



**Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Departamento de Engenharia Elétrica**

Milton Ribeiro da Costa Neto

**ESTUDO DE MODULAÇÕES E TOPOLOGIAS TRIFÁSICAS
PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE
ELÉTRICA SEM TRANSFORMADOR**

**João Pessoa – PB
Maio - 2019**

MILTON RIBEIRO DA COSTA NETO

**ESTUDO DE MODULAÇÕES E TOPOLOGIAS TRIFÁSICAS
PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE
ELÉTRICA SEM TRANSFORMADOR**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
coordenação do curso de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal da Paraíba como um dos
pré-requisitos para a obtenção do título de
Engenheiro Eletricista.*

**João Pessoa – PB
Maio - 2019**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

N469e Neto, Milton Ribeiro da Costa.

Estudo de topologias e modulações trifásicas para sistemas fotovoltaicos conectados à rede sem transformador / Milton Ribeiro da Costa Neto. - João Pessoa, 2019.

63 f.

Monografia (Graduação) - UFPB/CEAR.

1. Sistemas fotovoltaicos, topologia de conversores. I.
Título

UFPB/BC

MILTON RIBEIRO DA COSTA NETO

Estudo de Modulações e Topologias Trifásicas para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede sem Transformador

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários para à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Data de Aprovação: ____/____/____

Nota: _____

Aprovado por:

Prof. Dr. Kleber Carneiro de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida (Avaliador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. João Marcelo Dias Ferreira (Avaliador)
Universidade Federal da Paraíba

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado saúde, sabedoria e força para que eu pudesse vencer todos os obstáculos que encontrei durante minha vida.

Agradeço a toda minha família, em especial meus pais (Paulo Germano e Solange Araújo) e minha irmã Ana Paula por todo apoio e incentivo ao longo de todos esses anos e por sempre acreditarem em mim.

Agradeço a minha namorada Geday por sempre me incentivar em todos os momentos, e por estar sempre do meu lado.

Agradeço ao professor Kleber Carneiro pela disposição e orientação, essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos, em especial Jefferson e Eduardo pelas tão necessárias palavras de incentivo e persistência ditas durante todos os momentos da graduação.

Sem todos vocês ao meu lado, nada disso seria possível!

RESUMO

Este trabalho tem com objetivo fazer uma pesquisa sobre os sistemas fotovoltaicos trifásicos conectados à rede elétrica (SFCR) sem o uso de transformador. Mais especificamente, o trabalho visa comparar, por meio de simulações computacionais, topologias e estratégias de modulação para conversores trifásicos fotovoltaicos a fim de encontrar os melhores resultados para os problemas decorrentes do não uso do transformador como fonte de isolamento galvânica entre a conversão CC-CA. Inicialmente, é feita uma breve explanação sobre a matriz energética mundial e brasileira, logo depois, sobre os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Em seguida são apresentados os SFCR sem transformador e os conceitos de corrente de dispersão e tensão de modo comum. Mais a diante, são apresentadas algumas estratégias de modulação, topologias de conversores trifásicos para sistemas fotovoltaicos a fim de se analisar as correntes de dispersão e tensão de modo comum de cada circuito. Logo depois, são apresentados os resultados das simulações feitas através do *software PSIM*[®]. Por fim é feita uma avaliação visando encontrar as topologias e estratégias de modulações que apresentaram os melhores resultados no que se refere às normas técnicas para estes tipos de sistemas.

Palavras-Chaves: Sistemas Fotovoltaicos, Topologia de Conversores, Corrente de dispersão, Tensão de modo comum.

ABSTRACT

This work has the aim to research on three-phase photovoltaic systems connected to the electric grid without the use of transformer. More specifically, the work aims to compare, through computational simulations, topologies and modulation techniques of three-phase photovoltaic converters in order to find the best results for the problems arising from the non-use of the transformer as a source of galvanic isolation between the AC-DC conversion. Initially, a brief explanation is made about the world and Brazilian energy matrix and soon after, about photovoltaic systems connected to the grid. Following are the transformerless three-phase photovoltaic systems and the concepts of leakage current and common mode voltage. Further on, some modulation techniques topologies of three-phase inverters for photovoltaic systems are presented in order to analyze the common mode voltage and leakage current of each circuit. Soon after, the results of the simulations made through *PSIM*[®] software are presented. Finally, an evaluation is made to find the topologies and modulations techniques that presented the best results regarding the technical standards for these types of systems.

Key words: Photovoltaic Systems, inverters topologies, leakage current, common mode voltage.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Ampère
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
C.A.	Corrente Alternada
C.C.	Corrente Contínua
CRESESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
HFT	Transformador de Alta Frequência (<i>High Frequency Transformer</i>)
IEA	Agência Internacional De Energia (<i>Internacional Energy Agency</i>)
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
kW	QuiloWatt
LFT	Transformador de Baixa Frequência (<i>Low Frequency Transformer</i>)
MPPT	Rastreador do Ponto de Máxima Potência (<i>Maximum Power Point Tracking</i>)
PV	Fotovoltaico
PWM	Modulação por Largura de Pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>)
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SVPWM	Modulação Vetorial por Largura de Pulso (<i>Space Vector Pulse Width Modulation</i>)
RCMU	Unidade de Monitoramento de Corrente Residual (<i>Residual Current Monitoration Unit</i>)
RSPWM	Modulação PWM com Estado Remoto (<i>Remote Space Pulse Width Modulation</i>)
V	Volt
V_{CM}	Tensão de Modo Comum (<i>Voltage Commom Mode</i>)
V_{DM}	Tensão de Modo Diferencial (<i>Differential Mode Voltage</i>)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Produção energética mundial por fontes de energia em 2016.....	13
Figura 2-Produção energética no Brasil por fontes de energia (2019).....	14
Figura 3- Crescimento anual médio da oferta de energia por fonte energética no mundo de 1990 a 2016 ...	15
Figura 4-Sistema PV alimentando uma carga ou rede elétrica	20
Figura 5-Comparativo entre conversores com e sem transformador	22
Figura 6-Diagrama esquemático para a capacitância parasita em Painel PV	23
Figura 7-Corrente de dispersão em sistema PV sem transformador	24
Figura 8-Modelagem do sistema PV trifásico sem transformador.....	26
Figura 9-Modelo simplificado do inversor trifásico conectado à rede e ao arranjo PV.....	26
Figura 10-Modelo do inversor trifásico com as tensões V_{CM} e V_{DM}	28
Figura 11-Modelo simplificado do inversor trifásico com as tensões V_{CM} e V_{DM}	28
Figura 12- Conversor Trifásico em Ponte Completa	31
Figura 13-Inversor trifásico em ponte completa com barramento dividido e conexão ideal.....	32
Figura 14- Inversor trifásico em ponte completa com barramento dividido e conexão real.....	33
Figura 15-Sinais PWM. (a) Sinal Senoidal e Sinal Triangular. (b) Sinal de Saída PWM.	34
Figura 16-Diagrama vetorial para tensões de saída do inversor trifásico	35
Figura 17-Tensões Trifásicas de referência para o SVPWM.....	36
Figura 18-Padrão SVPWM e V_{CM} gerada	39
Figura 19- Amplitude máxima das tensões de fase usando SVPWM.....	39
Figura 20- Diagrama Vetorial para aplicação do RSPWM1.....	41
Figura 21-Composição vetorial para o cálculo da amplitude máxima do RSPWM1	42
Figura 22- Padrão RSPWM1 e V_{CM} gerada	42
Figura 23-Síntese do vetor V_S na modulação RSPWM2.....	43
Figura 24- Esquemático para inversor trifásico em ponte completa.....	44
Figura 25-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para conversor trifásico em ponte completa com modulação PWM Seno-Triângulo.....	45
Figura 26-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para conversor trifásico em ponte completa com modulação SVPWM.....	46
Figura 27-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para conversor em ponte completa com modulação RSPWM1.....	47
Figura 28-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para conversor em ponte completa com modulação RSPWM2.....	48
Figura 29- Esquemático para inversor trifásico em ponte completa com capacitor dividido e conexão ideal	49

Figura 30- Esquemático para inversor trifásico em ponte completa com capacitor dividido e conexão real	50
Figura 31-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para topologia capacitor dividido e conexão ideal aplicando modulação PWM Seno-Triângulo	51
Figura 32-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para topologia capacitor dividido e conexão real aplicando modulação PWM Seno-Triângulo	52
Figura 33-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para topologia capacitor dividido e conexão ideal aplicando modulação SVPWM	53
Figura 34-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para topologia capacitor dividido e conexão real aplicando modulação SVPWM	54
Figura 35-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para topologia capacitor dividido e conexão ideal aplicando modulação RSPWM1	55
Figura 36-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para topologia capacitor dividido e conexão real aplicando modulação RSPWM1	56
Figura 37-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para topologia capacitor dividido e conexão ideal aplicando modulação RSPWM2	57
Figura 38-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para topologia capacitor dividido e conexão ideal aplicando modulação RSPWM2	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Vetores espaciais de tensão aplicados no inversor trifásico	37
Tabela 2-Correspondência do vetor com a tensão de modo comum	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 OBJETIVO	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
2 A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	17
2.1 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	18
2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE.....	19
2.3 SISTEMAS PV SEM TRANSFORMADOR.....	21
3 CORRENTE DE DISPERSÃO EM SISTEMAS PV SEM TRANSFORMADOR.....	23
4 TENSÃO DE MODO COMUM EM SISTEMAS PV SEM TRANSFORMADOR	26
5 TOPOLOGIAS E MODULAÇÕES PARA CONVERSORES TRIFÁSICOS PV	31
5.1 INVERSOR TRIFÁSICO EM PONTE COMPLETA.....	31
5.1.1 PONTE COMPLETA COM CAPACITOR DIVIDIDO	32
5.2 MODULAÇÕES PARA INVERSORES TRIFÁSICOS.....	33
5.2.1 PWM SENO-TRIÂNGULO.....	33
5.2.2 MODULAÇÃO VETORIAL (SVPWM).....	34
5.2.2.1 Modulação RSPWM.....	40
5.2.2.1.1 Modulação RSPWM1	41
5.2.2.1.2 Modulação RSPWM2.....	43
6 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	44
6.1 CONVERSOR TRIFÁSICO EM PONTE COMPLETA	44
6.1.1 MODULAÇÃO PWM SENO-TRIÂNGULO.....	45
6.1.2 MODULAÇÃO VETORIAL (SVPWM).....	46
6.1.2.1 Modulação RSPWM1	47
6.1.2.2 Modulação RSPWM2.....	48

6.2 CONVERSOR TRIFÁSICO EM PONTE COMPLETA COM CAPACITOR DIVIDIDO	49
6.2.1 MODULAÇÃO PWM SENO-TRIÂNGULO	51
6.2.2 MODULAÇÃO VETORIAL (SVPWM)	53
6.2.3 MODULAÇÃO RSPWM1	55
6.2.4 MODULAÇÃO RSPWM2	57
7 CONCLUSÕES	59
7.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	60
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

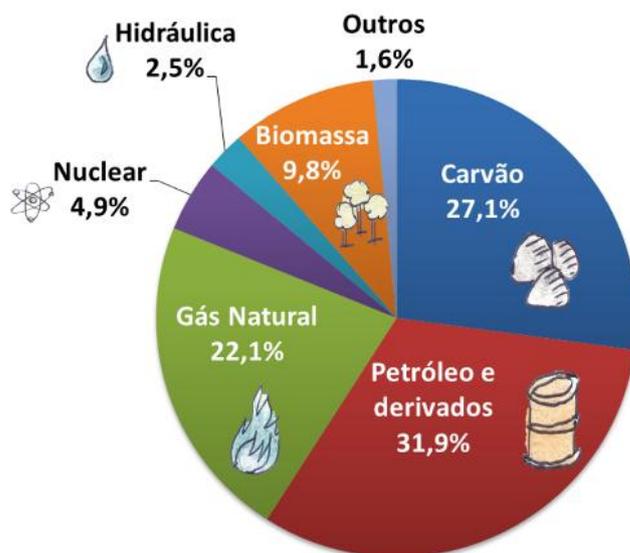
1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico, sobretudo após a revolução industrial, a energia elétrica se tornou um produto fundamental para a vida humana e um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade.

Segundo estimativas preliminares da Agência Internacional de Energia (IEA), a demanda mundial por energia cresceu 2,1% no ano de 2017, este crescimento é mais que o dobro da taxa de crescimento alcançada no ano de 2016 [1]. Embora este dado seja favorável quanto ao desenvolvimento social ao qual ele reflete, existe uma preocupação quanto ao meio ambiente visto que a maior parte da geração de energia elétrica mundial ainda é feita a partir de combustíveis fósseis.

A participação global de combustíveis fósseis na demanda global de energia em 2017 permaneceu em 81%, um nível que se manteve estável por mais de três décadas, apesar do forte crescimento em energias renováveis [1]. Na Figura 1 é mostrada a distribuição das fontes energéticas utilizadas na geração energética mundial no ano de 2016.

Figura 1-Produção energética mundial por fontes de energia em 2016

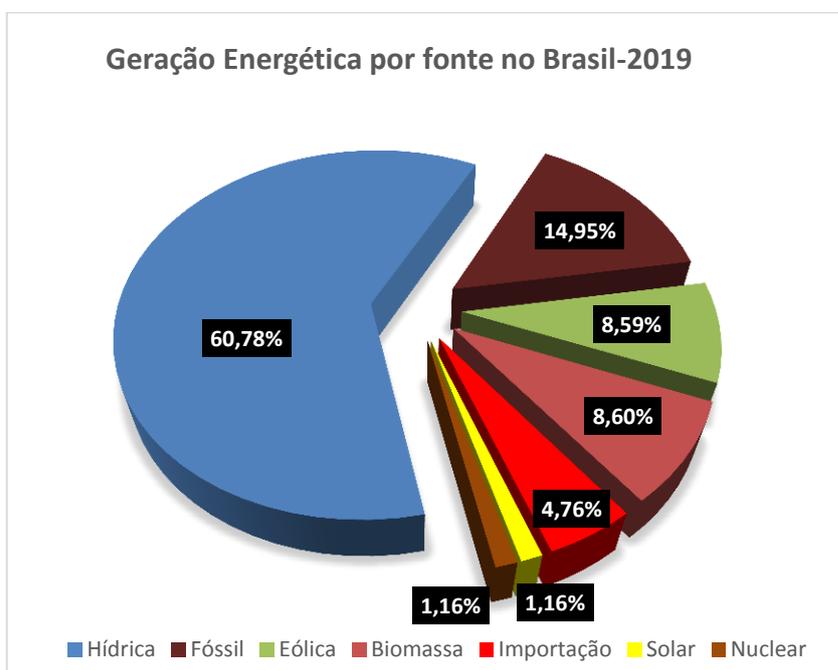


FONTE: [1] (Adaptado)

No Brasil, em contraste com a matriz energética mundial, a fonte energética com maior destaque é a de origem hídrica, sendo esta, responsável por mais da metade da energia gerada em todo o país [2].

Embora a geração de energia vinda das hidrelétricas seja bastante estável e robusta, em algumas épocas do ano, sobretudo em períodos de pouca chuva, o fornecimento de energia proveniente das hidrelétricas não é suficiente para atender à demanda de energia do país, fazendo com que novas fontes energéticas entrem em atividade. Na Figura 2 é mostrada a produção energética no Brasil por fontes energéticas no ano de 2019.

Figura 2-Produção energética no Brasil por fontes de energia (2019)



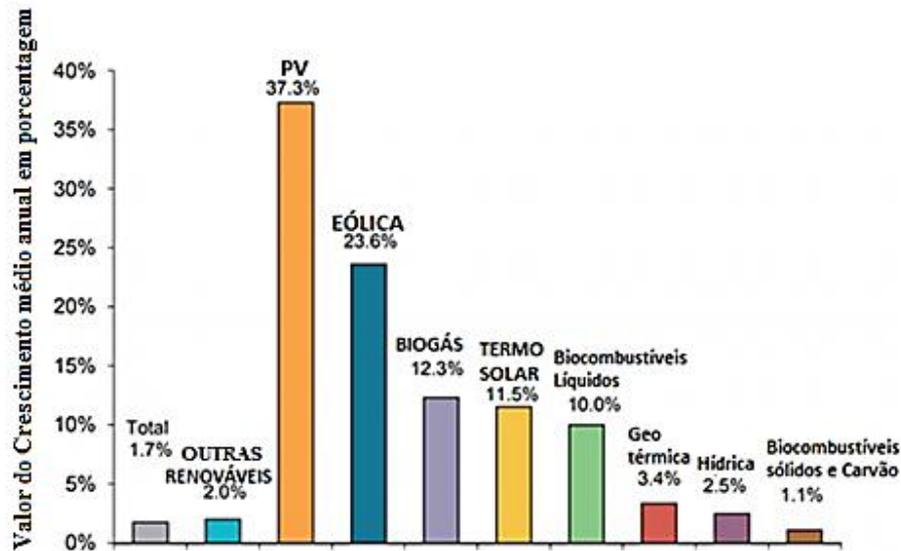
FONTE: [2] (Adaptado)

As termoeletricas brasileiras têm feito a maior parte do suprimento da demanda energética não alcançado pelas hidrelétricas do país. Apesar de gerar uma quantidade de energia suficiente para atender a demanda energética, este tipo de geração de energia utiliza em sua maior parte, combustíveis fósseis, além de possuir um alto custo de funcionamento o que acarreta no aumento da tarifa de energia elétrica para os consumidores finais.

Nesse sentido, as fontes de energias renováveis, sobretudo a energia solar fotovoltaica, têm experimentado um grande desenvolvimento por se tratar de uma forma de geração energética sustentável e cada vez mais econômica. Na Figura 3 é ilustrada as taxas de crescimento médio

anual dos fornecimentos de energia por fontes energéticas do ano de 1990 a 2016 na esfera mundial. Analisando o gráfico é possível notar que a energia solar fotovoltaica se destaca por ter o maior crescimento médio.

Figura 3- Crescimento anual médio da oferta de energia por fonte energética no mundo de 1990 a 2016



FONTE: [1] – (Adaptado)

Através da Figura 1 pode-se notar o grande destaque para o crescimento da oferta de energia através da energia solar ao longo da última década. Este grande crescimento torna o estudo sobre este tipo de energia bem como suas aplicações algo de grande relevância na atualidade.

1.1 Objetivo

Este Trabalho de Conclusão de Curso visa implementar, por meio de modelização e simulação computacional, um estudo comparativo da corrente de dispersão e tensão de modo comum entre algumas topologias e modulações para conversores trifásicos utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede sem transformador.

1.2 Objetivos Específicos

- Apresentar os tipos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede com ênfase no sistema fotovoltaico conectado à rede sem transformador;
- Apresentar os conceitos de capacitância parasita, corrente de dispersão e tensão de modo comum;
- Apresentar as topologias e modulações trifásicas à serem estudadas pelo trabalho;
- Apresentar os resultados das simulações através do software *PSIM*[®];
- Analisar a corrente de dispersão e tensão de modo comum de cada simulação.

1.3 Estrutura e Organização do Trabalho

Este trabalho organiza-se em mais sete capítulos, organizados da seguinte maneira:

- **Capítulo 2** – Neste capítulo é feita a fundamentação teórica onde a temática do trabalho está inserida, descrevendo os sistemas fotovoltaicos e mais especificamente, os sistemas conectados à rede sem transformador;
- **Capítulo 3** – Neste capítulo é apresentada a origem e a definição da capacitância parasita bem como a corrente de dispersão em sistemas fotovoltaicos conectados à rede sem transformador;
- **Capítulo 4** – Neste capítulo é apresentada a origem e a definição da tensão de modo comum em sistemas PV trifásicos conectados à rede sem transformador;
- **Capítulo 5** – Neste capítulo são apresentadas as topologias e as estratégias de modulação para conversores PV trifásicos que foram utilizadas no trabalho;
- **Capítulo 6** – Neste capítulo são apresentados os parâmetros e os resultados das simulações das topologias e modulações aplicadas aos conversores trifásicos analisados neste trabalho.
- **Capítulo 7** – Neste capítulo são apresentadas as conclusões finais, as análises das simulações das topologias apresentadas no trabalho e ideias para trabalhos futuros.
- **Capítulo 8** – Neste capítulo são apresentadas as Referências Bibliográficas utilizadas na elaboração do trabalho.

2 A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Entre as fontes energéticas renováveis, a energia solar é uma das mais abundantes em toda a superfície terrestre além de ser inesgotável na escala de tempo humano. Por esta razão, esta fonte energética é uma das alternativas mais promissoras para a composição de uma nova matriz energética mundial e seu aproveitamento tem se consolidado em muitos países [3]. É esperado que até 2040 a energia solar fotovoltaica seja a mais importante e significativa para o planeta [4].

A energia solar fotovoltaica é gerada através do efeito fotovoltaico. Este efeito consiste na geração de tensão elétrica e/ou corrente elétrica em um material após a sua exposição à luz. Os fótons (elementos de energia) presentes nos raios solares, quando atravessam um material semicondutor com energia suficiente, desprendem elétrons e devido às propriedades dos materiais semicondutores, é então possível o aproveitamento destes elétrons para a geração de energia.

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel que verificou que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas em um eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz [5].

Em 1877, William Grylls Adams e R.E. Day construíram a primeira célula solar baseada em dois eletrodos de selênio que produziam uma corrente elétrica quando expostos à radiação [6]. Apesar da grande descoberta, a eficiência destes sistemas era tão reduzida que o desenvolvimento de células solares realmente interessantes só foi possível com uma compreensão mais completa dos materiais semicondutores até a descoberta dos transistores, por Shockley, Bardeen e Brattain em 1947 [7]. Só em 1954, D.M. Chapin e colaboradores, do Bell Laboratory, nos Estados Unidos da América, publicaram o primeiro artigo sobre células solares em silício, ao mesmo tempo em que registavam a patente de uma célula com uma eficiência de 4.5% [8].

Ao longo dos últimos anos, a energia solar fotovoltaica tem representado uma tecnologia emergente em função da queda contínua nos custos de produção e do progresso tecnológico dos módulos fotovoltaicos. Esta energia alternativa pode contribuir de forma significativa na redução da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera [9].

2.1 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

Um sistema fotovoltaico pode ser classificado em três categorias distintas: sistemas isolados, híbridos e conectados à rede [10]. As três categorias estão descritas abaixo:

- **Sistemas Isolados** – Estes sistemas são mais utilizados para atender cargas que não têm rede elétrica em suas proximidades, sendo assim, é normalmente, necessário o uso de baterias para fazer o armazenamento da energia que será utilizada em períodos que não se tenha geração de energia fotovoltaica disponível. Esse tipo de sistema é também conhecido como *Off Grid*.
- **Sistemas Ligados à Rede** – Nesse tipo de conexão, a fonte é conectada à carga e à rede elétrica. Desta forma, quando a geração fotovoltaica for maior que a demanda de energia da carga, a energia proveniente dos painéis solares será injetada na rede elétrica. Por outro lado, se a geração não for maior que a demanda energética da carga, a rede elétrica irá fornecer a energia faltante para as cargas. Aproximadamente 75% dos sistemas fotovoltaicos instalados no mundo são do tipo conectados à rede [11]. Esse sistema também é conhecido como Sistema *On Grid*.
- **Sistemas Híbridos** - Sistemas híbridos são aqueles que, possuem diversas fontes associadas de geração de energia como turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos entre outras. A utilização simultânea de várias formas de geração de energia elétrica torna esse tipo de conexão bastante robusto e estável, no entanto, torna-se complexo pela necessidade de otimização do uso das energias. Esta forma de conexão é mais utilizada em sistemas de médio e grande porte devido à sua complexidade.

É de interesse deste trabalho, analisar apenas os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR).

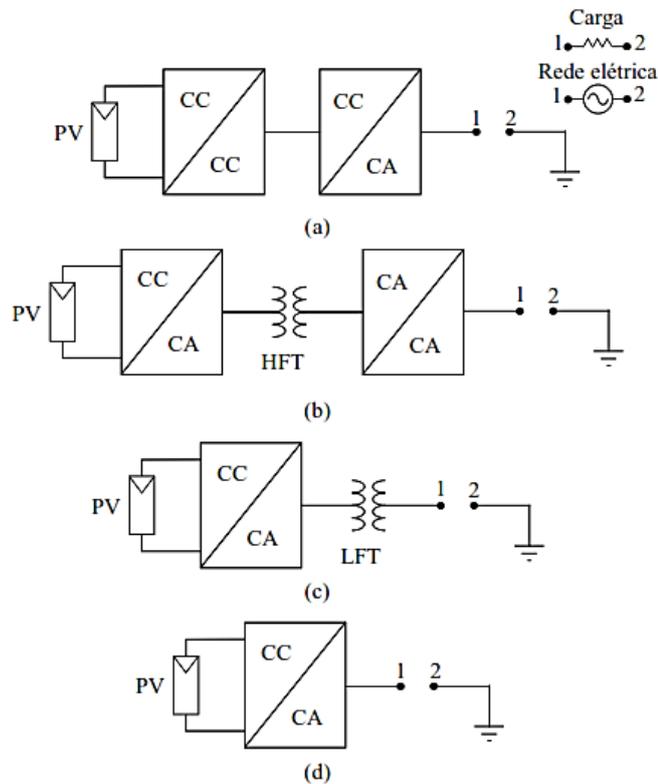
2.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Um sistema interligado à rede dito convencional, não utiliza armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente à rede. Todo o arranjo dito convencional é conectado aos conversores que servem de elemento de interface entre o painel e a rede, de modo a adequar as formas de onda das grandezas elétricas em corrente contínua (C.C.) do painel às formas de onda em corrente alternada (C.A.) exigidas pela rede. Estes conversores devem satisfazer às exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada [12]. Além disso, o conversor C.C.-C.A., também chamado de inversor, é usado para estabilizar tensão de barramento C.C. para um valor específico, já que a tensão de saída do gerador fotovoltaico varia com a temperatura, irradiância e efeito do Rastreamento do Ponto de Potência Máxima (MPPT) [13].

Devido à baixa tensão produzida no arranjo fotovoltaico (PV), às vezes se faz necessário o aumento do número de estágios até que a energia seja transmitida à rede elétrica ou carga específica. Três opções podem ser citadas para resolver esse problema. A primeira opção seria adicionar mais um estágio com um conversor C.C.-C.C. para elevar a tensão, em seguida passar pelo inversor e finalmente chegar à rede elétrica (Figura 4a). A segunda proposta seria utilizar um transformador no sistema para elevar a tensão. Nesse caso, pode-se fazer de duas formas diferentes: utilizando um transformador em alta frequência (*High Frequency Transformer – HFT*) (Figura 4b) ou utilizando um transformador na frequência da rede elétrica (*Low Frequency Transformer – LFT*) (Figura 4c) colocando-o após o inversor. Finalmente, a terceira opção é conectar a energia PV diretamente ao destino final (carga e/ou rede), sem a utilização de transformador (Figura 4d). Para a terceira opção (Figura 4d), o arranjo PV deverá ser maior para suprir a tensão exigida pela carga [14].

Nas Figuras 4a, 4b, 4c e 4d são ilustradas, respectivamente, as quatro formas de conexão de um sistema PV (descritas no parágrafo anterior) alimentando a carga e/ou a rede elétrica.

Figura 4-Sistema PV alimentando uma carga ou rede elétrica



FONTE : [14]

Além de permitir o aumento da tensão aos níveis da rede utilizada, a conexão com o transformador oferece também uma isolação galvânica devido à ausência de conexão elétrica entre as duas partes do circuito (C.C. e C.A.).

Ao redor do mundo, a obrigatoriedade da presença de transformador em um sistema PV conectado à rede depende da legislação local. Como exemplos, no Reino Unido e em alguns países, como a Itália, a isolação galvânica é uma exigência e pode ser feita com uso de transformadores de baixa frequência (*LFT*) ou de alta frequência (*HFT*) [15]. Por outro lado, em países como Alemanha e Espanha, o transformador pode ser retirado [16].

Embora o uso do transformador ofereça vantagens como a elevação da tensão vinda dos painéis PV e a isolação galvânica entre as partes C.C. e C.A. do sistema, a inclusão deste equipamento em um SFCR acarreta um maior peso e custo bem como a diminuição da eficiência, já que as perdas no núcleo, e nos enrolamentos do transformador devem ser levadas em consideração no cálculo da eficiência do sistema [19].

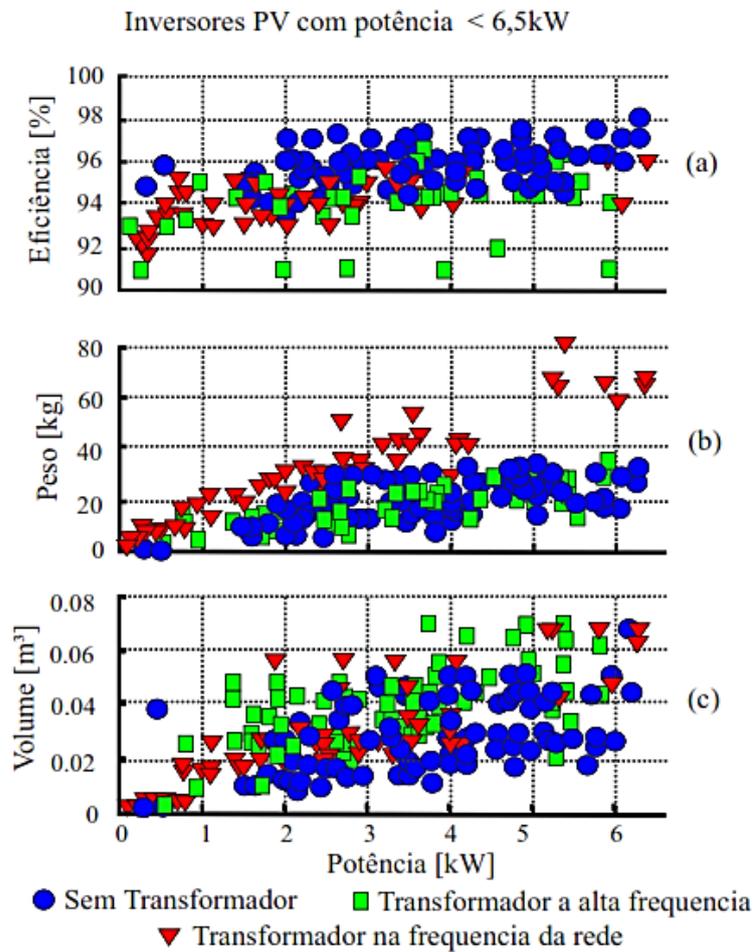
2.3 Sistemas PV sem Transformador

Em termos de desenvolvimento da tecnologia de inversores para aplicação no processamento de energia solar fotovoltaica, a seguinte evolução pode ser notada: os primeiros inversores, comercializados ainda na atualidade, são baseados em isolamento galvânica com o transformador conectado a sua saída, em baixa frequência (50Hz/60Hz) (Figura 4c). Esses transformadores possuem peso, volume e custos consideráveis. Dessa forma, uma parte da tecnologia evoluiu para inversores de dois estágios, com isolamento galvânica em alta frequência (Figura 4b), reduzindo a quantidade de material utilizado na fabricação dos transformadores. Visando à possibilidade de aumentar ainda mais a eficiência dos conversores, os transformadores são completamente eliminados em sistemas não isolados [17].

Na Figura 5 é ilustrado um gráfico publicado em uma revista comercial da indústria fotovoltaica. O gráfico foi elaborado a partir de uma base de dados de mais de 400 conversores para sistemas PV com potência menor que 6,5 kW disponíveis comercialmente e compara informações sobre eficiência máxima, peso e tamanho de diversos conversores com e sem transformador [18].

A falta da isolamento galvânica entre a rede elétrica e os módulos PV faz surgir uma corrente de dispersão devido à capacitância parasita dos módulos. Estas correntes aumentam a interferência eletromagnética, harmônicos injetados na rede elétrica e perdas. A amplitude e o espectro da corrente de dispersão dependem da topologia, da estratégia de modulação e do circuito ressonante formado pelos componentes do sistema [20].

Figura 5-Comparativo entre conversores com e sem transformador



FONTE: [18] – Adaptado

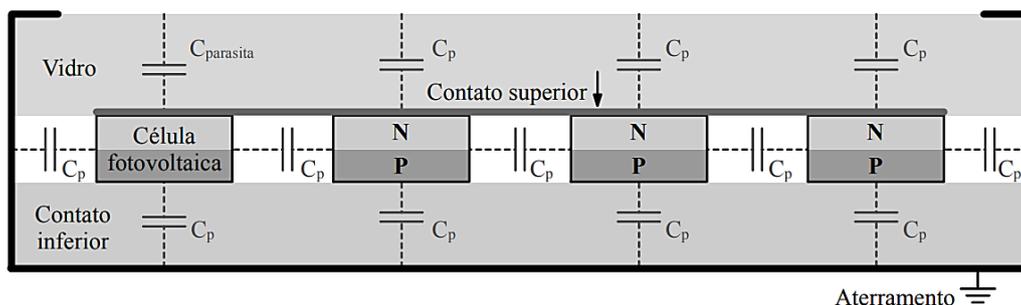
Diante do exposto, o presente trabalho apresenta uma introdução ao comportamento dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica sem a utilização de transformador e um comparativo entre topologias e estratégias de modulação para conversores trifásicos utilizados em sistemas fotovoltaicos no que se refere à corrente de dispersão e a tensão de modo comum. As definições de capacitância parasita, corrente de dispersão e tensão de modo comum serão explicadas com mais clareza ao longo dos capítulos seguintes.

3 CORRENTE DE DISPERSÃO EM SISTEMAS PV SEM TRANSFORMADOR

Devido à baixa tensão e corrente obtida através de uma única célula solar, um painel fotovoltaico é composto por várias células solares ligadas em série e em paralelo de forma que sejam obtidas a tensão e a corrente desejada. A acomodação dessas células é feita através da superfície de um material plástico. Sobre elas é colocada uma placa de vidro, visando uma menor reflexão aos raios solares e uma máxima transparência, enquanto as laterais do conjunto são presas por placas de metal [14].

Pelo fato das células solares dos painéis serem constituídas de materiais como o silício e possuírem um comportamento semelhante ao dos dispositivos semicondutores (camada P-N), há o surgimento de uma capacitância entre as células e destas com as extremidades do painel [21]. A esta capacitância é dado o nome de capacitância parasita (C_p). Na Figura 6 é ilustrado o fenômeno da capacitância parasita.

Figura 6-Diagrama esquemático para a capacitância parasita em Painel PV



FONTE: [25]

O valor dessa capacitância é proporcional à área da superfície e inversamente proporcional à espessura dos módulos, além disso, depende das características do material empregado em sua fabricação [22] [23]. Além dos fatores construtivos também existem os fatores externos, como a umidade e a poeira sobre a superfície do módulo, que contribuem para a elevação dos valores dessas capacitâncias parasitas [23].

O valor da capacitância medida em painéis PV foi estimado com um valor em torno de 150pF [24] *apud* [19], podendo alcançar 9 nF, aproximadamente 60 vezes maior que seu valor anterior, se a superfície do painel estiver coberta com água [19]. De acordo com medições

realizadas, as capacitâncias parasitas variam de $50\eta\text{F}$ a $150\eta\text{F}$ para cada kW de painéis PV instalados [19].

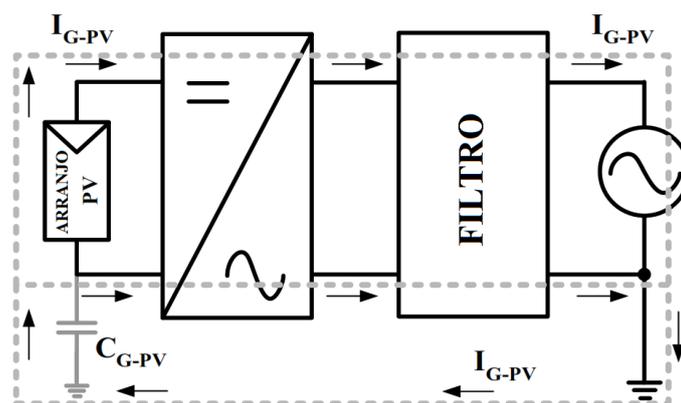
A carga armazenada nas capacitâncias pode fluir para o terminal de terra e, sem a presença de isolamento galvânica, existirá uma circulação de corrente de dispersão entre os painéis e a rede através do circuito do inversor [25].

As correntes de fugas ou de dispersão são geradas quando há uma variação de tensão nos terminais do painel fotovoltaico. Dependendo da estratégia de chaveamento do conversor e das condições atmosféricas em que o painel está submetido, as correntes podem trazer problemas severos de interferência eletromagnética e distorção de corrente na saída do conversor [23].

Quando não existe isolamento galvânica entre o sistema PV e a rede elétrica, cria-se um circuito ressonante entre a terra e os módulos PV (o sistema deve ser aterrado). Este circuito ressonante inclui a capacitância parasita, o filtro de saída do inversor, o inversor e a impedância da rede enquanto a frequência de ressonância deste circuito depende do tamanho do painel fotovoltaico e do comprimento dos cabos C.C. [19] [26]. O amortecimento deste circuito pode ser muito pequeno, fazendo com que a corrente de dispersão atinja valores muito altos, acima do permitido pela norma alemã VDE-0126-1-1 [20].

Na Figura 7 é ilustrado um sistema PV sem transformador e o caminho percorrido pela corrente de dispersão (linha tracejada cinza). A corrente de dispersão é indicada por I_{G-PV} , a capacitância parasita equivalente dos painéis fotovoltaicos é indicada por C_{G-PV} .

Figura 7-Corrente de dispersão em sistema PV sem transformador



FONTE: [19]-(Adaptado)

Não existe nenhuma norma brasileira que especifique os limites de magnitude das correntes de dispersão em sistemas PV sem transformador, no entanto, a norma alemã VDE-0126-

1-1 [27] lida com sistemas PV ligados à rede, e fornece os requisitos para os limites em relação às correntes de dispersão e correntes de falta.

De acordo com a norma alemã VDE-0126-1-1, o sistema PV deve ser desconectado da rede elétrica em no máximo 0,3 segundos caso uma corrente de dispersão maior que 300 mA seja detectada. O monitoramento desta corrente é feito através de uma Unidade de Monitoramento de Corrente Residual (RCMU).

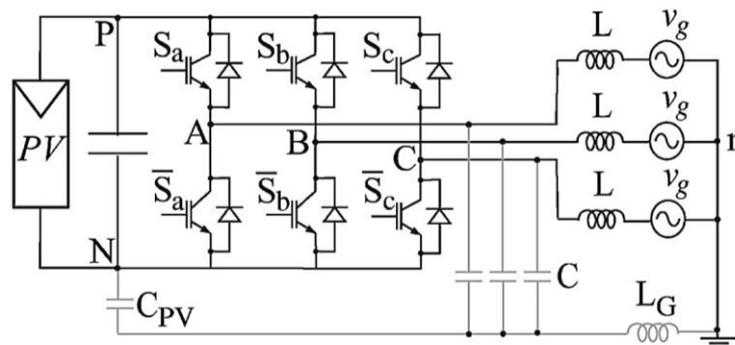
Neste capítulo foram apresentadas as definições de capacitância parasita e corrente de modo comum em sistemas fotovoltaicos. Diante da problemática apresentada, fica clara a grande relevância da análise da corrente de dispersão em sistemas PV sem transformador.

No capítulo 4 será apresentado o conceito de tensão de modo comum em sistemas fotovoltaicos sem transformador.

4 TENSÃO DE MODO COMUM EM SISTEMAS PV SEM TRANSFORMADOR

Para um sistema PV sem transformador, como o ilustrado pela Figura 8, quando a carcaça dos painéis PV é aterrada (exigido pela norma brasileira), a corrente de dispersão poderá aparecer entre o módulo e a terra. O aparecimento desta corrente está associado ao circuito ressonante criado pela capacitância parasita equivalente dos painéis PV (C_{PV}), o conjunto filtro com indutância da rede elétrica (L), capacitância parasita das fases do inversor (C) e a indutância entre a conexão de terra do inversor e a rede elétrica (L_G). As tensões V_g representam as tensões da rede elétrica [28]. Na Figura 8 é ilustrada a modelagem de um sistema PV trifásico com os elementos ressonantes do circuito.

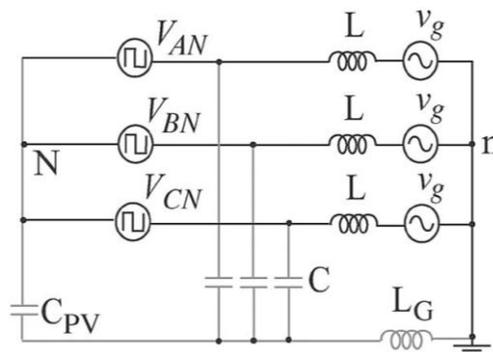
Figura 8-Modelagem do sistema PV trifásico sem transformador



FONTE: [28]

É possível estimar uma relação entre as tensões no sistema e a tensão que pode ser medida através do terminal positivo (V_{Pn}) ou negativo (V_{Nn}) do painel PV [14]. Na Figura 9 é ilustrado o modelo da rede elétrica trifásica conectada ao arranjo PV e o inversor.

Figura 9-Modelo simplificado do inversor trifásico conectado à rede e ao arranjo PV



FONTE: [14]

No caso de um sistema trifásico sem a conexão do neutro com o barramento C.C., as tensões de modo comum e do modo diferencial serão derivadas entre cada fase, portanto, haverá três casos [28]:

- Caso 1: Tensão em modo comum para as fases A e B;
- Caso 2: Tensão em modo comum para as fases B e C;
- Caso 3: Tensão em modo comum para as fases C e A.

Somente o caso 1 será mostrado no cálculo, visto que os outros dois casos são semelhantes.

A tensão de modo comum (*Common Mode Voltage* - V_{CM}) é definida como a média da soma de tensões entre as saídas e a referência comum. Neste caso, a referência comum é tomada como terminal negativo do PV (marcado com N) [16]. O modo comum tensão para as fases A e B é definida como:

$$V_{CM-AB} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} \quad (4.1)$$

Onde V_{AN} e V_{BN} são as tensões de saída do inversor em relação ao terminal negativo do arranjo PV.

A tensão de modo diferencial referente às fases A e B (*Differential Mode Voltage* - V_{DM-AB}) é definida como:

$$V_{DM-AB} = V_{AN} - V_{BN} = V_{AB} \quad (4.2)$$

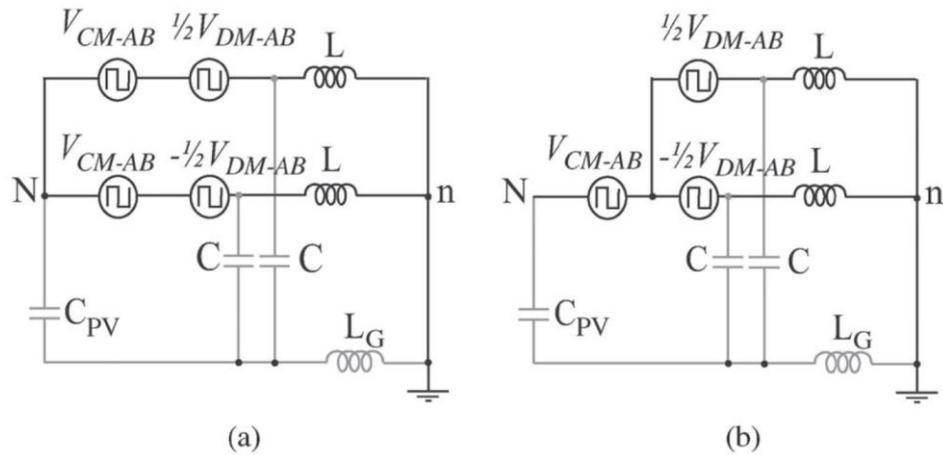
A tensão de saída do inversor ao ponto negativo (N) do arranjo PV pode ser escrita em função e (4.1) e (4.2), da seguinte forma:

$$V_{AN} = \frac{V_{DM-AB}}{2} + V_{CM-AB} \quad (4.3)$$

$$V_{BN} = -\frac{V_{DM-AB}}{2} + V_{CM-AB} \quad (4.4)$$

A partir de (4.3) e (4.4) pode-se remodelar um novo circuito. Na Figura 10 (a) é ilustrado o modelo de circuito trifásico considerando as tensões V_{CM} e V_{DM} entre as fases A e B. Como a tensão V_{CM-AB} é comum às duas fases (A e B), pode-se ainda redesenhar o circuito como mostra a Figura 10 (b).

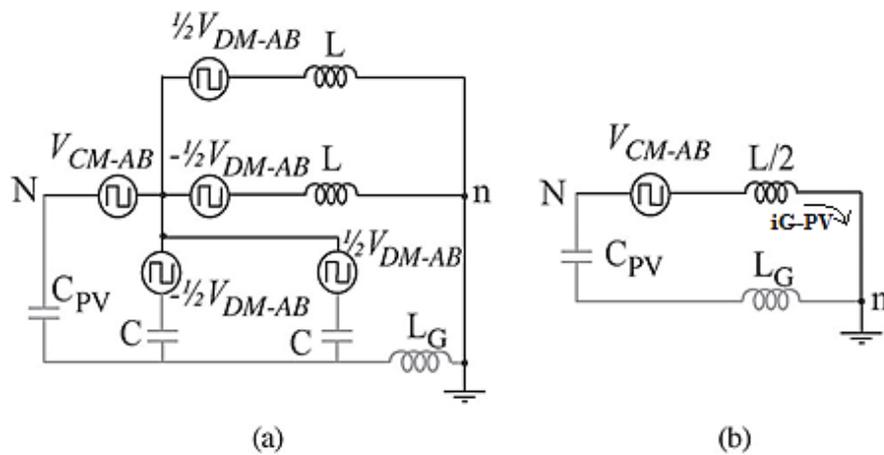
Figura 10-Modelo do inversor trifásico com as tensões V_{CM} e V_{DM}



FONTE: [28]

As influências da indutância de saída e a capacitância parasita do inversor podem ser separadas como mostrado na Figura 11(a) [16].

Figura 11-Modelo simplificado do inversor trifásico com as tensões V_{CM} e V_{DM}



FONTE: [28]-Adaptado

Considerando as capacitâncias parasitas do inversor e conjunto filtro com indutância da rede elétrica das três fases idênticas, o sistema pode ainda ser remodelado como mostra a Figura 11 (b) [28].

Na maioria das vezes, as saídas do inversor são fisicamente idênticas. Então, pode-se assumir que as capacitâncias parasitas do inversor (C) são idênticas. Quando comparadas com

C_{PV} , as capacitâncias parasitas da saída do inversor possuem baixo valor (de dezenas a centenas de μF) e podem ser negligenciadas do circuito mostrado na Figura 11 (b) [26].

A tensão de modo comum total ($V_{CM-3\phi}$) pode ser calculada como:

$$V_{CM-3\phi} = \frac{V_{CM-AB} + V_{CM-BC} + V_{CM-CA}}{3} \quad (4.5)$$

Usando (4.1) e as equações similares para as demais combinações de fases em (4.5), pode-se ainda, escrever $V_{CM-3\phi}$ como:

$$V_{CM-3\phi} = \frac{V_{AN} + V_{BN} + V_{CN}}{3} \quad (4.6)$$

A tensão de modo comum do inversor trifásico carrega e descarrega a capacitância de dispersão (capacitância parasita), isso significa que, a variação de V_{CM} faz surgir uma variação de tensão na capacitância de dispersão. A variação de tensão na capacitância por sua vez, faz surgir uma corrente de que circulará pelo circuito. A magnitude desta corrente depende da amplitude e frequência da tensão de modo comum, como também do valor da capacitância de dispersão [19].

Pode ser observado do modelo na Figura 11(b) que a corrente de dispersão pode ser atenuada ou eliminada pelo controle da tensão de modo comum. Portanto, em um sistema balanceado, a tensão de modo diferencial não contribui para as correntes de dispersão no sistema PV [26].

Por outro lado, a amplitude da corrente de dispersão é diretamente proporcional à variação de potência entregue à rede elétrica. Através da Figura 11(b) pode-se observar também que a variação na potência do arranjo PV provocará alterações na tensão do barramento C.C. e conseqüentemente, mudanças no valor da corrente de dispersão [14].

Sendo a impedância de dispersão composta pela capacitância parasita C_{PV} , a indutância do conjunto filtro com indutância da rede elétrica (L) e a indutância entre a conexão de terra do inversor e a rede elétrica (L_G), o valor da corrente i_{G-PV} muda de acordo com V_{CM} . Logo, a eliminação de i_{G-PV} se dá quando V_{CM} for constante em todo período de operação [14].

Neste capítulo, foram definidos o conceito de tensão de modo comum e o circuito equivalente que pode ser utilizado para a análise deste problema. No capítulo 5 serão apresentadas as topologias de conversores fotovoltaicos trifásicos e as estratégias de modulação utilizadas neste trabalho. Dessa forma, diversas topologias de conversores trifásicos, e diferentes estratégias de

modulação são empregadas a fim de se obter um valor constante para a tensão de modo comum (V_{CM}) evitando assim, o surgimento da corrente de dispersão e todos os problemas relacionados a ela.

5 TOPOLOGIAS E MODULAÇÕES PARA CONVERSORES TRIFÁSICOS PV

Neste capítulo são apresentadas duas possibilidades de topologias de conversores trifásicos para sistemas fotovoltaicos conectados à rede e algumas estratégias de modulação que podem ser aplicadas a estas.

A primeira topologia apresentada é a topologia conversor trifásico em ponte completa. A partir desta, se origina a topologia conversor trifásico com capacitor dividido. Na topologia do conversor trifásico com capacitor dividido, o ponto central do barramento pode ser aterrado utilizando-se de um fio ideal (resistência ôhmica = 0) ou um fio real, os dois casos são apresentados adiante.

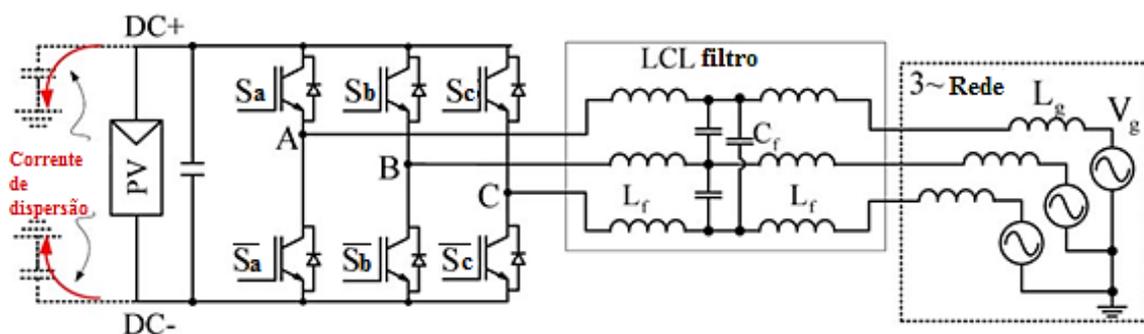
As modulações PWM, SVPWM, RSPWM1 e RSPWM2 também são apresentadas neste capítulo para mais adiante serem aplicadas, via simulação computacional, às topologias que foram utilizadas neste trabalho.

5.1 Inversor Trifásico em Ponte Completa

Inversores trifásicos em ponte completa são amplamente utilizados na maioria das aplicações como drivers de máquinas e filtros de equipamentos ligados à rede elétrica devido à sua simplicidade. Essa topologia consiste em três braços, cada braço com dois transistores (IGBT's) tal que os transistores da parte inferior ($\overline{S}_a, \overline{S}_b, \overline{S}_c$) conduzem de forma inversa aos transistores da parte superior (S_a, S_b, S_c) de forma que, as chaves da parte superior e inferior não devem conduzir ao mesmo tempo.

Na Figura 12 é ilustrada a estrutura desta topologia com um filtro de saída e a conexão com a rede elétrica.

Figura 12- Conversor Trifásico em Ponte Completa

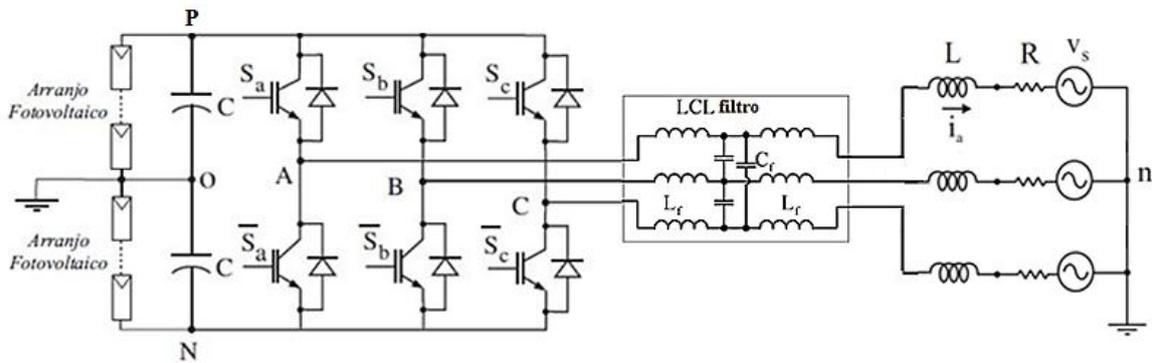


FONTE: [16]

5.1.1 Ponte Completa com Capacitor Dividido

Em sistemas PV sem transformador que usam a conexão entre o neutro da rede e o ponto central do barramento C.C., as correntes de dispersão têm níveis muito baixos porque o potencial entre os módulos PV e a terra é constante se esta conexão é ideal [26]. Na Figura 13 é ilustrada a topologia de inversor trifásico com capacitor dividido e conexão ideal.

Figura 13-Inversor trifásico em ponte completa com barramento dividido e conexão ideal

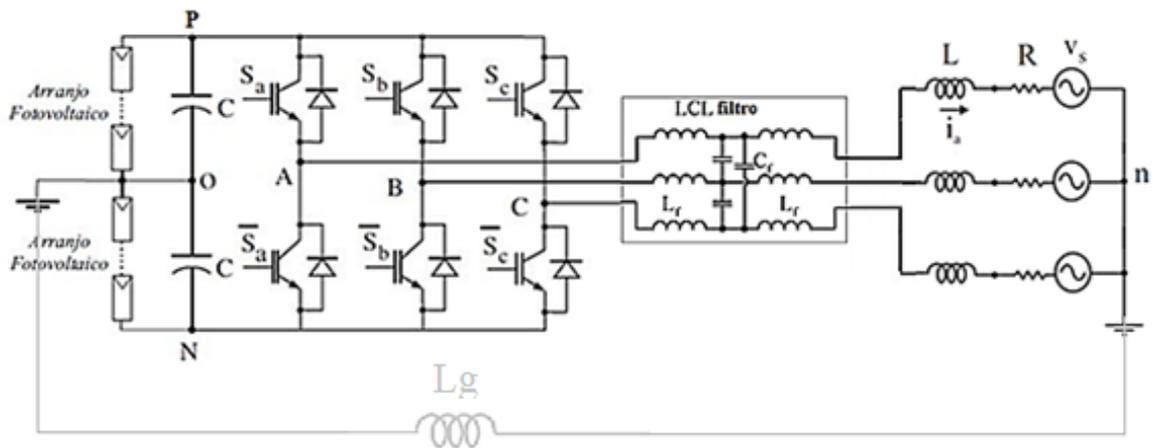


FONTE: [26]-Adaptado

Entretanto, na prática, a conexão não é ideal e uma pequena indutância entre o ponto central do barramento C.C. e o neutro da rede deve ser considerada [16]. Essa indutância é suficiente para fazer a tensão oscilar em alta frequência e aumentar a corrente de dispersão. Essa corrente pode alcançar um valor maior do que os valores recomendados na norma alemã VDE-0126-1-1 dependendo da configuração do sistema [26].

Na Figura 14 é ilustrada a topologia de inversor trifásico em ponte completa com capacitor dividido considerando a indutância entre o barramento C.C. e o neutro da rede, para efeito de simulação, é adotado o valor de $10\mu\text{H}$ para L_g .

Figura 14- Inversor trifásico em ponte completa com barramento dividido e conexão real



FONTE: [26]-Adaptado

5.2 Modulações para Inversores Trifásicos

As estratégias de modulação interferem na tensão de modo comum que por sua vez, interferem na corrente de dispersão do SFCR sem transformador. Com o objetivo da diminuição da corrente de dispersão nos sistemas, diversas estratégias de modulação podem ser empregadas.

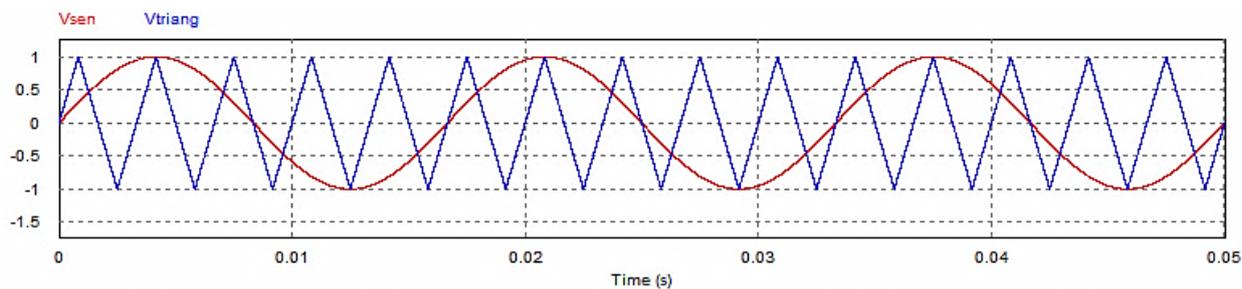
A seguir são apresentadas as modulações que foram utilizadas neste trabalho.

5.2.1 PWM Seno-Triângulo

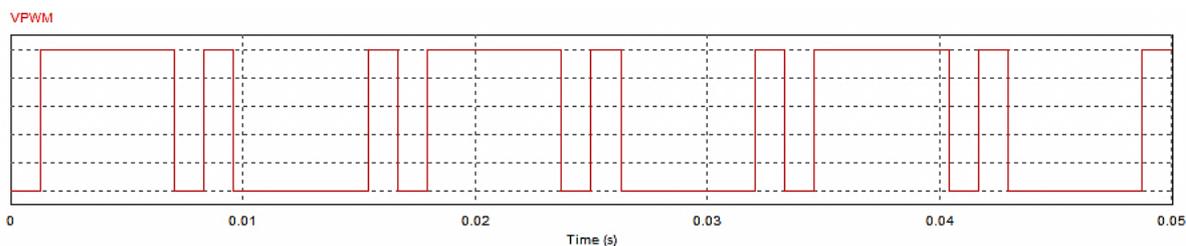
Diversas modulações podem ser utilizadas para as topologias de conversores trifásicos, entre elas, a Modulação por Largura de Pulso (PWM) é amplamente empregada no controle da abertura das chaves de comando de conversores trifásicos.

Entre as modulações PWM, a modulação PWM-Seno-Triângulo consiste na geração de um sinal proveniente da comparação entre dois outros sinais, sendo um sinal senoidal na frequência da rede elétrica (modulante) e o outro sinal triangular em alta frequência (portadora). No caso de uma síntese de ondas senoidais trifásicas este processo de comparação se dá com três ondas de referência senoidais, cada uma delas defasada 120° da outra. Na Figura 15 (a) são ilustrados os dois sinais que são comparados pelo PWM.

Figura 15-Sinais PWM. (a) Sinal Senoidal e Sinal Triangular. (b) Sinal de Saída PWM.



(a)



(b)

FONTE: Do autor

A saída do gerador PWM deve ser um sinal pulsante de forma que a largura dos pulsos é proporcional à diferença entre as amplitudes do sinal referência (frequência da rede elétrica) e a portadora triangular (alta frequência), este sinal é aplicado nas chaves superiores (S_a , S_b , S_c) ficando as chaves inferiores (\overline{S}_a , \overline{S}_b , \overline{S}_c) comandadas por um sinal inverso àquele. Na Figura 15 (b) é ilustrado o sinal de saída do inversor (PWM).

Ao sinal de saída do inversor, deve ser aplicado um filtro do tipo passa-baixa a fim de se eliminar componentes de altas frequências provenientes do chaveamento e assim adequar o sinal à rede elétrica e/ou cargas. Ao final do processo, consegue-se reproduzir uma boa aproximação do sinal de referência (sinal da rede).

5.2.2 Modulação Vetorial (SVPWM)

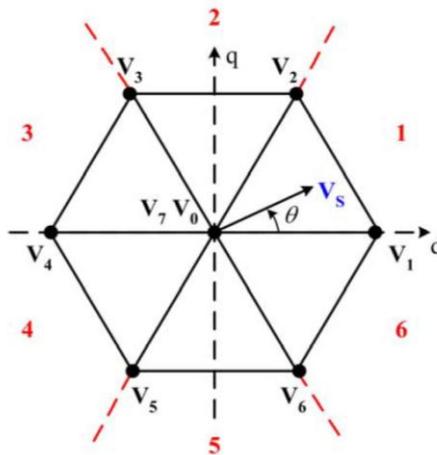
Na literatura, existem várias formas de sintetizar uma tensão de referência através de um sinal PWM. A modulação que desempenha um melhor controle em um sistema trifásico é o PWM vetorial (*Space Vector PWM* ou SVPWM) [14].

O SVPWM baseia-se na determinação dos períodos em que as chaves utilizadas no conversor, permanecem nos estados lógicos $ON(1)$ e $OFF(0)$ em função da posição instantânea de

um vetor espacial. Para este tipo de modulação são apresentados oito vetores, sendo destes, seis ativos (V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 e V_6) e dois nulos (V_0 e V_7). Os vetores ativos determinam um plano, que é dividido em seis setores formando um hexágono onde o ângulo entre dois vetores ativos adjacentes é 60° enquanto os dois vetores nulos se localizam no centro do hexágono.

Na Figura 16 é ilustrado o hexágono formado pelos vetores usados para o SVPWM e as marcações (em vermelho) para cada setor.

Figura 16-Diagrama vetorial para tensões de saída do inversor trifásico



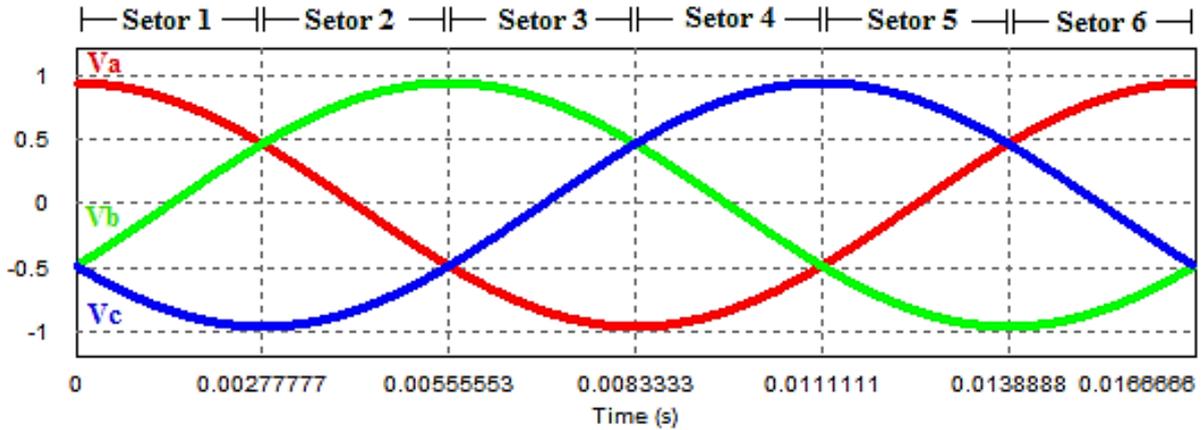
FONTE: Do autor

Para realizar tal modulação é necessária uma referência trifásica, a qual pode ser obtida de um sinal de tensão ou corrente no controle do processo. Utilizando tensão como referência, as tensões trifásicas são transformadas em variáveis dq que utilizam números complexos e usa-se o vetor auxiliar V_S dado por (5.1) e (5.2). O vetor V_S sintetiza assim, um estado de tensões trifásicas.

$$V_S = |V_S| \cdot e^{j\theta} = V_S \cdot \cos(\theta) + j \cdot V_S \cdot \sin(\theta) \quad (5.1)$$

$$\begin{bmatrix} V_S \cdot \cos(\theta) \\ V_S \cdot \sin(\theta) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Figura 17-Tensões Trifásicas de referência para o SVPWM



FONTE: Do autor

Na Figura 17 são ilustrados os setores definidos de acordo com as amplitudes instantâneas de cada fase das tensões trifásicas. A divisão é feita da seguinte maneira:

$$\text{Setor 1: } V_a \geq V_b \geq V_c$$

$$\text{Setor 4: } V_c \geq V_b \geq V_a$$

$$\text{Setor 2: } V_b \geq V_a \geq V_c$$

$$\text{Setor 5: } V_c \geq V_a \geq V_b$$

$$\text{Setor 3: } V_b \geq V_c \geq V_a$$

$$\text{Setor 6: } V_a \geq V_c \geq V_b$$

Matematicamente, pode-se determinar o setor em que o vetor V_S se encontra a partir do seu argumento (θ) da seguinte forma:

$$\text{Setor 1: } 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$$

$$\text{Setor 4: } \pi \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3}$$

$$\text{Setor 2: } \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3}$$

$$\text{Setor 5: } \frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3}$$

$$\text{Setor 3: } \frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \pi$$

$$\text{Setor 6: } \frac{5\pi}{3} \leq \theta \leq 2\pi$$

As tensões de cada estado das chaves superiores do inversor trifásico são dadas pelos vetores apresentados na Tabela 1. Onde V_{CC} é a tensão do barramento C.C. utilizado na entrada do inversor.

Tabela 1-Vetores espaciais de tensão aplicados no inversor trifásico

Configuração	Estado	Vetor
0	000	$V_0 = 0$
1	100	$V_1 = \left(\frac{2V_{cc}}{3}\right)$
2	110	$V_2 = \left(\frac{2V_{cc}}{3}\right) e^{j\pi/3}$
3	010	$V_3 = \left(\frac{2V_{cc}}{3}\right) e^{j2\pi/3}$
4	011	$V_4 = \left(\frac{2V_{cc}}{3}\right) e^{j3\pi/3}$
5	001	$V_5 = \left(\frac{2V_{cc}}{3}\right) e^{j4\pi/3}$
6	101	$V_6 = \left(\frac{2V_{cc}}{3}\right) e^{j5\pi/3}$
7	111	$V_7 = 0$

Para cada setor, são aplicados quatro vetores, sendo dois ativos (que delimitam o setor em que o vetor V_S se encontra) e dois vetores nulos (V_0 e V_7). Por exemplo, no setor 1, o SVPWM usa os dois vetores nulos (V_0 e V_7) e os vetores ativos (V_1 e V_2), o tempo de aplicação de cada vetor é dado por (5.3) e (5.4) onde T_S é a metade do período da portadora, t_1 e t_2 são os tempos dos vetores ativos e t_0 é o tempo de aplicação dos vetores nulos. É importante destacar que todos os tempos são referenciados na metade do período da portadora, e para a outra metade do período, basta espelhar os valores de tempo encontrados.

$$V_S \cdot T_S = V_1 \cdot t_1 + V_2 \cdot t_2 + t_0 \cdot (V_0 + V_7) \quad (5.3)$$

$$T_S = t_1 + t_2 + 2 \cdot t_0 \quad (5.4)$$

De acordo com a Tabela 2, a tensão de modo comum assume quatro valores: 0 , $\frac{V_{PN}}{3}$, $\frac{2V_{PN}}{3}$ e V_{PN} .

Continuando o exemplo do setor 1, substitui-se os valores dos vetores da Tabela 1 em (5.3) e usando (5.1) é possível obter (5.5) e (5.6), com algumas manipulações matemáticas e o uso de identidades trigonométricas, calcula-se os tempos de aplicação de cada vetor dados por (5.7) a (5.9). O mesmo procedimento é utilizado para o cálculo dos tempos nos outros setores.

$$T_S \cdot V_S \cdot \cos(\theta) = \frac{2 \cdot V_{cc}}{3} \cdot \left(t_1 \cdot \cos(0) + t_2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \right) \quad (5.5)$$

$$T_S \cdot V_S \cdot \sin(\theta) = \frac{2 \cdot V_{cc}}{3} \cdot \left(t_1 \cdot \sin(0) + t_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \right) \quad (5.6)$$

$$t_1 = \sqrt{3} \frac{V_S}{V_{cc}} \cdot T_S \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \quad (5.7)$$

$$t_2 = \sqrt{3} \frac{V_S}{V_{cc}} \cdot T_S \cdot \sin(\theta) \quad (5.8)$$

$$t_0 = (T_S - t_1 - t_2) / 2 \quad (5.9)$$

Com todas as equações dos tempos para cada setor obtidas é possível programar a modulação vetorial em código de linha e com isso comandar todas as chaves do conversor trifásico.

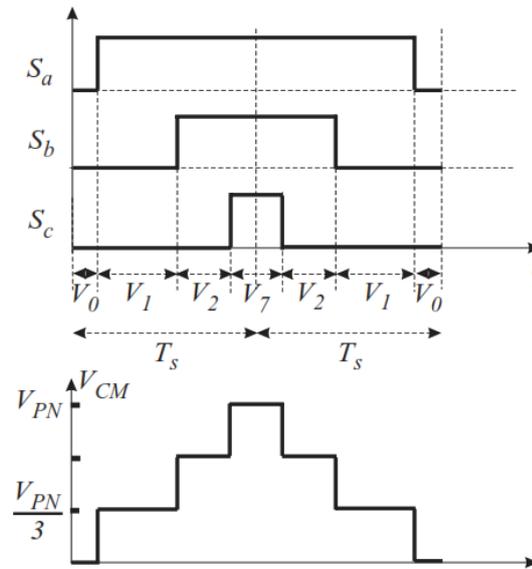
Usando o SVPWM, a tensão de modo comum será mudada sempre que um novo vetor é usado, a Tabela 2 apresenta as oito possibilidades das chaves do inversor e a tensão de modo comum por elas geradas para o inversor trifásico usando (4.6).

Tabela 2-Correspondência do vetor com a tensão de modo comum

S_a	S_b	S_c	Vetor	V_{CM}
0	0	0	V_0	0
1	0	0	V_1	$\frac{V_{PN}}{3}$
1	1	0	V_2	$\frac{2 \cdot V_{PN}}{3}$
0	1	0	V_3	$\frac{V_{PN}}{3}$
0	1	1	V_4	$\frac{2 \cdot V_{PN}}{3}$
0	0	1	V_5	$\frac{V_{PN}}{3}$
1	0	1	V_6	$\frac{2 \cdot V_{PN}}{3}$
1	1	1	V_7	V_{PN}

Na Figura 18 é ilustrado o padrão de chaveamento e a tensão de modo comum obtida a através do SVPWM para o setor 1.

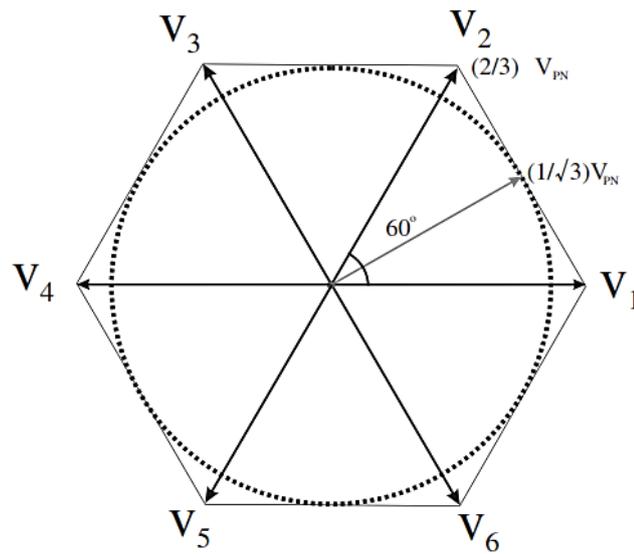
Figura 18-Padrão SVPWM e V_{CM} gerada



FONTE: [26]

A máxima amplitude das tensões de fase é delimitada pelo valor do raio da maior circunferência inscrita no hexágono formado pelos vetores ativos utilizados. Para a modulação SVPWM, a máxima amplitude é $\frac{V_{PN}}{\sqrt{3}}$ como mostrado na Figura 19 [14].

Figura 19- Amplitude máxima das tensões de fase usando SVPWM



FONTE: [26]

Conclui-se então que a modulação SVPWM permite que o inversor trifásico sintetize em sua saída uma quantidade infinita de vetores a partir da combinação de sete vetores fundamentais. Contudo, a duração de cada estado das chaves deve satisfazer as seguintes equações (5.10) e (5.11) [31].

$$V_S = \frac{\sum_{i=0}^7 t_i V_i}{T_S} \quad (5.10)$$

$$T_S = \sum_{i=0}^7 t_i \quad (5.11)$$

5.2.2.1 Modulação RSPWM

Uma maneira de se diminuir a ocorrência de correntes de dispersão no sistema PV é através da redução do número de variações do nível de tensão de modo-comum ao longo de um ciclo de chaveamento. A modulação PWM com estado remoto (*Remote-State PWM* ou *RSPWM*) utiliza ao longo de um dado ciclo de chaveamento somente os vetores que produzem o mesmo nível de tensão de modo-comum, ou seja, apenas os vetores ativos ímpares (1, 3 e 5) ou os vetores pares (2, 4 e 6), não havendo, portanto $\frac{dv}{dt}$ ao longo do ciclo [31].

Na modulação RSPWM, o ângulo formado entre dois vetores adjacentes vale 120° , diferente da modulação SVPWM onde este ângulo valia 60° . Nesta modulação existem apenas 3 setores sendo que cada setor da modulação RSPWM é formado por dois setores da modulação SVPWM.

De acordo com a Tabela 2, a tensão de modo comum para esta modulação deve ser constante e igual à $\frac{V_{PN}}{3}$, com isso, a corrente de dispersão deve ser zero.

Para a modulação que utilizada apenas os setores ímpares (1, 3 e 5) é dado o nome de RSPWM1, enquanto a modulação que utiliza apenas os setores pares (2, 4 e 6), é denominada RSPWM2.

5.2.2.1.1 Modulação RSPWM1

Sendo a modulação RSPWM1, devido à utilização apenas dos vetores ímpares, tem-se que os tempos de aplicação dos vetores pares e vetores nulos são iguais à zero, assim:

$$t_2 = t_4 = t_6 = t_0 = t_7 = 0 \quad (5.12)$$

Desta forma, as equações (5.10) e (5.11) assumem a forma:

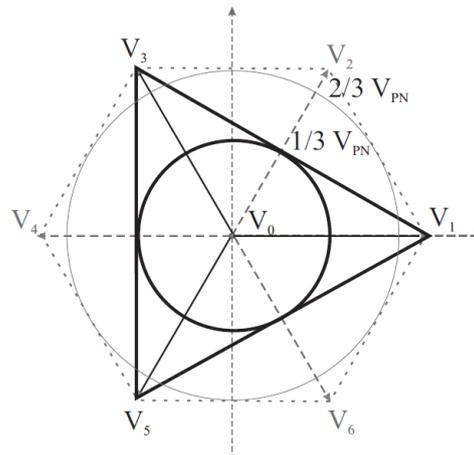
$$V_S = \frac{V_1 t_1 + V_3 t_3 + V_5 t_5}{T_S} \quad (5.13)$$

$$T_S = t_1 + t_3 + t_5 \quad (5.14)$$

De forma análoga ao que foi feito para a modulação SVPWM, é possível calcular o tempo de aplicação de cada vetor e assim programar a modulação RSPWM em código de linha a fim de comandar todas as chaves do conversor trifásico.

O diagrama vetorial para o RSPWM1 é ilustrado pela Figura 20.

Figura 20- Diagrama Vetorial para aplicação do RSPWM1



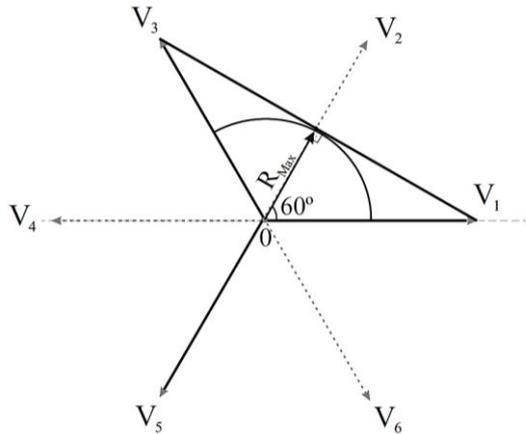
FONTE: [31]

Na Figura 21 é ilustrada a máxima amplitude das tensões de fase é delimitada pelo valor do raio da maior circunferência inscrita no hexágono formado pelos vetores ativos utilizados. Para a

modulação RSPWM, a máxima amplitude é $\frac{V_{PN}}{3}$. O cálculo pode ser feito observando que o raio máximo da altura do triângulo formado pelos vetores V_1, V_0 e V_3 , Logo:

$$\cos 60^\circ = \frac{R_{MÁX}}{2V_{PN}/3} \rightarrow R_{MÁX} = \frac{V_{PN}}{3} \quad (5.15)$$

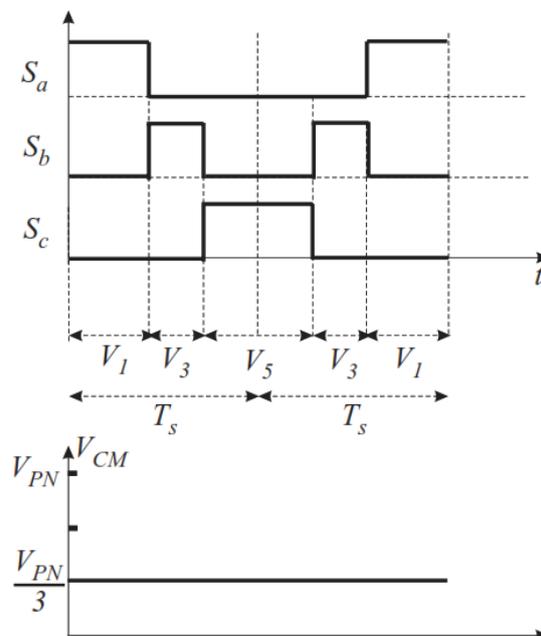
Figura 21-Composição vetorial para o cálculo da amplitude máxima do RSPWM1



FONTE: [31]

Na Figura 22 é ilustrado o padrão de chaveamento e a tensão de modo comum obtida a através do RSPWM1 para o setor 1.

Figura 22- Padrão RSPWM1 e V_{CM} gerada



FONTE: [26]

5.2.2.1.2 Modulação RSPWM2

De forma análoga à análise dos tempos de aplicação de cada vetor ímpar na modulação RSPWM1, sendo a modulação RSPWM2, devido à utilização apenas dos setores pares, tem-se que:

$$t_1 = t_3 = t_5 = t_7 = 0 \quad (5.16)$$

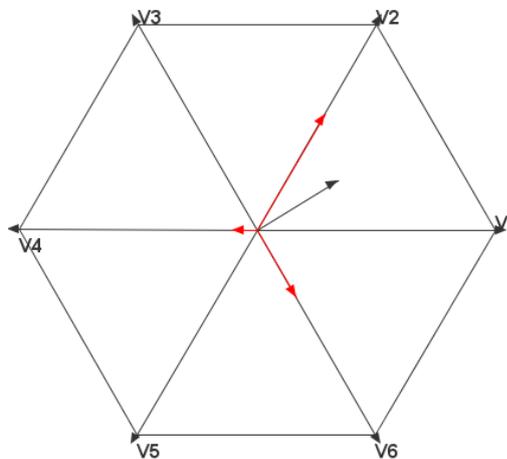
As equações (5.10) e (5.11) assumem a forma:

$$V_S = \frac{V_2 t_2 + V_4 t_4 + V_6 t_6}{T_S} \quad (5.17)$$

$$T_S = t_2 + t_4 + t_6 \quad (5.18)$$

Dessa forma, o vetor V_S será sintetizado através dos vetores V_2, V_4 e V_6 . Na Figura 23 é ilustrada a formação do vetor V_S (em preto) a partir dos vetores pares (em vermelho).

Figura 23-Síntese do vetor V_S na modulação RSPWM2



FONTE: [31]

A máxima amplitude das tensões de fase pode ser encontrada de maneira similar à modulação RSPWM1 (5.15), já que o triângulo formado pelos vetores V_2, V_0 e V_4 possui a mesma altura do triângulo formado pelos vetores V_1, V_0 e V_3 . Para a modulação RSPWM2, máxima amplitude das tensões de fase vale $\frac{V_{PN}}{3}$.

6 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

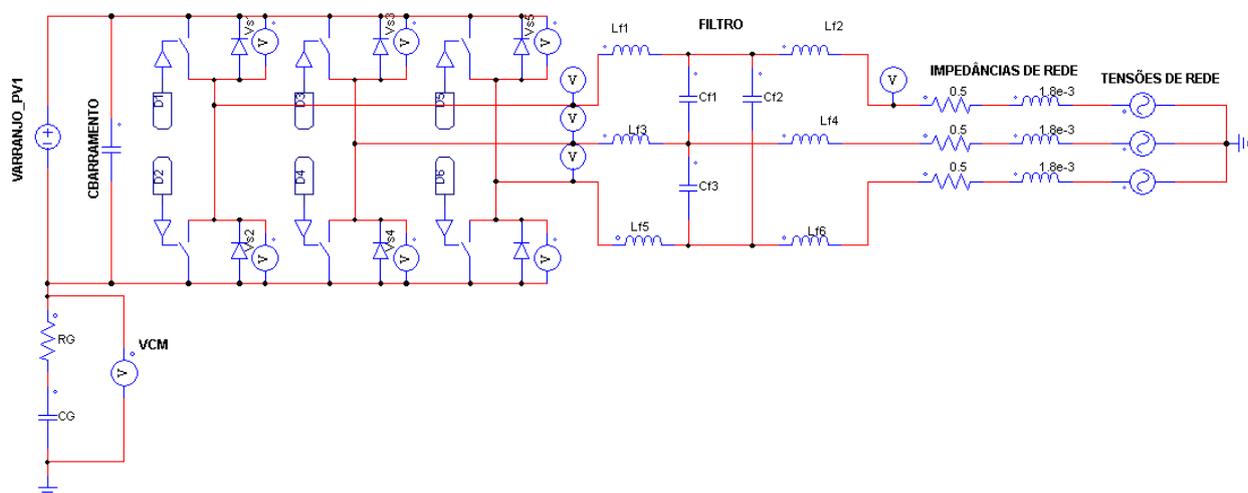
Neste capítulo, são apresentados os parâmetros de simulação utilizados e os resultados obtidos com as simulações realizadas. Todas as simulações têm como objetivo a verificação da corrente de dispersão e tensão de modo comum em cada uma das topologias e modulações aplicadas.

Para a obtenção dos resultados, as simulações foram realizadas através do *software PSIM*[®]. Os parâmetros de simulação foram extraídos de [26]. A frequência de chaveamento foi ajustada para 10kHz e o arranjo PV foi simulado como uma fonte C.C. de 650 V_{CC} . As indutâncias da rede são $L = 1,8\text{mH}$ por fase e a resistência da rede tem um valor de $R = 0,5\Omega$ por fase. A capacitância parasita entre os módulos e a terra é C_{G-PV} e tem sua capacitância igual a 220 nF, a resistência de terra R_G é igual a 10,75 Ω . O valor das indutâncias e capacitâncias utilizadas no filtro são $L_f = 3\text{mH}$ e $C_f = 4,5\mu\text{F}$ de forma que os capacitores estão ligados em Δ . O valor eficaz da tensão da rede elétrica foi fixado em $V_S = 110\text{V}$ e a frequência da rede elétrica adotada é 60Hz. O capacitor C usado no barramento C.C. tem sua capacitância igual a 1mF.

6.1 Conversor Trifásico em Ponte Completa

Para as simulações referentes à topologia do conversor trifásico em ponte completa, foi utilizado o esquemático mostrado pela Figura 24, elaborado através do *software PSIM*[®].

Figura 24- Esquemático para inversor trifásico em ponte completa



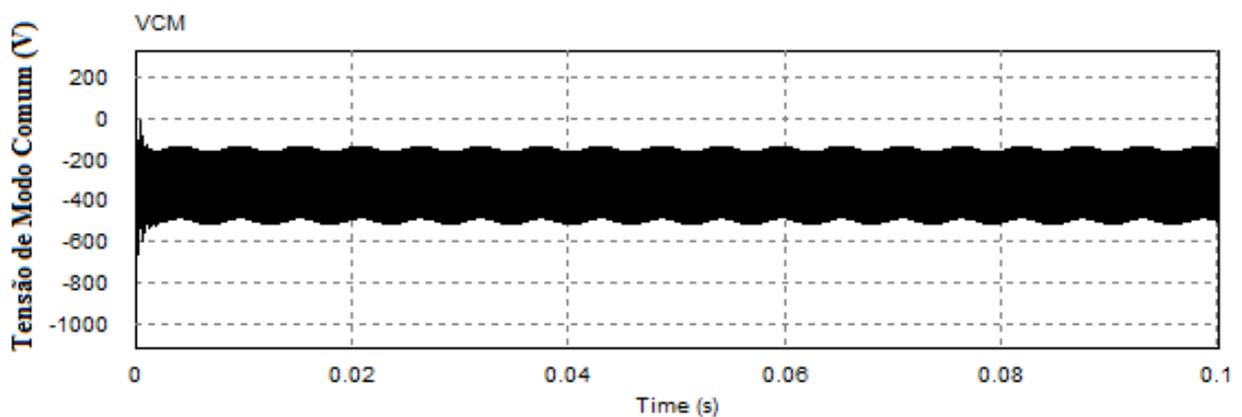
FONTE: Do Autor

A amplitude da tensão de modo comum é medida através de um voltímetro inserido no terminal inferior da fonte C.C.(simulando o arranjo fotovoltaico). A amplitude da corrente de dispersão i_{PV} é medida através da corrente que circula pela resistência de aterramento R_G . Para este circuito são aplicadas as modulações PWM Seno-Triângulo, SVPWM, RSPWM1 e RSPWM2.

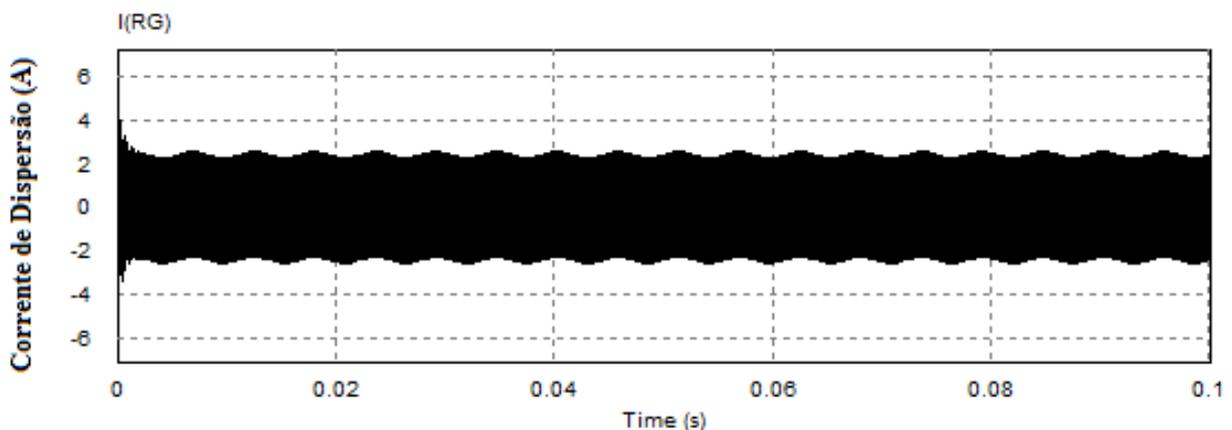
6.1.1 Modulação PWM Seno-Triângulo

Nas Figuras 25(a) e 25(b) são mostradas a tensão de modo comum e a corrente de dispersão obtidas através da simulação do conversor trifásico em ponte completa aplicando-se modulação PWM Seno-Triângulo.

Figura 25-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para conversor trifásico em ponte completa com modulação PWM Seno-Triângulo



(a)



(b)

FONTE: Do Autor

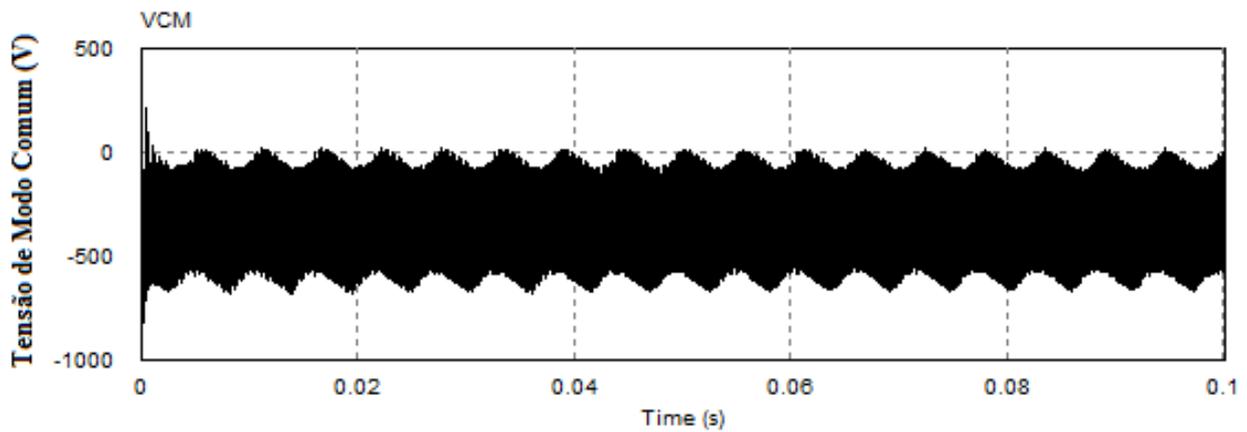
Utilizando-se a topologia ponte completa e modulação PWM Seno-Triângulo tem-se que a tensão de modo comum não é constante o que faz com que a corrente de dispersão não seja nula.

Esta corrente alcança amplitudes que fogem da faixa de amplitude de corrente de dispersão aceita pela norma VDE-0126-1-1.

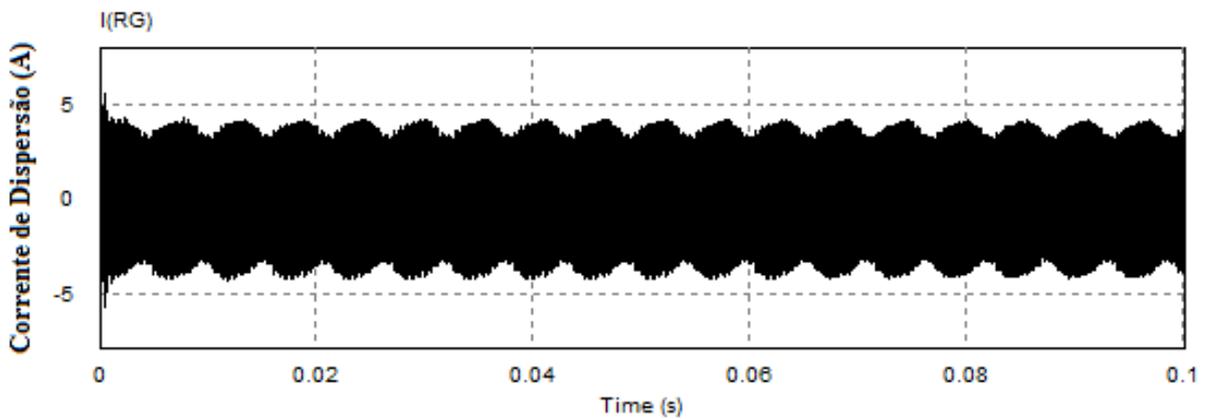
6.1.2 Modulação Vetorial (SVPWM)

Nas Figuras 26(a) e 26(b) são mostradas a tensão de modo comum e a corrente de dispersão obtida através da simulação do conversor trifásico em ponte completa aplicando-se modulação vetorial SVPWM.

Figura 26-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para conversor trifásico em ponte completa com modulação SVPWM



(a)



(b)

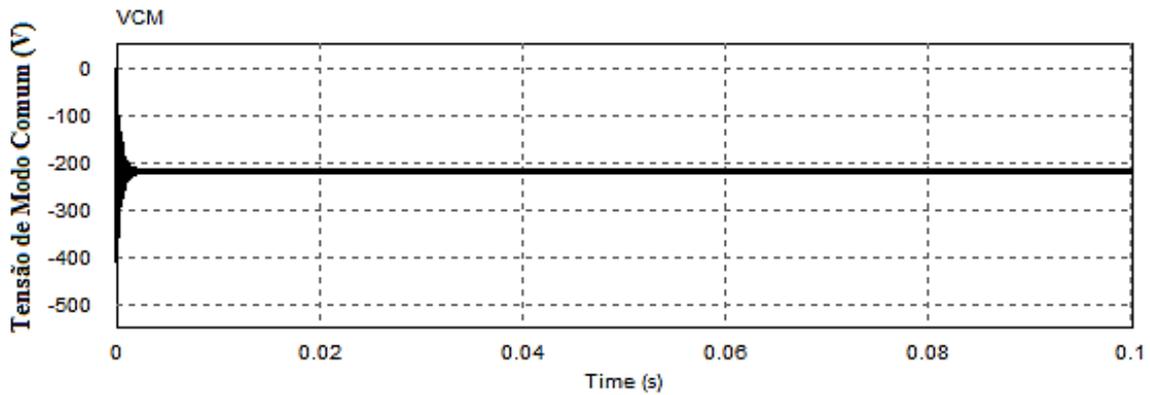
FONTE: Do Autor

Utilizando-se a topologia ponte completa e modulação SVPWM tem-se que a tensão de modo comum não é constante o que faz com que a corrente de dispersão não seja nula, alcançando uma amplitude de corrente que não atende à norma VDE-0126-1-1.

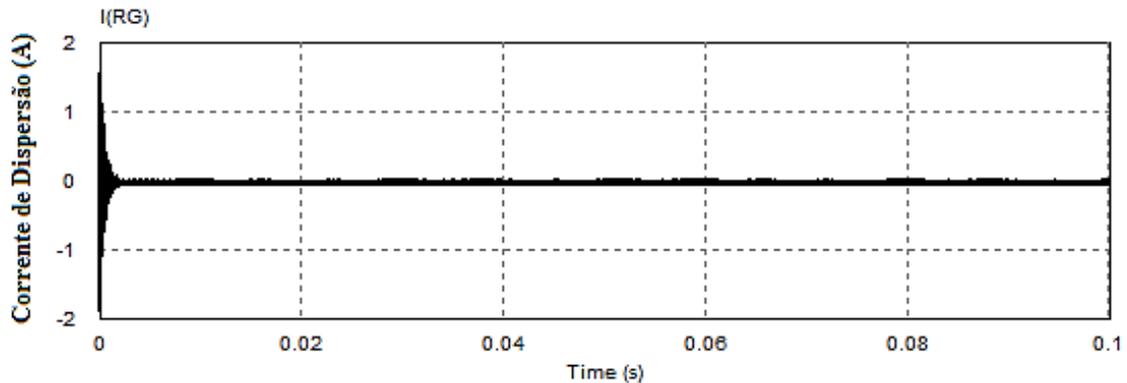
6.1.2.1 Modulação RSPWM1

Nas Figuras 27(a) e 27(b) são mostradas a tensão de modo comum e a corrente de dispersão obtida pela simulação do conversor trifásico em ponte completa aplicando-se modulação vetorial por estado remoto (RSPWM1).

Figura 27-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para conversor em ponte completa com modulação RSPWM1



(a)



(b)

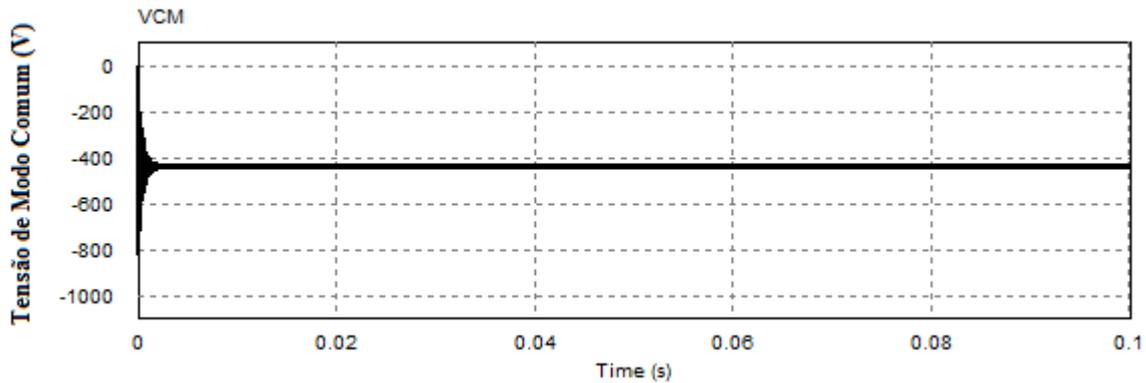
FONTE: Do Autor

Utilizando-se a topologia ponte completa e modulação RSPWM1, tem-se que a tensão de modo comum é constante $\left(\frac{-V_{PN}}{3}\right)$, fazendo com que, a corrente de dispersão seja nula e atendendo assim, à norma VDE-0126-1-1.

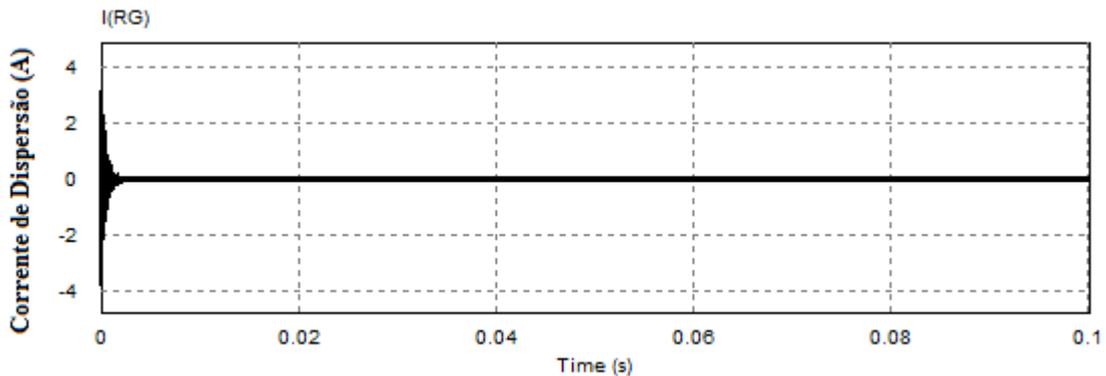
6.1.2.2 Modulação RSPWM2

Nas Figuras 28(a) e 28(b) são mostradas a tensão de modo comum e a corrente de dispersão obtida pela simulação do conversor trifásico em ponte completa aplicando-se modulação vetorial por estado remoto (RSPWM2).

Figura 28-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para conversor em ponte completa com modulação RSPWM2



(a)



(b)

FONTE: Do Autor

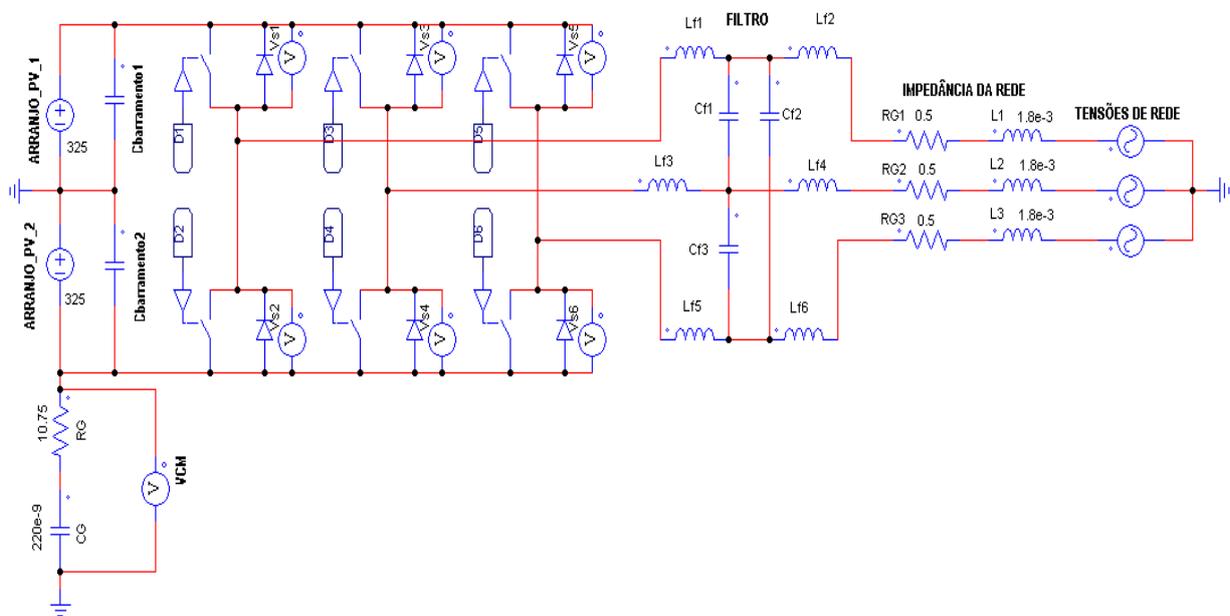
Utilizando-se a topologia ponte completa e modulação RSPWM1, tem-se que a tensão de modo comum é constante $\left(\frac{-2V_{PN}}{3}\right)$, fazendo com que, a corrente de dispersão seja nula e atendendo assim, à norma VDE-0126-1-1.

6.2 Conversor Trifásico em Ponte Completa com Capacitor Dividido

Para a topologia do conversor trifásico em ponte completa com capacitor dividido, são simulados dois circuitos. No primeiro circuito, é admitido o caso ideal, no qual o ponto central do barramento C.C. é aterrado usando um fio de resistência e indutância ideal. No segundo circuito, é admitido um caso real onde o fio utilizado para conexão do ponto central do barramento C.C. possui uma pequena indutância, para efeito de simulação, o valor da tal indutância é de $L_G = 10\mu\text{H}$.

Para as simulações referentes à topologia do conversor trifásico em ponte completa com capacitor dividido utilizando conexão ideal é utilizado o esquemático mostrado pela Figura 29, elaborado através do *software PSIM*[®]. Para efeito de simulação, o valor da capacitância do barramento C.C. foi dividida por dois de forma que cada capacitor do barramento C.C. tem sua capacitância igual a 0,5mF.

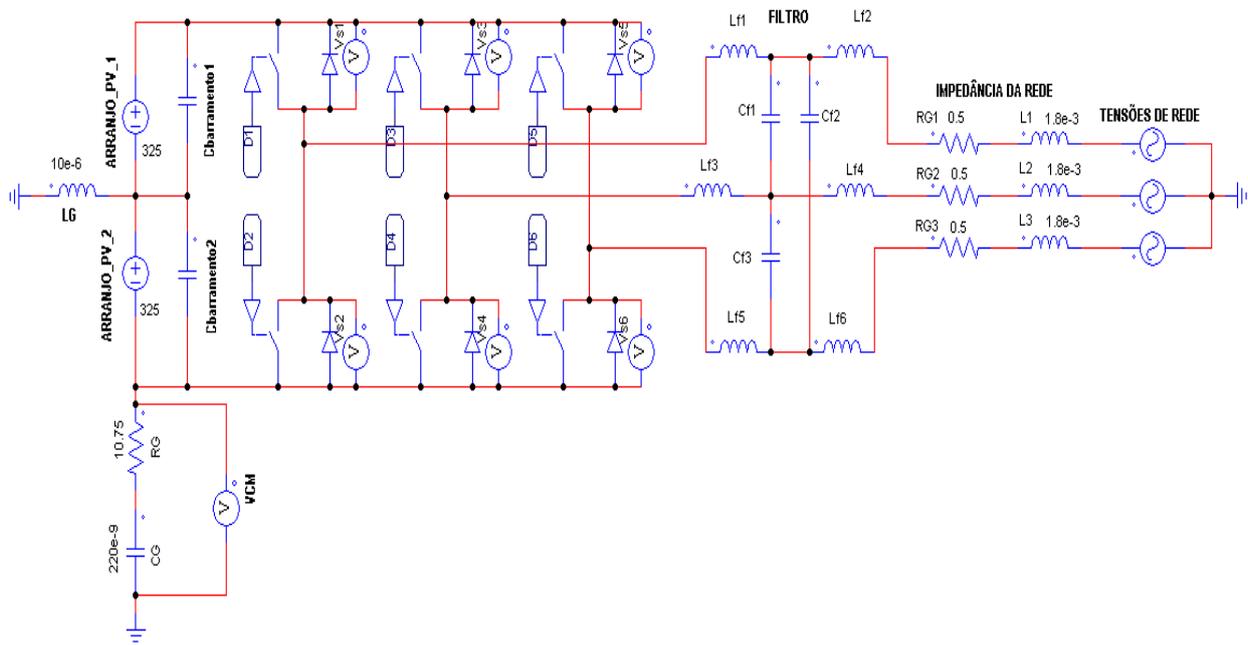
Figura 29- Esquemático para inversor trifásico em ponte completa com capacitor dividido e conexão ideal



FONTE: Do Autor

Para as simulações da topologia do conversor trifásico em ponte completa com capacitor dividido utilizando conexão real foi utilizado o esquemático mostrado pela Figura 30 e elaborado através do *software PSIM*[®].

Figura 30- Esquemático para inversor trifásico em ponte completa com capacitor dividido e conexão real



FONTE: Do Autor

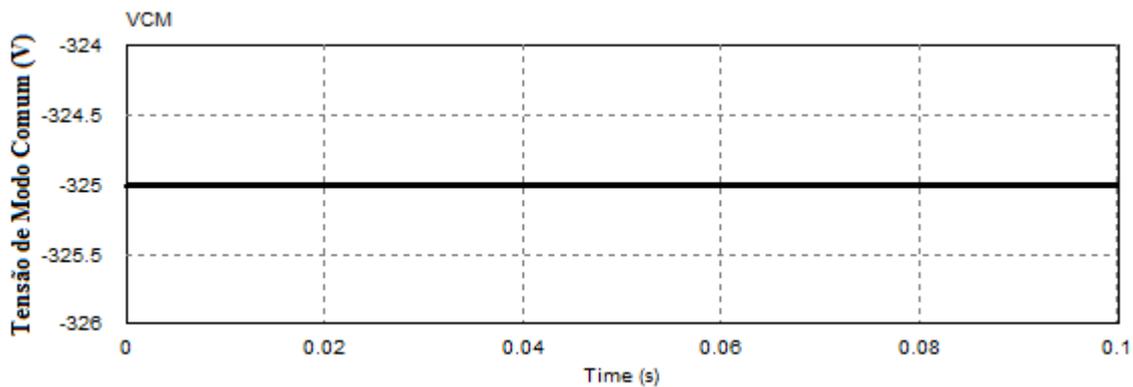
Para as duas topologias de circuito, a amplitude tensão de modo comum é medida através de um voltímetro inserido no terminal inferior da fonte C.C. o qual simula o arranjo fotovoltaico. A amplitude da corrente de dispersão i_{pV} é medida através da corrente que circula pela resistência de aterramento R_C .

Para ambos os circuitos são aplicadas as modulações PWM Seno-Triângulo, SVPWM, RSPWM1 e RSPWM2.

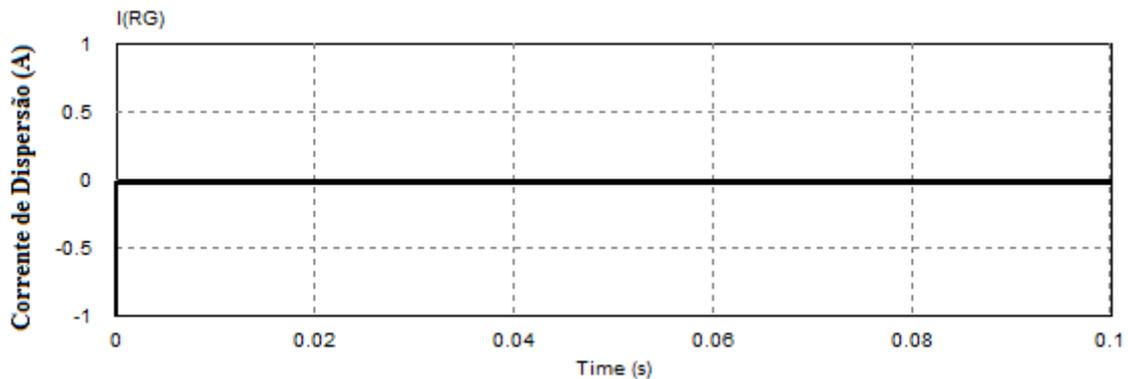
6.2.1 Modulação PWM Seno-Triângulo

Nas Figuras 31(a) e 31(b) são mostradas a tensão de modo comum e a corrente de dispersão obtida pela simulação do conversor trifásico em ponte completa com capacitor dividido, para um uma conexão ideal do ponto central do barramento C.C. ao terra e aplicando-se modulação PWM Seno-Triângulo.

Figura 31-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para topologia capacitor dividido e conexão ideal aplicando modulação PWM Seno-Triângulo



(a)



(b)

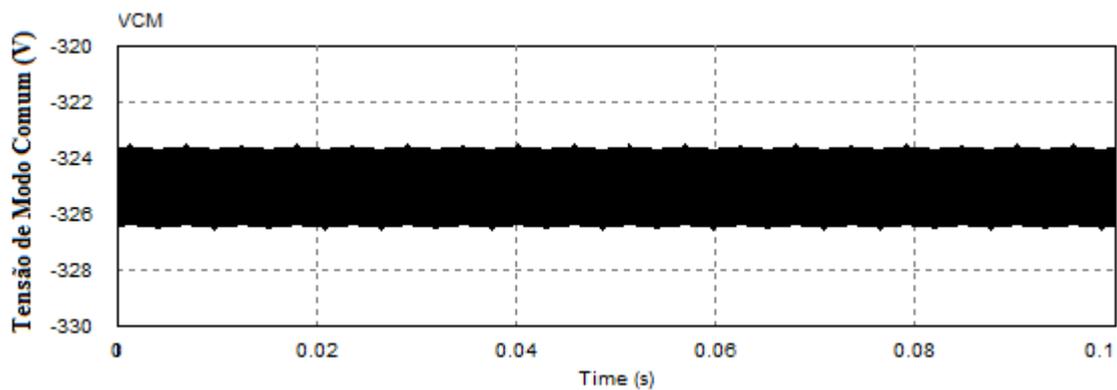
FONTE: Do Autor

Utilizando-se a topologia ponte completa com capacitor dividido, conexão ideal e modulação PWM Seno-Triângulo, tem-se que a tensão de modo comum é constante $\left(\frac{-V_{PN}}{2}\right)$, fazendo com que, a corrente de dispersão seja nula e atendendo assim, à norma VDE-0126-1-1.

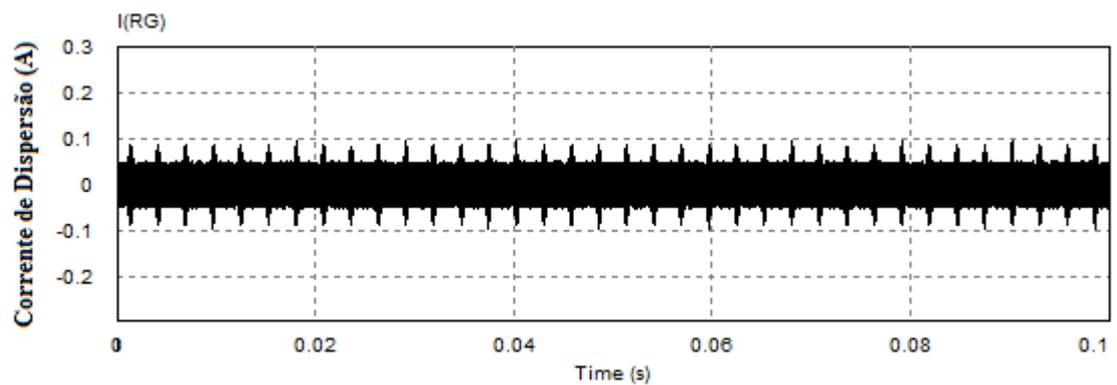
Embora a corrente de dispersão seja nula, esse caso não é aplicado à realidade visto que não existem conexões elétricas ideais.

Nas Figuras 32(a) e 32(b) são mostradas a tensão de modo comum e a corrente de dispersão obtida pela simulação do conversor trifásico em ponte completa com capacitor dividido, para uma conexão real ($L_G = 10\mu H$) do ponto central do barramento C.C. ao terra e aplicando-se modulação PWM Seno-Triângulo.

Figura 32-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para topologia capacitor dividido e conexão real aplicando modulação PWM Seno-Triângulo



(a)



(b)

FONTE: Do Autor

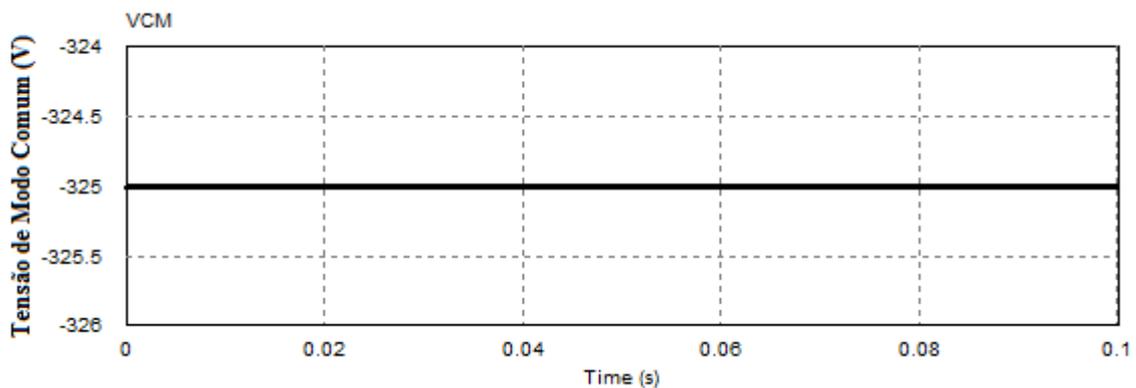
Utilizando-se a topologia ponte completa com capacitor dividido, conexão real e modulação PWM Seno-Triângulo, tem-se que a tensão de modo comum não é constante, fazendo com que, a corrente de dispersão não seja nula.

Embora não tenha se anulado, a corrente de dispersão apresenta níveis de amplitude que estão dentro da faixa de amplitude de corrente aceita pela norma VDE-0126-1-1.

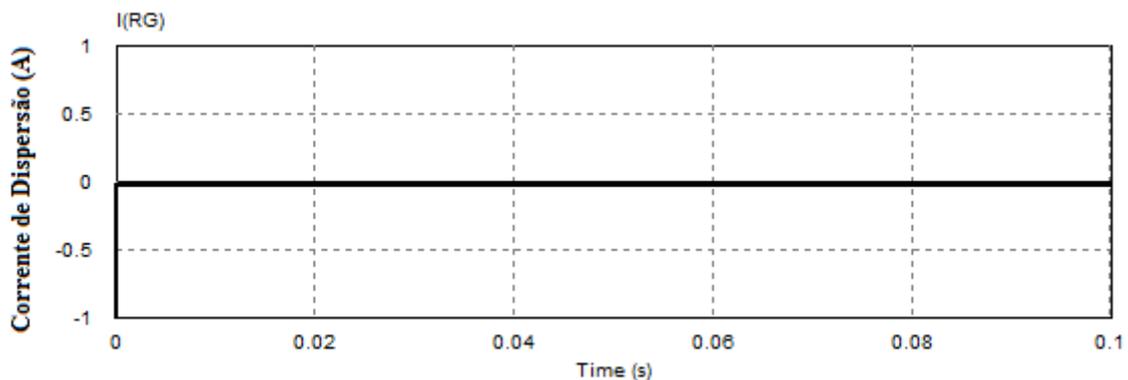
6.2.2 Modulação Vetorial (SVPWM)

Nas Figuras 33(a) 33(b) são mostradas a tensão de modo comum e a corrente de dispersão obtida pela simulação do conversor trifásico em ponte completa com capacitor dividido, para um uma conexão ideal do ponto central do barramento C.C. ao terra e aplicando-se modulação SVPWM.

Figura 33-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para topologia capacitor dividido e conexão ideal aplicando modulação SVPWM



(a)



(b)

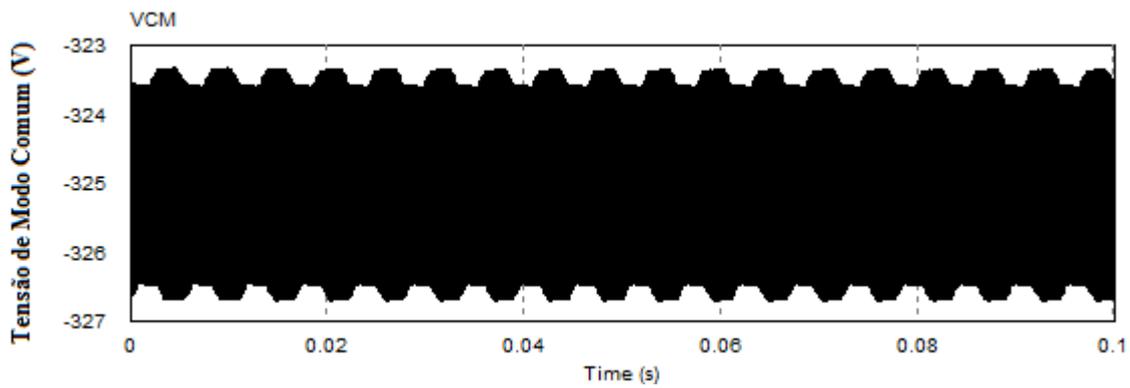
FONTE: Do Autor

Utilizando-se a topologia ponte completa com capacitor dividido, conexão ideal e modulação SVPWM, tem-se que a tensão de modo comum é constante $\left(\frac{-V_{PN}}{2}\right)$, fazendo com que, a corrente de dispersão seja nula e atendendo assim, à norma VDE-0126-1-1.

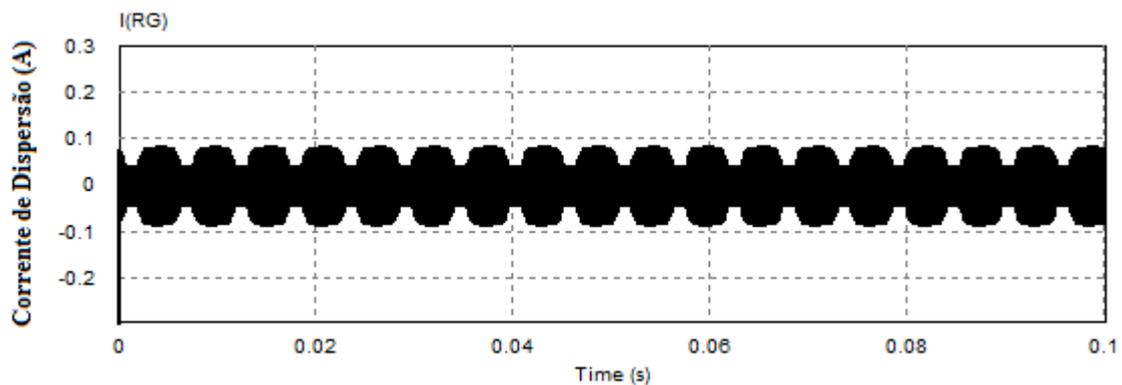
Embora a corrente de dispersão seja nula, esse caso não é aplicado à realidade visto que não existem conexões elétricas ideais.

Nas Figuras 34(a) e 34(b) são mostradas a tensão de modo comum e a corrente de dispersão obtidas através da simulação do conversor trifásico em ponte completa com capacitor dividido, para um uma conexão real ($L_G = 10\mu H$) do ponto central do barramento C.C. ao terra e aplicando-se modulação SVPWM.

Figura 34-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para topologia capacitor dividido e conexão real aplicando modulação SVPWM



(a)



(b)

FONTE: Do Autor

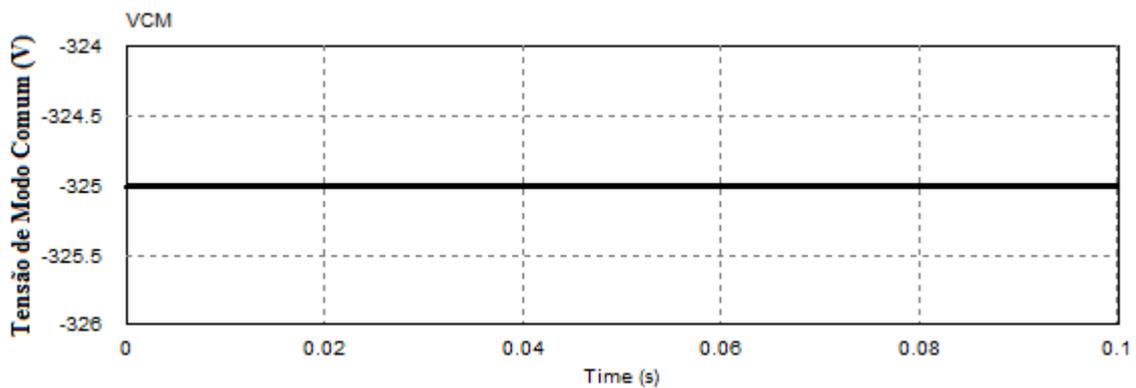
Utilizando-se a topologia ponte completa com capacitor dividido, conexão real e modulação SVPWM, tem-se que a tensão de modo comum não é constante, fazendo com que, a corrente de dispersão não seja nula.

Embora não tenha se anulado, a corrente de dispersão apresenta níveis de amplitude que estão dentro da faixa de amplitude de corrente aceita pela norma VDE-0126-1-1.

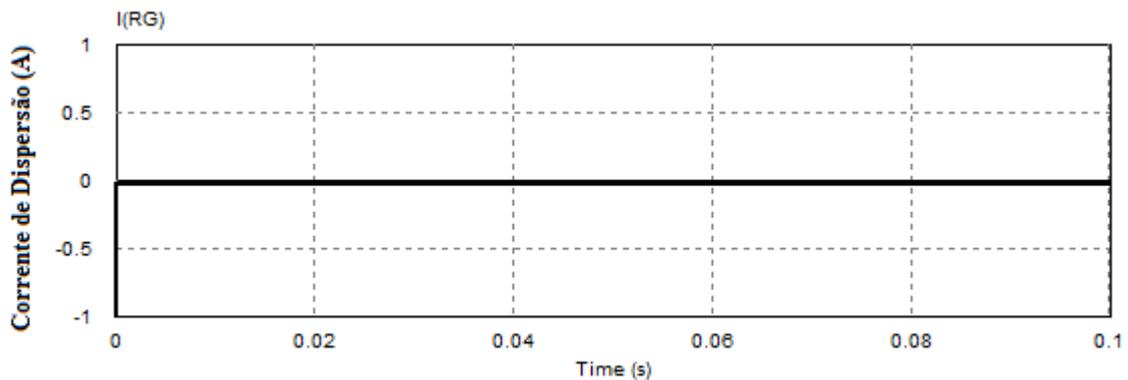
6.2.3 Modulação RSPWM1

Nas Figuras 35(a) e 35(b) são mostradas a tensão de modo comum e a corrente de dispersão obtida pela simulação do conversor trifásico em ponte completa com capacitor dividido, para um uma conexão ideal do ponto central do barramento C.C. ao terra e aplicando-se modulação RSPWM1.

Figura 35-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para topologia capacitor dividido e conexão ideal aplicando modulação RSPWM1



(a)



(b)

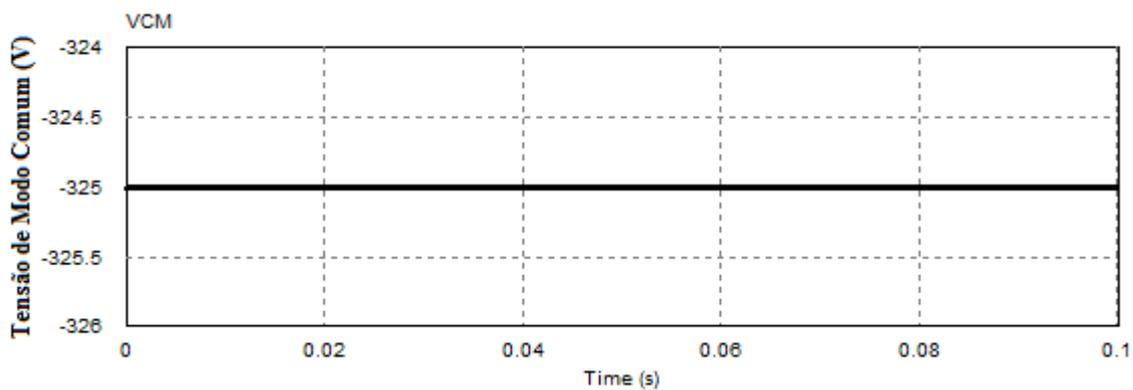
FONTE: Do Autor

Utilizando-se a topologia ponte completa com capacitor dividido, conexão ideal e modulação RSPWM1, tem-se que a tensão de modo comum é constante $\left(\frac{-V_{PN}}{2}\right)$, fazendo com que, a corrente de dispersão seja nula e atendendo assim, à norma VDE-0126-1-1.

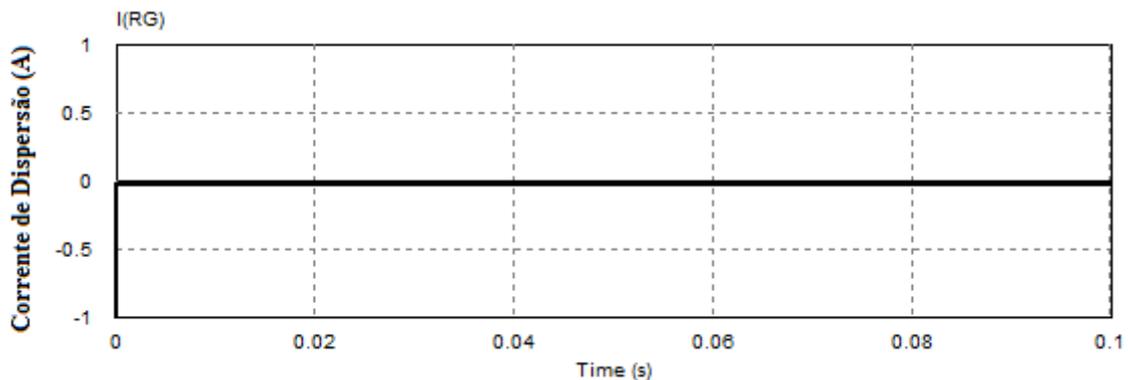
Embora a corrente de dispersão seja nula, esse caso não é aplicado à realidade visto que não existem conexões elétricas ideais.

Nas Figuras 36(a) e 36(b) são mostradas a tensão de modo comum e a corrente de dispersão obtida pela simulação do conversor trifásico em ponte completa com capacitor dividido, para um uma conexão real ($L_G = 10\mu H$) do ponto central do barramento C.C. ao terra e aplicando-se modulação RSPWM1.

Figura 36-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para topologia capacitor dividido e conexão real aplicando modulação RSPWM1



(a)



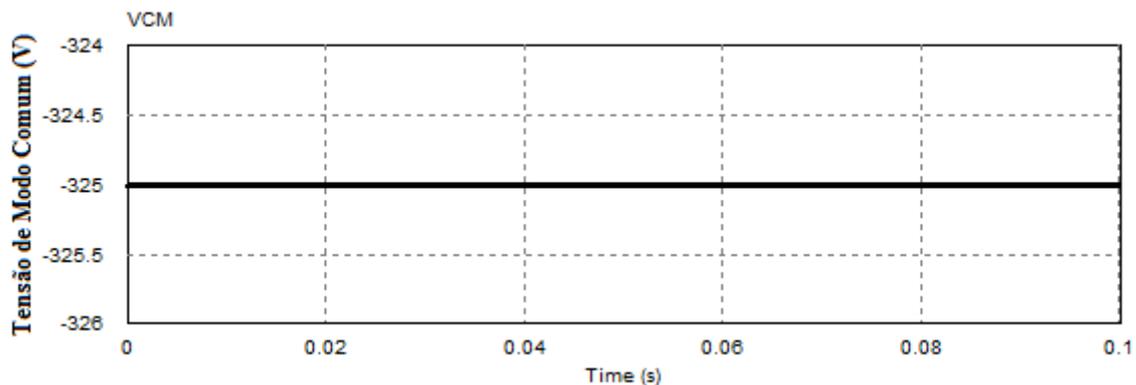
(b)

Utilizando-se a topologia ponte completa com capacitor dividido, conexão real e modulação RSPWM1, tem-se que a tensão de modo comum é constante $\left(\frac{-V_{PN}}{2}\right)$, fazendo com que, a corrente de dispersão seja nula e atendendo assim, à norma VDE-0126-1-1.

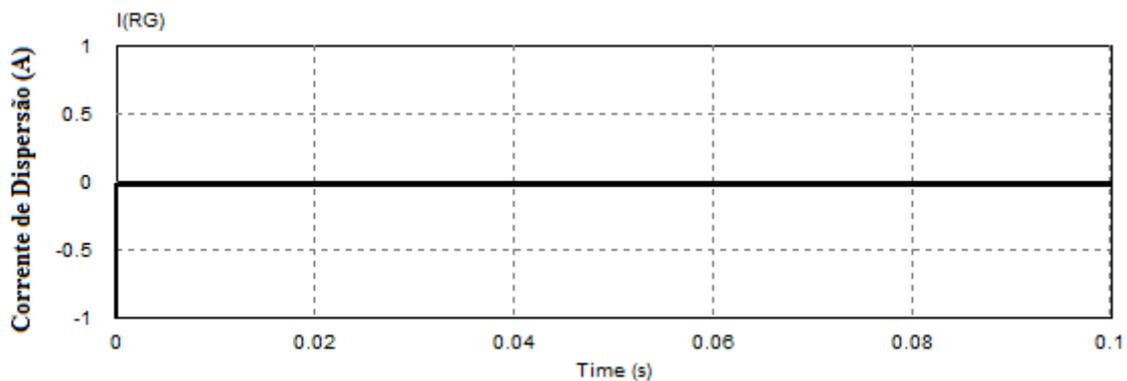
6.2.4 Modulação RSPWM2

Nas Figuras 37(a) e 37(b) são mostradas a tensão de modo comum e a corrente de dispersão obtida pela simulação do conversor trifásico em ponte completa com capacitor dividido, para um uma conexão ideal do ponto central do barramento C.C. ao terra e aplicando-se modulação RSPWM2.

Figura 37-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para topologia capacitor dividido e conexão ideal aplicando modulação RSPWM2



(a)



(b)

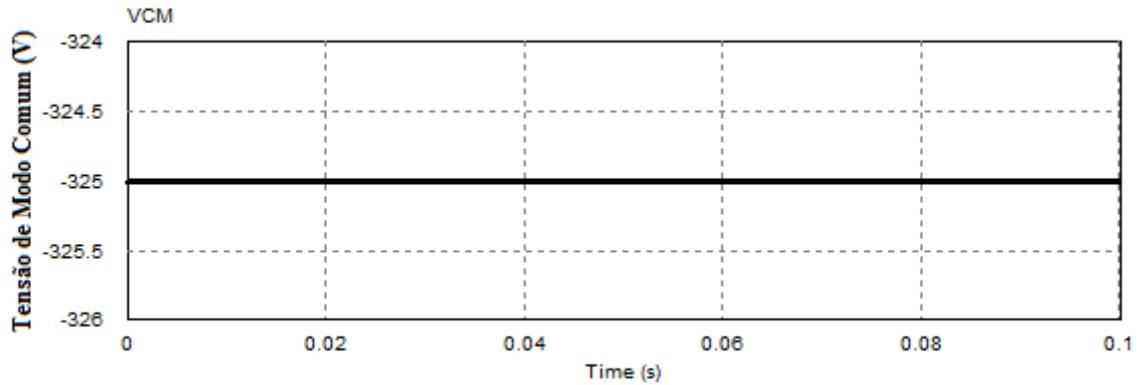
FONTE: Do Autor

Utilizando-se a topologia ponte completa com capacitor dividido, conexão ideal e modulação RSPWM2, tem-se que a tensão de modo comum é constante $\left(\frac{-V_{PN}}{2}\right)$, fazendo com que, a corrente de dispersão seja nula e atendendo assim, à norma VDE-0126-1-1.

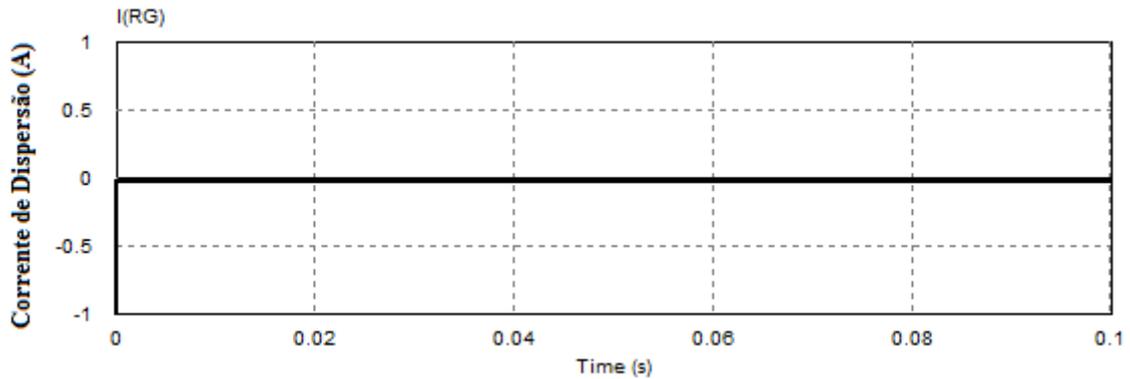
Embora a corrente de dispersão seja nula, esse caso não é aplicado à realidade visto que não existem conexões elétricas ideais.

Nas Figuras 38(a) e 38(b) são mostradas a tensão de modo comum e a corrente de dispersão obtida pela simulação do conversor trifásico em ponte completa com capacitor dividido, para um uma conexão real ($L_G = 10\mu H$) do ponto central do barramento C.C. ao terra e aplicando-se modulação RSPWM2.

Figura 38-(a)Tensão de Modo Comum e (b)Corrente de Dispersão para topologia capacitor dividido e conexão ideal aplicando modulação RSPWM2



(a)



(b)

FONTE: Do Autor

Utilizando-se a topologia ponte completa com capacitor dividido, conexão real e modulação RSPWM2, tem-se que a tensão de modo comum é constante $\left(\frac{-V_{PN}}{2}\right)$, fazendo com que, a corrente de dispersão seja nula e atendendo assim, à norma VDE-0126-1-1.

7 CONCLUSÕES

Com o avanço da tecnologia e da globalização, o consumo de energia elétrica é cada vez mais vital para uma sociedade. Com uma crescente demanda energética onde as fontes convencionais, sobretudo os combustíveis fósseis estão cada vez mais limitados, a geração por meio de fontes renováveis tem ganhado destaque.

As energias renováveis, sobretudo a energia solar fotovoltaica têm contribuído cada vez mais na matriz energética mundial. A constante queda nos preços dos sistemas fotovoltaicos, juntamente com o baixo custo de manutenção, tem feito da energia solar fotovoltaica a forma de energia mais promissora para o futuro.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede têm se destacado pela facilidade de instalação e devido aos incentivos por parte dos governos, são cada vez mais comuns em todo mundo. Com o aumento do número de sistemas instalados, se faz necessário uma padronização e normatização destes, visando à qualidade da energia elétrica e segurança dos consumidores.

Se os sistemas PV conectados à rede elétrica foram do tipo sem transformador, problemas como corrente de dispersão no sistema podem surgir devido ao não uso do transformador como fonte de isolamento galvânica entre os painéis e a rede elétrica. Estas correntes podem causar distorções harmônicas na rede elétrica, além de oferecer risco de choque elétrico em uma eventual manutenção. Visando a segurança dos usuários de sistemas PV, a norma alemã VDE-0126-1-1 normatiza a amplitude máxima desta corrente.

As topologias dos conversores trifásicos juntamente com a estratégia de modulação escolhida têm um papel fundamental na atenuação ou diminuição das correntes de dispersão, adequando os sistemas PV às normas e assim assegurando a qualidade e bom funcionamento do sistema.

Desta forma, o trabalho apresentou quatro estratégias de modulação que foram aplicadas a três topologias de conversores trifásicos, visando à análise e adequação com a norma existente no que se refere à corrente de dispersão e tensão de modo comum de cada configuração.

As modulações PWM Seno-Triângulo e SVPWM se mostraram eficientes quando aplicadas à topologia de conversor em ponte completa com capacitor dividido, anulando a corrente de dispersão para o caso da conexão ideal do barramento C.C. ao ponto de terra. Para o caso de uma conexão real do barramento C.C. ao ponto de terra, as modulações conseguiram atenuar esta corrente, adequando-a a norma regulamentadora.

As modulações RSPWM1 e RSPWM2 se mostraram eficientes quando aplicadas a todas as topologias de conversores trifásicos apresentadas neste trabalho. A peculiaridade de manter a tensão de modo comum constante, fez com que a corrente de dispersão se anule o que garante a adequação do sistema à norma VDE-0126-1-1, que exige que a amplitude da corrente de dispersão seja menor que 300mA.

7.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

A partir deste trabalho, ficam como propostas para futuros trabalhos as seguintes ideias:

- Analisar a influência de diferentes materiais utilizados na construção de módulos fotovoltaicos na capacitância parasita e assim na corrente de dispersão dos sistemas PV;
- Propor diferentes topologias trifásicas para conversores fotovoltaicos e modulações aplicadas à estes, bem como analisar a suas influências na corrente de dispersão e tensão de modo comum dos sistemas;
- Analisar a Taxa de Distorção Harmônica (TDH) e interferência eletromagnética da corrente de dispersão nas topologias e modulações apresentadas neste trabalho.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics 2017**, disponível em: < <https://www.iea.org/statistics/electricity> > Acessado em 05 fev. 2019.
- [2] ANEEL, BIG. **Banco de Informações de geração**. ANEEL, disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>Acessado em 25 fev. 2019
- [3] VERMA, D.; MIDTGARD, O.M.; SATRE, T. O. **Review of photovoltaic status in a European (EU) perspective**. In: 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). p. 3292-3297, 2011.
- [4] BRITO, M. A. G., et al. **Research on photovoltaics: review, trends and perspectives**. In: Brazilian Power Electronics Conference (COBEP). p. 531-537, 2011.
- [5] BECQUEREL, E., **Memoires sur les effets electriques produits sous l'influence des rayons**, Comptes Rendues 9 (1839) 561.
- [6] W.G. Adams, R.E. Day, **The action of light on selenium**, in **Proceedings of the Royal Society**, A25, 113.
- [7] SHOCKLEY, W., **The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors**, **Bell System Tech. Journal** 28 (1949) 435.
- [8] CHAPIN D.M., FULLER C.S., PEARSON G.L., **A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power**, **Journal of Applied Physics** 25 (1954) 676.
- [9] MARTINS,D.C., **Analysis of a three-phase grid-connected PV power system using a modified dual-stage inverter**. **ISRN Renewable Energy**, v. 2013, 2013.
- [10] CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO RITO. **Energia solar: princípios e aplicações**. Rio de Janeiro, 2008.
- [11] YUAN, Xiaoming; ZHANG, Yingqi. **Status and opportunities of photovoltaic inverters in grid-tied and micro-grid systems**. **CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference**. IEEE, 2006. p. 1-4.
- [12] OLIVEIRA, K. C. **Avaliação da conversão da energia fotovoltaica em sistemas isolados**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, 2007.
- [13] COELHO,R.F.; CONCKER,F.M.; MARTINS, DENIZAR C. **Analytical and experimental analysis of DC-DC converters in photovoltaic maximum power point tracking applications**. In: **IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society**. IEEE, 2010. p. 2778-2783.

- [14] FARIAS, A.M. **Técnicas de modulação para inversores fotovoltaicos sem transformador conectados à rede elétrica.** Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, 2011.
- [15] ROLLIER, S., RICHARD, B., KELLER, M. **Earth leakage control in solar inverters.** Power System Design Europe, 2005.
- [16] KERKES, T., TEODORESCU, R., LISERRE, M. **Common Mode Voltage in case of Transformerless PV Inverters Connected to the Grid.** IEEE International symposium on industrial electronics, 2008.
- [17] GAVILÁN, E. J. M. **Estudo da influencia de diferentes modulações na tensão de modo comum e eficiência de inversor monofásico aplicado ao processamento de energia solar fotovoltaica.** Trabalho de conclusão de curso – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2013.
- [18] SCHLUMBERGER, A. **Market survey on inverters 2007.** Photon International, 2007.
- [19] KERKES, T. **Analysis and modeling of transformerless photovoltaic inverter systems.** Thesis (PhD) – Faculty of Engineering, Science and Medicine, Aalborg University, 2009.
- [20] LOPEZ, O. et al. **Eliminating ground current in a transformerless photovoltaic application.** In: 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. IEEE, 2007. p. 1-5.
- [21] GENZLER, J. **Estudo comparativo de topologias de inversores para a conexão de painéis fotovoltaicos com a rede elétrica sem o uso de transformador.** Trabalho de conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Pampa-2015.
- [22] SMA TECHNOLOGIE. **Capacitive Leakage Currents.** Technical information on the design of transformerless inverters of type Sunny Boy, Sunny Mini Central, Sunny Tripower.
- [23] CALAIS, M., AGELIDIS, V. G., **Multilevel converters for single-phase grid connected photovoltaic systems: an overview.** IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1998.
- [24] SCHMIDT, H.; BURGER, B.; SIEDLE, Chr. **“Gefährdungspotential transformatorloser Wechselrichter-Fakten und Gerüchte.”** In: 18. Symposium Photovoltaische Solarenergie. 2003. p. 89-98.
- [25] MARANGONI, F. **Inversores monofásicos para conexão de sistemas fotovoltaicos à rede.** Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2012.

- [26] OLIVEIRA, K.C. **Conversores de Potência para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica sem Transformador**. Tese de Doutorado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, 2012.
- [27] DIN VDE-0126-1-1, **Automatic disconnection between a generator and the public low-voltage grid**, 2006.
- [28] CAVALCANTI, M. C. et al. **Modulation techniques to eliminate leakage currents in transformerless three-phase photovoltaic systems**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 57, n. 4, p. 1360-1368, 2010.
- [29] SUAN, F.T.K; RAHIM, N.A; PING, H.W., **Three-phase transformerless grid-connected photovoltaic inverter to reduce leakage currents**. IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT). IEEE, 2013. p. 277-280.
- [30] KERKES, T. **Evaluation of three-phase transformerless photovoltaic inverter topologies**. European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2007. p. 1-10.
- [31] PEREIRA, P.C.T. **Projeto e análise de sistemas fotovoltaicos com enfoque na compatibilidade eletromagnética**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2016.