



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



JEFFERSON RAFAEL PEREIRA DE ASSIS

**OPERAÇÃO DE UM INVERSOR DE TENSÃO DE NOVE CHAVES PARA
ATUAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO E COMPENSADOR SÉRIE
INTEGRADOS**

JOÃO PESSOA

2018

JEFFERSON RAFAEL PEREIRA DE ASSIS

**OPERAÇÃO DE UM INVERSOR DE TENSÃO DE NOVE CHAVES PARA
ATUAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO E COMPENSADOR SÉRIE
INTEGRADOS**

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 a obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Darlan Alexandria Fernandes

Área de Conhecimento: Qualidade de Energia

JOÃO PESSOA

2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A848o Assis, Jefferson Rafael Pereira de.

Operação de um Inversor de Tensão de Nove Chaves para Atuação de Sistema Fotovoltaico e Compensador Série Integrados / Jefferson Rafael Pereira de Assis. - João Pessoa, 2018.

75 f. : il.

Orientação: Darlan Alexandria Fernandes.
Monografia (Graduação) - UFPB/CEAR.

1. Qualidade de Energia. 2. Geração Distribuída. 3. Planta Fotovoltaica. 4. Inversor de Nove Chaves. 5. Restaurador Dinâmico de Tensão. I. Fernandes, Darlan Alexandria. II. Título.

UFPB/BC

JEFFERSON RAFAEL PEREIRA DE ASSIS

**OPERAÇÃO DE UM INVERSOR DE TENSÃO DE NOVE CHAVES PARA
ATUAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO E COMPENSADOR SÉRIE
INTEGRADOS**

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 a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Data de Aprovação: 13 / 06 / 18

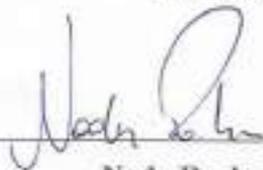
Banca Examinadora:



Darlan Alexandria Fernandes, Dr.
Universidade Federal da Paraíba
Orientador



Rogério Gaspar de Almeida, Dr.
Universidade Federal da Paraíba
Avaliador



Nady Rocha, Dr.
Universidade Federal da Paraíba
Avaliador

João Pessoa, 2018

Dedico este trabalho a minha mãe Socorro e ao meu pai Renato, pelo apoio, amor e esforços imensuráveis, que me deram forças para enfrentar esta jornada

“Se pude enxergar mais longe, é porque
me apoiei nos ombros de gigantes.”

ISAAC NEWTON

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me dar forças diante de todas as intempéries da vida.

Aos meus pais, por sempre serem fonte de calma meio ao caos.

A Kaminska, minha namorada, por estar sempre ao meu lado.

Aos meus amigos Eduardo e Milton, que com sua amizade e companheirismo tornaram esta jornada mais leve, e sobretudo, por sempre ouvir deles: “vai dar certo!”.

Ao professor Darlan, pela paciência, disponibilidade e expertise compartilhada durante a excelente orientação deste trabalho.

Agradeço ainda, aos professores Nady e Rogério, por aceitarem o convite para fazer parte da banca examinadora e por contribuírem de forma significativa para a melhoria deste trabalho através de suas sugestões.

RESUMO

Este trabalho apresenta o funcionamento de um inversor trifásico de tensão de nove chaves (NSI – *Nine Switch Inverter*) por meio de sua estratégia de modulação. Neste trabalho, o NSI integra a função de planta fotovoltaica (PV – *photovoltaic*) conectada à rede com um Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR – *Dynamic Voltage Restorer*). A utilização de um inversor de tensão trifásico de nove chaves, é capaz de unir a função de planta fotovoltaica e DVR em um único sistema, reduzindo o número necessário de chaves de doze para nove, o que permite desonerar o custo do sistema. Além disso, vantagens operacionais frente a um sistema com planta fotovoltaica e DVR isolados entre si serão explicitadas ao longo do texto. Os modos de operação e o esquema de modulação serão analisados teoricamente e por meio de simulação, utilizando o *software* PSIM.

Palavras-chave: Qualidade de Energia, Geração Distribuída, Planta Fotovoltaica, Inversor de Nove Chaves, Restaurador Dinâmico de Tensão.

ABSTRACT

This work presents the operation of a three-phase voltage Nine Switch Inverter (NSI) through its modulation strategy. In this work, the NSI integrates the photovoltaic (PV) plant function connected to the grid with a Dynamic Voltage Restorer (DVR). The use of a three-phase voltage nine switch inverter is capable of joining the photovoltaic plant and DVR function in a single system, reducing the required number of switches from 12 to 9, which allows the cost of the system to be reduced. In addition, operational advantages over a system with photovoltaic plant and DVR isolated from each other will be explained throughout the text. The modes of operation and the modulation scheme will be analyzed theoretically and analyzed by simulation using the PSIM software.

Keywords: Power Quality, Distributed Generation, Photovoltaic Plant, Nine Switch Inverter, Dynamic Voltage Restorer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de variações de tensão de curta duração	3
Figura 2 – Configuração básica de um DVR.....	4
Figura 3 – Sistema fotovoltaico conectado à rede	5
Figura 4 – Topologia do NSI.....	9
Figura 5 – Sistemas PV e DVR isolados entre si	10
Figura 6 – Sistema PV-DVR integrados via NSI	11
Figura 7 – Situação do NSI durante o Modo 1	12
Figura 8 – Situação do NSI durante o Modo 2	13
Figura 9 – Situação do NSI durante o Modo 3	13
Figura 10 – Cenário necessário para implementação da modulação.....	14
Figura 11 – Referências com frequências distintas	15
Figura 12 – Exemplo de sinais de <i>offset</i>	16
Figura 13 – Exemplo de sinais de referência modificados	16
Figura 14 – Esquema de modulação em diagrama de blocos.....	20
Figura 15 – Sistema PV-DVR integrados	23
Figura 16 – Esquema de obtenção das referências modificadas - PV	23
Figura 17 – Esquema de obtenção das referências modificadas - DVR.....	24
Figura 18 – Parâmetros ajustáveis do bloco <i>sine</i> do PSIM	24
Figura 19 – Parâmetros ajustáveis do bloco <i>triangular</i> do PSIM	25
Figura 20 – Esquema de obtenção dos sinais de gatilho do braço (a) 1 (b) 2 (c) 3.....	26
Figura 21 – Esquemático completo da estratégia de modulação.....	27
Figura 22 – Bloco modulação.....	28
Figura 23 – NSI implementado no PSIM	28
Figura 24 – Filtro LC implementado no PSIM	30
Figura 25 – Filtro L implementado no PSIM	30
Figura 26 – Transformadores utilizados na plataforma de simulação.....	31
Figura 27 – Parâmetros dos transformadores utilizados.....	31
Figura 28 – Modelo da rede no PSIM	32
Figura 29 – Modelo da carga no PSIM	32
Figura 30 – Fonte de tensão c.c. adotada.....	32

Figura 31 – Plataforma de simulação completa.....	33
Figura 32 – Trecho abordado pelo código desenvolvido em MATLAB.....	36
Figura 33 – Referências modificadas durante o modo 1 - MATLAB.....	36
Figura 34 – G7, G8 e G9 durante o modo 1 - MATLAB.....	37
Figura 35 – Tensões de saída do DVR durante o modo 1 - MATLAB.....	37
Figura 36 – Tensões de saída do PV durante o modo 1 - MATLAB.....	38
Figura 37 – Retorno do teste de curto-circuito do barramento c.c.....	38
Figura 38 – Referências modificadas durante o modo 2 - MATLAB.....	39
Figura 39 – G1, G2 e G3 durante o modo 2 - MATLAB.....	40
Figura 40 – Tensões de saída do PV durante o modo 2 - MATLAB.....	40
Figura 41 – Tensões de saída do DVR durante o modo 2 - MATLAB.....	41
Figura 42 – Referências modificadas durante o modo 3 - MATLAB.....	42
Figura 43 – Tensões de saída do PV durante o modo 3 - MATLAB.....	42
Figura 44 – Tensões de saída do DVR durante o modo 3 - MATLAB.....	43
Figura 45 – Tensões no PCC durante o Modo 1.....	44
Figura 46 – Tensões injetadas pelo DVR-VSI durante o Modo 1.....	44
Figura 47 – Tensões na carga durante o Modo 1.....	45
Figura 48 – Tensão de saída do DVR-VSI.....	45
Figura 49 – Correntes da rede durante o Modo 1.....	46
Figura 50 – Correntes injetadas pelo PV-VSI durante o Modo 1.....	46
Figura 51 – Correntes na carga durante o Modo 1.....	47
Figura 52 – Método utilizado para fazer V_{PCC} aproximadamente igual a zero.....	47
Figura 53 – Tensões no PCC durante o Modo 2.....	48
Figura 54 – Tensões injetadas pelo DVR durante o Modo 2.....	48
Figura 55 – Tensões na carga durante o Modo 2.....	49
Figura 56 – Correntes na rede durante o Modo 2.....	49
Figura 57 – Correntes injetadas pelo PV-VSI durante o Modo 2.....	50
Figura 58 – Correntes na carga durante o Modo 2.....	50
Figura 59 – Tensões no PCC durante o Modo 3.....	51
Figura 60 – Tensões injetadas pelo DVR-VSI durante o Modo 3.....	52
Figura 61 – Tensões na carga durante o Modo 3.....	52
Figura 62 – Correntes da rede durante o Modo 3.....	53
Figura 63 – Correntes injetadas pelo PV-VSI durante o Modo 3.....	53
Figura 64 – Correntes na carga durante o Modo 3.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das VTCDs segundo o PRODIST	3
Tabela 2 – Estados de chaveamento possíveis para um braço do NSI	9
Tabela 3 – Estados de chaveamento admissíveis de um braço do NSI	9
Tabela 4 – Condições de operação de cada Modo.....	13
Tabela 5 – Composição dos sinais de gatilho.....	19
Tabela 6 – Valores de m_{PV} e m_{DVR} em cada modo de operação	20
Tabela 7 – Parâmetros das referências senoidais no PSIM	24
Tabela 8 – Parâmetros de simulação do sistema PV-DVR	34
Tabela 9 – Condições para a simulação de cada modo de operação	35
Tabela 10 – Resumo dos resultados obtidos para cada modo	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
c.a.	-	Corrente Alternada
c.c.	-	Corrente Contínua
CF	-	<i>Common Frequency</i>
CP	-	<i>Custom Power</i>
DVR	-	<i>Dynamic Voltage Restorer</i>
EPE	-	Empresa de Pesquisa Energética
FACTS	-	<i>Flexible Alternating Current Transmission Systems</i>
IGBT	-	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
NSI	-	<i>Nine-Switch Inverter</i>
PCC	-	Ponto de Conexão Comum
PRODIST	-	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
PV	-	<i>Photovoltaic</i>
PWM	-	<i>Pulse Width Modulation</i>
QEE	-	Qualidade de Energia Elétrica
SAC	-	<i>Standard Atmospheric Condition</i>
SVM	-	<i>Space Vector Modulation</i>
THD	-	<i>Total Harmonic Distortion</i>
UPS	-	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
VF	-	<i>Variable Frequency</i>
VSI	-	<i>Voltage Source Inverter</i>
VTCD	-	Variação de Tensão de Curta Duração

Sumário

1. Introdução	1
1.1. Variações de Tensão de Curta Duração	2
1.2. Restaurador Dinâmico de Tensão	4
1.3. Planta Fotovoltaica Conectada à Rede	5
1.4. Motivação	6
1.5. Objetivos do Trabalho	6
1.6. Organização do Trabalho	7
2. Sistema PV-DVR Integrado	8
2.1. Princípios de Operação do NSI	8
2.2. Descrição do Sistema PV-DVR Integrado	9
2.2.1. Modo 1 – Normal	11
2.2.2. Modo 2 – Falta	12
2.2.3. Modo 3 – Afundamento	12
2.3. Esquema de Modulação	14
3. Plataforma de Simulação	22
4. Resultados	35
4.1. Esquema de Modulação	35
4.1.1. Modo 1 – Normal	36
4.1.2. Modo 2 – Falta	39
4.1.3. Modo 3 – Afundamento	41
4.2. Sistema Completo	43
4.2.1. Modo 1 – Normal	44
4.2.2. Modo 2 – Falta	47
4.2.3. Modo 3 – Afundamento	51
5. Conclusões	55
Referências Bibliográficas	57
Apêndice A	59

1. INTRODUÇÃO

Existe uma preocupação crescente das empresas fornecedoras de energia elétrica e dos seus consumidores com um indicador denominado Qualidade de Energia Elétrica (QEE). De maneira geral, este indicador serve para expressar a continuidade do fornecimento e o quão conforme estão as formas de onda de tensão e corrente, em relação a valores de referência preestabelecidos. Nos sistemas de potência os parâmetros de QEE são geralmente relacionados ao suprimento de tensão. Um dos principais motivos para o aumento do interesse com respeito a QEE é a grande quantidade de cargas sensíveis (ou críticas) conectadas ao sistema elétrico. Entende-se por carga sensível, aquela que quando submetida a perturbações de tensão na rede, tem sua vida útil reduzida ou vem a falha. São exemplos desse tipo de carga: processos industriais automatizados, computadores, máquinas de lavar, hospitais, entre outras. Os principais distúrbios que comprometem a QEE são: harmônicas, flutuações de tensão, desequilíbrios de tensão, variações de frequência e variações de tensão de longa e curta duração. A QEE pode afetar de forma mais contundente consumidores de maior porte, como por exemplo grandes indústrias, isso se deve ao fato de que os distúrbios oriundos da rede podem danificar equipamentos integrantes do processo fabril, trazendo perdas econômicas tão grandes quanto o porte da indústria, sabendo disso, o fator econômico é primordial quando se trata da QEE [1].

Uma das maneiras de combater os distúrbios é tornar os equipamentos conectados à rede mais robustos, ou seja, menos sensíveis as perturbações da tensão da rede. Outro caminho, é o uso de equipamentos do tipo FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*), sobretudo os do tipo CP (*Custom Power*). Esses equipamentos utilizam conceitos e técnicas da eletrônica de potência para mitigar distúrbios advindos da rede e conseqüentemente proteger as cargas sensíveis. Um dispositivo desse tipo que vem se consolidando como uma alternativa para a mitigação de distúrbios de tensão, principalmente afundamentos, é o Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR - *Dynamic Voltage Restorer*) [1].

Outra crescente preocupação não apenas de determinadas empresas ou determinados consumidores, mas sim da população mundial, é a utilização de fontes de energia renováveis para o suprimento total ou parcial da demanda por energia elétrica. O Brasil, devido a sua característica geográfica, pauta por anos sua matriz energética majoritariamente via geração hídrica. Porém, a exploração da geração hídrica vem se exaurindo, seja por embargos ambientais, ou por já ter aproveitado em plenitude a capacidade de geração de grandes rios. Portanto, a utilização de fontes renováveis para compor a matriz energética nacional não é apenas uma atitude sustentável, mas também, necessária. Entre as opções de fontes alternativas

de energia, a solar fotovoltaica vem tendo um crescimento mundial significativo da sua utilização. No Brasil, a energia solar fotovoltaica vem ganhando espaço ano após ano. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) estima que a geração via energia solar fotovoltaica no Brasil atinja até 2022 em torno de 810 MW, impulsionada pelo barateamento dos custos dos componentes dos sistemas fotovoltaicos, bem como, por incentivos fiscais por parte do governo [2]. Nesse contexto, surgiu um conceito chamado geração distribuída, que basicamente se resume a trazer a geração de energia elétrica para perto da carga a ser suprida, reduzindo assim custos de transmissão. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) por meio da Resolução 482/2012, permite que consumidores possam gerar sua própria energia elétrica através de fontes renováveis, conectados ou não, a rede de distribuição [3]. As plantas fotovoltaicas podem ser classificadas em três topologias com relação a sua conexão com a rede de distribuição, são elas: isolada, conectada à rede ou híbrida.

Nas subseções seguintes, serão feitas breves abordagens com respeito as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs), do uso do DVR como meio de mitigação de distúrbios de tensão e de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, que conduziram à proposta do estudo desenvolvida neste trabalho.

1.1.VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

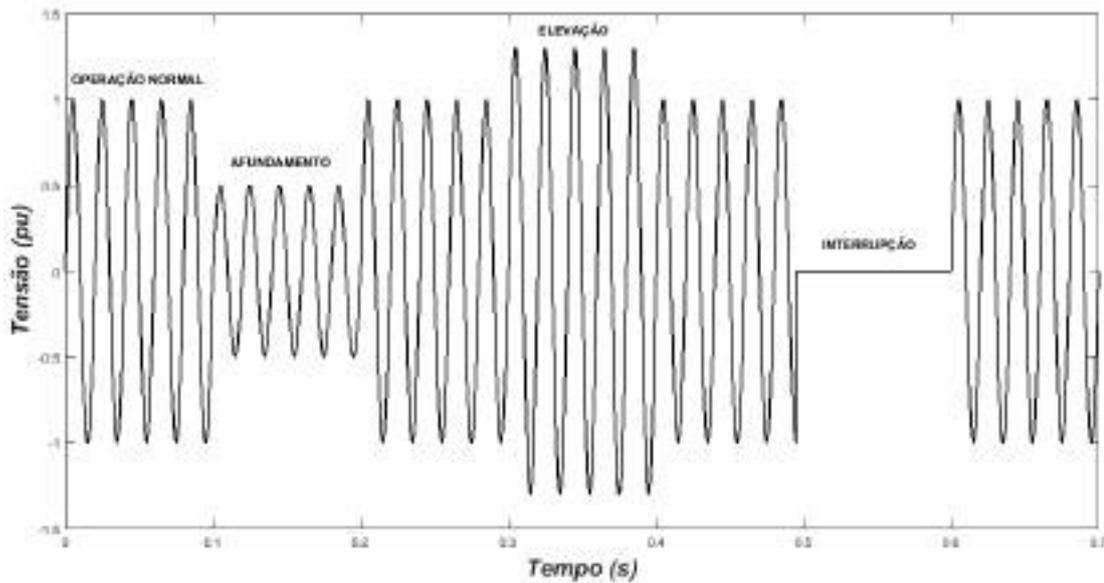
Entre os distúrbios capazes de degradar a QEE, as variações de tensão de curta duração recebem uma atenção especial. Isso se deve ao fato delas serem capazes de gerar danos significativos ao consumidor e as fornecedoras de energia elétrica.

A ANEEL através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) em seu Módulo 8, sendo sua última atualização vigente a partir de 01 de janeiro de 2018, estabelece os procedimentos relativos à QEE, definindo terminologias e indicadores, caracterizando fenômenos, estabelecendo valores e faixas de referência, métodos de medição e gerindo as reclamações referentes às perturbações na forma de onda da tensão nos sistemas de distribuição [4].

No PRODIST as VTCDs são definidas como desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos. Podendo ser classificadas como: elevações, afundamentos ou interrupções, todas com duração momentânea ou temporária [4]. Esses distúrbios são ilustrados pela Figura 1. Pode-se definir o afundamento de tensão como uma redução na magnitude da tensão seguida do restabelecimento depois de um curto período de tempo. Quando este distúrbio ocorre, equipamentos conectados à rede

podem operar de forma indesejada ou vir a falha. Já a elevação de tensão é um aumento na magnitude da tensão por um curto intervalo de tempo, sendo este tipo de distúrbio menos comum do que os afundamentos. Enquanto que as interrupções representam a perda total de tensão no sistema.

Figura 1 – Tipos de variações de tensão de curta duração.



Fonte: próprio autor.

De acordo com o PRODIST, as VTCDs podem ser classificadas de acordo com a Tabela 1, onde são apresentadas as classificações, denominações, faixas de duração e faixas de amplitude de tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência que caracterizam as VTCDs.

Tabela 1 – Classificação das VTCDs segundo o PRODIST.

Classificação	Denominação	Duração - D	Amplitude - A
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	$D \leq 3$ segundos	$A < 0,1$ p.u.
	Afundamento Momentâneo de Tensão	$1 \text{ ciclo} \leq D \leq 3$ segundos	$0,1 \text{ p.u.} \leq A < 0,9 \text{ p.u.}$
	Elevação Momentânea de Tensão	$1 \text{ ciclo} \leq D \leq 3$ segundos	$A > 1,1$ p.u.
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	$3 \text{ segundos} < D < 3 \text{ min}$	$A < 0,1$ p.u.
	Afundamento Temporário de Tensão	$3 \text{ segundos} < D < 3 \text{ min}$	$0,1 \text{ p.u.} \leq A < 0,9 \text{ p.u.}$
	Elevação Temporária de Tensão	$3 \text{ s} < D < 3 \text{ min}$	$A > 1,1$ p.u.

Fonte: [4].

1.2.RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO

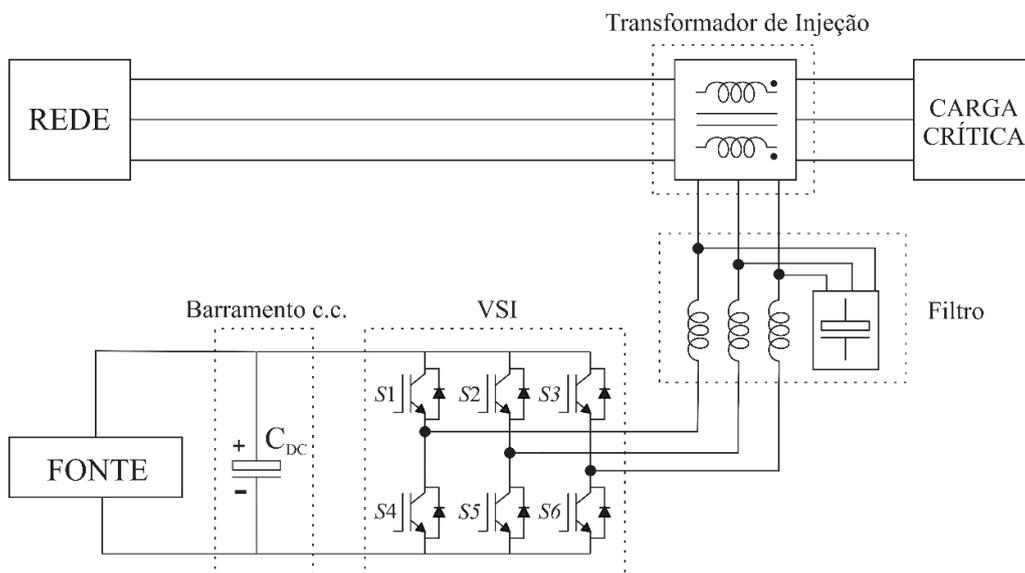
O Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR) é um equipamento eletrônico de potência que tem a finalidade de mitigar distúrbios do sistema elétrico, fazendo com que a carga crítica a qual ele esteja protegendo não experimente os efeitos de tais distúrbios. O principal componente desse equipamento é o Inversor Fonte de Tensão (*Voltage Source Inverter – VSI*), responsável por fazer a conversão de tensão contínua para alternada. Os sinais de comando para as chaves do VSI são gerados via Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation – PWM*). Esses equipamentos são conectados entre o sistema elétrico e a carga crítica [1].

O DVR é constituído basicamente por: fonte de tensão, barramento c.c., VSI, filtro e transformador de injeção [5], como ilustrado na Figura 2. O seu princípio de funcionamento é a inserção de uma tensão de compensação através do transformador de injeção, essa tensão de compensação quando somada a tensão perturbada da rede resulta na forma de onda esperada pela carga. Quando a tensão da rede é constantemente monitorada e essa informação é utilizada como realimentação têm-se um controle em malha fechada.

As quatro principais limitações de um DVR são [5]:

- 1) Limite de tensão: o DVR pode ser limitado pela sua capacidade de injeção de tensão.
- 2) Limite de corrente: uma menor solicitação de corrente reduz o custo do DVR.
- 3) Limite de potência: a potência é limitada pelo barramento c.c.
- 4) Limite de energia: alguns afundamentos podem consumir muito rápido a energia usada para manter a tensão na carga constante.

Figura 2 – Configuração básica de um DVR.



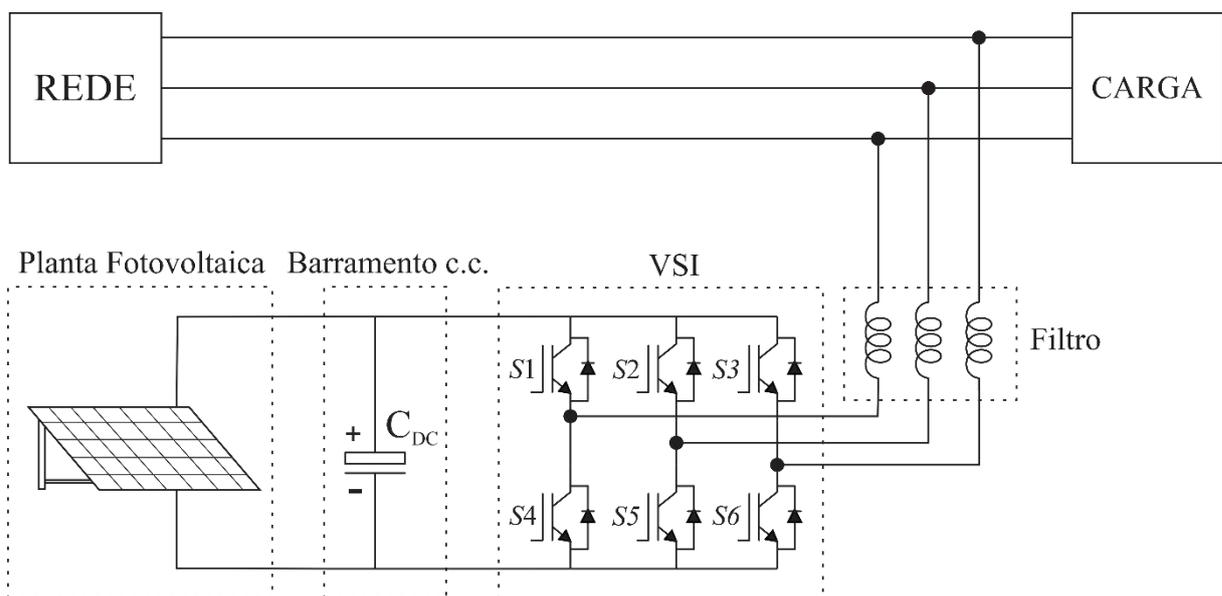
Fonte: próprio autor.

1.3. PLANTA FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE

A tensão gerada por uma planta fotovoltaica é de natureza c.c., portanto, para que a conexão com a rede seja possível é preciso realizar o processo de conversão para corrente alternada (c.a.). O dispositivo responsável por realizar a conversão c.c./c.a. é o VSI, sendo este um componente imprescindível para esta topologia [6]. Os componentes básicos de um sistema fotovoltaico conectado à rede são: planta fotovoltaica, barramento c.c., VSI e filtro. Um sistema desse tipo é mostrado na Figura 3.

Um problema importante que pode ocorrer quando se utiliza esse tipo de configuração é um fenômeno chamado de ilhamento. Ele acontece quando após uma falta e subsequente atuação dos dispositivos de proteção da rede elétrica o sistema fotovoltaico continua operando. A principal consequência disso é o risco de acidentes envolvendo funcionários das concessionárias de energia elétrica, pois estes podem ter contato direto com pontos que teoricamente deveriam estar desenergizados, mais que na verdade estão energizados graças a operação em momento inoportuno do sistema fotovoltaico conectado à rede. Em geral, para contornar este problema uma parte do sistema de controle do VSI deve ser responsável por realizar a ação de anti-ilhamento. Um problema secundário derivado do ilhamento é uma possível demanda de energia elétrica por parte da carga maior do que o sistema fotovoltaico possa fornecer, resultando em uma operação em sobrecarga. Isso pode ocorrer porque o sistema fotovoltaico não necessariamente é dimensionado para suprir a demanda nominal da carga [7].

Figura 3 – Sistema fotovoltaico conectado à rede.



Fonte: próprio autor.

1.4. MOTIVAÇÃO

Tendo em vista a notória preocupação de consumidores e concessionárias com a QEE, é cada vez mais comum a utilização de dispositivos capazes de mitigar distúrbios que possam degradar a QEE, sendo o DVR uma alternativa para a mitigação de distúrbios de tensão.

O desenvolvimento sustentável é um tema recorrente na atualidade. Nesse contexto, a utilização de plantas fotovoltaicas conectadas à rede para suprir a demanda total ou parcial de determinada carga vem se tornando um cenário cada vez mais corriqueiro.

Sabendo disso, é possível deparar-se com sistemas que utilizam um DVR para realizar compensações de tensão e ainda possuem uma planta fotovoltaica conectada à rede com a função de injeção de potência ativa. Das Figuras 2 e 3 é possível notar que o elemento comum entre um DVR e uma planta fotovoltaica conectada à rede é o VSI. Sendo o VSI constituído por seis chaves, um sistema que possui um DVR e uma planta fotovoltaica conectada à rede, faz uso de um total de doze chaves.

O fazer mais com menos, é uma característica intrínseca ao engenheiro. Logo, neste trabalho será apresentada uma solução capaz de integrar um DVR e uma planta fotovoltaica conectada à rede utilizando apenas nove chaves. Para tanto, será utilizado um inversor de tensão de nove chaves (NSI – *Nine Switch Inverter*). A redução no número de chaves utilizadas é acompanhada pela redução de custos e volume do sistema.

1.5. OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral deste trabalho é analisar e efetuar a simulação computacional de um sistema capaz de integrar as funções de planta fotovoltaica conectada à rede e DVR através do uso de um NSI.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Compreender o princípio de funcionamento do NSI.
- Descrever a operação do sistema integrado PV-DVR.
- Detalhar o funcionamento do esquema de modulação adotado para o NSI.
- Desenvolver um código em MATLAB para a verificação do funcionamento do esquema de modulação adotado para o NSI.
- Criar uma plataforma de simulação para o sistema integrado PV-DVR utilizando o *software* PSIM.

1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte maneira:

- No capítulo 2 são descritos: o princípio de funcionamento do NSI, o sistema integrado PV-DVR e o esquema de modulação adotado para o NSI.
- No capítulo 3 é detalhado o processo de construção da plataforma de simulação do sistema PV-DVR integrado em ambiente PSIM.
- No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos da verificação do funcionamento do esquema de modulação e do sistema PV-DVR integrado.
- No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e possibilidades de trabalhos futuros.

2. SISTEMA PV-DVR INTEGRADO

Neste capítulo inicialmente é feito um breve estudo dos princípios de funcionamento do inversor trifásico de tensão de nove chaves (NSI – *Nine Switch Inverter*). Em seguida é apresentada a topologia que integra o sistema fotovoltaico e DVR através do NSI, bem como, seus possíveis modos de operação. Por fim, é detalhado o esquema de modulação utilizado para a geração dos sinais de gatilho das chaves que compõem o NSI.

2.1. PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO DO NSI

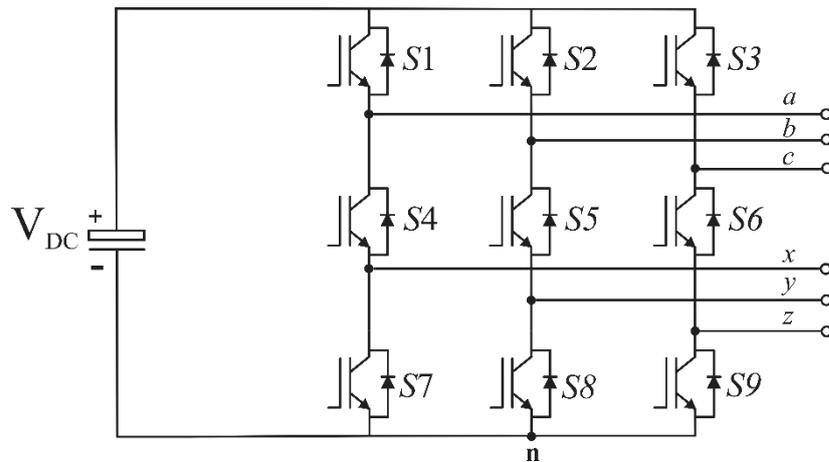
A Figura 4 apresenta a topologia do inversor nove chaves. Este inversor pode ser visto como dois VSIs que utilizam o mesmo barramento c.c. e compartilham as chaves da linha central S4, S5 e S6, possibilitando a existência de dois conjuntos de saídas, o conjunto superior [a, b, c] e o conjunto inferior [x, y, z] [8].

O inversor de nove chaves pode operar de duas maneiras: em Frequência Comum (CF – *Common Frequency*) ou em Frequência Variável (VF – *Variable Frequency*). Quando o NSI opera em CF seus dois conjuntos de saídas funcionam na mesma frequência, já no modo de operação em VF cada conjunto de saída pode assumir uma frequência de trabalho diferente [9].

O NSI enfrenta limitações ligadas aos estados de chaveamento admissíveis, tais estados podem ser determinados analisando um braço do inversor, utilizando o braço formado pelas chaves S1, S4 e S7 que serão responsáveis por originar as tensões V_{an} e V_{xn} . Dessa forma tem-se oito possibilidades para os estados destas chaves. Estas possibilidades estão mostradas na Tabela 2, onde “1” corresponde a chave fechada e “0” a chave aberta. A Tabela 2 indica que o NSI só assume dois possíveis valores para seus terminais de saída por fase, sendo estes valores iguais a zero ou V_{DC} , além disso, combinações nas quais apenas uma chave permanece fechada levam a saídas indeterminadas devido à falta de referência. A combinação na qual todas as chaves estão fechadas é totalmente proibida, tendo em vista que tal combinação leva ao curto-circuito do barramento c.c. Sendo assim, das oito possíveis combinações de chaveamentos para um braço, apenas três delas devem ser utilizadas, estas combinações compõem os estados de chaveamento admissíveis para cada braço do inversor e são apresentados na Tabela 3 [9].

Diversas aplicações podem ser implementadas utilizando o NSI, alguns exemplos são: controle de duas cargas trifásicas de maneira independente [8], condicionadores de energia [10] e fontes de alimentação ininterruptas (UPS - *Uninterruptible Power Supply*) [11].

Figura 4 – Topologia do NSI.



Fonte: próprio autor.

Tabela 2 – Estados de chaveamento possíveis para um braço do NSI.

S1	S4	S7	V_{an}	V_{xn}
0	0	0	Indeterminado	Indeterminado
0	0	1	Indeterminado	Indeterminado
0	1	0	Indeterminado	Indeterminado
0	1	1	0	0
1	0	0	Indeterminado	Indeterminado
1	0	1	V_{DC}	0
1	1	0	V_{DC}	V_{DC}
1	1	1	Proibida	Proibida

Fonte: próprio autor.

Tabela 3 – Estados de chaveamento admissíveis de um braço do NSI.

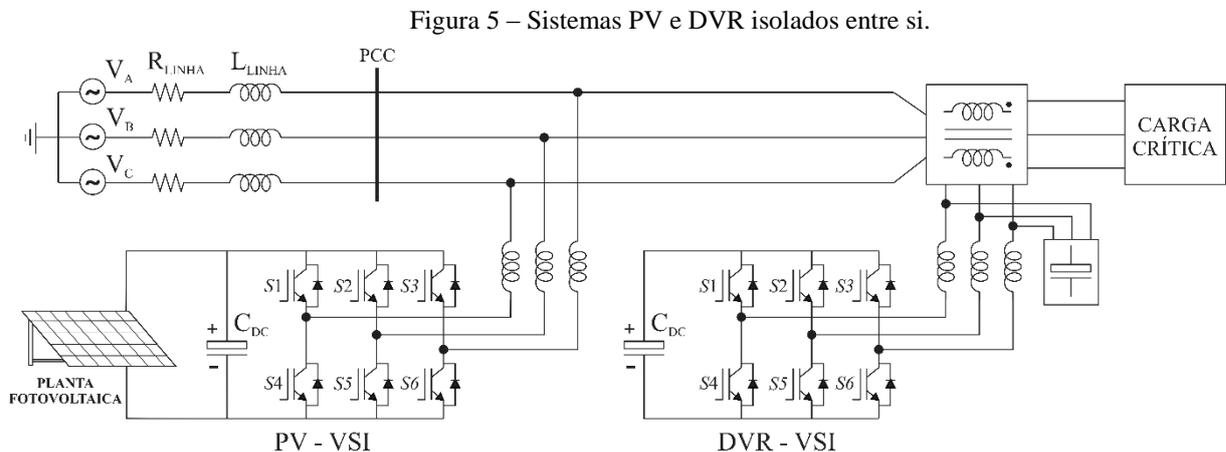
S1	S4	S7	V_{an}	V_{xn}
0	1	1	0	0
1	0	1	V_{DC}	0
1	1	0	V_{DC}	V_{DC}

Fonte: próprio autor.

2.2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA PV-DVR INTEGRADO

O elemento comum ao sistema DVR e a uma planta fotovoltaica conectada à rede é o inversor fonte de tensão, que tem a função de fazer a conversão c.c./c.a. No sistema trifásico a configuração mais comum para o inversor fonte de tensão é a que possui três braços com duas

chaves por braço. Logo, um sistema que possui uma planta fotovoltaica conectada à rede injetando potência ativa e um DVR fazendo as devidas compensações de tensão, fará uso de dois inversores de tensão trifásicos, totalizando o emprego de doze chaves. Essa configuração é mostrada na Figura 5.

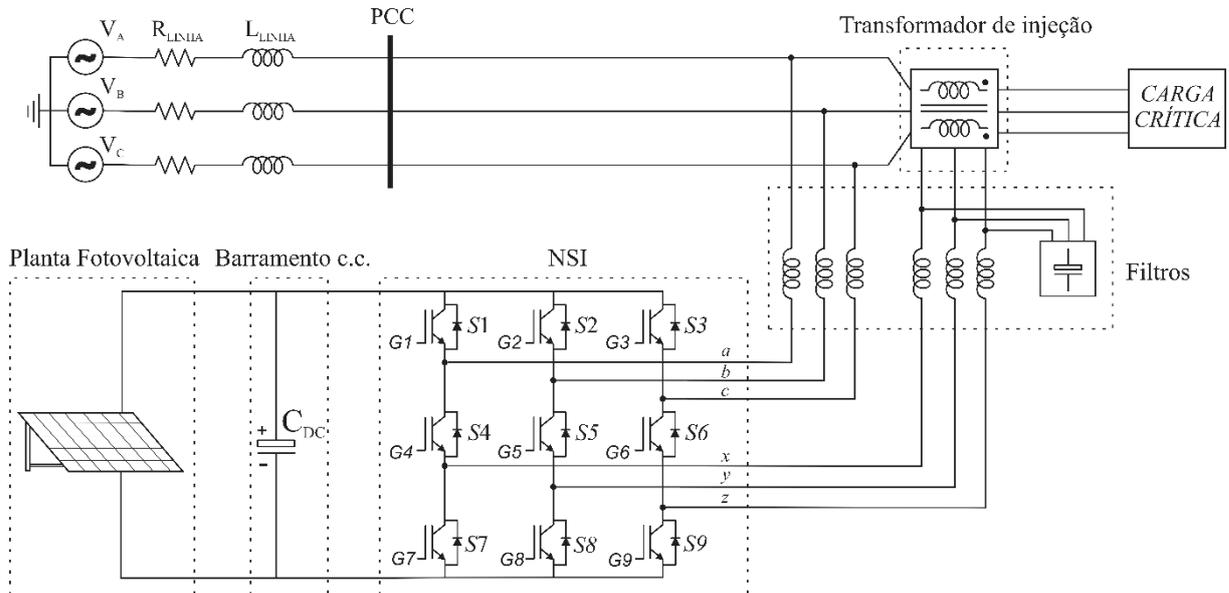


A configuração clássica mostrada na Figura 5 possui dois sistemas independentes, um para a planta fotovoltaica e outro para o DVR. Uma limitação dessa configuração é que caso ocorra uma falta no PCC (Ponto de Conexão Comum) o DVR não conseguirá manter a tensão nominal nos terminais da carga. Para que isso fosse possível, a energia do barramento c.c. deveria ser infinita. Além disso, a planta fotovoltaica não poderia mais fornecer potência ativa para a rede [12].

Utilizando o inversor de nove chaves é possível integrar a função de planta fotovoltaica e DVR em um único sistema, trazendo o benefício da economia de três chaves. A Figura 6 mostra a configuração do sistema integrado utilizando o NSI. A configuração do sistema integrado PV-DVR mostrada na Figura 6, utiliza nove chaves que quando devidamente controladas podem comutar convenientemente o papel do sistema entre planta fotovoltaica conectada à rede e restaurador dinâmico de tensão. O primeiro conjunto de saídas [a, b, c] é referente a operação como PV-VSI e o segundo formado pelas saídas [x, y, z] referentes a operação como DVR-VSI. As chaves S1, S2 e S3 pertencem ao subsistema PV-VSI, as chaves S7, S8 e S9 pertencem ao subsistema DVR-VSI, enquanto S4, S5 e S6 são compartilhadas por ambos os subsistemas. Esta configuração pode operar em três modos distintos, são eles [13]:

- a) Modo 1 - Normal
- b) Modo 2 - Falta
- c) Modo 3 – Afundamento

Figura 6 – Sistema PV-DVR integrados via NSI.



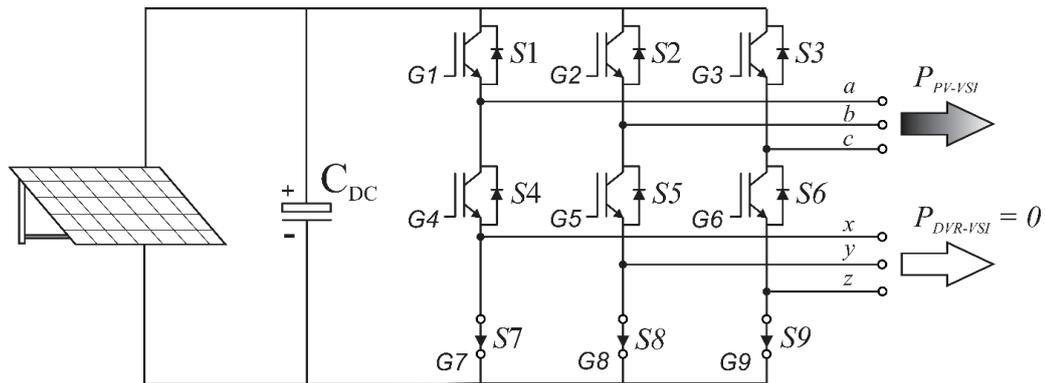
Fonte: próprio autor.

Cada modo de operação tem suas particularidades. A operação em determinado modo será definida baseando-se na condição da rede e da planta fotovoltaica. A seguir serão descritos qualitativamente o princípio de funcionamento de cada modo de operação, bem como quais são os requisitos para que o NSI opere em determinado modo.

2.2.1. Modo 1 – Normal

Para que o sistema entre neste modo de operação duas condições devem ser atendidas: a primeira é que a tensão da rede seja de valor nominal (1 p.u.), a segunda, é que a planta fotovoltaica esteja operando em condições atmosféricas padrão (SAC – *Standard Atmospheric Condition*). Note que é intuitivo concluir que neste modo de operação o DVR-VSI permanecerá inativo, pois a rede está operando com tensão nominal. Assim, o DVR-VSI não deve injetar nenhuma tensão de compensação na rede. Para fazer com que o DVR-VSI permaneça inativo basta fazer com que o conjunto de saídas [x, y, z] sejam submetidas ao mesmo potencial. Ao fazer isso, a potência ativa injetada pelo DVR-VSI será igual a zero e isso implica que as chaves S7, S8 e S9 devem permanecer fechadas durante este modo de operação. Durante o Modo 1 a planta fotovoltaica está operando em SAC, injetando potência ativa na rede, e as seis chaves restantes (S1 à S6) estão sendo controladas via modulação PWM. A Figura 7 mostra o estado do NSI durante o Modo 1 [13].

Figura 7 – Situação do NSI durante o Modo 1.



Fonte: próprio autor.

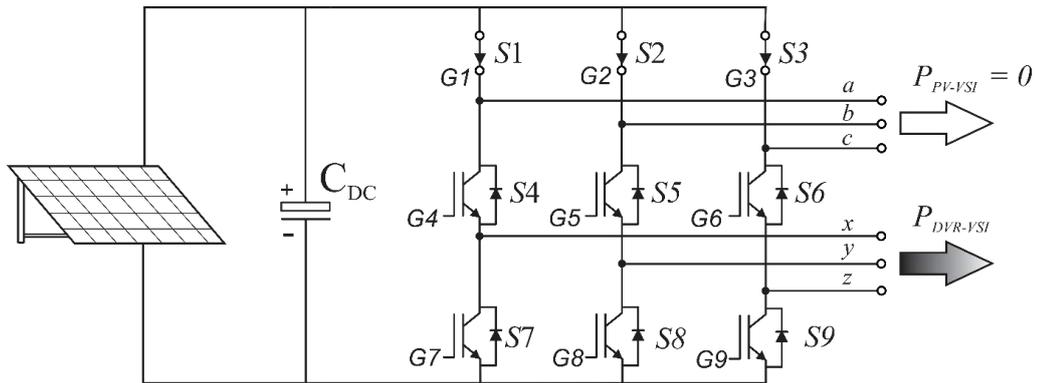
2.2.2. Modo 2 – Falta

O NSI entra nesse modo de operação quando ocorre uma falta trifásica no PCC. Da mesma forma que o Modo 1, é intuitivo concluir que agora, o subsistema PV-VSI deve permanecer inativo, ou seja, a intenção é que a potência ativa injetada por PV-VSI seja igual a zero. O procedimento para garantir isso é análogo ao utilizado no Modo 1, deve-se fazer com que o conjunto de saídas [a, b, c] pertencentes ao PV-VSI experimentem o mesmo potencial. Para isso é suficiente que as chaves S1, S2 e S3 permaneçam conduzindo durante este modo, fazendo com que a injeção de potência ativa via PV-VSI seja igual a zero. Estando a planta fotovoltaica operando em SAC, o NSI é capaz de suprir a demanda da carga crítica sem nenhum suporte da rede, utilizando para isso as chaves remanescentes S4 à S9 sob regime de comando PWM. Nessa situação o sistema passa a funcionar como um DVR suportado via PV. A configuração clássica apresentada na Figura 5 possui a limitação de não aproveitar a energia gerada pelo PV durante uma falta, como discutido no Capítulo 1. Portanto o Modo 2 de operação do sistema integrado via NSI é uma vantagem frente a configuração convencional [13]. A Figura 8 mostra o estado do NSI durante o Modo 2.

2.2.3. Modo 3 – Afundamento

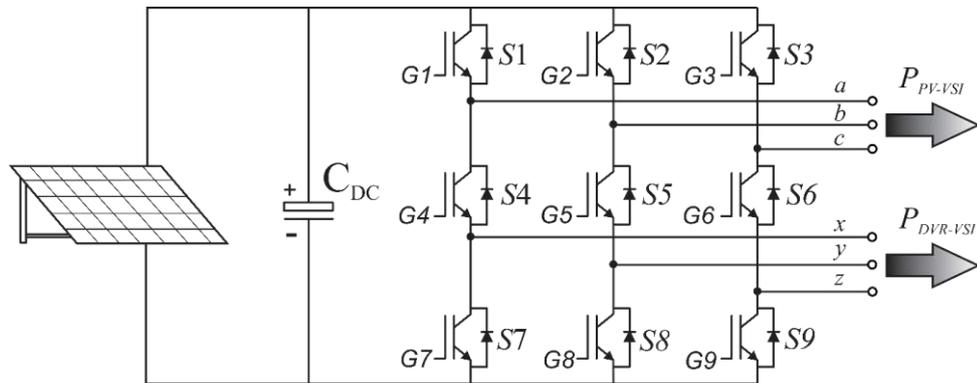
Durante um afundamento de tensão no PCC o sistema passa a operar no Modo 3. Neste modo todas as chaves estão sendo comandadas via PWM, ou seja, PV-VSI e DVR-VSI estão atuando. O DVR-VSI é responsável por fazer a compensação do afundamento e o PV-VSI injeta potência ativa na rede. O fluxo de potência ativa flui de ambas as saídas em direção a rede e a carga, como mostrado na Figura 9.

Figura 8 – Situação do NSI durante o Modo 2.



Fonte: próprio autor.

Figura 9 – Situação do NSI durante o Modo 3.



Fonte: próprio autor.

A Tabela 4 resume os possíveis modos de operação do sistema integrado PV-DVR, bem como as condições da rede que determinam em que modo o sistema deve operar.

Tabela 4 – Condições de operação de cada Modo.

Modo	Estado da rede V_{PCC} (p.u.)	Estado das chaves	
		“1” durante todo o modo	Em regime PWM
1 – Normal	$V_{PCC} = 1$	S7 – S8 – S9	S1 à S6
2 – Falta	≈ 0	S1 – S2 – S3	S4 à S9
3 – Afundamento	$0,1 \text{ p.u.} \leq V_{PCC} < 0,9 \text{ p.u.}$	nenhuma	S1 à S9

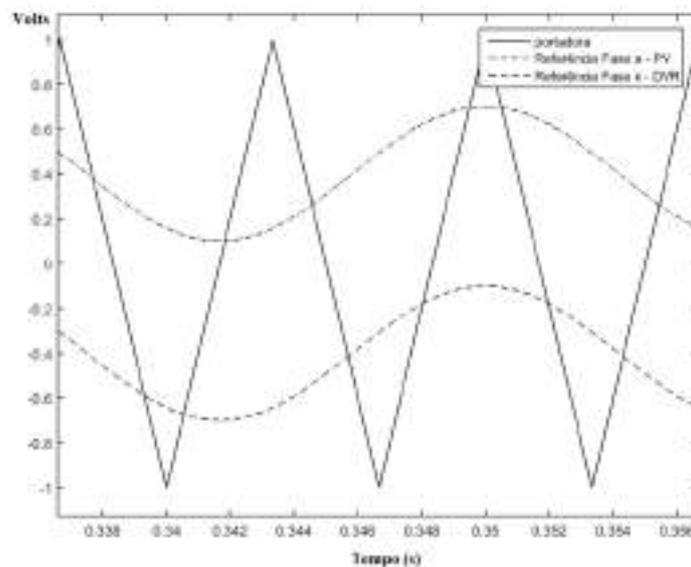
Fonte: adaptada de [13].

2.3.ESQUEMA DE MODULAÇÃO

Esta seção tem como objetivo detalhar o processo de obtenção dos sinais de gatilho para o NSI. O esquema de modulação do inversor deve essencialmente atender as combinações de chaveamento admissíveis para cada braço apresentadas na Tabela 3, além disso, deve ser capaz de atender as necessidades específicas de chaveamento de cada um dos três modos de operação possíveis do sistema, que variam de acordo com o estado da rede, como foi mostrado em resumo na Tabela 4.

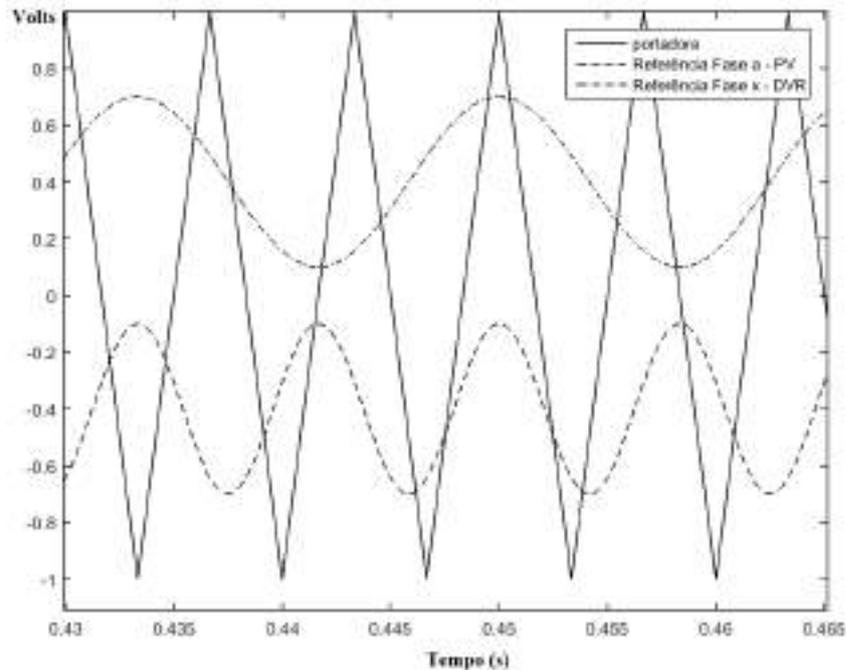
Como mostrado na Tabela 2, existe um estado de chaveamento por braço que é definitivamente proibido, isso se deve ao fato de tal estado levar o barramento c.c. a um curto-circuito. Uma maneira de realizar a modulação evitando este estado é fazer com que o sinal de referência de cada fase pertencente ao conjunto de saídas superior esteja sempre acima do sinal de referência de cada fase do conjunto de saídas inferior, utilizando uma portadora triangular comum [14], ou seja, os sinais de referência para as fases do PV-VSI devem estar sempre acima dos sinais de referência para o DVR-VSI. Este cenário é mostrado na Figura 10. Se determinada aplicação necessitar de que cada saída do NSI opere em frequências diferentes, basta fazer com que cada conjunto de referências possua frequências diferentes, respeitando sempre o princípio básico de que uma referência não deve sobrepor a outra. A Figura 11 demonstra tal cenário, nela a referência para a saída inferior possui o dobro da frequência da referência para a saída superior. Vale salientar, que tanto na Figura 10 como na Figura 11, a frequência da portadora foi convenientemente reduzida para facilitar a visualização.

Figura 10 – Cenário necessário para implementação da modulação.



Fonte: próprio autor.

Figura 11 – Referências com frequências distintas.



Fonte: próprio autor.

Em [15] é demonstrado que as técnicas de modulação descontínua reduzem o número de comutações por período de portadora em VSIs, assim, um caminho natural seria utilizar os métodos descontínuos mais populares que são os de 30° e 60° para a modulação do NSI, porém, em [14] é mostrado que estes dois métodos que são eficientes para o VSI tradicional não atendem as especificidades do NSI, pois tais esquemas podem fazer com que a referência da saída superior fique abaixo da referência da saída inferior, o que é proibido para a desejada modulação do inversor de nove chaves.

O único esquema de modulação descontínua capaz de garantir que a referência da saída superior de um braço esteja sempre acima da referência inferior desse mesmo braço é o esquema de modulação descontínua de 120° . A aplicação deste método gera os chamados sinais de referência modificados descontínuos de 120° , estes serão os sinais utilizados como sinais de referência para o esquema de modulação do NSI. Para a obtenção dos sinais modificados devem ser adicionados as referências senoidais os sinais de *offset* obtidos pelas equações (1) e (2) [14]:

$$V_{offset-PV} = 1 - \max(V_a^*, V_b^*, V_c^*) \quad (1)$$

$$V_{offset-DVR} = -1 - \min(V_x^*, V_y^*, V_z^*) \quad (2)$$

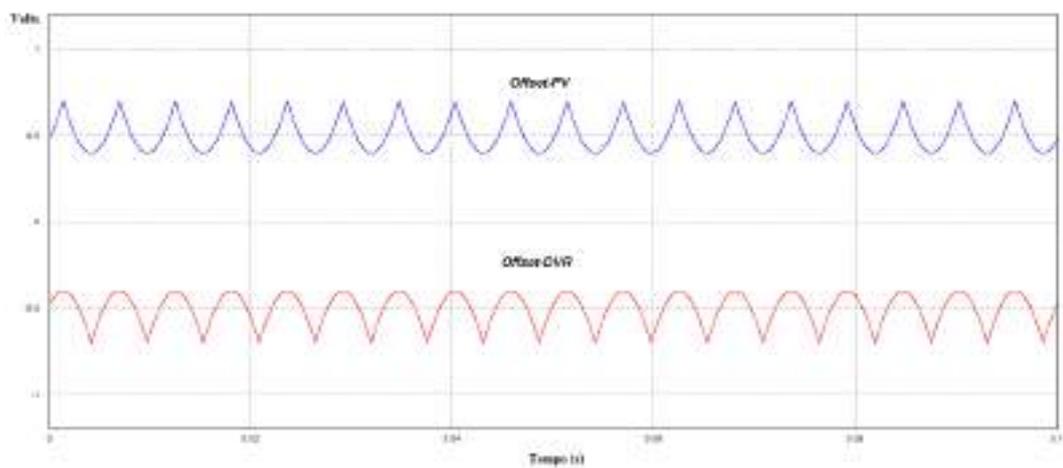
sendo:

V_a^*, V_b^*, V_c^* as referências senoidais para as fases a, b e c

V_x^*, V_y^*, V_z^* os sinais de referência senoidais para as fases x, y e z

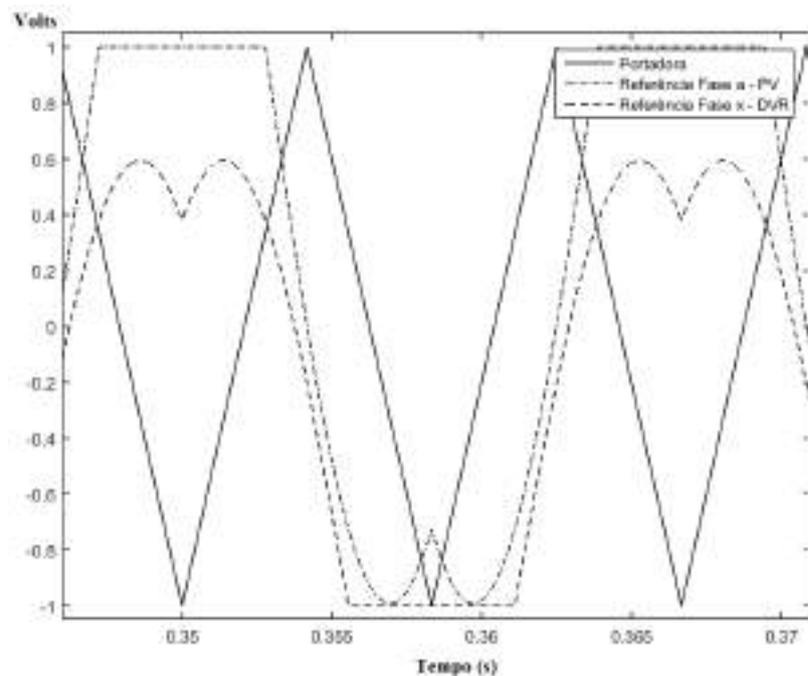
A Figura 12 mostra um possível cenário de sinais de *offset* utilizados pelo esquema de modulação, enquanto que a Figura 13 apresenta um exemplo de sinais de referência modificados pela modulação descontínua de 120°.

Figura 12 – Exemplo de sinais de *offset*.



Fonte: próprio autor.

Figura 13 – Exemplo de sinais de referência modificados.



Fonte: próprio autor.

Os sinais de gatilho do NSI serão obtidos seguindo quatro passos [13]:

1º) Definição dos sinais de referência senoidais

Sejam os sinais de referência senoidais dados por:

$$\begin{cases} V_a^* = m_{PV} \cos(2\pi f_{PV} + \theta_{PV}) \\ V_b^* = m_{PV} \cos(2\pi f_{PV} - 120^\circ + \theta_{PV}) \\ V_c^* = m_{PV} \cos(2\pi f_{PV} + 120^\circ + \theta_{PV}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} V_x^* = m_{DVR} \cos(2\pi f_{DVR} + \theta_{DVR}) \\ V_y^* = m_{DVR} \cos(2\pi f_{DVR} - 120^\circ + \theta_{DVR}) \\ V_z^* = m_{DVR} \cos(2\pi f_{DVR} + 120^\circ + \theta_{DVR}) \end{cases} \quad (4)$$

onde:

m_{PV} , f_{PV} e θ_{PV} são a amplitude normalizada, a frequência de operação e o ângulo de fase para o PV-VSI; m_{DVR} , f_{DVR} e θ_{DVR} são a amplitude normalizada, a frequência de operação e o ângulo de fase para o PV-VSI.

2º) Obtenção dos sinais de referência modificados descontínuos de 120°

Os sinais de referências modificados são o resultado da adição dos sinais de referência senoidais com os sinais de *offset* definidos nas equações (1) e (2), logo:

$$\begin{cases} M_{PV-a} = V_a^* + 1 - \max(V_a^*, V_b^*, V_c^*) \\ M_{PV-b} = V_b^* + 1 - \max(V_a^*, V_b^*, V_c^*) \\ M_{PV-c} = V_c^* + 1 - \max(V_a^*, V_b^*, V_c^*) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} M_{DVR-x} = V_x^* - 1 - \min(V_x^*, V_y^*, V_z^*) \\ M_{DVR-y} = V_y^* - 1 - \min(V_x^*, V_y^*, V_z^*) \\ M_{DVR-z} = V_z^* - 1 - \min(V_x^*, V_y^*, V_z^*) \end{cases} \quad (6)$$

onde:

M_{PV-a} , M_{PV-b} e M_{PV-c} são os sinais de referência modificados descontínuos de 120° para o PV-VSI; M_{DVR-x} , M_{DVR-y} e M_{DVR-z} são os sinais de referência modificados descontínuos de 120° para o DVR-VSI.

3º) Obtenção dos sinais de gatilho parciais

Uma vez obtidos os sinais de referência modificados, já é possível obter os sinais de gatilho parciais. Para tanto, as referências modificadas de cada braço devem ser comparadas a uma portadora triangular comum. O resultado dessa comparação gera seis sinais de gatilho parciais, da seguinte maneira:

$$G_{AUX-PV-1,2,3} = \begin{cases} 1, & \text{se } M_{PV-a,b,c} > M_C \\ 0, & \text{se } M_{PV-a,b,c} < M_C \end{cases} \quad (7)$$

$$G_{AUX-DVR-7,8,9} = \begin{cases} 1, & \text{se } M_{DVR-x,y,z} > M_C \\ 0, & \text{se } M_{DVR-x,y,z} < M_C \end{cases}$$

onde:

M_C é a amplitude da portadora triangular

$G_{AUX-PV-1,2,3}$ são os sinais de gatilho auxiliares das chaves S1, S2 e S3

$G_{AUX-DVR-7,8,9}$ são os sinais de gatilho auxiliares das chaves S7, S8 e S9

Os dois conjuntos de condições apresentados na equação 7 dão origem a seis sinais de gatilho parciais, são eles:

$$\left. \begin{array}{l} G_{AUX-PV-1} \text{ originado da comparação de } M_{PV-a} \text{ com } M_C \\ G_{AUX-PV-2} \text{ originado da comparação de } M_{PV-b} \text{ com } M_C \\ G_{AUX-PV-3} \text{ originado da comparação de } M_{PV-c} \text{ com } M_C \\ G_{AUX-DVR-7} \text{ originado da comparação de } M_{DVR-x} \text{ com } M_C \\ G_{AUX-DVR-8} \text{ originado da comparação de } M_{DVR-y} \text{ com } M_C \\ G_{AUX-DVR-9} \text{ originado da comparação de } M_{DVR-z} \text{ com } M_C \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{PV} \\ \text{DVR} \end{array}$$

4°) Obtenção dos sinais de gatilho

De posse dos sinais de gatilho parciais, obtém-se os sinais de gatilho das chaves do NSI através das seguintes relações [13]:

$$\begin{cases} G_{1,2,3} = G_{AUX-PV-1,2,3} \\ G_{4,5,6} = !G_{AUX-PV-1,2,3} + G_{AUX-DVR-7,8,9} \\ G_{7,8,9} = !G_{AUX-DVR-7,8,9} \end{cases} \quad (8)$$

onde:

$G_{1,2,3}$ são os sinais de gatilho das chaves S1, S2 e S3

$G_{4,5,6}$ são os sinais de gatilho das chaves S4, S5 e S6

$G_{7,8,9}$ são os sinais de gatilho das chaves S7, S8 e S9

“!” representa a operação lógica NOT

“+” representa a operação lógica OR

A Tabela 5 resume a composição dos sinais de gatilho em relação aos sinais de gatilho auxiliares.

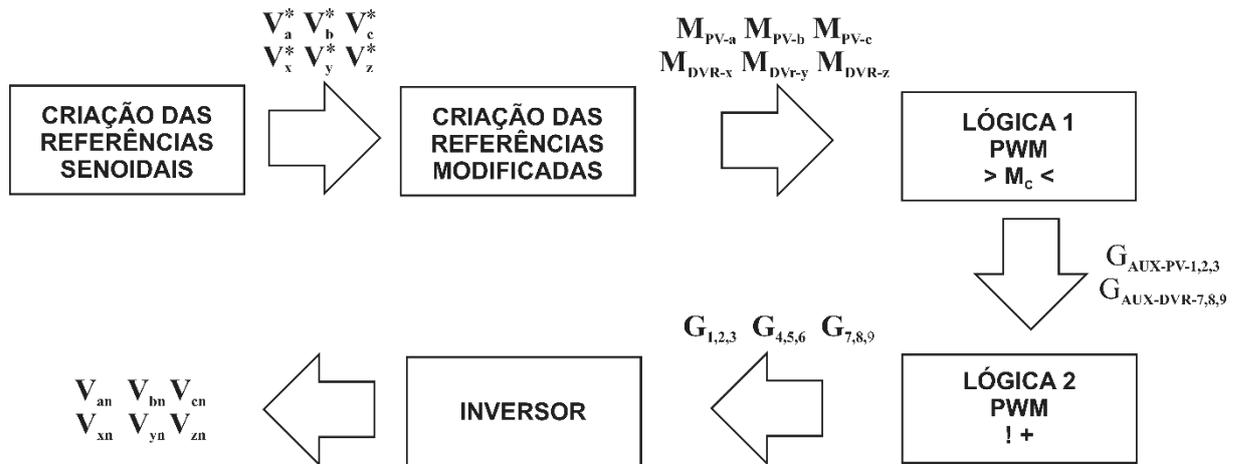
Tabela 5 – Composição dos sinais de gatilho.

Sinal de Gatilho	Composição
G1	$G_{AUX-PV-1}$
G2	$G_{AUX-PV-2}$
G3	$G_{AUX-PV-3}$
G4	$!G_{AUX-PV-1} + G_{AUX-DVR-7}$
G5	$!G_{AUX-PV-2} + G_{AUX-DVR-8}$
G6	$!G_{AUX-PV-3} + G_{AUX-DVR-9}$
G7	$!G_{AUX-DVR-7}$
G8	$!G_{AUX-DVR-8}$
G9	$!G_{AUX-DVR-9}$

Fonte: próprio autor.

A Figura 14 apresenta o processo completo do esquema de modulação. Vale salientar que ao final do processo de modulação os sinais de gatilho gerados devem atender aos estados

Figura 14 – Esquema de modulação em diagrama de blocos.



Fonte: próprio autor.

admissíveis descritos na Tabela 3. Além disso, devem ser capazes de atender os aspectos de cada modo de funcionamento do sistema descrito na Tabela 4.

O que determina em que modo de operação o sistema está trabalhando é o estado da rede. A partir dessa informação, as amplitudes dos sinais senoidais de referência (m_{PV} e m_{DVR}) devem ser devidamente ajustados a fim de atender as características exigidas por cada modo de operação. Sabendo disso, é possível definir quais os valores m_{PV} e m_{DVR} devem assumir de acordo com cada modo de operação. Estes valores são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de m_{PV} e m_{DVR} em cada modo de operação.

Modo	Estado da rede V_{PCC} (p.u.)	Estado das chaves		m_{PV}	m_{DVR}
		“1” durante todo o modo	Em regime PWM		
1 – Normal	$V_{PCC} = 1$	S7 – S8 – S9	S1 à S6	1,15	0
2 – Falta	≈ 0	S1 – S2 – S3	S4 à S9	0	1
3 – Afundamento	$0,1 \leq V_{PCC} < 0,9$	nenhuma	S1 à S9	ajustáveis	ajustáveis

Fonte: adaptada de [13].

Note que, fazer m_{DVR} igual a zero atende a característica do modo normal de manter as chaves S7, S8 e S9 fechadas durante este modo. Isso pode ser visualizado seguindo a ideia descrita a seguir:

substituindo $m_{DVR} = 0$ no conjunto de equações dado por (4) tem-se:

$$V_x^* = V_y^* = V_z^* = 0$$

logo, de (2):

$$V_{offset-DVR} = -1$$

e de (6):

$$M_{DVR-x} = M_{DVR-y} = M_{DVR-z} = -1$$

Assim, de acordo com (7):

$$G_{AUX-DVR-7,8,9} = 0$$

e utilizando (8):

$$G_{7,8,9} = 1$$

o que comprova que fazer m_{DVR} igual a zero, de fato, faz com que os sinais de gatilho das chaves S7, S8 e S9 permaneçam fechadas durante o Modo Normal. De maneira análoga pode ser demonstrado que fazer m_{PV} igual a zero implica em manter as chaves S1, S2 e S3 fechadas durante o Modo Falta.

Na Tabela 6, durante o funcionamento no Modo Afundamento os valores de m_{PV} e m_{DVR} aparecem como ajustáveis, isso se deve ao fato de que os valores de m_{PV} e m_{DVR} devem ser ajustados de acordo com a intensidade do afundamento.

Por fim, é importante frisar que a modulação PWM descontínua de 120° utilizada neste trabalho, não é a única estratégia de modulação possível para o NSI. Em [16] é proposta uma Modulação Vetorial Espacial (SVM - *Space Vector Modulation*) que aponta para uma redução do número de comutações das chaves, minimização da distorção harmônica total e otimização do uso da tensão do barramento c.c.

3. PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO

Este capítulo tem como objetivo detalhar o processo de construção da plataforma de simulação para o sistema PV-DVR integrado via NSI, o que abrange: a definição de parâmetros e todas as estratégias utilizadas para a obtenção fiel das características intrínsecas ao sistema abordadas no Capítulo 2.

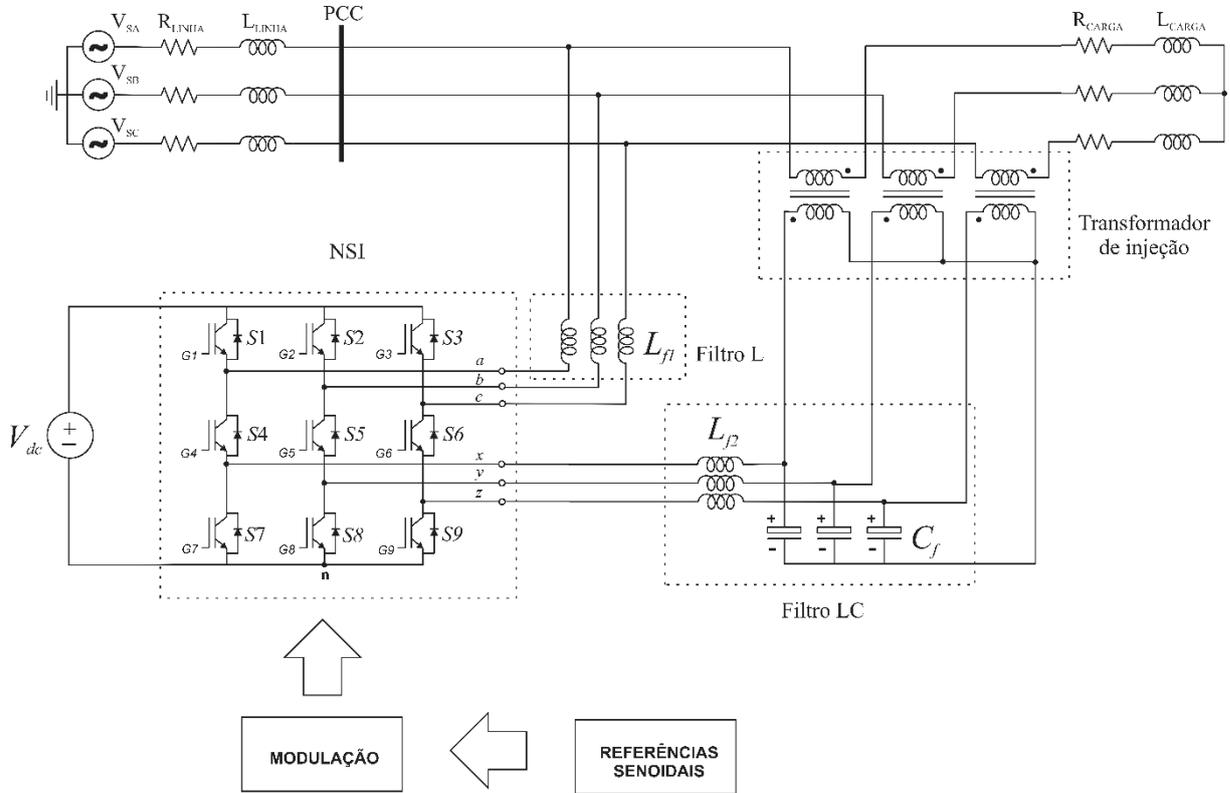
A fim de comprovar a eficiência do esquema de modulação do NSI, foi desenvolvido um código em ambiente MATLAB que emula todo o esquema de modulação descrito na Seção 2.3. Este código é apresentado no Apêndice A. O código implementado realiza todo o processo de modulação, desde a geração dos sinais de referência senoidais até a obtenção das tensões de saída do NSI. O ponto mais importante do *script* desenvolvido é o trecho que realiza a verificação de existência de curto-circuito no barramento c.c. a partir da modulação, ou seja, se os sinais de gatilho das três chaves de um mesmo braço assumem nível lógico 1 simultaneamente. Caso isso ocorra, o usuário é notificado por uma mensagem no *prompt* de comando do MATLAB contendo o alerta: “o barramento c.c. está curto-circuitado”, do contrário, a mensagem: “o barramento c.c. está em segurança” é impressa. Este teste foi primordial para dar continuidade a implementação da plataforma de simulação completa. A sua flexibilidade de emular diversos cenários com facilidade, torna este código uma ferramenta de auxílio ao entendimento de todo o processo de modulação. Além disso, a funcionalidade de verificar a ocorrência de curto-circuito no barramento c.c. é de grande valia não só para a simulação digital, mas também, será de suma importância em uma futura validação experimental. Outro ganho obtido com a implementação deste código é a possibilidade de adaptação do mesmo a outras estratégias de modulação. Resultados obtidos através do uso do código desenvolvido serão apresentados no Capítulo 4.

A plataforma de simulação completa será desenvolvida em ambiente PSIM. Este *software* desenvolvido pela empresa Powersim, foi projetado especificamente para aplicações de eletrônica de potência e sistemas de energia, além de possuir uma velocidade de simulação elevada, o PSIM ainda tem uma interface amigável, o que o torna uma poderosa ferramenta de simulação, capaz de atender desde a usuários iniciantes até os que demandam aplicações mais avançadas [17].

A topologia completa do sistema que será implementado no PSIM é apresentada na Figura 15. O primeiro passo para a construção da plataforma de simulação em ambiente PSIM foi a construção do esquema de modulação. A priori foi implementado um esquema capaz de

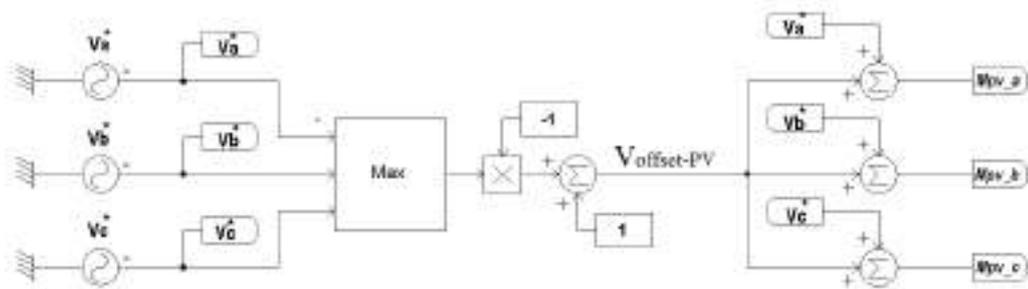
gerar os sinais de referência modificados descontínuos de 120° para o PV-VSI. Este circuito é apresentado na Figura 16.

Figura 15 – Sistema PV-DVR integrados.



Fonte: próprio autor.

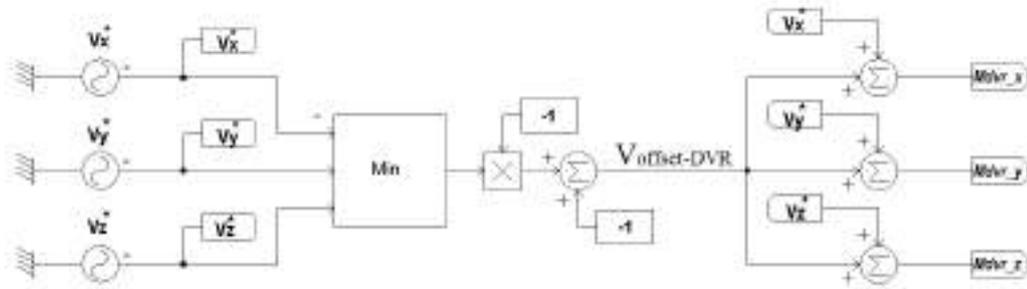
Figura 16 – Esquema de obtenção das referências modificadas – PV.



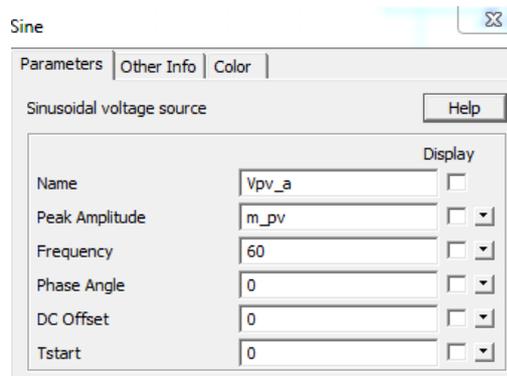
Fonte: próprio autor.

Em seguida, foram criados os sinais de referência modificados descontínuos de 120° para o DVR-VSI, como apresentado na Figura 17. Note que, o processo de obtenção das referências modificadas apresentado nas Figuras 16 e 17 atende as equações (1), (2), (3), (4), (5) e (6). Nesse ponto, os parâmetros passíveis de definição estão contidos no bloco *sine* do PSIM, são eles: amplitude de pico, frequência, ângulo de fase, *offset* DC e tempo de início. A Figura 18 apresenta a janela de interface do PSIM para a definição desses parâmetros.

Figura 17 – Esquema de obtenção das referências modificadas – DVR.



Fonte: próprio autor.

Figura 18 – Parâmetros ajustáveis do bloco *sine* do PSIM.

Fonte: próprio autor.

Na plataforma desenvolvida neste texto, será adotada a sequência de fases positiva para as tensões de referência senoidais, as amplitudes de pico das senoides serão alteradas de acordo com cada modo de funcionamento do sistema, além disso, a frequência das senoides deve ser a mesma da rede, que será adotada como 60 Hz, enquanto que o *offset* DC e tempo de início serão iguais a zero. Feitas estas considerações, os parâmetros definidos até este ponto são apresentados na Tabela 7.

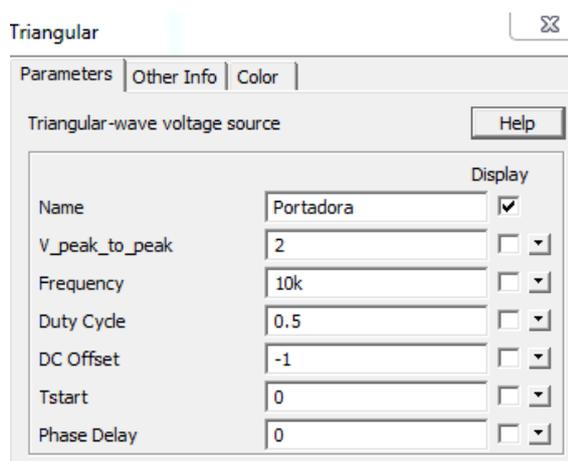
Tabela 7 – Parâmetros das referências senoidais no PSIM.

Sinal de Referência	Valores				
	Amplitude de Pico	Frequência	Ângulo de Fase	DC Offset	Tstart
V_a^*	m_{PV}	60 Hz	0	0	0
V_b^*	m_{PV}	60 Hz	-120°	0	0
V_c^*	m_{PV}	60 Hz	120°	0	0
V_x^*	m_{DVR}	60 Hz	0	0	0
V_y^*	m_{DVR}	60 Hz	-120°	0	0
V_z^*	m_{DVR}	60 Hz	120°	0	0

Fonte: próprio autor.

De posse dos sinais de referência modificados, a etapa seguinte na construção da plataforma de simulação foi a obtenção dos sinais de gatilho auxiliares, seguido da formação dos sinais de gatilho. Para isso, foram efetuadas as comparações evidenciadas em (7), portanto, neste ponto da implementação foi necessária a definição da amplitude e frequência da portadora triangular. Estes parâmetros foram definidos como 2 Volts de pico a pico e frequência igual a 10 kHz. Na Figura 19 é possível visualizar a janela disponível para os ajustes dos parâmetros da portadora. A abordagem adotada para a geração dos sinais de gatilho foi a utilização dos elementos do PSIM: *Triangular*, *Comparator*, *NOT gate*, *OR gate*, e *On-Off Controller*. Com estes elementos foi possível a implementação das equações (7) e (8) resultando na obtenção dos sinais de gatilho. O esquema desenvolvido é mostrado na Figura 20, que ilustra a obtenção dos sinais de gatilho do braço 1,2 e 3.

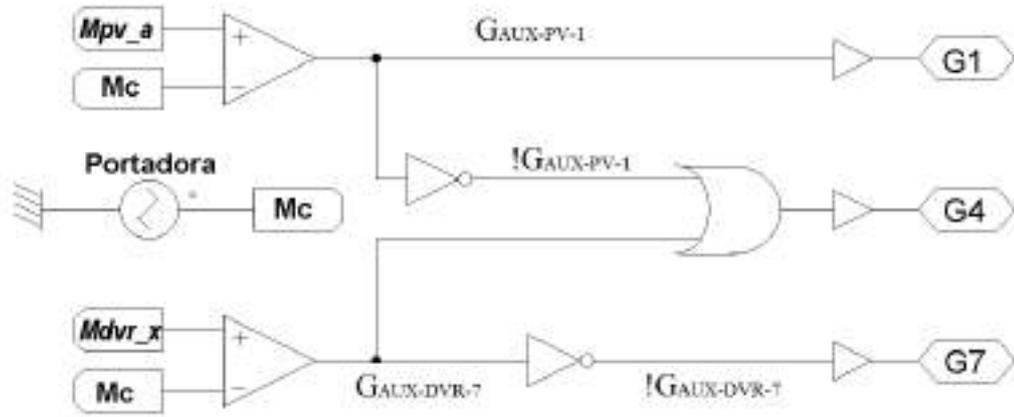
Figura 19 – Parâmetros ajustáveis do bloco *triangular* do PSIM.



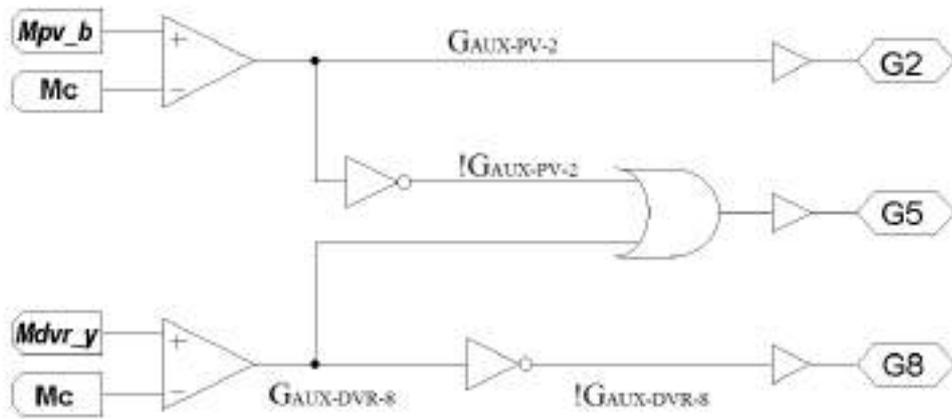
Fonte: próprio autor.

Com isso, o esquema de modulação está devidamente implementado, porém, o tamanho do esquema de modulação completo, junto com as demais partes componentes do sistema, tornaria a plataforma completa de difícil compreensão. Para solucionar este inconveniente foi utilizada uma funcionalidade do PSIM chamada *subcircuit*, este recurso permite que o usuário agrupe circuitos e defina apenas quem são suas portas de entrada e/ou saída. Sendo assim, os esquemas desenvolvidos e apresentados nas Figuras 16, 17 e 20 foram agrupados em um único bloco denominado modulação. Este bloco contém todo o processo de obtenção dos sinais de gatilho do NSI, tendo como saída os sinais G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8 e G9. A Figura 21 mostra o esquemático completo desenvolvido para a implementação da estratégia de modulação, enquanto que, a Figura 22 apresenta o bloco denominado modulação que contém este esquemático.

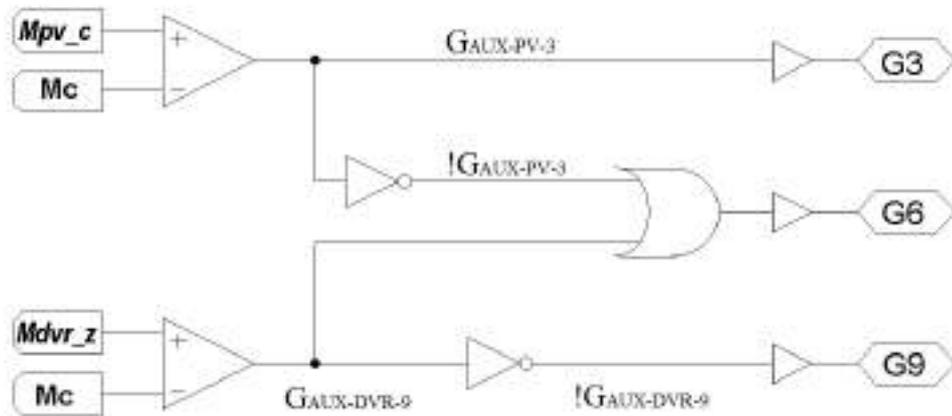
Figura 20 – Esquema de obtenção dos sinais de gatilho do braço (a) 1 (b) 2 (c) 3.



(a)



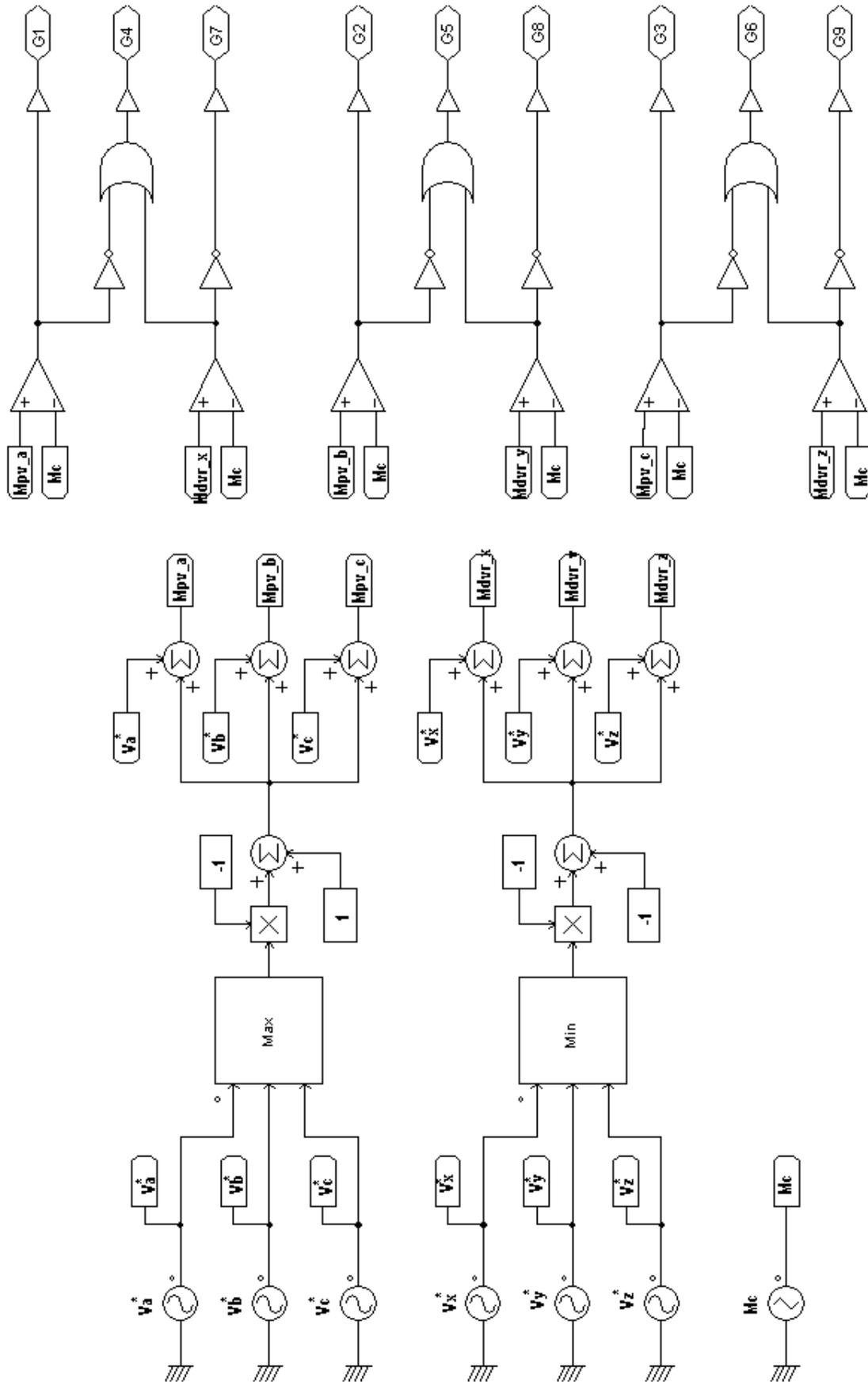
(b)



(c)

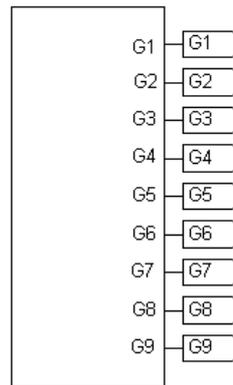
Fonte: próprio autor.

Figura 21 – Esquemático completo da estratégia de modulação.



Fonte: próprio autor.

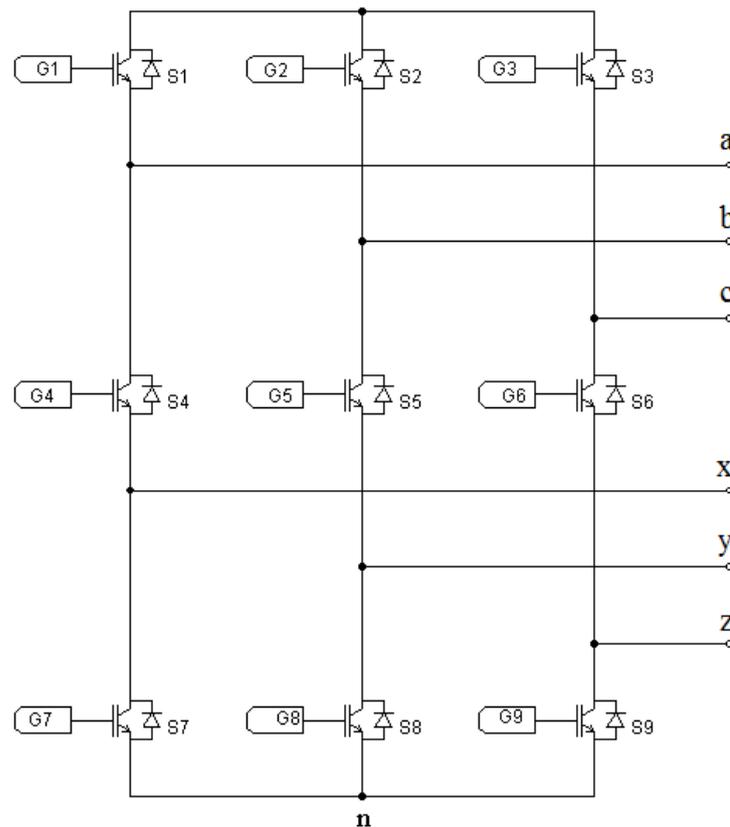
Figura 22 – Bloco modulação.



Fonte: próprio autor.

O próximo passo executado foi a implementação do NSI, ele foi construído utilizando-se chaves do tipo IGBT. A Figura 23 ilustra a topologia do NSI montada no PSIM.

Figura 23 – NSI implementado no PSIM.



Fonte: próprio autor.

As saídas superiores relativas ao PV-VSI são conectadas a um filtro L, enquanto as saídas do DVR-VSI são conectadas a um filtro LC. O caminho natural para a implementação da plataforma de simulação é a determinação dos parâmetros desses filtros, ou seja, L_{f1} , L_{f2} e

C_f . A determinação dos parâmetros do filtro LC é feita baseada em sua frequência de corte. O valor da frequência de corte do filtro deve estar uma década abaixo da frequência de chaveamento, assim:

$$f_o = \frac{f_s}{10} \quad (9)$$

Onde:

f_o é a frequência de corte do filtro LC

f_s é a frequência de chaveamento

A frequência de chaveamento do inversor é igual a frequência da portadora (10 kHz), logo:

$$f_o = 1 \text{ kHz} \quad (10)$$

A expressão da frequência de corte de um filtro LC é dada por:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (11)$$

Assim, da equação (11) obtém-se:

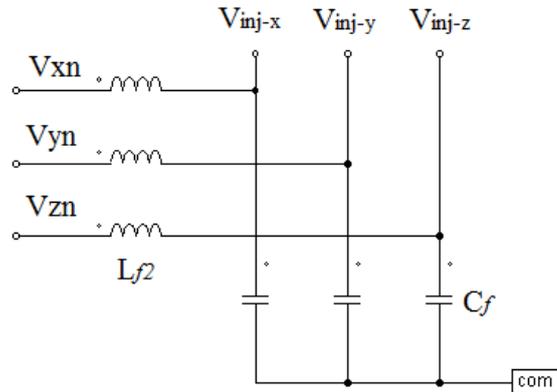
$$L_{f2} = \frac{1}{C_f} \left(\frac{1}{2\pi f_o} \right)^2 \quad (12)$$

Fixando o valor de C_f em 50 μF e sabendo que $f_o = 1 \text{ kHz}$, chegamos a:

$$L_{f2} = 5 \text{ mH} \quad (13)$$

Com isso os parâmetros do filtro LC estão definidos. A Figura 24 apresenta o filtro LC implementado no PSIM, onde o terminal inferior dos capacitores foi denominado “com” em referência a palavra “comum”, pois este terminal é comum a um dos terminais da bobina primária de cada transformador de injeção.

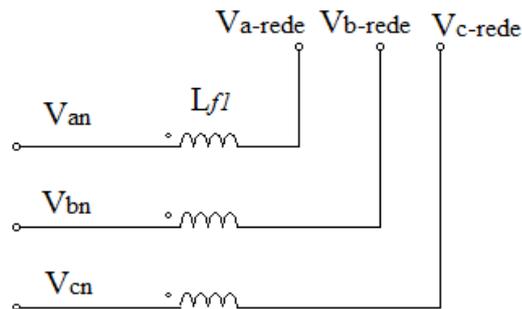
Figura 24 – Filtro LC implementado no PSIM.



Fonte: próprio autor.

O filtro L teve o seu valor de indutância definido em 2 mH. Este valor foi escolhido baseado em valores típicos utilizados na literatura. Sua implementação no PSIM tem a forma apresentada na Figura 25.

Figura 25 – Filtro L implementado no PSIM.



Fonte: próprio autor.

O transformador de injeção é composto por três transformadores monofásicos, estes transformadores devem estar conectados de tal forma a atender:

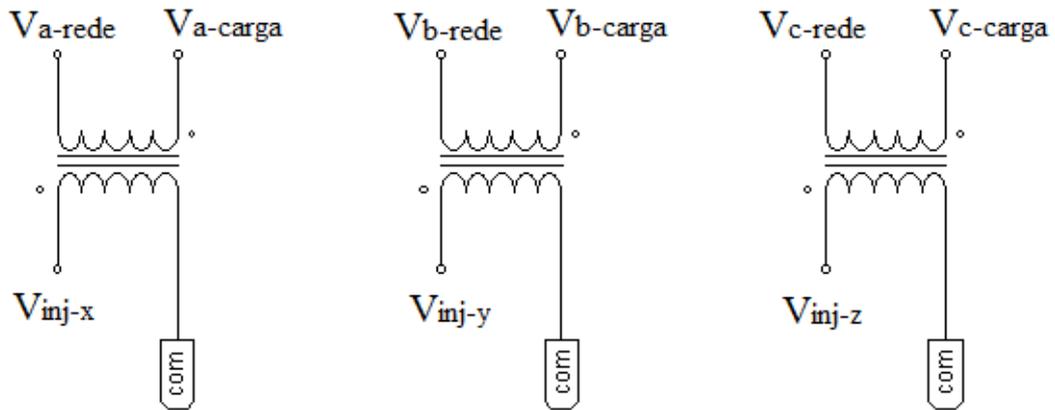
$$V_{abc-carga} = V_{abc-rede} + V_{xyz-inj} \quad (14)$$

Onde:

V_{inj} é a tensão injetada pelo DVR-VSI após o filtro LC.

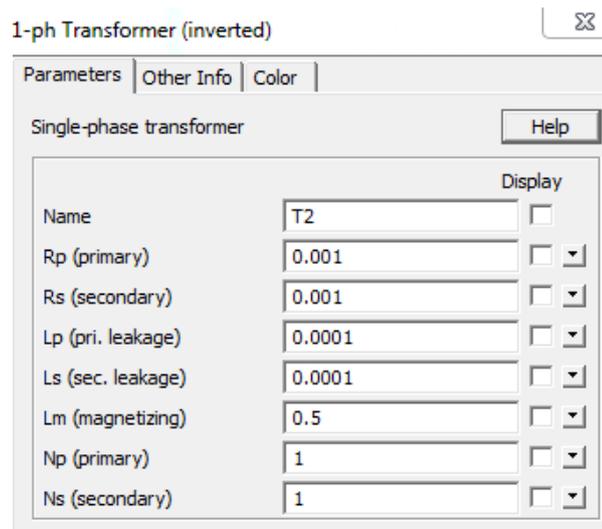
Para atender a equação (14) os transformadores devem possuir polaridade aditiva. Os que foram utilizados no PSIM estão mostrados na Figura 26. Os parâmetros dos transformadores serão adotados como os valores padrão do PSIM. Na Figura 27 é mostrada a janela que contém todos os parâmetros padrão utilizados.

Figura 26 – Transformadores utilizados na plataforma de simulação.



Fonte: próprio autor.

Figura 27 – Parâmetros dos transformadores utilizados.

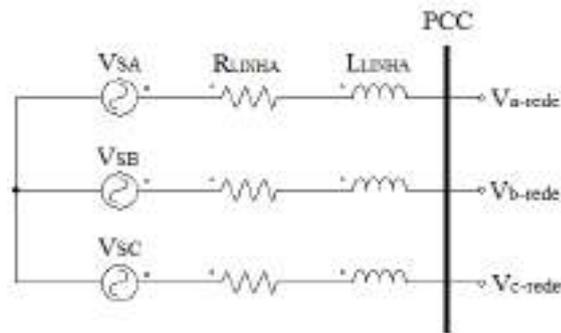


Fonte: próprio autor.

A rede será modelada utilizando um sistema trifásico, simétrico, equilibrado e de sequência positiva. A frequência da rede foi adotada como sendo 60 Hz e a amplitude de pico da tensão de uma fase foi definida em 100 V (70,71 V_{RMS}). Além disso, a linha foi adotada como sendo composta por uma resistência de 0,5 Ω e uma indutância de 0,2 mH. A rede implementada no PSIM é apresentada na Figura 28.

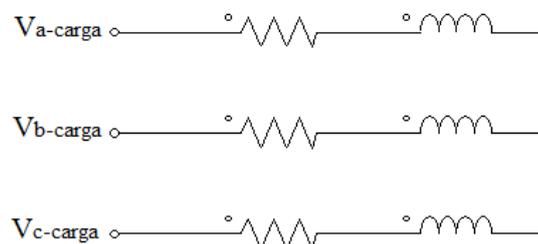
A carga foi modelada utilizando como ramo RL série, com os seguintes valores: $R_{carga} = 15 \Omega$ e $L_{carga} = 1 \text{ mH}$. O modelo da carga criado é ilustrado na Figura 29.

Figura 28 – Modelo da rede no PSIM.



Fonte: próprio autor.

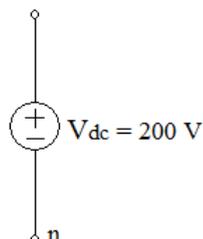
Figura 29 – Modelo da carga no PSIM.



Fonte: próprio autor.

O único parâmetro ainda não determinado foi a tensão do barramento c.c. Na plataforma desenvolvida, o barramento c.c. é representado por uma fonte de tensão contínua ideal. O valor definido para esta fonte foi baseado no nível de tensão da rede. Como a rede possui uma amplitude de 100 V de pico por fase, um valor razoável para a tensão do barramento c.c. foi definido como sendo $V_{dc} = 200 V$. A Figura 30 apresenta a fonte de tensão contínua ideal utilizada na plataforma de simulação.

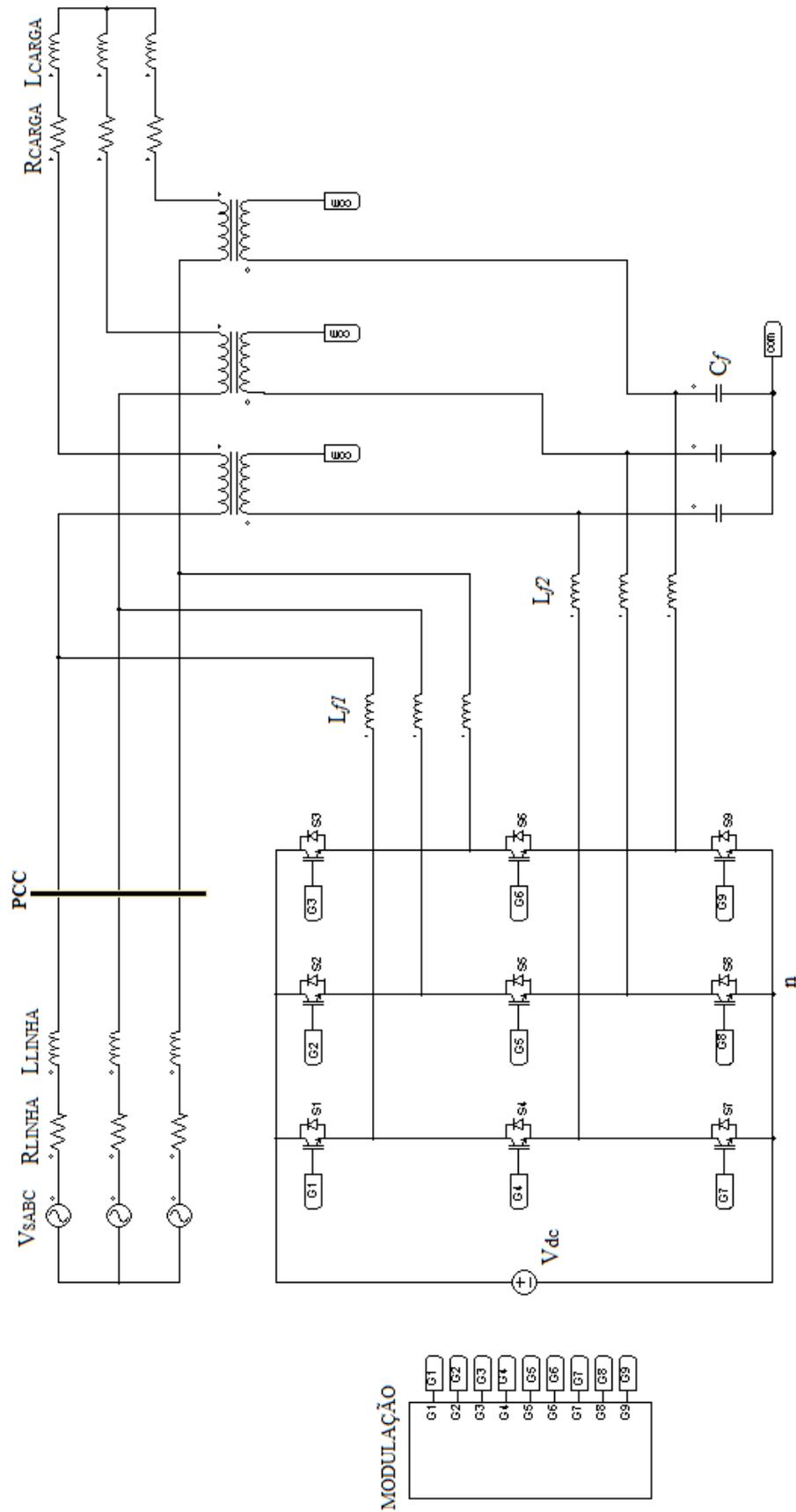
Figura 30 – Fonte de tensão c.c. adotada.



Fonte: próprio autor.

Neste ponto, a construção da plataforma de simulação foi arrematada. Todos os componentes do sistema completo apresentados na Figura 15 foram implementados. A plataforma completa em ambiente PSIM é ilustrada pela Figura 31. A Tabela 8 agrupa todos os parâmetros definidos ao longo deste capítulo.

Figura 31 – Plataforma de simulação completa.



Fonte: próprio autor.

Tabela 8 – Parâmetros de simulação do sistema PV-DVR.

Parâmetro	Valor
Tensão de fase rede	100 V de pico
Frequência da rede	60 Hz
Resistência da linha	0,5 Ω
Indutância da linha	0,2 mH
Resistência da carga	15 Ω
Indutância da carga	1 mH
Capacitância do filtro	50 μ F
Indutância do filtro	0,5 mH
Indutância do filtro L	2 mH
Tensão do barramento c.c.	200 V
Tensão da portadora	2 V de pico a pico
Frequência da portadora	10 kHz
m_{PV}	1,15, durante o Modo 1 – Normal 0, durante o Modo 2 – Falta Ajustável, durante o Modo 3 – Afundamento
m_{DVR}	0, durante o Modo 1 – Normal 1, durante o Modo 2 – Falta Ajustável, durante o Modo 3 – Afundamento

Fonte: próprio autor.

4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir do código implementado em ambiente MATLAB para a verificação do funcionamento do esquema de modulação, e sobretudo, os resultados obtidos através da plataforma de simulação desenvolvida no PSIM. Todos os resultados foram obtidos seguindo fielmente os parâmetros apresentados na Tabela 8, bem como, todas as particularidades do sistema discutidas ao longo do texto.

Este trabalho não engloba o desenvolvimento do sistema de controle para o PV-DVR integrado via NSI, portanto, para simular determinado modo de operação do sistema o procedimento adotado foi alterar convenientemente os valores de m_{PV} , m_{DVR} e da tensão da rede, a fim de emular as condições específicas que determinam o funcionamento do sistema em cada modo de operação. Estas condições estão contidas na Tabela 9.

Tabela 9 – Condições para a simulação de cada modo de operação.

Modo	Estado da rede – V_{PCC} (p.u.)	m_{PV}	m_{DVR}
Normal	$V_{PCC} = 1$	1,15	0
Falta	≈ 0	0	1
Afundamento	$0,1 \leq V_{PCC} < 0,9$	ajustáveis	ajustáveis

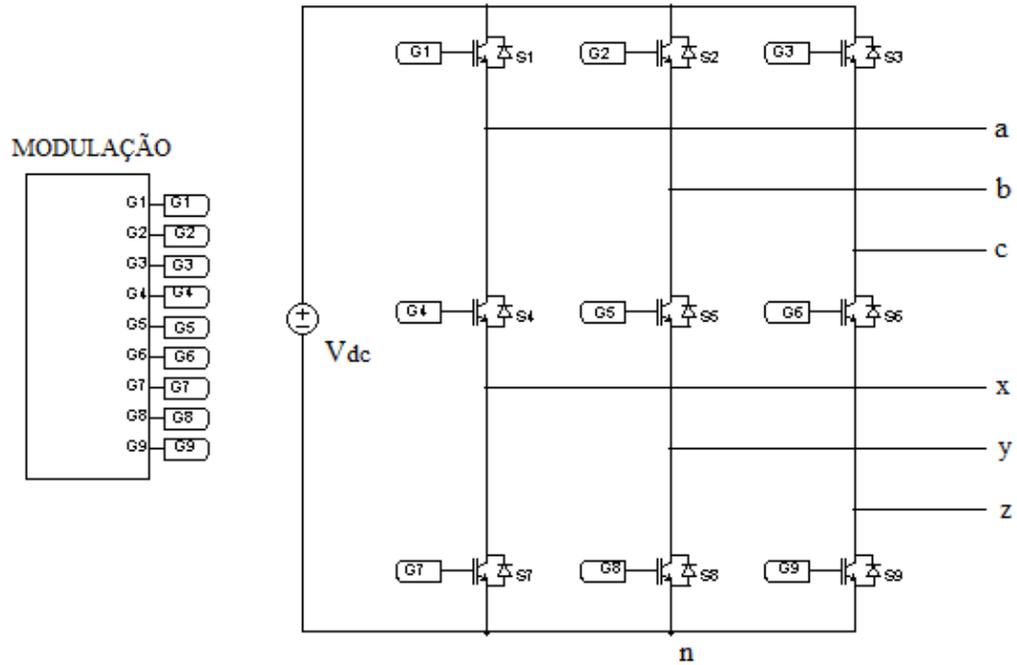
Fonte: próprio autor.

4.1. ESQUEMA DE MODULAÇÃO

Os primeiros resultados foram obtidos através do código desenvolvido em MATLAB disponível no Apêndice A, visando a validação do esquema de modulação. O código implementado simula o trecho da plataforma de simulação que vai do bloco modulação até as saídas do NSI, como mostrado na Figura 32.

O procedimento seguido para verificar o funcionamento adequado do esquema de modulação consistiu em simular as condições de operação de cada modo descritas na Tabela 9 e analisar se os resultados obtidos são coerentes com as especificidades de cada modo. Basicamente, os resultados obtidos aqui são: a detecção se houve curto-circuito do barramento c.c. durante o processo de modulação e as formas de onda dos sinais de referência modificados, dos sinais de gatilho e das tensões de saída V_{an} , V_{bn} , V_{cn} , V_{xn} , V_{yn} e V_{zn} .

Figura 32 – Trecho abordado pelo código desenvolvido em MATLAB.

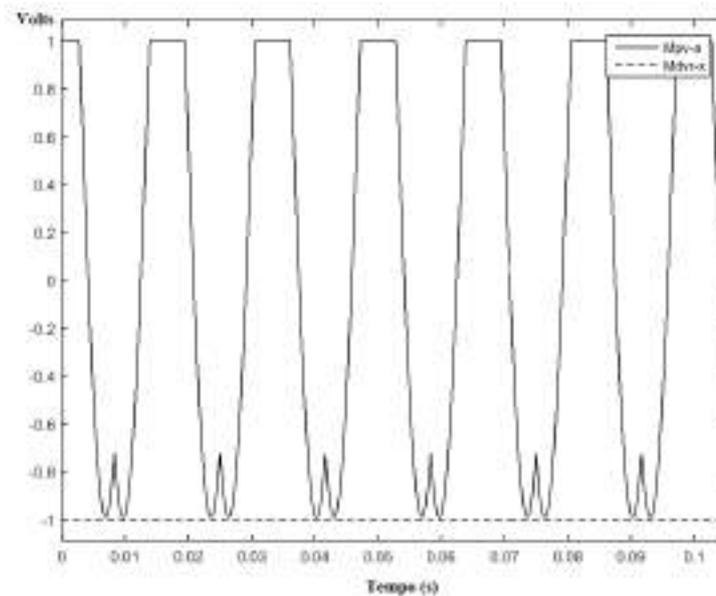


Fonte: próprio autor.

4.1.1. Modo 1 – Normal

A operação em Modo Normal é obtida fazendo $m_{PV} = 1,15$ e $m_{DVR} = 0$, com isso, os sinais de referência modificados assumem a forma apresentada na Figura 33. Por conveniência são mostradas apenas as referências modificadas para o braço 1, ou seja, M_{PV-a} e M_{DVR-x} .

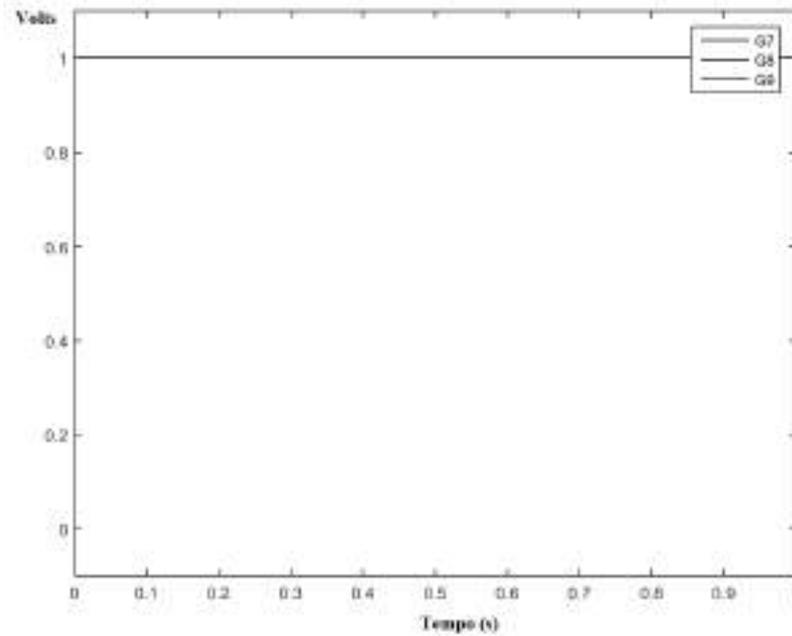
Figura 33 – Referências modificadas durante o modo 1 – MATLAB.



Fonte: próprio autor.

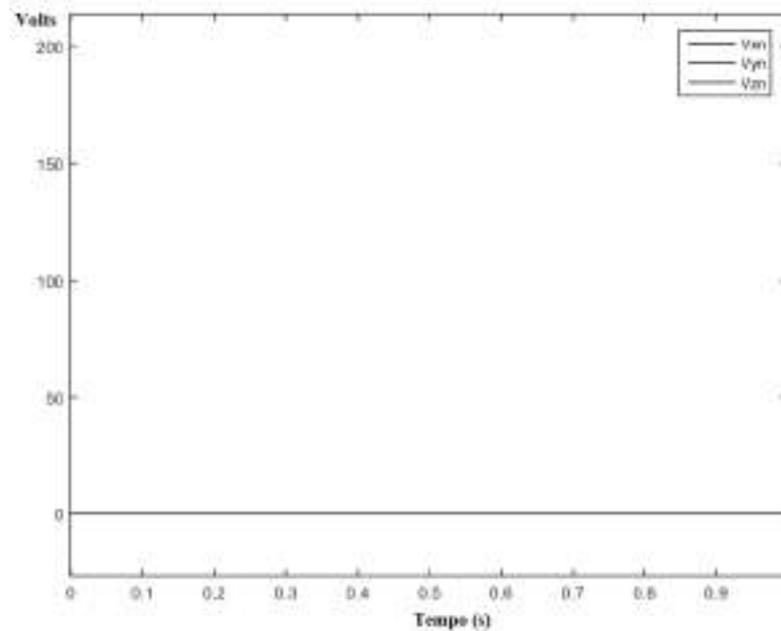
Note que, como esperado o sinal de referência modificado para o DVR está constante em -1. Como demonstrado no Capítulo 2, isto faz com que as chaves S7, S8 e S9 permaneçam fechadas, ou seja, os sinais de gatilho destas chaves devem ser constantes e iguais a um. Este comportamento foi comprovado e é mostrado pela Figura 34. Com S7, S8 e S9 fechadas as tensões de saída V_{xn} , V_{yn} e V_{zn} devem ser iguais a zero, como evidenciado na Figura 35.

Figura 34 – G7, G8 e G9 durante o modo 1 – MATLAB.



Fonte: próprio autor.

Figura 35 – Tensões de saída do DVR durante o modo 1 – MATLAB.

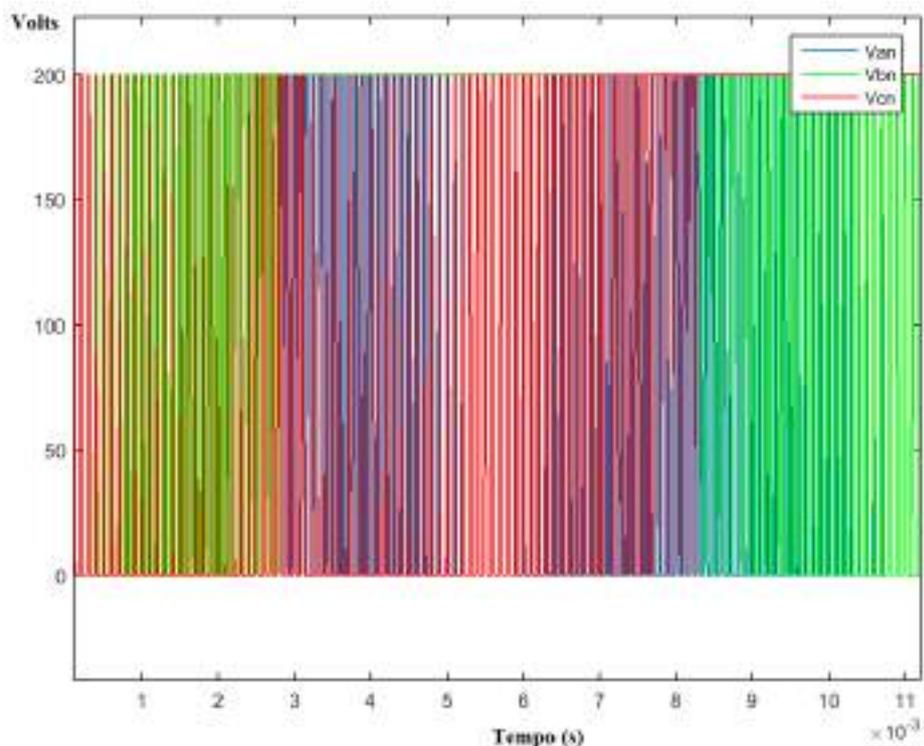


Fonte: próprio autor.

A última característica esperada e comprovada para o Modo 1, foi visualizar que as formas de onda das tensões de saída V_{an} , V_{bn} e V_{cn} devem ser sinais PWM variando de zero a V_{dc} . De fato, este comportamento ocorreu e é apresentado na Figura 36. Além disso, o código não detectou em nenhum instante três chaves de um mesmo braço fechadas simultaneamente, e assim, retornou na janela de comando do MATLAB a mensagem padrão definida. Um *screenshot* da janela de comando é mostrado na Figura 37.

Com isso, o teste do esquema de modulação durante o Modo Normal foi finalizado. As características inerentes a este modo foram devidamente respeitadas, comprovando a eficiência do esquema de modulação durante este modo.

Figura 36 – Tensões de saída do PV durante o modo 1 – MATLAB.



Fonte: próprio autor.

Figura 37 – Retorno do teste de curto-circuito do barramento c.c.

```
Command Window
>> teste_modulacao
O barramento CC está em segurança!
fx >> |
```

Fonte: próprio autor.

4.1.2. Modo 2 – Falta

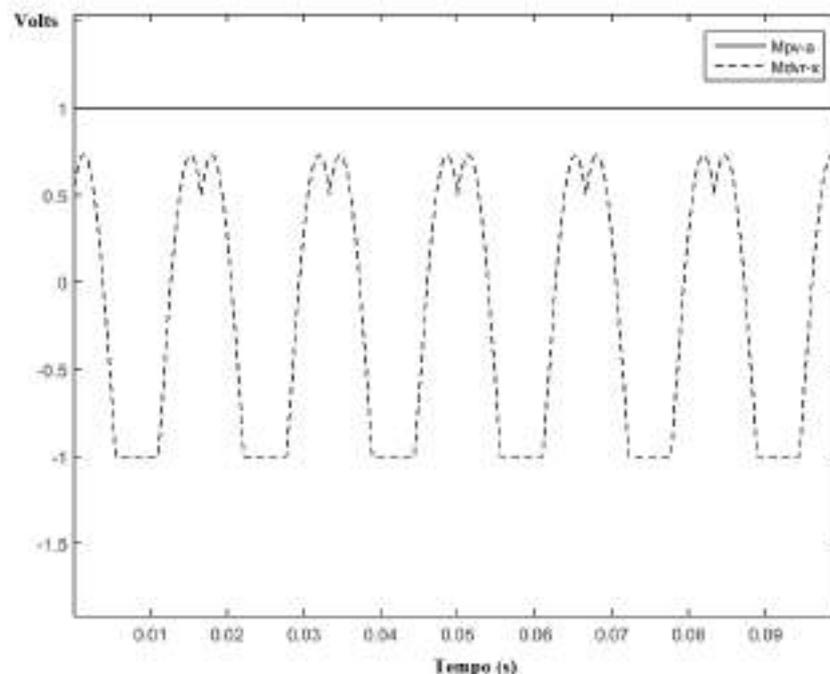
Durante o Modo Falta m_{PV} é igual a zero, enquanto m_{DVR} vale um, assim, ao atribuir estes valores para suas devidas variáveis no código, o Modo 2 é emulado. Ao executar o *script* obtemos o cenário apresentado na Figura 38 para os sinais de referência modificados. Como esperado o sinal de referência modificado para o PV-VSI foi constante e igual a um, esta situação acarreta em manter as chaves S1, S2 e S3 fechadas durante o Modo 2. Isso implica que, os sinais de gatilho G1, G2 e G3 devem ser constantes e iguais a um, de fato, isto foi evidenciado e estes sinais de gatilho são mostrados na Figura 39.

Estando as chaves S1, S2 e S3 fechadas durante este modo, as tensões de saída V_{an} , V_{bn} e V_{cn} esperadas são constantes e iguais a V_{dc} . Esta especificação foi atendida e está ilustrada na Figura 40.

Para as saídas referentes ao DVR-VSI a forma de onda esperada para as tensões V_{xn} , V_{yn} e V_{zn} é de um sinal em regime PWM com amplitudes limitadas por zero e V_{dc} . Esta característica foi visualizada e é apresentada na Figura 41.

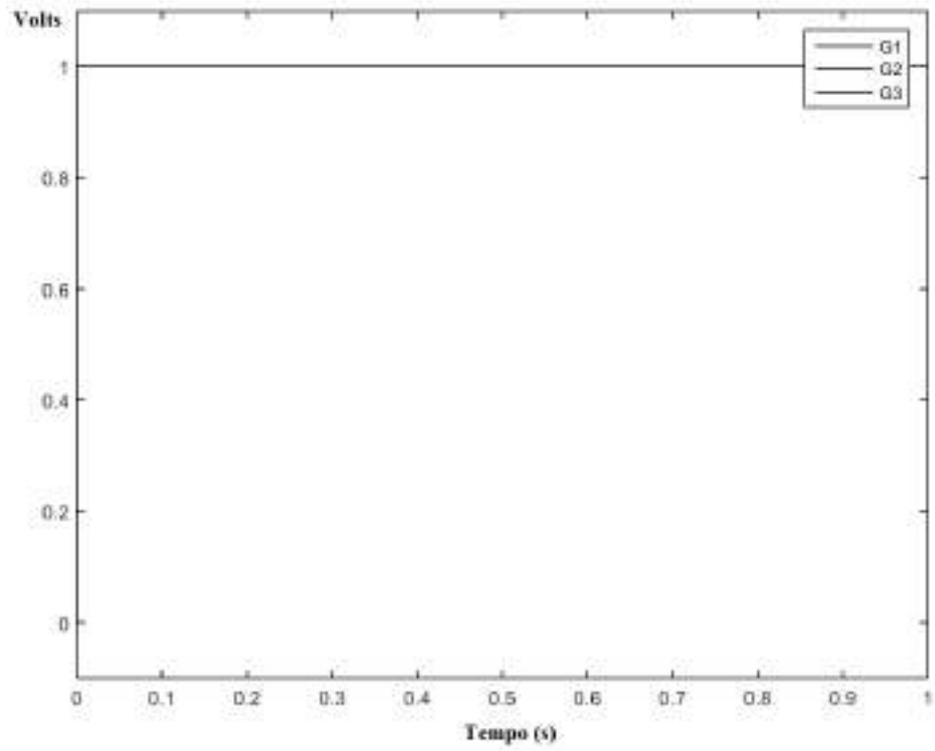
Ao executar o código, o teste de curto-circuito do barramento c.c. não detectou a situação proibida de três chaves de um mesmo braço estarem conduzindo ao mesmo tempo. Sendo assim, o teste do esquema de modulação para o Modo 2 foi finalizado com êxito.

Figura 38 – Referências modificadas durante o modo 2 – MATLAB.



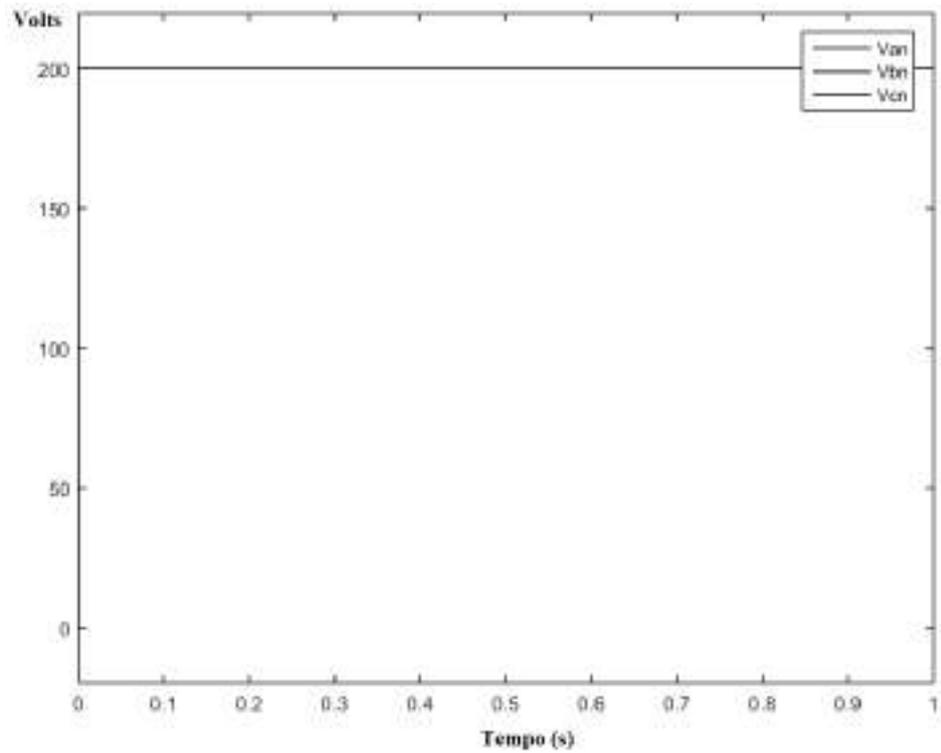
Fonte: próprio autor.

Figura 39 – G1, G2 e G3 durante o modo 2 – MATLAB.



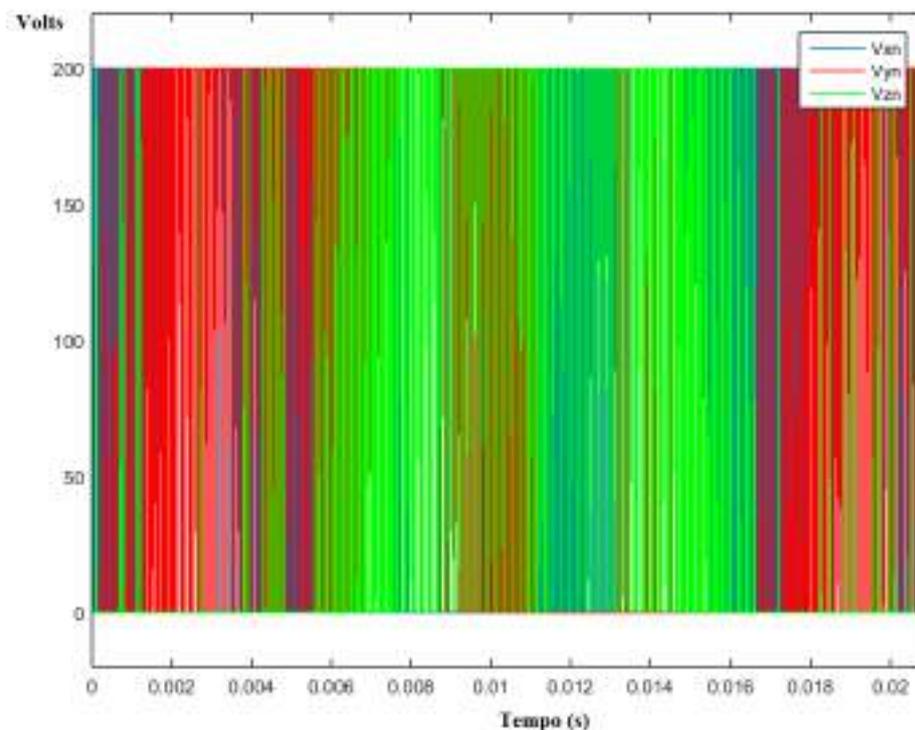
Fonte: próprio autor.

Figura 40 – Tensões de saída do PV durante o modo 2 – MATLAB.



Fonte: próprio autor.

Figura 41 – Tensões de saída do DVR durante o modo 2 – MATLAB.



Fonte: próprio autor.

4.1.3. Modo 3 – Afundamento

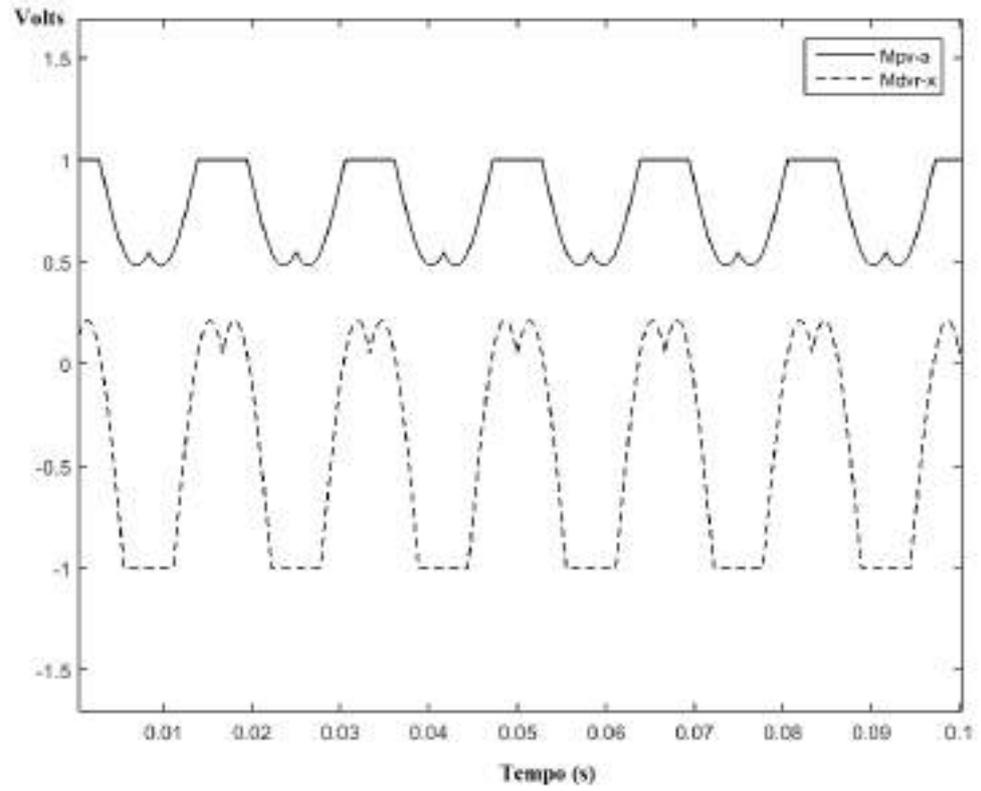
O teste do esquema de modulação durante o Modo 3 foi realizado para várias possíveis situações, porém, será apresentado aqui um cenário no qual $m_{PV} = 0,3$ e $m_{DVR} = 0,7$. Os sinais de referência modificados para o braço 1 do NSI obtidos para esta situação são apresentadas na Figura 42. Como requerido não houve o cruzamento de referências.

Durante o Modo Afundamento é esperado que todas as chaves recebam sinais de gatilho em regime PWM e que ambas as saídas forneçam tensões de formato similar. Estas tensões como previsto variaram de zero a 200 V. As formas de onda das tensões de saída obtidas para o PV-VSI e para o DVR-VSI, são mostradas nas Figuras 43 e 44, respectivamente.

O algoritmo de detecção de curto-circuito do barramento c.c. mais uma vez não apontou nenhuma anomalia, o que significa que o esquema de modulação atendeu a todas as particularidades do Modo 3.

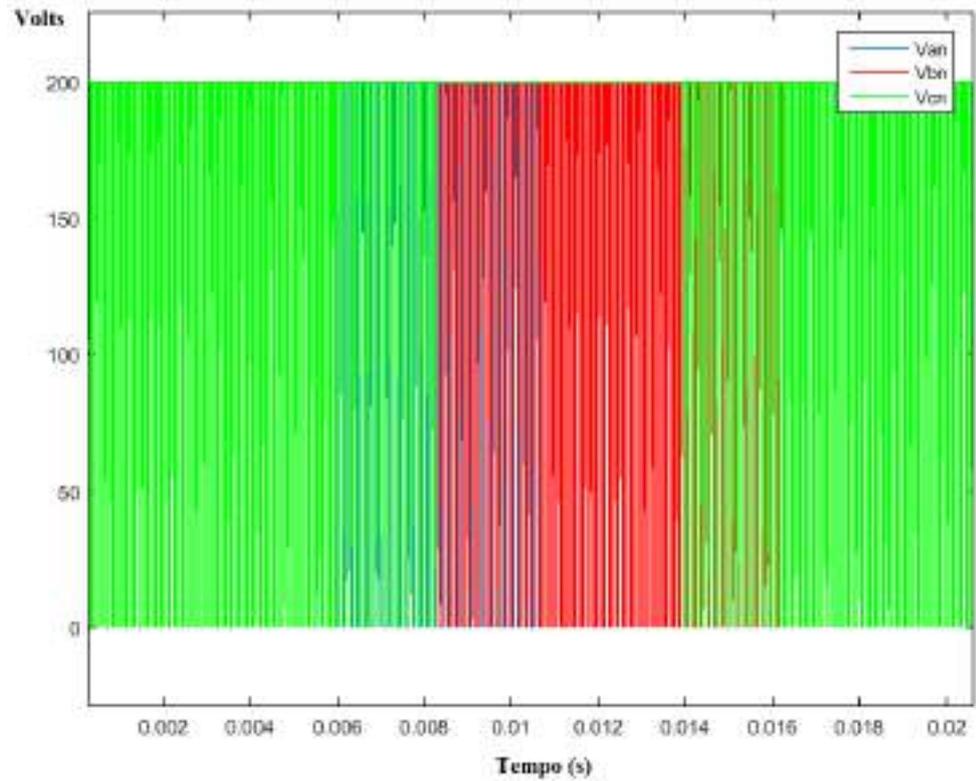
Com isso, o esquema de modulação PWM descontínua de 120° utilizado para o NSI que integra o sistema PV-DVR foi devidamente testado para cada modo de operação, atendendo sem restrições a todas as especificações almejadas.

Figura 42 – Referências modificadas durante o modo 3 – MATLAB.



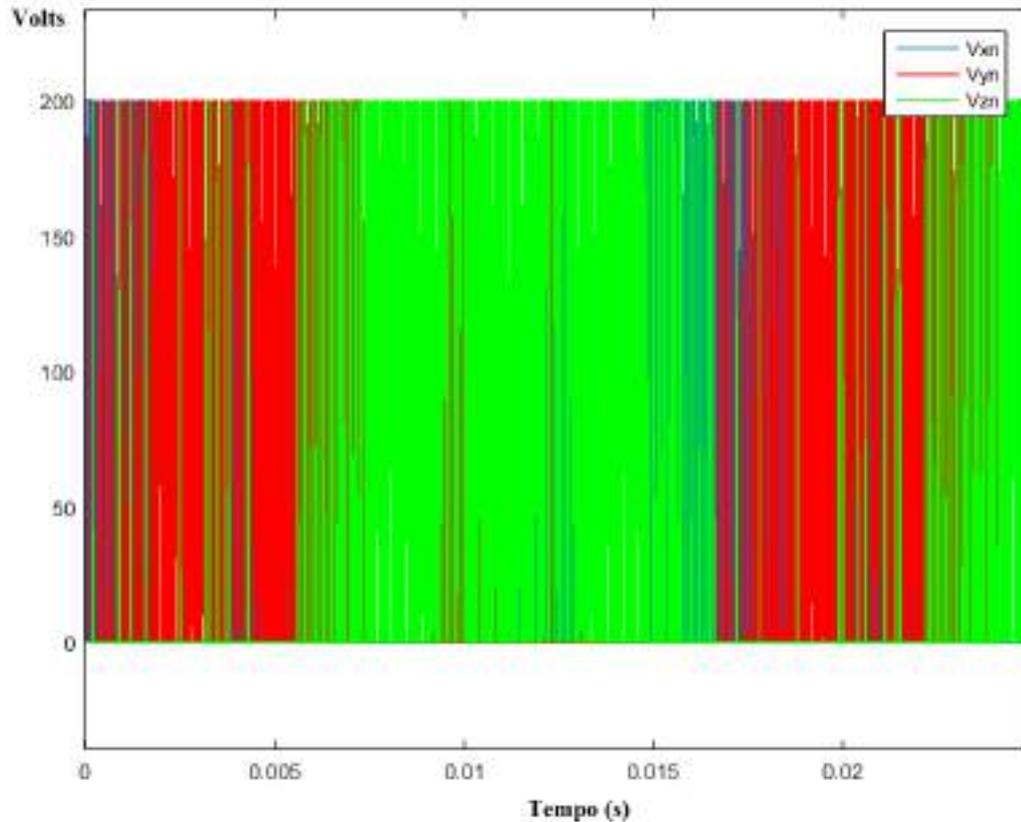
Fonte: próprio autor.

Figura 43 – Tensões de saída do PV durante o modo 3 – MATLAB.



Fonte: próprio autor.

Figura 44 – Tensões de saída do DVR durante o modo 3 – MATLAB.



Fonte: próprio autor.

4.2.SISTEMA COMPLETO

A plataforma de simulação desenvolvida em ambiente PSIM apresentada na Figura 31 e todos os parâmetros de simulação agrupados na Tabela 8 foram utilizados para efetuar a simulação do sistema PV-DVR integrado via NSI.

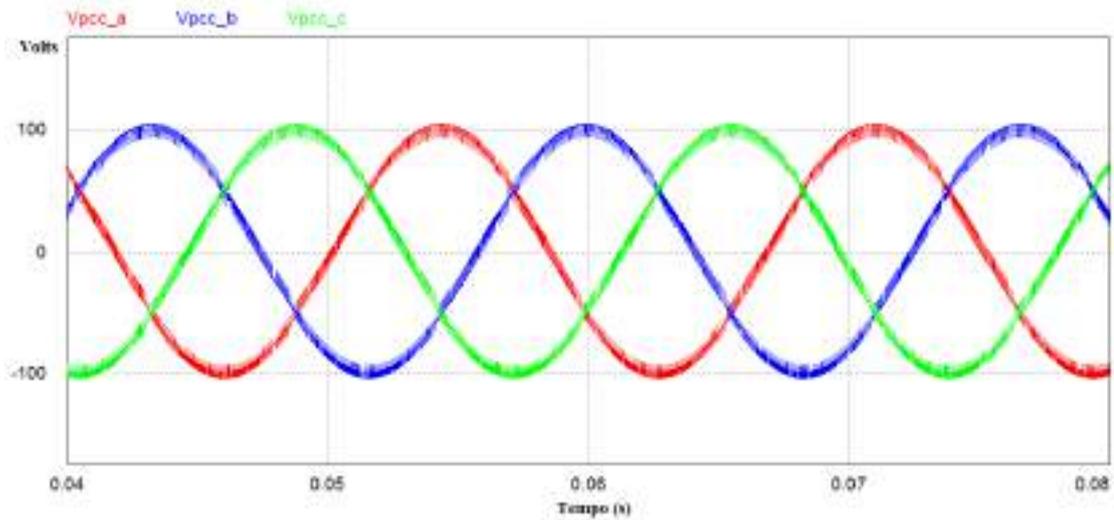
O procedimento para simular cada modo de operação do sistema foi análogo ao utilizado na simulação do esquema de modulação discutido na seção anterior, ou seja, os valores de m_{PV} e m_{DVR} foram alterados de acordo com as condições de operação de cada modo. Um detalhe adicional ao qual deve-se atentar durante a simulação do sistema completo na plataforma desenvolvida no PSIM, é que além dos valores de m_{PV} e m_{DVR} deve-se alterar também os valores da tensão no PCC, a fim de atender todas as condições de operação de cada modo descritas da Tabela 9.

As principais grandezas que serão monitoradas na simulação do sistema completo para cada modo de operação são: tensões no PCC, tensões injetadas pelo DVR-VSI, tensões na carga, correntes da rede, correntes injetadas pelo PV-VSI e as correntes na carga.

4.2.1. Modo 1 – Normal

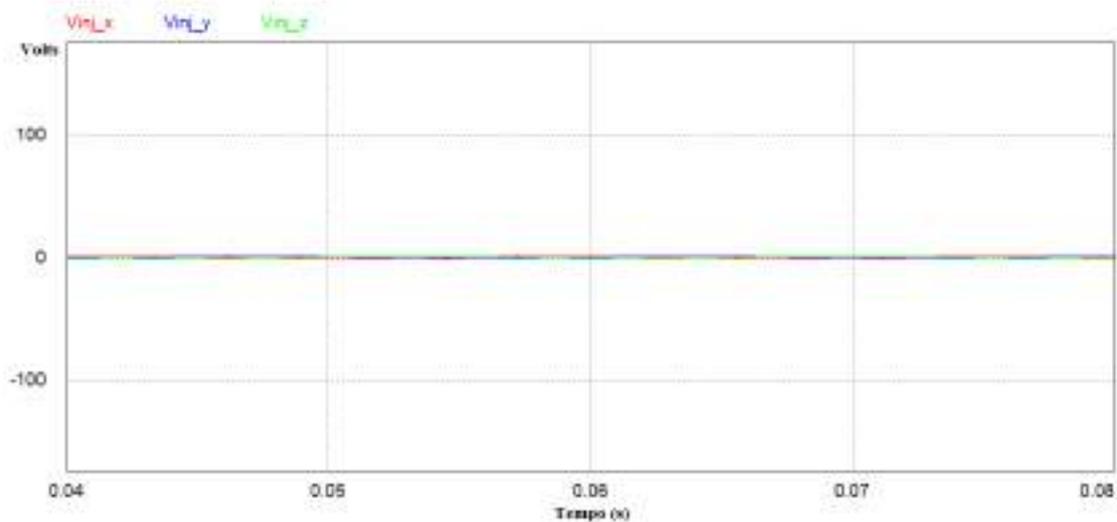
Uma vez configurados os valores de m_{PV} , m_{DVR} e da tensão da rede para emular o Modo Normal, foram obtidos os resultados apresentados nas Figura 45, 46 e 47 para as tensões no PCC, tensões injetadas pelo DVR-VSI e tensões na carga, respectivamente.

Figura 45 – Tensões no PCC durante o Modo 1.



Fonte: próprio autor.

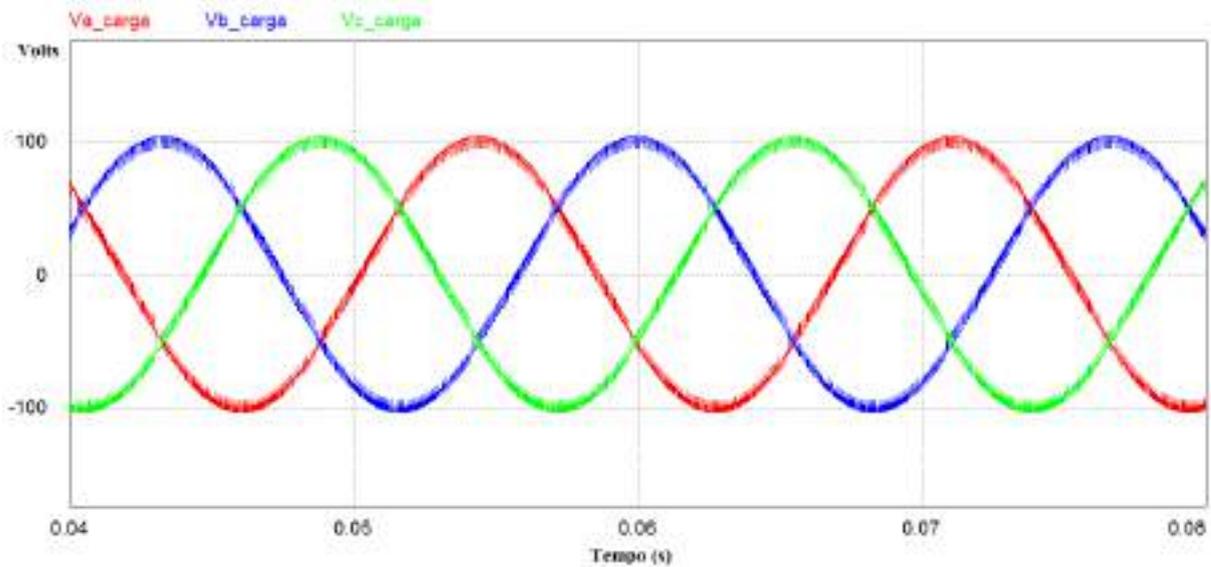
Figura 46 – Tensões injetadas pelo DVR-VSI durante o Modo 1.



Fonte: próprio autor.

As tensões no PCC apresentaram valores de pico de aproximadamente 100 V como esperado para este modo de operação. A THD (*Total Harmonic Distortion*) dessas tensões foi de 4,66 %.

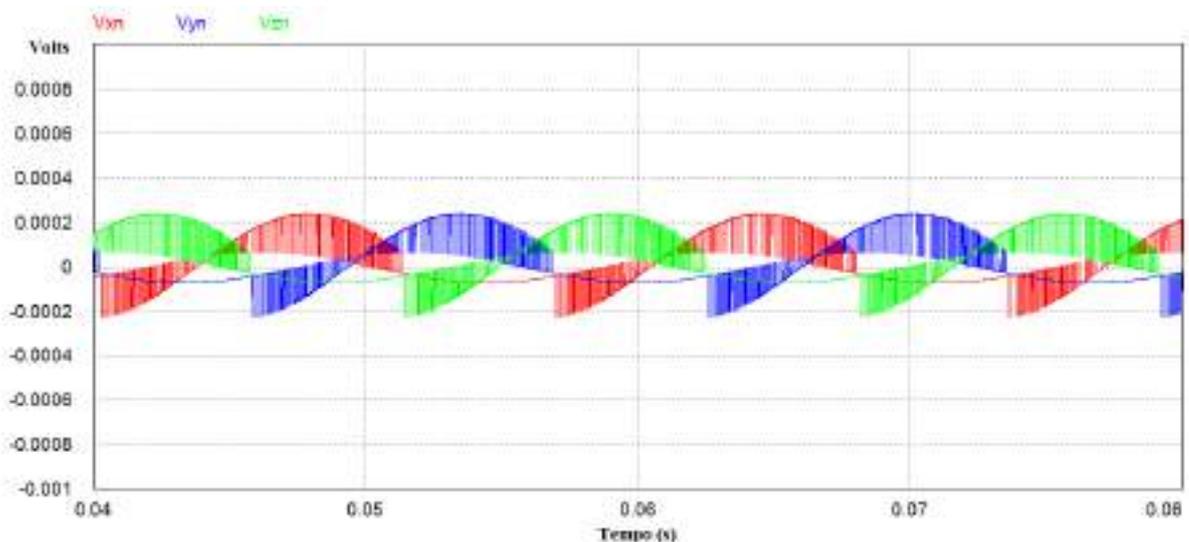
Figura 47 – Tensões na carga durante o Modo 1.



Fonte: próprio autor.

As tensões injetadas pelo DVR-VSI apresentaram uma amplitude de 1,32 V com uma THD de 1,14 %. Idealmente estas tensões deveriam ser iguais a zero, tendo em vista que a tensão no PCC não necessita de compensação. Ao verificar as tensões de saída do DVR-VSI V_{xn} , V_{yn} e V_{zn} mostradas na Figura 48, notou-se que elas possuem uma amplitude de 235 μ V, porém, quando estas tensões passam pela filtragem LC não só assumem uma forma senoidal, mas também recebem um ganho, o que explica o motivo das tensões injetadas pelo DVR-VSI não terem sido iguais a zero. As tensões na carga foram muito semelhantes às do PCC, mas com uma THD de 3,9 %.

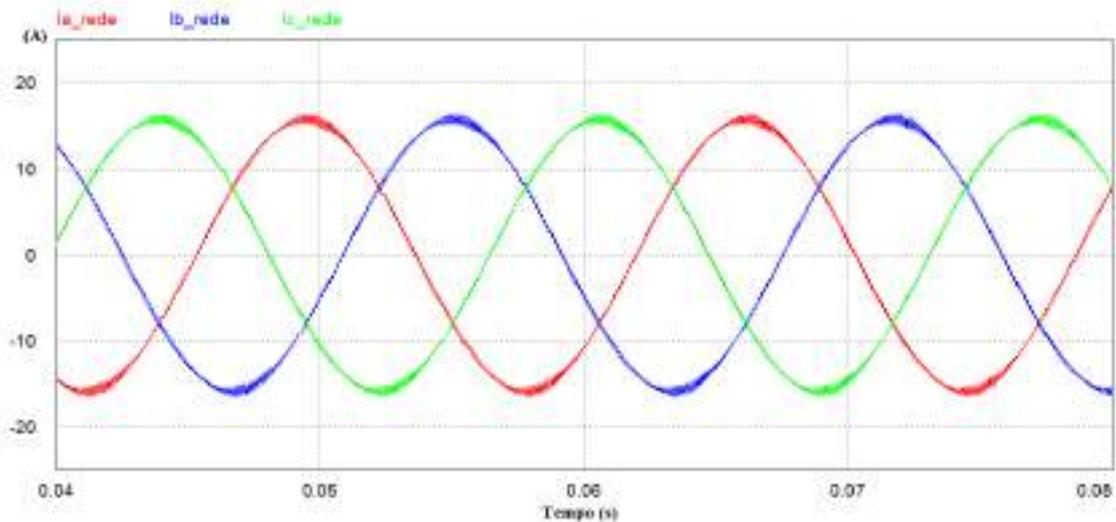
Figura 48 – Tensão de saída do DVR-VSI.



Fonte: próprio autor.

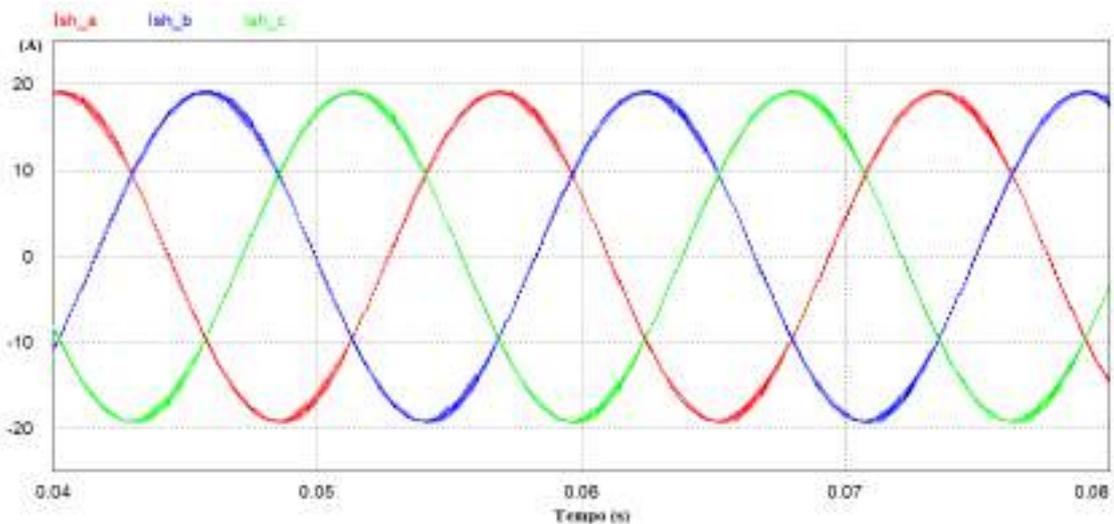
Nas Figuras 49, 50 e 51 são mostrados os resultados obtidos para as correntes da rede, correntes injetadas pelo PV-VSI e correntes na carga, respectivamente.

Figura 49 – Correntes da rede durante o Modo 1.



Fonte: próprio autor.

Figura 50 – Correntes injetadas pelo PV-VSI durante o Modo 1.



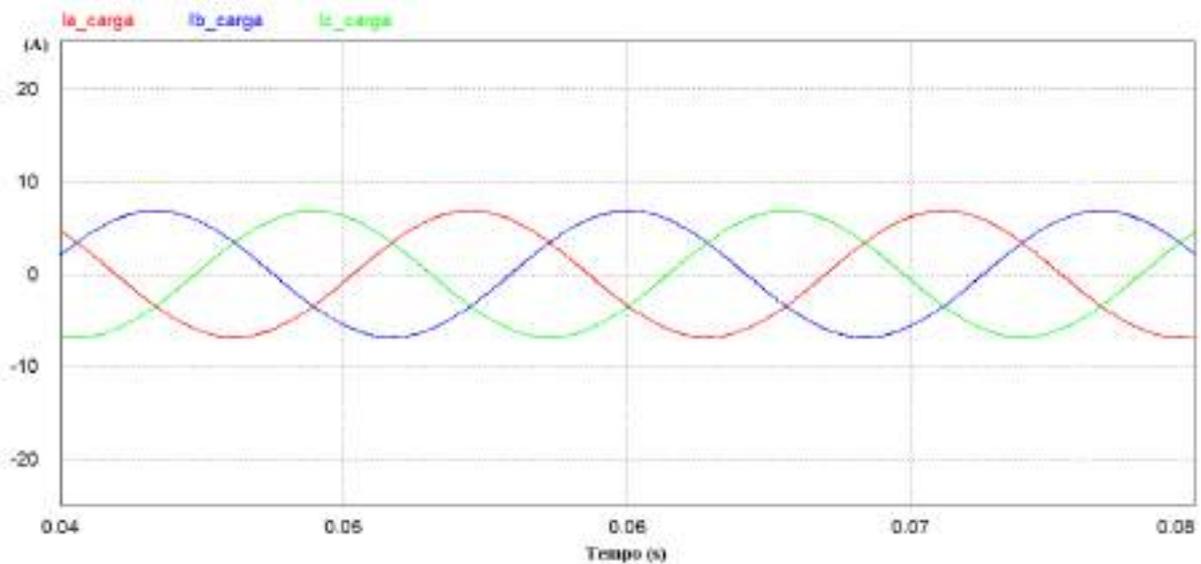
Fonte: próprio autor.

As correntes da rede são aquelas que fluem da fonte ao PCC. Estas correntes apresentaram uma amplitude de 16,37 A com uma THD de 1,83 %.

As correntes injetadas pelo PV-VSI (ou correntes *shunt*) assumiram uma amplitude de 19,25 A com uma THD de 1,76 %.

As correntes na carga apresentaram uma amplitude igual a 6,9 A com uma THD de apenas 0,69 %.

Figura 51 – Correntes na carga durante o Modo 1.

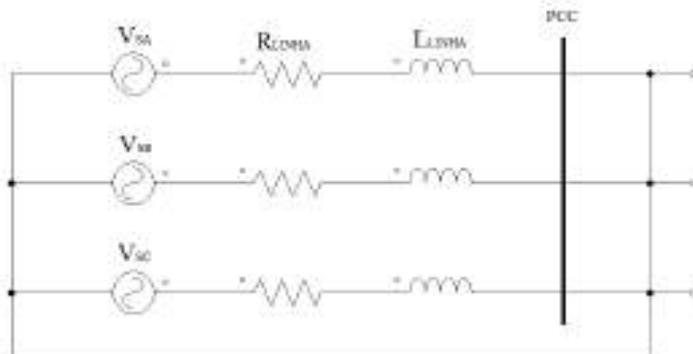


Fonte: próprio autor.

Neste ponto a simulação do sistema operando em Modo Normal foi finalizada, todas as características de funcionamento esperadas puderam ser observadas. Portanto, o sistema integrado PV-DVR respondeu com êxito as especificidades deste modo de operação.

4.2.2. Modo 2 – Falta

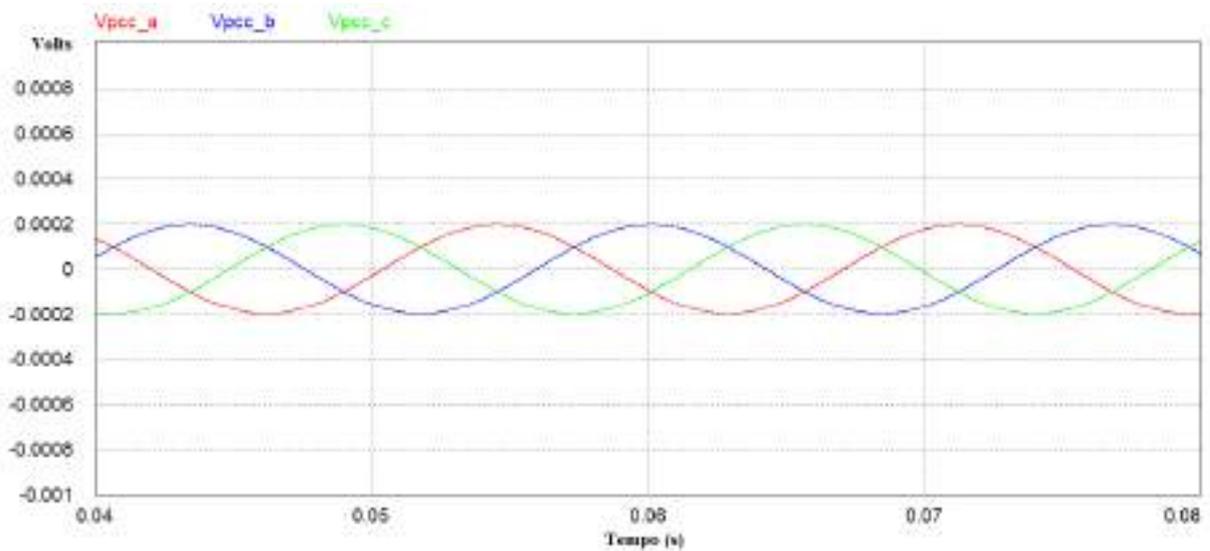
O sistema opera em Modo 2 quando a tensão no PCC é aproximadamente zero, para emular esta situação na plataforma de simulação o procedimento adotado foi conectar as três fases do PCC entre si e em seguida conectar este ponto ao ponto comum entre as fontes de alimentação. Este procedimento está ilustrado na Figura 52.

Figura 52 – Método utilizado para fazer V_{PCC} aproximadamente igual a zero.

Fonte: próprio autor.

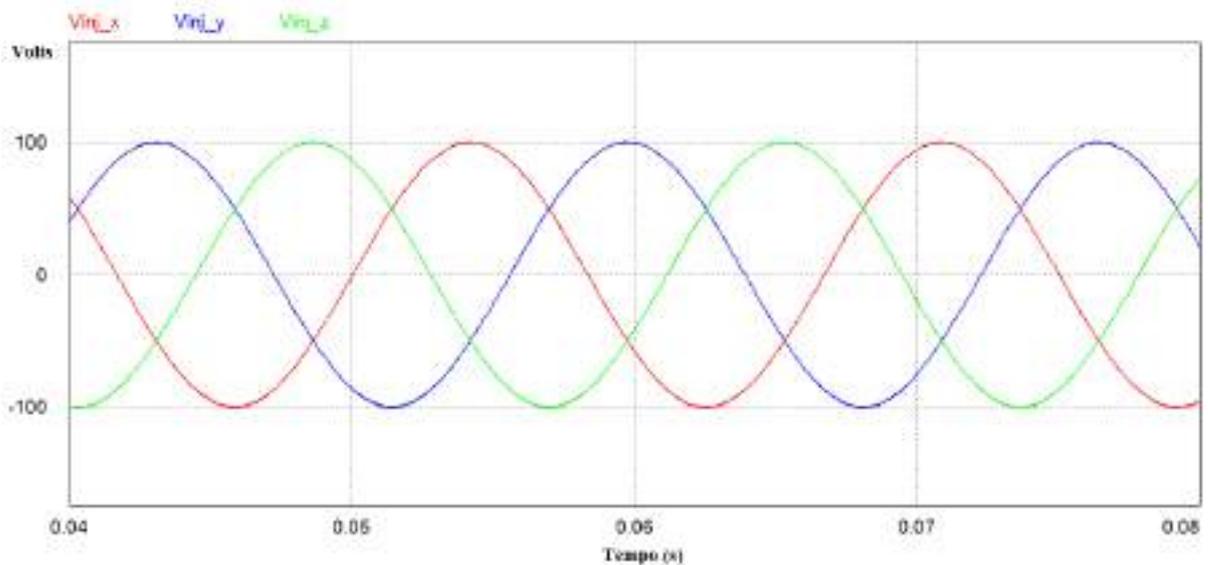
As formas de onda obtidas para as tensões no PCC, tensões injetadas pelo DVR-VSI e das tensões na carga durante o Modo 2 são mostradas nas Figuras 53, 54 e 55, respectivamente.

Figura 53 – Tensões no PCC durante o Modo 2.



Fonte: próprio autor.

Figura 54 – Tensões injetadas pelo DVR durante o Modo 2.

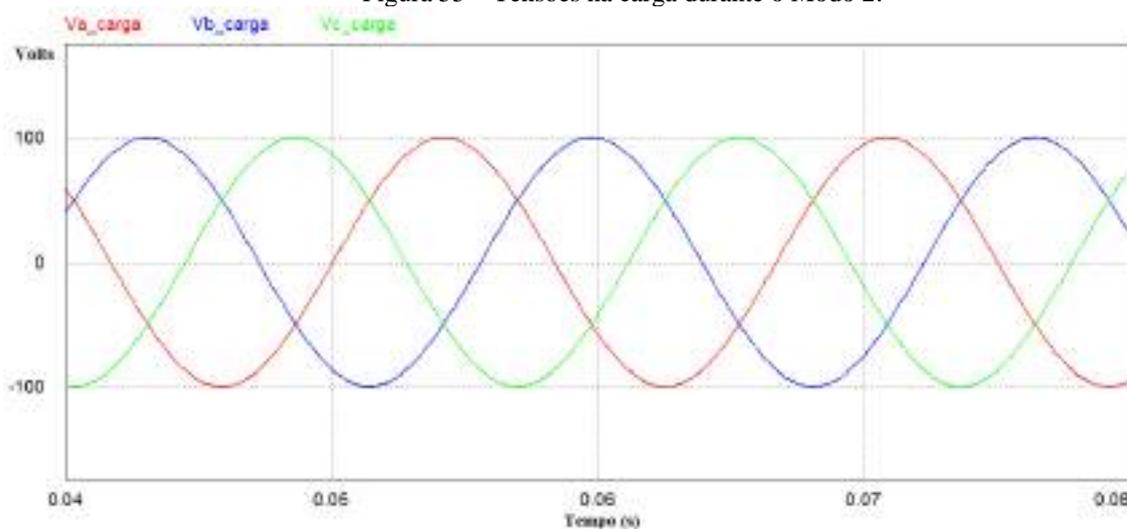


Fonte: próprio autor.

A tensão no PCC foi muito próxima a zero, apresentando uma amplitude de apenas 197,76 μV com uma THD de 0,0135 %.

As tensões injetadas pelo DVR-VSI apresentaram amplitude de 100,93 V, o que corrobora com o esperado, tendo em vista que durante o Modo Falta o DVR-VSI deve injetar a tensão nominal da carga. Além disso, a THD das tensões injetadas foi de 0,4727 %.

Figura 55 – Tensões na carga durante o Modo 2.

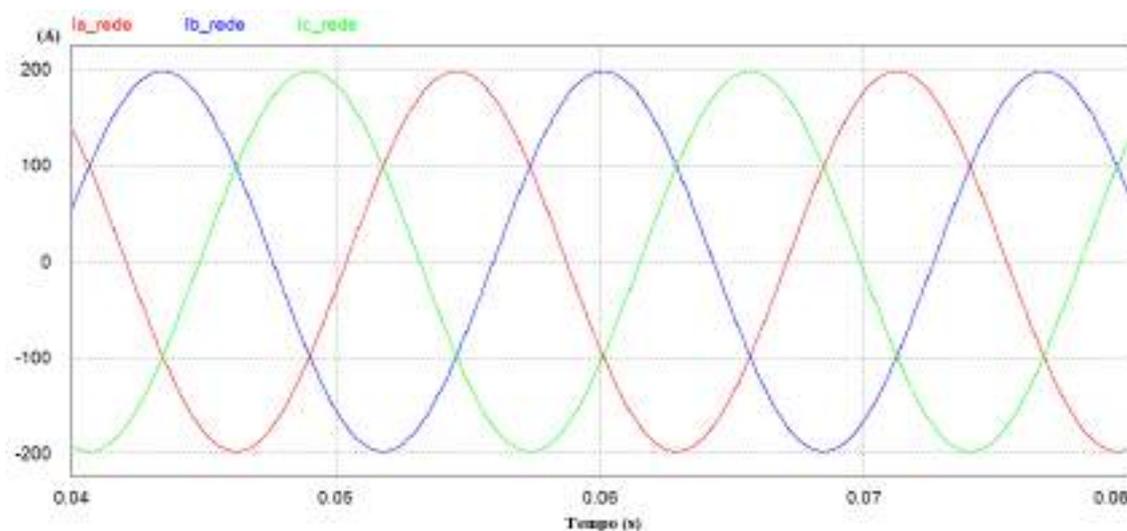


Fonte: próprio autor.

As tensões na carga assumem uma amplitude de 100,75 V com uma THD de 0,43 %. Este resultado concorda de maneira fiel com o esperado, tendo em vista que apesar da tensão no PCC ser aproximadamente zero, o DVR-VSI foi capaz fornecer a tensão nominal da carga.

Nas Figuras 56, 57 e 58 são apresentadas as formas de onda obtidas para as correntes na rede, correntes *shunt* e correntes na carga durante o Modo Falta, respectivamente.

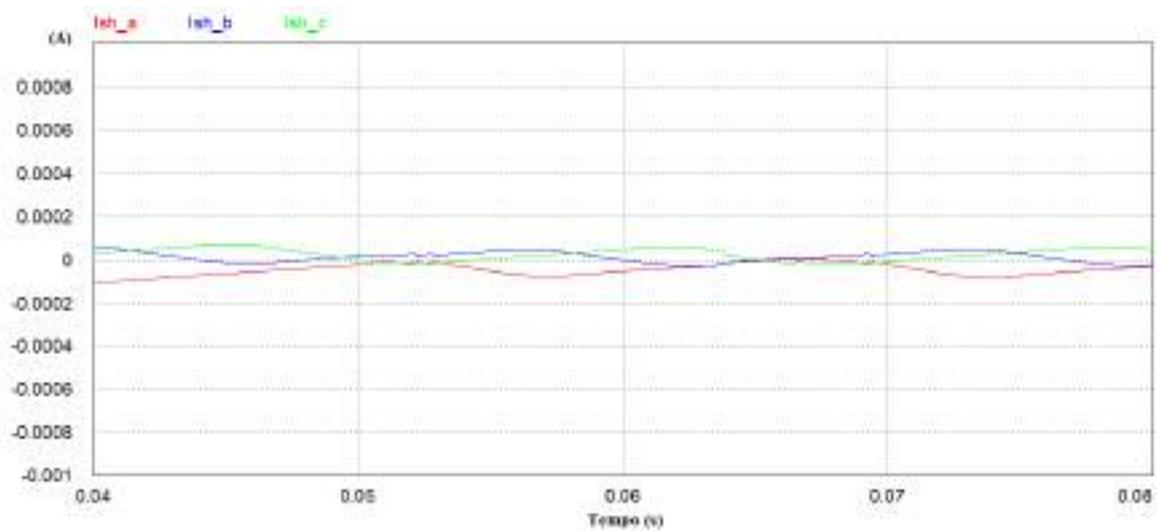
Figura 56 – Correntes na rede durante o Modo 2.



Fonte: próprio autor.

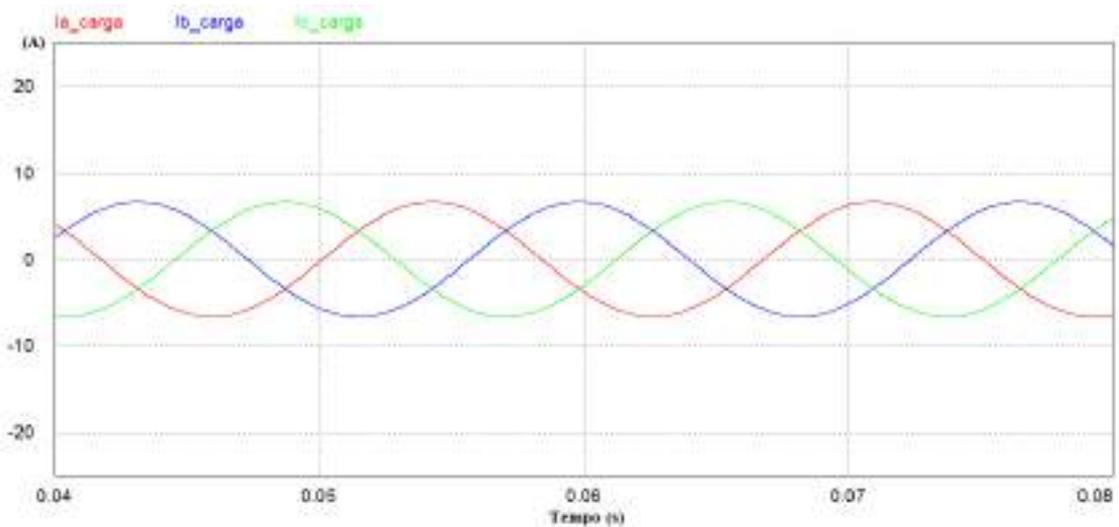
As correntes obtidas na rede apresentaram 197,76 A de amplitude. Este valor elevado já era esperado, tendo em vista que esta é a corrente resultante da falta provocada no PCC. Além disso, a THD dessas correntes foi de 0,0136 %.

Figura 57 – Correntes injetadas pelo PV-VSI durante o Modo 2.



Fonte: próprio autor.

Figura 58 – Correntes na carga durante o Modo 2.



Fonte: próprio autor.

Entre as correntes injetadas a que apresentou maior amplitude foi a referente a saída 'a' do PV-VSI, sendo esta amplitude igual $96,65 \mu\text{A} \approx 0$. Este comportamento era esperado pois durante o Modo 2, de fato, a injeção de corrente pelo PV-VSI deve cessar.

As correntes na carga assumem amplitude igual a 6,67 A com uma THD de 0,19 %, o que foi um excelente resultado, tendo em vista que houve uma concordância excelente entre os valores nominais da carga.

Sendo assim, a simulação do Modo 2 foi finalizada. Os resultados obtidos aqui foram adequados e corroboraram com todos os comportamentos esperados para este modo de operação.

4.2.3. Modo 3 – Afundamento

O sistema opera em Modo 3 quando a tensão no PCC está entre 0,1 p.u. e 0,9 p.u., neste caso, o valor de m_{DVR} deve ser ajustado de forma a corrigir o afundamento, enquanto que m_{PV} será ajustado para injeção de corrente na rede.

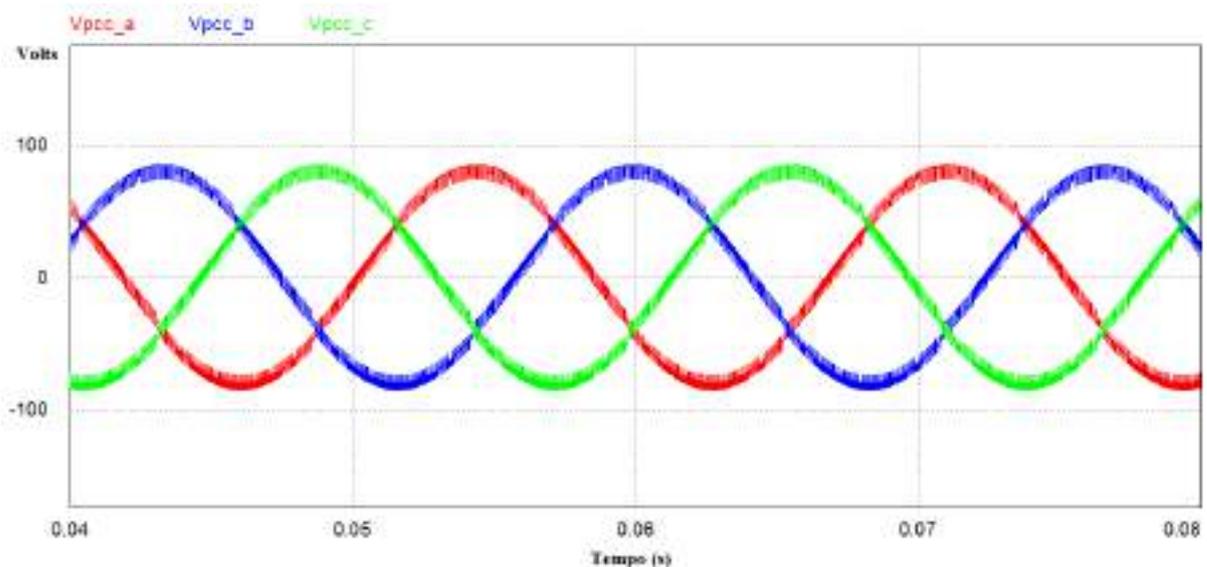
Um afundamento de tensão trifásico balanceado é aquele no qual as tensões da rede têm uma redução em sua magnitude de igual valor. Este é o tipo de distúrbio de tensão que será emulado durante o Modo 3 de operação do sistema. Para provocar um afundamento de tensão balanceado na plataforma de simulação, o procedimento seguido foi reduzir igualmente as amplitudes de pico das fontes senoidais que compõem o modelo da rede.

Diferentemente dos Modos Normal e Falta, existem várias combinações possíveis de profundidades de afundamentos e de valores para m_{PV} e m_{DVR} que emulam o funcionamento do sistema no Modo 3. Neste trabalho serão apresentados os resultados referentes ao seguinte cenário: a rede enfrenta um afundamento de 20 %, m_{DVR} será alterado para 0,2 a fim de efetuar a compensação do distúrbio e m_{PV} será alterado para 0,92.

Ao simular o sistema os primeiros resultados obtidos foram as seguintes formas de onda: tensões no PCC, tensões injetadas pelo DVR-VSI e tensões na carga. Estes resultados foram medidos e são apresentadas nas Figuras 59, 60 e 61, respectivamente.

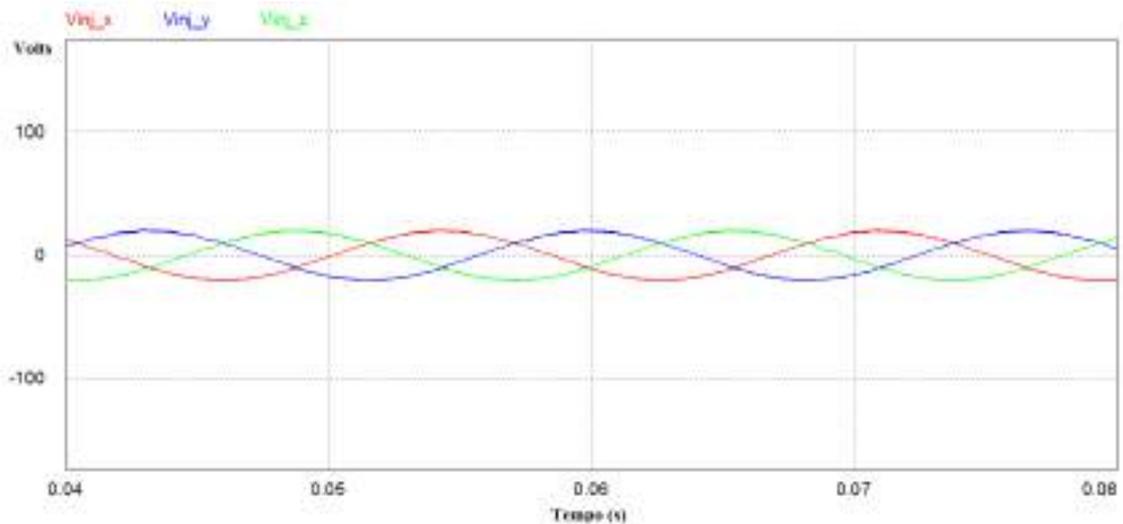
A amplitude observada para as tensões no PCC foi de 84,9 V com uma THD de 6,84 %.

Figura 59 – Tensões no PCC durante o Modo 3.



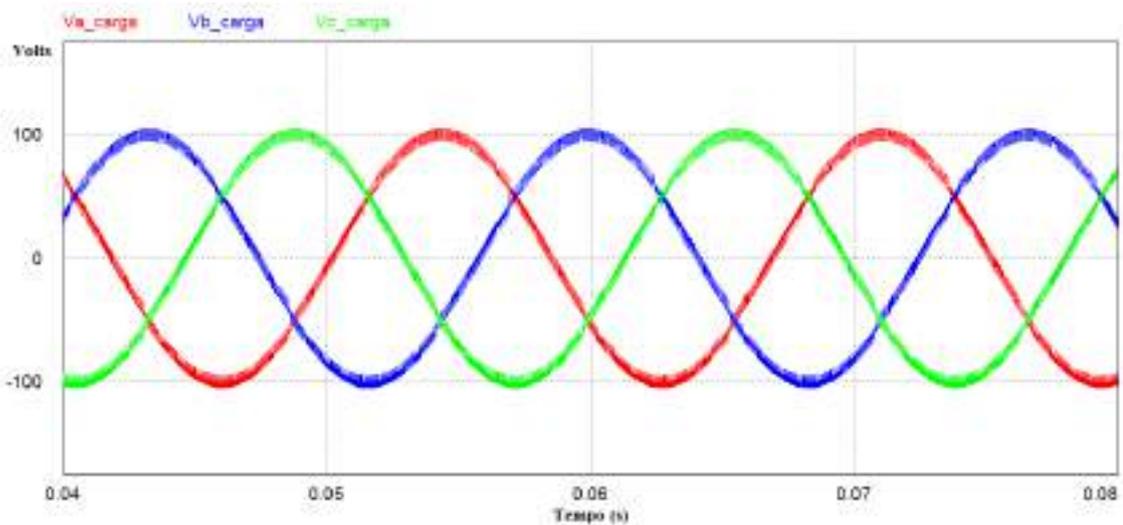
Fonte: próprio autor.

Figura 60 – Tensões injetadas pelo DVR-VSI durante o Modo 3.



Fonte: próprio autor.

Figura 61 – Tensões na carga durante o Modo 3.



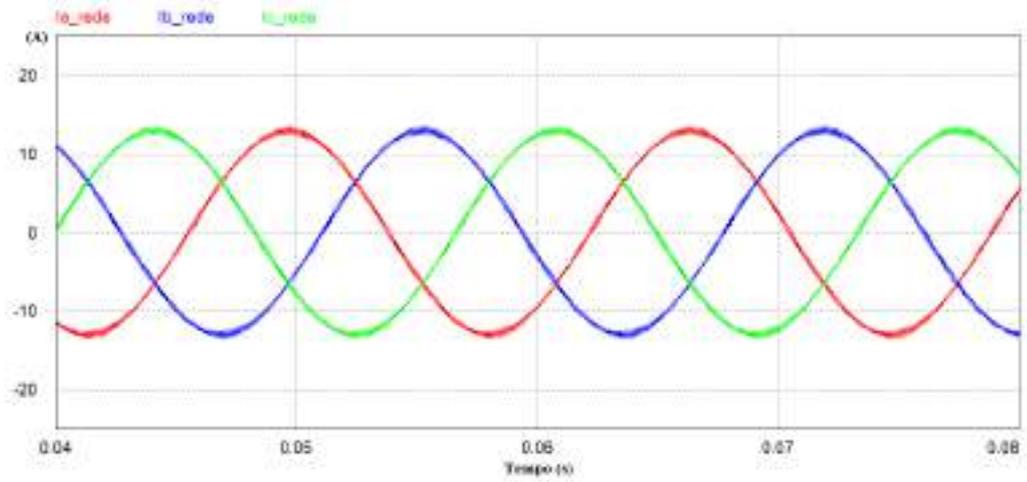
Fonte: próprio autor.

A Figura 60 mostra que o DVR-VSI injetou tensões com amplitude de 20,26 V e THD de 1,8 %. Este comportamento concorda com o esperado, tendo em vista que as tensões injetadas deverão ser somadas as tensões do PCC para resultar na tensão nominal da carga.

Analisando as tensões na carga apresentadas na Figura 61 nota-se que tais tensões possuem amplitude igual a 105,23 V com uma THD de 4,76 %. As tensões observadas na carga foram 5,23% maiores do que a nominal, uma solução seria realizar um ajuste fino no valor de m_{PV} , porém, este valor é aceitável.

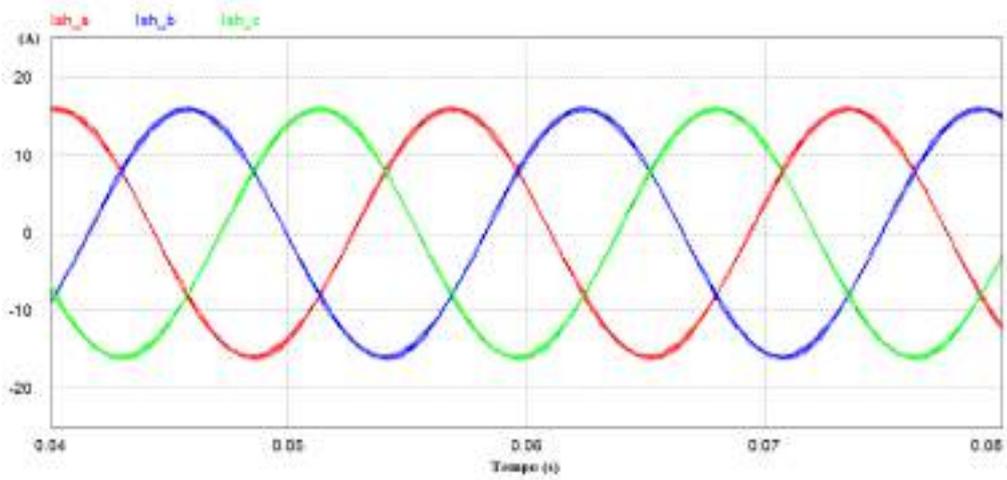
As formas de onda obtidas para as correntes da rede, correntes injetadas pelo PV-VSI e correntes na carga, são apresentadas nas Figuras 62, 63 e 64, respectivamente.

Figura 62 – Correntes da rede durante o Modo 3.



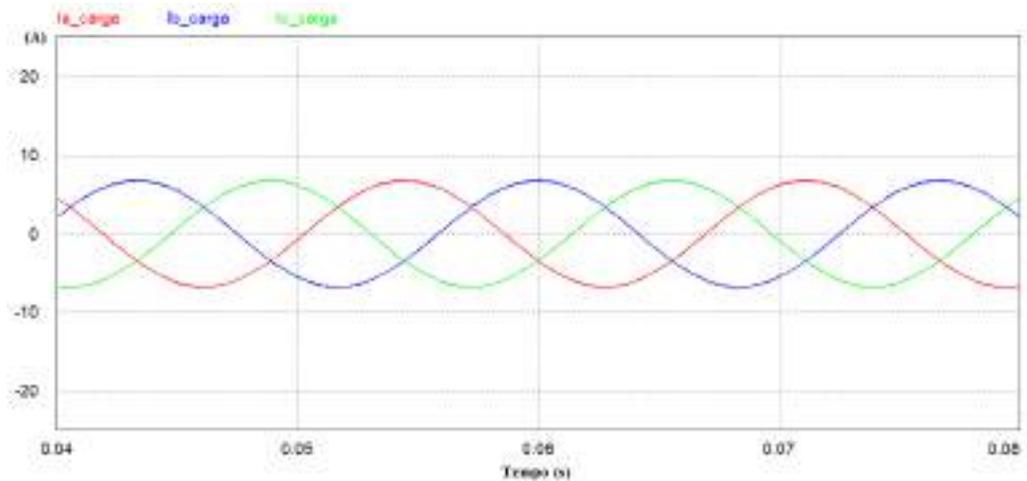
Fonte: próprio autor.

Figura 63 – Correntes injetadas pelo PV-VSI durante o Modo 3.



Fonte: próprio autor.

Figura 64 – Correntes na carga durante o Modo 3.



Fonte: próprio autor.

As correntes na rede durante o Modo Afundamento apresentaram uma amplitude igual a 13,48 A e THD de 2,49 %. Enquanto que as correntes injetadas na rede pelo PV-VSI assumiram 16,26 A de amplitude com THD de 2,36 %. Já a carga experimentou correntes de 6,88 A de amplitude e THD de 0,83%. Com isso a simulação de todos os modos de funcionamento foi finalizada, sendo todos os resultados obtidos coerentes com as características intrínsecas a cada modo discutidas ao longo deste trabalho.

A fim de proporcionar uma melhor visualização quantitativa dos resultados obtidos, os valores de pico e de THD das grandezas monitoradas durante a simulação de cada modo de operação foram agrupados na Tabela 10. Nessa tabela V_{PCC} , V_{inj} e V_{carga} são as tensões no PCC, tensões injetadas pelo DVR-VSI e tensões na carga, respectivamente, enquanto que I_{rede} , I_{sh} e I_{carga} são as correntes na rede, as correntes injetadas pelo PV-VSI e as correntes na carga, respectivamente.

Tabela 10 – Resumo dos resultados obtidos para cada modo.

Grandeza	Valor					
	Modo 1 – Normal		Modo 2 – Falta		Modo 3 – Afundamento	
	Pico	% THD	Pico	% THD	Pico	% THD
V_{PCC}	104,68 V	4,66	197,76 μ V	0,0135	84,90 V	6,84
V_{inj}	1,32 V	1,14	100,93 V	0,4727	20,26 V	1,8
V_{carga}	104,45 V	3,92	100,75 V	0,43	105,23 V	4,76
I_{rede}	16,37 A	1,83	197,76 A	0,0136	13,48 A	2,49
I_{sh}	19,25 A	1,76	≈ 0	----	16,26 A	2,36
I_{carga}	6,90 A	0,69	6,67 A	0,19	6,88 A	0,83

Fonte: próprio autor.

5. CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho foi apresentado um sistema capaz de integrar as funções de planta fotovoltaica injetando potência ativa na rede, com um DVR realizando compensações de tensão, sendo o elemento integrador desses subsistemas o NSI.

O primeiro grande desafio enfrentado foi entender o esquema de modulação utilizado para o NSI. Esta etapa resultou na implementação de um código em MATLAB capaz de simular o processo de obtenção dos sinais de gatilho para o NSI, fornecer as tensões de saída do inversor e ainda fazer a detecção de curto-circuito do barramento c.c. Este código foi de grande valia para o entendimento e validação do esquema de modulação PWM descontínua de 120° utilizado, além disso, pode servir de base para o teste e validação de outras possíveis estratégias de modulação.

A construção da plataforma de simulação completa em ambiente PSIM proporcionou a possibilidade de simular todos os modos de operação do sistema. Esta plataforma se mostrou uma excelente ferramenta para a compreensão e obtenção de resultados de maneira rápida e eficiente do sistema completo.

Baseado nos resultados agrupados na Tabela 10, nota-se que durante o Modo Normal o DVR-VSI injetou tensões de apenas 1,32 V de amplitude, o que representa apenas 1,32 % da tensão de pico da rede. Durante este modo, ocorreu como esperado a maior injeção de corrente na rede por parte do PV-VSI, no entanto, a THD da corrente da rede foi de apenas 1,83 %. A tensão na carga durante o Modo Normal foi 4,45 % maior do que a nominal (100 V de pico), isso ocorreu devido a tensão no PCC já estar superior a nominal. Ainda no Modo 1, a corrente na carga foi 3,45 % maior que o seu valor nominal, sendo isto uma consequência da tensão ligeiramente maior da carga.

O melhor desempenho do sistema ocorreu durante o Modo Falta, onde a carga experimentou tensões e correntes praticamente iguais a suas nominais, sendo a diferença em relação ao valor nominal de tensão de apenas 0,75 %. Como esperado para este modo de operação, o PV-VSI injetou correntes desprezíveis, enquanto que o DVR-VSI se mostrou capaz de fornecer a tensão nominal da carga praticamente sem distorções.

As maiores THDs para todas as grandezas monitoradas foram encontradas durante o Modo Afundamento, isto já era esperado, tendo em vista que diferentemente dos Modos 1 e 2, no Modo 3 todas as nove chaves do NSI estão operando em regime PWM.

Analisando os resultados obtidos agrupados na Tabela 10, percebe-se que a carga não foi submetida a grandes variações em seus valores de tensão e corrente de um modo de operação

para o outro, fazendo com que a carga tenha experimentado tensões e correntes muito similares a seus valores nominais em todos os modos de operação.

Durante as simulações de cada modo, ficaram evidenciadas todas as características esperadas inerentes a cada modo de operação, o que qualifica o sistema PV-DVR integrado via NSI como funcional. Sendo assim, de fato, o sistema integrado PV-DVR apresenta vantagens em relação a configuração que utiliza esses dois subsistemas isolados, pois, o uso do NSI implica na economia de três chaves, que por consequência reduz o custo e o volume do sistema abordado ao longo deste trabalho.

Este trabalho apresentou um estudo e simulação da aplicação do NSI na integração PV-DVR, abrindo um leque de possibilidades de propostas de melhorias em trabalhos futuros, entre estas possibilidades pode-se destacar:

- a) implementação do sistema de controle para o PV-DVR
- b) validação experimental
- c) estudo de novas estratégias de modulação
- d) verificar cenários com afundamentos assimétricos

As possibilidades de trabalhos futuros citadas nos itens acima serão sem dúvidas facilitadas pela utilização dos resultados obtidos neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. A. Fernandes. Um Restaurador Dinâmico de Tensão para Correções de Variações de Tensão de Curta Duração em Redes Elétricas Trifásicas. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.
- [2] Empresa de Pesquisa Energética. Projeção da Demanda de Energia Elétrica para os Próximos 10 Anos (2013-2022). Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- [3] ANEEL. [S.l.], 2012. Resolução Normativa 482/2012.
- [4] ANEEL. [S.l.], 2018. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica.
- [5] J. Nielsen, F. Blaabjerg, N. Mohan. Control strategies for dynamic voltage restorer compensating voltage sags with phase jumps. In: *IEEE-PELS-IAS. Proceedings of Applied Power Electronics Conference and Exposition. Anaheim-Ca, 2001*. v. 2, p. 1267-1273. APEC'01.
- [6] Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES), CEPEL – CRESESB. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- [7] R. Zilles et al. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. São Paulo: Editora de textos, 2012.
- [8] T. Kominami, Y. Fujimoto. A novel nine-switch inverter for independent control of two three-phase loads. In *Proc. IEEE-Ind. Applicat. Soc. (IAS)s*, pp. 2346-2350, 2007.
- [9] C. Liu, B. Wu, N. R. Zargari, D. Xu, J. Wang. A novel three-phase three-leg ac/ac converter using nine IGBTs. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1151-1160, May 2009.

- [10] L. Zhang, P. C. Loh, F. Gao. An Integrated Nine-Switch Power Conditioner for Power Quality Enhancement and Voltage Sag Mitigation. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 3, pp. 1177–1190, May 2012.
- [11] C. Liu, B. Wu, N. R. Zargari, D. Xu, J. Wang. A novel Nine-Switch PWM rectifier-inverter topology for three-phase UPS applications. *Proc. IEEE-Everyday Practical Electron. (EPE)*, 2007, pp. 1-10.
- [12] J. Kaniewski, Z. Fedyczak, G. Benysek. AC Voltage sag/well compensator based on three-phase hybrid transformer with buck-boost matrix-reactance chopper. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 8, pp. 3835-3846, Aug. 2014.
- [13] A. M. Rauf, V. Khadkikar. Integrated Photovoltaic and Dynamic Voltage Restorer System Configuration. *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 400-410, May 2015.
- [14] F. Gao, L. Zhang, D. Li, P. C. Loh, Y. Tang, H. Gao. Optimal Pulsewidth Modulation of Nine-Switch Converter. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 9, pp. 2331-2343, Sep. 2010.
- [15] O. Ojo. The Generalized Discontinuous PWM Scheme for Three-Phase Voltage Source Inverters. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 6, pp. 1280-1289, Dec. 2004.
- [16] S. M. D. Dehnavi, M. Mohamadian, A. Yazdian, F. Ashrafzadeh. Space Vectors Modulation for Nine-Switch Converters. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 6, pp. 1488-1496, Jun. 2010.
- [17] POWERSIM. [S.I], 2016. PSIM User's Guide.

APÊNDICE A

SCRIPT DESENVOLVIDO EM AMBIENTE MATLAB PARA VERIFICAR O FUNCIONAMENTO ADEQUADO DO ESQUEMA MODULAÇÃO

```

% Script file: teste_modulacao.m
%
% Propósito:
%     Simular o esquema de modulação do inversor nove chaves
%
% Registro de revisões:
%     Data           Programador           Descrição de mudança
%     ====           =====           =====
%     04/05/18      Jefferson Rafael           Código Original

% Definição de Variáveis
Mpv = 1;           % Amplitude das referências senoidais Va*,Vb* e Vc* do PV-VSI
Mdvr = 0;         % Amplitude das referências senoidais Vx*,Vy* e Vz* do DVR-VSI
wpv = 2*pi*60;    % Frequência angular das senóides Va*,Vb* e Vc* do PV-VSI
wdvr = 2*pi*60;   % Frequência angular das senóides Vx*,Vy* e Vz* do DVR-VSI
teta_pv = 0;      % Fase inicial das senóides Va*,Vb* e Vc* do PV-VSI
teta_dvr = 0;     % Fase inicial das senóides Vx*,Vy* e Vz* do DVR-VSI
t = 0:1e-5:1;     % Vetor tempo
wc = 2*pi*10000;  % Frequência angular da portadora triangular
portadora = sawtooth(wc*t,0.5); % Portadora
Va_ref = zeros(1,length(t)); % Tensões de referência modificadas para Va,Vb e Vc
Vb_ref = zeros(1,length(t));
Vc_ref = zeros(1,length(t));
Vx_ref = zeros(1,length(t)); % Tensões de referência modificadas para Vx,Vy e Vz
Vy_ref = zeros(1,length(t));
Vz_ref = zeros(1,length(t));
vetor_aux1 = zeros(1,3); % Vetor auxiliar à comparação de máximos
vetor_aux2 = zeros(1,3); % Vetor auxiliar à comparação de mínimos
Gaux_pv1 = zeros(1,length(t)); % Sinais de Gatilho Auxiliares Gaux_pv_1-2-3
Gaux_pv2 = zeros(1,length(t));
Gaux_pv3 = zeros(1,length(t));
Gaux_dvr7 = zeros(1,length(t)); % Sinais de Gatilho Auxiliares Gaux_dvr_7-8-9
Gaux_dvr8 = zeros(1,length(t));
Gaux_dvr9 = zeros(1,length(t));
G1 = zeros(1,length(t)); % Sinais de Gatilho
G2 = zeros(1,length(t));
G3 = zeros(1,length(t));
G4 = zeros(1,length(t));
G5 = zeros(1,length(t));
G6 = zeros(1,length(t));
G7 = zeros(1,length(t));
G8 = zeros(1,length(t));
G9 = zeros(1,length(t));
vdc = 200; % Tensão do barramento c.c.

```

```

Van = zeros(1,length(t));      % Tensões da saída superior - PV
Vbn = zeros(1,length(t));
Vcn = zeros(1,length(t));
Vxn = zeros(1,length(t));      % Tensões da saída inferior - DVR
Vyn = zeros(1,length(t));
Vzn = zeros(1,length(t));
% -----

% Sinais de referência senoidais
Va = Mpv*cos(wpv*t + teta_pv);
Vb = Mpv*cos(wpv*t - 120*pi/180 + teta_pv);
Vc = Mpv*cos(wpv*t + 120*pi/180 + teta_pv);

Vx = Mdvr*cos(wdvr*t + teta_dvr);
Vy = Mdvr*cos(wdvr*t - 120*pi/180 + teta_dvr);
Vz = Mdvr*cos(wdvr*t + 120*pi/180 + teta_dvr);
% -----

% Sinais de referência modificados descontínuos de 120° e Gatilhos
for i=1:length(t)
    vetor_aux1 = [Va(i) Vb(i) Vc(i)];
    vetor_aux2 = [Vx(i) Vy(i) Vz(i)];

    Va_ref(i) = Va(i) + 1 - max(vetor_aux1);
    Vb_ref(i) = Vb(i) + 1 - max(vetor_aux1);
    Vc_ref(i) = Vc(i) + 1 - max(vetor_aux1);

    Vx_ref(i) = Vx(i) - 1 - min(vetor_aux2);
    Vy_ref(i) = Vy(i) - 1 - min(vetor_aux2);
    Vz_ref(i) = Vz(i) - 1 - min(vetor_aux2);

    % Geração dos Sinais de Gatilho
    % Gatilho Auxiliares
    % Gatilho auxiliar PV 1
    if Va_ref(i) > portadora(i)
        Gaux_pv1(i) = 1;
    else
        Gaux_pv1(i) = 0;
    end
    % Gatilho auxiliar PV 2
    if Vb_ref(i) > portadora(i)
        Gaux_pv2(i) = 1;
    else
        Gaux_pv2(i) = 0;
    end
    % Gatilho auxiliar PV 3
    if Vc_ref(i) > portadora(i)
        Gaux_pv3(i) = 1;
    else
        Gaux_pv3(i) = 0;
    end
    % -----
    % Gatilho auxiliar DVR 7:
    if Vx_ref(i) > portadora(i)
        Gaux_dvr7(i) = 1;
    else
        Gaux_dvr7(i) = 0;
    end
end

```

```

% Gatilho auxiliar DVR 8
if vy_ref(i) > portadora(i)
    Gaux_dvr8(i) = 1;
else
    Gaux_dvr8(i) = 0;
end
% Gatilho auxiliar DVR 9
if Vz_ref(i) > portadora(i)
    Gaux_dvr9(i) = 1;
else
    Gaux_dvr9(i) = 0;
end
%-----
% Criando os sinais de Gatilho:
G1(i) = Gaux_pv1(i);
G2(i) = Gaux_pv2(i);
G3(i) = Gaux_pv3(i);
G4(i) = or(not(Gaux_pv1(i)),Gaux_dvr7(i));
G5(i) = or(not(Gaux_pv2(i)),Gaux_dvr8(i));
G6(i) = or(not(Gaux_pv3(i)),Gaux_dvr9(i));
G7(i) = not(Gaux_dvr7(i));
G8(i) = not(Gaux_dvr8(i));
G9(i) = not(Gaux_dvr9(i));
% -----

% Teste se três chaves de um mesmo braço fecham juntas
if (G1(i) == G4(i) == G7(i) == 1)||G2(i) == G5(i) == G8(i) == 1)...
    ||(G3(i) == G6(i) == G9(i) == 1)
    fprintf('\n O barramento CC está curto-circuitado! \n\n');
else
    if i == length(t)
        fprintf('\n O barramento CC está em segurança! \n\n');
    end
end

% Tensões de saída Van e Vxn --> Braço 1
if G1(i) == 1 && G4(i) == 1 && G7(i) == 0
    Van(i) = vdc;
    Vxn(i) = vdc;
else
    if G1(i) == 1 && G4(i) == 0 && G7(i) == 1
        Van(i) = vdc;
        Vxn(i) = 0;
    else
        if G1(i) == 0 && G4(i) == 1 && G7(i) == 1
            Van(i) = 0;
            Vxn(i) = 0;
        end
    end
end

% Tensões de saída Vbn e Vyn --> Braço 2
if G2(i) == 1 && G5(i) == 1 && G8(i) == 0
    Vbn(i) = vdc;
    Vyn(i) = vdc;
else
    if G2(i) == 1 && G5(i) == 0 && G8(i) == 1
        Vbn(i) = vdc;
        Vyn(i) = 0;
    end
end

```

```
else
    if G2(i) == 0 && G5(i) == 1 && G8(i) == 1
        van(i) = 0;
        vxn(i) = 0;
    end
end
end
end
% Tensões de saída Vcn e Vzn --> Braço 3
if G3(i) == 1 && G6(i) == 1 && G9(i) == 0
    vcn(i) = vdc;
    vzn(i) = vdc;
else
    if G3(i) == 1 && G6(i) == 0 && G9(i) == 1
        vcn(i) = vdc;
        vzn(i) = 0;
    else
        if G3(i) == 0 && G6(i) == 1 && G9(i) == 1
            vcn(i) = 0;
            vzn(i) = 0;
        end
    end
end
end
end
end
% -----
```