



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

VINICIUS PEIXOTO MEDINA

Análise harmônica em um sistema fotovoltaico conectado à rede de baixa tensão

NITERÓI

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

VINICIUS PEIXOTO MEDINA

**Análise harmônica em um sistema fotovoltaico conectado à rede
de baixa tensão**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador:

Henrique de Oliveira Henriques

NITERÓI

2022

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

M491a Medina, Vinicius Peixoto
Análise harmônica em um sistema fotovoltaico conectado à rede de baixa tensão / Vinicius Peixoto Medina. - 2022.
109 f.

Orientador: Henrique de Oliveira Henriques.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 2022.

1. Engenharia elétrica. 2. Energia renovável. 3. Energia solar. 4. Filtro elétrico. 5. Produção intelectual. I. Henriques, Henrique de Oliveira, orientador. II. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. III. Título.

CDD - XXX

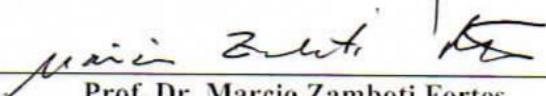
VINICIUS PEIXOTO MEDINA

ANÁLISE HARMÔNICA EM UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À
REDE DE BAIXA TENSÃO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.
Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Henrique de Oliveira Henriques - Orientador
Universidade Federal Fluminense - UFF


Prof. Dr. Marcio Zamboti Fortes
Universidade Federal Fluminense - UFF


Prof. Dr. Paulo Eduardo Darski Rocha
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Niterói
(novembro/2022)

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.” (Theodore Roosevelt)

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais Ana Lúcia e Nicodemos e a minha irmã Bruna, por todo amor e suporte que demonstram ao longo da minha vida. E por sempre apoiarem as minhas ideias e participar de cada etapa da minha vida.

Agradeço aos meus amigos pelos momentos de descontração e apoio na jornada acadêmica.

Agradeço ao meu orientador Professor Dr. Henrique de Oliveira Henriques, por dar todo o suporte, conselho, por sempre estar disponível nos momentos de dúvidas e pela paciência no decorrer do projeto.

Agradeço a todos os integrantes do NITEE, em especial pesquisadores Alexandre Bitencourt e Fernando Dias pelo apoio e momentos descontraídos.

Resumo

O aumento do emprego de sistemas fotovoltaicos conectados à rede vem crescendo consideravelmente, quando comparado a anos anteriores. O surgimento de diversos novos sistemas interligados à rede de distribuição de energia elétrica pode ser prejudicial a qualidade da energia fornecida, devido a produção de elevados níveis de distorções harmônicas. Fez-se necessário então, boa compreensão sobre as individualidades dos distúrbios produzidos na rede elétrica e conhecer técnicas para reduzir impactos provocados. Este trabalho apresenta contribuição na exposição das influências desses sistemas na qualidade de energia elétrica fornecida na rede, em razão da apresentação de tecnologias que retratam a composição de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica de baixa tensão. Demonstrou-se os principais métodos de MPPT, tipos de conversores CC-CC, tipos de inversores CC-CA, topologias de inversores essenciais e alguns tipos de filtros passivos e ativos. Apresentou-se também um estudo de caso para um pequeno sistema fotovoltaico conectado à rede, situado em um campus universitário, com definições para modelo de carregamento definido, o que não se encontra necessariamente nas residências e comércios. Através de situações práticas realizadas, considerando o caso sem carregamento, com carregamento, e ambas as situações anteriores, com filtro passivo adicionado ao arranjo experimental, as avaliações de qualidade foram realizadas por um analisador de qualidade ligado na saída do inversor fotovoltaico. Portanto, esse estudo possibilitou, em um sistema de baixa potência, a redução dos conteúdos harmônicos superiores a frequência 1kHz, que corresponde a frequência de sintonia do filtro.

Palavras-chaves: sistemas fotovoltaicos conectados à rede de baixa tensão, distorções harmônicas, filtro passivo LCL.

Abstract

The increase in the use of photovoltaic systems connected to the grid has grown considerably when compared to previous years. The emergence of several new systems interconnected to the electricity distribution network can be harmful to the quality of the energy supplied, due to the production of high levels of harmonic distortions. Then, it was then necessary to have a good understanding of the individualities of the disturbances produced in the electrical network and to know techniques to reduce the impacts caused. This work presents a contribution in exposing the influences of these systems on the quality of electrical energy supplied in the network, due to the presentation of technologies that portray the composition of photovoltaic systems connected to the low voltage electrical network. The main methods of MPPT, types of DC-DC converters, types of DC-AC inverters, topologies of essential inverters and some types of passive and active filters were demonstrated. A case study was also presented for a small photovoltaic system connected to the grid, located on a university campus, with definitions for a defined charging model, which is not necessarily found in homes and businesses. Through practical situations carried out, considering the case without loading, with loading, and both previous situations, with a passive filter added to the experimental arrangement, the quality evaluations were carried out by a quality analyzer connected to the output of the photovoltaic inverter. Therefore, this study makes it possible, in a low power system, to reduce the harmonic contents above the 1kHz frequency, which corresponds to the filter tuning frequency.

Keywords: *photovoltaic systems connected to the low voltage grid, harmonic distortions, passive LCL filter.*

Lista de Figuras

FIGURA 1- EXEMPLO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA.	3
FIGURA 2- FLUXOGRAMA DO ALGORITMO P&O [8].	9
FIGURA 3- FLUXOGRAMA DO ALGORITMO CI [8].	11
FIGURA 4- FLUXOGRAMA DO ALGORITMO VC [8].	12
FIGURA 5- TOPOLOGIA DO CONVERSOR <i>BOOST</i>	18
FIGURA 6- TOPOLOGIA DO CONVERSOR <i>BUCK</i>	19
FIGURA 7- TOPOLOGIA DO CONVERSOR <i>BUCK-BOOST</i>	20
FIGURA 8- TOPOLOGIA DO CONVERSOR <i>CUK</i>	20
FIGURA 9- TOPOLOGIA DO CONVERSOR <i>SEPIC</i>	21
FIGURA 10- TOPOLOGIA DO CONVERSOR <i>FLYBACK</i>	22
FIGURA 11- TOPOLOGIA DO CONVERSOR <i>FORWARD</i>	22
FIGURA 12- TOPOLOGIA DO CONVERSOR <i>PUSH-PULL</i>	23
FIGURA 13- CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE INVERSORES [74].	24
FIGURA 14- EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS INVERSORES CONECTADOS À REDE [55].	27
FIGURA 15- TOPOLOGIAS DE FILTROS PASSIVOS. (A): L. (B): LCL. (C): LCL+R. (D):	32
FIGURA 16- TOPOLOGIAS DE FILTROS ATIVOS. (A): PARALELO. (B): SÉRIE. (C): UPQC. (D):	34
FIGURA 17- INVERSORES POR ESTÁGIO [55].	35
FIGURA 18- INVERSOR PONTE COMPLETA, AUTO-COMUTADOS COM TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA DE LINHA [93].	36
FIGURA 19- TOPOLOGIA DE INVERSOR <i>BUCK-BOOST</i> ESTÁGIO ÚNICO COM SEIS DISPOSITIVOS DE COMUTAÇÃO [94].	36
FIGURA 20- INVERSOR IMPULSO DE ESTÁGIO ÚNICO [95].	37
FIGURA 21- INVERSOR <i>FLYBACK</i> ISOLADO DE ESTÁGIO ÚNICO [96].	37
FIGURA 22- INVERSOR <i>BOOST</i> ESTÁGIO ÚNICO APRIMORADO [97].	38
FIGURA 23- INVERSOR <i>BUCK-BOOST</i> NÃO ISOLADO DE DOIS ESTÁGIOS [97].	39
FIGURA 24- INVERSOR <i>BUCK-BOOST</i> ISOLADO DE DOIS ESTÁGIOS [97].	39
FIGURA 25- INVERSOR <i>BOOST</i> DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS COM <i>PSEUDO-DC-LINK</i> [98].	39
FIGURA 26- INVERSOR <i>BOOST</i> DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS [98].	40
FIGURA 27- CAPACITOR DE DESACOPLAMENTO DE POTÊNCIA [99].	40
FIGURA 28- INVERSOR SEM TRANSFORMADOR CONECTADO À REDE [93].	41
FIGURA 29- INVERSOR CIRCUITO DE COMUTAÇÃO SUAVE CONTROLADA POR ONDA SENOIDAL DE MODO DUPLO SELETIVO [99]. .	41
FIGURA 30- INVERSORES BASEADOS EM TRANSFORMADORES [55].	42
FIGURA 31- INVERSOR <i>FLYBACK</i> DE DOIS INTERRUPTORES [104].	43
FIGURA 32- TOPOLOGIA <i>HERIC</i> [105].	43
FIGURA 33- TOPOLOGIA <i>H5</i> [106].	44
FIGURA 34- TOPOLOGIA <i>H6</i> [73].	44
FIGURA 35- TOPOLOGIA <i>KARSCHNY</i> [107].	45
FIGURA 36- TOPOLOGIA <i>H5</i> MODIFICADA [73].	45
FIGURA 37- TOPOLOGIA <i>FLYING CAPACITOR</i> [73].	46
FIGURA 38- INVERSOR DE TRÊS NÍVEIS <i>HALF-BRIDGE DIODE CLAMPED</i> [114].	47
FIGURA 39- INVERSOR DE TRÊS NÍVEIS <i>FULL-BRIDGE SINGLE LEG CLAMPED</i> [114].	47
FIGURA 40- INVERSOR EM CASCATA [116].	48
FIGURA 41- CONVERSOR RESSONANTE EM SÉRIE COM INVERSOR <i>BANG-BANG DC-AC</i> [119].	49
FIGURA 42- INVERSOR COMUTAÇÃO SUAVE RESSONANTE SÉRIE COM <i>LINK</i> DE ALTA FREQUÊNCIA [120]	50
FIGURA 43- INVERSOR DE COMUTAÇÃO SUAVE RESSONANTE SÉRIE <i>LINK</i> DE ALTA FREQUÊNCIA [120]	50
FIGURA 44- INVERSOR RESSONANTE <i>LLCC</i> COM CONVERSOR <i>BOOST ZVT-PWM</i> [121]	51
FIGURA 45- DISPOSIÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS [11].	52
FIGURA 46 - CURVAS DE CORRENTE E POTÊNCIA À TEMPERATURA DE 25°C [14].	53
FIGURA 47 – COMPOSIÇÃO DO FILTRO <i>LCL</i>	56
FIGURA 48 – ESQUEMA DE LIGAÇÕES E MEDIÇÕES DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM CARGA E FILTRO.	57

FIGURA 49- ESQUEMA SIMPLIFICADO DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA.	58
FIGURA 50- MEDIÇÃO DO SISTEMA CONECTADO.	59
FIGURA 51- HARMÔNICOS DE CORRENTE DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA	60
FIGURA 52- AMPLITUDE DE CORRENTE DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA	61
FIGURA 53- HARMÔNICOS DE TENSÃO DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA.....	62
FIGURA 54- AMPLITUDE DE TENSÃO DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA.....	63
FIGURA 55- ESQUEMA SIMPLIFICADO DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM FILTRO.	64
FIGURA 56 – MEDIÇÃO DO SISTEMA CONECTADO COM FILTRO	64
FIGURA 57- HARMÔNICOS DE CORRENTE DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM FILTRO	66
FIGURA 58- AMPLITUDE DE CORRENTE DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM FILTRO	66
FIGURA 59- HARMÔNICOS DE TENSÃO DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM FILTRO.....	67
FIGURA 60- AMPLITUDE DE TENSÃO DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM FILTRO.....	68
FIGURA 61- AMPLITUDE DE TENSÃO DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM FILTRO.....	69
FIGURA 62- AMPLITUDE DE TENSÃO DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM FILTRO.....	69
FIGURA 63- ESQUEMA SIMPLIFICADO DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM CARGA.	70
FIGURA 64- MEDIÇÃO DO SISTEMA CONECTADO COM CARGA.	71
FIGURA 65- HARMÔNICOS DE CORRENTE DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM CARGA	72
FIGURA 66- AMPLITUDE DE CORRENTE DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM CARGA	73
FIGURA 67- HARMÔNICOS DE TENSÃO DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM CARGA	74
FIGURA 68- HARMÔNICOS DE TENSÃO DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM CARGA	74
FIGURA 69- ESQUEMA SIMPLIFICADO DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM CARGA E FILTRO.	75
FIGURA 70- MEDIÇÃO DO SISTEMA CONECTADO COM CARGA E FILTRO.	76
FIGURA 71- HARMÔNICOS DE CORRENTE DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM CARGA E FILTRO	77
FIGURA 72- AMPLITUDE DE CORRENTE DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM CARGA E FILTRO	78
FIGURA 73- HARMÔNICOS DE TENSÃO DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM CARGA E FILTRO.....	79
FIGURA 74- AMPLITUDE DE TENSÃO DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM CARGA E FILTRO.....	80
FIGURA 75- AMPLITUDE DE TENSÃO DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM CARGA E FILTRO.....	81
FIGURA 76- AMPLITUDE DE TENSÃO DO SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM CARGA E FILTRO.....	81

Lista de Tabelas

TABELA 1 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS MPPT	16
TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO MÓDULO FOTOVOLTAICO [14].	53
TABELA 3 - PRINCIPAIS ESPECIFICAÇÕES DO INVERSOR [13].	54
TABELA 4 - PRINCIPAIS ESPECIFICAÇÕES DO MOTOR ELÉTRICO.....	55
TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS DO ANALISADOR DE QUALIDADE.....	55
TABELA 6 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS CORRENTES EM RELAÇÃO À FUNDAMENTAL DO SISTEMA CONECTADO	60
TABELA 7 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS TENSÕES EM RELAÇÃO À FUNDAMENTAL DO SISTEMA CONECTADO.....	62
TABELA 8 - DISTORÇÃO HARMÔNICA DO SISTEMA CONECTADO	63
TABELA 9 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS CORRENTES EM RELAÇÃO À FUNDAMENTAL DO SISTEMA CONECTADO COM FILTRO ..	65
TABELA 10 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS TENSÕES EM RELAÇÃO À FUNDAMENTAL DO SISTEMA CONECTADO COM FILTRO....	67
TABELA 11 - DISTORÇÃO HARMÔNICA DO SISTEMA CONECTADO COM FILTRO	68
TABELA 12 - COMPARATIVO DAS DISTORÇÃO HARMÔNICAS DOS SISTEMAS CONECTADOS COM FILTRO E SEM FILTRO	70
TABELA 13 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS CORRENTES EM RELAÇÃO À FUNDAMENTAL DO SISTEMA CONECTADO COM CARGA	72
TABELA 14 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS TENSÕES EM RELAÇÃO À FUNDAMENTAL DO SISTEMA CONECTADO COM CARGA....	73
TABELA 15 - DISTORÇÃO HARMÔNICA DO SISTEMA CONECTADO COM CARGA.....	75
TABELA 16 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS CORRENTES EM RELAÇÃO À FUNDAMENTAL DO SISTEMA CONECTADO COM CARGA E FILTRO	77
TABELA 17 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS TENSÕES EM RELAÇÃO À FUNDAMENTAL DO SISTEMA CONECTADO COM CARGA E FILTRO	79
TABELA 18 - DISTORÇÃO HARMÔNICA DO SISTEMA CONECTADO COM CARGA E FILTRO	80
TABELA 19 - COMPARATIVO DAS DISTORÇÃO HARMÔNICAS DOS SISTEMAS COM CARGA COM FILTRO E SEM FILTRO	82

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DC	<i>Direct Current</i>
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i>
HERIC	<i>Highly Efficient and Reliable Inverter Concept</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
NITEE	Núcleo de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica
OCDE	Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico

P&O	<i>Perturbation and observation</i>
PRODIST	Regras e Procedimentos de Distribuição
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SEPIC	<i>Single-Ended Primary-Inductor Converter</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
UFF	Universidade Federal Fluminense
UPQC	<i>Unified Power Quality Conditioner</i>
ZCS	<i>Zero Current Switching</i>
ZCT	<i>Zero Current Transition</i>
ZVS	<i>Zero Voltage Switching</i>
ZVT	<i>Zero Voltage Transition</i>

Sumário

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Motivação	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Estrutura do Trabalho	4
Capítulo 2 - Algoritmos de MPPT	6
2.1 Distorção Harmônica em Sistemas Fotovoltaicos	6
2.2 Métodos de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência	8
2.2.1.1 Método Perturbação e Observação (P&O)	8
2.2.1.2 Método Condutância Incremental (CI)	9
2.2.1.3 Método Tensão Constante (VC)	11
2.2.1.4 Método Capacidade Parasita (CP)	12
2.2.1.5 Método Escalada (HC)	12
2.2.1.6 Método Tensão de Circuito Aberto Fracionada (Fov) e Corrente Fracionada de Curto-circuito (Fsc)	13
2.2.1.7 Método Baseado em Rede Neural Artificial (RNA)	14
2.2.1.8 Método Baseado em Controlador de Lógica Fuzzy (FLC)	14
2.2.1.9 Método Baseado em Metaheurística	15
Capítulo 3 - Revisão Tecnológica de Topologias	17
3.1 Conversor CC-CC	17
3.1.1.1 Conversor <i>Boost</i>	17
3.1.1.2 Conversor <i>Buck</i>	18
3.1.1.3 Conversor <i>Buck-boost</i>	19
3.1.1.4 Conversor <i>Cuk</i>	20
3.1.1.5 Conversor SEPIC	20
3.1.1.6 Conversor <i>Flyback</i>	21
3.1.1.7 Conversor <i>Forward</i>	22
3.1.1.8 Conversor <i>Push-pull</i>	22
3.2 Inversor CC-CA	23
3.2.1.1 Inversor Central	26
3.2.1.2 Inversor de <i>String</i>	26
3.2.1.3 Inversor <i>Multi-string</i>	26
3.2.1.4 Inversor Integrado ao Módulo	27

3.2.1.5	Inversor <i>Master-slave</i>	28
3.2.1.6	Inversor <i>Team-concept</i>	28
3.3	Filtros Passivos e Ativos	28
3.3.1.1	Filtros Passivos	29
3.3.1.1	Filtros Ativos	32
Capítulo 4 - Classificação de Topologias de Inversores		35
4.1	Número de Estágios de Processamento de Energia	35
4.1.1.1	Estágio Único	35
4.1.1.2	Múltiplos Estágios	38
4.2	Desacoplamento de Energia	40
4.3	Transformadores e Interligações	41
4.4	Inversor Multinível	46
4.4.1.1	<i>Half-bridge Diode Clamped</i>	46
4.4.1.2	<i>Full-bridge Single Leg Clamped</i>	47
4.4.1.3	Em Cascata	48
4.5	Comutação Suave	48
Capítulo 5 - Projeto do Esquema Fotovoltaico		52
5.1	Arranjo Fotovoltaico	52
5.2	Componentes do Modelo Experimental	54
Capítulo 6 - Resultados		58
6.1	Sistema Conectado à Rede Elétrica	58
6.2	Sistema Conectado à Rede Elétrica com Filtro	63
6.3	Sistema Conectado à Rede Elétrica com Carga	70
6.4	Sistema Conectado à Rede Elétrica com Carga e Filtro	75
Capítulo 7 - Conclusão		83
7.1	Trabalhos Futuros	84

Capítulo 1 - Introdução

Os investimentos na geração de energia fotovoltaica têm aumentado de forma gradativa no país como resultado de aperfeiçoamentos tecnológicos, custos de tecnologia decrescentes, políticas governamentais funcionais para fontes de energia renováveis, preocupações ambientais e elevados valores tarifários.

No Brasil, as fontes eólicas e solar subiram 2,9 pontos percentuais na composição da matriz da oferta interna de energia elétrica em 2021, chegando a 13,4%, indicador que perde somente para a hidráulica, com 56,7%, ultrapassando o indicador do bloco da Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico (OCDE), estimado em 13% para 2021[1]. Na geração solar, foi estimado um crescimento da geração distribuída de 120%, quatro vezes o indicador da geração centralizada [1].

A universalização dos dispositivos elétricos com propriedade não linear tem causado, há vários anos, alertas em função da proliferação de harmônicos no sistema elétrico. Equipamentos como lâmpadas fluorescentes, computadores, retificadores e outras cargas similares podem gerar maiores níveis de correntes harmônicas que são responsáveis por perdas de potência na rede, além de relacionar-se com ressonâncias presentes no sistema [2]. A detecção e análise de harmônicos são pré-requisitos para o controle e a qualidade da energia distribuída [3].

Os sistemas de geração de energia renovável possuem algumas limitações operacionais como a de qualidade de energia, faltas de alta impedância e sincronização da rede devido a multiplicação das cargas não lineares conectadas nos terminais de distribuição. Por essas razões, a rede tem produzido conteúdos harmônicos, afundamentos e sobretensões, ruídos, interrupções longas e curtas, falhas, distorção de tensão, desequilíbrio nas tensões, entre outros. O que pode causar falhas ou danos às cargas sensíveis que estão conectadas à rede [4].

Do ponto de vista da qualidade de energia, o propósito é atingir uma corrente senoidal como saída do sistema fotovoltaico conectado à rede. Ainda assim, harmônicos são evidenciados na corrente de saída devido ao emprego de conversores de potência e fluxo de potência variável. Essas correntes, transcorrendo por entre as impedâncias do sistema de distribuição, resultam na distorção da tensão do sistema [5]. Entretanto, recomendações particulares para análise e avaliação das ocorrências de qualidade de energia ainda requerem maiores acompanhamentos.

A dimensão da maioria dos sistemas fotovoltaicos residenciais é pequena em relação a potência de curto-circuito da rede de distribuição. Então, no que concerne à distorção de tensão, o efeito da operação da planta fotovoltaica única é praticamente insignificante [6].

Entretanto, o número de sistemas fotovoltaicos conectados à mesma rede local está evoluindo e manifesta-se a questão de saber como irá contribuir para a formação dos harmônicos de tensão da rede. Além de que, as cargas conectadas a rede de distribuição, possuem características não lineares. Levando-se em consideração que o inversor fotovoltaico pode injetar correntes harmônicas de baixa ordem nos sistemas de energia [7], podendo ocasionar um problema crítico para o gerenciamento dos sistemas de distribuição.

As técnicas de *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) correspondem ao primeiro método para a redução das distorções geradas pelos sistemas fotovoltaicos, por manter a tensão de saída do painel em um nível sem flutuação, podendo levar a um baixo valor de *Total Harmonic Distortion* (THD) no lado do consumidor [8]. Esta estratégia envolve várias técnicas, dentre elas podem-se citar as clássicas e modernas, com vasta aplicação na literatura de energia elétrica.

O segundo método para atenuação da produção de distorções harmônicas concentra-se no lado eletrônico de potência do sistema fotovoltaico, sendo a eminente fonte de harmônicos em consequência da comutação entre os estados ligado e desligado [9]. Refere-se aos conversores CC-CC e inversores CC-CA, que possuem diversas variações tecnológicas em sistemas fotovoltaicos conectados à rede e altas complexidades topológicas.

Por fim, mitigar os efeitos de cargas não lineares no desempenho do sistema fotovoltaico corresponde ao terceiro método de redução de THD [9], que através do emprego de filtros passivos e ativos, visam restringir as componentes harmônicas produzidas, geralmente são utilizados na saída do inversor fotovoltaico [10]. Dentre as opções de filtros, destaca-se a topologia do filtro passivo LCL que estão se tornando as mais utilizadas em sistemas conectados à rede.

Na Figura 1, foi ilustrado um exemplo de sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, onde é possível identificar a maioria dos componentes citados anteriormente, dentre eles: os módulos fotovoltaicos, conversores, inversores, filtro e também, a configuração de uma carga.

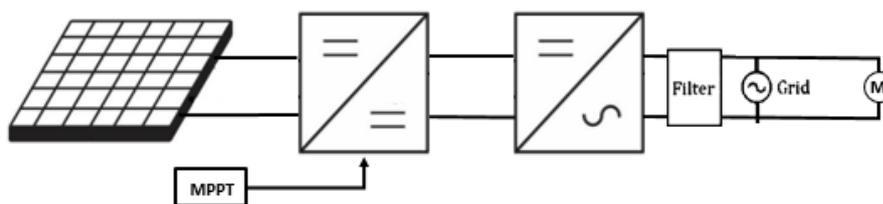


Figura 1- Exemplo de sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.

1.1 Motivação

No estacionamento da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense (UFF), através do Núcleo de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica (NITEE), encontra-se um telhado composto por dois módulos de nove painéis solares, com o propósito de apurar o desenvolvimento de projetos voltados para a energia elétrica renovável [11-14]. Com o avanço do uso de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, aumentou-se a preocupação com os níveis de conteúdos harmônicas e distorções produzidas nesses sistemas, podendo afetar a qualidade do fornecimento de energia elétrica por parte das distribuidoras. Tal demanda, amplia-se, levando em consideração os grandes centros urbanos.

Com o intuito de explorar os efeitos desse crescimento, foi iniciado um estudo sobre as metodologias usadas na atualidade para reduzir os impactos da propagação de harmônicos na rede elétrica de baixa tensão. Foi realizado também uma aplicação prática, visando a construção de cenários controlados de um sistema fotovoltaico funcional. Como parte do projeto, este estudo tem o objetivo de analisar, através de dados capturados por um analisador de qualidade de energia, a dinâmica entre a rede convencional e a saída do inversor ligado ao conjunto de painéis fotovoltaicos, considerando: condição inicial sem carga, caso com carregamento e o emprego do filtro passivo LCL nas condições anteriores.

O cerne do trabalho é analisar como se dá a qualidade de energia elétrica na saída do inversor frente a distorções harmônicas que ocorrem frequentemente nessas configurações [13]. Por fim, posteriormente ao experimento realizado, será organizada a comparação dos dados probatórios com as normas vigentes, a fim de validar a adequação dos casos explorados.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho foi dividido em duas partes: a parte inicial, apresentou uma revisão na literatura acadêmica da área de energia elétrica sobre as tecnologias fundamentais empregadas em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica e, na segunda parte, foi evidenciado uma aplicação experimental visando ilustrar o comportamento dos conteúdos harmônicos existentes num sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de baixa tensão.

A primeira parte do objetivo geral teve como propósito de categorizar as principais tecnologias relacionadas a MPPT, conversores CC-CC, inversores CC-CA, filtros passivos e ativos e topologias de inversores [4,9].

A segunda parte do objetivo geral consistiu na exemplificação experimental do esquema fotovoltaico conectado à rede disponível na Escola de Engenharia da UFF [11-15], verificando o comportamento dos conteúdos harmônicos de tensão, corrente e distorções harmônicas totais produzidas na saída do inversor. A princípio, o experimento foi dividido em duas partes: os arranjos fotovoltaicos conectados à rede elétrica de baixa tensão sem carga e os arranjos fotovoltaicos conectados à rede elétrica de baixa tensão com carga. Nesta prática utilizou-se um filtro passivo LCL, com a intenção de mitigar os conteúdos harmônicos gerados na saída do inversor. Por último, verificou-se a adequação dos casos em virtude das recomendações e regulamentações vigentes de qualidade de energia elétrica.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é organizado em 6 capítulos, incluindo este introdutório, organizados da seguinte forma:

O capítulo 2 exibe breve introdução teórica contendo os conceitos de distorção harmônica total, distorção harmônica total de tensão, distorção harmônica total de corrente e suas relevâncias. Apresenta também, o conceito de método de rastreamento de potência máxima e os principais mecanismos empregues nessa tecnologia na atualidade.

O capítulo 3 apresenta as topologias relacionadas a conversores CC-CC, inversores CC-CA e filtros. Aborda as principais tecnologias e métodos empregados na atualidade para cada um dos equipamentos relacionados, anteriormente.

O capítulo 4 classifica as composições de inversores que são organizadas quanto ao número de estágios de processamento de energia, desacoplamento de energia, transformadores e interligações, composições multinível e comutação suave.

O capítulo 5 retrata o projeto do esquema fotovoltaico, com o arranjo de placas solares, esquemas experimentais e componentes aplicados na prática.

No capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos, esquemas teóricos e práticos das medições realizadas.

Por fim, no capítulo 7 é apresentado a conclusão do projeto e bem como proposta para trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Algoritmos de MPPT

Neste capítulo apresenta-se uma introdução dos parâmetros de um sistema fotovoltaico, abordando as principais teorias da área de energia elétrica, relacionadas às distorções harmônicas, distorções harmônicas totais e os efeitos produzidos por seus componentes harmônicos no sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de baixa tensão. É realizado também, a descrição do primeiro método de mitigação de distorções harmônicas, os algoritmos de MPPT, tornando-se possível evidenciar as técnicas mais relevantes utilizadas em sistemas fotovoltaicos conectado à rede, e relacionar as visões clássicas e modernas do emprego desta tecnologia.

2.1 Distorção Harmônica em Sistemas Fotovoltaicos

Um sistema fotovoltaico consiste em painéis para converter a luz solar em eletricidade, dispositivos eletrônicos de energia para adequar certo nível de tensão CC e converter CC em tensão CA e instrumentos para proteção, conexão e confiabilidade. Com base em sua aplicabilidade, os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em dois tipos principais: autônomos e conectado à rede [9].

Os dois sistemas fotovoltaicos podem ainda ser divididos, caso o sistema de armazenamento de energia da bateria seja utilizado como fonte de alimentação de *backup*. Em ambos os tipos, as três primeiras das quatro partes dos sistemas fotovoltaicos, que são painéis fotovoltaicos, conversores, inversores e integração fotovoltaica, funcionam da mesma maneira. A diferenciação está na quarta parte, relativa à forma como o sistema fotovoltaico entrega a energia gerada aos consumidores [9].

A potência fornecida é regularmente distorcida devido a várias razões, e o índice de THD, é o indicador mais frequentemente usado de tal distorção. O THD é a razão entre a potência distorcida e a potência principal do sinal [16].

$$THD(\%) = 100 \sqrt{\frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + \dots + P_n}{P_1}} \quad (1)$$

Onde, P_n é em *watts*. Se os dados de medição estiverem em *volts*, o THD de tensão é calculado da seguinte forma:

$$THD_V(\%) = 100 \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}{V_1^2}} \quad (2)$$

Onde, V_n é a tensão quadrática média. Em ambas as equações, n representa o número harmônico. O mesmo modelo de equação poderia ser realizado para o cálculo do THD de corrente:

$$THD_I(\%) = 100 \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}{I_1^2}} \quad (3)$$

Onde, I_n é a corrente quadrática média.

Uma das causas evidentes do THD é a conexão de inúmeras cargas não lineares no sistema de potência, que podem ser corrigidas pelo gerenciamento do lado da demanda através de ações de planejamento, implementação e monitoramento do uso da energia elétrica pelo lado do consumidor, cujo objetivo é operar o sistema com maior eficiência e sustentabilidade. As causas de THD mais complexas e relevantes, são os conteúdos harmônicos advindos do sistema fotovoltaico [17].

Em cada componente, os harmônicos são produzidos devido a diferentes razões baseadas nos modos de operação, especialmente em baixos níveis de radiação solar. Sob tais condições, o arranjo fotovoltaico e a potência de entrada do inversor correspondente são baixos. Portanto, o inversor apresenta alta não linearidade e potência de saída com maiores conteúdos harmônicos, comprometendo a eficiência operacional, a confiabilidade do sistema de energia, o funcionamento de cargas e relés de proteção [18,19]. Dentre os efeitos indesejáveis do THD, estão: o aquecimento no sistema fotovoltaico e na carga, mau funcionamento de dispositivos eletrônicos, leitura incorreta nos medidores, interrupção dos relés de proteção, interferência na comunicação e a sobrecarga nos condutores, inclusive de neutro.

2.2 Métodos de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência

Entre os componentes que visam reduzir o nível de distorções produzidas, os painéis fotovoltaicos ganham destaque, e vários estudos mostraram que o THD gerado provém de baixa irradiância ou alta temperatura [20]. Como resultado deste advento, o algoritmo de MPPT foi proposto para resolver a baixa irradiância, sendo extensamente utilizado.

Um método possível para determinar a eficiência de um algoritmo MPPT é indicado na Equação 4 [21]:

$$N_{MPPT} = \frac{\int_0^t P_{atual}(t) dt}{\int_0^t P_{max}(t) dt} \quad (4)$$

onde, P_{atual} é a medida real da potência gerada pelo sistema fotovoltaico sob o controle do MPPT e P_{max} é a potência máxima real do painel que pode produzir em determinada temperatura e irradiância.

As técnicas de MPPT podem ser classificadas em duas categorias principais: abordagens clássicas, tais como: perturbação e observação, condutância incremental, tensão constante, capacidade parasita, método escalada, tensão de circuito aberto fracionada e corrente fracionada de curto-circuito; abordagens modernas, como: controlador de lógica *fuzzy*, técnicas metaheurísticas e rede neural artificial [8,9]. A seguir, elaboram-se as principais características e metodologias de cada um dos métodos.

2.2.1.1 Método Perturbação e Observação (P&O)

O método P&O é considerado um dos métodos mais relevantes e simples de implementar [22]. O funcionamento decorre de perturbar periodicamente a tensão de saída (V_{pv}) ou corrente de saída (I_{pv}) do painel fotovoltaico, através do comando do conversor eletrônico de potência, como esquematizado no fluxograma da Figura 2 [8]. Ao variar o comando calcula-se o novo valor de potência $P_{pv}(k)$ e este é assemelhado com o valor anterior existente $P_{pv}(k-1)$. Caso o novo valor da tensão produza aumento na potência ($dP/dV_{pv} > 0$), o controlador move o ponto de máxima potência nesta direção, sendo a

próxima perturbação nesse mesmo sentido, caso P_{pv} diminua, no ciclo seguinte a perturbação ocorrerá no sentido inverso [8].

O P&O pode ser usado como a técnica de MPPT para governar a tensão, a corrente e a potência no módulo solar, encurtando notavelmente o THD do sistema fotovoltaico conectado à rede [23]. A perturbação é empregada à tensão do arranjo fotovoltaico e causa acréscimos ou diminuições na potência de saída [24].

O uso do método pode assegurar precisão constante, duplicar a velocidade de rastreamento e transformar consideráveis quantidades de energia em eletricidade. Uma versão modificada do P&O foi idealizada, recentemente, para reduzir o THD em um arranjo fotovoltaico [25].

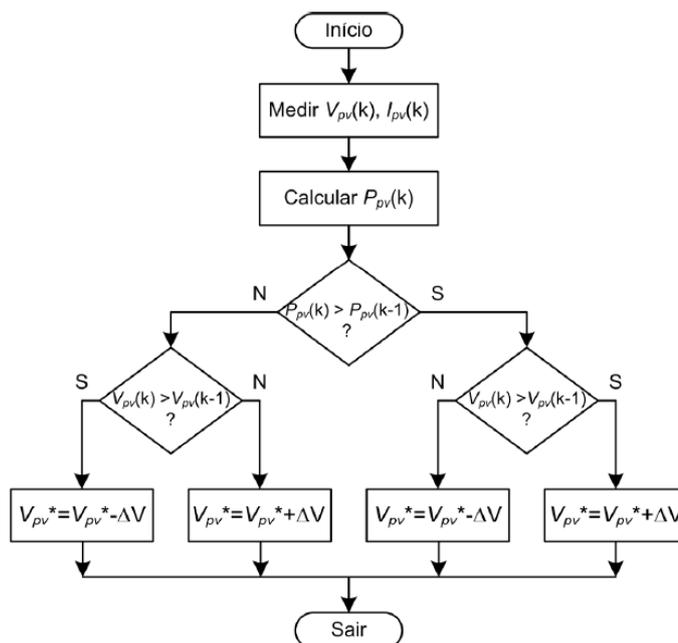


Figura 2- Fluxograma do algoritmo P&O [8].

2.2.1.2 Método Condutância Incremental (CI)

O funcionamento do algoritmo CI baseia-se na Equação 5, ou seja, é feita a derivada da potência em relação à tensão e o seu resultado é igualado a zero para se obter o valor máximo, em MPPT [8].

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (5)$$

Resolvendo a Equação 5 obtém-se Equação 6:

$$\frac{dP}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (6)$$

Para a implantação do algoritmo MPPT divide-se a Equação 6 em três partes as Equações ((7), (8) e (9)). As equações permitem determinar o sentido da desordem inserindo-a no sistema. Quando a Equação 7 é satisfeita, o sistema encontra-se no seu ponto de máxima potência, não existe variação do ponto de operação e o sistema é condicionado a trabalhar neste ponto até ocorrer uma mudança do valor da corrente [26].

$$\frac{dP}{dV} = -\frac{I}{V}; \quad \left(\frac{dP}{dV} = 0\right) \quad (7)$$

$$\frac{dP}{dV} > -\frac{I}{V}; \quad \left(\frac{dP}{dV} > 0\right) \quad (8)$$

$$\frac{dP}{dV} < -\frac{I}{V}; \quad \left(\frac{dP}{dV} < 0\right) \quad (9)$$

As Equações ((7) e (8)) são usadas para fornecer a direção em que deve suceder uma perturbação e mover o ponto de operação para o ponto de máxima potência, como representado na Figura 2. A perturbação é repetida até que a Equação 7 seja satisfeita. Uma vez que o ponto de máxima potência é atingido, continua a funcionar neste ponto [27,28].

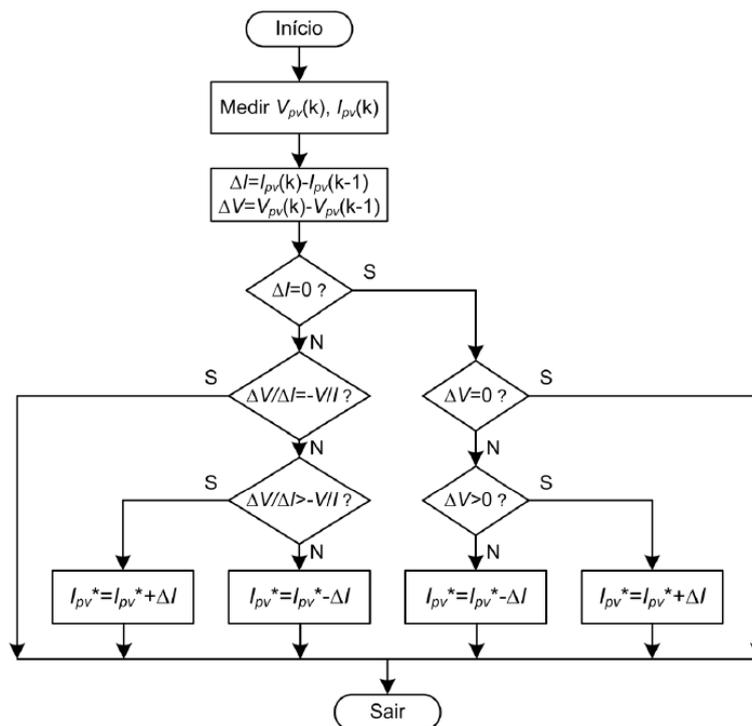


Figura 3- Fluxograma do algoritmo CI [8].

2.2.1.3 Método Tensão Constante (VC)

O método da tensão constante é um dos algoritmos mais simples para o controle do melhor ponto de operação de um painel fotovoltaico [29]. O ponto de execução do painel é mantido próximo do melhor ponto de operação, por meio da V_{pv} em comparação com uma tensão de referência fixa (V^*), de acordo com a Figura 3. Esta tensão é herdada da tensão do melhor ponto de operação do painel fotovoltaico (V_{MPP}) ou é um valor estipulado pelo fabricante para o ponto de máxima potência do painel [8].

Este método não preza as alterações que possam desenrolar-se nos valores de radiação solar e, singularmente, na temperatura da célula, além de que assume o valor V^* próximo ao verdadeiro valor da V_{MPP} . Nota-se que este método pode ser considerado eficaz quando os níveis de radiação solar são baixos, superando os métodos P&O e CI [29]. A Figura 3 mostra o fluxograma de funcionamento do método VC e o seu diagrama de blocos.

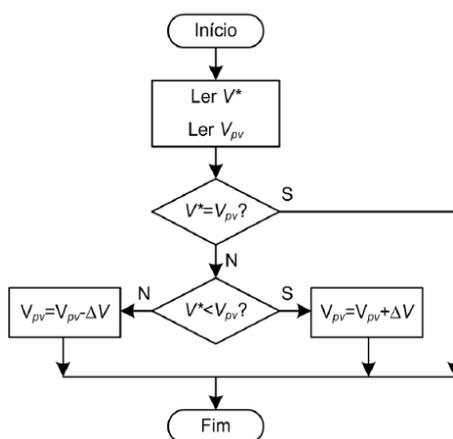


Figura 4- Fluxograma do algoritmo VC [8].

2.2.1.4 Método Capacidade Parasita (CP)

O método de capacidade parasita pode ser encarado como aprimoramento do método CI, em que se considera as capacidades parasitas das células solares do painel fotovoltaico. É baseado na avaliação das componentes de alta frequência de corrente e tensão nos terminais do painel, para determinar as alterações de tensão ou corrente e incorporar no ponto de serviço.

Uma desvantagem deste algoritmo é que a capacidade parasita em cada painel é diminuta, tendo vantagem em grandes sítios de painéis fotovoltaicos [8].

2.2.1.5 Método Escalada (HC)

O método HC é análogo a P&O, mas em vez de variação na tensão e corrente, o ciclo de operação do conversor CC-CC é modificado. Se o acréscimo no ciclo de trabalho levar a elevação na potência de saída, o ciclo será ampliado ainda mais, quando não, o ciclo de trabalho será reduzido [31]. Assim como os métodos P&O e CI, o HC sofre oscilações em torno do ponto de máxima potência, resultando na diminuição da eficiência dos sistemas fotovoltaicos.

Na literatura da área de energia elétrica, o HC de perturbação adaptativa foi introduzido para diminuir as oscilações em torno do ponto de melhor potência. [32]. Durante o rumo do rastreamento, o tamanho da perturbação é adaptado de acordo com a Equação 10.

$$S = \frac{\left(\frac{\Delta P}{\Delta d}\right)}{\left(\frac{P}{d}\right)} \quad (10)$$

Onde, S representa o tamanho do passo de perturbação, ΔP e Δd denotam respectivamente a diferença entre os valores de potência e os valores do ciclo de trabalho de duas agitações anteriores.

2.2.1.6 Método Tensão de Circuito Aberto Fracionada (F_{OV}) e Corrente Fracionada de Curto-circuito (F_{SC})

No método F_{OV} , o ponto de trabalho é simplesmente submetido a uma quota da tensão de circuito aberto como proposto pela Equação 11 [33,34].

$$V_{MPP} = K_1 V_{CO} \quad (11)$$

Onde, K_1 é uma constante no intervalo [0,71, 0,78], V_{MPP} indica a tensão do ponto de máxima potência e V_{CO} configura a tensão de circuito aberto.

No mecanismo F_{SC} , o ponto de operação é conduzido a uma parcela da corrente de curto-circuito, conforme caracterizado pela Equação 12 [24].

$$I_{MPP} = K_2 I_{SC} \quad (12)$$

Onde, K_2 é uma constante no intervalo [0,78, 0,92], I_{MPP} anuncia a corrente do ponto de máxima potência I_{SC} simboliza a corrente de curto-circuito. Neste método, assim como o F_{OV} , a principal vantagem é sua simplicidade. Necessita apenas de um sensor de corrente, porém não fornece alta precisão.

Uma das desvantagens dos métodos F_{OV} e F_{SC} é que a tensão de circuito aberto ou corrente de curto-circuito deve ser medida regularmente e isso interrompe o fornecimento às cargas e diminui a eficiência do MPPT [24].

2.2.1.7 Método Baseado em Rede Neural Artificial (RNA)

Iniciando as técnicas modernas, pode-se discorrer sobre o método RNA, que possui entradas típicas que englobam parâmetros do arranjo fotovoltaico, como: tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito e parâmetros ambientais, a saber, irradiação, temperatura e padrão de sombreamento do arranjo fotovoltaico. A saída pode ser a tensão ou o ciclo de laboração que leva ao melhor ponto de operação. As técnicas de RNA podem ser usadas em aplicações de MPPT, promovendo um bom desempenho em aplicações fotovoltaicas [35-38].

Na RNA, um maior número de camadas ocultas aumenta a eficiência de rastreamento, mas reduz a velocidade de rastreamento. Um desafio na aplicação de RNA para MPPT é encontrar dados confiáveis como conjunto de treinamento [39]. Outro desafio do método é que a estratégia MPPT desenvolvida depende do sistema. Em alguns casos, a RNA é combinada com técnicas MPPT clássicas para conseguir uma estratégia MPPT mais eficiente. Em alguns trabalhos a metodologia foi hibridizada com IC e P&O visando melhores valores de eficiência quando comparados com a tecnologia RNA, sendo obtidos resultados satisfatórios nas combinações realizadas [40,41].

2.2.1.8 Método Baseado em Controlador de Lógica Fuzzy (FLC)

As metodologias FLC têm sido frequentemente adotadas em sistemas fotovoltaicos conectados à rede [42-45]. Cada sistema FLC abrange três partes, a saber, fuzzificação, regras de inferência e defuzzificação. Para MPPT, as entradas do método FLC são erro (e) e a variação no erro (Δe), que são definidos como abaixo, nas Equações ((13) e (14)).

$$e(K) = \frac{P(K) - P(K - 1)}{V(K) - V(K - 1)} \quad (13)$$

$$\Delta e = e(K) - e(K - 1) \quad (14)$$

A saída do método FLC é a mudança na tensão (ΔV) ou a mudança no ciclo de operação (Δd). Como as funções MPPT baseadas em FLC se fundamentam na relação (dP/dV), em circunstâncias de sombreamento parcial ele não pode diferenciar entre melhores pontos locais e melhores pontos globais, portanto, nessas circunstâncias deve ser alterado para rastrear efetivamente o ponto de máxima potência global [46]. Em alguns casos, os métodos FLC são incorporados às técnicas clássicas de MPPT, por exemplo, o FLC sendo associado ao HC, em busca de maior eficiência do rastreamento do melhor ponto de operação [47].

Comparando o desempenho de RNA e FLC em sistemas MPPT conclui-se que FLC proporciona maior eficiência de rastreamento do que RNA [48]. Uma desvantagem importante é sua dependência do sistema, além disso, seu projeto requer conhecimento prévio do comportamento e das características do arranjo fotovoltaico.

2.2.1.9 Método Baseado em Metaheurística

Encontrar o MPPT em fotovoltaicos caracteriza um problema de otimização. Para insolação uniforme, tem-se uma problemática de otimização unimodal, com ponto ótimo único, enquanto para condições de sombreamento parcial, manifesta-se o caso de otimização multimodal com múltiplos ótimos locais [24].

Nas últimas três décadas, essas técnicas provaram ser laboriosas para resolver problemas difíceis de otimização. Sendo eficientes até nos casos em que não existe uma formulação matemática clara da função objetivo em relação a variáveis de decisão. Os métodos são equipados com capacidade de exploração, posto isto, diferentemente de P&O, CI e HC, eles podem obter melhor ponto de operação global em condições de sombreamento parcial.

Ao contrário das técnicas MPPT clássicas, as estratégias fundamentadas em metaheurísticas não oscilam em torno do melhor ponto de operação. A otimização por enxame de partículas, do inglês *Particle Swarm Optimization* (PSO), corresponde ao algoritmo de otimização metaheurística mais popular para MPPT em sistemas fotovoltaicos, inspirando-se no comportamento de bando das aves [49-51].

Não há consenso sobre qual o melhor algoritmo MPPT a ser adotado em sistemas fotovoltaicos [52,53]. Esta falta de consenso é devido a literatura, da área de energia elétrica, não envolver comparações de ganhos absolutos de eficiência dos diferentes algoritmos de rastreamento. A maioria das comparações são efetivadas entre um algoritmo e um acoplamento direto ao sistema ou entre um algoritmo e um conversor de operação fixa [9]. Uma breve comparação entre os métodos pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 - Comparação entre os métodos MPPT

Método	Dependência do módulo	Eficiência do método	Dificuldade de implementação	Sensores	Nível de processamento
P&O	Não	Muito bom	Simples	Tensão e corrente	Baixo
CI	Não	Muito bom	Simples	Tensão e corrente	Baixo
VC	Sim	Razoável	Simples	Tensão	Baixo
CP	Sim	Bom	Média	Tensão e corrente	Médio
HC	Não	Bom	Média	Tensão e corrente	Médio
Fov	Sim	Bom	Simples	Tensão	Baixo
Fsc	Sim	Bom	Simples	Corrente	Baixo
RNA	Sim	Excelente	Elevada	Tensão, corrente e outros	Alto
FLC	Sim	Excelente	Elevada	Tensão, corrente e outros	Alto
Metaheurística	Sim	Excelente	Elevada	Tensão, corrente e outros	Alto

Em relação aos métodos modernos, possuem um ótimo desempenho, maior dificuldade de implementação, dependência dos módulos e maior grau de processamento, a complexidade de implantação pode torna-los desanimadores ao serem comparados com métodos clássicos. Os métodos mais elaborados, emanam grandes capacidades de processamento, como FLC e RNA, geralmente são adotados em situações de sombreamento total ou parcial, podendo ser combinados com outras tecnologias mais simples, garantindo maior eficácia.

Os métodos clássicos, como: P&O, CI e VC, também são de grande relevância por conta da baixa dificuldade de implementação e bons resultados operacionais. Contudo, verifica-se grande abrangência do emprego do método clássico P&O, geralmente, pela sua simplicidade e fácil implantação. Na prática experimental deste trabalho, foi utilizado o algoritmo F_{SC}, por efeito do inversor possuir esse método integrado em sua composição.

Capítulo 3 - Revisão Tecnológica de Topologias

Neste capítulo apresenta-se dois, dos três métodos, mais adotados para redução de conteúdos harmônicos e as principais tecnologias utilizadas. São realizados ponto de vista referentes a três equipamentos: conversores CC-CC, inversores CC-CA e filtros.

3.1 Conversor CC-CC

O estudo dos conversores CC-CC inicia o segundo método de mitigação de distorções, em relação a primeira parte no lado eletrônico de potência do sistema fotovoltaico.

Os componentes eletrônicos de potência conhecidos são aplicados em um ou dois estágios com base em seu *design* e serventias de processamento. O inversor implementa todas as tarefas de controle no modo de estágio único, ao passo que, quando o conversor é inserido antes do inversor, no modo de dois estágios, oferece uma capacidade maior de controle e custos mais elevados [54,55]. Para mitigar os valores de THD concebidos nestes dois componentes, diversas estratégias de controle e topologias de conexão foram declaradas.

Em relação aos conversores CC-CC, as topologias praticadas atualmente são *boost*, *buck*, *buck-boost*, *cuk*, *Single-Ended Primary-Inductor Converter (SEPIC)*, *flyback*, *forward* e *push-pull* [56-58]. Essas topologias podem funcionar como controle no modo de comutação para monitorar e converter a saída CC em uma tensão conveniente, que é dependente da frequência de comutação do sinal de controle da *Pulse Width Modulation (PWM)* [56,59,60].

3.1.1.1 Conversor *Boost*

O conversor *boost* é constituído por um elemento de comutação (T), um diodo (D), um indutor (L) e um controlador de comutação, conforme mostrado na Figura 5. O elemento

de comutação T é alterado entre os estados ligado e desligado, pelo controlador, para amplificar a tensão de entrada para a tensão de saída desejada. Durante o estado ligado, a energia elétrica é armazenada no indutor L e, posteriormente, o capacitor (C_o) concede corrente à carga e ao diodo D com polarização reversa, enquanto no estado desligado, a energia acumulada é transferida para a carga e o capacitor C_o através do diodo D [61]. O conversor termina em um dos dois modos, modo de condução contínua ou modo de condução descontínua, que é especificado pela forma de onda de corrente do indutor [62].

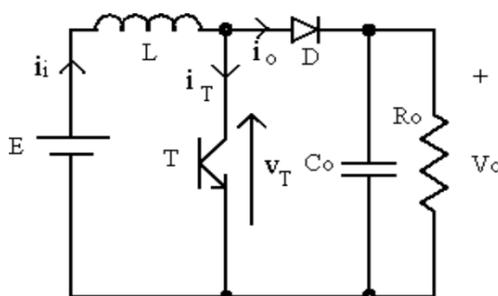


Figura 5- Topologia do conversor *Boost*

O conversor tem como atributos: uma corrente de entrada contínua, baixa ondulação corrente na entrada, envolvendo de forma variável, a análise de várias classificações de tensão de diodos retificadores. Algumas tentativas de melhorias foram realizadas para aprimorar a eficiência da topologia em baixas tensões de entrada, dentre elas, incluem-se a otimização do projeto do transformador para obter indutâncias de fuga baixas, valendo-se da comutação da eletrônica de potência e suprimindo a necessidade de um circuito de fixação de tensão [63-66].

3.1.1.2 Conversor *Buck*

O conversor *buck* é usado para reduzir a tensão CC, sendo largamente adotado por conta de sua composição simples, caracterizada por um baixo número de componentes, menor dificuldade de controle e ausência de isolamento [58].

Na topologia convencional, uma única chave ativa (T) é empregada, e a tensão máxima aplicada nos terminais dos semicondutores é igual à tensão de entrada (E), usando a técnica de chaveamento rígido. Apesar disso, este método rende baixa eficiência em função

de altas perdas de condução nos dispositivos de alta tensão e comutação. Os conversores *buck* podem ser usados em reguladores de faixa de baixa potência e conversores abaixadores de faixa alta potência [67,68].

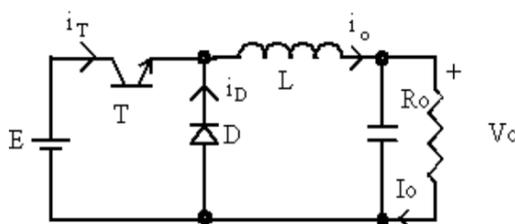


Figura 6- Topologia do conversor *buck*.

3.1.1.3 Conversor *Buck-boost*

O circuito tradicional de um conversor *buck-boost* consiste em um elemento de comutação, indutor, diodo e capacitor. A diferença entre um conversor *buck-boost* e um conversor *boost* é a disposição do elemento de comutação T antecedendo o indutor L, conforme mostrado na Figura 7 [58].

A topologia pode fornecer uma tensão de saída (V_o) igual, menor ou maior que a tensão de entrada (E). A composição *buck-boost* é propícia para aplicações portáteis, que demandam uma ampla faixa de V_o , sendo uma escolha atraente para altos valores de corrente elétrica [61].

A tensão de saída V_o é igual à tensão de entrada E logo que o ciclo de trabalho é 0,5, quando menor, o conversor funciona no modo *buck*, fazendo com que a tensão de saída seja menor que a tensão de entrada [61]. Para operar no modo *boost* e fazer com que a tensão de saída V_o seja maior que a tensão de entrada E , o ciclo de trabalho deve ser superior a 0,5 [61].

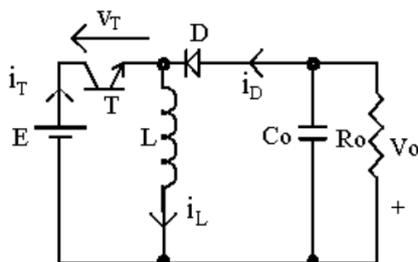


Figura 7- Topologia do conversor *buck-boost*.

3.1.1.4 Conversor *Cuk*

O conversor *cuk* contém um indutor em série com a porta de entrada e saída do conversor, a rede de comutação conecta de maneira alternada um capacitor aos indutores de entrada e saída [58]. A taxa de conversão é idêntica à do conversor *buck-boost*. Desta forma, o conversor também inverte a tensão, aumentando ou diminuindo sua magnitude. O conversor *cuk* é um conversor *boost-buck* adaptado e pode ser usado para aumentar ou diminuir a tensão de saída.

Este conversor é capaz de produzir uma tensão de saída negativa a partir de uma tensão de entrada positiva, e sua prerrogativa é a presença de indutores de entrada e saída. Esses indutores reduzem o desnivelamento de corrente na fonte de entrada e na carga, além disso, também possui maior eficiência e reduzida geração de interferência eletromagnética [69].

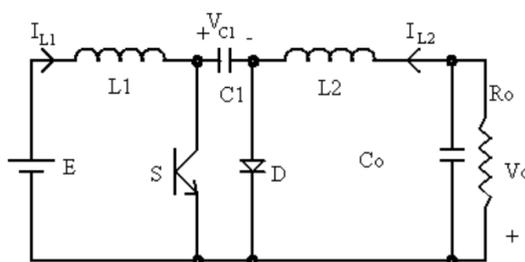


Figura 8- Topologia do conversor *Cuk*.

3.1.1.5 Conversor SEPIC

O conversor SEPIC pode aumentar ou diminuir a magnitude da tensão, todavia, não inverte a polaridade. A topologia possui os artifícios do modo de operação *buck-boost*, sem

inversão de polaridade, baixa oscilação de corrente de entrada e ampla faixa de tensão de entrada.

Ao serem aplicadas a um sistema de geração de energia elétrica, possui ainda as seguintes vantagens [70]:

- (i) Pode funcionar em topologias de *boost* ou *buck*, e há maior plasticidade para auxiliar o projeto.
- (ii) Comparado com conversores *boost* ou *buck* usuais, não apresenta problemas com uma tensão de saída de polaridade invertida.
- (iii) Os terminais de entrada do conversor contêm um indutor, o que pode mitigar os pulsos de corrente de entrada, superando a desvantagem dos pulsos de corrente elétrica, aumentando a exatidão do controle.

É comumente utilizado em painéis de LED e aplicações fotovoltaicas, por produzir saída não inversora e operar como conversor elevador e abaixador. Nada obstante, a eficiência de conversão de energia é menor do que a de outros conversores, devido ao indutor e capacitor extras, que proporcionam perdas de energia adicionais [22,71].

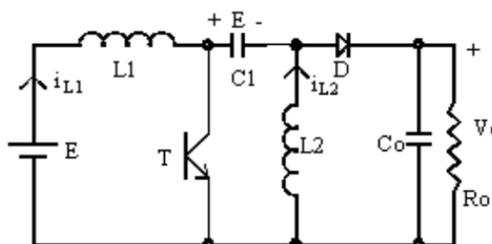


Figura 9- Topologia do conversor SEPIC.

3.1.1.6 Conversor *Flyback*

No conversor *flyback* o componente magnético comporta-se como um indutor bifilar ao invés de um transformador. Quando o elemento de comutação T conduz, armazena-se energia no primário e o diodo adquire polarização reversa. Quando T desliga, para perdurar a continuidade do fluxo, o diodo D entra em condução e a energia acumulada no campo magnético é dirigida à saída.

O dispositivo pode ser composto por um conversor *buck-boost* com isolamento galvânico, que emprega um transformador no lugar do indutor para acumular energia [72].

Tem o princípio de armazenar energia no enrolamento primário (N1) durante o período de condução, e de liberar a energia através do enrolamento secundário (N2) no período em que o interruptor não está conduzindo [72].

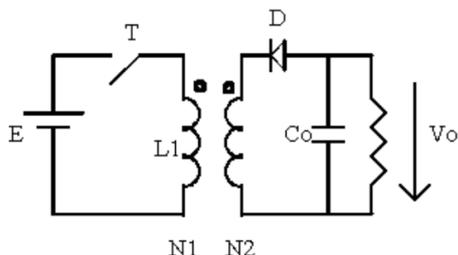


Figura 10- Topologia do conversor *flyback*.

3.1.1.7 Conversor *Forward*

Nesta topologia de conversor, quando o elemento de comutação T conduz, aplica-se a tensão E no enrolamento (N1), fazendo com que o diodo (D1) fique diretamente polarizado e gerando acréscimos de corrente no indutor L. Ao desligar T, a corrente do indutor de saída tem continuidade via diodo D3. Quanto ao transformador, é necessário um acesso que faculte a circulação de uma corrente que gere continuidade ao fluxo magnético, de modo a absorver a energia, relativa à indutância de magnetização. Isto se dá pela condução do diodo D2, durante este intervalo aplica-se uma tensão negativa no enrolamento N2 e apresenta-se um retorno de energia para a fonte [58,72,73]. A figura 11 exhibe o circuito.

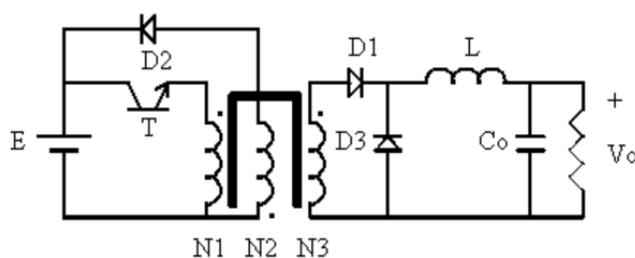


Figura 11- Topologia do conversor *forward*.

3.1.1.8 Conversor *Push-pull*

O conversor *push-pull* compõem-se de um arranjo de 2 conversores *forward*, trabalhando em contra fase, conforme mostrado na Figura 12. Quando o elemento de

comutação (T1) conduz gera tensões nos secundários. O diodo (D2) conduz simultaneamente, mantendo nulo o fluxo no transformador. Note que no intervalo entre as conduções dos transistores, os diodos D1 e D2 conduzem simultaneamente, atuando como diodos de livre circulação e promovendo curto-circuito no secundário do transformador [58,72,73].

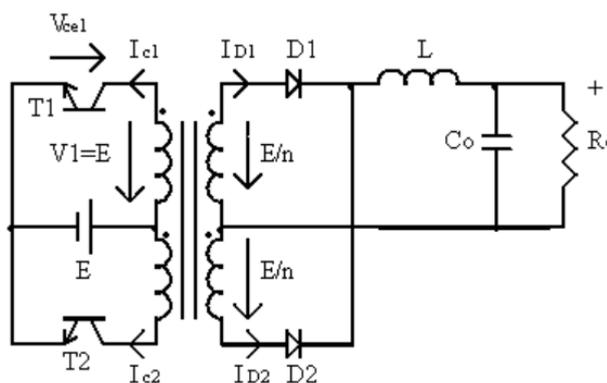


Figura 12- Topologia do conversor *push-pull*.

Dentre os conversores relacionados anteriormente, a topologia *buck-boost* costuma ser a mais adotada, devido a sua portabilidade, faixa de operação de frequências, valores de corrente e simplicidade de implantação. Contudo, as utilizações dos conversores variam de aplicação para aplicação, de acordo com objetivos a serem alcançados.

3.2 Inversor CC-CA

Neste tópico é anunciado o segundo método de mitigação de distorções, a parte de número dois no lado eletrônico de potência do sistema fotovoltaico, os estudos dos inversores CC-CA. Serão ressaltados os procedimentos mais relevantes utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

No sistema fotovoltaico conectado à rede, a energia CC deve ser convertida em energia CA com tensão, frequência e fase congruentes com a rede elétrica. Nesta condição, é primordial um conversor CC-CA, conhecido como inversor. O inversor é, portanto, um componente significativo em sistemas fotovoltaicos conectados à rede [73,74]. Existem vários tipos de inversores fotovoltaicos conectados à rede, conforme retrata a Figura 13.



Figura 13- Classificação dos tipos de inversores [74]

No inversor comutado em linha, a rede elétrica dita o processo de comutação, dispondo de dispositivos de comutação como tiristores de comutação [73]. O acionamento deste aparelho pode ser controlado pelo terminal de porta do dispositivo enquanto o desligamento não, este ocorrerá somente com a ajuda de um circuito complementar ao equipamento.

Contrariamente ao caso anterior, o inversor auto-comutado, é caracterizado pela transferência de corrente, que ocorre de um dispositivo de comutação para outro, de maneira discreta. Classifica-se por aplicar um equipamento de comutação de potência, cujo potencial nos terminais pode dominar o acionamento e a operação de desligamento, como o *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) e o *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET) [73].

Os acionamentos MOSFETs são utilizados para baixa potência distintivamente inferior a 10 kW e operação de comutação de alta frequência, enquanto as técnicas IGBTs são adotadas para potência média a alta superior a 10 kW, entretanto, a comutação de frequência muito alta não é plausível, pois a frequência limita-se a 20 kHz [74]. No caso de inversor conectado à rede, a comutação de alta frequência é fundamental para reduzir os harmônicos de corrente de saída de um inversor, o tamanho do filtro empregado e o peso do inversor.

O inversor auto-comutado usa técnicas de comutação PWM para gerar uma forma de onda em CA na saída. Podendo controlar as formas de onda de tensão e corrente no lado de

saída do inversor, ajustar o fator de potência, suprimir os harmônicos de corrente e severos a distúrbios advindos da rede. Atualmente, devido à evolução de dispositivos de comutação avançados, a maioria dos inversores para sistemas de energia distribuída, agora emprega inversores auto-comutados [73]. Os inversores auto-comutados podem ser subdivididos em inversor de fonte de tensão ou fonte de corrente de acordo com as formas de onda de tensão ou corrente em seu lado CC de entrada.

No inversor de fonte de tensão, a tensão de entrada mantém a polaridade, a direção média do fluxo de potência através do inversor e na saída, uma forma de onda de tensão CA de amplitude invariável e largura ajustável [73]. Para limitar o fluxo de corrente para a rede elétrica, um indutor de linha é adequado junto com o inversor de fonte de tensão. Os terminais de entrada de um inversor de fonte de tensão são tradicionalmente conectados em paralelo com um capacitor robusto, equivalente a uma fonte de tensão.

Para o inversor de fonte de corrente, a entrada é uma fonte de corrente CC, onde mantém-se a polaridade, a direção média do fluxo de potência é estipulada pela polaridade da tensão de entrada. Na saída, forma de onda de corrente CA de amplitude constante e largura variável. O lado CC de entrada do inversor de fonte de corrente é frequentemente conectado em série com um indutor, de alto valor de indutância, que condiciona a passagem da corrente [73].

Um inversor de fonte de tensão pode ser implementado no modo de gerenciamento de tensão, bem como no modo de domínio de corrente. Frequentemente, o inversor de fonte de tensão com controle de corrente é privilegiado para sistemas fotovoltaicos conectados à rede. [73,74].

Os inversores também podem ser classificados quanto a sua posição no sistema fotovoltaico conectado à rede. As classificações gerais podem ser as seguintes:

- Inversor central;
- Inversor de *string*;
- Inversores *multi-string*;
- Inversor integrado ao módulo;
- Inversor *master-slave*;
- Inversor *team-concept*;

3.2.1.1 Inversor Central

Nas primeiras instalações solares utilizando inversores, o sistema com inversor central caracterizado na Figura 14(a), foram praticados predominantemente, onde plantas fotovoltaicas maiores que 10 kWp foram arranjadas em série ou em paralelo conectadas ao inversor fotovoltaico [75].

A tensão desempenhada pelos módulos conectados em série foi elevada o suficiente para corresponder a condição de tensão de entrada do inversor [28]. No entanto, este inversor tinha desvantagens consideráveis, como perdas devido ao rastreamento centralizado do MPPT, cabos CC de alta tensão entre painéis, inversores, *design* inflexível, perdas nos diodos de *string* e custo oneroso. Além disso, a potência provida à rede pelo inversor central era de qualidade inferior, envolvendo muitos harmônicos de corrente.

3.2.1.2 Inversor de *String*

O inversor *string* oferece inúmeras vantagens e lidera a tecnologia atual. A Figura 14(b) ilustra a tecnologia, onde uma *string* feita por painéis solares em série sendo conectados a um inversor. A tensão de operação normal do inversor é de 340V a 510V em tensão contínua para aplicação de 230V em alternada [75].

O inversor de *string* possui vantagens quando comparado ao central, como nenhuma perda de diodo de *string*, MPPT individual aplicado a cada *string*, preço acessível em larga escala de produção e eficiência geral superior [55,76]. A possibilidade de utilizar menor número de módulos fotovoltaicos conectados em série também está à disposição, na presença de um *booster* CC-CC ou um transformador de frequência de linha [55].

3.2.1.3 Inversor *Multi-string*

O conceito de inversor *multi-string* na Figura 14(c), foi concebido para estender o nível de potência, mantendo as vantagens do inversor *string* sobre o inversor centralizado. Os conversores CC-CC de baixa potência com suas próprias técnicas MPPT são ligados a *strings* individuais e são associados através de um barramento CC a um único inversor de

alta potência à rede [76,77]. Nesta estrutura, somente uma nova *string* com conversor CC-CC deve ser incluída para ampliar o sistema em uma determinada faixa de potência. Para operação de comutação de baixa potência e alta frequência e de alta potência e baixa frequência, são usados MOSFETs e IGBTs, respectivamente.

3.2.1.4 Inversor Integrado ao Módulo

O módulo CA mostrado na Figura 14(d) trata a estabilização do inversor e módulo fotovoltaico em sistema único, chamado de módulo integrado de sistema fotovoltaico conectado à rede. Com a existência exclusivamente de um módulo fotovoltaico, as perdas de separação entre módulos são destituídas, tornando-se um equipamento de fácil instalação e que pode ser utilizado por pessoas sem nenhum conhecimento prévio em sistemas fotovoltaicos [76,77]. A principal inconveniência é a eficiência geral reduzida em função da amplificação de tensão e custo de instalação. No entanto, pode ser superada pela produção em larga escala, levando a menores custos de fabricação e varejo.

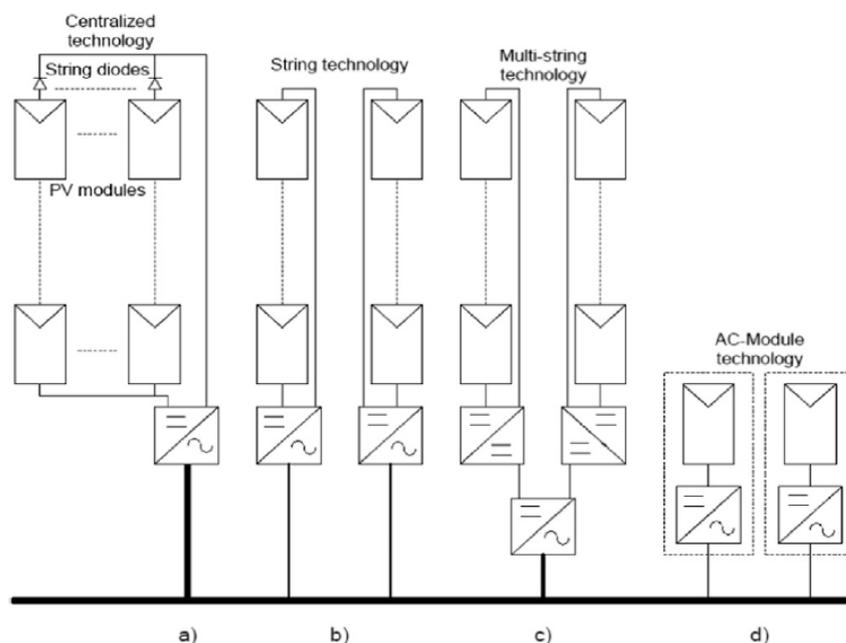


Figura 14- Evolução histórica dos inversores conectados à rede [55].

3.2.1.5 Inversor *Master-slave*

As cargas nos inversores sofrem variações ao longo do dia, pois a irradiância solar não é constante. A eficiência dos inversores não é estável para todas as cargas de 0% a 100% e, em cargas menores, é menor que a eficiência de pico.

Neste conceito, os dispositivos mestre e escravo são dispostos em paralelo no lado CC, com o mestre controlando a quantidade de escravos que estão operando subordinando-se a irradiação solar. Com baixa irradiação solar, permite maiores eficiências em relação ao caso em que todos os inversores estão operando permanentemente [78].

3.2.1.6 Inversor *Team-concept*

Esta tecnologia combina o inversor *string* com o conceito de *master-slave* [75,79]. Em caso de irradiação solar muito baixa, o painel é conectado a um inversor único. Com o aumento da irradiação, o painel fotovoltaico é segmentado em *string* menores, com cada inversor de *string* operando próximo a potência nominal. Neste modo, cada *string* opera de maneira independente com seu próprio MPPT. Com baixa irradiação solar, os inversores são operados no modo mestre-escravo.

Dentre os conversores relacionados anteriormente, o inversor de *string* lidera a tecnologia atual, devido as baixas perdas, valor de mercado e certa facilidade de implantação. Contudo, a escolha da topologia de inversor varia de aplicação para aplicação, de acordo com objetivos traçados.

3.3 Filtros Passivos e Ativos

Mitigar os efeitos de cargas não lineares no desempenho do sistema fotovoltaico corresponde ao terceiro método de redução das distorções harmônicas geradas. Serão apresentados neste tópico arranjos de circuitos capazes de amenizar a proliferação de distorções harmônicas de correntes e tensões em sistemas elétricos.

Inicia-se a abordagem retratando as teorias relacionadas a filtros passivos, verificando aspectos de dimensionamento, problemas de uso diante de distorção harmônicas, entre outros. Estende-se o estudo para filtros ativos, suas principais características em termos harmônicos, vantagens e desvantagens.

Dentre as medidas de atenuação mais notórias de combate às distorções provocadas por harmônicos, tem-se os filtros passivos e ativos. Os filtros ativos, por demandam maior valor agregado que os passivos, tendo ligeiras aplicações em grandes instalações para reduzir as correntes harmônicas existentes [80]. Além da classificação anterior, os filtros podem ser categorizados conforme as frequências não atenuadas, nesse caso eles são chamados de: passa baixas, o filtro passa altas, filtro passa faixa e o filtro de rejeição de faixa.

3.3.1.1 Filtros Passivos

O artifício tradicional aplicado para a redução da propagação de conteúdos harmônicos em sistemas elétricos é o uso de filtros sintonizados conectados em derivação no alimentador.

Os filtros passivos são constituídos substancialmente pela junção de resistores, capacitores e indutores, gerando um composto com baixa impedância, por onde uma corrente de determinada ordem harmônica é reorientada para a terra ao invés de alastrar-se pelo sistema inteiro, ocasionando prejuízos citados. A ordem harmônica a ser limitada, para qual o filtro foi dimensionado, relaciona-se como frequência de sintonia e a seletividade pode ser determinada pelos valores da resistência, indutância e capacitância dos elementos passivos intervenientes do equipamento [80].

(i) Filtro L

O filtro L condiz com a topologia de filtro passivo mais trivial a ser utilizada num inversor conectado à rede, tendo sua composição realizada por apenas um componente indutivo, cuja impedância reduz-se linearmente com a frequência numa taxa de 20 dB/dec. Possui como vantagens como o fato de não causar ressonância e de possuir uma função de transferência, representada na Equação 15, de primeira ordem com fácil controle [81].

$$G_L(s) = \frac{1}{sL_1} \quad (15)$$

O essencial problema no emprego deste filtro reside no impedimento de alcançar boa atenuação na frequência de comutação ao mesmo tempo em que se concede a passagem da frequência da rede com valores não muito elevados de indutância. Por conseguinte, para boa atenuação, a indutância deve ser elevada e o filtro tende a ser robusto e de alto custo [81].

(ii) Filtro LCL

O filtro LCL é um filtro de terceira ordem que insere um par de polos complexos não amortecidos deliberando aumento da taxa de atenuação de 20 dB/dec para 60 dB/dec no espectro de frequência em escala logarítmica. Sua função de transferência é representada pela Equação 16 [81].

$$G_{LCL}(s) = \frac{1}{s^3 L_1 L_2 C_f + s(L_1 + L_2)} \quad (16)$$

O filtro LCL, quando comparado com o tradicional filtro L, pode atender as demandas da conexão na rede com menores volume e custo. Ainda assim, ruídos ou a planta de controle poderiam denigrir a qualidade da corrente e até alcançar a frequência de ressonância, caso nenhum método de amortecimento seja utilizado [82].

(iii) Filtro LCL+R

O filtro LCL+R integra um resistor de amortecimento em paralelo com o capacitor de filtragem. O resistor tem a função de realizar o deslocamento dos polos complexos para o semiplano esquerdo fomentando a atenuação do pico ressonante. Sua função de transferência é descrita por Equação 17 [81].

$$G_{LCL+R}(s) = \frac{1}{s^3 L_1 L_2 C_f + s^2 \frac{L_1 L_2}{R_d} + s(L_1 + L_2)} \quad (17)$$

A vasta adversidade desta topologia relaciona-se a ínfima eficiência, visto que, para baixas frequências (f_g) os indutores possuem baixos valores de reatância, causando perdas estimadas no resistor que está submetido à tensão da rede. Além de tudo, esta associação requisita resistências de altos valores, suscitando desempenho menor da atenuação em altas frequências [83].

(iv) Filtro LCL+RC

Objetivando resolver as contrariedades da topologia LCL+R, o filtro LCL+RC segmenta a capacitância total entre o ramo de filtragem e o ramo de amortecimento com a razão de capacitâncias RC.

A topologia LCL+RC ganha cada vez mais espaço por apresentar a redução nas perdas, austeridade e bom desempenho em altas frequências [84]. Sua função de transferência está descrita em Equação 18.

$$G_{LCL+RC}(s) = \frac{s + \frac{1}{C_d R_d}}{s^4 L_1 L_2 C_f + s^3 \frac{L_1 L_2 (C_f + C_d)}{C_d R_d} + s^2 (L_1 + L_2) + s \frac{(L_1 + L_2)}{C_d R_d}} \quad (18)$$

A problemática do filtro LCL+R relatado anteriormente, resolve-se graças à introdução do capacitor C_d em série com R_d que, em baixas frequências, desacopla o ramo de amortecimento contendo R_d . Isso possibilita a extinção das perdas em torno de f_g sem afetar o desempenho de atenuação em torno da frequência de comutação f_s [81].

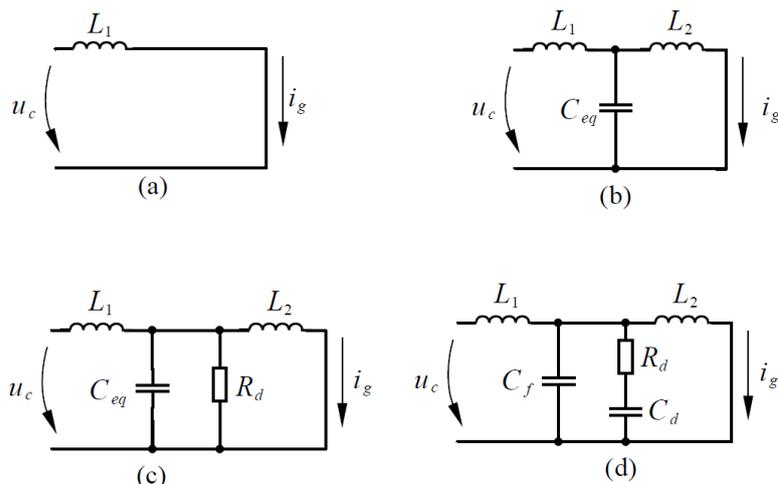


Figura 15- Topologias de filtros passivos. (a): L. (b): LCL. (c): LCL+R. (d): LCL+RC [81].

3.3.1.1 Filtros Ativos

A utilização de um filtro ativo de potência faz com que um conversor CC-CA produza uma tensão ou corrente alternada com qualquer forma de onda. A capacidade de síntese torna-se limitada devido a frequência, que corresponde a uma parcela da frequência de comutação, provendo-se ainda a existência de um filtro de saída que minore o ingresso de elementos de alta frequência na rede.

Os inversores detêm incumbência de instituir uma corrente ou tensão que siga uma referência, que se relaciona com as mesmas, que se quer neutralizar. São possíveis implementações de filtros em paralelo, série, *Unified Power Quality Conditioner* (UPQC) e híbridos [85].

(i) Filtro em Paralelo

Um filtro em derivação ou paralelo, tem como objetivo minorar a distorção da corrente que flui pela rede elétrica. Este deverá ser capaz de inserir uma corrente que, somada à corrente da carga, origine uma corrente livre de distúrbios na rede.

O filtro em paralelo da Figura 16(a) pode ser empregado com o interesse de anular: harmônicos de corrente, potência reativa, corrente de neutro e desequilíbrio de corrente [85].

(ii) Filtro em Série

Nesta conjuntura, tem-se como propósito mitigar a distorção de tensão da alimentação da carga, retificando eventuais harmônicos na tensão da rede local. A tensão estabelecida pelo filtro corresponde a uma amostra da tensão nominal da rede, enquanto a corrente que o percorre faz referência a corrente da carga.

O filtro série da Figura 16(b) equivale a um filtro *dual shunt* que funciona como fonte de tensão controlada, com a intenção de impor o negativo dos harmônicos de tensão [86]. Pode ser aplicado com a destinação de reduzir: harmônicos de tensão, instabilidade e afundamentos de tensão.

(iii) Filtro em UPQC

A combinação das topologias série e paralelo na Figura 16(c) viabiliza a composição condicionador unificado de qualidade de energia, o UPQC. A topologia utiliza os filtros ativos série e paralelo associados, adquirindo as características de compensação de tensão e corrente em uma ferramenta apenas [86,87].

O emprego do UPQC deve ser limitado a um panorama de cargas críticas, muito sensíveis às distorções harmônicas e, à vista disso requerem um fornecimento de energia de excelência. Estas cargas devem estar em um barramento juntamente com outras cargas não lineares geradoras de distorções de corrente e tensões da rede [85].

Para implementar esse filtro utiliza-se dois conversores conectados a um barramento CC único como mostra a Figura 16(c), onde o conversor em paralelo detém o controle da tensão do barramento. Esta topologia, do ponto de vista de resultados, reflete a melhor entre as existentes. Entretanto, sua operação deve ser restrita a sistemas que justifiquem um elevado investimento [88].

(iv) Filtro Híbrido

O filtro híbrido na Figura 16(d) propõem o uso de um filtro paralelo passivo e um série ativo [88-90]. Esta topologia tem a intenção de diminuir a potência dos filtros ativos, em consequência o custo inicial. O filtro ativo série funciona como um isolador harmônico

para impedir uma possível interação da rede elétrica com os filtros passivos, eliminando assim, os problemas de ressonância dos desses filtros e tornando a tarefa de sintonizá-los descomplicado.

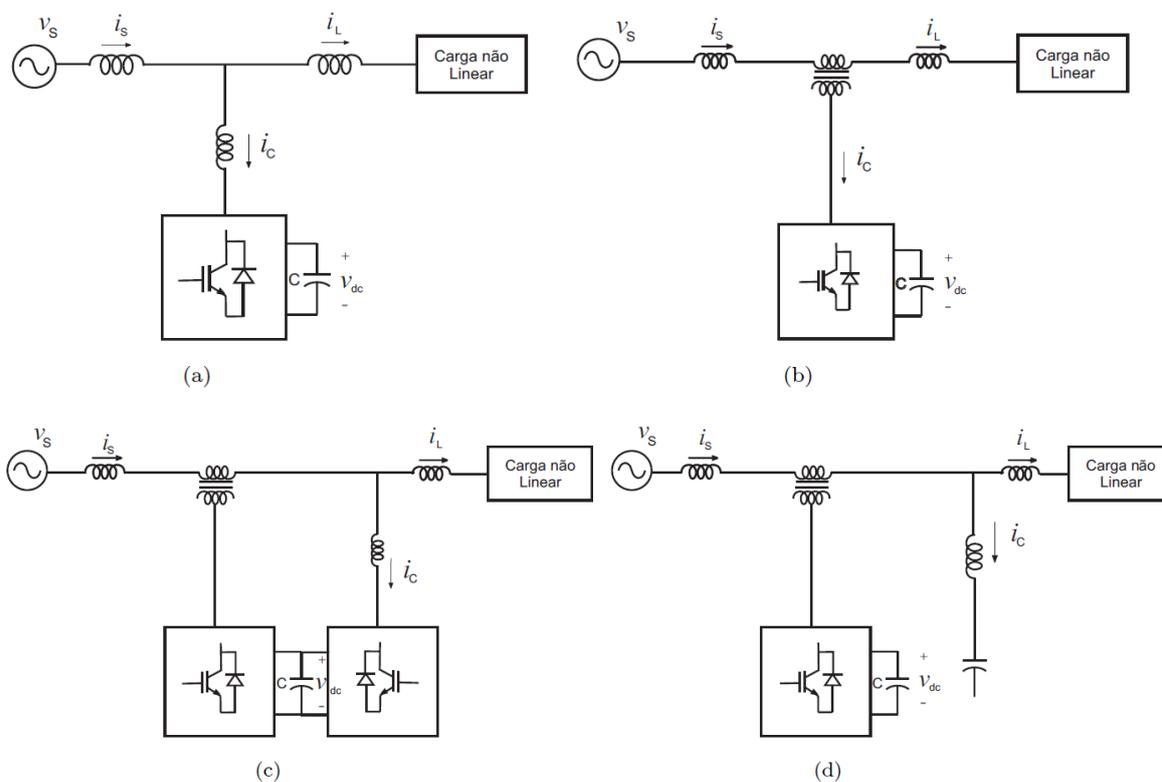


Figura 16- Topologias de filtros ativos. (a): paralelo. (b): série. (c): UPQC. (d): híbrido. [85].

Dos tipos de filtros abordados anteriormente, a predominância nos sistemas fotovoltaicos está na implantação de filtros passivos, devido a seletividade de frequências, componentes elementares e implantação facilitada. As topologias de filtros passivos do tipo LCL são as mais adotadas em sistemas conectados à rede, por conseguirem amparar às limitações de harmônicas injetadas com menor volume e custo reduzido [84,91].

Capítulo 4 - Classificação de Topologias de Inversores

Neste capítulo apresenta-se algumas das principais variações na especificação de topologias de inversores, com base em diferentes categorias, como: número de estágios de processamento de energia, posicionamento do capacitor, a utilização de transformador ou não e, se empregues, um transformador de linha de frequência ou transformador de alta frequência e etc.

4.1 Número de Estágios de Processamento de Energia

Na primeira categoria descrita, as topologias dos inversores podem ser apontadas de acordo com o número de estágios de processamento de energia, de acordo com a Figura 17.

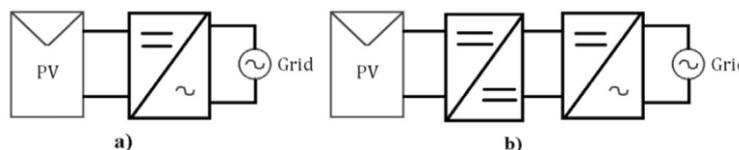


Figura 17- Inversores por estágio [55].

4.1.1.1 Estágio Único

O inversor de Figura 17(a) é um inversor de estágio único, que implementa sozinho todas as tarefas, ou seja, amplificação de tensão, MPPT e controle de corrente do inversor a ser injetada na rede. O dispositivo deve ser concebido para lidar com uma potência de pico de duas vezes a potência nominal, de acordo com a Equação 19. O inversor comanda a corrente por meio de PWM ou operação *bang-bang* [73].

$$P_{rede} = 2P_{rede} \text{sen}^2(\omega_{rede} t) \quad (19)$$

Onde, P_{rede} é a potência de pico da rede, ω_{rede} é a frequência da rede.

A seguir, são ilustradas algumas topologias de inversores de estágio único, disponíveis na literatura relacionada a energia elétrica e em trabalhos acadêmicos.

Observa-se na Figura 18, indica-se a topologia tradicional do inversor *buck* de estágio único com transformador de frequência de linha. O transformador do projeto é responsável por cerca de 2% perdas no pico de eficiência e responsável pela maior parte do peso do inversor [92].

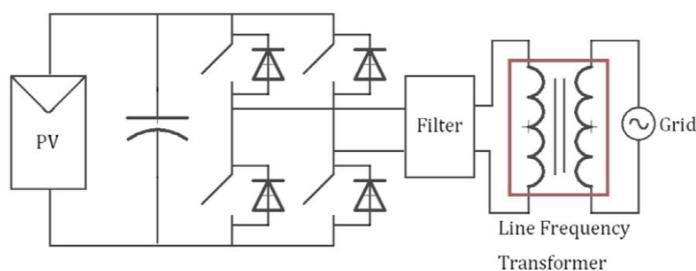


Figura 18- Inversor ponte completa, auto-comutados com transformador de frequência de linha [93].

As iniciativas sem transformador ou com transformador de alta frequência, devido a menores valores de impedância em frequências elevadas, são mais acessíveis financeiramente, mais eficientes e, na maioria dos casos, mais leves e, por isso, correspondem a uma alternativa para as topologias de inversores.

Outro esquema de inversor *buck-boost*, com seis dispositivos de comutação de potência, é apontado na Figura 19. Nesta estrutura, carrega-se o indutor de retenção em duas direções diferentes, gerando corrente CA na saída [94]. Esta topologia em comparação com topologias com quatro dispositivos de comutação realiza o aterramento da rede e dos módulos fotovoltaicos.

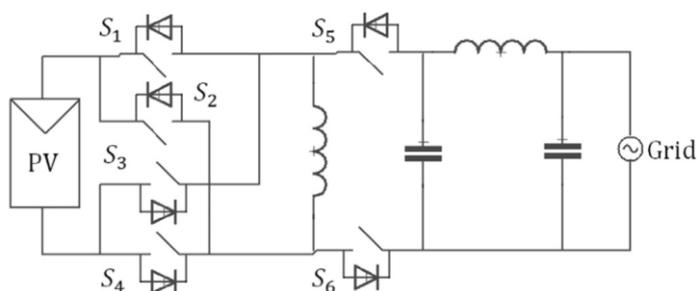


Figura 19- Topologia de inversor buck-boost estágio único com seis dispositivos de comutação [94].

O esquema apresentado na Figura 20 contém dois conversores *boost*, que atuam para cada meio ciclo da tensão da rede [95]. Esta topologia apresenta a desvantagem que seus dispositivos de comutação são operados em alta frequência e simultaneamente, resultando maiores perdas por comutação.

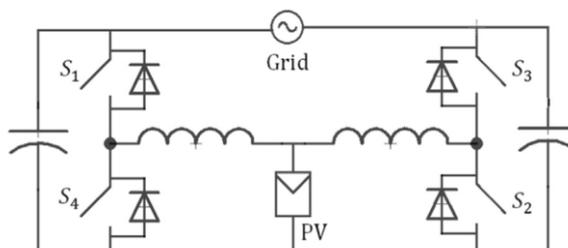


Figura 20- Inversor impulso de estágio único [95].

No diagrama indicado na Figura 21, o transformador de alta frequência fornece isolamento entre sistema e a rede elétrica. Este arranjo é relevante para baixa potência, geralmente potências menores que 500 W, devido a indutância no primário do transformador [96].

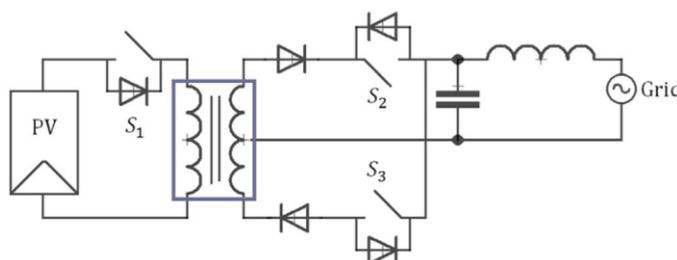


Figura 21- Inversor *flyback* isolado de estágio único [96].

Uma nova estrutura de inversor baseada no princípio *buck-boost* é retratada na Figura 22 [97]. Durante o semiciclo positivo da tensão da rede, aciona-se (S_1) em alta frequência enquanto (S_2) continua ligado. Durante o semiciclo negativo, (S_3) é comutado enquanto o interruptor (S_4) é mantido ligado. Neste projeto, tem-se a vantagem da baixa perda de comutação devido ao número de comutadores operados simultaneamente.

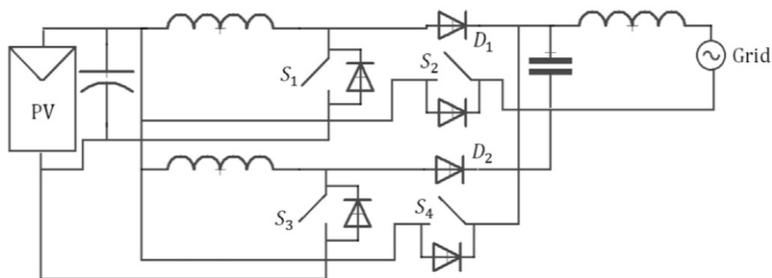


Figura 22- Inversor *boost* estágio único aprimorado [97].

A eliminação de transformadores de frequência de linha enfatiza as topologias baseadas em inversores *buck-boost* de estágio único. Todavia, esses esquemas detêm baixa capacidade de energia, baixa qualidade e baixa faixa de tensão CC de entrada. Elevando a capacidade de energia, aumentará também as tensões de pico de corrente no dispositivo de comutação [73]. Portanto, em aplicações de alta potência, alta qualidade de energia e ampla faixa de tensão, os inversores de estágio único não são indicados. Para esses propósitos, os inversores de múltiplos estágios são muito usados.

4.1.1.2 Múltiplos Estágios

Na Figura 17(b), um inversor com dois estágios de processamento de potência é exibido. O conversor CC-CC executa as tarefas de amplificação de tensão e o MPPT. De acordo com o modo de controle do inversor, a saída dos conversores CC-CC será uma tensão CC pura ou modulada para seguir uma onda semisenoidal. O dispositivo é comutado em frequência de linha, alterando a corrente de onda semisenoidal para onda completa e, nesta aplicação, o conversor CC-CC controla a corrente CA a ser injetada na rede [73]. Na situação de potência nominal elevada, deve-se operar o inversor no modo PWM, por outro lado, uma alta eficiência pode ser alcançada para o segundo caso se a potência nominal for baixa.

Define-se um inversor de múltiplos estágios como sendo o inversor que possui mais de um estágio de processamento de energia, onde um ou mais estágios cumprem tarefas de amplificação de tensão, isolamento galvânico, e no estágio final exerce tarefas de conversão CC-CA. A seguir, são apresentadas algumas topologias de inversores de múltiplos estágios, disponíveis na literatura e em trabalhos acadêmicos da área de energia elétrica.

A Figura 23 apresenta um inversor *buck-boost* de múltiplos estágios [97]. Este esquema não possui isolamento, uma vez que o transformador é inexistente. Neste modelo, a faixa de tensão CC de entrada é demasiadamente baixa.

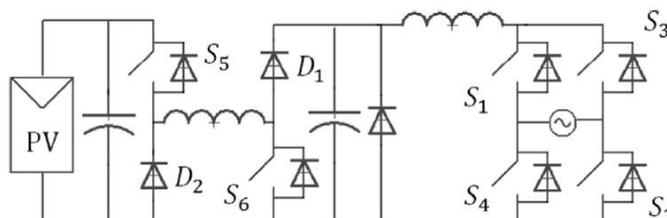


Figura 23- Inversor *buck-boost* não isolado de dois estágios [97]

A Figura 24, ilustra uma topologia de inversor *buck-boost* de múltiplos estágios isolado, que simboliza um transformador de alta frequência que pode trabalhar com baixa tensão CC [97]. Em ambas as topologias mostradas nas Figuras ((19) e (20)), o segundo estágio é um inversor de corrente que está comutando para modificar a corrente de onda senoidal retificada, do primeiro estágio para uma corrente senoidal de onda completa.

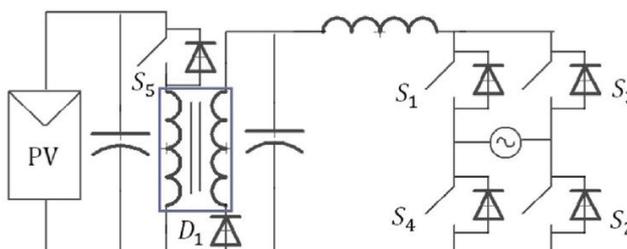


Figura 24- Inversor *buck-boost* isolado de dois estágios [97].

Dois outros inversores *boost* de múltiplos estágios são indicados nas Figuras ((25) e (26)). Na primeira apresentação, o estágio final corresponde a um inversor conectado em paralelo com *pseudo-link*, em contrapartida, no caso seguinte, o último estágio assemelha-se a um inversor fonte de corrente em série com um indutor robusto [98].

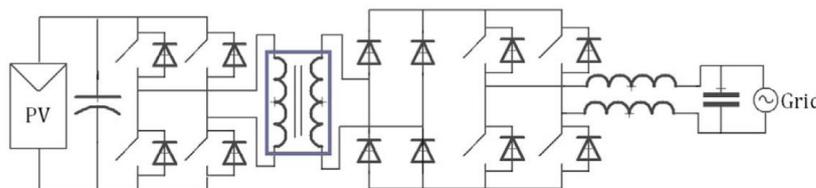


Figura 25- Inversor *boost* de múltiplos estágios com *pseudo-dc-link* [98].

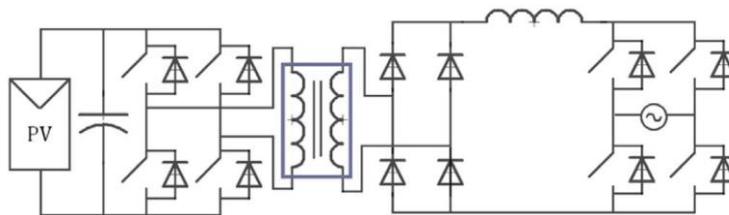


Figura 26- Inversor *boost* de múltiplos estágios [98].

4.2 Desacoplamento de Energia

O desacoplamento de energia é fundamental para filtrar picos de tensão e movimentar apenas as componentes CC da fonte de entrada, sendo apresentada neste tópico. Geralmente é realizado por meio de um capacitor eletrolítico robusto, inserido em paralelo com os módulos ou no *link DC* entre os estágios do conversor, conforme realizado na Figura 27 [73].

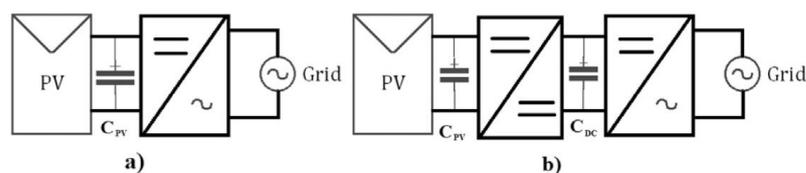


Figura 27- Capacitor de desacoplamento de potência [99].

Fundamentalmente, nos circuitos inversores, a comutação de alta frequência gera grandes variações na frequência de comutação. O capacitor eletrolítico do barramento CC ajuda a evitar o retorno dessas oscilações para a entrada. Contudo, tais capacitores são grandes, caros e sua vida útil encurtada em relação a qualquer outro equipamento adotado no circuito do inversor [99]. Além disso, são de baixa eficiência e confiabilidade. Em razão desses problemas, objetiva-se eliminar ou reduzir a capacitância.

A seguir, são mostradas algumas topologias de inversores com desacoplamento de energia, disponíveis na literatura relacionada a energia elétrica e em trabalhos acadêmicos.

A esquematização convencional do inversor de dois estágios, como exibido na Figura 28, consistiu em conversor CC-CC do tipo *boost* com inversor em ponte completa e filtro em paralelo com a rede [100]. A saída deste conversor CC-CC precisou de um capacitor eletrolítico robusto para manter a tensão constante. O capacitor eletrolítico e os estágios de

potência do inversor, puderam ser reduzidos do ponto de vista prático usando novas topologias, como representado a seguir.

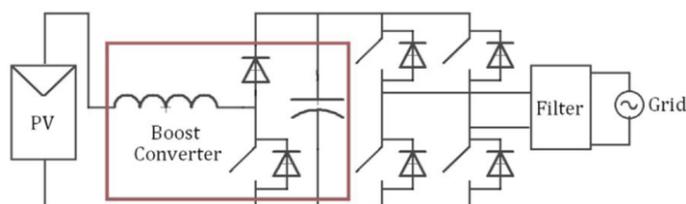


Figura 28- Inversor sem transformador conectado à rede [93].

Uma inovação foi apresentada na Figura 29, onde a figura refere-se ao circuito de comutação suave por onda senoidal de compartilhamento de tempo com modo duplo seletivo. Esta topologia é integrada pelo conversor CC-CC tipo *boost* de rastreamento de tensão de onda senoidal e compartilhamento de tempo seletivo com diodo de *by-pass* de tempo complementar, inversor ponte completa com filtro passa-baixa [99]. O conversor de rastreamento é usado para elevar e transmutar a tensão do *link DC* para um valor absoluto CA de senoidal constante. O inversor ponte completa é manobrado seletivamente pela técnica de controle de onda senoidal para produzir a tensão de saída CA e conectar à rede elétrica.

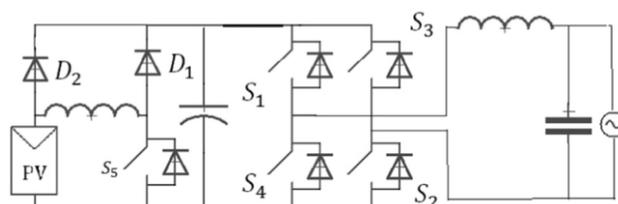


Figura 29- Inversor circuito de comutação suave controlada por onda senoidal de modo duplo seletivo [99].

4.3 Transformadores e Interligações

Neste tópico são abordados, previamente, as variações quanto à utilização ou não de transformadores. Alguns inversores empregam um transformador de frequência de linha que permite isolamento galvânico entre o painel fotovoltaico e a rede elétrica. No entanto, o transformador de frequência proporciona aumento de tamanho, peso e custos.

Os inversores modernos utilizam transformadores de alta frequência combinados em um conversor ou inversor CC-CC, encurtando o tamanho e o peso do sistema. E alguns inversores não incluem transformador, como ilustra a Figura 30 [55].

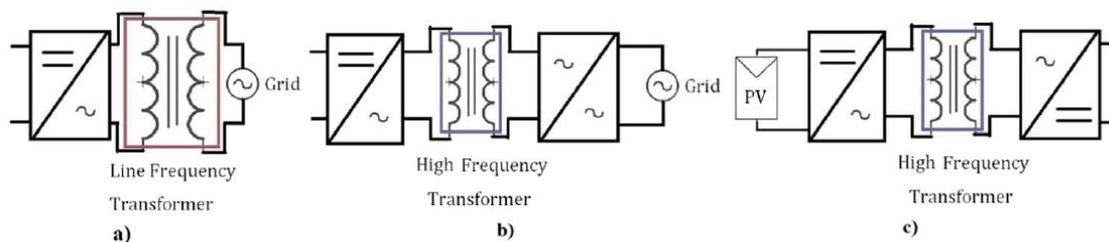


Figura 30- Inversores baseados em transformadores [55].

Diagramas sem transformador comumente são mais eficientes e mais baratos que inversores com transformador. Contudo, deve-se considerar o problema de injeção de corrente CC e a conexão direta do gerador fotovoltaico à rede sem isolamento galvânico. Em concordância com o circuito do inversor, isso pode gerar flutuações de tensão entre o painel fotovoltaico e a terra.

O projeto do sistema fotovoltaico molda um capacitor, em relação à terra, que se energiza por esta tensão flutuante. O valor do capacitor pode variar entre 50 e 150 nF por kWp para células de silício cristalino e valores de até 1 μ F por kWp para células de filme fino, conforme os parâmetros climáticos e da estrutura do painel fotovoltaico [101].

Outro problema é que as flutuações de tensão provocam interferência eletromagnética, do inglês *Electromagnetic Interference* (EMI). Alguns estudos apontam que essa interferência em sistemas sem transformador é geralmente desprezível e não gera nenhum risco neste tipo de sistema [102,103]. Um exemplo de topologia de inversor conectado à rede com transformador de alta frequência é apresentada a seguir nesta seção.

O inversor da Figura 31 é do tipo *flyback* e *buck-boost* combinado, classificado para 160 W. Neste projeto são usados conversores *flyback* de duas chaves [104]. A indutância de fuga incluída no transformador resulta em um pico de tensão no interruptor (S_3), mas como outro interruptor (S_4) é empregado, o problema de sobretensão que se têm quando empregasse um único interruptor é superado.

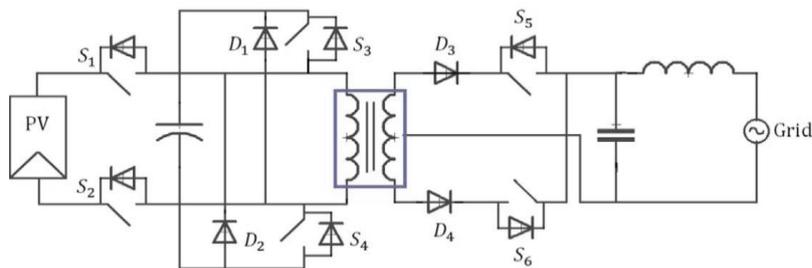


Figura 31- Inversor *flyback* de dois interruptores [104].

Algumas topologias de inversores sem transformador conectados à rede são apresentadas a seguir.

Na topologia da Figura 32, (S_5) está ligado no meio ciclo positivo da tensão da rede e está desligado no meio ciclo negativo, enquanto o interruptor (S_6) está desligado no meio ciclo positivo e ativo no meio ciclo negativo [105]. Isso permite que os diodos D_1 e D_2 funcionem como diodos de roda livre nos semiciclos negativo e positivo, respectivamente, evitando que a corrente de saída flua através dos diodos dos dispositivos de comutação da ponte completa.

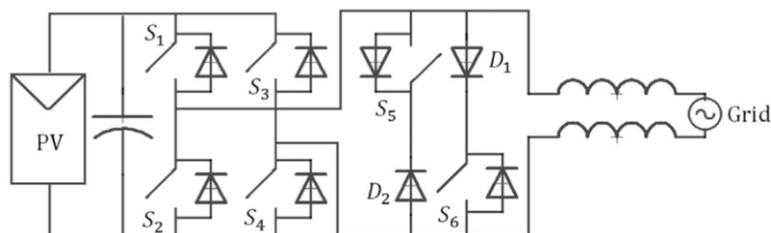


Figura 32- Topologia HERIC [105].

No esquema ilustrado na Figura 33, os interruptores S_2 e S_5 são comutados na frequência de linha, onde S_1 , S_3 e S_4 são comutados em alta frequência. Durante o período de roda livre atual, S_1 não está acionado. O caminho de roda livre é vedado pelo transistor da chave S_2 e o diodo do interruptor S_4 durante o semiciclo positivo da tensão da rede e pelo transistor da chave S_4 e o diodo do interruptor S_2 durante a metade negativa ciclo da tensão da rede [106]. Como esta topologia consiste em cinco dispositivos de comutação, esta topologia é chamada de topologia H5.

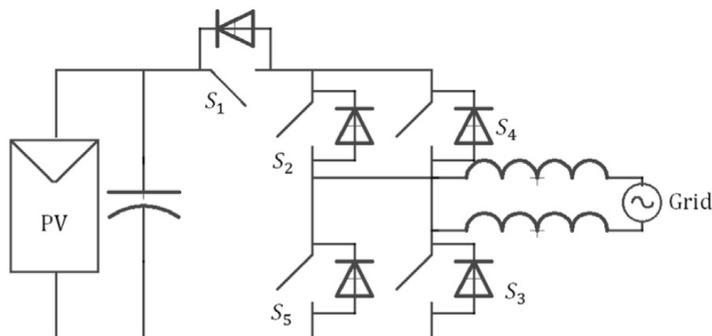


Figura 33- Topologia H5 [106].

O diagrama da Figura 34 revela um circuito do inversor proposto com configuração do tipo H6, composto por seis dispositivos de comutação de potência, dois diodos de roda livre e dois indutores divididos como um filtro passa-baixa. Este circuito é apropriado para inversor integrado de módulo não isolado devido seguintes vantagens [73]:

- alta eficiência e ampla faixa de carga empregando MOSFETs para todas as chaves ativas, dado que seus diodos de corpo intrínseco são inativos;
- menor corrente de fuga à terra, uma vez que a tensão aplicada à capacitância contém apenas componentes de baixa frequência;
- não há necessidade de capacitores eletrolíticos;
- indutância de saída pequena em relação ao inversor de ponte completa comum com comutação PWM bipolar;

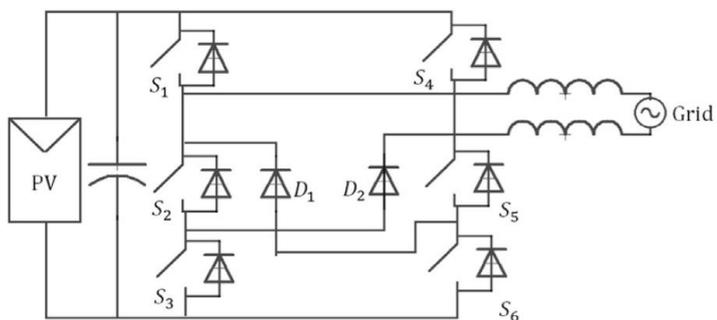


Figura 34- Topologia H6 [73].

A topologia da Figura 35, proporciona conexão direta entre o neutro e o terminal negativo do painel fotovoltaico, eliminando quaisquer oscilações de tensão [107]. A estrutura consiste num circuito capaz de operar como um estágio *buck* e *boost* com instrumentos de comutação auxiliares que definem a polaridade de saída. Nesta tecnologia, conhecida como Topologia *Karschny* ou *flying inductor*, a grande quantidade de semicondutores e a necessidade de armazenar toda a energia no indutor direccionam, respectivamente, a altas perdas e maiores tamanhos e custos [108].

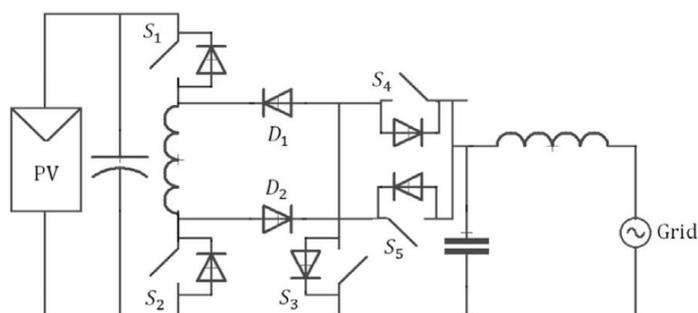


Figura 35- Topologia *Karschny* [107].

A topologia sem transformador da Figura 36, evolui da topologia H5 pela inserção de comutadores adicionais (S_5, S_6) em virtude de conexões de ponto médio nos estados zero.

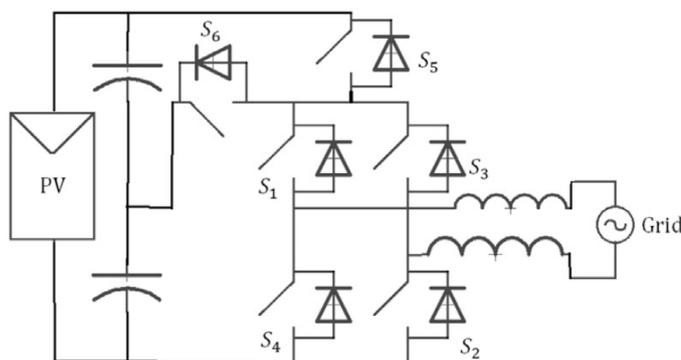


Figura 36- Topologia H5 modificada [73].

A esquemática do exibida na Figura 37, com fixação de ponto médio ao fio neutro da rede eléctrica, trata-se de um tipo de inversor conectado à rede monofásico sem transformador fixado. Esta topologia é conhecida como *flying capacitor* e requer uma tensão de barramento CC mais alta, fornecendo uma baixa ondulação de corrente do indutor do filtro devido à tensão de saída de três níveis [73].

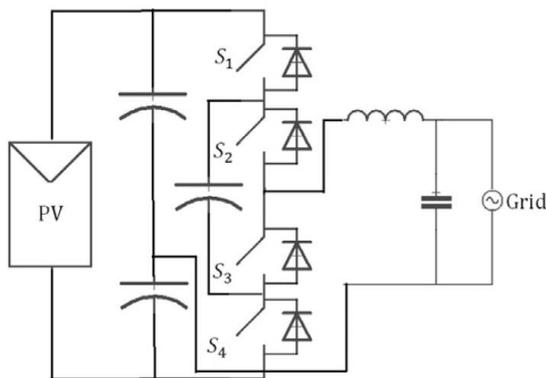


Figura 37- Topologia *flying capacitor* [73].

4.4 Inversor Multinível

A melhoria dos inversores fotovoltaicos conectados à rede está ligada a redução dos custos gerais do sistema fotovoltaico. A eficiência de um inversor conectado à rede está acima de 98% e não é a essência do desenvolvimento, embora uma alta eficiência seja um pré-requisito para qualquer tipo de sistema próspero.

Os inversores multiníveis conectados à rede oferecem várias vantagens em comparação com os inversores de dois níveis. Ao originar a tensão CA a partir de vários níveis de tensão, podem ser geradas formas de onda senoidais em escada, que se aproximam da forma senoidal ideal, com baixa distorção harmônica, mitigando os requisitos de filtro [109]. Diferentes níveis de tensão CC podem ser facilmente gerados.

A concepção de conversores multinível foi introduzida em 1975 [110]. O conteúdo multinível começou com o conversor de três níveis [111]. Mais tarde, vários estudos de conversores multiníveis foram desenvolvidos [109,112,113]. Algumas topologias multiníveis são apresentadas a seguir nesta seção.

4.4.1.1 *Half-bridge Diode Clamped*

A Figura 38 exibe um inversor de três níveis grampeado por diodo de meia ponte [114] como parte de um sistema fotovoltaico monofásico sem transformador conectado à rede, conforme sugerido em [115].

Com a apuração simultânea dos interruptores S_1 e S_2 gera-se uma tensão positiva no terminal de saída do inversor. Uma tensão de saída zero é criada ativando S_2 e S_3 e uma tensão negativa é criada ligando S_3 e S_4 . Para outorgar a transferência de energia para a rede, as tensões do barramento CC devem ser superiores a amplitude da tensão da rede elétrica [114,115]. Uma vantagem deste sistema é que o ponto médio do arranjo é aterrado, eliminando as correntes de terra capacitivas e sua influência negativa na compatibilidade eletromagnética do circuito.

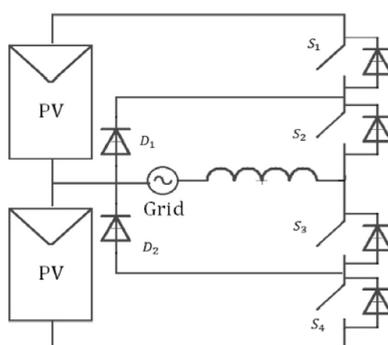


Figura 38- Inversor de três níveis *half-bridge diode clamped* [114].

4.4.1.2 *Full-bridge Single Leg Clamped*

O esquema da Figura 39 é composto por uma ponte completa convencional, onde um interruptor bidirecional é adicionado para controlar o fluxo de corrente e o ponto médio do barramento CC. No caso de sistema fotovoltaico sem transformador, o tamanho mínimo do inversor com esta topologia é de aproximadamente 1,5 kW [114].

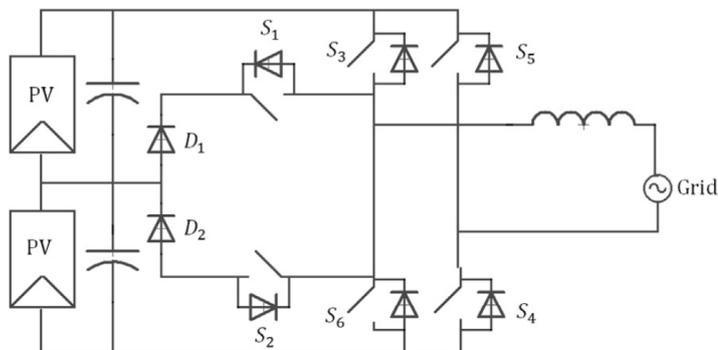


Figura 39- Inversor de três níveis *full-bridge single leg clamped* [114].

4.4.1.3 Em Cascata

A Figura 40 indica um sistema fotovoltaico conectado à rede sem transformador, onde um inversor em cascata é usado para conversão de energia CC para CA. A topologia contém duas configurações de ponte completa com suas saídas CA conectadas em série. Cada composição de ponte pode criar três níveis de tensão diferentes em sua saída CA, fornecendo uma tensão de saída CA geral de cinco níveis. A vantagem desta topologia é o caráter modular [116].

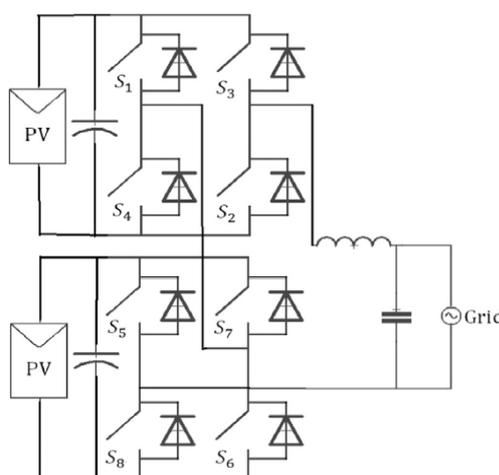


Figura 40- Inversor em cascata [116].

4.5 Comutação Suave

Com o intuito de obter melhor desempenho, eficiência e densidade de potência, as técnicas de comutação suave foram aplicadas no projeto de inversores conectados à rede. Em inversores PWM de comutação de alta frequência, variações na tensão de comutação e nas formas de onda da corrente proporcionam graves perdas de comutação e problemas de EMI [117,118].

Os valores máximos de tensão ou corrente podem ser observados durante os transitórios, devido a capacitâncias e indutâncias parasitas em torno dos equipamentos de comutação de energia [73]. Nas esquemáticas de inversores de comutação suave, uma rede ressonante de alta frequência composta por componentes passivos como indutores,

capacitores, diodos auxiliares ou dispositivos de comutação de potência é anexada aos circuitos PWM convencionais.

As tradicionais topologias de inversores PWM *buck-boost* possuem algumas desvantagens, como baixa eficiência em alta frequência de comutação, custo elevado devido ao grande peso e tamanho causado, grande corrente de fuga, EMI causadas por componentes harmônicos de alta frequência [73]. Para suplantiar essas limitações, são empregadas técnicas de comutação suave ressonante, sendo evitadas devido ao fato que a corrente ou tensão é igual ou próxima de zero. Algumas topologias de inversores de comutação suave são apresentadas a seguir nesta seção.

O esquema na Figura 41 corresponde a um inversor de fonte de tensão baseado em um conversor CC-CC ressonante em série de 110 W com um inversor de alta frequência conectado à rede. O inversor conectado à rede é modificado de tal forma que não pode ser operado como retificador, devido a inserção de dois diodos adicionais [119]. A vantagem deste projeto é que nenhuma corrente de pico flui quando o inversor é conectado à rede pela primeira vez.

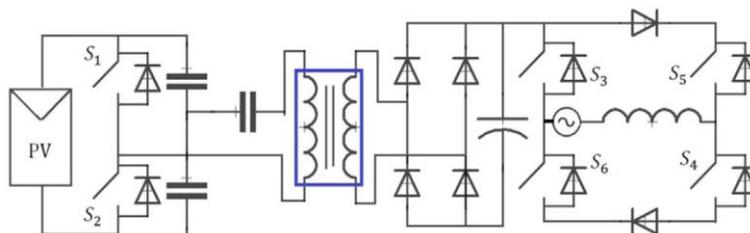


Figura 41- Conversor ressonante em série com inversor *bang-bang* dc-ac [119].

O diagrama mostrado na Figura 42 refere-se a uma topologia de inversor de comutação suave ressonante em série, composto por um inversor de ponte completa, um circuito ressonante, um transformador de alta frequência de isolamento com enrolamento de derivação central no secundário e equipamentos de comutação de baixa frequência sincronizados com a rede [120]. A corrente CA de saída é dominada pela modulação ressonante descontínua usando um sinal constante sincronizado com a frequência ressonante para realizar a ação de comutação suave. Os dispositivos de comutação do inversor são operados sob comutação de corrente zero.

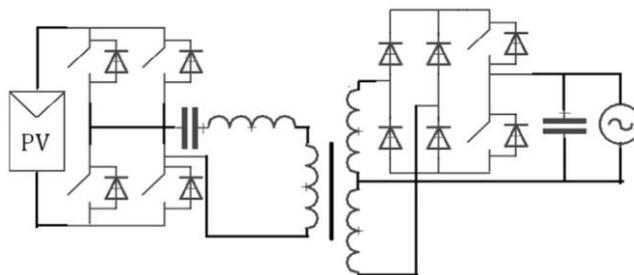


Figura 42- Inversor comutação suave ressonante série com *link* de alta frequência [120]

O modelo exibido na Figura 43, faz alusão a um conversor capacitivo *buck-boost* em marcha lenta, no lado CC de entrada, para efetivar a operação de comutação suave do inversor, um inversor *flyback* de transistor único no lado CA de saída, com um transformador de derivação central de alta frequência [120].

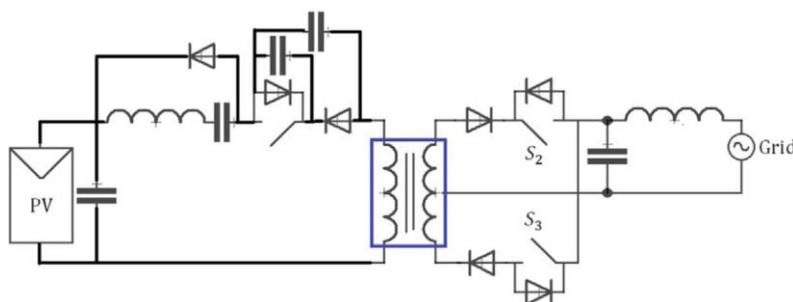


Figura 43- Inversor de comutação suave ressonante série *link* de alta frequência [120]

Conversores ressonantes usando as técnicas de *zero voltage switching* (ZVS) e *zero current switching* (ZCS) podem ser utilizados para mitigar perdas de comutação. As perdas de comutação nestas topologias podem ser reduzidas apenas à custa de tensões ou correntes muito maiores que dos dispositivos de comutação, gerando acréscimo significativo na perda de condução [73]. Para solucionar essa problemática são empregadas técnicas de transição suave, como *zero voltage transition* (ZVT) e *zero current transition* (ZCT), desenvolvidas para minorar ou subtrair as perdas e, assim, melhorar a eficiência do inversor.

A topologia mostrada em Figura 44 consiste em um conversor CC-CC *boost* ZVT-PWM e um inversor ressonante LLCC. As ferramentas de comutação ativas em um conversor *boost* ZVT-PWM agem no modo de comutação suave. O inversor ressonante LLCC inclui combinações em série e em paralelo de indutores e capacitores igualmente conhecidos como tanque ressonante em série e tanque ressonante paralelo para fornecer a tensão de saída CA com baixo THD [121].

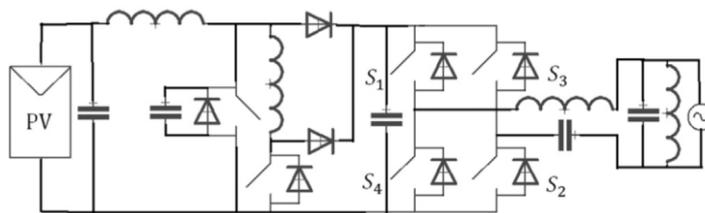


Figura 44- Inversor ressonante LLC com conversor *boost* ZVT-PWM [121]

O capítulo visou a reunião das principais variações de topologias de inversores, em relação a alguns aspectos, sempre visando melhores situações de controle de harmônicos, eficiência, desempenho e custos.

Em relação ao processamento de energia, é possível notar que quanto maior são as etapas de processamento melhor é o controle do sistema, contudo, de custo mais oneroso. No que diz respeito ao desacoplamento de energia, tem o objetivo de filtrar picos de tensão e movimentar apenas as componentes CC da fonte de entrada, sendo caracterizado por um capacitor eletrolítico robusto, inserido em paralelo, que pode acarretar em perdas de energia e custos de implantação elevados.

Em referência à utilização de transformadores, alguns inversores empregam um transformador que permite isolamento galvânico entre o painel fotovoltaico e a rede elétrica, no entanto, o transformador pode gerar aumento de tamanho, peso e custos. Com o intuito de obter melhor desempenho, eficiência e densidade de potência, as técnicas de comutação suave foram aplicadas no projeto de inversores conectados à rede, visando mitigar, principalmente, perdas por comutação.

Cada uma das variações de inversores apresentadas contribui positivamente em perspectivas, como: eficiência, desempenho, isolamento, entre outros, apesar disso, a escolha das tecnologias se deve em função da necessidade do projeto.

Capítulo 5 - Projeto do Esquema Fotovoltaico

Este capítulo caracteriza a disposição do arranjo fotovoltaico, disponível na Escola de Engenharia da UFF no campus da Praia Vermelha, desde sua montagem, a cada um de seus elementos constituintes. Apresenta-se, inclusive, as variações dos esquemas experimentais e os casos de medição.

5.1 Arranjo Fotovoltaico

Em trabalho anteriormente realizado em [11], foram reveladas as etapas do projeto e dimensionamento da cobertura solar para recarga de veículos elétricos, no estacionamento da Escola de Engenharia da UFF. Assim sendo, composto por 18 módulos com duas *strings* conectadas em paralelo, sendo cada *string* composta por nove módulos em série, totalizam 268,2 V de tensão e 16,78 A. Na Figura 45 é apresentada a armação do arranjo utilizado no projeto de geração de energia solar.

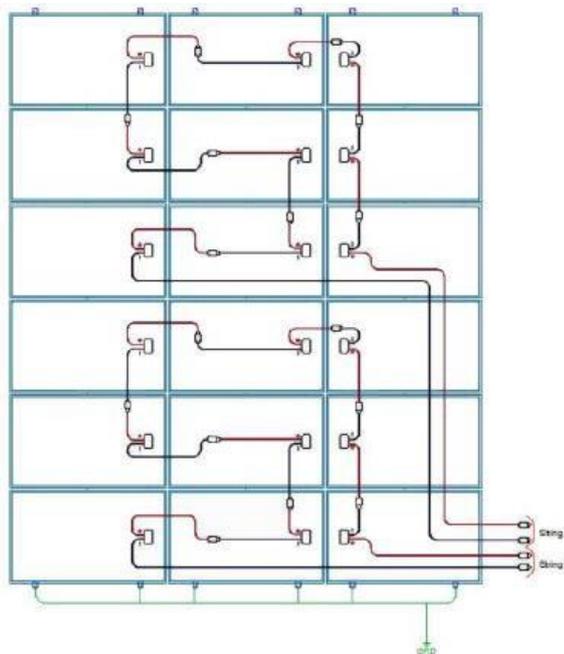


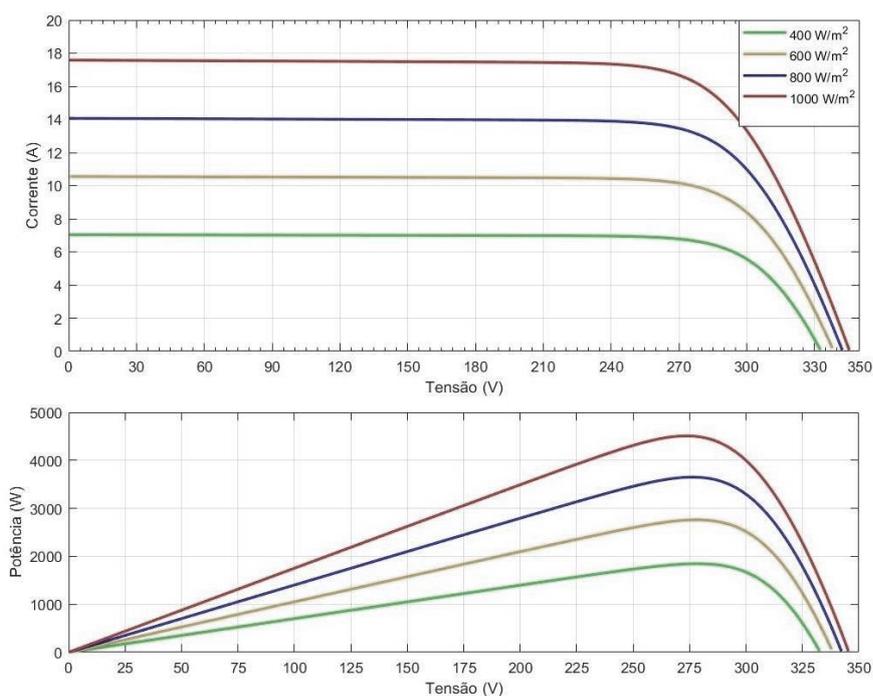
Figura 45- Disposição dos módulos fotovoltaicos [11].

O modelo de painel utilizado tem especificações disponíveis na Tabela 2.

Tabela 2 - Características elétricas do módulo fotovoltaico [14].

Características à temperatura de 25°C	
Tensão em máxima potência	29,8 V
Corrente em máxima potência	8,39 A
Tensão de circuito aberto	37,6 V
Corrente de curto-circuito	8,92 A
Potência máxima	250 W _p
Eficiência	15,4%

A fim de conhecer o comportamento do arranjo fotovoltaico, foram extraídas as curvas $V \times I$ e $P \times V$ através do *Matlab/Simulink*, obtidas pela variação de grandezas de entrada do arranjo, como temperatura e irradiância [14].

**Figura 46 - Curvas de corrente e potência à temperatura de 25°C [14].**

A Figura 46 utilizou valores de irradiância entre 400 W/m² e 1000 W/m², para arranjo à 25°C, possibilitando a observação do comportamento das variáveis, como potência e corrente, em função da tensão no arranjo fotovoltaico.

5.2 Componentes do Modelo Experimental

O modelo experimental constitui-se pelo arranjo fotovoltaico, por um inversor de estágio único, onde o mesmo é responsável por elevar a tensão e controlar a corrente e pelos seguintes equipamentos integrados: carga, analisador de qualidade e filtro.

O inversor usado na prática possui MPPT característica pelo método F_{SC} . A seguir, a Tabela 3, caracteriza as componentes elétricas do equipamento.

Tabela 3 - Principais especificações do inversor [13].

Especificações do Inversor	
Dados de Entrada	
Máxima Potência Fotovoltaica	3000 W
Máxima Tensão CC	500 V
Máxima Corrente CC	15 A
Dados de Saída	
Potência CA Nominal	3000 W
Máxima Potência CA	3000 W
Máxima Corrente CA	13,5 A
Saída nominal	60 Hz; 220 Vca
THD	< 5%
Fator de Potência	1
Conexão CA	Monofásica

Como carga, foi utilizado um motor elétrico trifásico de 5 CV, com atributos descritos conforme a Tabela 4. O motor elétrico foi instalado com acionamento direto e, graças as peculiaridades do inversor bifásico, necessitou de fase suplementar de alimentação provida pela rede de baixa tensão para seu funcionamento.

Tabela 4 - Principais especificações do motor elétrico.

Especificações do motor elétrico	
Tensão	220 / 380 V
Máxima Corrente	14 / 8,1 A
Potência	3677,49 w
Fases	Trifásico
Velocidade	1740 rpm
Frequência	60 Hz
Classe de isolamento	A

Para aferir qualidade e confiabilidade da energia fornecida pela rede, na saída do inversor fotovoltaico, deu-se a instalação de um analisador de qualidade e suas características estão presentes na Tabela 5.

Tabela 5 - Características do analisador de qualidade.

Analisador de qualidade	
Máxima Tensão	540 Vrms
Máxima Corrente	11 A
Amostragem	64 a 128 por ciclo
Alimentação CA	90 a 600 V
Alimentação CC	11 a 60 V
Frequência	50 / 60 Hz
Peso	3kg

O modo de operação de analisador, admite intervalo de registro em memória de massa mínimo de 1 minuto. Para o cálculo dos valores harmônicos médios são considerados um grupo de 8 ciclos consecutivos lidos em intervalos de 7,5 segundos, registrando o valor médio para cada período.

Por fim, a taxa de amostragem deste modo de operação é de 104 amostras por ciclo. Os valores de tensão e corrente correspondem a valores em RMS. Os dados do analisador são obtidos via programa do fabricante que realiza a compilação dos registros, cálculos de distorções e componentes harmônicas.

No que se refere ao filtro, tendo em vista a diminuição das distorções de corrente e tensão, foi adotado um filtro passivo LCL passa baixa, por mérito da sua relevância na literatura da área de energia elétrica e implantação mais acessível, o esquema do filtro está desenhado da Figura 15b. A ligação do filtro ocorreu em série com os pontos de conexão com a rede elétrica [81] e, foram usados os seguintes valores em seu dimensionamento: $L_1 = L_2 = 1\text{mH}$, $C_{eq} = 45\mu\text{F}$ e frequência de sintonia de 1kHz. A montagem do filtro LCL passa baixa está disponível na Figura 48, onde na prática, foi utilizado apenas um banco de capacitores.



Figura 47 – Composição do Filtro LCL.

O teste em bancada foi formulado em quatro casos de medição: sistema conectado à rede elétrica, sistema conectado à rede elétrica com filtro, sistema conectado à rede elétrica com carga e sistema conectado à rede elétrica com carga e filtro.

A figura 48 apresentou o esquema de ligação completo do sistema conectado à rede elétrica com carga e filtro, onde foram usados todos os componentes listados, anteriormente, na descrição. Vale a pena ressaltar que as aferições de qualidade foram realizadas nos pontos comuns de conexão da rede de baixa tensão com o sistema fotovoltaico, conforme a Figura 48. O papel dos disjuntores foi proteger, isolar e acionar os equipamentos quando necessário.

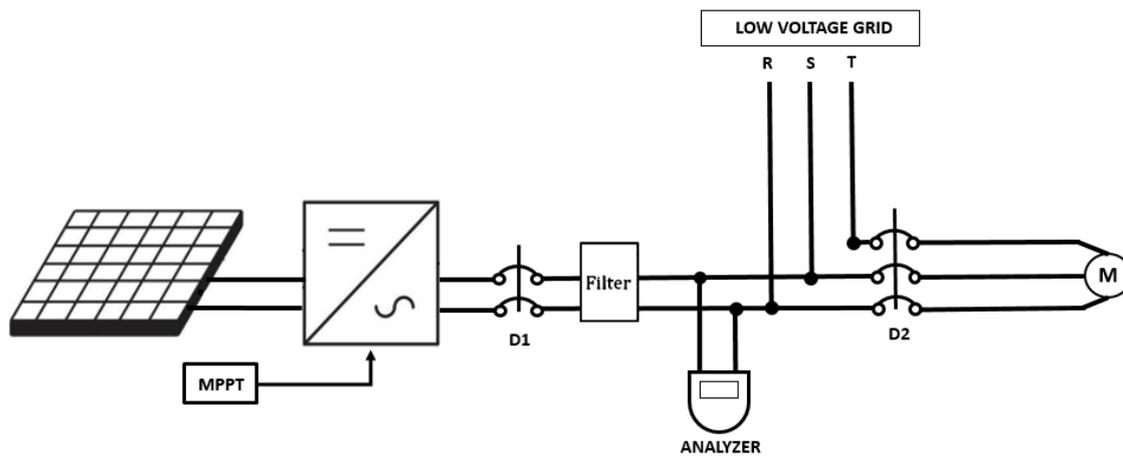


Figura 48 – Esquema de ligações e medições do sistema conectado à rede elétrica com carga e filtro.

Capítulo 6 - Resultados

Ao longo deste capítulo foram apresentados os resultados advindos dos casos de medição da prática, realçando os esquemas experimentais, valores das distorções harmônicas de corrente e de tensão, para os ensaios realizados. Foram construídas tabelas que descrevem a distribuição percentual das correntes e tensões medidas em relação à ordem fundamental, além de gráficos de colunas e linhas, para facilitar a visualização dos resultados em quadros.

Ocorreram demarcações de harmônicos de ordem ímpar [122], e as situações consideradas corresponderam a valores máximos de THD de corrente e tensão, verificados em bancada, para cada caso apresentado.

6.1 Sistema Conectado à Rede Elétrica

Dentre os casos de medição citados anteriormente, este possui composição elementar, e consistiu basicamente num diagrama formado pelo sistema fotovoltaico conectado à rede sem cargas acrescentadas, a fim de atestar a qualidade da energia fornecida. As verificações de qualidade de energia foram realizadas no ponto de conexão do inversor com a rede elétrica de acordo com as Figuras ((49) e (50)).

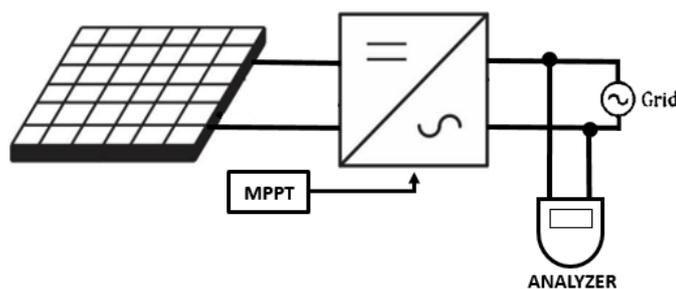


Figura 49 – Esquema simplificado do sistema conectado à rede elétrica.



Figura 50 – Medição do sistema conectado.

Na figura 49, observou-se que o primeiro elemento representa o conjunto de *strings*, composta por módulos, responsáveis pela geração da energia fotovoltaica. A seguir, foi representado o inversor fotovoltaico, que realiza a conversão de CC para CA e também integra a função de MPPT. O terceiro elemento, corresponde ao analisador de qualidade, como o próprio nome sugere, realizou aferições de qualidade da energia no ponto de conexão do sistema fotovoltaico com a rede elétrica de baixa tensão, que corresponde ao último elemento da imagem. A Figura 50 retratou a prática de medição, levando em consideração as Figuras ((48) e (49)).

Neste caso de medição inicial, foram ponderadas as distorções harmônicas produzidas pela configuração mais simples, dentre os casos de medição estudados. Pode-se observar que o THD_1 apresentou o valor de 51,07% e suas respectivas harmônicas de ordem ímpar estão organizadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Distribuição percentual das correntes em relação à fundamental do sistema conectado

N°	I(mA)	%	N°	I(mA)	%
1	10,00	100	25	0,35	3,76
3	0,57	4,49	27	0,34	3,68
5	0,40	4,16	29	0,51	5,67
7	0,37	3,53	31	1,34	11,35
9	0,34	2,93	33	1,89	16,39
11	0,34	3,27	35	1,40	13,97
13	0,36	3,58	37	0,57	7,83
15	0,37	3,52	39	0,40	3,86
17	0,36	3,29	41	0,35	4,25
19	0,35	2,98	43	0,34	3,87
21	0,36	3,42	45	0,34	3,58
23	0,45	3,84			

A Figura 51 representou a distribuição das informações da Tabela 6, objetivando o entendimento do comportamento dos harmônicos de corrente em relação à fundamental. A figura 52 configurou a amplitude de corrente atingida por cada frequência harmônica, sendo elas pares ou ímpares, com frequência fundamental 60 Hz.

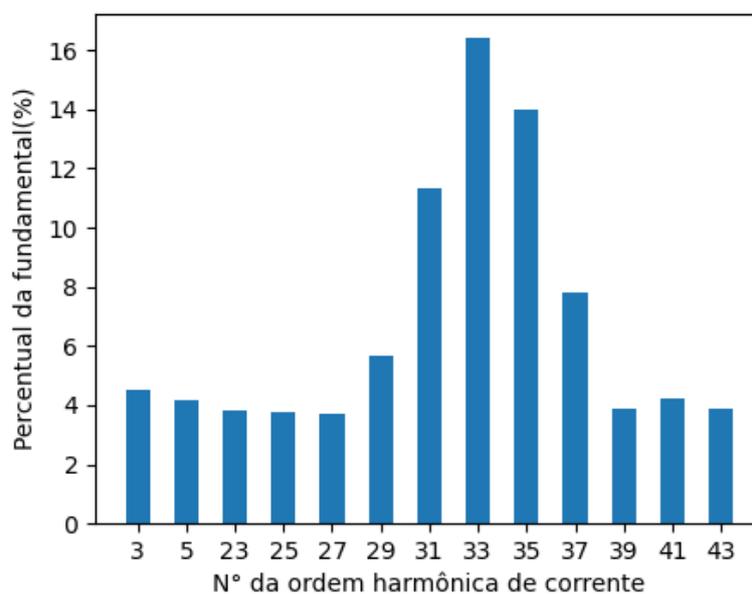


Figura 51 - Harmônicos de corrente do sistema conectado à rede elétrica

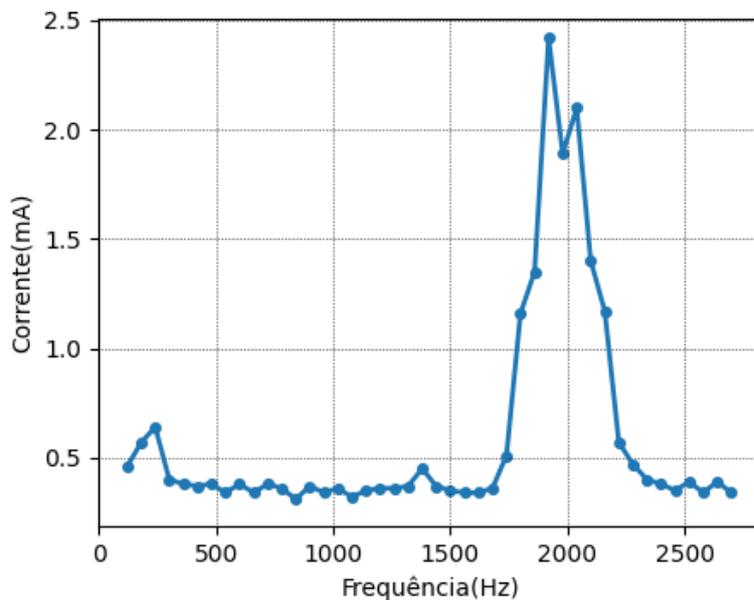


Figura 52 – Amplitude de corrente do sistema conectado à rede elétrica

Constatou-se a regularidade dos componentes harmônicos de corrente de ordem elevada, isto é, de frequências altas. Quando relacionados com a amplitude do sinal, a análise tornou-se relevante, pois a corrente elétrica gerada apresenta valores interessantes em torno da frequência de 2 kHz.

Ao serem examinados os harmônicos ímpares de tensão, observou-se o cenário expresso no Tabela 7. Através de cálculos, foi possível representar numericamente o valor do THD_V como sendo de 1,88%.

Tabela 7 - Distribuição percentual das tensões em relação à fundamental do sistema conectado

N°	V (V)	%	N°	V (V)	%
1	215,55	100	25	0,11	0,05
3	0,55	0,26	27	0,17	0,08
5	2,16	1,00	29	0,27	0,12
7	2,36	1,09	31	0,52	0,24
9	0,25	0,12	33	0,85	0,39
11	0,23	0,11	35	0,71	0,33
13	0,33	0,15	37	0,34	0,16
15	0,09	0,04	39	0,18	0,08
17	0,22	0,10	41	0,14	0,07
19	0,15	0,07	43	0,12	0,05
21	0,09	0,04	45	0,33	0,15
23	0,14	0,06			

A Figura 53 ilustrou os dados disponíveis na Tabela 7, de maneira gráfica, com a finalidade de descrever a conduta dos harmônicos de tensão em relação ao harmônico fundamental. Na figura 54, verificou-se a performance da amplitude de tensão, de frequência fundamental 60 Hz, atingida por cada frequência harmônica, sendo elas pares ou ímpares.

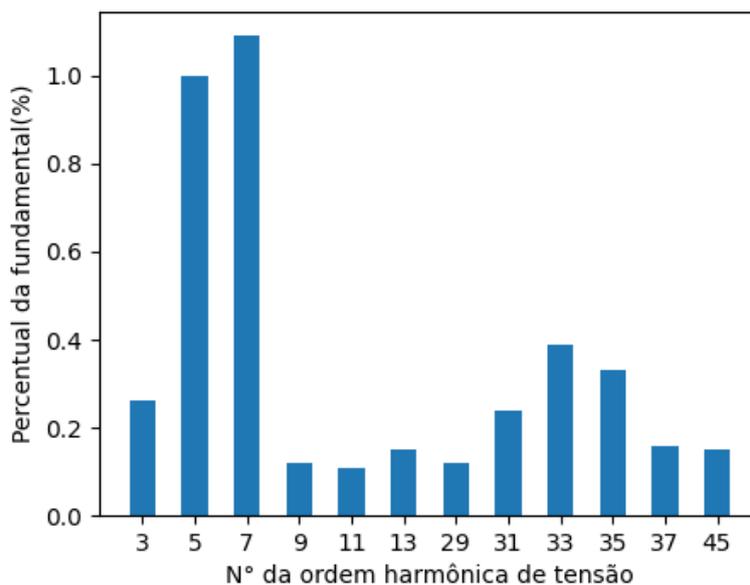


Figura 53 - Harmônicos de tensão do sistema conectado à rede elétrica

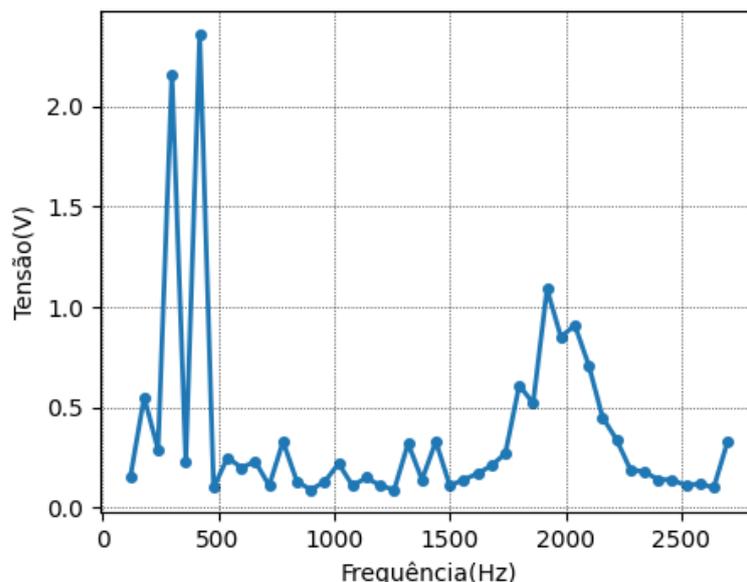


Figura 54 – Amplitude de tensão do sistema conectado à rede elétrica

Notou-se a proliferação de conteúdos harmônicos de tensão de maior ordem, ou melhor, de frequências elevadas, em torno da frequência de 2 kHz.

A Tabela 8 relacionou os valores mínimos, médios e máximos de THD_V e THD_I . Os três valores de THD de tensão estão em concordância com valores estipulados pelas normas, contudo, o THD_I destoa consideravelmente da regulação nos três eventos disponíveis na Tabela 8 [122-124].

Tabela 8 - Distorção harmônica do sistema conectado

Variável	Mínimo(%)	Médio (%)	Máximo(%)
THD_V	1,69	1,82	1,88
THD_I	45,57	47,58	51,07

6.2 Sistema Conectado à Rede Elétrica com Filtro

Este caso de medição objetivou uma prática formada pelo sistema fotovoltaico conectado à rede sem cargas adicionais com a inserção de um filtro LCL passivo. Ao fim da etapa experimental, foi possível averiguar a qualidade da energia no ponto de conexão do sistema fotovoltaico e a rede elétrica de baixa tensão. As medições de qualidade de energia

foram efetuadas no ponto de conexão do inversor com a rede elétrica de acordo com as Figuras ((55) e (56)).

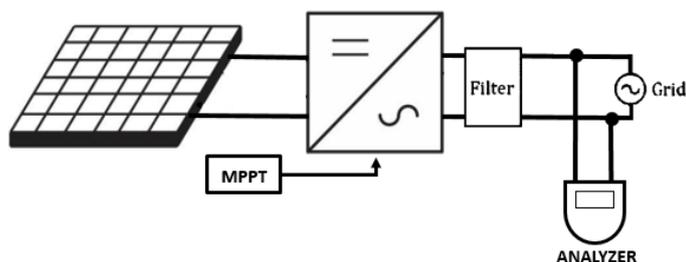


Figura 55 - Esquema simplificado do sistema conectado à rede elétrica com filtro.



Figura 56 – Medição do sistema conectado com filtro

Na figura 55, o primeiro elemento representou o conjunto de *strings*, composta por módulos, encarregados pela geração da energia fotovoltaica. A seguir, foi indicado o inversor fotovoltaico, que realiza a conversão de CC para CA e integra a função de MPPT. O terceiro elemento correspondeu ao filtro LCL passivo, que tem a função de suavizar os conteúdos harmônicos produzidos após o inversor. O quarto elemento correspondeu ao analisador de qualidade, que realizou aferições de qualidade da energia no ponto de conexão do sistema fotovoltaico com a rede elétrica de baixa tensão, que corresponde ao último elemento da imagem. A Figura 56 retratou a prática de medição, levando em consideração as Figuras ((48) e (55)).

Neste segundo caso de medição, foram examinados os harmônicos oportunizados através do sistema conectado à rede elétrica e um filtro passivo. Observa-se que o valor do THD_I foi de 24,18% e suas respectivas contribuições harmônicas ímpares estão à disposição na Tabela 9.

Tabela 9 - Distribuição percentual das correntes em relação à fundamental do sistema conectado com filtro

N°	I(mA)	%		N°	I(mA)	%
1	10,00	100		25	0,26	2,55
3	0,39	3,89		27	0,29	2,93
5	0,79	7,86		29	0,31	3,05
7	0,75	7,52		31	0,24	2,43
9	1,01	10,10		33	0,30	3,01
11	0,68	6,78		35	0,22	2,16
13	0,29	2,90		37	0,22	2,22
15	0,34	3,41		39	0,27	2,66
17	0,28	2,75		41	0,26	2,59
19	0,28	2,76		43	0,25	2,46
21	0,35	3,50		45	0,28	2,80
23	0,28	2,76				

A Figura 57 retratou a estruturação das informações da Tabela 9, com o propósito de representar o desempenho dos harmônicos de corrente em relação à fundamental. A figura 58 expressou a amplitude de corrente atingida por cada frequência harmônica, sendo elas pares ou ímpares, com frequência fundamental 60 Hz.

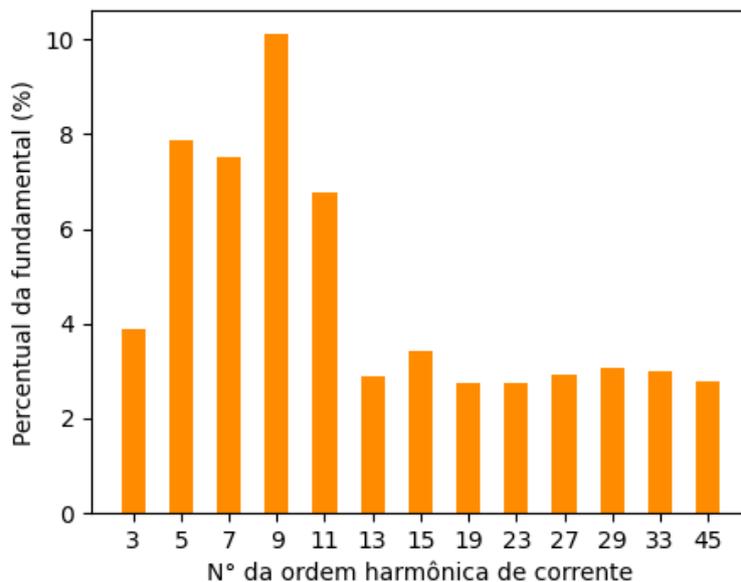


Figura 57 - Harmônicos de corrente do sistema conectado à rede elétrica com filtro

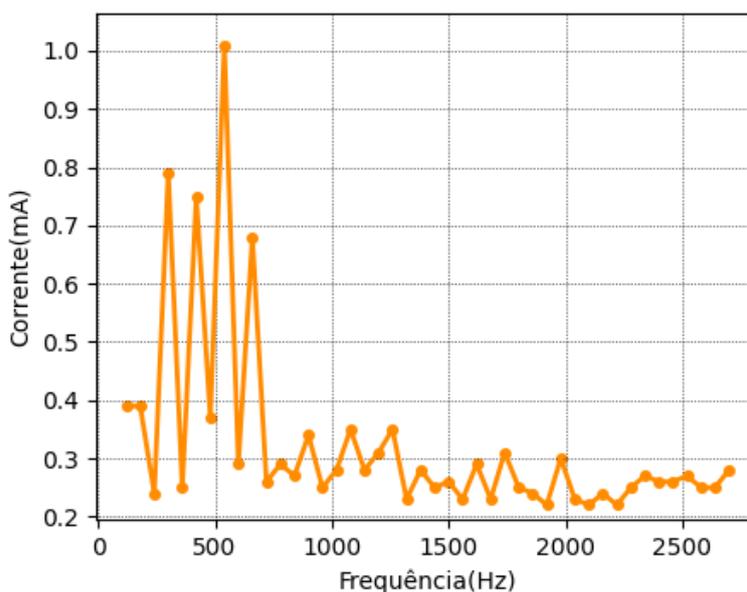


Figura 58 - Amplitude de corrente do sistema conectado à rede elétrica com filtro

Constatou-se a mitigação da difusão de componentes harmônicos de corrente de altas frequências, ao comparar-se com o sistema conectado à rede sem filtro. A corrente elétrica apresenta valores menores em torno da frequência de 2 kHz.

No viés dos harmônicos ímpares de tensão, apurou-se o cenário expresso no Tabela 10. Numericamente observou-se o valor do THD_V como sendo de 1,58%.

Tabela 10 - Distribuição percentual das tensões em relação à fundamental do sistema conectado com filtro

Nº	V (V)	%	Nº	V (V)	%
1	219,48	100	25	0,15	0,07
3	0,55	0,25	27	0,15	0,07
5	2,05	0,93	29	0,20	0,09
7	1,68	0,76	31	0,28	0,13
9	0,32	0,15	33	0,42	0,19
11	1,32	0,6	35	0,28	0,13
13	0,50	0,23	37	0,16	0,07
15	0,18	0,08	39	0,13	0,06
17	0,42	0,19	41	0,14	0,06
19	0,16	0,07	43	0,14	0,06
21	0,12	0,05	45	0,35	0,16
23	0,26	0,12			

A Figura 59 caracterizou os dados do Tabela 11, de maneira gráfica com a intenção de indicar o comportamento dos harmônicos de tensão em relação à fundamental. Verificou-se a atividade da amplitude de tensão na Figura 60, com frequência fundamental 60 Hz, constituída por cada frequência harmônica sendo elas pares ou ímpares.

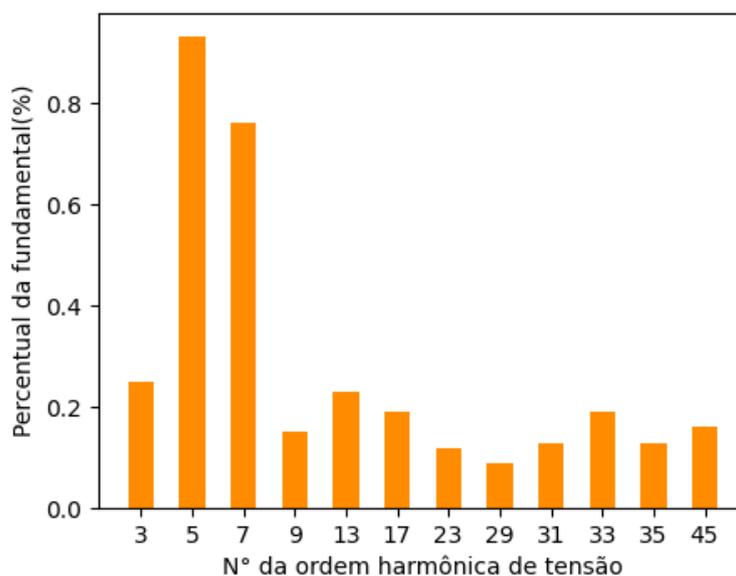


Figura 59 - Harmônicos de tensão do sistema conectado à rede elétrica com filtro

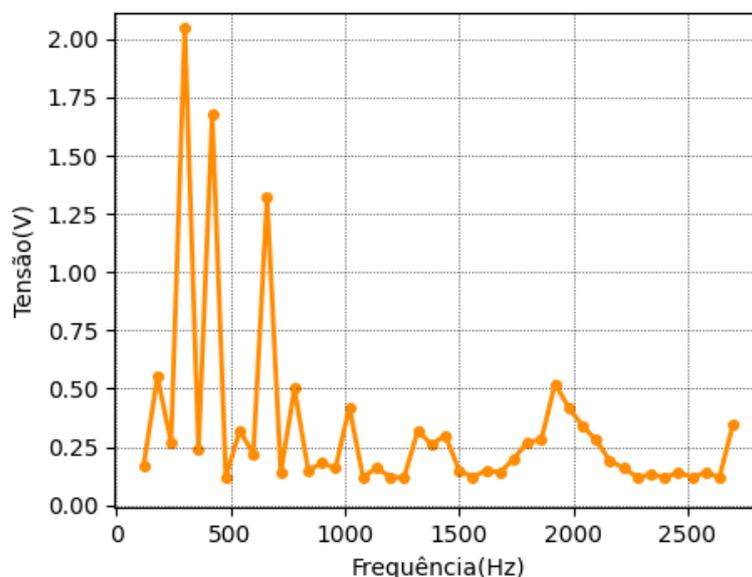


Figura 60 – Amplitude de tensão do sistema conectado à rede elétrica com filtro

Reparou-se atenuação da propagação de harmônicos de tensão de maior ordem, contrapondo o caso do sistema conectado à rede sem filtro, em torno da frequência de 2 kHz.

Os valores mínimos, médios e máximos de THD estão reproduzidos na Tabela 11. Os valores do THD_V encontram-se amparados pelas normas, enquanto os valores de THD_I destoam dos limites determinados [122-124].

Tabela 11 - Distorção harmônica do sistema conectado com filtro

Variável	Mínimo(%)	Médio (%)	Máximo(%)
THD_V	1,46	1,52	1,58
THD_I	22,52	23,38	24,18

Ao serem relacionados os dois casos de medição anteriores, os sistemas conectados à rede de baixa tensão com e sem o filtro, foi possível notar um aumento residual nos harmônicos de corrente de baixa frequência, próximo ao ponto de frequência com valor 500 Hz. Ocorreu também, uma diminuição considerável na geração de conteúdos harmônicos de corrente de alta frequência, quando comparado com o caso experimental sem filtro, onde observou-se grande atenuação em torno do ponto com frequência de 2 kHz, tendo a existência valores muito próximos a zero, como indicados na Figura 61.

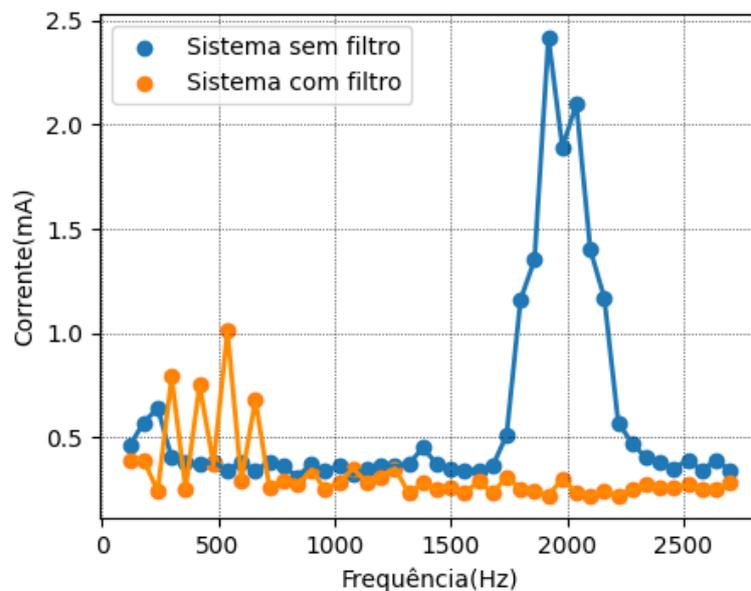


Figura 61 – Amplitude de tensão do sistema conectado à rede elétrica com filtro

Em relação aos conteúdos harmônicos de tensão, apreciou-se um aumento residual nos harmônicos de tensão de baixa frequência, frente ao ponto de frequência com valor 500 Hz. Foi possível reparar uma diminuição relevante na geração de conteúdos harmônicos de tensão de alta frequência, quando comparado com o caso experimental sem filtro, onde notou-se atenuação em torno do ponto com frequência de 2 kHz, tendo a existência valores muito próximos a metade do obtidos no caso sem o filtro, como indicados na Figura 62.

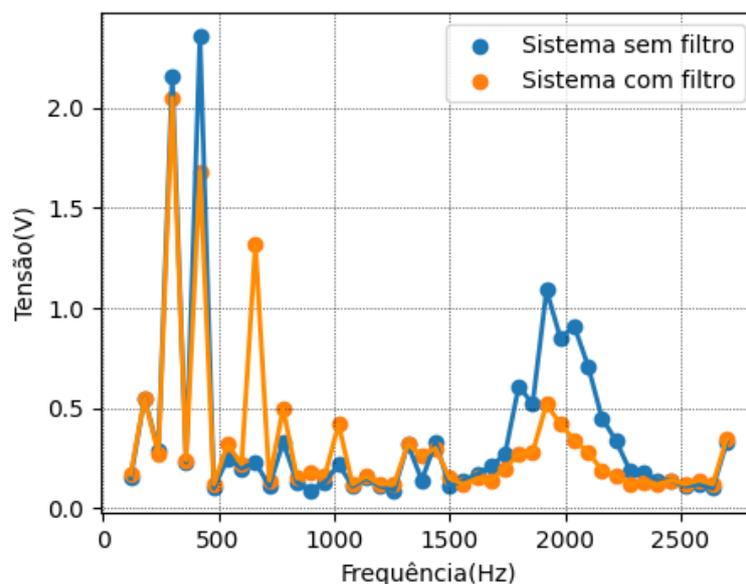


Figura 62 – Amplitude de tensão do sistema conectado à rede elétrica com filtro

Constatou-se que a existência do filtro, possibilitou a redução dos conteúdos harmônicos de tensão e corrente, impactando em grande redução principalmente do THD_I , cerca de 52,65%, conforme a Tabela 12.

Tabela 12 - Comparativo das distorção harmônicas dos sistemas conectados com filtro e sem filtro

Variável	Sem filtro (%)	Com filtro (%)	(%)
THD_V	1,88	1,58	-16,96
THD_I	51,07	24,18	-52,65

6.3 Sistema Conectado à Rede Elétrica com Carga

Este caso de medição objetivou agregar informações sobre a qualidade de energia na saída da rede devido a influência de uma carga, que neste enquadramento, foi retratado por um motor elétrico.

O diagrama foi constituído por meio do sistema fotovoltaico conectado à rede e a existência de uma carga. Mensurações de qualidade de energia foram cometidas no ponto de conexão do inversor com a rede elétrica como ilustrado nas Figuras ((63) e (64)).

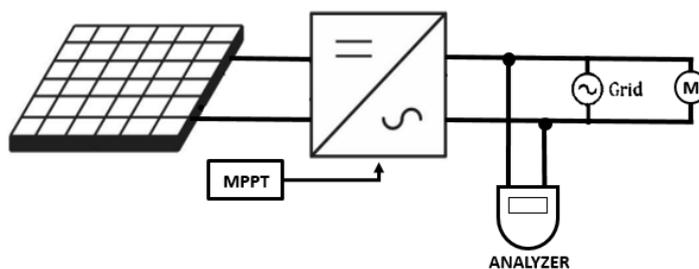


Figura 63 - Esquema simplificado do sistema conectado à rede elétrica com carga.



Figura 64 – Medição do sistema conectado com carga.

Na figura 63, o primeiro elemento expressou um conjunto de *strings*, composto por módulos, responsáveis pela geração da energia fotovoltaica. A seguir, foi simbolizado o inversor fotovoltaico, que atua na conversão de CC para CA e integra a função de MPPT. O terceiro elemento correspondeu ao analisador de qualidade, destinado a aferições de qualidade da energia no ponto de conexão do sistema fotovoltaico com a rede elétrica de baixa tensão, que corresponde ao quarto elemento da imagem. O último elemento é o motor, que tem a finalidade de servir como carregamento para o sistema. A Figura 64 retratou a prática de medição, levando em consideração as Figuras ((48) e (63)).

Neste caso de medição de número três, foram apreciados os harmônicos ímpares promovidos com uma carga. Foi possível verificar que o THD_1 apresentou o valor de 14,76% e suas respectivas contribuições harmônicas estão disponíveis no Tabela 13.

Tabela 13 - Distribuição percentual das correntes em relação à fundamental do sistema conectado com carga

N°	I(A)	%	N°	I(A)	%
1	3,73	100	25	0,01	0,27
3	0,05	1,27	27	0,01	0,35
5	0,01	0,29	29	0,04	1,05
7	0,01	0,32	31	0,13	3,56
9	0,02	0,47	33	0,20	5,28
11	0,02	0,59	35	0,12	3,23
13	0,02	0,54	37	0,04	0,97
15	0,02	0,44	39	0,01	0,29
17	0,02	0,50	41	0,01	0,28
19	0,01	0,31	43	0,01	0,25
21	0,01	0,26	45	0,01	0,30
23	0,01	0,30			

A Figura 65 refletiu a disposição das informações da Tabela 13, com a finalidade de estruturar o comportamento dos harmônicos de corrente em relação à fundamental. Na figura 66, configurou-se a amplitude de corrente atingida por cada frequência harmônica, sendo elas pares ou ímpares, com frequência fundamental 60 Hz.

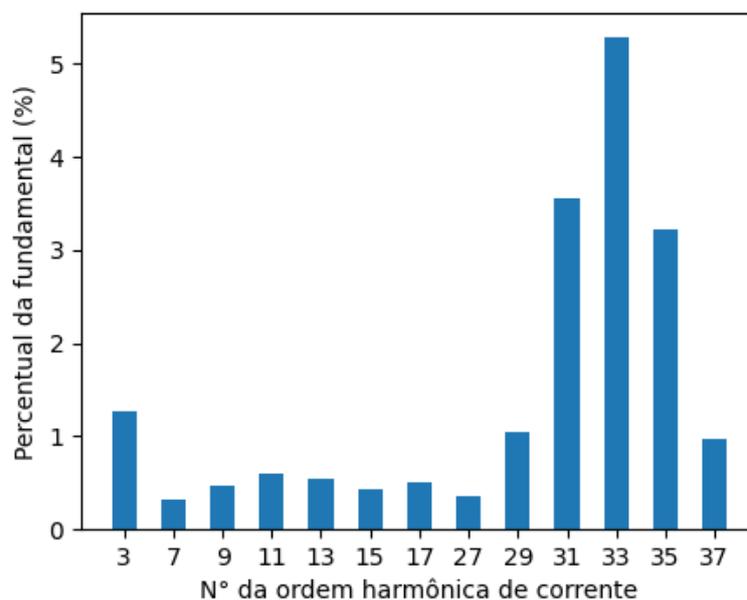


Figura 65 - Harmônicos de corrente do sistema conectado à rede elétrica com carga

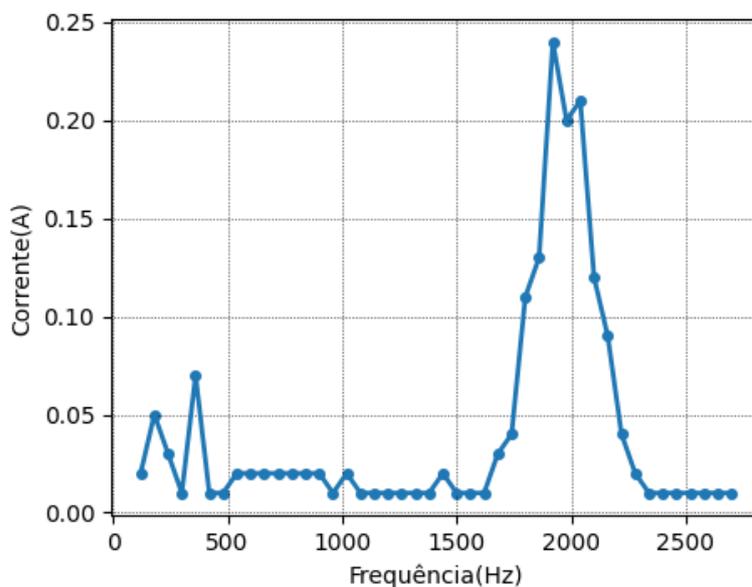


Figura 66 - Amplitude de corrente do sistema conectado à rede elétrica com carga

Observou-se a relevância da continuidade de componentes harmônicos de corrente de ordem superior, ou seja, de frequências elevadas, em torno da frequência de 2 kHz. Analisando os harmônicos ímpares de tensão, foi concebível averiguar o cenário expresso no Tabela 14. Representa-se numericamente o valor do THD_V como sendo de 1,75%.

Tabela 14 - Distribuição percentual das tensões em relação à fundamental do sistema conectado com carga

Nº	V (V)	%	Nº	V (V)	%
1	212,91	100	25	0,11	0,05
3	0,52	0,24	27	0,16	0,07
5	1,30	0,61	29	0,27	0,13
7	2,33	1,09	31	0,49	0,23
9	0,25	0,12	33	0,80	0,38
11	0,30	0,14	35	0,62	0,29
13	0,25	0,12	37	0,31	0,14
15	0,10	0,05	39	0,17	0,08
17	0,31	0,14	41	0,11	0,05
19	0,16	0,08	43	0,10	0,04
21	0,09	0,04	45	0,33	0,15
23	0,06	0,13			

A Figura 67 representou as informações do Tabela 14, de maneira gráfica, com a intenção de evidenciar o comportamento dos harmônicos de tensão em relação à fundamental. Observou-se também, a atividade da amplitude de tensão na Figura 68, com frequência fundamental 60 Hz, constituída por cada frequência harmônica sendo elas pares ou ímpares.

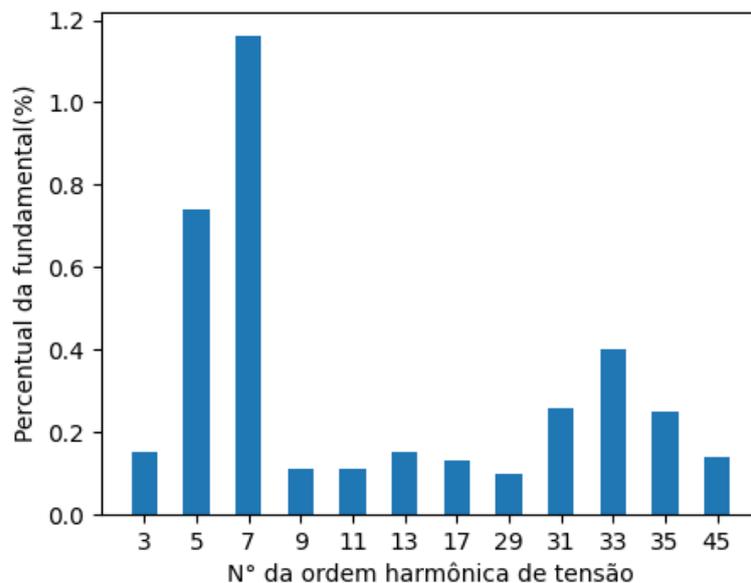


Figura 67 - Harmônicos de tensão do sistema conectado à rede elétrica com carga

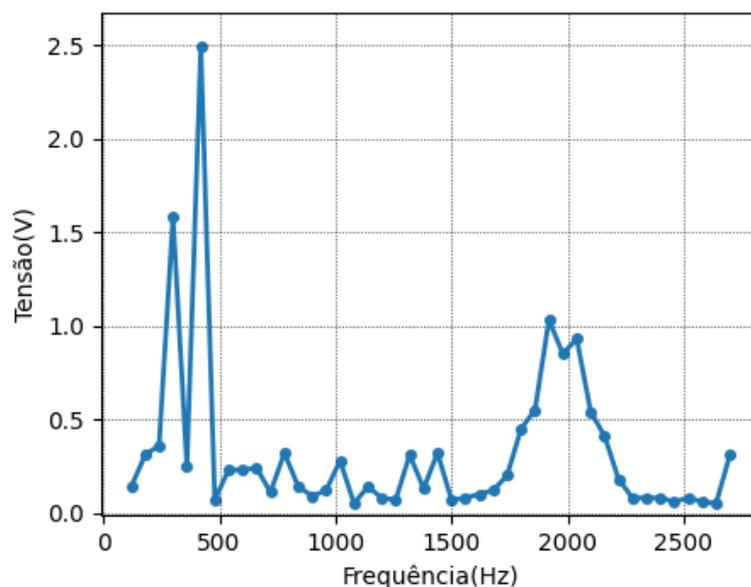


Figura 68 - Harmônicos de tensão do sistema conectado à rede elétrica com carga

Percebeu-se a presença de grande quantidade de conteúdos harmônicos de tensão de ordem superior, ou melhor, de frequências altas, em torno da frequência de 2 kHz.

Os valores mínimos, médios e máximos de THD estão representados na Tabela 15. Os três valores de THD_V encontram-se contemplados pela regulação, enquanto que os valores de THD_I estão fora dos valores limites determinados nas normas [122-124].

Tabela 15 - Distorção harmônica do sistema conectado com carga

Variável	Mínimo(%)	Médio (%)	Máximo(%)
Tensão (V)	1,52	1,67	1,75
Corrente (A)	11,77	12,83	14,76

6.4 Sistema Conectado à Rede Elétrica com Carga e Filtro

Esta prática, dentre os casos de medição anteriores, instaurou-se como a de composição mais elaborada, por possuir maior quantidade de elementos de conexão.

Instituiu-se por um esquema estabelecido pelo sistema fotovoltaico conectado à rede a presença de uma carga e o emprego do filtro. Validações de qualidade de energia foram localizadas no ponto de conexão do inversor com a rede elétrica como indicado nas Figuras ((69) e (70)).

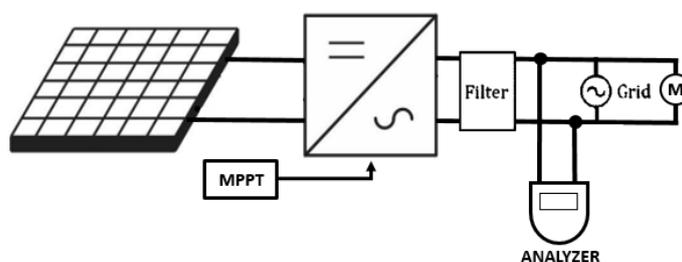


Figura 69 - Esquema simplificado do sistema conectado à rede elétrica com carga e filtro.



Figura 70 – Medição do sistema conectado com carga e filtro.

Na figura 69, o primeiro elemento caracterizou um conjunto de *strings*, composta por módulos, incumbidos da geração da energia fotovoltaica. A seguir, foi indicado o inversor fotovoltaico, que atua na conversão de CC para CA e integra a função de MPPT. O terceiro elemento correspondeu ao filtro LCL passivo, que tem a função de reduzir os conteúdos harmônicos produzidos após o inversor. O quarto elemento correspondeu ao analisador de qualidade, destinado a aferições de qualidade da energia no ponto de conexão do sistema fotovoltaico com a rede elétrica de baixa tensão, que corresponde ao quinto elemento da imagem. O último elemento é o motor, que tem a finalidade de servir como carregamento para o sistema. A Figura 70 retratou a prática de medição, levando em consideração as Figuras ((48) e (69)).

Neste último caso de medição, foram estudados os conteúdos harmônicos produzidos pelo sistema conectado à rede com carga e filtro. Constatou-se que o THD_I apresentou o valor de 15,01% e seus pertinentes harmônicos ímpares estão descritos na Tabela 16.

Tabela 16 - Distribuição percentual das correntes em relação à fundamental do sistema conectado com carga e filtro

N°	I(A)	%	N°	I(A)	%
1	5,29	100	25	0,01	0,18
3	0,08	1,51	27	0,01	0,17
5	0,56	10,50	29	0,01	0,19
7	0,34	6,39	31	0,01	0,15
9	0,10	1,99	33	0,01	0,14
11	0,29	5,56	35	0,01	0,13
13	0,09	1,79	37	0,01	0,13
15	0,05	0,91	39	0,01	0,12
17	0,06	1,11	41	0,01	0,12
19	0,02	0,36	43	0,01	0,12
21	0,01	0,23	45	0,01	0,18
23	0,02	0,32			

A Figura 71 configurou as informações da Tabela 16, com a intenção de revelar o comportamento dos harmônicos de corrente em relação à fundamental. Na figura 72, compreendeu-se a amplitude de corrente atingida por cada frequência harmônica, sendo elas pares ou ímpares, com frequência fundamental 60 Hz.

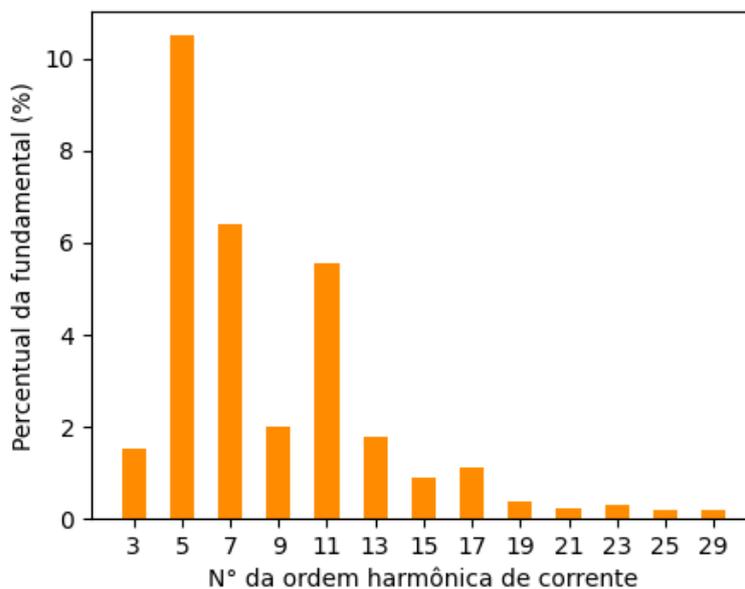


Figura 71 - Harmônicos de corrente do sistema conectado à rede elétrica com carga e filtro

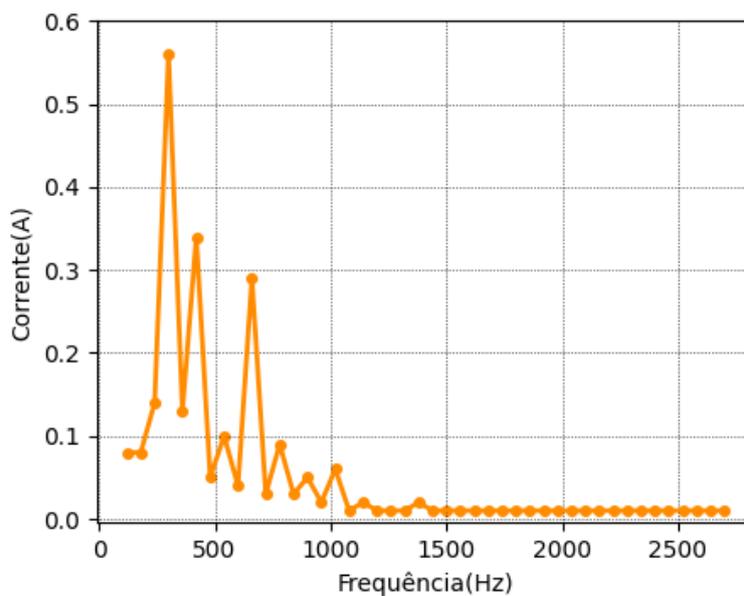


Figura 72- Amplitude de corrente do sistema conectado à rede elétrica com carga e filtro

Reparou-se diminuição da participação de harmônicos de corrente de maior frequência, comparando com o sistema conectado à rede elétrica com carga sem filtro. Foi possível constatar a extinção de conteúdos harmônicos a partir da frequência de 1 kHz.

Analisando os harmônicos de tensão de ordem ímpar, pode-se perceber o cenário expresso na Tabela 17. Pode-se representa numericamente o valor do THD_v como sendo de 1,61%.

Tabela 17 - Distribuição percentual das tensões em relação à fundamental do sistema conectado com carga e filtro

Nº	V (V)	%	Nº	V (V)	%
1	218,72	100	25	0,10	0,04
3	0,59	0,27	27	0,11	0,05
5	2,06	0,94	29	0,22	0,10
7	1,44	0,66	31	0,01	0,15
9	0,25	0,12	33	0,36	0,17
11	1,67	0,77	35	0,29	0,13
13	0,40	0,18	37	0,18	0,08
15	0,10	0,05	39	0,12	0,05
17	0,44	0,20	41	0,10	0,05
19	0,12	0,05	43	0,10	0,05
21	0,11	0,05	45	0,34	0,16
23	0,19	0,09			

A Figura 73 representou os dados da Tabela 17, com o desígnio de reproduzir o desempenho dos harmônicos de tensão em relação à fundamental. Verificou-se a atividade da amplitude de tensão na Figura 74, com frequência fundamental 60 Hz, constituída por cada frequência harmônica sendo elas pares ou ímpares.

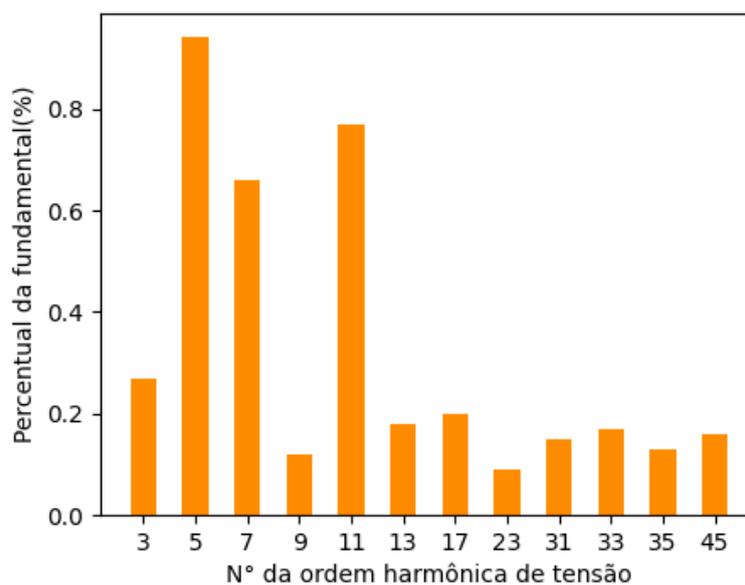


Figura 73 - Harmônicos de tensão do sistema conectado à rede elétrica com carga e filtro

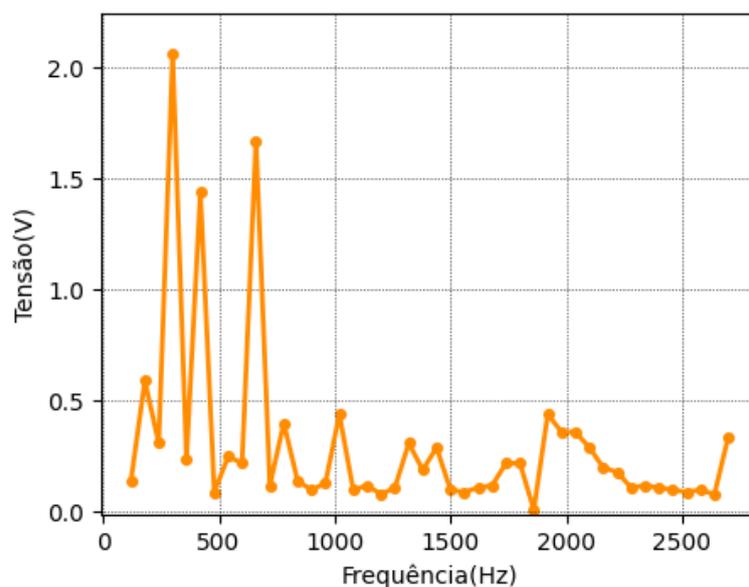


Figura 74 – Amplitude de tensão do sistema conectado à rede elétrica com carga e filtro

Constatou-se a suavização da transmissão de conteúdos harmônicos de tensão de maior ordem, relativamente ao caso do sistema conectado à rede elétrica com carga sem filtro, em torno da frequência de 2 kHz.

Os valores mínimos, médios e máximos de THD estão representados na Tabela 18. Os valores de THD_v encontram-se agraciados pela regulação, enquanto os valores de THD_i estão fora dos valores limites determinados nas normas [122-124].

Tabela 18 - Distorção harmônica do sistema conectado com carga e filtro

Variável	Mínimo(%)	Médio (%)	Máximo(%)
THD_v	1,50	1,57	1,61
THD_i	12,34	13,60	15,01

Ao serem relacionados os dois casos de medição anteriores, os sistemas conectados à rede de baixa tensão com carga com e sem filtro, foi possível observar um aumento relevante nos harmônicos de corrente de baixa frequência, nas proximidades do ponto de frequência com valor 500 Hz. Ocorreu também, uma severa redução na geração de conteúdos harmônicos de corrente de alta frequência, quando comparado com o caso experimental sem filtro, onde constatou-se grande atenuação em torno do ponto com frequência de 1 kHz, tendo a existência valores muito próximos a zero, como indicados na Figura 75.

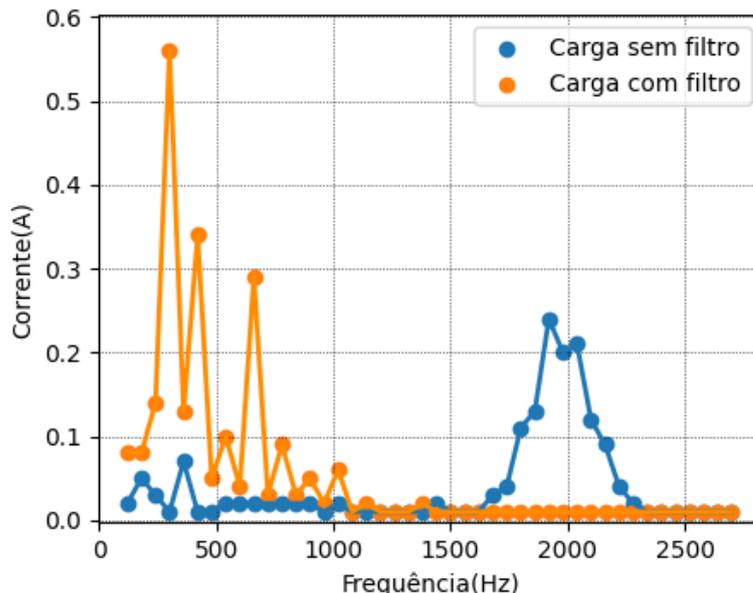


Figura 75 – Amplitude de corrente do sistema conectado à rede elétrica com carga e filtro

Em relação aos conteúdos harmônicos de tensão, presenciou-se um aumento residual nos harmônicos de tensão de baixa frequência, próximo ao ponto de frequência com valor 500 Hz. Foi possível constatar uma diminuição pertinente na geração de conteúdos harmônicos de tensão de alta frequência, quando comparado com o caso experimental sem filtro, onde admirou-se atenuação em torno do ponto com frequência de 2 kHz, tendo a existência valores muito próximos a metade do obtidos no caso sem o filtro, como indicados na Figura 76.

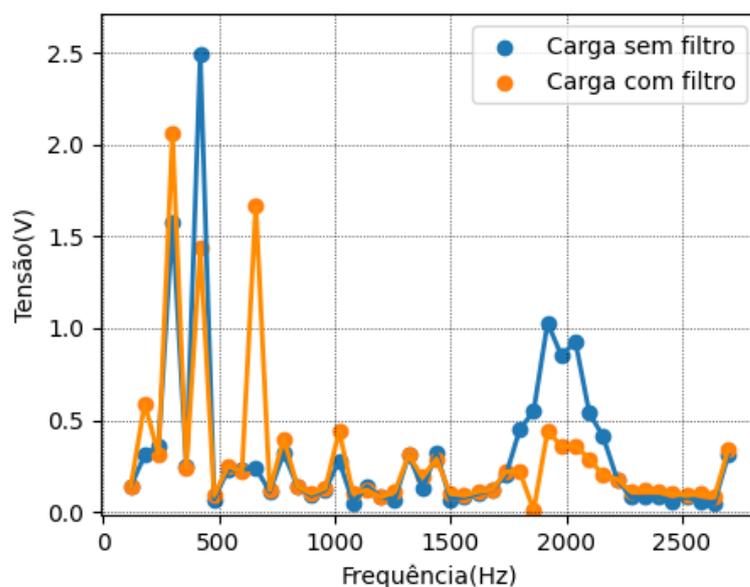


Figura 76 – Amplitude de tensão do sistema conectado à rede elétrica com carga e filtro

Observou-se que a existência do filtro, possibilitou a redução dos conteúdos harmônicos de tensão e corrente de altas frequências, impactando em redução principalmente do THD_V , cerca de 8,00%, conforme a Tabela 19. O THD_I sofreu leve incremento devido a característica do perfil de carga.

Tabela 19 - Comparativo das distorção harmônicas dos sistemas com carga com filtro e sem filtro

Variável	Sem filtro (%)	Com filtro (%)	(%)
THD_V	1,75	1,61	-8,00
THD_I	14,76	15,01	+1,69

Notou-se que devido à redução percentual de carga nominal ou até mesmo sem carga associada na saída do inversor, as ordens harmônicas superiores de corrente surgiram e nestas conjunturas, produziram acréscimos nas distorções harmônicas de corrente [125]. Foi ponderado que, mesmo com a existência de um método MPPT por parte do inversor no arranjo experimental, as distorções obtidas nos casos sem carga foram bem acentuadas.

Considerando que o valor máximo de distorção harmônica total recomendada pelo IEEE para corrente é de 8% [122,123], em todos os arranjos empregues na prática o THD_I excedeu o valor limite, chegando a 51,07% para aplicação do sistema conectado à rede. O THD_V oscilou moderadamente ficando dentro do valor limite de 10%, de acordo com as recomendações da Resolução 1000 [122-124], em todos os casos analisados.

Pode-se observar também que a inserção de um filtro passivo LCL no arranjo conectado à rede, pode abrandar a participação dos componentes de altas frequências, tanto de tensão como de corrente. A esquemática conectada à rede sem carga, repercutiu positivamente com uma redução nos valores de THD_V e THD_I , evidenciando a redução considerável de 52,65% no THD_I . Para o caso conectado à rede com carga foi possível verificar redução no valor de THD_V , enquanto, mesmo não impactando numa redução direta do THD_I , devido principalmente a possíveis distorções presentes na rede de baixa tensão e perfil de carregamento, colaborou na mitigação de harmônicos de ordens superiores.

Capítulo 7 - Conclusão

Os sistemas fotovoltaicos estão em expansão por todo o território nacional. A inserção destes sistemas segue instruções de implantação local por parte das distribuidoras, entretanto recomendações particulares para análise e avaliação das ocorrências de qualidade de energia ainda requerem maiores acompanhamentos.

Inicialmente, foi realizada uma introdução abrangente ao estudo de harmônicos produzidos em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. A metodologia para construção e incremento dos sistemas foi caracterizado ao longo do desenvolvimento deste trabalho, enumerando aspectos essenciais dos sistemas fotovoltaicos, tecnologias de controle e melhoramentos na disseminação harmônica.

No que diz respeito a composição geral das topologias de sistemas conectados à rede elétrica de baixa tensão, constatou-se relevância na utilização dos métodos MPPT por manter a tensão de saída sem flutuação, podendo levar a um baixo valor de THD no lado do consumidor. Evidencia-se também, a empregabilidade dos métodos clássicos, sobretudo P&O, quando comparados com métodos modernos.

Dentre as tecnologias conversores e inversores relacionadas neste trabalho, a topologia *buck-boost* costuma ser a mais adotada para conversores, devido à sua portabilidade, faixa de operação de frequências, entre outros. O inversor *string* lidera a tecnologia atual ao oferecer inúmeras vantagens, como: nenhuma perda de diodo de *string*, MPPT individual aplicado a cada *string*, entre outros. Contudo, a utilização dos conversores e inversores variam de aplicação para aplicação, de acordo com objetivos a serem alcançados.

Em relação a topologias experimentais de filtros, constatou-se a relevância da integração de um filtro LCL passivo, uma vez que o inversor não abrange nenhum tipo de filtro em sua composição. Assim, em todas as práticas, foi verificado que a colocação do filtro possibilitou diminuição da produção dos conteúdos harmônicos satisfatoriamente, sobretudo em altas frequências, quando comparado as aplicações sem o filtro. Em termos de THD, foi possível observar a redução de valores de THD_V nas aplicações, enquanto os valores THD_I conceberam decremento em um dos casos analisados, por efeito das componentes harmônicas características e perfil de carga.

No presente trabalho foram apresentados alguns casos simplificados, onde foi possível detectar atenuação nas distorções harmônicas tanto com existência carga, como apenas na presença da geração fotovoltaica conectada à rede. Dessa forma, em cenários com carregamento mais relevante, o método utilizado pode ser aplicado projetando redução nos valores de distorções harmônicas. Portanto, esse estudo possibilitou, para um sistema de baixa potência, mitigação dos conteúdos harmônicos superiores a frequência de sintonia do filtro, que corresponde 1kHz.

Vale ressaltar que as distribuidoras são reguladas pela ANEEL e a Resolução 1000 que exibem numerosos aspectos com respeito à qualidade de energia distribuída pelas concessionárias, mas não retratam os modos do cliente conectado à rede elétrica de distribuição. Esta conduta pôde ser observada, com a avaliação do comportamento dos harmônicos de tensão e corrente na saída do inversor e seu desempenho com os demais equipamentos integrantes do sistema.

Por fim, este trabalho atingiu o objetivo de descrever as principais tecnologias existentes para rastreamento do MPPT e filtragem de componentes harmônicos. A escolha de qual tecnologia a ser adotada, dependerá do tipo de projeto, variando de acordo com a potência, características geográficas e custos.

7.1 Trabalhos Futuros

Conforme as características individuais dos métodos de redução de conteúdos harmônicos abordadas no decurso do presente trabalho, existe uma série de projetos futuros que podem ser desenvolvidos utilizando a base deste trabalho. Por exemplo, na parte de MPPT, combinar o MPPT interno do inversor com um método mais sofisticado, como RNA ou FLC, a fim de verificar em termos de distorções e a conferência entre cenários e situações de sombreamento. Na topologia de inversores, usar um inversor multinível variando percentuais e carga, a fim de compreender a sua reação em cada um dos níveis e situações de carregamento. Por fim, no âmbito dos filtros passivos, pode-se introduzir os principais filtros empregados na literatura da área de energia elétrica. Verificar o comportamento do sistema para cada um dos filtros dimensionados e graduar o melhor para a situação prática.

Bibliografia

- [1] M. d. M. e. Energia, “Energia eólica e solar somadas têm a segunda maior participação na Oferta Interna de Energia Elétrica de 2021,” Governo Federal, 02 Fevereiro 2022. [Online]. Available: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/energia-eolica-e-solar-somadas-tem-a-segunda-maior-participacao-na-oferta-interna-de-energia-eletrica-de-2021>. [Acesso em 19 Fevereiro 2022].
- [2] F. C. D. I. Rosa, *Harmonics and Power Systems*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006.
- [3] Z. Li, L. Wang, Y. Wang e G. Li, “Harmonic detection method based on adaptive noise cancellation and its application in photovoltaic - active power filter system,” *Electric Power Systems Research*, vol. 184, n° 10638, 2020 . doi: <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106308>.
- [4] Han. Y, Li. H, Shen. P, Coelho. EAA e Guerrero. JM, “Review of active and reactive power sharing strategies in hierarchical controlled,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 32 (3), n° 2427-2451, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2569597>, 2017.
- [5] W. M. Grady e S. Santoso, “Understanding Power System Harmonics,” *IEEE Power Engineering Review*, vol. 21, pp. 8 - 11, 2001. doi: <https://doi.org/10.1109/MPER.2001.961997>.
- [6] F. Batrinu, G. Chicco, J. Schlabbach e F. Spertino, “Impacts of grid-connected photovoltaic plant operation on the harmonic distortion,” *MELECON 2006 - 2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, pp. 861-864, 16-19 maio 2006. doi: <https://doi.org/10.1109/MELCON.2006.1653234>.
- [7] M. Ortega, J. Hernández e O. García, “Measurement and assessment of power quality characteristics for photovoltaic systems: Harmonics, flicker, unbalance, and slow voltage variations,” *Electric Power Systems Research*, vol. 96, pp. 23-35, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.11.003>.
- [8] R. D. R. e. a. Barbosa, “Dissertação de mestrado,” em *Compensação Harmónica em Inversores*, Porto, Portugal, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [9] L. Alhafadhi e J. Teh, “Advances in reduction of total harmonic distortion in solar photovoltaic systems: A literature review.,” *International Journal of Energy Research*, vol. 44, n° 4, pp. 2455-2470, 2020. doi: <https://doi.org/10.1002/er.5075>.
- [10] M. Liserre, F. Blaabjerg e S. Hansen, “Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier,” *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 41, n° 5, pp. 1281-1291, 2005. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2005.853373>.
- [11] R. C. Da Costa, “Trabalho de conclusão,” em *Projeto de um estacionamento solar com interface para recarga de veículos elétricos na escola de engenharia da universidade federal fluminense ‘estação recarga solar’*, Niterói, Brasil, Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, 2017.
- [12] C. C. De Menezes, “Trabalho de conclusão,” em *Estudo e simulação de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica*, Niterói , Brasil, Escola de Engenharia de Universidade Federal Fluminense, 2019.
- [13] M. Z. Fortes, V. P. Medina, J. C. Martinho e G. Cosentino, “Análise da qualidade de energia de um sistema fotovoltaico conectado a uma rede de baixa tensão,” *Revista*

- Augustus*, vol. 25, nº 52, pp. 11- 41, 2020. doi: <https://doi.org/10.15202/19811896.2020v25n52p11>.
- [14] D. P. Fernandes, “Dissertação de mestrado,” em *Simulação de uma Estação Solar para Recarga de Veículos Elétricos Conectada à Rede Elétrica*, Niterói , Brasil, Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, 2021.
- [15] M. C. C. Leite, F. A. M. Vieira, V. B. Silva, M. Z. Fortes e D. H. N. Dias, “Harmonic Analysis of a Photovoltaic Systems Connected to Low Voltage Grid,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, nº 1, pp. 112-117, 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8291462>.
- [16] L. Alhafadhi, J. Asumadu e A. Alsafi, “Total Harmonics Distortion reduction using a new method of adaptive filtering,” *2016 IEEE Western New York Image and Signal Processing Workshop (WNYISPW)*, pp. 1-5, 2016. doi: <https://doi.org/10.1109/WNYIPW.2016.7904791>.
- [17] M. Buresch, *Photovoltaic energy systems: Design and installation*, New York, NY: McGraw-Hill Book Co, 1983.
- [18] Y. Du, D. D. C. Lu, A. Zobaa, S. H. E. A. Aleem e M. E. Balci, *Harmonic distortion caused by single-phase grid-connected PV inverter.*, London, United Kingdom: Power System Harmonics: Analysis, Effects and Mitigation Solutions for Power Quality Improvement, 2018. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.68674>.
- [19] R. Sunny e R. Anto, “Harmonics control and performance analysis of a grid connected photovoltaic system,” *2013 International Conference on Advanced Computing and Communication Systems*, pp. 1-6, 2013. doi: <https://doi.org/10.1109/ICACCS.2013.6938706>.
- [20] A. Rai, B. Awasthi, S. Singh e C. K. Dwivedi, “A review of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system,” *International Journal of Engineering Research*, vol. 5, nº 6, pp. 539-545, 2016. <https://doi.org/10.17950/ijer/v5s6/625>.
- [21] M. Cacciato, A. Consoli e V. Crisafulli, “Power converters for photovoltaic generation systems in smart grid applications,” *2009 Brazilian Power Electronics Conference*, pp. 26-31, 2009. doi: <https://doi.org/10.1109/COBEP.2009.5347592>.
- [22] N. Mohan, T. M. Undeland e W. P. Robbins, *Power electronics: converters, applications, and design*, John wiley & sons, Inc, 2003.
- [23] M. Ayub, C. K. Gan e A. F. A. Kadir, “The impact of grid-connected PV systems on Harmonic Distortion,” *2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)*, pp. 669-674, 2014. doi: 10.1109/ISGT-Asia.2014.6873872.
- [24] A. R. Jordehi, “Maximum power point tracking in photovoltaic (PV) systems: A review of different approaches,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, pp. 1127-1138, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.053>.
- [25] Q. Fu, G. L. Cheng, F. J. Liu e G. L. Ma, “Improvement of P&O MPPT Method for Photovoltaic System Based on Adaptive Prediction Algorithm,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 263–266, p. 2131–2137, 2012. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.263-266.2131>.
- [26] H. P. Desai e H. K. Patel, “Maximum Power Point Algorithm in PV Generation: An Overview,” *2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, pp. 624-630, 2007. doi: <https://doi.org/10.1109/PEDS.2007.4487766>.
- [27] J. M. A. Aniceto, “Tese de doutorado,” em *Conversor DC-DC com busca de ponto de potência máxima (MPPT) para painéis solares*, Caparica, Portugal, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2010.

- [28] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galván, R. C. PortilloGuisado, M. M. Prats e N. Moreno-Alfonso, "Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 53, n° 4, pp. 1002-1016, 2006. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.878356>.
- [29] Y. Liu, "Doctoral dissertation," em *Advanced control of photovoltaic converters*, University of Leicester, 2009.
- [30] M. Calais e V. G. Agelidis, "Multilevel converters for single-phase grid connected photovoltaic systems-an overview," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Proceedings. ISIE'98 (Cat. No.98TH8357)*, vol. 1, pp. 224-229 , 1998. doi:<https://doi.org/10.1109/ISIE.1998.707781>.
- [31] F. Liu, Y. Kang, Y. Zhang e S. Duan, "Comparison of P&O and hill climbing MPPT methods for grid-connected PV converter," *2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pp. 804-807, 2008. doi:<https://doi.org/10.1109/ICIEA.2008.4582626>.
- [32] M.-L. Chiang, C.-C. Hua e J.-R. Lin, "Direct power control for distributed PV power system," *Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka 2002 (Cat. No.02TH8579)*, vol. 1, pp. 311-315, 2002. doi:<https://doi.org/10.1109/PCC.2002.998566>.
- [33] W. Xiao e W. G. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems," *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, vol. 3, pp. 1957-1963, 2004. doi:<https://doi.org/10.1109/PESC.2004.1355417>.
- [34] W. Xiao, "Doctoral dissertation," em *A modified adaptive hill climbing maximum power point tracking (MPPT) control method for photovoltaic power systems*, University of British Columbia, 2003. <https://doi.org/10.14288/1.0091711>.
- [35] C.-T. Pan, J.-Y. Chen, C.-P. Chu e Y.-S. Huang, "A fast maximum power point tracker for photovoltaic power systems," *IECON'99. Conference Proceedings. 25th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No.99CH37029)*, vol. 1, pp. 390-393, 1999. doi:<https://doi.org/10.1109/IECON.1999.822229>.
- [36] H. Patel e V. Agarwal, "Maximum Power Point Tracking Scheme for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, n° 4, pp. 1689-1698, 2008. doi:<https://doi.org/10.1109/TIE.2008.917118>.
- [37] D. Vasarevicius, R. Martavicius e M. Pikutis, "Application of Artificial Neural Networks for Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Panels," *Elektronika Ir Elektrotechnika*, vol. 18, n° 10, pp. 65-68, 2012. <https://doi.org/10.5755/j01.eee.18.10.3065>.
- [38] S. A. Rizzo e G. Scelba, "ANN based MPPT method for rapidly variable shading conditions," *Applied Energy*, vol. 145, pp. 124-132, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.077>.
- [39] K. Ishaque e Z. Salam, "A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 475-488, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.032>.
- [40] J. Xu, A. Shen, C. Yang, W. Rao e X. Yang, "ANN Based on IncCond Algorithm for MPP Tracker," *2011 Sixth International Conference on Bio-Inspired Computing*:

- Theories and Applications*, pp. 129-134, 2011. doi:<https://doi.org/10.1109/BIC-TA.2011.16>.
- [41] B. Amrouche, M. Belhamel e A. Guessoum, "Artificial intelligence based P&O MPPT method for photovoltaic systems.," *Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen*, pp. 11-16, 2007. .
- [42] A. M. A. Mahmoud, H. M. Mashaly, S. A. Kandil, H. E. Khashab e M. N. F. Nashed, "Fuzzy logic implementation for photovoltaic maximum power tracking," *2000 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON 2000. 2000 IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. 21st Century Technologies*, vol. 1, pp. 735-740, 2000. doi:<https://doi.org/10.1109/IECON.2000.973240>.
- [43] C.-Y. Won, D.-H. Kim, S.-C. Kim, W.-S. Kim e H.-S. Kim, "A new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller," *Proceedings of 1994 Power Electronics Specialist Conference - PESC'94*, vol. 1, pp. 396-403, 1994. doi:<https://doi.org/10.1109/PESC.1994.349703>.
- [44] I. Altas e A. Sharaf, "A novel maximum power fuzzy logic controller for photovoltaic solar energy systems," *Renewable Energy*, vol. 33, n° 3, pp. 388-399, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.002>.
- [45] A. Messai, A. Mellit, A. M. Pavan, A. Guessoum e H. Mekki, "FPGA-based implementation of a fuzzy controller (MPPT) for photovoltaic module," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, n° 7, pp. 2695-2704, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.01.021>.
- [46] B. N. Alajmi, K. H. Ahmed, S. J. Finney e B. W. Williams, "A Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded Photovoltaic Systems in Microgrids," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, n° 4, pp. 1596-1606, 2013. <http://doi.org/10.1109/TIE.2011.2168796>.
- [47] B. N. Alajmi, K. H. Ahmed, S. J. Finney e B. W. Williams, "Fuzzy-Logic-Control Approach of a Modified Hill-Climbing Method for Maximum Power Point in Microgrid Standalone Photovoltaic System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, n° 4, pp. 1022-1030, 2011. <http://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2090903>.
- [48] C. B. Salah e M. Ouali, "Comparison of fuzzy logic and neural network in maximum power point tracker for PV systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, n° 1, pp. 43-50, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.07.005>.
- [49] J. Kennedy e R. Eberhart, "Particle swarm optimization," *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, vol. 4, pp. 1942-1948, 1995. <http://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>.
- [50] R. C. Eberhart e Y. & K. J. Shi, *Swarm intelligence*, Elsevier, 2001.
- [51] A. R. Jordehi, "Particle swarm optimisation (PSO) for allocation of FACTS devices in electric transmission systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 1260-1266, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.007>.
- [52] T. Noguchi, S. Togashi e R. & Nakamoto, "Short-current-pulse based adaptive maximum-power-point tracking for photovoltaic power generation system," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 121, n° 1, pp. 78-83, 2001. <https://doi.org/10.1541/ieejias.121.78>.
- [53] D. Patterson e R. Spee, "The design and development of an axial flux permanent magnet brushless DC motor for wheel drive in a solar powered vehicle," *IEEE*

- Transactions on Industry Applications*, vol. 35, n° 5, pp. 1054-1061, 1995. <https://doi.org/10.1109/28.464519>.
- [54] W. Omran, “PhD Tesis,” em *Performance analysis of grid-connected photovoltaic systems*, Ontario, Canadá, University of Waterloo, 2010.
- [55] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen e F. Blaabjerg, “A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, n° 5, pp. 1292-1306, 2005. <https://doi.org/10.1109/TIA.2005.853371>.
- [56] N. H. Baharudin, T. M. N. T. Mansur, F. A. Hamid, R. Ali e M. I. Misrun, “Topologies of DC-DC converter in solar PV applications,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 8, n° 2, pp. 368-374, 2017. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v8.i2.pp368-374>.
- [57] W. Li e X. He, “Review of Nonisolated High-Step-Up DC/DC Converters in Photovoltaic Grid-Connected Applications,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, n° 4, pp. 1239-1250, 2011. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2049715>.
- [58] M. S. Ali, S. K. Kamarudin, M. S. Masdar e A. Mohamed, “An overview of power electronics applications in fuel cell systems: DC and AC converters,” *The Scientific World Journal*, vol. 2014, pp. 1-9, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/103709>.
- [59] O. Deveci e C. Kasnakoğlu, “Performance improvement of a photovoltaic system using a controller redesign based on numerical modeling,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, n° 29, pp. 12634-12649, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.149>.
- [60] A. Marrekchi, S. Kammoun, S. Sallem e M. B. A. Kammoun, “A practical technique for connecting PV generator to single-phase grid,” *Solar Energy*, vol. 118, pp. 145-154, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.015>.
- [61] J. Brey, C. Bordallo, J. Carrasco, E. Galván, A. Jimenez e E. Moreno, “Power conditioning of fuel cell systems in portable applications,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, n° 10-11, pp. 1559-1566, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.10.033>.
- [62] L. Palma, M. H. Todorovic e P. Enjeti, “Design considerations for a fuel cell powered dc-dc converter for portable applications,” *Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 2006. APEC '06.*, p. 1263–1268, 2006. <https://doi.org/10.1109/APEC.2006.1620701>.
- [63] W. Li, J. Liu, J. Wu e X. He, “Design and Analysis of Isolated ZVT Boost Converters for High-Efficiency and High-Step-Up Applications,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, n° 6, pp. 2363-2374, 2007. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.909195>.
- [64] J. T. Kim, B. K. Lee, S. J. J. S. S. K. Tae Won Lee e C. Y. Won, “An active clamping current-fed half-bridge converter for fuel-cell generation systems,” *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, vol. 6, pp. 4709-4714, 2004. <https://doi.org/10.1109/PESC.2004.1354832>.
- [65] K. Wang, C. Y. Lin, D. Q. L. Zhu, F. C. Lee e J. S. Lai, “Bi-directional DC to DC converters for fuel cell systems,” *Power Electronics in Transportation (Cat. No.98TH8349)*, pp. 47-51, 1998. <https://doi.org/10.1109/PET.1998.731056>.
- [66] L. Zhu, “A Novel Soft-Commutating Isolated Boost Full-Bridge ZVS-PWM DC–DC Converter for Bidirectional High Power Applications,” *IEEE Transactions on Power*

- Electronics*, vol. 21, nº 2, pp. 422-429, 2006. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2005.869730>.
- [67] W. Huang, "A new control for multi-phase buck converter with fast transient response," *APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No.01CH37181)*, vol. 1, pp. 273-279, 2001. <https://doi.org/10.1109/APEC.2001.911660>.
- [68] T. Fuse, M. Ohta, M. Tokumasu, H. Fujii, S. Kawanaka e A. Kameyama, "A 0.5-V power-supply scheme for low-power system LSIs using multi-V/sub th/ SOI CMOS technology," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 38, nº 2, pp. 303-311, 2003. <https://doi.org/10.1109/JSSC.2002.807406>.
- [69] R. W. Erickson e D. Maksimovic, *Fundamentals of power electronics*, Mass, USA: Springer Science & Business Media, 2nd edition, 2007.
- [70] A. C. -C. Hua e B. C. -y. Tsai, "Design of a wide input range DC/DC converter based on SEPIC topology for fuel cell power conversion," *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA*, pp. 311-316, 2010. <https://doi.org/10.1109/IPEC.2010.5542257>.
- [71] H. S. ...-H. Chung, K. K. Tse, S. Y. R. Hui, C. M. Mok e M. T. Ho, "A novel maximum power point tracking technique for solar panels using a SEPIC or Cuk converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, nº 3, pp. 717-724, 2003. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2003.810841>.
- [72] C. E. B. Rambo, "Dissertação de mestrado," em *Estudo e desenvolvimento de um método de MPPT para sistemas PV, baseado na técnica P&O aplicado a um microinversor do tipo flyback*, Porto Alegre, Brasil, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2015.
- [73] J. Jana, H. Saha e K. D. Bhattacharya, "A review of inverter topologies for single-phase grid-connected photovoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 1256-1270, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.049>.
- [74] I. I. E. Agency, *Grid-connected photovoltaic power systems: survey of inverter and related protection equipments*, Task V, Report IEA-PVPS T5-05, 2002.
- [75] M. Calais, J. Myrzik, T. Spooner e V. G. Agelidis, "Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems-an overview," *2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No.02CH37289)*, vol. 4, pp. 1995-2000, 2002. <https://doi.org/10.1109/PSEC.2002.1023107>.
- [76] G. Cramer, M. Ibrahim e W. Kleinkauf, "PV system technologies: State-of-the-art and trends in decentralised electrification," *Refocus*, vol. 5, nº 1, pp. 38-42, 2004. [https://doi.org/10.1016/S1471-0846\(04\)00076-9](https://doi.org/10.1016/S1471-0846(04)00076-9).
- [77] C. M. F. S. Reza e S. Mekhilef, "Online stator resistance estimation using artificial neural network for direct torque controlled induction motor drive," *2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 1486-1491, 2013. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2013.6566602>.
- [78] T. Kerekes, "PhD Thesis," em *Analysis and modeling of transformerless photovoltaic inverter systems*, Institut for Energiteknik, Aalborg Universitet, 2009, p. 197.
- [79] G. Cramer e K. H. Toenges, "Modular system technology (string inverters) for grid connected PV sytems in the 100 kW-1 MW power range," Staffelstein, Germany, 1997..
- [80] R. W. da Silva, I. D. M. Melo, H. L. e M. P. Antunes, "Dimensionamento de filtros passivos sintonizados em sistemas elétricos: uma abordagem considerando modelos

- de cargas lineares na análise harmônica.” *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, vol. 2, nº 1, 2020. <https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.1068>.
- [81] E. E. Behr, “Trabalho de conclusão,” em *Filtros Passivos Aplicados a Inversores Monofásicos Conectados à Rede Elétrica*, Florianópolis, Brasil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
- [82] W. Wu, Y. Sun, M. Huang, X. Wang, H. Wang, F. Blaabjerg e H. S. H. ... Chung, “A robust passive damping method for LLCL-filter-based grid-tied inverters to minimize the effect of grid harmonic voltages,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, nº 7, pp. 3279-3289, 2013. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2279191>.
- [83] Y. Jiao e F. C. Lee, “LCL Filter Design and Inductor Current Ripple Analysis for a Three-Level NPC Grid Interface Converter,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, nº 9, pp. 4659-4668, 2015. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2361907>.
- [84] Y. Tang, P. C. Loh, P. Wang, F. H. Choo, F. Gao e F. Blaabjerg, “Generalized Design of High Performance Shunt Active Power Filter With Output LCL Filter,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, nº 3, pp. 1443-1452, 2012. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2167117>.
- [85] L. R. Limongi, “Dissertação de mestrado,” em *Filtros ativos de potência para compensação de harmônicos de corrente e potência reativa*, Recife, Brasil, Universidade Federal de Pernambuco, 2006.
- [86] M. Aredes, “PhD Tieses,” em *Active power line conditioners*, Berlim, 1996..
- [87] L. R. Limongi, M. C. Cavalcanti, F. Neves e G. M. Azevedo, “Implementation of a digital signal processor-controlled shunt active filter,” *Electrical Power Quality and Utilisation. Journal*, vol. 12, nº 2, pp. 5-14, 2006 .
- [88] H. Akagi e H. Fujita, “A new power line conditioner for harmonic compensation in power systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, nº 3, pp. 1570-1575, 1995. <https://doi.org/10.1109/61.400941>.
- [89] D. M. Divan, S. Bhattacharya e B. Banerjee, “Synchronous frame harmonic isolator using active series filter.,” *European conference on power electronics and applications*, vol. 3, pp. 030-030, 1991.
- [90] S. Bhattacharya e D. Divan, “Synchronous frame based controller implementation for a hybrid series active filter system,” *IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting*, vol. 3, pp. 2531-2540, 1995. <https://doi.org/10.1109/IAS.1995.530625>.
- [91] V. Blasko e V. Kaura, “A novel control to actively damp resonance in input LC filter of a three-phase voltage source converter,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, nº 2, pp. 542-550, 1997. <https://doi.org/10.1109/28.568021>.
- [92] R. Attanasio, M. Cacciato, F. Gennaro e G. & Scarcella, “Review on single-phase PV inverters for grid-connected applications,” em *4th IASME/WSEAS, International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development (EEESD'08)*, Algarve, Portugal, 2008.
- [93] J. M. A. Myrzik, “Novel inverter topologies for single-phase stand-alone or grid-connected photovoltaic systems,” *4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE PEDS 2001 - Indonesia. Proceedings (Cat. No.01TH8594)*, vol. 1, pp. 103-108, 2001. <https://doi.org/10.1109/PEDS.2001.975293>.

- [94] M. Kusakawa, H. Nagayoshi, K. Kamisako e K. Kurokawa, "Further improvement of a transformerless, voltage-boosting inverter for AC modules," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 67, n° 1-4, pp. 379-387, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00306-8](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00306-8).
- [95] R. O. Caceres e I. Barbi, "A boost DC-AC converter: analysis, design, and experimentation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 14, n° 1, pp. 134-141, 1999. <https://doi.org/10.1109/63.737601>.
- [96] H. R., *Practical design of power supplies*, New York: McGraw Hill, 1998..
- [97] S. Saha e V. P. Sundarsingh, "Novel grid-connected photovoltaic inverter," *IEE proceedings. Generation, transmission and distribution*, vol. 143, 1996. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19960054>.
- [98] B. K. Bose, P. M. Szczesny e R. L. Steigerwald, "Microcomputer Control of a Residential Photovoltaic Power Conditioning System," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vols. %1 de %2IA-21, n° 5, pp. 1182-1191, 1985.10.1109/TIA.1985.349522.
- [99] N. A. Ahmed, H. W. Lee e M. Nakaoka, "Dual-Mode Time-Sharing Sinewave-Modulation Soft Switching Boost Full-Bridge One-Stage Power Conditioner Without Electrolytic Capacitor DC Link," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, n° 3, pp. 805-813, 2007. <https://doi.org/10.1109/TIA.2007.895803>.
- [100] J. Madouh, N. A. Ahmed e A. M. Al-Kandari, "Advanced power conditioner using sinewave modulated buck-boost converter cascaded polarity changing inverter," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, n° 1, pp. 280-289, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.05.002>.
- [101] G. Bopp, "Inwieweit tragen PV-Anlagen zum Elektrosmog bei?," em *14 Symposium Photovoltaische Sonnenenergie*, Staffelstein, Germany, 1999.
- [102] G. Cramer e K. H. Toenges, "Modular system technology (string inverters) for grid connected PV sytems in the 100 kW-1 MW power range (Einsatz der modularen Systemtechnik (String-WR) zur Netzkopplung von PV-Anlagen im Leistungsbereich von 100kW-1MW in German)," em *12 Symposium Photovoltaische Sonnenenergie*, 1997. .
- [103] Z. Ozkan e A. M. Hava, "Classification of grid connected transformerless PV inverters with a focus on the leakage current characteristics and extension of topology families," *Journal of Power Electronics*, vol. 15, n° 1, pp. 256-267, 2015 .
- [104] S. B. Kjaer e F. Blaabjerg, "Design optimization of a single phase inverter for photovoltaic applications," *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, 2003. PESC '03.*, vol. 3, pp. 1183-1190, 2003. <https://doi.org/10.1109/PESC.2003.1216616>.
- [105] B. Yang, W. Li, Y. Gu, W. Cui e X. He, "Improved Transformerless Inverter With Common-Mode Leakage Current Elimination for a Photovoltaic Grid-Connected Power System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, n° 2, pp. 752-762, 2012. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2160359>.
- [106] Y. Gu, W. Li, Y. Zhao, B. Yang, C. Li e X. He, "Transformerless Inverter With Virtual DC Bus Concept for Cost-Effective Grid-Connected PV Power Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, n° 2, pp. 793-805, 2013. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2203612>.
- [107] D. Karschny, *Wechselrichter*, German Patent DE19, n. 522,1998.

- [108] B. Burger, "Power electronics for grid connected photovoltaic," *Proc. Otti Workshop*, pp. 163-216, 2008.
- [109] B. GruB, W. Kleinkauf, U. Kregel e J. Myzrik, "Loss-reduced energy conversion in PV systems by means of transformerless inverters (Verlustarme nergiewandlung in PV-systemen durch transformatorlose Wechselrichter, in German)," em *Tagungsband des Symposiums Photovoltaische Solarenergie*, pp. 324-25 . 1997.
- [110] J. Schmid e W. & Kleinkauf, "New trends in photovoltaic systems technology," em *14th EPVSEC*, Barcelona, Spain, pp 1337-1339. 1997.
- [111] K. G, K. W, K. U, M. J e Z. P, "Developments in PVinvertertechnology, overview, state of the art, trends in development (Entwicklungslinien der PVWechselrichtertechnik, Ruckblick, Stand der Technik,Entwicklungstendenzen, in German)," em *Tagungsbund des Symposiums*, pp. 163-8. 1997.
- [112] M. Meinhardt e P. Mutschler, "Inverters without transformer in grid connected photovoltaic applications.," *Proceedings of 6th European Conference on Power Electronics and Application (EPE 95)*, vol. 3, pp. 3086-3091, 1995.
- [113] P. M. Bhagwat e V. R. Stefanovic, "Generalized Structure of a Multilevel PWM Inverter," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 19, n° 6, pp. 1057-1069, 1983. <https://doi.org/10.1109/TIA.1983.4504335>.
- [114] B. Burger e D. Kranzer, "Extreme high efficiency PV-power converters," em *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications*, Barcelona, Spain, pp. 1-13. 2009..
- [115] H. Hinz e P. Mutschler, "Single phase voltage source inverters without transformer in photovoltaic application," *Proceedings of 7th International Power Electronics and Motion Control (PEMC)*, vol. 3, p. 161-165, 1996.
- [116] M. Marchesoni, M. Mazzucchelli e S. Tenconi, "A nonconventional power converter for plasma stabilization," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 5, n° 2, pp. 212-219, 1990. <https://doi.org/10.1109/63.53158>.
- [117] J. Mahdavi, J. Roudet, R. Scheich e J. P. Rognon, "Conducted RFI emission from an AC-DC converter with sinusoidal line current," *Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting*, vol. 2, pp. 1048-1053, 1993. <https://doi.org/10.1109/IAS.1993.299027>.
- [118] J. Mahdavi, M. Tabandeh e A. K. Shahriari, "Comparison of conducted RFI emission from different unity power factor AC/DC converters," *PESC Record. 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, vol. 2, pp. 1979-1985, 1996. <https://doi.org/10.1109/PESC.1996.548852>.
- [119] P. K. Hinga, T. Ohnishi e T. Suzuki, "A new PWM inverter for photovoltaic power generation system," *Proceedings of 1994 Power Electronics Specialist Conference - PESC'94*, vol. 1, pp. 391-395, 1994. <https://doi.org/10.1109/PESC.1994.349704>.
- [120] Y. F. Huang, Y. Konishi e W. J. Ho, "Series resonant type soft-switching grid-connected single-phase inverter employing discontinuous-resonant control applied to photovoltaic AC module," *2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 989-994, 2011. <https://doi.org/10.1109/APEC.2011.5744715>.
- [121] D. Amorndechaphon, S. Premrudeepreechacharn e K. Higuchi, "An improved soft-switching single-phase inverter for small grid-connected PV-system," *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2008*, pp. 2125-2130, 2008. <https://doi.org/10.1109/IECON.2008.4758285>.

- [122] *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, IEEE Standard 519-2014, 2014.
- [123] *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, IEEE Standard 519, 1992.
- [124] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “*Resolução 1000*,” 3 janeiro 2022. [Online]. Available: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf. [Acesso em 17 09 2022].
- [125] T. M. Blooming e D. J. Carnovale, “Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits,” *Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, pp. 1-9, 2006. <https://doi.org/10.1109/PAPCON.2006.1673767>.