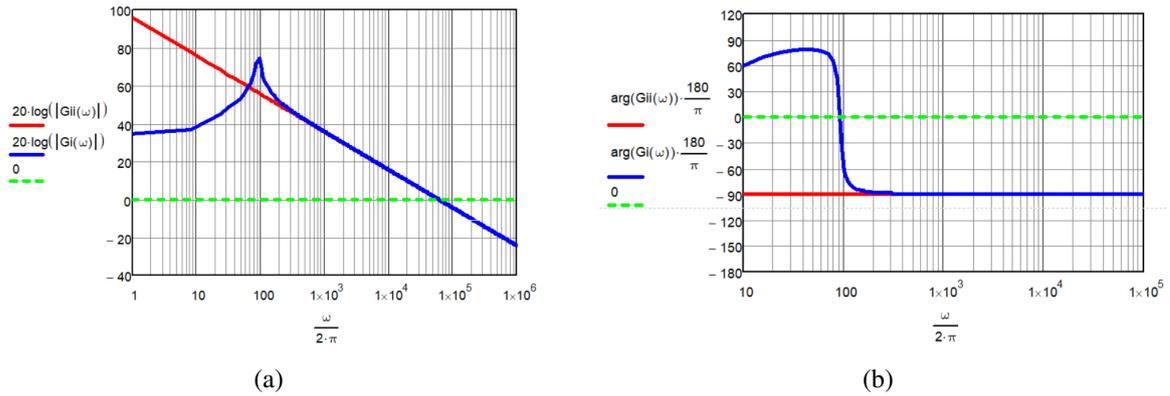
Onde:

$$j = \sqrt{-1};$$

ω : frequência angular.

O diagrama de Bode da função de transferência da planta é mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Diagrama de Bode de $G_i(s)=iL1/d$: (a) ganho e (b) fase.



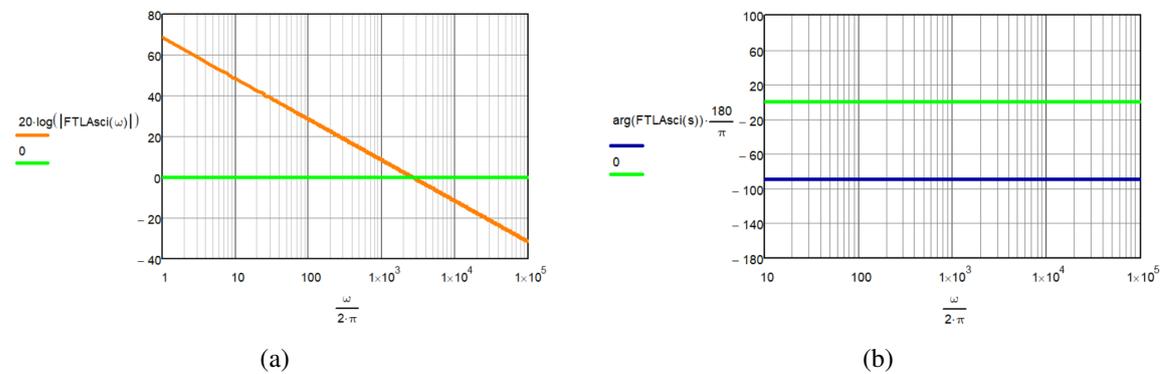
Fonte: Adaptado de BASCOPE, 2021.

A função de transferência em laço aberto sem compensador é dada pela expressão (3.35).

$$FTLAsci(s) = Gii(s) \cdot Fm(s) \cdot Hi(s) \quad (3.35)$$

Com isso, obtém-se o diagrama de Bode $FTLAsci(s)$:

Figura 32 – Diagrama de Bode de $FTLAsci(s)$: (a) ganho e (b) fase.



Fonte: Adaptado de BASCOPE, 2021.

A frequência de cruzamento por 0 dB adotada deve ser menor ou igual a 1/4 da frequência de chaveamento.

$$f_{ci} = \frac{f_s}{5} \quad (3.36)$$

Logo, $f_{ci} = 4000 \text{ Hz}$.

Para encontrar a fase utiliza-se a Equação (3.37).

$$P = \arg[FTLAsci(f_{ci} \cdot 2 \cdot \pi)] \quad (3.37)$$

Para a frequência de cruzamento adotada em (3.36), então, chega-se no valor de $P = -90$.

O ganho do compensador é dado por (3.38).

$$Ai_{dB} = 20 \cdot \log[|FTLAsci(f_{ci} \cdot 2 \cdot \pi)|] \quad (3.38)$$

Portanto, $Ai_{dB} = -3.687 \text{ dB}$.

A partir do diagrama de Bode da função de transferência em laço aberto sem compensador, dado na Figura 32, tem-se a margem de fase, $MF = 60$.

Dessa forma, calcula-se o avanço de fase como mostrado em (3.39)

$$\alpha = MF - P - 90^\circ \quad (3.39)$$

Então, $\alpha = 60^\circ$.

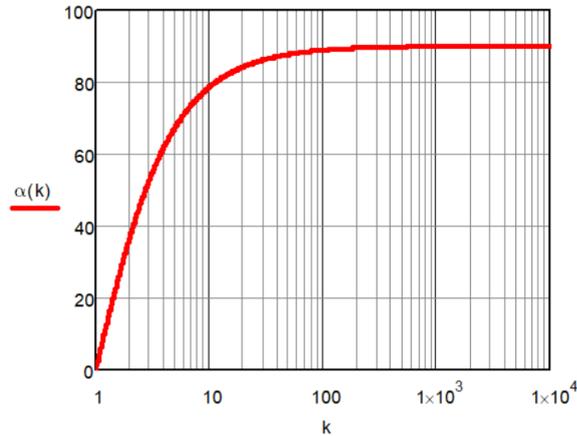
Devido o valor do avanço de fase ser menor que 90° , um compensador Tipo 2 ou Proporcional-Integral com filtro (PI com filtro) é adequado para esta aplicação.

O próximo passo é determinar o Fator K, o qual é obtido com as curvas do gráfico plotado a partir da equação do avanço de fase em função de K, como mostra (3.40).

$$\alpha(k) = \left(2 \cdot \arctg(K) - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (3.40)$$

O gráfico resultante de (3.40) é apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Curva de avanço de fase em função do fator K para o compensador Tipo 2



Fonte: Adaptado de BASCOPÉ, 2021.

A partir da análise da curva do gráfico da Figura 33, verifica-se que para o avanço de fase de 60° tem-se $K = 3,73$.

Com o valor de K conhecido é possível calcular as frequências em que os zeros e pólos do compensador são alocados, como mostra (3.41) e (3.42).

$$f_{z1} = \frac{f_{ci}}{K} \quad (3.41)$$

$$f_{p1} = f_{ci} \cdot K \quad (3.42)$$

Com isso, chega-se em $f_{z1} = 1,072 \cdot 10^3 \text{ Hz}$ e $f_{p1} = 1,492 \cdot 10^4 \text{ Hz}$

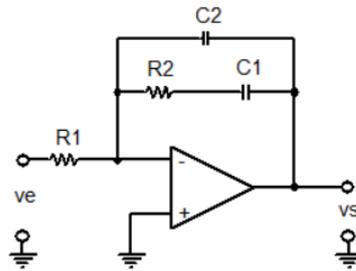
O ganho do compensador em valor absoluto é:

$$Gi = 10^{\frac{|A_{dB}|}{20}} \quad (3.43)$$

Logo, $Gi = 1,529$.

O circuito do compensador Tipo 2 a ser utilizado na malha de corrente é esquematizado na Figura 34.

Figura 34 – Compensador Tipo 2



Fonte: O próprio autor.

Para o dimensionamento dos componentes do compensador pode-se escolher um valor para o resistor R1 e, a partir disso, encontrar os valores dos outros componentes utilizando as equações (3.44)(3.45)(3.46).

$$C2 = \frac{1}{2 \cdot f_{ci} \cdot Gi \cdot K \cdot R1} \quad (3.44)$$

$$C1 = C2 \cdot (K^2 - 1) \quad (3.45)$$

$$R2 = \frac{K}{2 \cdot \pi \cdot f_{ci} \cdot C1} \quad (3.46)$$

Adotando $R1 = 10000 \Omega$, então,

$$C2 = 6,978 \cdot 10^{-10} F$$

$$C1 = 9,01 \cdot 10^{-9} F$$

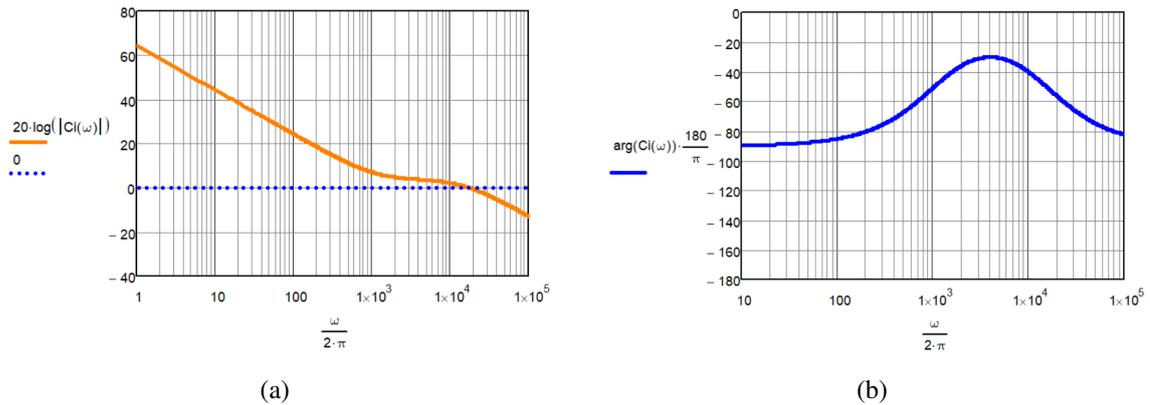
$$R2 = 1,647 \cdot 10^4$$

A função de transferência do compensador Tipo 2 é expressa na Equação (3.47).

$$Ci(s) = \frac{1 + s \cdot C1 \cdot R2}{R1 \cdot s \cdot (C1 + C2 + s \cdot R2 \cdot C1 \cdot C2)} \quad (3.47)$$

Com isso, seu diagrama de Bode de $Ci(s)$ está apresentado na Figura 35

Figura 35 – Diagrama de Bode do compensador $C_i(s)$: (a) ganho e (b) fase.



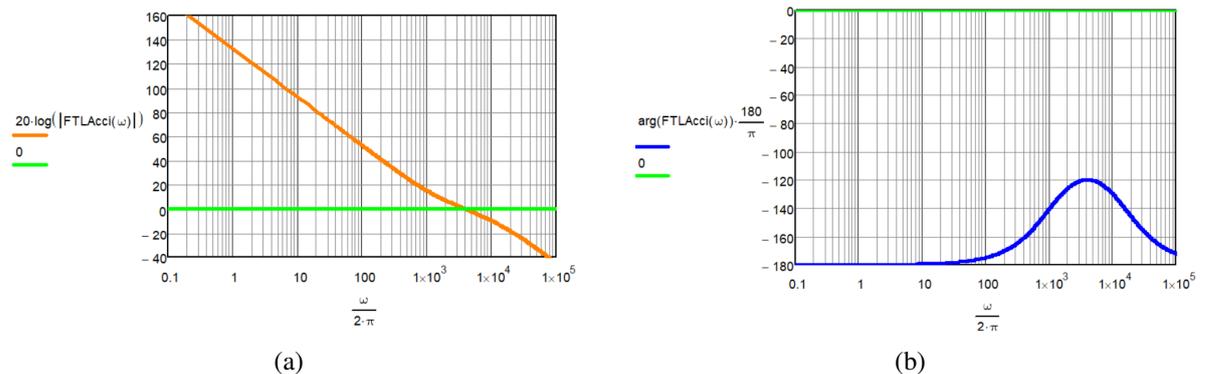
Fonte: Adaptado de BASCOPÉ, 2021.

Adicionando o compensador a função de transferência em laço aberto do sistema, dada em (3.35), obtém-se:

$$FTL_{Acci}(s) = FTL_{Asci}(s) \cdot C_i(s) \quad (3.48)$$

Assim, o diagrama de Bode para o sistema compensado fica como mostrado na Figura 36.

Figura 36 – Diagrama de Bode de FTL_{Acci} : (a) ganho e (b) fase.



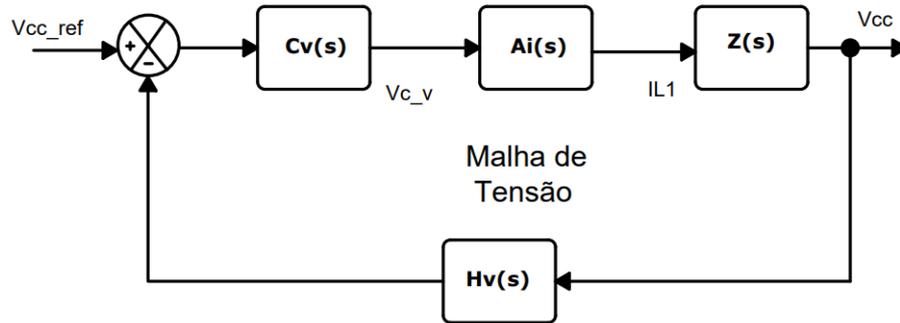
Fonte: Adaptado de BASCOPÉ, 2021.

Dessa forma, resultando em uma margem de fase $MF = 59,984^\circ$ e uma margem de ganho $MG = infinito$.

b) Projeto da Malha de Tensão:

O diagrama de blocos da malha de tensão a ser utilizada está demonstrado na Figura 37.

Figura 37 – Diagrama de blocos da malha de tensão.



Fonte: Adaptado de BASCOPÉ, 2021.

A coleta da amostra de tensão do barramento CC na saída do conversor é realizada por um divisor resistivo. Na saída do divisor deve-se obter a tensão que será comparada com uma tensão de referência no compensador da malha de tensão. Considerando a tensão de referência no valor de $V_{CCref} = 2,5 \text{ V}$, e um dos resistores do divisor resistivo sendo $R1 = 1 \cdot 10^6 \Omega$, tem-se para R2:

$$R2 = \frac{V_{CCref} \cdot R1}{V_{CC} - V_{CCref}} = \frac{2,5 \cdot 1 \cdot 10^6}{250 - 2,5} = 1,01 \cdot 10^4 \Omega \quad (3.49)$$

Além disso, o elemento de medição de tensão tem a função de transferência expressa na Equação (3.50).

$$Hv(s) = \frac{V_{CCref}}{V_{CC}} \quad (3.50)$$

Considerando a corrente de entrada drenada pelo inversor com frequência de 120 Hz, a frequência de cruzamento da malha de tensão deve ser menor que 1/4 de 120 Hz. Como a malha de tensão é lenta, a malha de corrente torna-se um simples ganho dado pela Equação (3.51).

$$Ai(s) = \frac{1}{Hi(s)} \quad (3.51)$$

Já a função de transferência da planta $Z(s) = \frac{Vo(s)}{iL1(s)}$ é apresentada na Equação (3.52).

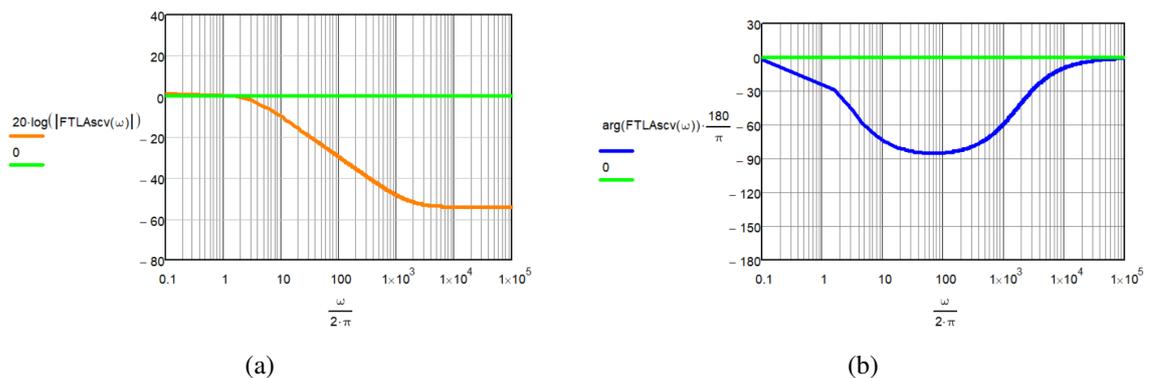
$$Z(s) = \left[(1 - D_{max}) \cdot \frac{Ro \cdot Rse}{Ro + Rse} \right] \cdot \frac{s \cdot \frac{1}{Rse \cdot C1}}{s \cdot \frac{1}{C1 \cdot (Ro + Rse)}} \quad (3.52)$$

Por conseguinte, se chega na função de transferência em laço aberto sem compensador:

$$FTLAsc_v(s) = Ai(s) \cdot Hv(s) \cdot Z(s) \quad (3.53)$$

A partir da Equação (3.53) o seu diagrama de Bode é obtido, como é visto na Figura 38.

Figura 38 – Diagrama de Bode de $FTLAsc_v(s)$: (a) ganho e (b) fase.



Fonte: Adaptado de BASCOPÉ, 2021.

A frequência de cruzamento para 0 dB da malha de tensão deve ser menor que 1/4 de 120 Hz, então, foi considerado o cálculo feito na Equação (3.36).

$$f_{cv} = 20 \text{ Hz}$$

Em seguida devem ser encontrados os parâmetros necessários para se chegar as curvas do fator K baseadas no avanço de fase.

A partir da Equação (3.36) calcula-se a fase para a malha de tensão utilizando o valor de f_{cv} escolhido. Dessa forma,

$$P = -81,233^\circ$$

O ganho do compensador da malha de tensão é obtido pela Equação (3.38). Logo,

$$Av_{dB} = -15,748 \text{ dB}$$

A margem de fase para o projeto é adotada no valor de:

$$MF = 60^\circ$$

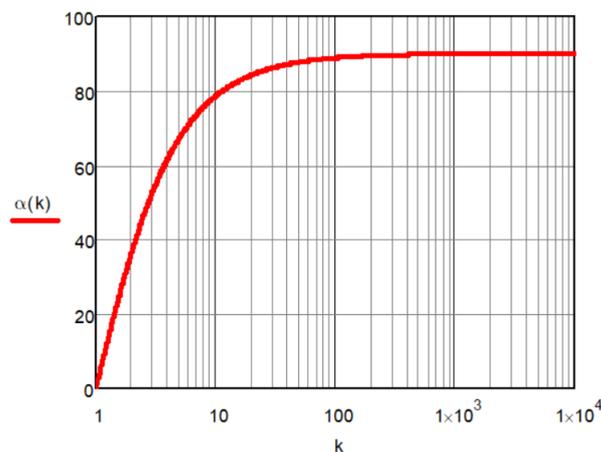
Usando os dados, o avanço de fase é calculado na Equação (3.39).

$$\alpha = 51,223^\circ$$

Assim como no dimensionamento compensador da malha de corrente, para a malha de tensão o avanço de fase encontrado também é inferior a 90° . Portanto, basta utilizar o compensador Tipo 2, cujo circuito é apresentado na Figura 34.

Utilizando a Equação (3.40) é possível plotar o gráfico do avanço de fase obtido para o compensador da malha de tensão em função do fator K, como pode ser visto na Figura 39

Figura 39 – Curva de avanço de fase em função do fator K para o compensador Tipo 2



Fonte: Adaptado de BASCOPÉ, 2021.

Para o avanço de fase calculado o valor do fator K é encontrado partir da curva apresentada no gráfica da Figura 39, sendo de $K = 2,9$.

Calcula-se, então, as frquências de alocação de zeros e pólos utilizando-se as equações (3.41) e (3.42). Dessa maneira, $f_{z1} = 6,897 \text{ Hz}$ e $f_{p1} = 58 \text{ Hz}$.

O ganho do compensador em valor absoluto é dado da mesma forma que expresso pela Equação (3.43). Portanto, $G_v = 6,129$.

O dimensionamento dos componentes do compensador escolhido é realizado da mesma maneira descrita para o compensador de corrente, utilizando as equações (3.44)(3.45)(3.46).

Logo, assumindo-se $R1 = 10000 \ \Omega$:

$$C2 = 4,447 \cdot 10^{-8} \text{ F}$$

$$C1 = 3,318 \cdot 10^{-7} \text{ F}$$

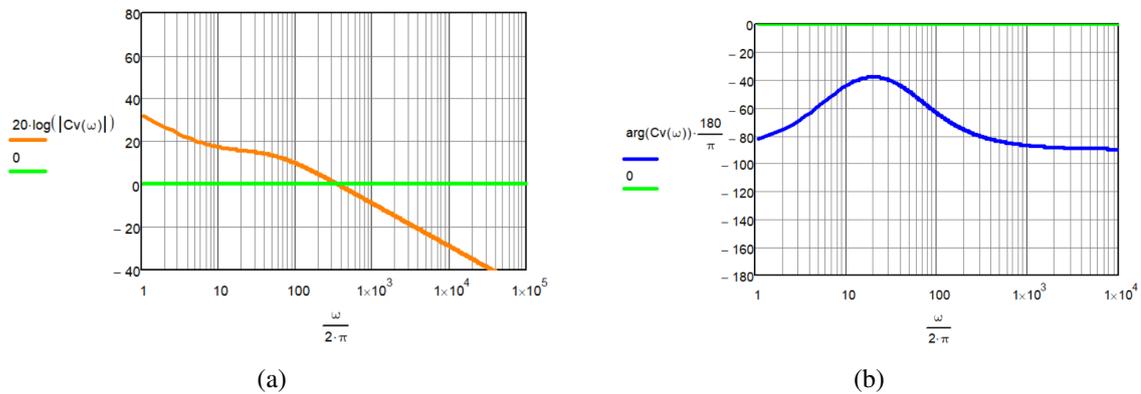
$$R2 = 6,956 \cdot 10^4 \ \Omega$$

Como a função de transferência do compensador Tipo 2 é expressa na Equação (3.54),

$$Cv(s) = \frac{1 + s \cdot C1 \cdot R2}{R1 \cdot s \cdot (C1 + C2 + s \cdot R2 \cdot C1 \cdot C2)} \quad (3.54)$$

Seu diagrama de Bode é plotado como mostra a Figura 40.

Figura 40 – Diagrama de Bode do compensador $Cv(s)$: (a) ganho e (b) fase.



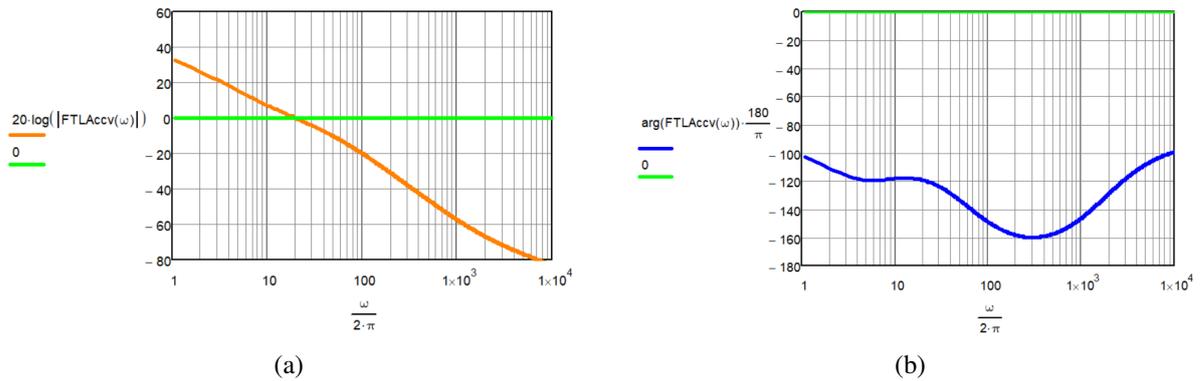
Fonte: Adaptado de BASCOPE, 2021.

A função de transferência em laço aberto com compensador $FTLAccv(s)$ é igual a Equação (3.55).

$$FTLAccv(s) = FTLAScv(s) \cdot Cv(s) \quad (3.55)$$

Então, para encontrar as margens de fase e de ganho do sistema com a adição do compensador, plota-se os gráficos do diagrama de Bode usando a Equação (3.55). O diagrama resultante está na Figura 41.

Figura 41 – Diagrama de Bode de FTLAccv(s): (a) ganho e (b) fase.



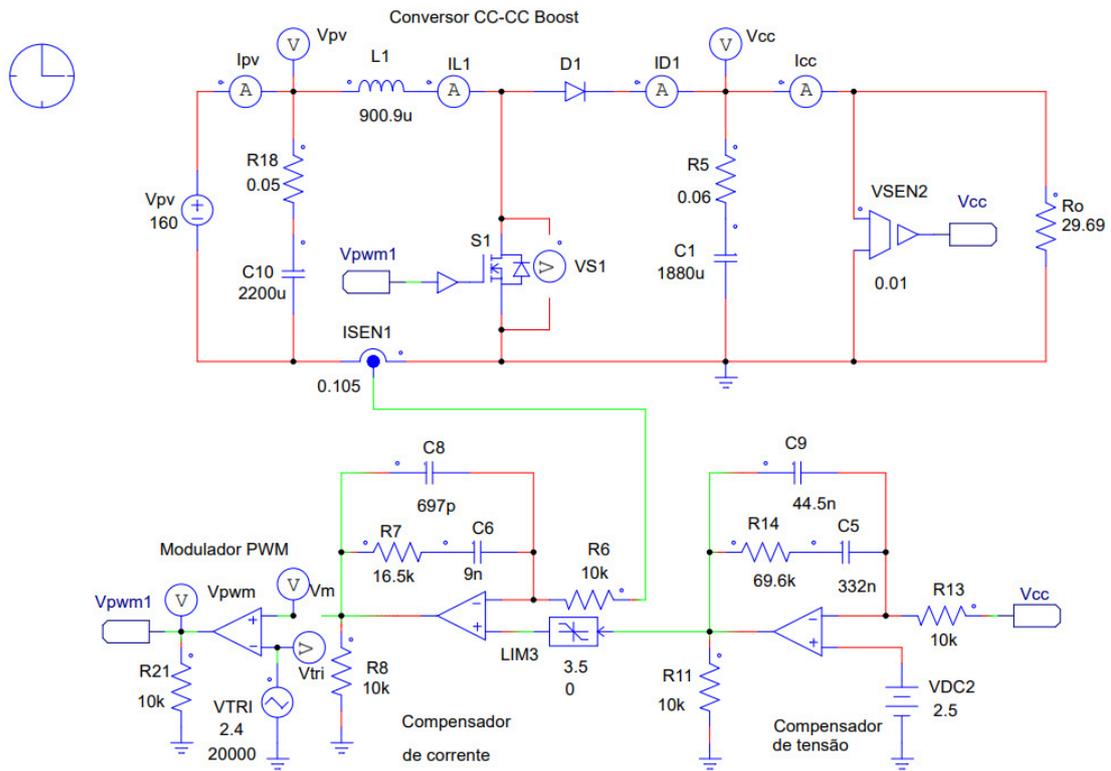
Fonte: Adaptado de BASCOPE, 2021.

Com a análise desses gráficos chega-se em uma margem de fase $MF = 60,726^\circ$ e uma margem de ganho $MG = infinito$.

3.6 Resultados de Simulação

A Figura 42 mostra o esquemático do circuito montado e simulado no programa PSIM. Foram utilizados os valores calculados no dimensionamento realizado na seção anterior.

Figura 42 – Esquemático simulado no PSIM.

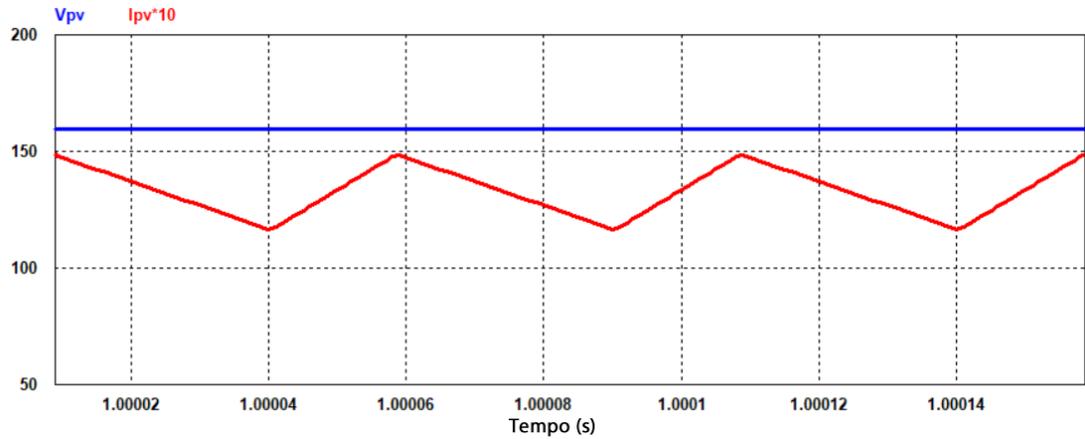


Fonte: O próprio autor utilizando o programa PSIM.

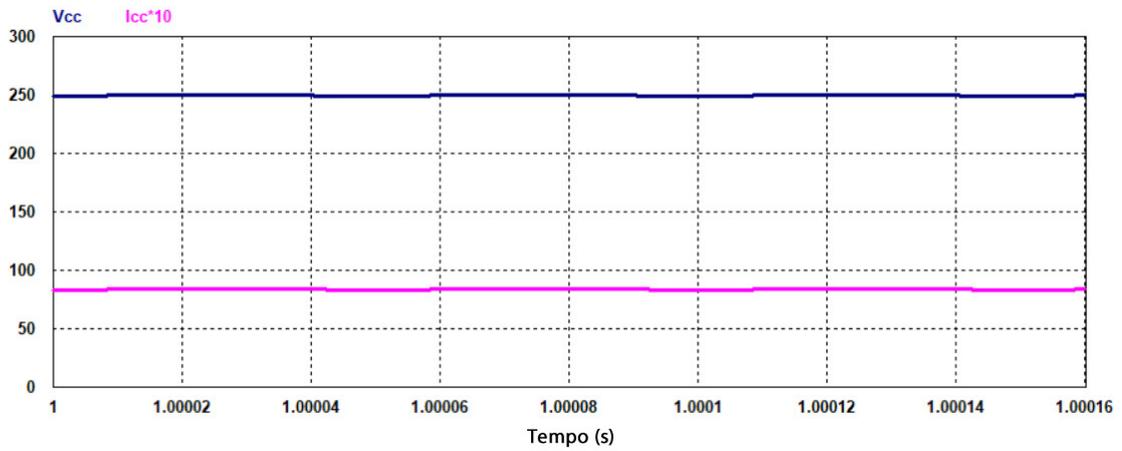
3.6.1 Formas de onda em regime permanente

As formas de onda presentes na Figura 43 representam os sinais de tensão e corrente de entrada, V_{pv} e I_{pv} , e de saída, V_{cc} e I_{cc} , onde em ambos os gráficos a corrente está multiplicada pelo valor 10 para melhor observação da mesma.

Figura 43 – Formas de onda de tensão e corrente: (a) na entrada e (b) na saída.



(a)

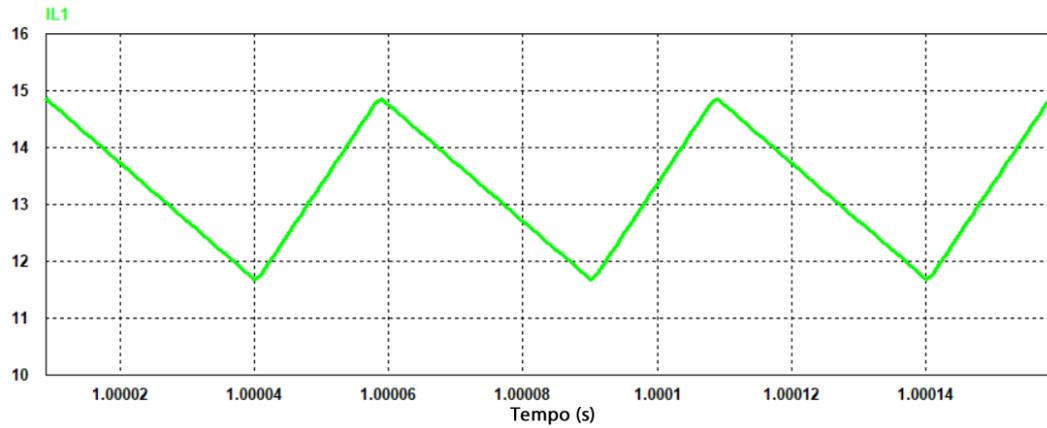


(b)

Fonte: O próprio autor utilizando o programa PSIM.

A forma de onda da corrente através do indutor, L1, é apresentada na Figura 44. Pela sua característica, é possível observar que o conversor está operando em modo de condução contínua.

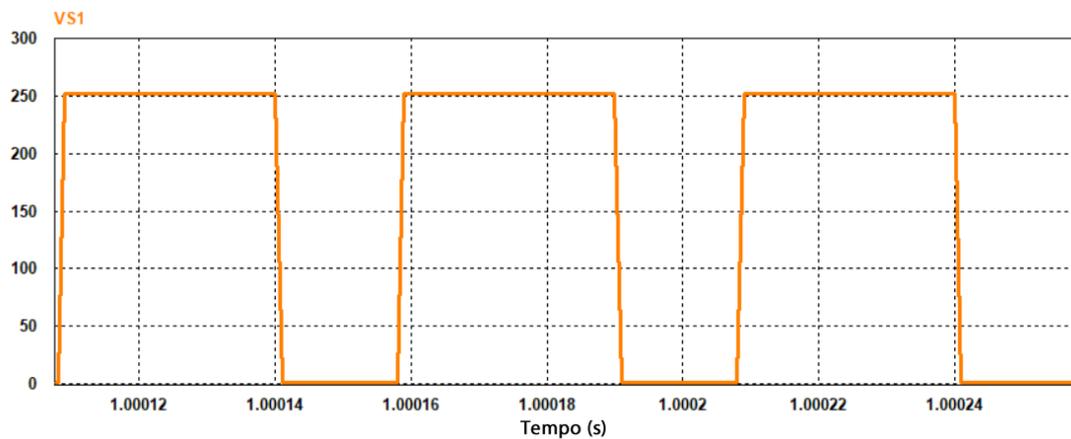
Figura 44 – Corrente através do indutor L1.



Fonte: O próprio autor utilizando o programa PSIM.

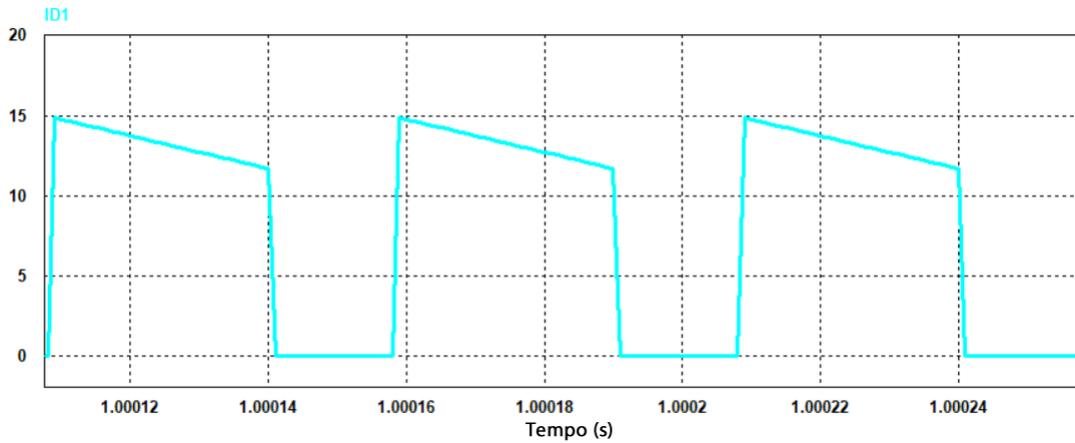
As Figuras 45 e 46 mostram os gráficos da tensão sobre a chave, S1, e a corrente através do diodo, D1, respectivamente.

Figura 45 – Tensão sobre a chave S1.



Fonte: O próprio autor utilizando o programa PSIM.

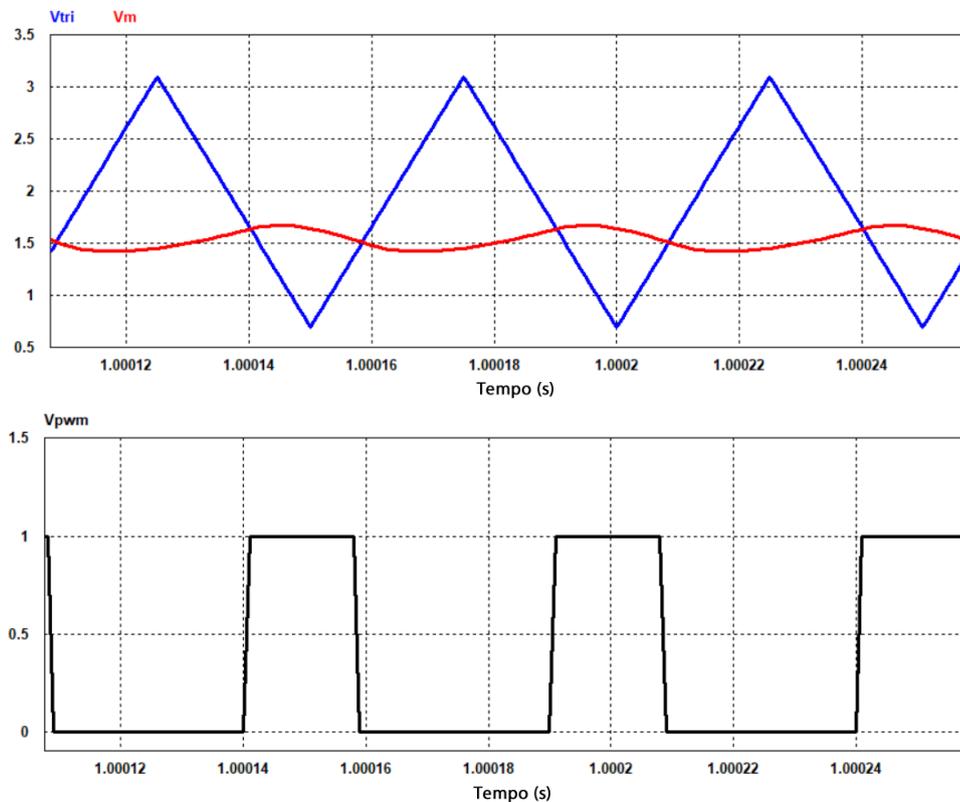
Figura 46 – Corrente através do diodo D1.



Fonte: O próprio autor utilizando o programa PSIM.

Os sinais de controle dados pela portadora triangular e a moduladora estão apresentados nos gráficos da Figura 47.

Figura 47 – Sinais de controle: portadora triangular e moduladora (gráfico superior) e sinal PWM (gráfico inferior).

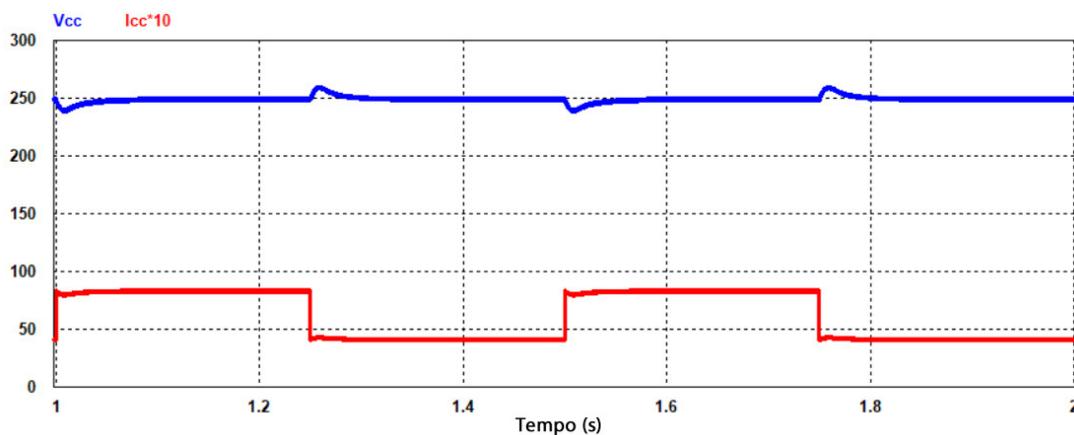


Fonte: O próprio autor utilizando o programa PSIM.

3.6.2 Formas de onda em regime transitório com carga linear

A fim de verificar o desempenho dinâmico do conversor *Boost*, foi aplicado um degrau de carga na saída do mesmo variando a potência de saída de 50% a 100%. A Figura 48 apresenta os sinais de tensão e corrente (multiplicada por 10) de saída do conversor durante a aplicação do degrau. Observa-se que a tensão se mantém regulada no valor ao qual foi definido, de 250 V, com um tempo de resposta inferior a 100 ms.

Figura 48 – Sinais de tensão e corrente na saída do conversor *Boost* durante degrau de carga



Fonte: O próprio autor utilizando o programa PSIM.

3.7 Verificação de Resultados Teóricos e Simulados

Na Tabela 5 são apresentados os valores calculados no Exemplo de Projeto deste capítulo e os valores obtidos via simulação no PSIM do circuito do conversor *Boost* dimensionado.

Tabela 5 – Comparação de resultados teóricos e simulados.

Grandeza	Valor Teórico	Valor Simulado
$V_{pv_{md}}$	160 V	160 V
$I_{pv_{md}}$	13,25 A	13,15 A
$V_{cc_{md}}$	250 V	249,99V
$I_{cc_{md}}$	8,42 A	8,42 A
$V_{S1_{max}}$	250 V	251,9 V
$I_{L1_{md}}$	13,25 A	13,31 A
ΔI_{L1}	1,99 A	1,97 A

Fonte: O próprio autor.

3.8 Considerações

Com as análises qualitativa, quantitativa e exemplo de projeto demonstrados neste capítulo o circuito do primeiro estágio de processamento foi dimensionado. O esquemático do mesmo foi implementado no programa PSIM a fim de que seu funcionamento fosse verificado via simulação, onde observou-se um comportamento esperado do conversor CC-CC *Boost*. As formas de onda de tensão e corrente nos componentes obtidas foram de acordo com as formas de onda características apresentadas na seção 3.2, e os valores medidos foram muito próximos ou iguais aos calculados, como mostra a Tabela 5.

Diante do exposto, entende-se que a simulação, na utilização de componentes ideais, do circuito dimensionado valida o exemplo de projeto teórico e, com isso, é viável prosseguir para a implementação prática do mesmo.

4 PROJETO DO INVERSOR PONTE COMPLETA DE ONDA QUADRADA DE TRÊS NÍVEIS

4.1 Introdução

O inversor, ou conversor CC-CA, é um item essencial em um sistema de processamento de energia onde se tem como objetivo adquirir uma tensão alternada. A depender da técnica de controle, pode ser obtido em sua saída uma onda em formato senoidal ou próximo a isso, o que é definido pelo projetista do conversor.

No sistema proposto para o projeto deste trabalho existe um estágio CC-CA em cascata com o primeiro estágio, CC-CC. Neste capítulo é discutido o funcionamento da topologia escolhida para o segundo estágio, bem como, o sincronismo e a modulação utilizada na comutação das chaves semicondutoras. A forma de onda resultante do lado CA do inversor é quadrada de três níveis, podendo ter seu valor eficaz ajustado pelo controle dos intervalos onde não há condução das chaves, o que também será abordado com mais detalhes.

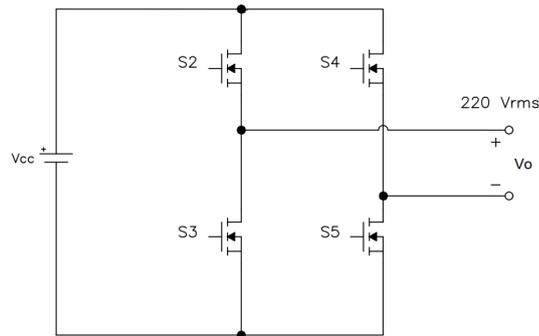
4.2 Análise Qualitativa

O inversor que compõe o segundo estágio de processamento do sistema é do tipo ponte completa, utilizando modulação PWM assimétrica com frequência fixa de 60 Hz. A topologia e o princípio de funcionamento são abordados mais especificamente nesta seção.

4.2.1 Topologia do inversor

A topologia do inversor adotado pode ser observada na Figura 49, sendo composta por uma fonte de tensão contínua na entrada (V_{cc}); quatro chaves de potência (S2-S5); e uma carga em sua saída (R_o). No caso, V_{cc} é a tensão de saída do primeiro estágio de processamento, o conversor *Boost*.

Figura 49 – Topologia do inversor ponte completa.

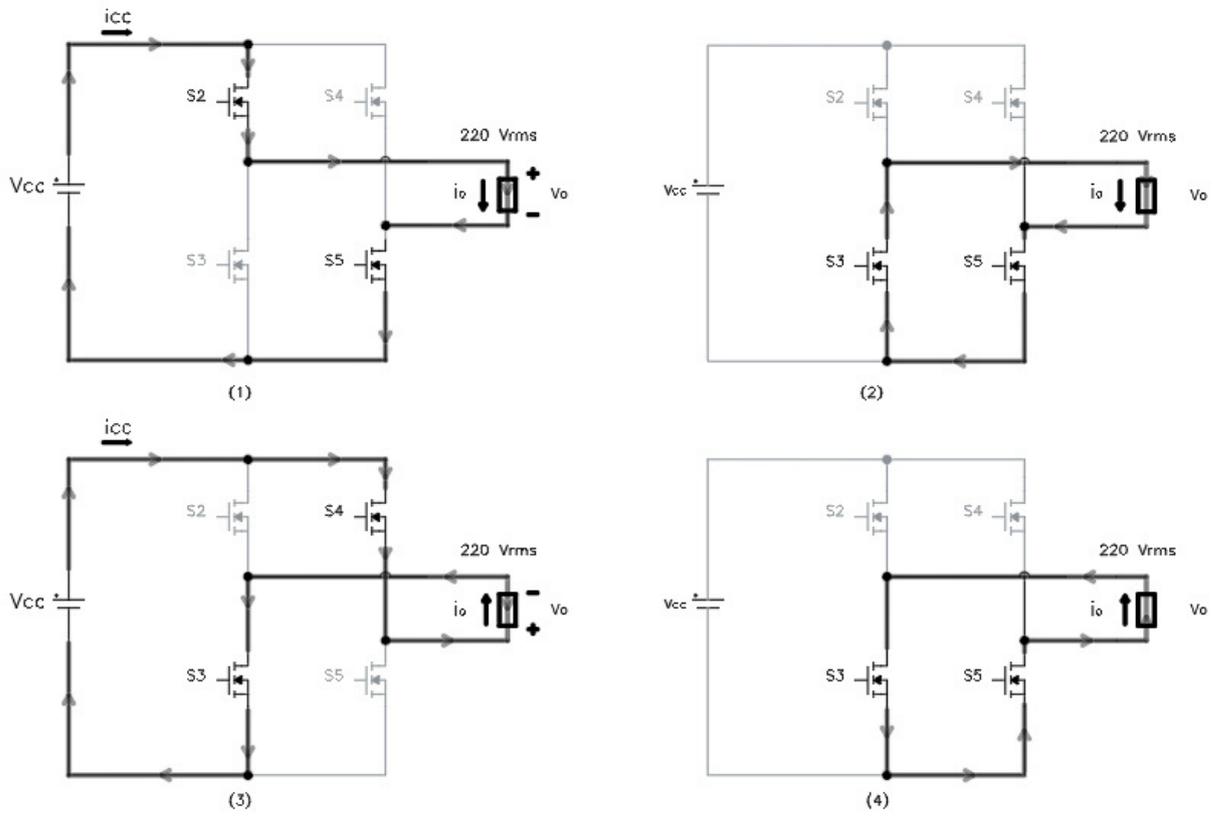


Fonte: O próprio autor.

4.2.2 Princípio de funcionamento

As etapas de operação e as formas de onda de tensão e correntes são mostradas na Figura 50. Basicamente, em um período ocorrem as seguintes etapas: S2 e S5 entram em condução e a tensão sobre a carga tem amplitude de mesmo valor que a tensão de entrada do inversor; em seguida, ocorre a condução das chaves S3 e S5, na qual a tensão sobre a carga fica nula; posteriormente, S3 e S4 conduzem fazendo com que a tensão aplicada sobre a carga possua amplitude de valor igual a tensão de entrada, porém com polaridade invertida; por fim, S3 e S5 conduzem novamente, resultando em outro instante em que a tensão sobre a carga é igual a zero.

Figura 50 – Etapas de operação do inversor.

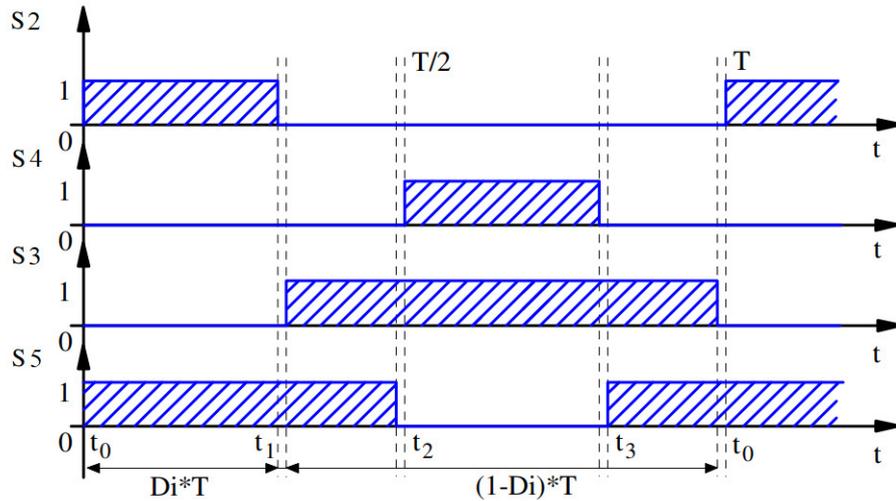


Fonte: O próprio autor.

4.2.3 Técnica de modulação PWM

O acionamento das chaves do inversor ocorre de forma assimétrica, na qual os pulsos de controle gerados possuem defasagem de $\pi \text{ rad}$ (180° elétricos), onde as chaves superiores (S2 e S3) têm largura de pulso equivalente a $\pi - \alpha$ e as chaves inferiores (S4 e S5) possuem os seus respectivos complementos, com largura de pulso dada por $\pi + \alpha$. A utilização de um tempo morto entre os pulsos de controle se faz necessário para evitar que as chaves de um mesmo braço entrem em condução ao mesmo tempo, o que poderia causar um curto entre as mesmas. Na Figura 51 observa-se os sinais de controle referentes aos pulsos PWM gerados.

Figura 51 – Modulação PWM assimétrica.



Fonte: Adaptado de APOLINÁRIO, 2017.

4.3 Análise Quantitativa

Assim como realizado na seção 3.3 para o conversor *Boost*, nesta seção serão demonstrados os cálculos de esforços de tensão e corrente nos componentes do inversor, além do dimensionamento de seu circuito de potência e controle.

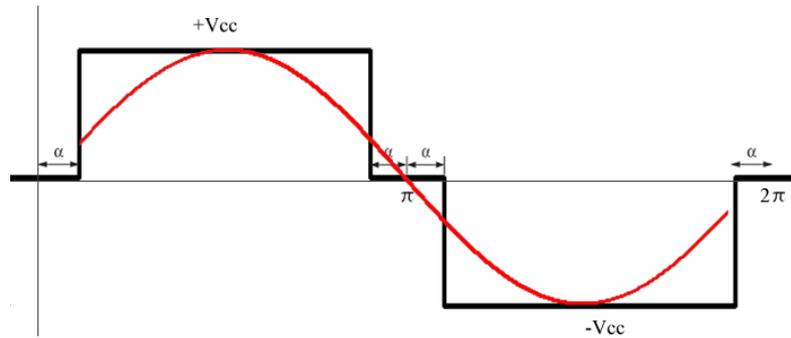
4.3.1 Determinação de esforços de tensão e corrente nos componentes

a) Tensão de saída, V_o :

A explicação a seguir baseia-se no exposto em (HART, 2014) para controle de amplitude e harmônica.

A tensão eficaz de saída tem formato de onda quadrada de três níveis, como pode ser visto no gráfico da Figura 52. O gráfico também mostra uma onda senoidal, sendo possível observar uma certa aproximação entre os dois tipos de forma onda.

Figura 52 – Forma de onda quadrada de três níveis.



Fonte: O próprio autor.

A mesma pode ser expressa em termos das séries de Fourier, possuindo apenas harmônicas ímpares, que são representados por:

$$v_o(t) = \sum_{n_{\text{impares}}} \frac{4 \cdot V_n}{n \cdot \pi} \text{sen}(n\omega_0 t) \quad (4.1)$$

Onde o índice n representa o número da componente harmônica.

Observando o gráfico da Figura (52), tem-se que o valor eficaz de meio período pode ser dado pela Equação (4.2).

$$V_{\text{odef}}(t) = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} V_{cc}^2 d\omega t} \rightarrow V_{\text{rms}}(t) = V_{cc} \cdot \sqrt{1 - \frac{2 \cdot \alpha}{\pi}} \quad (4.2)$$

Onde α é o ângulo da tensão zero que ocorre após o final de cada pulso. Dessa forma, é possível controlar a tensão eficaz ao definir um valor para α .

Devido a simetria presente na forma de onda em questão, encontra-se a amplitude de cada termo, V_n , da série, indicado na Equação (4.7), da forma apresentada na Equação (4.3).

$$V_n = \frac{\pi}{2} \cdot \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} V_{cc} \text{sen}(n\omega_0 t) d(n\omega_0 t) \quad (4.3)$$

A amplitude de cada frequência de saída também está em função de α . Para a frequência fundamental, tem-se o valor da amplitude dado pela Equação (4.4).

$$V_1 = \frac{4 \cdot V_{cc}}{\pi} \cos(\alpha) \quad (4.4)$$

O ângulo α também pode ser ajustado no intuito de definir qual harmônica seria eliminada apenas fazendo com o termo do cosseno resulte em zero. Para isso, deve-se relacionar o ângulo de 90° com o valor numérico da harmônica, como mostra a Equação (4.5).

$$\alpha = \frac{90^\circ}{n} \quad (4.5)$$

Entretanto, para a aplicação proposta neste trabalho, não se faz necessário o controle de harmônica, devido a utilização de cargas lineares, como foi abordado na Equação 2.9. Em vista disso, é interessante apenas o controle da amplitude da tensão.

Fixando-se o valor desejado no barramento CC de entrada do inversor, V_{cc} , e a tensão eficaz em sua saída, V_{oef} , na Equação (4.2), encontra-se o ângulo α que permitirá, com esses parâmetros fixados, obter a largura de pulso equivalente para resultar na tensão eficaz desejada. Ou seja, controla-se α para regular a largura de pulso que tem amplitude V_{cc} , a fim de se manter o valor escolhido de V_{oef} .

b) Resistor, R_o :

O resistor de carga pode ser facilmente dimensionado pela equação da potência de saída dada pela Equação (4.6)

$$R_o = \frac{V_{oef}^2}{P_o} \quad (4.6)$$

A tensão e a corrente no resistor são encontradas pela lei de Ohm.

c) Chaves, S2-S5:

Considerando a carga como puramente resistiva, já que é o caso de muitos eletrodomésticos de uso culinário, a mesma corrente circula pelas chaves S2-S5. Portanto, o mesmo cálculo é válido para as quatro chaves.

A corrente de pico que circula através das chaves é dada pela Equação (4.7).

$$I_{S2_{pico}} = \frac{V_{cc}}{R_o} \quad (4.7)$$

Enquanto a corrente eficaz e a corrente média através das chaves são dadas pelas Equações (4.8) e (4.9).

$$IS2_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{\alpha}^{(\pi-\alpha)} IS2_{pico}^2 d\theta} = IS2_{pico} \cdot \left[\sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\pi}} \right] \quad (4.8)$$

$$IS2_{md} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{\alpha}^{(\pi-\alpha)} IS2_{pico}^2 d\theta = IS2_{pico} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\pi} \right) \quad (4.9)$$

A tensão máxima sobre cada chave é igual a tensão de entrada do inversor (V_{cc}), Portanto as chaves de potência a serem utilizadas devem ser escolhidas com tensões acima do valor indicado pela Equação (4.10).

$$VS2_{max} \geq V_{cc} \quad (4.10)$$

4.4 Exemplo de Projeto

4.4.1 Especificações e considerações de projeto

Para o projeto do inversor em ponte completa foram utilizadas as especificações expostas na Tabela 6. Para a saída foram definidos valores de tensão eficaz e frequência necessários para acionar eletrodomésticos no padrão de tensão 220V para circuito monofásico da rede elétrica.

Tabela 6 – Especificações do inversor ponte completa.

Entrada	
Tensão de entrada	$V_{cc} = 250 V$
Saída	
Potência ativa de saída	$P_{cc} = 2000 W$
Potência aparente de saída	$S_o = 2000 VA$
Tensão de saída eficaz	$V_{oef} = 220 V$
Frequência de saída	$f_o = 60 Hz$

Fonte: O próprio autor

4.4.2 Dimensionamento do circuito de potência

Considerando que o rendimento do inversor é $\eta_i = 0,95$, a potência média no barramento CC de entrada é dada pela Equação (4.11).

$$P_i = \frac{P_o}{\eta_i} = \frac{2000}{0,95} = 2105,26 \text{ W} \quad (4.11)$$

a) Tensão de saída, V_o :

Desenvolvendo a Equação (4.2), tem-se:

$$\begin{aligned} V_{oef} &= V_{cc} \cdot \sqrt{1 - \frac{2 \cdot \alpha}{\pi}} \\ \left(\frac{V_{oef}}{V_{cc}} \right)^2 &= 1 - \frac{2 \cdot \alpha}{\pi} \\ \alpha &= \frac{\pi}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{V_{oef}}{V_{cc}} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (4.12)$$

Substituindo na Equação (4.12) os valores conhecidos de tensão de entrada e saída, obtém-se o valor de α necessário para o projeto.

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{220}{250} \right)^2 \right] = 0,3544 \text{ rad}$$

O qual corresponde a $\alpha = 20,3^\circ$.

b) Resistor, R_o :

A partir da Equação (4.6), encontra-se o valor de R_o .

$$R_o = \frac{220^2}{2000} = 24,2 \Omega$$

c) Chaves, S2-S5:

Para as correntes de pico, eficaz e média através das chaves utiliza-se as equações (4.7)(4.8) e (4.9).

$$I_{S2pico} = \frac{250}{24,2} = 10,33 \text{ A}$$

$$I_{S2ef} = 10,33 \cdot \left[\sqrt{\frac{1}{2} - \frac{0,3544}{\pi}} \right] = 6,43 \text{ A}$$

$$IS2_{md} = 10,33 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{0,3544}{\pi} \right) = 4,0 \text{ A}$$

Por fim, a tensão sobre as chaves é definida pela Equação (4.10), logo,

$$VS2_{max} \geq 250 \text{ V}$$

4.4.3 Circuito de controle

Por se tratar de um controle com frequência e ciclo de trabalho fixos, sem depender de quaisquer parâmetros variáveis, o inversor opera em malha aberta. Dessa maneira, é possível gerar os pulsos que controlam as chaves do inversor com a utilização de circuitos integrados geradores de sinais PWM, como o CI SG3525. Esse circuito integrado possui duas saídas, onde são gerados os mesmos pulsos modulados, porém, com um defasamento de 180° entre eles. A frequência e a largura de pulso dos sinais gerados são ajustadas com o uso de componentes periféricos adequados conectados aos pinos responsáveis por produzir tal ajuste.

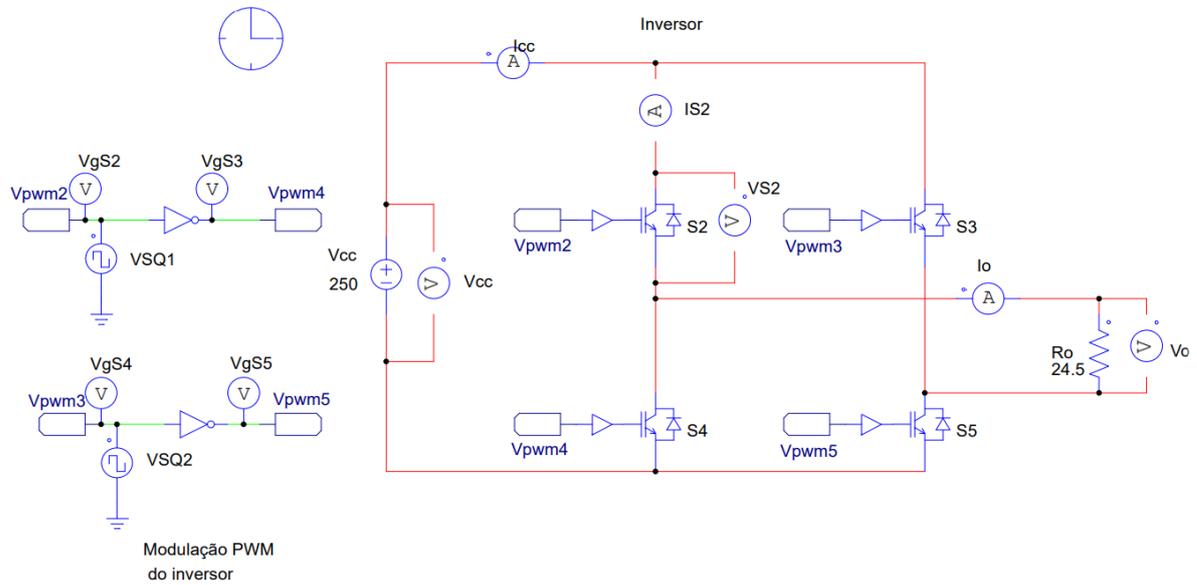
Como os pulsos em cada braço de chaves do inversor devem ser assimétricos e complementares, os sinais resultantes do CI SG3525 podem ser direcionados para o circuito integrado IR21844, o qual usa a técnica de *bootstrap*. O mesmo gera sinais complementares, um em cada uma de suas saídas, dessa forma, sendo capaz de acionar um braço de chaves. Além disso, esse circuito integrado permite a regulação de um tempo morto, evitando que as chaves de um mesmo braço entrem em condução no mesmo instante de tempo ocasionando um curto-circuito.

Desse modo, o controle em malha aberta do inversor utilizado no projeto experimental se dará por um circuito auxiliar baseado na operação em conjunto dos circuitos integrados SG3525 e IR21844.

4.5 Resultados de Simulação

O esquemático do circuito inversor montado está apresentado na Figura 53, o mesmo foi simulado no programa PSIM. Foram utilizados os valores calculados no dimensionamento realizado na seção 4.4.

Figura 53 – Esquemático simulado no PSIM.

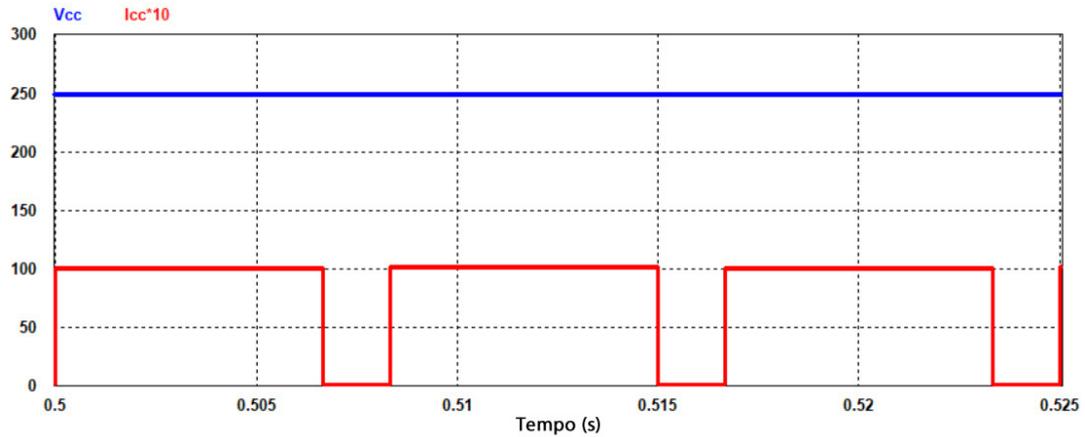


Fonte: O próprio autor utilizando o programa PSIM.

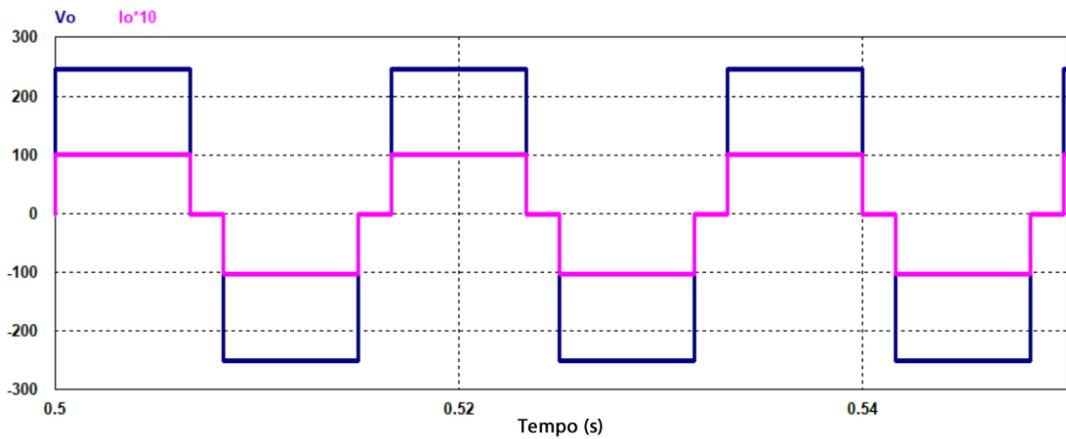
4.5.1 Formas de onda em regime permanente

A Figura 55(a) mostra a tensão e corrente na entrada do inversor, o sinal de tensão é contínuo enquanto o sinal de corrente é pulsado, de acordo com o funcionamento das chaves. Já a Figura 55(b) apresenta os sinais de saída do inversor, onde observa-se a característica de onda quadrada de três níveis explicado em seções anteriores para ambos os sinais.

Figura 54 – Sinais de tensão e corrente: (a) na entrada e (b) na saída.



(a)

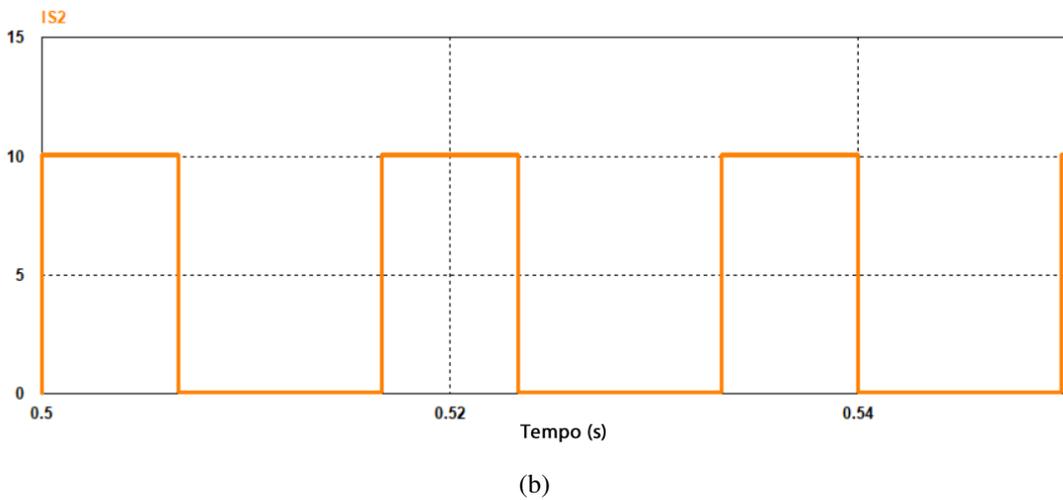
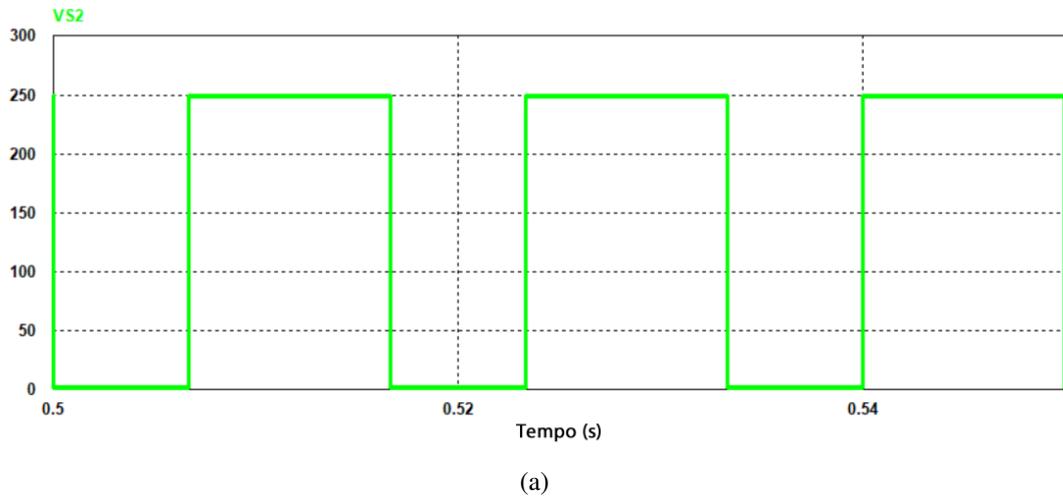


(b)

Fonte: O próprio autor utilizando o programa PSIM.

Para verificar o comportamento das chaves de potência foram retiradas as formas de onda da chave S2. A Figura 55 apresenta os sinais de tensão e corrente na mesma. Nota-se que a tensão máxima sobre as chaves atinge o valor da tensão de entrada, como esperado em teoria.

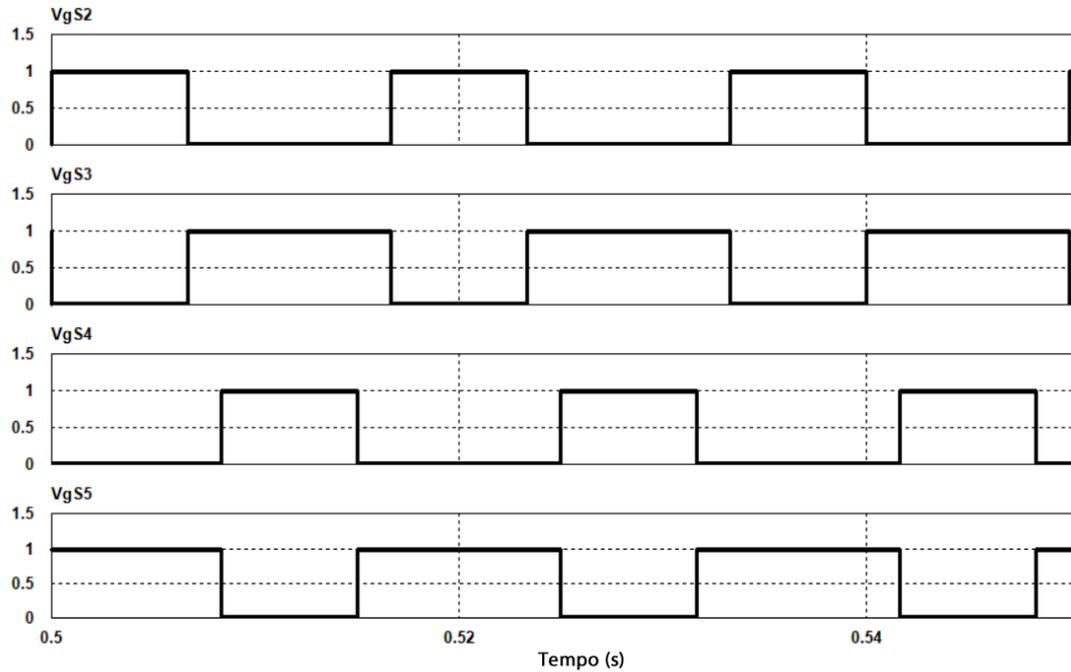
Figura 55 – Sinais na chave S2: (a) tensão e (b) corrente.



Fonte: O próprio autor utilizando o programa PSIM.

Por fim, foram verificados os sinais PWM de controle gerados para acionamento das chaves, como mostrado na Figura 56, os quais possuem as características descritas na seção 4.2.3.

Figura 56 – Sinais de controle das chaves S2-S5



Fonte: O próprio autor utilizando o programa PSIM.

4.6 Verificação de Resultados Teóricos e Simulados

Os valores obtidos via simulação e os valores calculados no Exemplo de Projeto deste capítulo estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 – Comparação de resultados teóricos e simulados.

Grandeza	Valor Teórico	Valor Simulado
V_{cc}	250 V	250 V
I_{cc}	8,42 A	8,03 A
V_{Orms}	220 V	222 V
I_{Orms}	9,1 A	9,1 A
$VS2_{max}$	250 V	250 V
$IS2_{pico}$	10,33 A	10,11 A
$IS2_{md}$	4,0 A	4,04 A

Fonte: O próprio autor.

4.7 Considerações

Neste capítulo foram apresentadas as análises qualitativa, quantitativa e exemplo de projeto para o segundo estágio de processamento, um inversor ponte completa do sistema proposto. Com o estudo demonstrado e a simulação do circuito dimensionado, foi possível analisar a viabilidade de se utilizar o controle em malha aberta, haja a vista a tensão de entrada, V_{cc} , ser regulada pelo estágio anterior. Dessa forma, também sendo possível obter o formato de onda quadrada de três níveis, formato que se mostra suficiente para a alimentação de cargas lineares.

Os resultados obtidos via simulação comprovaram o que foi exposto em teoria, com valores muito próximo ou iguais ao calculados no Exemplo de Projeto, como mostram as formas de onda exibidas na seção 4.5 e a Tabela 7. Ademais, o circuito de controle se mostrou eficaz, regulando a tensão de saída no valor escolhido no dimensionamento sem grandes variações. Dessa forma, o inversor com as características apresentadas se mostra eficaz para a aplicação proposta neste trabalho.

5 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS INTEGRANDO AMBOS OS ESTÁGIOS

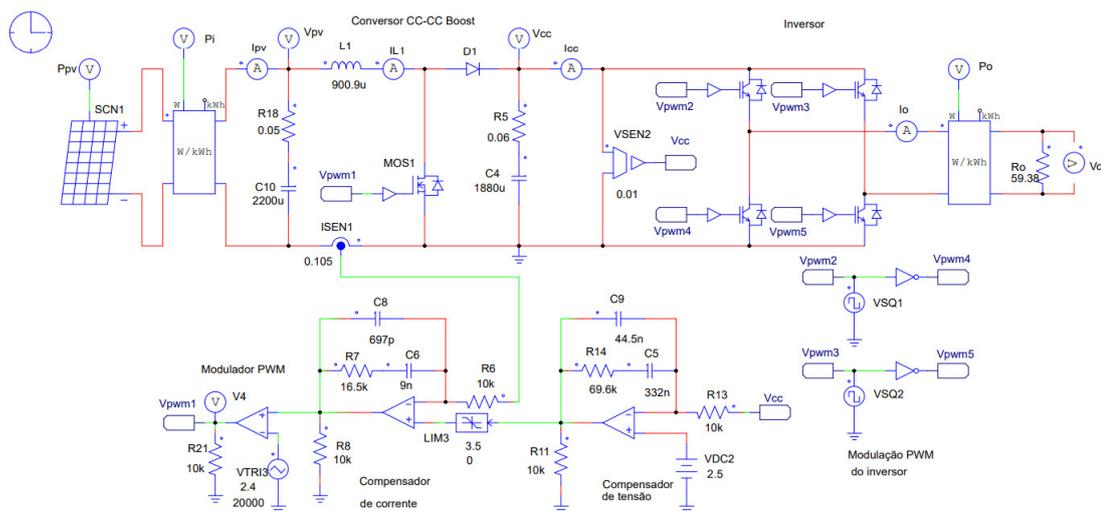
5.1 Introdução

Primeiramente, os circuitos dimensionados nos capítulos anteriores para o projeto deste trabalho foram integrados e testados via simulação através do programa PSIM. Foram verificados gráficos de suas principais formas de onda e, após a validação do mesmo com os resultados obtidos, o sistema foi implementado de forma prática e testes em bancada foram realizados em laboratório. Nos testes experimentais o circuito foi utilizado para alimentar uma panela elétrica de pressão com capacidade de 4 L e potência de 800 W. Os resultados obtidos por simulação e através dos procedimentos experimentais serão exibidos e discutidos neste capítulo.

5.2 Resultados de Simulação Integrando Ambos os Estágios de Processamento

Os dois estágios de processamento dimensionados foram integrados e simulados no PSIM. A fonte de tensão CC foi substituída por um modelo de módulos solares, o qual tinha como características tensão máxima de 120,8 V e corrente máxima de 16,22 A, atingindo uma potência máxima de até 1959 W.

Figura 57 – Esquemático simulado no PSIM.

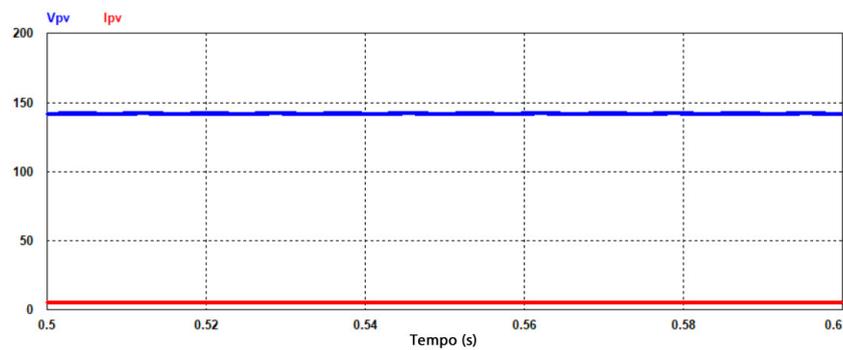


Fonte: O próprio autor utilizando o programa PSIM.

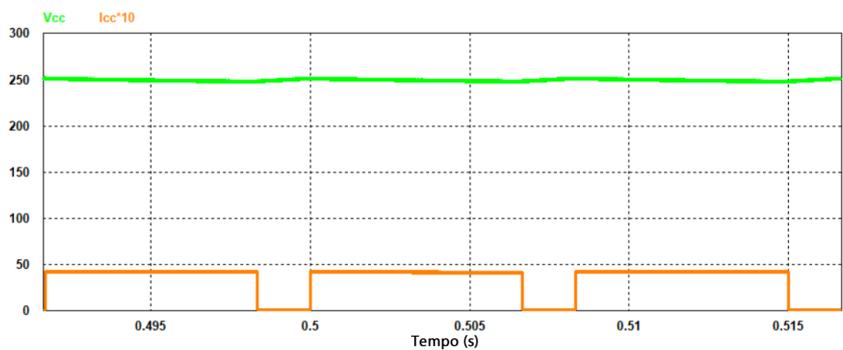
5.2.1 Formas de onda em regime permanente

Na Figura 59(a) observa-se a tensão e a corrente de entrada do conversor. Nas Figura 59(b) tem-se a tensão e a corrente (multiplicada por 10) no barramento CC, e na Figura 59(c) é mostrado o gráfico da tensão e da corrente obtidos na saída do processador. Pode-se concluir que o funcionamento do processador ao integrar os dois estágios acontece da forma esperada, já que seus principais gráficos se comportam como deveriam em teoria, atingindo valores muito próximo aos estipulados nas especificações e considerações do exemplo de projeto.

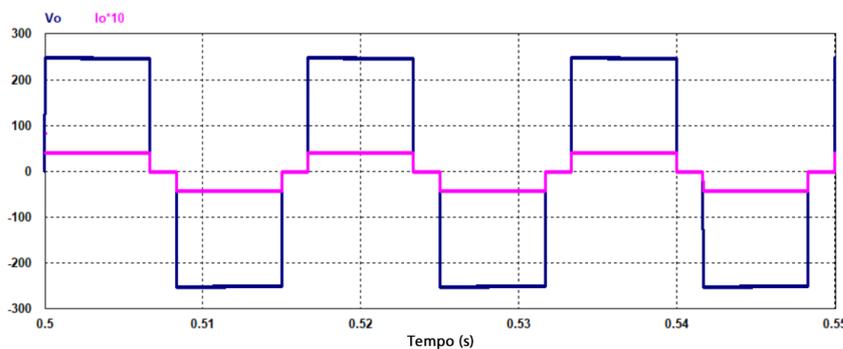
Figura 58 – Sinais de tensão e corrente: (a) na entrada, (b) no barramento CC e (c) na saída.



(a)



(b)



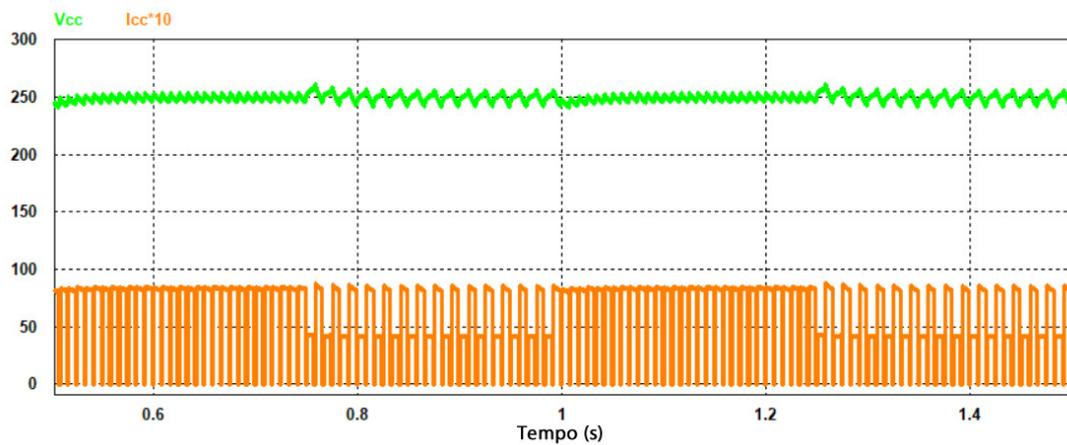
(c)

Fonte: O próprio autor utilizando o programa PSIM.

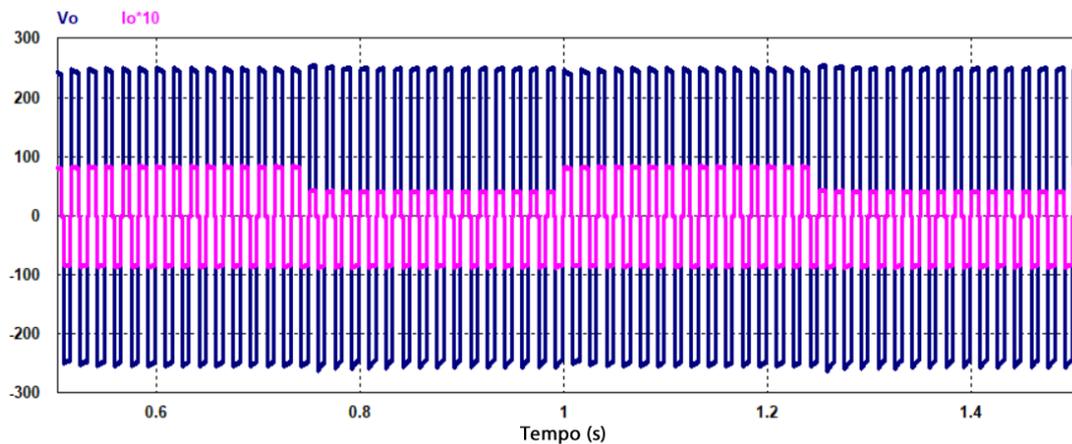
5.2.2 Formas de onda em regime transitório

Um degrau de carga de 50% a 100% foi realizado para verificar o comportamento do processador de energia elétrica em regime dinâmico, e as principais formas de onda encontram-se dispostas na Figura 59. Observa-se que a tensão no barramento CC está sendo regulada em 250 V, com um baixo tempo de acomodação, enquanto a corrente se altera e, de forma análoga, acontece com os sinais de saída.

Figura 59 – Sinais de tensão e corrente durante degrau de carga: (a) no barramento CC e (b) na saída.



(a)

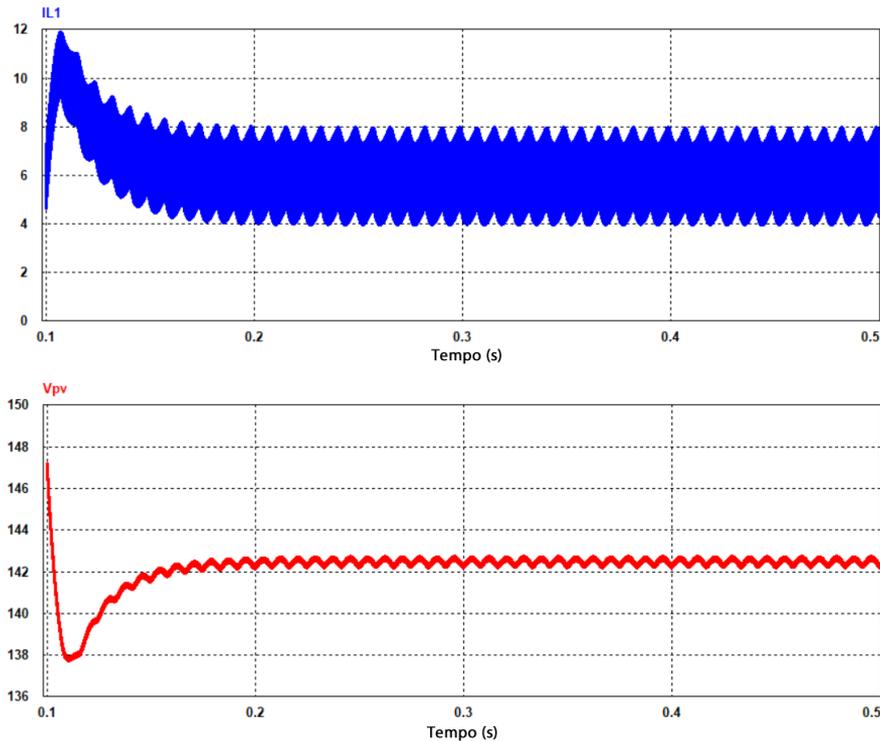


(b)

Fonte: O próprio autor utilizando o programa PSIM.

O transitório de partida também foi analisado, observando-se os sinais de tensão de entrada e corrente através do indutor, como mostra a Figura 60. Nota-se que o sistema leva um tempo próximo a 200 ms para entrar em regime permanente.

Figura 60 – Tensão de entrada e corrente através do indutor em regime transitório de partida.



Fonte: O próprio autor utilizando o programa PSIM.

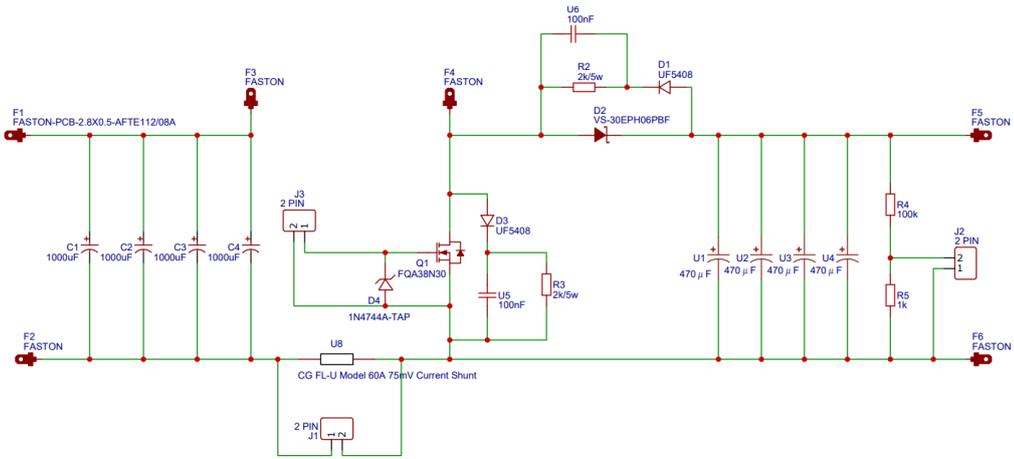
5.3 Resultados Experimentais Integrando Ambos os Estágios de Processamento

O conversor *Boost* a ser utilizado foi totalmente implementado em laboratório, desde o *layout* da placa de circuito impresso (PCB) até sua impressão e montagem com os componentes. Enquanto o inversor foi adaptado de um projeto já existente elaborado por APOLINÁRIO (2017), as chaves de potência e alguns periféricos do circuito de controle foram substituídos para que o mesmo ficasse de acordo com os valores definidos para este projeto.

5.3.1 Arquitetura integrada mostrando os circuitos de potência e controle

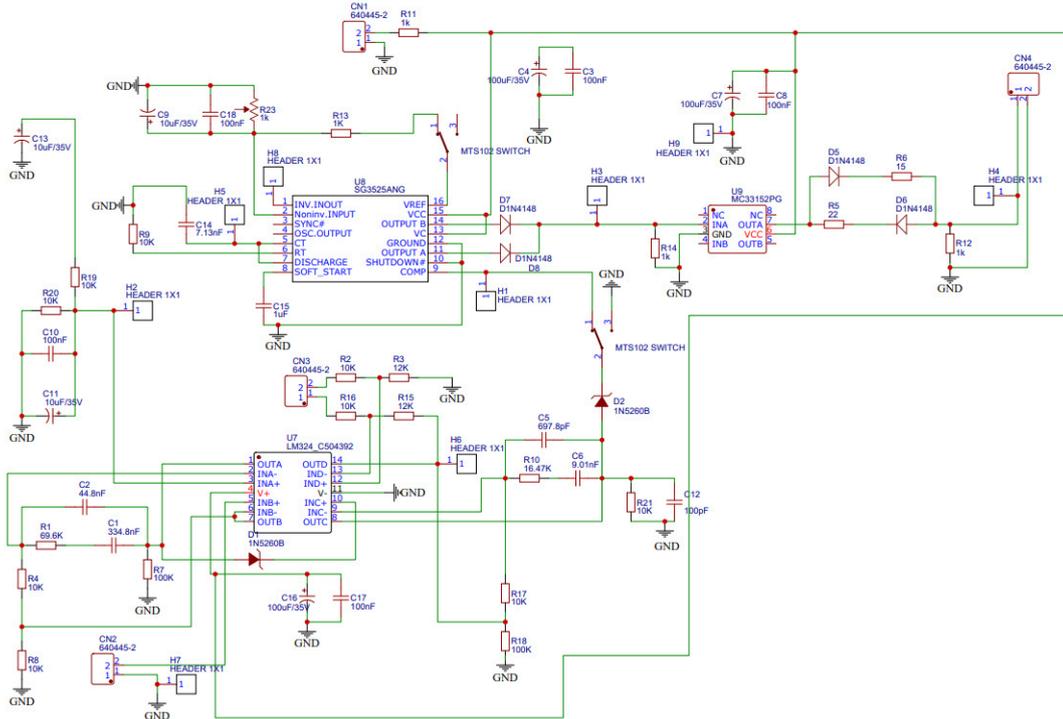
As placas de circuito impresso do conversor CC-CC *Boost* projetado foram elaboradas a partir da plataforma *online EasyEDA*. A Figura 61 apresenta o esquemático do circuito de potência do conversor, e a Figura 62 mostra o esquemático do circuito de controle, enquanto seus respectivos *layouts* encontram-se nas Figuras 63 e 64. No Apêndice A estão presentes as listas dos componentes comerciais utilizados.

Figura 61 – Esquemático do circuito de potência do conversor CC-CC Boost.



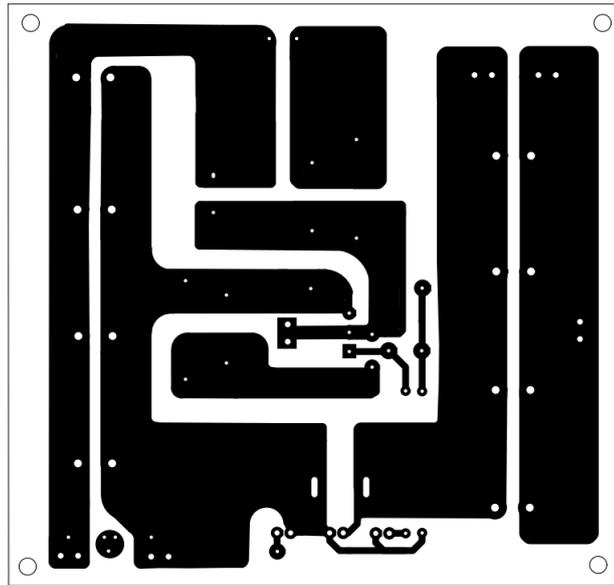
Fonte: O próprio autor utilizando o *EasyEDA*.

Figura 62 – Esquemático do circuito de controle do conversor CC-CC Boost.



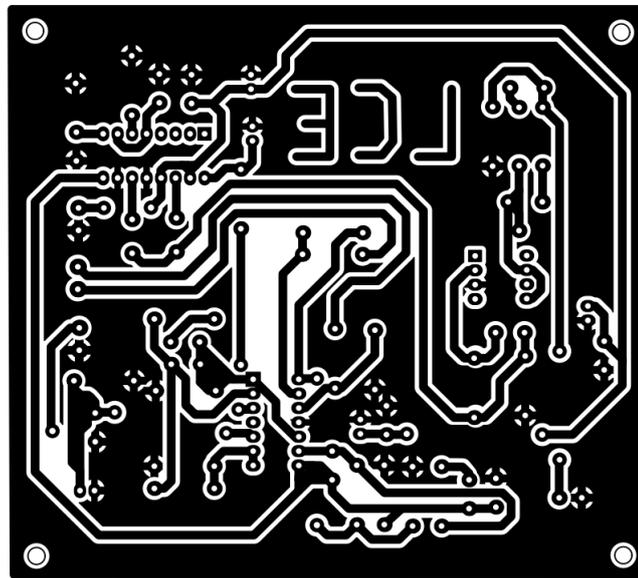
Fonte: O próprio autor utilizando o *EasyEDA*.

Figura 63 – *Layout* PCB do circuito de potência do conversor CC-CC *Boost*.



Fonte: O próprio autor utilizando o *EasyEDA*.

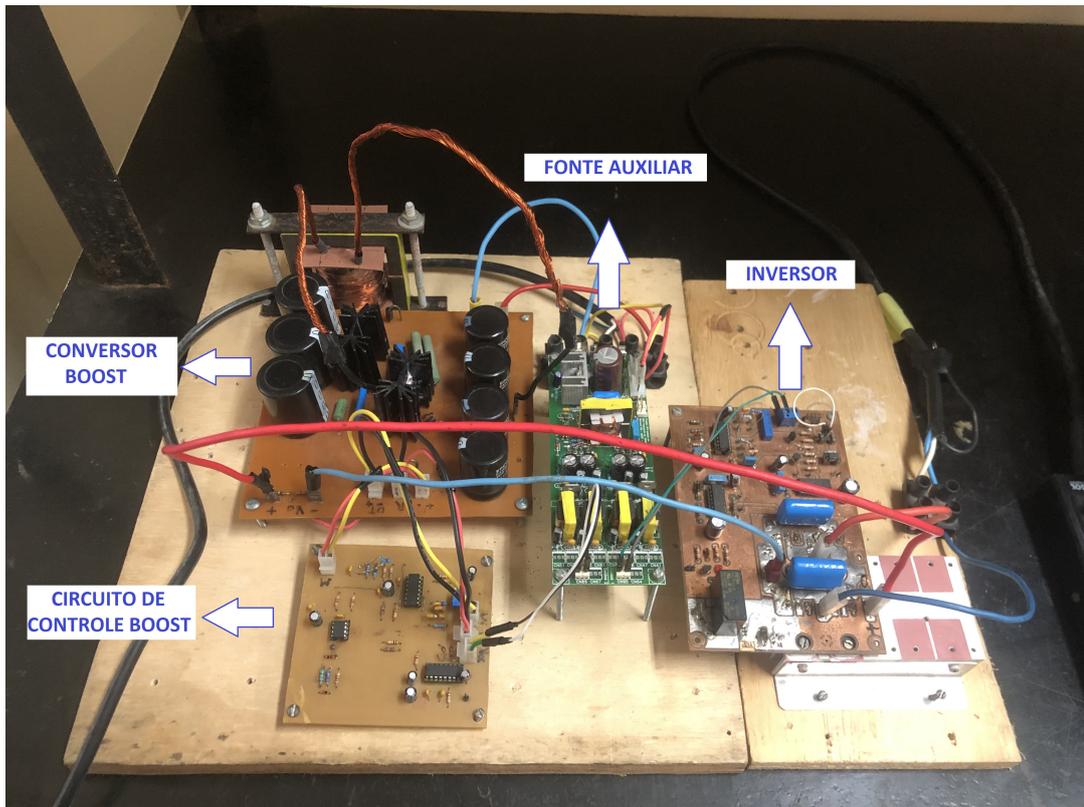
Figura 64 – *Layout* PCB do circuito de controle do conversor CC-CC *Boost*.



Fonte: O próprio autor utilizando o *EasyEDA*.

Na imagem da Figura 65 pode-se ver o circuito montado em bancada contendo o conversor CC-CC *Boost*, o circuito de controle do mesmo e o inversor integrados. Uma fonte auxiliar com topologia *flyback* foi utilizada para alimentar os circuitos de controle de ambos os conversores. Já na Figura 66, é visto o circuito conectado à panela utilizada como carga.

Figura 65 – Circuito completo montado em bancada.



Fonte: O próprio autor.

Figura 66 – Circuito completo montado em bancada com carga.



Fonte: O próprio autor.

Para a alimentação do circuito projetado, foi utilizada uma fonte de tensão CC

configurada para emular os painéis fotovoltaicos. A fonte em questão é do fabricante *Magna-Power Electronics*, da série TS e modelo 3U, como mostra a Figura 67.

Figura 67 – Fonte utilizada para emular painéis.

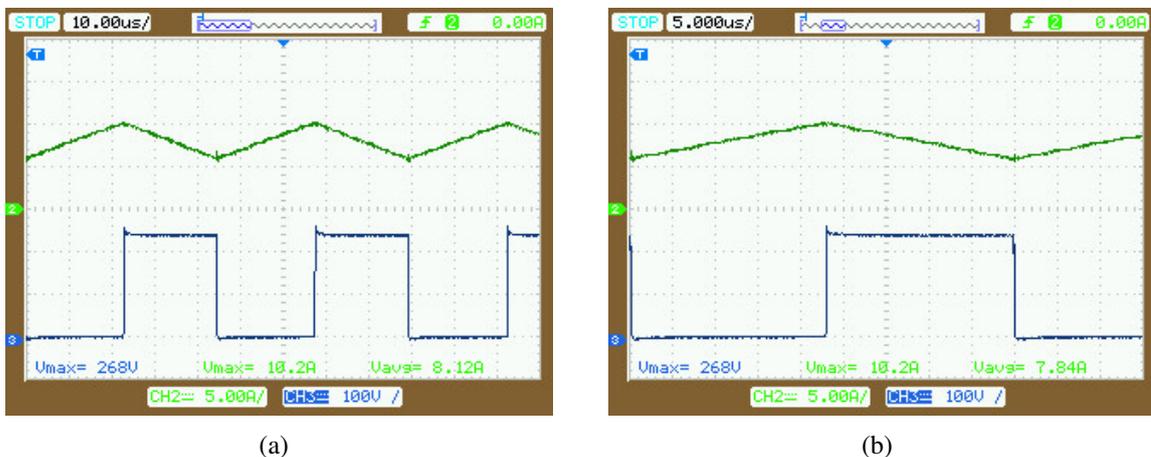


Fonte: O próprio autor.

5.3.2 Formas de onda em regime permanente com carga

As principais formas de onda em regime permanente, já analisadas por simulação, também foram coletadas de forma prática com a utilização do osciloscópio da fabricante *Agilent Technologies* modelo DSO1014A. A formas de onda obtidas estão apresentadas nas Figuras 68, 69 e 70. Cada figura contém duas imagens da mesma forma, sendo uma em uma escala maior e a outra em uma escala menor. Percebe-se que os sinais obtidos se comportam com as características esperadas e apresentam poucas distorções.

Figura 68 – Tensão sobre a chave, S1, e corrente através do indutor, L1.

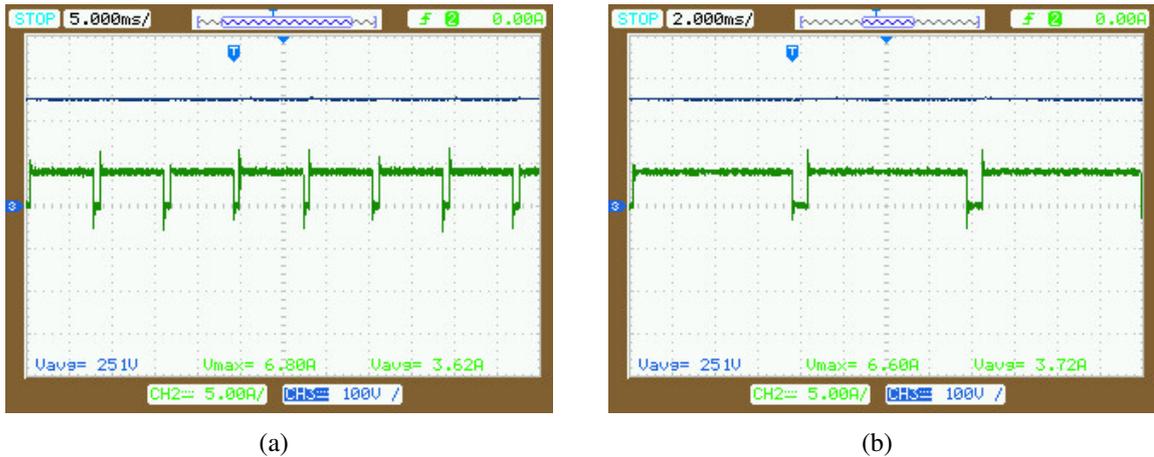


(a)

(b)

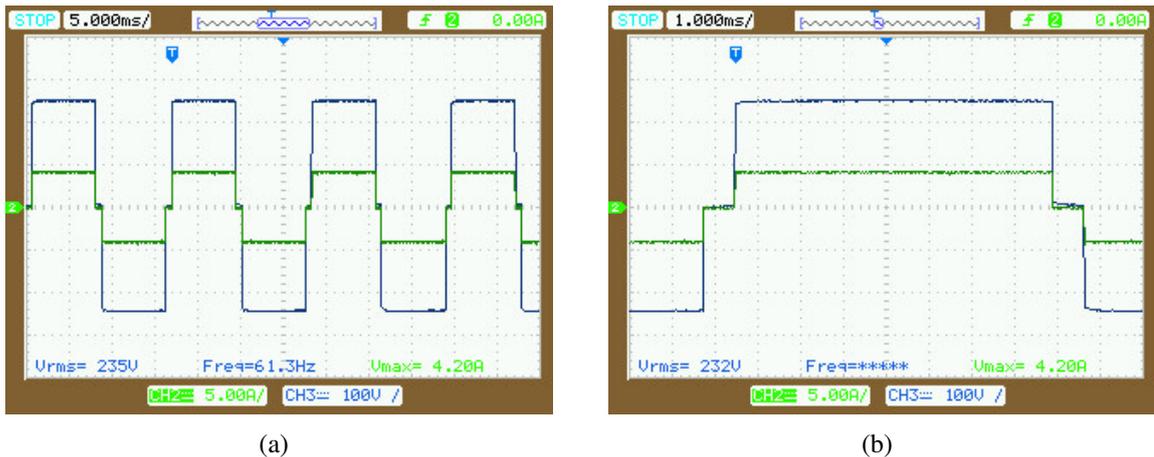
Fonte: O próprio autor.

Figura 69 – Tensão e corrente no barramento CC.



Fonte: O próprio autor.

Figura 70 – Tensão e corrente na saída.



Fonte: O próprio autor.

5.3.3 Formas de onda em regime transitório com carga

O transitório de partida também foi observado de forma experimental, para as formas de onda da tensão de entrada, V_{pv} , e corrente através do indutor, I_{L1} . O mesmo é apresentado na Figura 71, onde nota-se que existe um tempo maior em relação a simulação para se atingir o regime permanente, nesse caso, cerca de 1,5 s.

Um detalhe importante percebido durante os testes em bancada foi o fato de que o conversor *Boost* só iniciava seu chaveamento se o circuito de controle, com a utilização do modo *soft start* no CI SG3525, fosse acionado ao mesmo tempo que o conversor. Em síntese, a conclusão foi de que, com a utilização do *soft start*, os capacitores (C_{pv}) do barramento de entrada tinham tempo suficiente para armazenar carga e o chaveamento só iniciava com o

conversor sendo alimentado pela tensão do barramento, garantindo o correto funcionamento do mesmo. Caso contrário, enquanto esses capacitores carregavam, o CI SG3525 enviaria os pulsos com máxima razão cíclica para a chave, já que a tensão sobre a saída do *Boost* seria nula, e a mesma se manteria aberta, não chegando a dar a partida do conversor.

Figura 71 – Tensão e corrente de entrada em regime transitório de partida.



Fonte: O próprio autor utilizando o programa PSIM.

5.4 Considerações

Os resultados finais integrando os dois estágios de processamento obtidos com simulação e com implementação prática foram apresentados neste capítulo. O sistema completo se mostrou eficaz para alimentar uma carga até 2 kW nos testes através de simulação, e de forma prática, foi possível ser verificado seu funcionamento até 800 W. Das duas maneiras, o controle foi capaz de regular bem a tensão sobre o barramento CC na saída do conversor *Boost*, que resulta em ser a tensão de entrada do inversor.

As formas de onda coletadas com o osciloscópio e seus respectivos valores foram condizentes com o observado para as medições realizadas via simulação. Porém, é nítido que melhorias podem ser feitas para se obter valores mais precisos em relação aos teóricos, além de reduzir alguns pequenos ruídos que se mostraram presentes nas medições com o osciloscópio.

Dessa maneira, fica clara a funcionalidade do sistema para a aplicação proposta, bem como a viabilidade de implementação do mesmo sendo realizadas as devidas melhorias em relação aos componentes físicos do protótipo.

6 CONCLUSÃO GERAL

No presente trabalho foi apresentada uma proposta de sistema de processamento de energia fotovoltaica possuindo como finalidade a aplicação em projetos sociais voltados à mitigação da dificuldade de preparo de alimentos comumente enfrentada por pessoas financeiramente carentes. Assim como foi realizada a análise, o dimensionamento e a implementação prática do processador de energia proposto, onde os resultados obtidos se demonstraram satisfatórios e puderam validar a aplicabilidade do mesmo.

O dimensionamento do sistema foi viável utilizando-se teorias básicas da Eletrônica de Potência, com o uso de topologias clássicas tais como conversor CC-CC *Boost* e conversor CC-CA, inversor, assim como de técnicas de controle por PWM. Em relação a construção física do protótipo, pode-se dizer que o nível de dificuldade foi relativamente baixo, sendo possível chegar em um modelo funcional do protótipo experimental em laboratório e a utilização de poucos componentes eletrônicos, os quais podem ser facilmente encontrados no mercado nacional. Enquanto que na fase de experimentação prática, os testes em bancada precisaram ser minuciosos, principalmente, devido a necessidade de testes com fontes alimentadas pela rede elétrica, as quais, muitas vezes, não funcionam como fonte de corrente que é uma característica trivial dos módulos fotovoltaicos. Pelo fato de o sistema ser projetado considerando-se a fonte de alimentação sendo os módulos, o uso de fontes CC alimentadas pela rede se tornaram um empecilho devido ao transiente de partida gerado como consequência.

Todavia, os resultados obtidos se demonstraram bastante adequados, já que os valores de tensão e corrente medidos durante os testes práticos foram muito próximos do esperado em teoria. Dessa maneira, sendo possível alimentar uma panela elétrica de pressão com potência de 800 W como carga. A panela utilizada para testes foi escolhida devido a sua funcionalidade para cozimento de uma ampla variedade de alimentos. Com os demais exemplos de eletrodomésticos apontados na seção 2.9.1, conclui-se que na utilização do sistema projetado, o qual tem uma potência ativa de 2 kW, seria possível alimentar várias opções diferentes de eletrodomésticos úteis para a aplicação do projeto.

O sistema proposto nesta monografia, trata-se de um sistema sem baterias com a finalidade de fornecer energia elétrica à panela de pressão enquanto tiver radiação solar adequada para cocção de alimentos. Dado o sistema com redundância de energia elétrica proporcionado pelos módulos fotovoltaicos, não é necessário a incorporação do algoritmo de MPPT no circuito de controle. Então, basta um controle de malha fechada clássica, tal como foi implementado

para o conversor *Boost*, o qual regula a corrente drenada dos módulos fotovoltaicos e a tensão do barramento CC.

Portanto, as etapas teórica e experimental do projeto puderam definí-lo com uma solução de relativa baixa complexidade e robustez, além de fácil implementação, sendo suficiente para a finalidade a qual se propõe. Assim, o sistema de processamento sugerido tem viabilidade para ser desenvolvido, haja vista sua simplicidade e eficácia em alimentar eletrodomésticos de uso culinário, e aplicado em cozinhas comunitárias que podem ser concretizadas por projetos sociais financiados com recursos de programas sociais de governos e/ou de iniciativa privada mediante incentivo fiscal.

Recomendações para trabalhos futuros:

- Otimização de rendimento do sistema proposto;
- Estudo comparativo do sistema proposto nesta monografia com outras opções topológicas, tendo como foco a simplicidade, custo e rendimento;
- Estudo de sistemas Off-grid não isolados e isolados com armazenadores de energia (baterias). Nestes sistemas deve ser incorporado algoritmo de MPPT;
- Estudar um sistema Off-grid com inversor bifásico dado os diferentes níveis de tensão eficaz presentes no território brasileiro, como, por exemplo, 110V e 220V;
- Incorporar a energia eólica de pequeno porte aos sistemas citados anteriormente.

7 REFERÊNCIAS

JOSEN, Geoffrey G., BOUAMANE, Loubna. **Power from Sunshine: A Business History of Solar Energy**. Harvard Business School Working Paper, No. 12-105, 2012.

JÚNIOR, Orlando M., SOUZA, Celso C.. **Aproveitamento fotovoltaico, análise comparativa entre Brasil e Alemanha**.

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. <https://www.absolar.org.br/> - Acesso em: 20/06/2022.

IEA - International Energy Agency. **Renewable Power is Set to Break Another Alobal Record in 2022 Despite Headwinds From Higher Costs and Supply Chain Bottlenecks**. Disponível em: <https://www.iea.org/news/renewable-power-is-set-to-break-another-global-record-in-2022-despite-headwinds-from-higher-costs-and-supply-chain-bottlenecks> - Acesso em: 20/06/2022.

OTTONELLI, Janaina; CRUZ, Ulysses de B.; ROSA, Adriano C.; ANDRADE, José C. S. **Oportunidades e Desafios do Setor de Energia Solar Fotovoltaica**. Rev. Econ. NE, Fortaleza, v. 52, n. 4, p. 8-26, out./dez., 2021.

REN21, 2021. **The Renewables 2022 Global Status Report**. Páginas 22 e 212.

GRUPO ENERGISA (Mato Grosso do Sul). **ILUMINA PANTANAL**. Disponível em: <http://www.grupoenergisa.com.br/Paginas/inovacao-e-sustentabilidade/sustentabilidade/meio-ambiente/ilumina-pantanal.aspx>. Acesso em: 10/07/2022.

ABSOLAR (São Paulo). Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (org.). **Projeto de moradia do governo de Goiás ganha destaque**. 2017. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/projeto-de-moradia-do-governo-de-goias-ganha-destaque/>. Acesso em: 10/07/2022.

BRASIL. Governo Federal. Ministério de Minas e Energia (org.). **Programa Mais Luz para a Amazônia**. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/copy2_of_programa-de-eletrificacao-rural. Acesso em: 10/07/2022.

UFPI (Piauí). **Projeto da UFPI instala sistema de bombeamento de água no semiárido piauiense usando energia solar**. 2019. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/incentivos-a-energia-solar/governo-cria-programa-de-incentivo-a-geracao-de-energia-solar-progd.html>. Acesso em: 10/07/2022.

BASCOPE, René P. T., ALENCAR, Juliana C., GUERRA, Lucca L. C., FILHO, Raniere P. M., MOTA, Emanuel A. **Processador de Energia Fotovoltaica de Baixo Custo para Alimentar Eletrodomésticos de uma Cozinha Comunitária**. IX Congresso Brasileiro de Energia Solar. Florianópolis, 23 a 27 de maio de 2022.

ONS - ORGANIZA O NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. <http://www.ons.org.br/> - Acesso em: 20/06/2022.

LIMA, Bruna; RIOS, Alan. **Gás de cozinha aumenta quase 30% no ano; botijão chega a R\$ 135**. Disponível em: <https://noticias.r7.com/brasil/gas-de-cozinha-aumenta-quase-30-no-ano-botijao-chega-a-r-135-01102021> - Acesso em: 25/06/2022.

BRAZIL, Vital A. O.; ARAÚJO, Paulo M. M.; TEIXEIRA, Ol vio; LEÃO, Ana Claudia A.; SILVA, Maria S.; D RIA, Mary B. **Fogão Solar Como Mecanismo de Apropria o de Energia Pela Popula o de Baixa Renda em Sergipe**. Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 2008.

SHAH, Maqsood A.; ASHARAF, O. **Consumer preferences and market potential of solar cooking with emphasis on SOLPAC C50**. 2011.

SCI - SOLAR COOKER INTERNATIONAL, 2022. <https://www.solarcookers.org/> - Acesso em 25/06/2022.

SANTOS, Camila V.; FERRARETO, Tânia R. G. **Fogão Solar: Ferramenta Viável Para Cozimento de Alimentos a Partir de Materiais de Baixo Custo**. R. Eletr. de Extensão, ISSN 1807-0221 Florianópolis, v. 13, n. 21, p.97-104, 2016.

FIOCRUZ - Fundação Oswaldo Cruz, 2022. <https://portal.fiocruz.br/> - Acesso em: 25/06/2022.

BRAINLY, 2021. Disponível em: <https://brainly.com.br/tarefa/41596443> - Acesso em: 25/06/2022.

BISWAS, Multan; AZIM, Shafiu; SAHA, Tonmoy K.; ZOBAYER, Umama; URMI, Monalisa C. **Towards Implementation of Smart Grid: An Updated Review on Electrical Energy Storage Systems.** 2013.

BRIVIO, Claudio. **Battery Energy Storage Systems: Modelling, Applications and Design Criteria.** Dissertação de Doutorado em Engenharia Elétrica - POLITECNICO DI MILANO, 2017.

DEMETINO, Gleydson G. **Sistema de Aquisição de Dados de Baterias de Chumbo-Ácido.** Dissertação de Mestrado em Mecatrônica - UFBA, 2014.

MCCLUER, Stephen. **Battery Technology for Data Centers and Network Rooms: Lead-Acid Battery Options.** Schneider Electric, 2011.

FALQUETO, Juliana B. **Desenvolvimento de Uma Nova Rota de Síntese Hidrotermal Assistida por Micro-ondas Para a Obtenção de Nanopartículas de Espinélios de Manganês e Lítio Dopados com Alumínio para Aplicação em Baterias de Íons Lítio.** Dissertação de Mestrado em Química - UFSCar, 2017.

MICHELINE, Aldo. **Bateria Recarregáveis: Para Equipamentos Portáteis.** 1ª Edição. São Paulo: S.T.A. Sistemas e Tecnologia Aplicada Ind. Com. Ltda, 2017.

STA - Sistemas e Tecnologia Aplicada. **Manual das Baterias Recarregáveis, Pilhas e Carregadores.** 2017.

IRENA - International Renewable Energy Agency. **Renewable Capacity Statics 2021.** Abu Dhabi, 2021.

BOYLESTAD, Robert; NASHELESKY, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 11ª Edição. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda, 2013.

LACERDA, Vinícius S.; ABREU, Ródnei A.; MATTOS, Filipe C.; FERREIRA, André A. **Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede Elétrica, Único Estágio, Com Rastreamento do Ponto de Máxima Potência**. XVIII Congresso Brasileiro de Automática. Bonito-MS, 2010.

SOBREIRA, Pedro de A. **Conversor CC-CC Boost Entrelaçado Aplicado no Processamento da Energia de Arranjo Solar Fotovoltaico**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - UFJF, 2011.

BERWANGER, Diego. **Desenvolvimento de Um Sistema Fotovoltaico com Rastreador Solar de Um Eixo Instalado Em Uma Propriedade Rural Conectado a Rede**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura - UNIOESTE, 2019.

SEGUEL, Júnior I. L. **Projeto de Um Sistema Fotovoltaico Autônomo de Suprimento de Energia Usando Técnica MPPT e Controle Digital**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - UFMG, 2009.

TONIN, F. S. **Caracterização de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica na Cidade de Curitiba**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - UTFPR, Curitiba-PR, 2017.

FADIGAS, Eliane A. **Energia Solar Fotovoltaica : Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica**. GEPEA – Grupo de Energia Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2019.

NEOSOLAR. <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/energia-solar-fotovoltaica> - Acessado em 26/06/2022.

XIE, Fan; LUO, Zhenxiong; QIU, Dongyuan; ZHANG, Bo; CHEN, Yanfeng; HUANG, Liying.

Study on a Simplified Structure of a Two-Stage Grid-Connected Photovoltaic System for Parameter Design Optimization. Energies 2019, 12, 2193. June 2019.

JAIN, Sachin; AGARWAL, Vivek. **A Single-Stage Grid Connected Inverter Topology for Solar PV Systems With Maximum Power Point Tracking.** IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, No. 5, September 2007.

2016 Wang, W.; Ruan, R., 2016. **A Modified Reference of an Intermediate Bus Capacitor Voltage-Based Second-Harmonic Current Reduction Method for a Standalone Photovoltaic Power System.** IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31, No. 8, pp. 5562-5573.

HART, Daniel W. **Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos.** Tradução: Romeu Abdo. Revisão Técnica: Antônio Pertence Júnior. Porto Alegre: AMGH, 2012.

RASHID, Rashid. **Eletrônica de Potência: dispositivo, circuito e aplicações.** 4ª Edição. Pearson, 30 setembro 2015.

BASCOPE, René P. T. **Conversores CC-CC ZVS-PWM Duplo Forward com Acoplamento Magnético.** Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica - UFSC, 2000.

BARBI, Ivo; FONT, Carlos H. I.; ALVES, Ricardo L. **Projeto Físico de Indutores e Transformadores.** Instituto de Eletrônica de Potência - UFSC, 2002.

MCLYMAN, Colonel W. **Transformer and Inductor Design Handbook.** 4ª edição. CRC Press, 19 abril 2016.

BASCOPE, René P. T. **Notas de Aula.** Departamento de Engenharia Elétrica - UFC, 2021.

ON SEMICONDUCTOR - **Catálogo: FQA38N30 N-Channel QFET MOSFET. 2014.** Disponível em: https://br.mouser.com/datasheet/2/308/1/FQA38N30_D-2313643.pdf - Acesso em: 26/06/2022.

VISHAY SEMICONDUCTOS - **Catálogo: Hyperfast Rectifier, 30 A FRED Pt, 2018**. Disponível em: https://br.mouser.com/datasheet/2/427/vs_30eph06h-1769459.pdf - Acesso em: 26/06/2022.

APOLINÁRIO, Mário F. **Nobreak Dupla Conversão Monofásico Isolado em Alta Frequência com Tensão de Entrada Bivolt e Potência de 1kVA, Baseado no Conceito de Circuito Multiportas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - UFC, 2017.

APÊNDICE A – LISTA DE COMPONENTES COMERCIAIS DO CONVERSOR CC-CC *BOOST*

As Figuras 72 e 73 apresentam as tabelas com a listagem de todos os componentes comerciais utilizados para a implementação física do circuito de potência e do controle do conversor CC-CC *Boost*.

Figura 72 – Listagem dos componentes comerciais utilizados no circuito de potência do conversor *Boost*

Referência	Descrição	Grandezas	Quantidade
C1-C4	Capacitor eletrolítico	1000 uF / 250V	4
Q1	N-Channel Mosfet - FQA38N30	38,4 A / 300 V	1
D1-D3	Diodo Retificador - UF5408	3 A / 500 V	1
D2	Diodo Retificador - VS-30EPH06HN3	30 A / 600 V	1
D4	Diodo Zener - 1N4744A	17mA / 15V	1
U1-U4	Capacitor eletrolítico	470 uF / 400V	4
U5-U6	Capacitor cerâmico	100 nF	2
R2-R3	Resistor	2 kΩ / 5 W	2
U8	Resistor shunt - CG FL-U Model	40 A / 75mV	1
R4	Resistor	100 kΩ	1
R5	Resistor	1 kΩ	1

Fonte: O próprio autor.

Figura 73 – Listagem dos componentes comerciais utilizados no circuito de controle do conversor *Boost*

Referência	Descrição	Grandezas	Quantidade
U7	CI LM 324	-	1
U8	CI SG3525	-	1
U9	MC33152 <i>Driver</i>	-	1
C1	Capacitor cerâmico	330 nF	1
C2	Capacitor cerâmico	40 nF	1
C3	Capacitor cerâmico	100 nF	1
C4	Capacitor eletrolítico	100 uF / 35V	1
C5	Capacitor cerâmico	690 pF	1
C6	Capacitor cerâmico	6,8 nF	1
C7	Capacitor eletrolítico	100 uF / 35 V	1
C8	Capacitor cerâmico	100 nF	1
C9	Capacitor eletrolítico	10 uF / 35 V	1
C10	Capacitor cerâmico	100 nF	1
C11	Capacitor eletrolítico	10 uF / 35 V	1
C13	Capacitor eletrolítico	10 uF / 35 V	1
C14	Capacitor cerâmico	6,8 nF	1
C15	Capacitor cerâmico	10 uF	1
C16	Capacitor eletrolítico	100 uF / 35 V	1
C17	Capacitor cerâmico	100 nF	1
C18	Capacitor cerâmico	100 nF	1
C19	Capacitor cerâmico	10 uF	1
R1	Resistor	70 Ω	1
R2	Resistor	10 k Ω	1
R3	Resistor	12 k Ω	1
R4	Resistor	10 k Ω	1
R5	Resistor	22 Ω	1
R6	Resistor	15 Ω	1
R7	Resistor	100 k Ω	1
R8, R9	Resistor	10 k Ω	2
R10	Resistor	17 k Ω	1
R11-R14	Resistor	1 k Ω	4
R15	Resistor	12 k Ω	1
R16, R17	Resistor	100 k Ω	1
R18	Resistor	100 k Ω	1
R19-R21	Resistor	10 k Ω	3
R23	Potênciometro Trimpot	1 k Ω - 100 k Ω	1
D1-D2	Diodo Zener - 1N5227B	20mA / 3,6 V	2
D5-D8	Diodo - 1N4148	10mA / 1 V	2

Fonte: O próprio autor.