

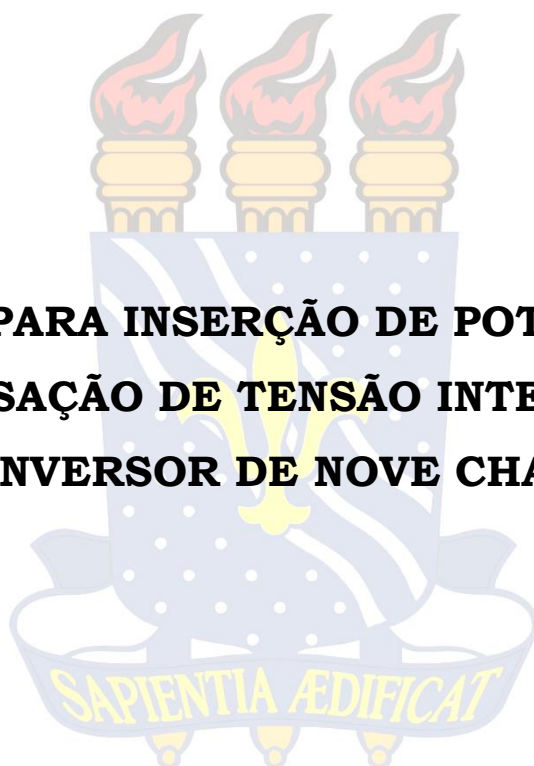


UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

SISTEMAS PARA INSERÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA E COMPENSAÇÃO DE TENSÃO INTEGRADOS VIA INVERSOR DE NOVE CHAVES



JEFFERSON RAFAEL PEREIRA DE ASSIS

JOÃO PESSOA, BRASIL

Novembro de 2021

JEFFERSON RAFAEL PEREIRA DE ASSIS

**SISTEMAS PARA INSERÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA E COMPENSAÇÃO DE
TENSÃO INTEGRADOS VIA INVERSOR DE NOVE CHAVES**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Darlan Alexandria Fernandes

Área de Conhecimento: Processamento de Energia

JOÃO PESSOA

Novembro de 2021

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A848s Assis, Jefferson Rafael Pereira de.
Sistemas para inserção de potência ativa e compensação
de tensão integrados via inversor de nove chaves /
Jefferson Rafael Pereira de Assis. - João Pessoa, 2021.
117 f. : il.

Orientação: Darlan Alexandria Fernandes.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Engenharia elétrica. 2. Qualidade de energia.
3. Inversor de nove chaves. 4. Restaurador dinâmico de tensão.
I. Fernandes, Darlan Alexandria. II. Título.

UFPB/BC

CDU 621.3(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**SISTEMAS PARA INSERÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA E COMPENSAÇÃO DE
TENSÃO INTEGRADOS VIA INVERSOR DE NOVE CHAVES**

Elaborada por

JEFFERSON RAFAEL PEREIRA DE ASSIS

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

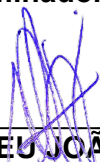
COMISSÃO EXAMINADORA



PROF. DR. DARLAN ALEXANDRIA FERNANDES
Orientador – UFPB



PROF. DR. EDISON ROBERTO CABRA DA SILVA
Examinador Interno – UFPB



PROF. DR. ALFEU JOAOZINHO SGUAREZI FILHO
Examinador Externo – UFABC

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 companheira de vida, por estar sempre ao meu lado.

Ao professor Darlan, por sempre me incentivar e confiar no meu trabalho. Além da paciência, disponibilidade e expertise compartilhada durante a excelente orientação deste trabalho.

Agradeço ainda, aos professores Edison e Alfeu, 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.

Por fim, aproveito para agradecer a todos que fizeram parte da minha formação acadêmica, e que, de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise do funcionamento de um inversor trifásico de tensão de nove chaves (NSI – *Nine Switch Inverter*) aplicado a integração de um sistema para inserção de potência na rede e um Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR – *Dynamic Voltage Restorer*), bem como, um sistema de controle e esquema de modulação adequados para este propósito. A utilização de um inversor de tensão trifásico de nove chaves é capaz de unir a função inserção de potência na rede e DVR em um único sistema, reduzindo o número necessário de chaves de doze para nove, o que permite desonerar o custo do sistema e manter as duas funcionalidades. O esquema de modulação utilizado, o sistema de controle e todos os modos de operação do sistema integrado são discutidos e tem seu funcionamento analisado por meio de simulação utilizando o *software* Simulink/MATLAB. A validação do sistema apresentado é realizada através de simulações em tempo real no simulador OP5700 da OPAL-RT *Technologies*.

Palavras-chave: Qualidade de Energia, Inversor de Nove Chaves, Restaurador Dinâmico de Tensão.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the operation of a nine-switch three-phase voltage inverter (NSI - Nine-Switch Inverter) designed as an integration of a system to insert power into the grid with a Dynamic Voltage Restorer (DVR), as well as a control system and modulation scheme suitable for this purpose. The use of a nine-switch three-phase voltage inverter is able to unite the power insertion function in the network and DVR in a single system, according to the necessary number of switches from nine to nine, which allows reducing the cost of the system and maintaining as two features. The modulation scheme used, the control system and all modes of operation of the integrated system are discussed and its operation is analyzed through simulation using the Simulink / MATLAB software. The validation of the presented system is performed through real-time simulations in the OP5700 simulator from OPAL-RT Technologies.

Keywords: Power Quality, Nine Switch Inverter, Dynamic Voltage Restorer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Tipos de variações de tensão de curta duração.	20
Figura 2. Configuração básica de um DVR.....	21
Figura 3. Sistema fotovoltaico conectado à rede.	22
Figura 4. Topologia do NSI.	24
Figura 5. Sistemas PV e DVR isolados entre si.	23
Figura 6. Sistema PV-DVR integrados via NSI.	31
Figura 7. Situação do NSI durante o Modo 1.	32
Figura 8. Situação do NSI durante o Modo 2.	33
Figura 9. Situação do NSI durante o Modo 3.	34
Figura 10. Cenário necessário para implementação da modulação.	37
Figura 11. Referências com frequências distintas.	37
Figura 12. Etapas para obtenção dos sinais de gatilho do NSI.	41
Figura 13. Resultado de simulação: obtenção de sinais modificados.	43
Figura 14. Resultado de simulação: Sinais de Gatilho.	44
Figura 15. Tensão de polo nas saídas do NSI.	45
Figura 16. Esquema de controle PV-VSI.	47
Figura 17. Esquema de controle do PV simplificado.	48
Figura 18. Esquema de controle do DVR.	49
Figura 19. Resultado de simulação: V_{pcc} e corrente injetada.	51
Figura 20. Resultados de simulação: controle do PV – modo normal.	52
Figura 21. Esquemático simplificado de simulação.	53
Figura 22. Resultado de simulação: controle do DVR.	54
Figura 23. Resultado de simulação: sinais de controle DVR	55
Figura 24. Resultado de simulação: sinais de controle DVR	56
Figura 25. Resultado de simulação: saída do controle do DVR.	57
Figura 26. Resultado de simulação: controle do DVR - Assimetria.	59
Figura 27. Vetores v_p e v_n	61
Figura 28. Resultado de simulação: decomposição em componentes de sequência.	62
Figura 29. Diagrama funcional do sistema de controle completo.	63
Figura 30. Processo de simulação HIL.	66
Figura 31. Processo de simulação PHIL.	67

Figura 32. Processo de simulação RCP.	68
Figura 33. Processo de simulação SIL.	68
Figura 34. Foto do simulador em tempo real OP5700.	69
Figura 35. Metodologia de simulação em tempo real.	70
Figura 36. Esquemático do sistema simulado.	74
Figura 37. Resultado de simulação: Simulink – modo normal.....	75
Figura 38. Resultado de simulação: Simulink – modo falta.....	77
Figura 39. Resultado de simulação: Simulink – modo afundamento – simétrico.	78
Figura 40. Resultado de simulação: Simulink – modo afundamento – assimétrico.....	79
Figura 41. Resultado de simulação: Simulink – transição entre modos de operação.....	81
Figura 42. Resultado de simulação: Simulink – falta assimétrica monofásica.	82
Figura 43. Resultado de simulação: Simulink – falta assimétrica bifásica.	83
Figura 44. Resultado de simulação: OP5700 – modo normal.	85
Figura 45. Resultado de simulação: OP5700 – modo falta.	86
Figura 46. Resultado de simulação: OP5700 – modo afundamento – simétrico.....	87
Figura 47. Resultado de simulação: OP5700 – modo afundamento – assimétrico.	88
Figura 48. Resultado de simulação: OP5700 – transição entre modos de operação.	90
Figura 49. Resultado de simulação: OP5700 – falta assimétrica – monofásica.	91
Figura 50. Resultado de simulação: OP5700 – falta assimétrica – bifásica.	92
Figura 51. Apêndice A: Esquema de modulação - Simulink.	105
Figura 52. Apêndice B: Controle do PV - Simulink.	106
Figura 53. Apêndice C: Controle do DVR - Simulink.	107
Figura 54. Apêndice D: Modelo Simulink para tempo real.	108
Figura 55. Apêndice D: Localização do <i>OpComm Block</i>	109
Figura 56. Apêndice E: Plataforma de Simulação - Parte 1.	110
Figura 57. Apêndice E: Plataforma de simulação - Parte 2.....	111
Figura 58. Apêndice F: Curva ITI (CBEMA).	112
Figura 59. Apêndice G: Resultado de simulação – modo normal.	113
Figura 60. Apêndice G: Resultado de simulação – modo falta.	114
Figura 61. Apêndice G: Resultado de simulação – afundamento simétrico.....	115
Figura 62. Apêndice G: Resultado de simulação – afundamento assimétrico.	116
Figura 63. Apêndice G: Resultado de simulação – transição entre modos de operação.	117
Figura 64. Apêndice G: Resultado de simulação – falta assimétrica monofásica.	118
Figura 65. Apêndice G: Resultado de simulação – falta assimétrica bifásica.	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação das VTCDs segundo o PRODIST.	20
Tabela 2. Estados de chaveamento possíveis para um braço do NSI.	25
Tabela 3. Estados de chaveamento admissíveis de um braço do NSI.	25
Tabela 4. Condições de operação de cada Modo.....	34
Tabela 5. Composição dos sinais de gatilho.....	41
Tabela 6. Valores de <i>mpv</i> e <i>mdvr</i> em cada modo de operação.	42
Tabela 7. Exemplo numérico.....	50
Tabela 8. Recursos do OP5700.	69
Tabela 9. Condições de contorno para a carga.	73
Tabela 10. Parâmetros de simulação	73
Tabela 11. Resumo dos resultados de simulação – Simulink.....	93
Tabela 12. Resumo dos resultados de simulação – Tempo Real – OP5700.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
c.a.	-	Corrente Alternada
CBEMA	-	<i>Computer and Business Equipment Manufacturers Association</i>
CBPWM	-	<i>Carrier-Based Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso Baseada em Portadora)
c.c.	-	Corrente Contínua
CF	-	<i>Common Frequency</i> (Frequência Comum)
CP	-	<i>Custom Power</i> (Potência Customizada)
CPT	-	<i>Current Peak Tracking</i>
DCS	-	Decomposição Instantânea em Componentes de Sequência
DFIG	-	<i>Doubly-Fed Electric Machine</i> (Máquina Elétrica de Alimentação Dupla)
DVR	-	<i>Dynamic Voltage Restorer</i> (Restaurador Dinâmico de Tensão)
EPE	-	Empresa de Pesquisa Energética
FACTS	-	<i>Flexible Alternating Current Transmission Systems</i> (Sistemas de Transmissão em Corrente Alternada Flexíveis)
FLNSI	-	<i>Four-Leg Nine-Switch Inverter</i> (Inversor de Nove Chaves com Quarto Braço)
FPGA	-	<i>Field Programmable Gate Array</i>
HIL	-	<i>Hardware-in-the-Loop</i>
IGBT	-	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> (Transistor Bipolar de Porta Isolada)
ITI	-	<i>Information Technology Institute Council</i>
LOSE	-	Laboratório de Otimização de Sistemas de Energia da UFPB
MNSPWM	-	<i>Modified Nonsinusoidal Pulse Width Modulation</i> Modulação por Largura de Pulso Não Senoidal Modificada
MPPT	-	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NSC	-	<i>Nine-Switch Converter</i> (Conversor de Nove Chaves)
NSBI	-	<i>Nine-Switch Boost Inverter</i> (Inversor Boost de Nove Chaves)
NSI	-	<i>Nine-Switch Inverter</i> (Inversor de Nove Chaves)
PCC	-	Ponto de Conexão Comum

PHIL	-	<i>Power Hardware-in-the-Loop</i>
PLL	-	<i>Phase Locked Loop</i> (Malha de Captura de Fase)
PRODIST	-	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
PV	-	<i>Photovoltaic</i> (Fotovoltaica)
PWM	-	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
QEE	-	Qualidade de Energia Elétrica
RCP	-	<i>Rapid Control Prototyping</i>
SAC	-	<i>Standard Atmospheric Condition</i> (Condição Atmosférica Padrão)
SFP	-	<i>Small Form Pluggable</i>
SIL	-	<i>Software-in-the-Loop</i>
SPWM	-	<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>
SVM	-	<i>Space Vector Modulation</i> (Modulação Vetorial Espacial)
SVPWM	-	<i>Space Vector Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso Vetorial Espacial)
THD	-	<i>Total Harmonic Distortion</i> (Distorção Harmônica Total)
UFPB	-	Universidade Federal da Paraíba
UPS	-	<i>Uninterruptible Power Supply</i> (Fonte de Energia Ininterrupta)
VF	-	<i>Variable Frequency</i> (Frequência Variável)
VSI	-	<i>Voltage Source Inverter</i> (Inversor Fonte de Tensão)
VTCD	-	Variação de Tensão de Curta Duração
ZVT	-	<i>Zero Vector Table</i>

Sumário

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Contextualização e Localização do Tema	18
1.1.1. Variações de Tensão de Curta Duração	19
1.1.2. Restaurador Dinâmico de Tensão	21
1.1.3. Planta Fotovoltaica Conectada à Rede	22
1.1.4. Sistemas PV-DVR Isolados	23
1.2. Revisão Bibliográfica	24
1.2.1. Princípio de Operação do NSI	24
1.2.2. Esquemas de Modulação para o NSI	26
1.2.3. Aplicações do NSI	27
1.3. Motivação	28
1.4. Objetivos do Trabalho	29
1.5. Organização do Trabalho	30
2. SISTEMA PV-DVR INTEGRADO	31
2.1. Descrição do Sistema PV-DVR Integrado	31
2.1.1. Modo 1 – Normal	32
2.1.2. Modo 2 – Falta	33
2.1.3. Modo 3 – Afundamento	33
2.2. Conclusões	35
3. ESQUEMA DE MODULAÇÃO	36
3.1. PWM Descontínua de 120°	36
3.1.1. Princípios da Estratégia de Modulação	36
3.1.2. Obtenção dos Sinais de Gatilho	38
3.1.3. Simulação – Esquema de Modulação	42
3.2. Conclusões	46

4. SISTEMA DE CONTROLE	47
4.1. Controle do PV-VSI	47
4.2. Controle do DVR-VSI	49
4.2.1. Detecção de Falta e Afundamentos	50
4.3. Simulação – Sistemas de Controle	51
4.3.1. Sistema de Controle do PV	51
4.3.2. Sistema de Controle do DVR.....	53
4.4. Capacidade de Correção de Falta Assimétricas	58
4.4.1. Simulação – Sistema de Controle do DVR	58
4.4.2. Decomposição Instantânea em Componentes de Sequência.....	60
4.5. Conclusões	64
5. SIMULAÇÕES EM TEMPO REAL	65
5.1. Conceitos	65
5.2. Tipos de Simulação.....	66
5.2.1. <i>Hardware-in-the-Loop</i> (HIL)	66
5.2.2. <i>Power Hardware-in-the-Loop</i> (PHIL).....	67
5.2.3. <i>Rapid Control Prototyping</i> (RCP)	67
5.2.4. <i>Software-in-the-Loop</i> (SIL)	68
5.3. Simulador em Tempo Real – OP5700	69
5.4. Modelo de Simulação em Tempo Real – OP5700.....	70
5.5. Metodologia Adotada	70
5.6. Conclusões	71
6. RESULTADOS	72
6.1. Introdução.....	72
6.2. Parâmetros de Simulação e Esquemático	73
6.3. Resultados – Simulink/MATLAB.....	74
6.3.1. Modo 1 – Normal	74
6.3.2. Modo 2 – Falta Simétrica	76
6.3.3. Modo 3 – Afundamento Simétrico e Assimétrico.....	76

6.3.4. Transição entre Modos de Operação	80
6.3.5. Falta Assimétrica	80
6.4. Resultados – Simulador em Tempo Real – OP5700	84
6.4.1. Modo 1 – Normal	84
6.4.2. Modo 2 – Falta Simétrica	84
6.4.3. Modo 3 – Afundamento Simétrico e Assimétrico	84
6.4.4. Transição entre Modos de Operação	89
6.4.5. Falta Assimétrica	91
6.5. Resumo dos Resultados	93
6.6. Conclusões	94
7. Conclusões e Trabalhos Futuros	95
7.1. Conclusões	95
7.2. Trabalhos Futuros	97
7.3. Publicações do Autor	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
APÊNDICE A – Modelo Simulink - Esquema de Modulação	105
APÊNDICE B – Modelo Simulink - Controle do PV	106
APÊNDICE C – Modelo Simulink - Controle do DVR	107
APÊNDICE D – Modelo Simulink - Tempo Real	108
APÊNDICE E – Plataforma de Simulação	110
APÊNDICE F – Curva ITI (CBEMA)	112
APÊNDICE G – Resultados de Simulação em Ambiente Simulink com Passo de Cálculo de 1 μs	113

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO TEMA

Existe uma preocupação crescente das empresas fornecedoras de energia elétrica e dos seus consumidores com os indicadores de Qualidade de Energia (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 à 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: harmônicos, flutuações de tensão, desequilíbrios de tensão, variações de frequência e variações de tensão de longa e curta duração [1]. 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. Dessa forma, o fator econômico é primordial quando se trata da QEE [2].

Uma das maneiras de combater os distúrbios é tornar os equipamentos conectados à rede mais robustos, ou seja, menos sensíveis às 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*) [3]. Esses equipamentos utilizam conceitos e técnicas da eletrônica de potência para mitigar distúrbios advindos da rede e consequentemente 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*) [3].

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 [4]. 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 [4]. 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 [4]. O conceito de geração distribuída basicamente se resume ao ato de 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 [5]. 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 é feita uma descrição simplificada a respeito das Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs), do DVR e de uma planta fotovoltaica conectada à rede. Essa discussão culminará com a motivação e objetivos deste trabalho.

1.1.1.1. 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.

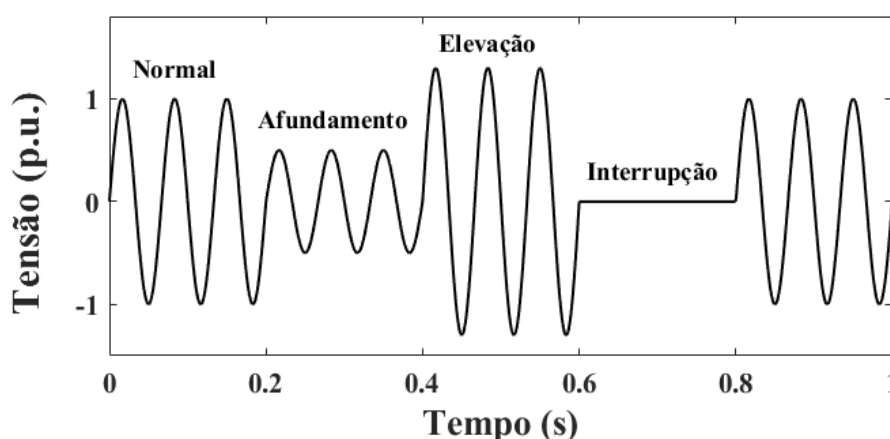
A ANEEL através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) em seu Módulo 8, sendo sua última atualização vigente a partir de 01 de janeiro de 2021, estabelece os procedimentos relativos à QEE, definindo terminologias e indicadores, caracterizando fenômenos, 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 [6].

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 [6]. 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. 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.

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



Fonte: próprio autor.

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.

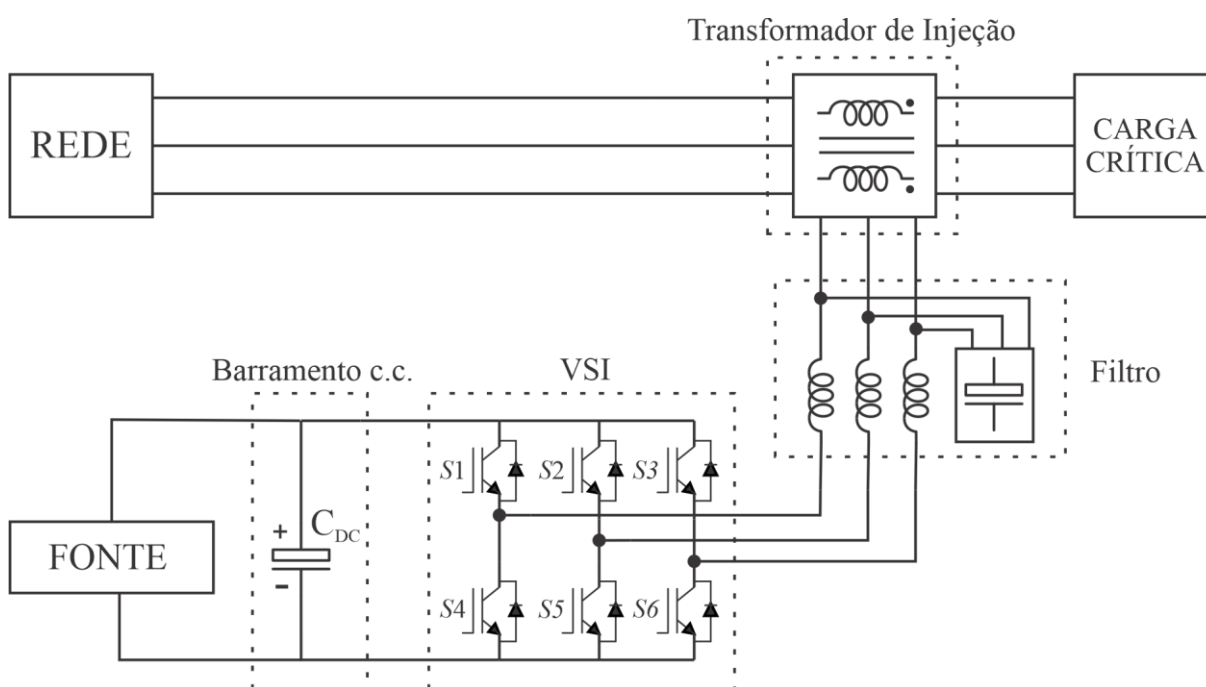
Fonte: adaptada de [6].

1.1.2. Restaurador Dinâmico de Tensão

O Restaurador Dinâmico de Tensão 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 podem ser 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 [7], 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.

Figura 2. Configuração básica de um DVR.



Fonte: próprio autor.

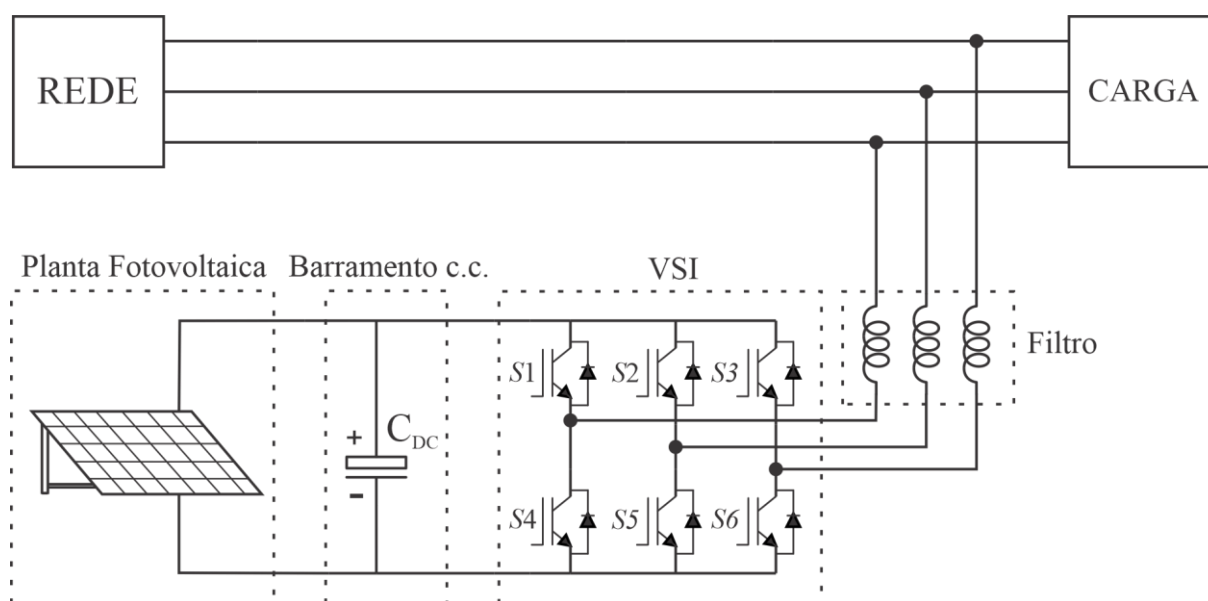
As quatro principais limitações de um DVR são [7]:

- 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.

1.1.3. Planta Fotovoltaica Conectada à Rede

A tensão gerada por uma planta fotovoltaica (*Photovoltaic* – PV) 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 [8]. 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.

Figura 3. Sistema fotovoltaico conectado à rede.



Fonte: próprio autor.

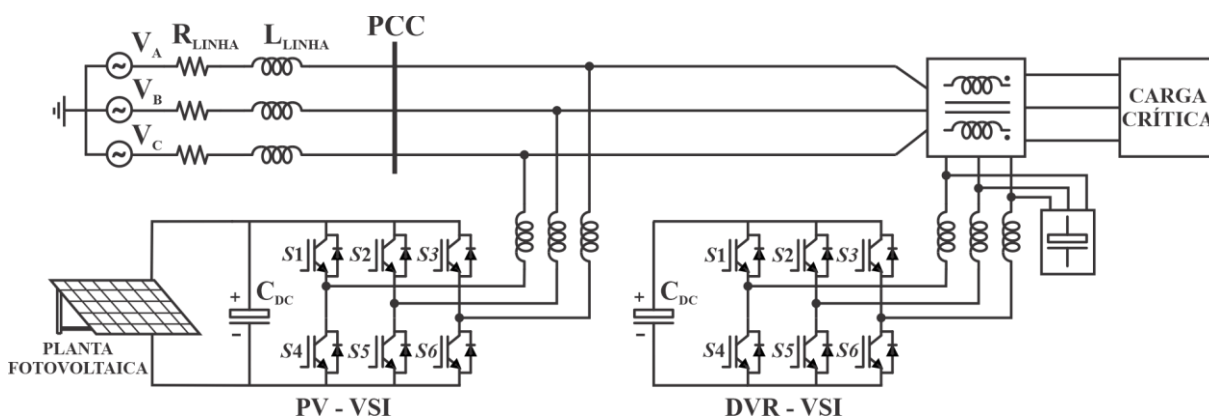
Um problema importante que pode ocorrer quando se utiliza esse tipo de configuração é um fenômeno chamado de ilhamento. Ele acontece quando após uma falta e subsequente atuação dos dispositivos de proteção da rede elétrica o sistema fotovoltaico continua operando. A principal consequência disso é o risco de acidentes envolvendo funcionários das concessionárias de energia elétrica, pois estes podem ter contato direto com pontos que 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 [9].

1.1.4. Sistemas PV-DVR Isolados

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 4.

Figura 4. Sistemas PV e DVR isolados entre si.



Fonte: próprio autor.

A configuração clássica mostrada na Figura 4 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 [10].

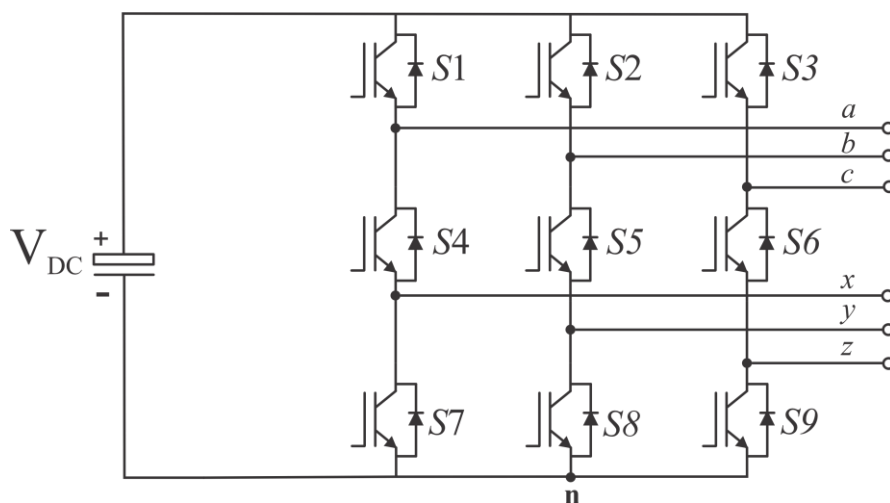
1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.2.1. Princípio de Operação do NSI

A Figura 5 apresenta a topologia do inversor nove chaves. Este inversor pode substituir a funcionalidade de 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] [11].

O inversor de nove chaves pode operar basicamente 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 [12].

Figura 5. Topologia do NSI.



Fonte: próprio autor.

O NSI tem 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} [13]. Dessa forma, tem-se oito possibilidades para os estados destas chaves. Estas possibilidades estão mostradas na Tabela 2, sendo que “1” corresponde a chave fechada e “0” a chave aberta.

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. [14]. 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 [12].

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.

1.2.2. Esquemas de Modulação para o NSI

A primeira técnica de modulação proposta para o NSI foi a PWM senoidal (SPWM) [12]. Em [15], foi proposta uma modulação vetorial espacial (SVM – *Space Vector Modulation*), onde cada unidade (saída no NSI) é considerada como um VSI trifásico convencional de seis chaves com sua SVM específica, e os doze sinais PWM gerados por ambos os SVMs são combinados para gerar nove sinais de gatilho para o NSI. Uma versão baseada em portadora deste SVM foi proposta em [16]. Enquanto em [17], foi proposta uma modulação por largura de pulso vetorial espacial (SVPWM – *Space Vector Pulse Width Modulation*) simplificada.

A primeira técnica PWM concebida para redução das perdas de comutação foi a técnica de deslocamento [18], usando sinais de *offset* adequados para criar sinais de modulação descontínua. Assim é possível fazer com que algumas chaves permaneçam fechadas (sem comutação) em determinados períodos.

Em [19] foi apresentada uma abordagem mais generalista para o SVM, propondo usar um método de deslocamento para criar o mesmo efeito de sinais de *offset*, resultando em uma modulação descontínua chamada técnica de tabela de vetores zero (ZVT – *Zero Vector Table*), sendo esta, capaz de operar em ambos os modos CF e VF. Esta técnica tem a necessidade da resolução de muitas equações trigonométricas em tempo real, além de utilizar várias pesquisas em tabelas auxiliares para construir as sequências de comutação adequadas. Este trabalho também tem como principal objetivo reduzir as perdas por comutação deixando algumas chaves sem comutação ao longo do tempo.

As técnicas escalares são mais simples (com respeito a implementação) do que as SVMs, pois utilizam somente um número reduzido de equações algébricas. Estas técnicas também não necessitam de tabelas de pesquisa auxiliares ou de um padrão de comutação demasiadamente sofisticado. Uma modulação escalar generalizada apareceu pela primeira vez em [20] e [21]. O motivo de buscar uma generalização fica bastante explícito, resume-se na capacidade de poder simular qualquer técnica PWM alterando apenas alguns parâmetros.

Em [22] 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 [18] é mostrado que estes dois métodos que são eficientes para o VSI trifásico de seis chaves 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 modulação

pretendida no inversor de nove chaves. A modulação descontínua de 120° é uma das técnicas de modulação capaz de garantir que a referência da saída superior de um braço esteja sempre acima da referência inferior desse mesmo braço.

Uma generalização para uma modulação PWM escalar capaz de emular qualquer PWM alterando apenas dois parâmetros, funcionando tanto no modo CF, quanto no modo VF foi proposta em [23]. Nesse artigo, baseada na generalização proposta, também é apresentada uma estratégia específica de PWM chamada técnica de rastreamento de corrente de pico (CPT – *Current Peak Tracking*). Esta técnica sempre fixa o par de chaves que está processando os maiores valores de corrente.

Mais recentemente foi proposta em [24] uma técnica PWM otimizada. Neste trabalho o NSI é utilizado como um conversor *Boost* (NSBI – *Nine-Switch Boost Inverter*). Nele são feitas modificações na modulação por largura de pulso visando aumentar a qualidade da tensão de saída e minimizar o estresse térmico dos interruptores. A técnica foi validada tanto para frequência comum, quanto para o modo em frequência variável.

1.2.3. Aplicações do NSI

Ao longo dos anos o NSI vem sendo explorado em uma vasta gama de aplicações. Podendo se destacar [24]: acionamentos de motores, sistemas retificador-inversor, fontes de alimentação ininterruptas (UPS - *Uninterruptible Power Supply*), condicionadores de energia, aplicações para microrredes e melhoramento do sistema de conversão de energia eólica baseado em máquinas de indução duplamente alimentadas (DFIG – *Doubly-Fed Electric Machine*).

Em [25] foi apresentada uma técnica para compensação de potência reativa utilizando motores de indução acionados por NSIs. A principal motivação da investigação desse trabalho é a obtenção de um fator de potência elevado no ponto de acoplamento comum.

As técnicas de controle preditivo também vêm sendo exploradas para o NSI. Em [26] propõe-se um controle de corrente preditivo dual. Nesse trabalho, as saídas do NSI estão conectadas a pontos de acoplamento comum distintos. A principal contribuição dessa investigação foi a redução da carga computacional dedicada ao sistema de controle, e, o levantamento da ideia de aplicação dessa estratégia em geradores de energia que operam com velocidade variável.

Já em [27], duas cargas trifásicas são alimentadas por um NSI. Apresentando também uma técnica de controle preditivo. Esse trabalho propõe um método de modelo direto de

múltiplas etapas assimétrico. O método é capaz de encontrar duas soluções ótimas independentes para cada carga, o que é interessante ao se utilizar cargas de naturezas diferentes em cada saída do NSI.

Recentemente em [28] foi apresentada uma topologia que utiliza o NSI para suprir cargas desbalanceadas. Para tanto, nesse trabalho é inserido um quarto braço com mais três chaves ao NSI, totalizando doze chaves, denominado nesse artigo de inversor de nove chaves com quatro braços (FLNSI – *Four-Leg Nine-Switch Inverter*). Ainda nesse trabalho, é proposta uma estratégia de modulação por largura de pulso baseada em portadora (CBPWM – *Carrier-Based Pulse Width Modulation*) com o objetivo de simplificar o uso de uma SVPWM.

Atualmente, máquinas multifásicas são utilizadas em aplicações que envolvem veículos elétricos visando melhorar a confiabilidade e eficiência. Em [29], é proposta a utilização de um NSBI para acionamento de máquinas de seis fases. Nesse trabalho, as tensões de saída das seis fases são reguladas através do uso de uma modulação por largura de pulso não senoidal modificada (MNSPWM – *Modified Nonsinusoidal Pulse Width Modulation*). A principal vantagem apresentada no uso dessa topologia foi o menor nível de tensão necessário no barramento c.c., isso quando comparado com um arranjo de VSIs para seis fases tradicional.

Por fim, vale salientar que o NSI também pode ser encontrado na literatura com a denominação de conversor de nove chaves (NSC – *Nine-Switch Converter*). É assim que ele foi denominado em [30], onde um controle de corrente preditivo desacoplado com otimização de ciclo de trabalho para o NSI é proposto. A ideia principal desse trabalho foi separar o controle da rede (conectada a saída superior do NSI) do controle da máquina de indução (conectada a saída inferior do NSI) reduzindo assim, o número de vetores de tensão a serem computados.

1.3. 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.

Percebe-se, portanto, que a QEE e a mitigação de distúrbios de tensão em sistemas de energia, sobretudo aqueles que possuam sistemas fotovoltaicos conectados à rede, trazem à tona oportunidades de análises e temas de pesquisas que envolvam a otimização do desempenho desses sistemas, seja esta otimização relacionada a performance, robustez ou custo.

Logo, neste trabalho será apresentada uma configuração capaz de integrar um DVR e um planta fotovoltaica conectada à rede (sistema para inserção de potência na 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.

Neste ponto, vale salientar que neste trabalho o projeto da planta fotovoltaica responsável por realizar a inserção de potência ativa na rede, bem como, de seus principais subsistemas, não fará parte dos objetivos desta pesquisa. E por este motivo, não serão detalhados ao longo do texto. Para os fins deste trabalho, a planta fotovoltaica é representada por uma fonte c.c. Esta simplificação será utilizada para obtenção de todos os resultados apresentados neste documento.

1.4. OBJETIVOS DO TRABALHO

Nesta dissertação é apresentado um sistema capaz de integrar a função de inserção de potência ativa na rede com a capacidade de realizar compensações de tensão, sendo o elemento integrador entre estas duas funções, um inversor de nove chaves. O objetivo principal deste trabalho é adicionar ao sistema apresentado, a capacidade de realizar compensações de tensão, com a presença de faltas assimétricas advindas da rede.

Para alcançar o objetivo principal descrito, será necessário a execução das seguintes ações secundárias:

- a) Realizar a análise do funcionamento do sistema integrado, abrangendo modos de operação, técnica de modulação e sistema de controle;

- b) Propor uma modificação ao sistema apresentado, que possibilite ao mesmo, efetuar correções de tensão quando submetido a faltas assimétricas oriundas da rede;
- c) Validar a modificação proposta utilizando um simulador de tempo real.

1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Até este ponto o objetivo principal do trabalho foi contextualizado, foram descritos os principais aspectos que motivaram esta pesquisa, bem como, os principais objetivos a serem alcançados. Ao longo do Capítulo 1 foram apresentadas as principais teorias relacionadas ao tema do trabalho. A revisão bibliográfica partiu do princípio de funcionamento de um NSI, até suas principais aplicações relatadas na literatura, acompanhada das principais estratégias de modulação utilizadas.

O Capítulo 2 contém a descrição do funcionamento do sistema integrado PV-DVR, detalhando o comportamento do sistema para cada modo de funcionamento. Os Capítulos 3 e 4, compreendem a descrição do esquema de modulação utilizado e do sistema de controle, respectivamente.

No Capítulo 4 é discutida a capacidade de correção de tensão do sistema, quando submetido a presença de faltas assimétricas no PCC. Ainda neste capítulo, é apresentada uma proposta de modificação ao sistema. Esta modificação, tem a intenção de adicionar ao sistema a capacidade de efetuar compensações de tensão na carga diante de faltas assimétricas ocorridas na rede.

A definição de simulação em tempo real, bem como, seus tipos e principais aplicações, serão apresentadas no Capítulo 5. Os resultados de simulação em ambiente Simulink/MATLAB e no simulador em tempo real, além da análise dos resultados obtidos, estão contidos no Capítulo 6.

O texto se encerra com as considerações finais, sugestões de trabalhos futuros, trabalhos publicados, lista de referências utilizadas para o desenvolvimento do trabalho e apêndices.

2. SISTEMA PV-DVR INTEGRADO

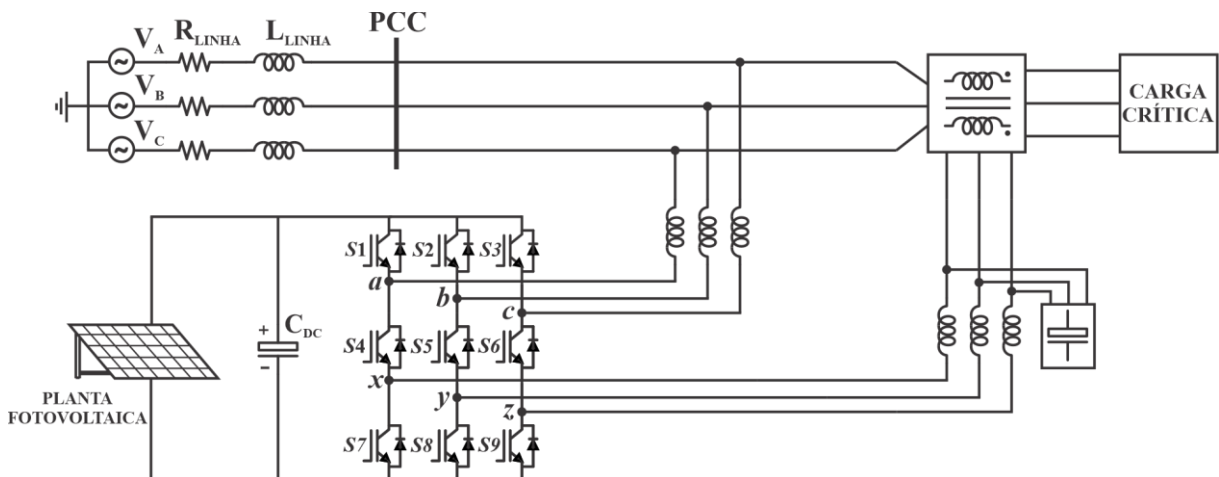
Neste capítulo é apresentada uma topologia capaz de integrar um sistema fotovoltaico e DVR através do NSI, bem como, seus possíveis modos de operação.

2.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA PV-DVR INTEGRADO

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 [31]:

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

Figura 6. Sistema PV-DVR integrados via NSI.



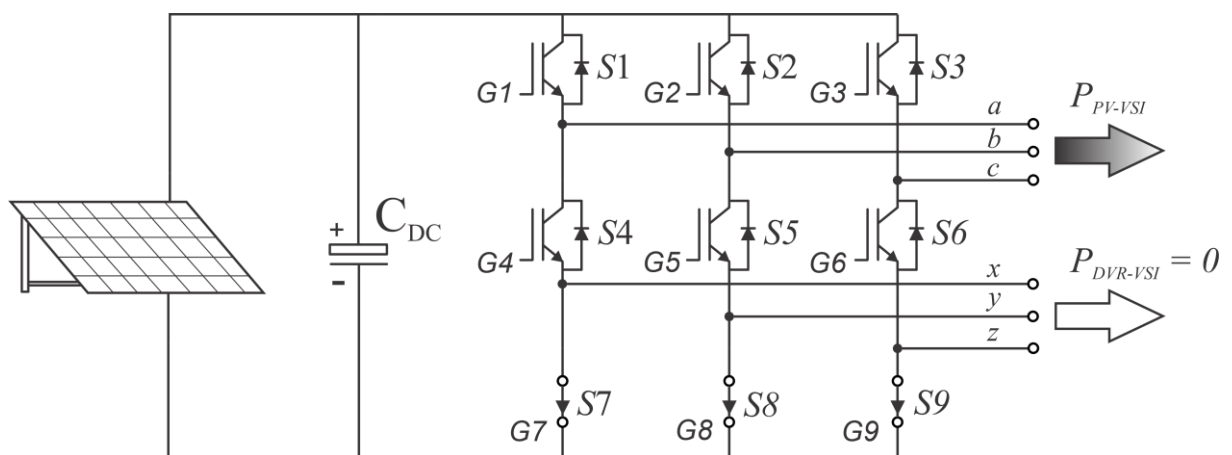
Fonte: próprio autor.

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.

2.1.1. 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*), ou seja, irradiância de 1000 W/m^2 e 25°C . Note que é intuitivo concluir que neste modo de operação o VSI-DVR permanecerá inativo, pois a rede está operando com tensão nominal. Assim, o VSI-DVR não deve injetar nenhuma tensão de compensação na rede. Para fazer com que o VSI-DVR 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 VSI-DVR 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 [31].

Figura 7. Situação do NSI durante o Modo 1.

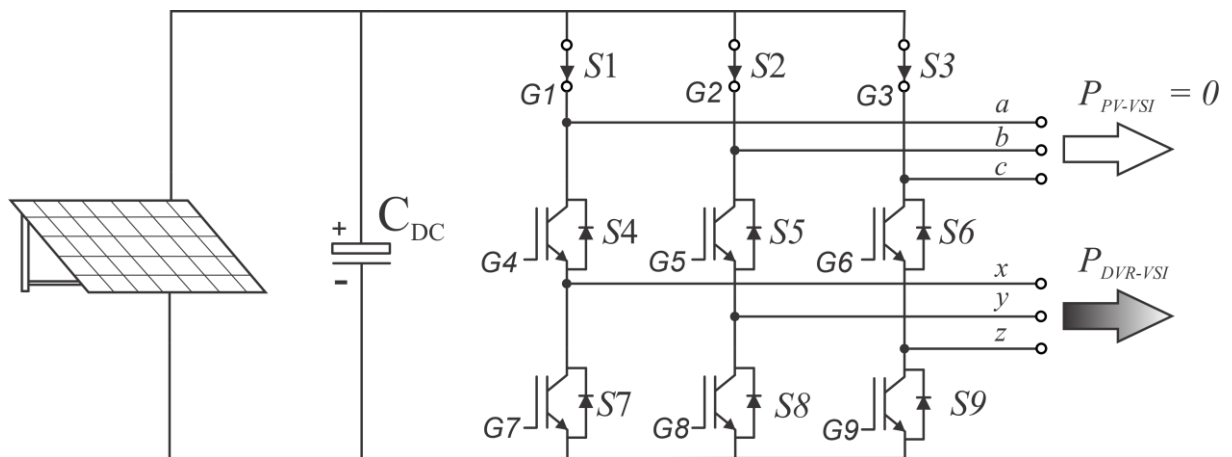


Fonte: próprio autor.

2.1.2. 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 deve ser capaz de suprir a demanda da carga crítica sem nenhum suporte da rede, utilizando para isso as chaves remanescentes S4 a 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 [31]. A Figura 8 mostra o estado do NSI durante o Modo 2.

Figura 8. Situação do NSI durante o Modo 2.



Fonte: próprio autor.

2.1.3. Modo 3 – Afundamento

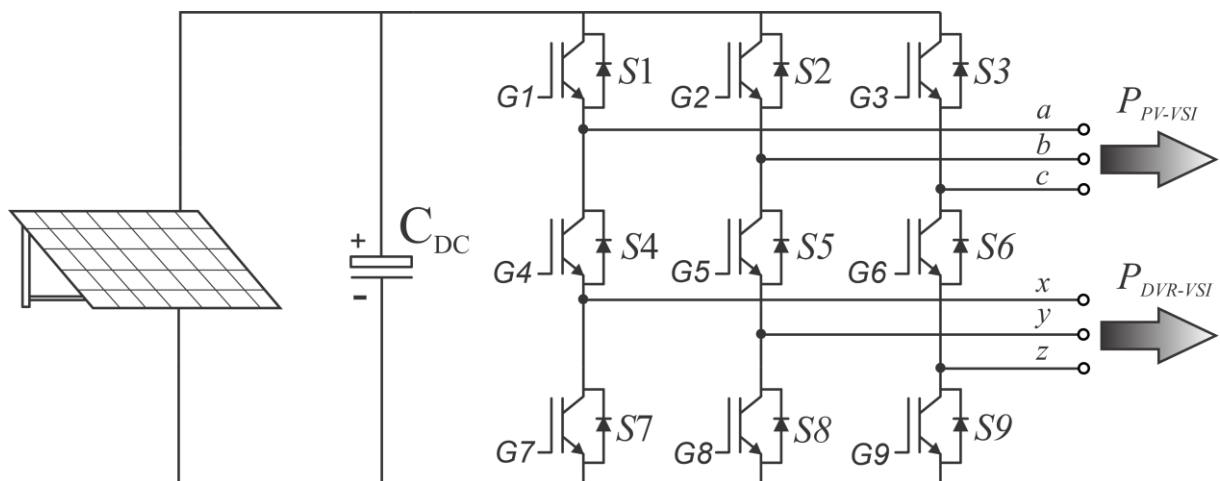
Durante um afundamento de tensão no PCC o sistema passa a operar no Modo 3. Neste modo todas as chaves estão sendo comandadas via PWM, ou seja, VSI-PV e VSI-DVR estão

atuando. O VSI-DVR é responsável por fazer a compensação do afundamento e o VSI-PV 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.

Neste modo, é priorizada a restauração de tensão para a carga, ou seja, apenas após a efetuação da correção de tensão é que a energia excedente disponível é injetada na rede através do PV-VSI.

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.

Figura 9. Situação do NSI durante o Modo 3.



Fonte: próprio autor.

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 [31].

2.2. CONCLUSÕES

Neste capítulo foi descrito a configuração que será utilizada para integrar a função de inserção de potência ativa na rede (representada por uma planta PV) com um restaurador dinâmico de tensão. Foi discutido ainda, que a utilização de um NSI como elemento integrador é capaz de atender as funcionalidades almejadas.

Os modos de operação do sistema integrado (normal, falta e afundamento) foram descritos. Pode-se destacar que, para o modo falta, foi evidenciada a vantagem de utilização da energia da planta fotovoltaica para a restauração de tensão na carga, mesmo com a ocorrência de uma falta no PCC.

3. ESQUEMA DE MODULAÇÃO

Este capítulo tem como objetivo detalhar o esquema de modulação que será utilizado para o comando das chaves do NSI. O esquema de modulação aplicado ao 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.

3.1. PWM DESCONTÍNUA DE 120°

Durante a revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 1, foram apresentadas as principais técnicas de modulação para o NSI presentes na literatura. Dentre as postulantes apresentadas, a técnica de modulação que será utilizada neste trabalho, é a PWM descontínua de 120°.

Conforme demonstrado em [22], o uso desta técnica reduz significativamente as perdas de comutação, além disso, quando comparada por exemplo, a técnicas de modulação vetoriais espaciais, ou, esquemas PWM não senoidais. Também é de implementação mais simples. Estas são as justificativas para a sua escolha e utilização neste trabalho.

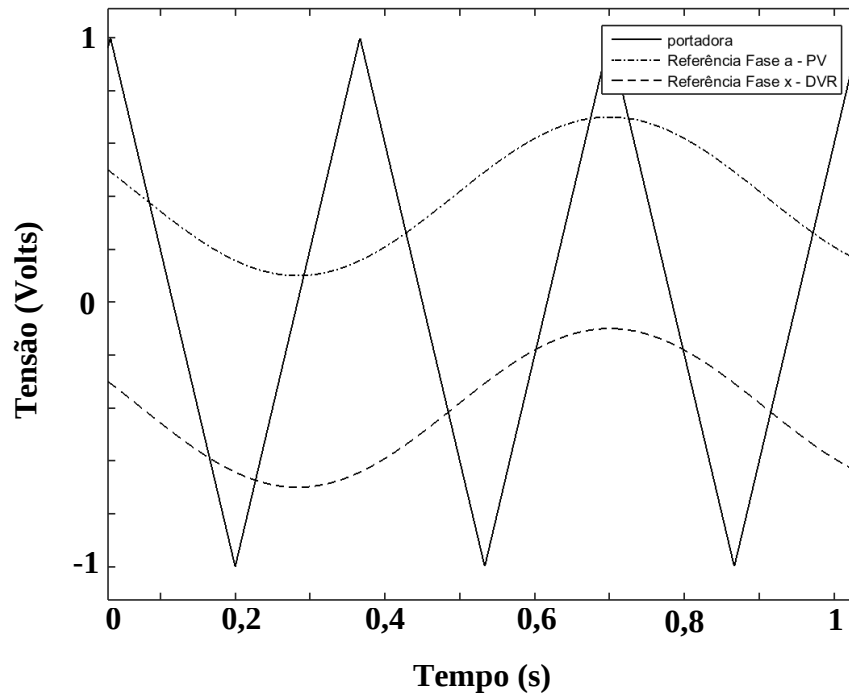
3.1.1. Princípios da Estratégia de Modulação

A partir deste ponto, são descritos os princípios da técnica de modulação PWM descontínua de 120°, culminando com a obtenção dos sinais de gatilho para o NSI.

Conforme 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. De acordo com [18], uma maneira de evitar esse 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. Isso significa que, os sinais de referência para as fases do PV-VSI devem estar sempre acima dos sinais de referência para o DVR-VSI, compartilhando a mesma banda de portadora. Além disso, deve-se sempre respeitar o princípio básico de que uma referência não deve jamais

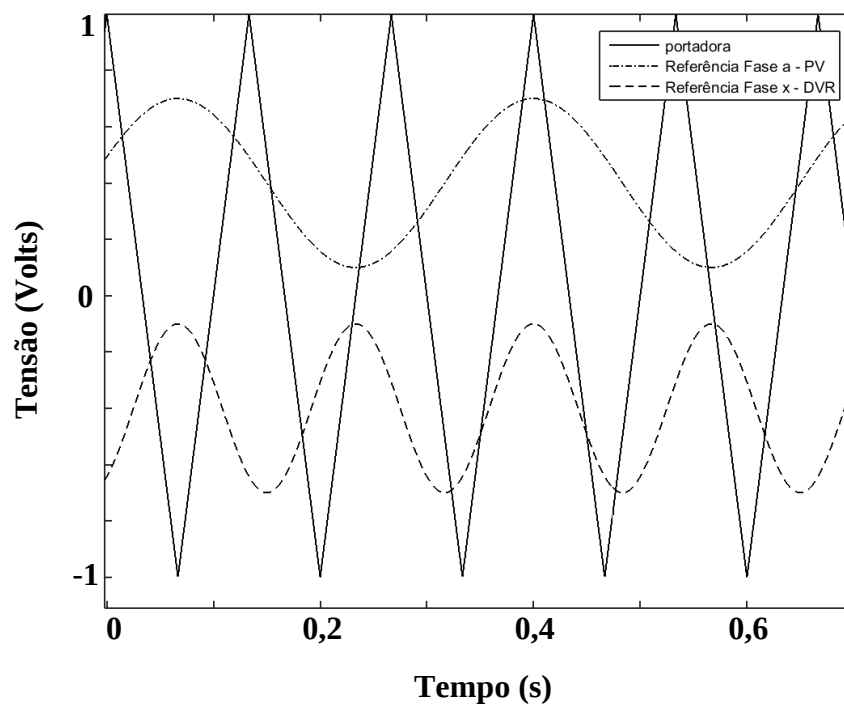
sobrepôr a outra [22]. Essas diretrizes básicas para implementação do esquema de PWM descontinuo de 120° estão exemplificadas nas Figuras 10 e 11.

Figura 10. Cenário necessário para implementação da modulação.



Fonte: próprio autor.

Figura 11. Referências com frequências distintas.



Fonte: próprio autor.

3.1.2. Obtenção dos Sinais de Gatilho

Aqui, é detalhado todo o processo de obtenção dos sinais de gatilho para o NSI utilizando a técnica de PMW descontínua de 120°. Neste trabalho, não serão demonstradas as equações utilizadas, porém, toda a formalidade conceitual, bem como, o ferramental matemático que suportam a construção desta estratégia podem ser consultadas em [18], [22], [32], [33], [34], [35], [36] e [37].

Utilizando como base [13], [18], [22], [31] e [34], pode-se resumir o processo de obtenção dos sinais de gatilho para o NSI em três etapas, sendo elas:

- 1) Obtenção dos sinais de referencia senoidais.
- 2) Criação de sinais de referência modificados e descontínuos de 120°.
- 3) Comparação com uma portadora triangular e utilização de operações booleanas para obtenção dos sinais de gatilho.

Os sinais de referência senoidais citados na etapa 1, em geral, são oriundos de um sistema de controle. Como o NSI possui duas saídas, utilizam-se dois conjuntos de sinais senoidais como entrada do esquema de modulação. Estes dois conjuntos de senoides, podem ser representados matematicamente pelas expressões:

$$\begin{aligned}
 V_a^* &= m_{PV} \cos(2\pi f_{PV} + \theta_{PV}) \\
 V_b^* &= m_{PV} \cos(2\pi f_{PV} - 120^\circ + \theta_{PV}) \\
 V_c^* &= m_{PV} \cos(2\pi f_{PV} + 120^\circ + \theta_{PV})
 \end{aligned} \tag{1}$$

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

sendo:

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

Na etapa 2, devem ser criados dois conjuntos de sinais de referência modificados descontínuos de 120°. Para tanto, adicionam-se as referências senoidais, os seguintes sinais de *offset*:

$$V_{offset-PV} = 1 - \max(V_a^*, V_b^*, V_c^*) \quad (3)$$

$$V_{offset-DVR} = -1 - \min(V_x^*, V_y^*, V_z^*) \quad (4)$$

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

Efetuando-se a adição de (1) com (3) e de (2) com (4), obtêm-se os almejados sinais de referência modificados e descontínuos de 120°. Os dois conjuntos de sinais resultantes desta operação são:

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

$$M_{PV-c} = V_c^* + 1 - \max(V_a^*, V_b^*, V_c^*)$$

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

$$M_{DVR-z} = V_z^* - 1 - \min(V_x^*, V_y^*, V_z^*)$$

sendo:

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

Conforme descrito na etapa 3, agora, os sinais de referência modificados devem ser comparados com uma portadora triangular, e em seguida, manipulados via operações booleanas para resultar nos sinais de gatilho para o NSI. A lógica de compação com a portadora pode ser descrita da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
 G_{PV-1,2,3} &= \begin{cases} 1, \text{ se } M_{PV-a,b,c} > M_C \\ 0, \text{ se } M_{PV-a,b,c} < M_C \end{cases} \\
 G_{DVR-1,2,3} &= \begin{cases} 1, \text{ se } M_{DVR-x,y,z} > M_C \\ 0, \text{ se } M_{DVR-x,y,z} < M_C \end{cases}
 \end{aligned} \tag{7}$$

sendo:

M_C a portadora triangular;

$G_{PV-1,2,3}$ os sinais de gatilho parciais do VSI-PV;

$G_{DVR-1,2,3}$ os sinais de gatilho parciais do VSI-DVR.

O termo “parciais” foi utilizado convenientemente nesse momento pelo fato de que os conjuntos de sinais gerados pela comparação com a portadora, ainda não são, os sinais de gatilho para o NSI.

Os sinais de gatilho para o NSI são obtidos por meio das seguintes expressões:

$$\begin{aligned}
 G_{n1,2,3} &= G_{PV-1,2,3} \\
 G_{n4,5,6} &= !G_{PV-1,2,3} + G_{DVR-1,2,3} \\
 G_{n7,8,9} &= !G_{DVR-1,2,3}
 \end{aligned} \tag{8}$$

sendo:

$G_{n1,2,3}$ os sinais de gatilho das chaves S1, S2 e S3;

$G_{n4,5,6}$ os sinais de gatilho das chaves S4, S5 e S6;

$G_{n7,8,9}$ os sinais de gatilho das chaves S7, S8 e S9;

“!” representa a operação lógica NOT;

“+” representa a operação lógica OR.

A Tabela 5 apresenta uma forma expandida da composição dos sinais de gatilho obtidos e expressos por (8) para o NSI.

A metodologia descrita e dividida nas etapas 1-3 apresentadas até aqui está representada em forma de fluxograma na Figura 12.

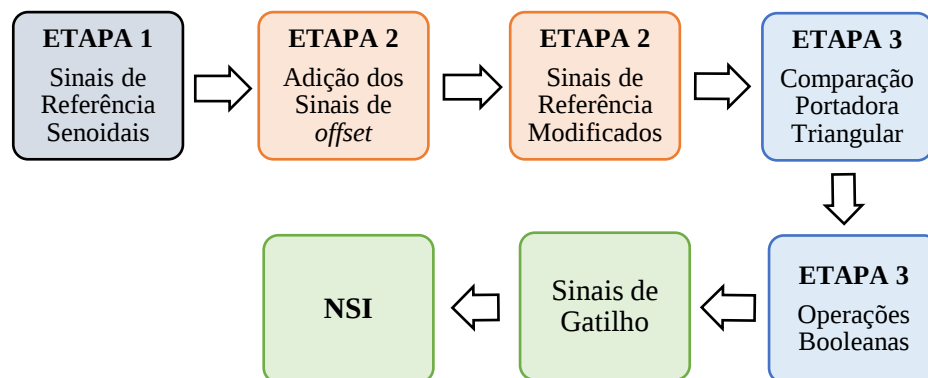
Vale lembrar que ao final do processo de modulação os sinais de gatilho gerados devem atender aos estados admissíveis descritos na Tabela 3. Além disso, devem ser capazes de atender os aspectos de cada modo de funcionamento do sistema descrito na Tabela 4.

Tabela 5. Composição dos sinais de gatilho.

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

Fonte: próprio autor.

Figura 12. Etapas para obtenção dos sinais de gatilho do NSI.



Fonte: próprio autor

3.1.3. Simulação – Esquema de Modulação

A fim de tornar mais intuitivo o processo de modulação descrito neste capítulo, será realizado aqui, a implementação de um modelo em ambiente Simulink/MATLAB que seja capaz de ilustrar o funcionamento do esquema de modulação adotado. A intenção é observar os principais sinais presentes em todo o processo e correlacioná-los com as equações apresentadas anteriormente. O modelo desenvolvido para execução desta simulação pode ser encontrado no Apêndice A.

Conforme discutido no Capítulo 2, o que determina em que modo de operação o sistema integrado PV-DVR 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 ajustadas 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.

O cenário simulado para exemplificar o processo de obtenção dos sinais de gatilho para o NSI apresentado aqui foi o modo normal. Além disso, para facilitar a visualização dos resultados, serão apresentados os sinais de apenas um braço do NSI. O braço escolhido é o composto pelas chaves S1, S4 e S7, que são comandadas respectivamente, pelos sinais de gatilho G1, G4 e G7.

Na Figura 13 (a)-(c) são apresentados respectivamente, os sinais de referência senoidais de entrada para o esquema de modulação, os sinais de *offset* e os sinais de referência modificados descontínuos de 120°.

Os sinais resultantes da simulação apresentados na Figura 13 foram expressos matematicamente pelas equações (1) - (6), podendo ser diretamente correlacionados com estas.

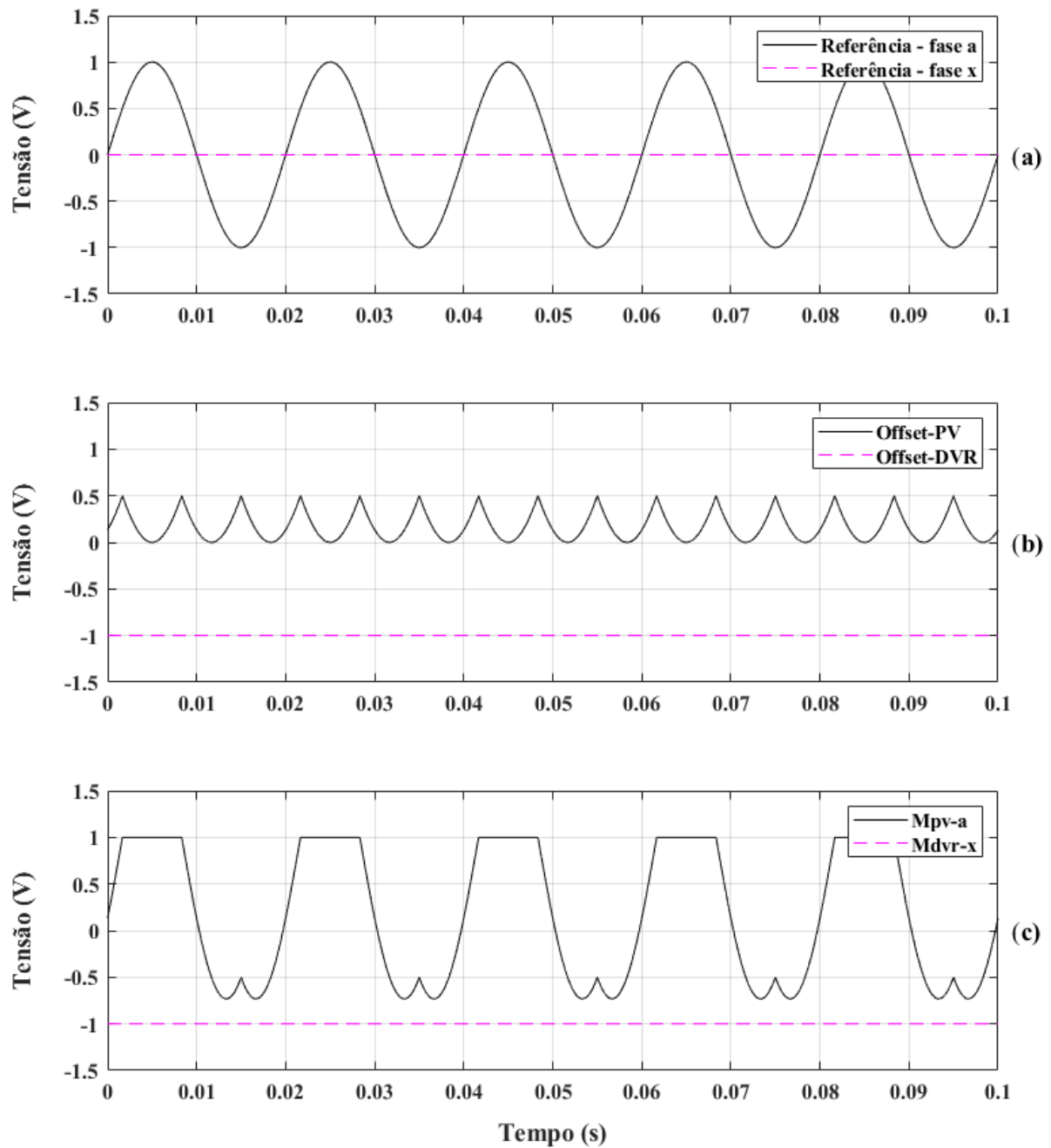
Tabela 6. Valores de m_{PV} e m_{DVR} em cada modo de operação.

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 a S6	1	0
2 – Falta	≈ 0	S1 – S2 – S3	S4 a S9	0	1
3 – Afundamento	$0,1 \leq V_{PCC} < 0,9$	nenhuma	S1 a S9	ajustáveis	ajustáveis

Fonte: próprio autor

Figura 13. Resultado de simulação: obtenção de sinais modificados.

(a) Sinais de Referência; (b) Sinais de *Offset*; (c) Sinais Modificados



Fonte: próprio autor

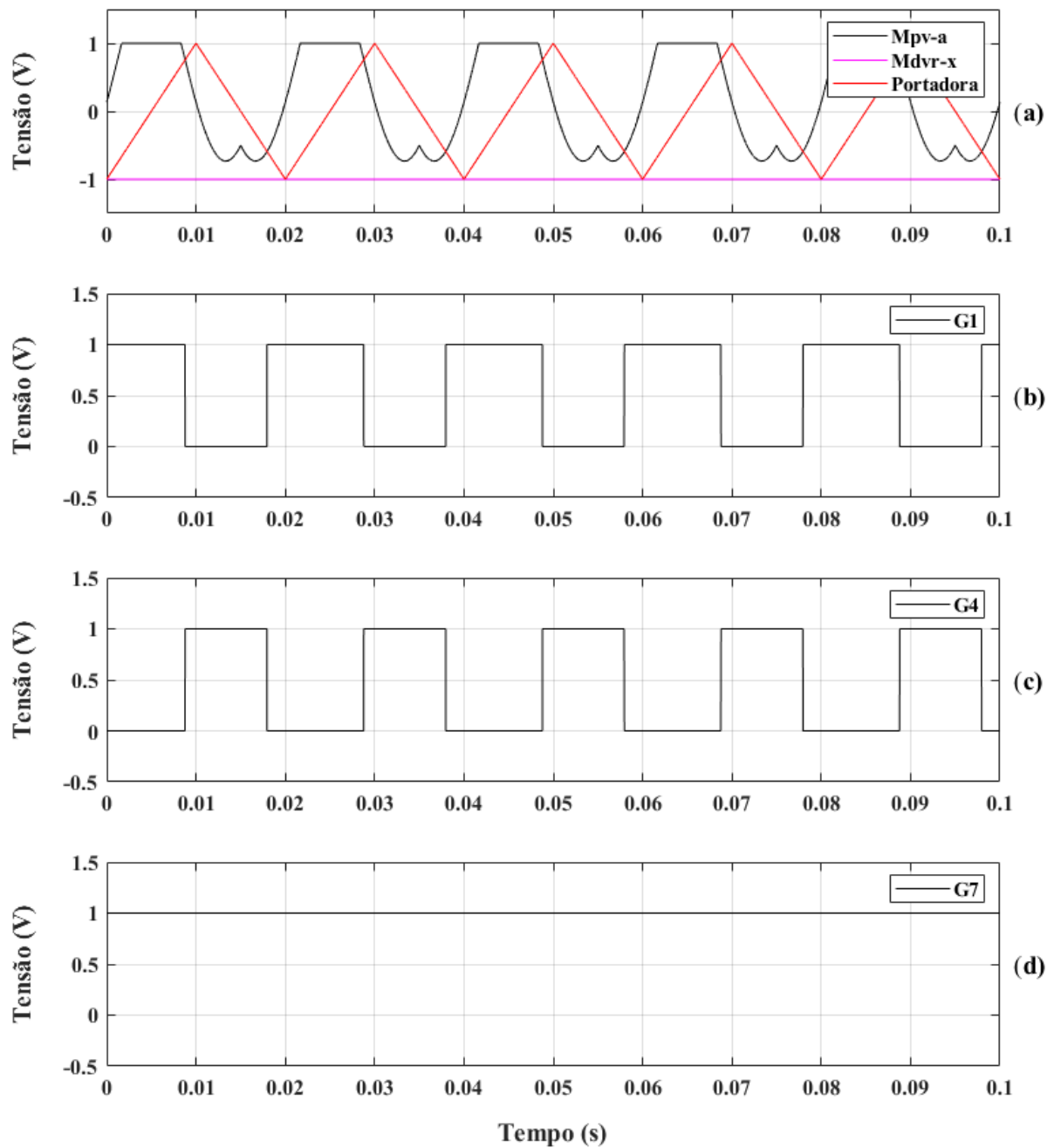
Pode-se observar que, a inserção de um sinal de referência com amplitude nula para a fase x do DVR resultou em um sinal de *offset* igual a -1. Este resultado é corroborado pela equação (4). O sinal de referência modificado para a fase x, também teve como resultado um sinal constante igual a -1. O motivo é que de acordo com a equação (6), quando o sinal de referência senoidal é nulo, o sinal de referência modificado é igual ao próprio sinal de *offset*.

Na Figura 14 (a)-(d) são apresentados os sinais de referência modificados acompanhados da portadora triangular a qual é utilizada para comparação conforme regra descrita na equação (7). Além disso, contém ainda, o resultado do processo de obtenção dos sinais de gatilho G1, G4 e G7 que foi representado pela equação (8).

As tensões de polo observadas nas saídas do NSI são mostradas na Figura 15.

Figura 14. Resultado de simulação: Sinais de Gatilho.

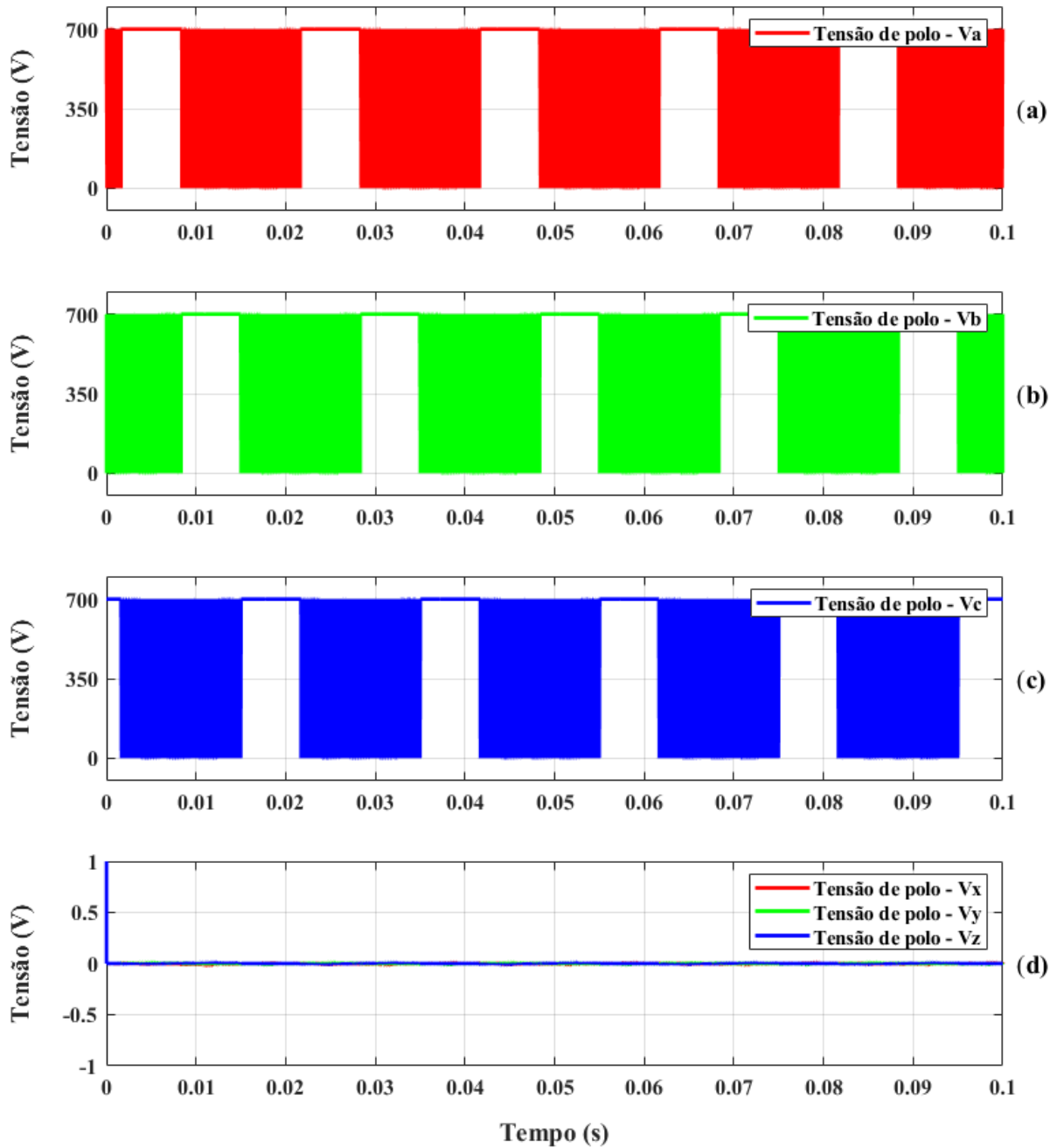
(a) Sinais modificados e portadora; (b) G1; (c) G4; (d) G7



Fonte: próprio autor.

Figura 15. Tensão de polo nas saídas do NSI.

(a) V_a ; (b) V_b ; (c) V_c ; (d) V_x , V_y e V_z



Fonte: próprio autor.

De acordo com o resultado apresentado na Figura 14, a técnica de modulação atendeu o comportamento esperado para os estados das chaves durante o modo normal. As transições de borda nos sinais G1 e G4 acontecem como esperado, e o sinal G7 de gatilho G7 permaneceu corretamente em estado ativo durante todo o tempo, tendo em vista que durante o modo normal, o DVR deve permanecer inativo. Note que, esta condição é garantida graças ao sinal de

referência modificado para a fase x ser igual a -1 . Este fato pode ser bem compreendido observando-se as equações (7) e (8).

O último resultado apresentado aqui, mostrado na Figura 15 (a) – (d), contém o resultado obtido para as tensões de polo na saída do NSI, sendo V_a , V_b e V_c as tensões de polo da saída superior, referente a inserção de potência na rede. As tensões de polo V_x , V_y e V_z , referem-se à saída do DVR.

Como durante o modo normal não há a necessidade de execução de correções de tensão, os valores das tensões de polo na saída dedicada a restauração de tensão foram nulas. Enquanto isso, as tensões de polo na saída para inserção de potência, operaram em regime PWM, experimentando dois níveis (zero e a tensão utilizada no barramento c.c. – 700 V).

3.2. CONCLUSÕES

Ao longo deste Capítulo, foram apresentados os princípios fundamentais da técnica de modulação PWM descontínua de 120° . Conclui-se que o compartilhamento da banda de portadora pelos dois sinais de referência modificados é possível, se, e somente se, não houver cruzamento entre elas, do contrário, há o surgimento de um curto-circuito no barramento c.c.

A escolha da estratégia de modulação a ser utilizada foi justificada, sendo os principais pontos levados em conta para a escolha: a redução de perdas de comutação e a simplicidade de implementação quando comparada a técnicas vetoriais ou não senoidais.

Todo o processo de obtenção dos sinais de gatilho para o NSI foi detalhado e resumido em três etapas bem definidas e discutidas. As equações necessárias foram apresentadas e tiveram suas aplicações comentadas. Por fim, resultados de simulação para o esquema de modulação supondo funcionamento em modo normal foram apresentados. Os resultados obtidos corroboraram com toda a teoria e conceitos apresentados até este ponto do texto.

4. SISTEMA DE CONTROLE

Neste Capítulo são apresentados os sistemas de controle utilizados no sistema PV-DVR integrado via NSI. De maneira geral, os sistemas de controle apresentados aqui são responsáveis por monitorar as condições da rede e fornecer como resultado, sinais de referência senoidais que serão utilizados como entrada para o esquema de modulação discutido no Capítulo 3.

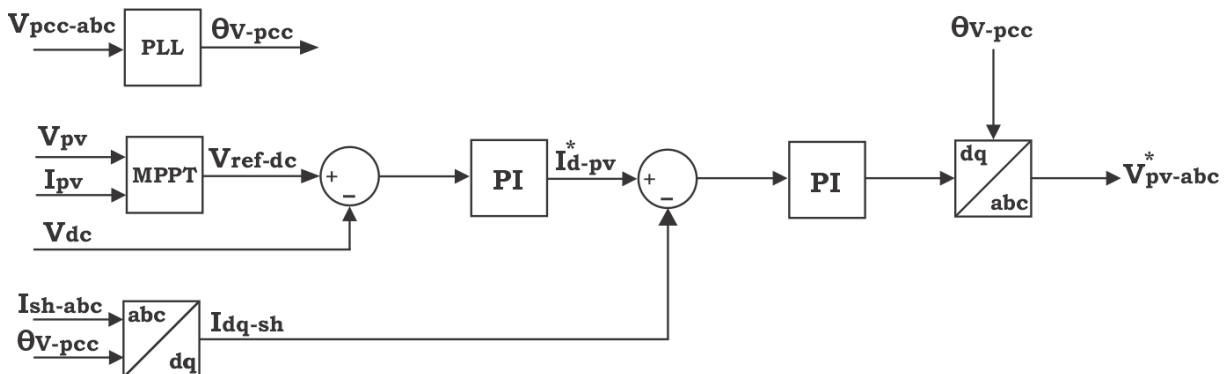
Neste ponto, é importante salientar que o projeto da planta fotovoltaica, bem como de seus principais constituintes (por exemplo o MPPT – *Maximum Power Point Tracking*), não serão abordados neste trabalho. Para atingir o principal propósito desta pesquisa, a planta PV será substituída por uma fonte de tensão constante. Esta simplificação será, inclusive, utilizada para a obtenção de todos os resultados contidos neste trabalho.

Os parâmetros para sintonia dos controladores utilizados para a obtenção de todos os resultados que serão apresentados posteriormente no texto foram obtidos realizando-se ajustes e observando os resultados na saída.

4.1. CONTROLE DO PV-VSI

O esquema de controle completo para inserção de potência ativa na rede [31] é mostrado na Figura 16.

Figura 16. Esquema de controle PV-VSI.



Fonte: próprio autor.

A simplificação do esquema que determina a amplitude de corrente consiste em atribuir um valor de referência, mas a partir de um cálculo realizado previamente. O esquemático resultante desta simplificação é mostrado na Figura 17.

No sistema de controle simplificado, a corrente injetada na rede (I_{sh-abc}) é medida e transformada para o sistema de referência síncrono (I_{sh-d}, I_{sh-q}), transformando-se em valores constantes enquanto as correntes injetadas forem equilibradas. Os valores medidos e de referência são comparados e o erro obtido é processado por meio de um controlador PI.

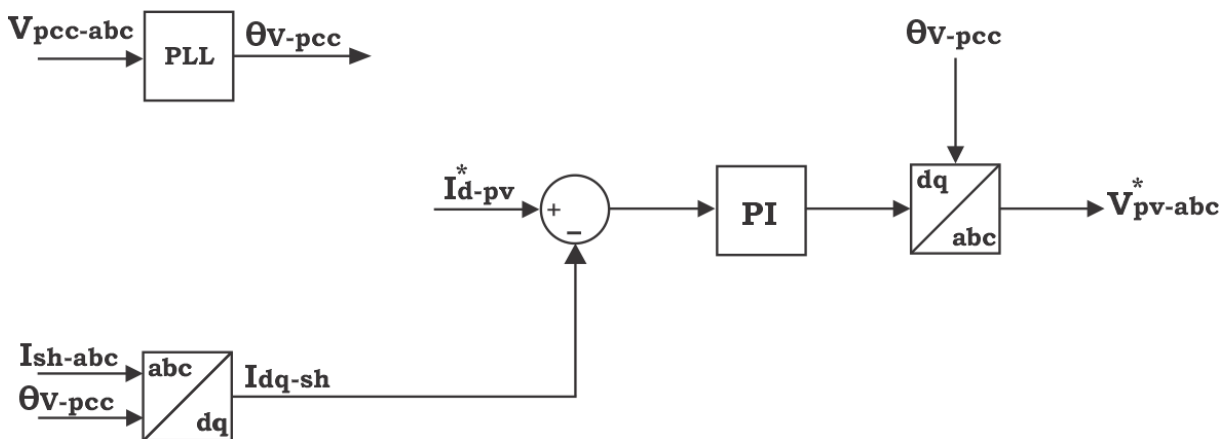
Note que, uma malha de captura de fase (PLL - *Phase Locked Loop*) é utilizada para fazer a sincronização entre a tensão do PCC e a corrente injetada, isso significa que a corrente injetada na rede estará em fase com a tensão do PCC. A intenção disso é manter o fator de potência mais próximo possível da unidade.

Por fim, os sinais resultantes são transformados de volta para o sistema de referência estacionário, sendo estes, os sinais de referência senoidais utilizados como entrada para o esquema de modulação.

Utilizando as premissas do controle orientado de tensão utilizado em [38], o eixo d está alinhado com a sequência positiva da tensão do PCC, ou seja, $V_d = V_{PCC}$. Enquanto que a corrente de referência do eixo q é igualada a zero, conforme recomendado pela IEEE 1547 [39]. Portanto, a corrente de referência para o eixo- d (I_{d-pv}^*) pode ser expressa em termos da potência do PV como [31]:

$$i_{d-pv}^* = \frac{2}{3 * V_d} P_{pv} \quad (9)$$

Figura 17. Esquema de controle do PV simplificado.



Fonte: próprio autor.

4.2. CONTROLE DO DVR-VSI

O esquema de controle que será utilizado para regular os níveis de tensão injetados na rede pelo DVR é apresentado na Figura 18.

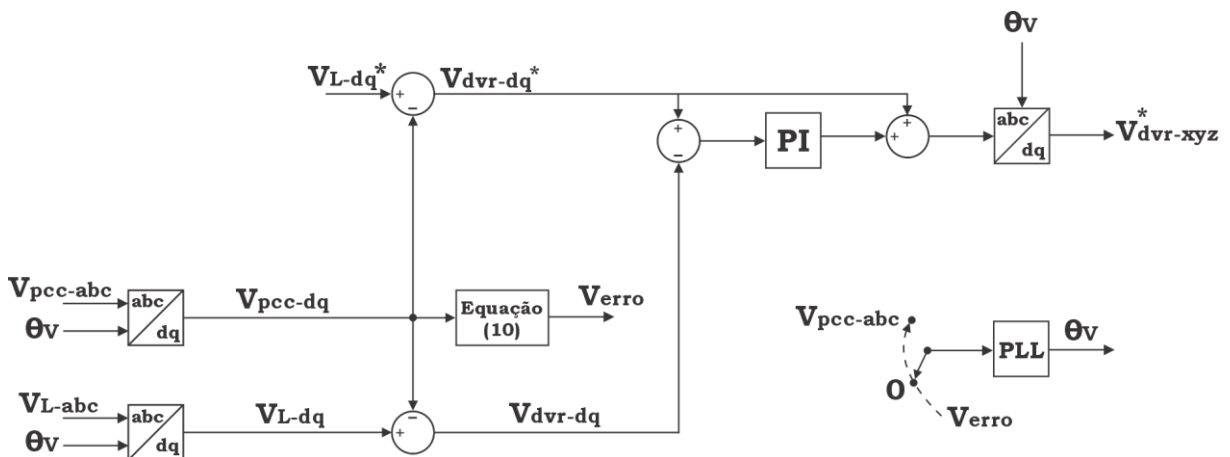
Este esquema de controle possui como sinais de entrada: a tensão medida no PCC ($V_{pcc-abc}$) e a tensão medida na carga (V_{L-abc}). Primeiramente, ambas as variáveis de entrada são transformadas para o sistema de referência síncrono (V_{pcc-dq}, V_{L-dq}), que assumirão valores constantes enquanto tiverem natureza equilibrada.

A diferença entre tensão de referência na carga e a tensão no PCC, resulta na tensão de referência do DVR. A tensão atual do DVR é obtida pela diferença entre a tensão medida na carga e a tensão medida no PCC. Os sinais resultantes são comparados e o erro obtido é processado por um controlador PI.

Para compensar as quedas de tensão nas chaves, filtros e transformador série, um sinal de V_{dvr-dq}^* é adicionado a saída do PI [31]. Por fim, os sinais resultantes são transformados de volta para o sistema de referência estacionário, sendo estes, os sinais de referência senoidais utilizados como entrada para o esquema de modulação.

Um PLL é utilizado para fazer a sincronização entre a tensão do PCC e a tensão injetada pelo DVR, isso significa que a tensão injetada na rede estará em fase com a tensão presente no PCC.

Figura 18. Esquema de controle do DVR.



Fonte: próprio autor.

4.2.1. Detecção de Falta e Afundamentos

Uma vez a tensão no PCC transformada para o sistema de referência síncrono (V_{pcc-dq}), estes valores utilizados como entrada para o cálculo do erro absoluto (V_{erro}) entre a tensão de referência do PCC (1 p.u.) e a tensão medida no PCC em p.u. (V_{pcc-d} , V_{pcc-q}), conforme a Equação (10).

$$V_{erro} = \left| 1 - \sqrt{V_{pcc-d}^2 - V_{pcc-q}^2} \right| \quad (10)$$

Se o sinal de erro assumir valores maiores do que 0,05 um afundamento/falta é detectado. Quando isso ocorre, a lógica na entrada do PLL é alterada de zero para um. Isto significa que, no momento da detecção de uma falta/afundamento, o PLL passa a executar a sincronização entre a tensão no PCC e a tensão que será injetada pelo DVR.

Um exemplo numérico para demonstrar o entendimento da utilização da equação (10) para a detecção de falta/afundamento é apresentado na Tabela 7. Nesse exemplo é suposta uma rede que possui tensão nominal de 300 V e opera em condições equilibradas. Note que, o valor de V_{pcc-q} manteve-se igual a zero, isso ocorre devido a suposição de perfis de tensão equilibrados. Uma interpretação simplista para a equação (10), é que o sistema de controle não considerará como falta/afundamento quedas de tensão de até 5% no PCC, ou seja, passará a executar correções de tensão apenas se V_{erro} exceder o limite de 0,05.

Tabela 7. Exemplo numérico.

Tensão Nominal V_{pcc}^*	Tensão medida V_{pcc}	V_{pcc-d} (p.u.)	V_{pcc-q} (p.u.)	V_{erro}	Lógica PLL	Falta/Afundamento
300 V	300 V	1	0	0	0	Não
300 V	291 V	0,97	0	0,03	0	Não
300 V	285 V	0,95	0	0,05	0	Não
300 V	282 V	0,94	0	0,06	1	Sim

Fonte: próprio autor.

4.3. SIMULAÇÃO – SISTEMAS DE CONTROLE

Para consolidar o entendimento da estratégia de controle utilizada neste trabalho, serão apresentados nesta seção, resultados de simulação obtidos a partir de modelos construídos em ambiente Simulink/MATLAB. Os modelos desenvolvidos estão disponíveis para consulta nos Apêndices B e C, para o controle do PV e do DVR, respectivamente.

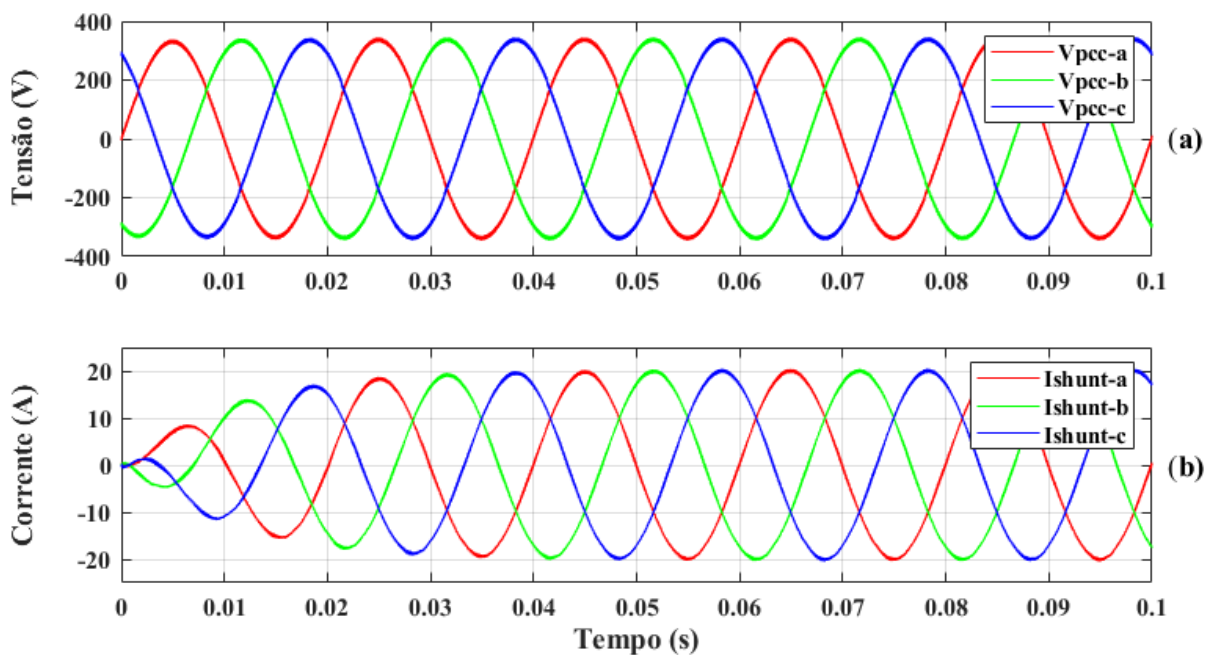
4.3.1. Sistema de Controle do PV

Para observação do comportamento do sistema de controle do PV foi simulada a sua atuação durante o modo de funcionamento normal. O valor de pico da corrente de referência foi configurado para 20 A.

Na Figura 19 é apresentado o resultado obtido para a tensão no PCC e para a corrente injetada na rede. A intenção em observar estes sinais é principalmente notar que eles estão em fase. Essa característica já era esperada, tendo em vista que o PLL presente no sistema de controle é responsável por esta sincronização. Além disso, observou-se que a referência de 20 A para a corrente injetada foi atingida em 1,5 ciclo da fundamental (30 ms), partindo-se de condições iniciais nulas, e sem a presença de ultrapassagens.

Figura 19. Resultado de simulação: Vpcc e corrente injetada.

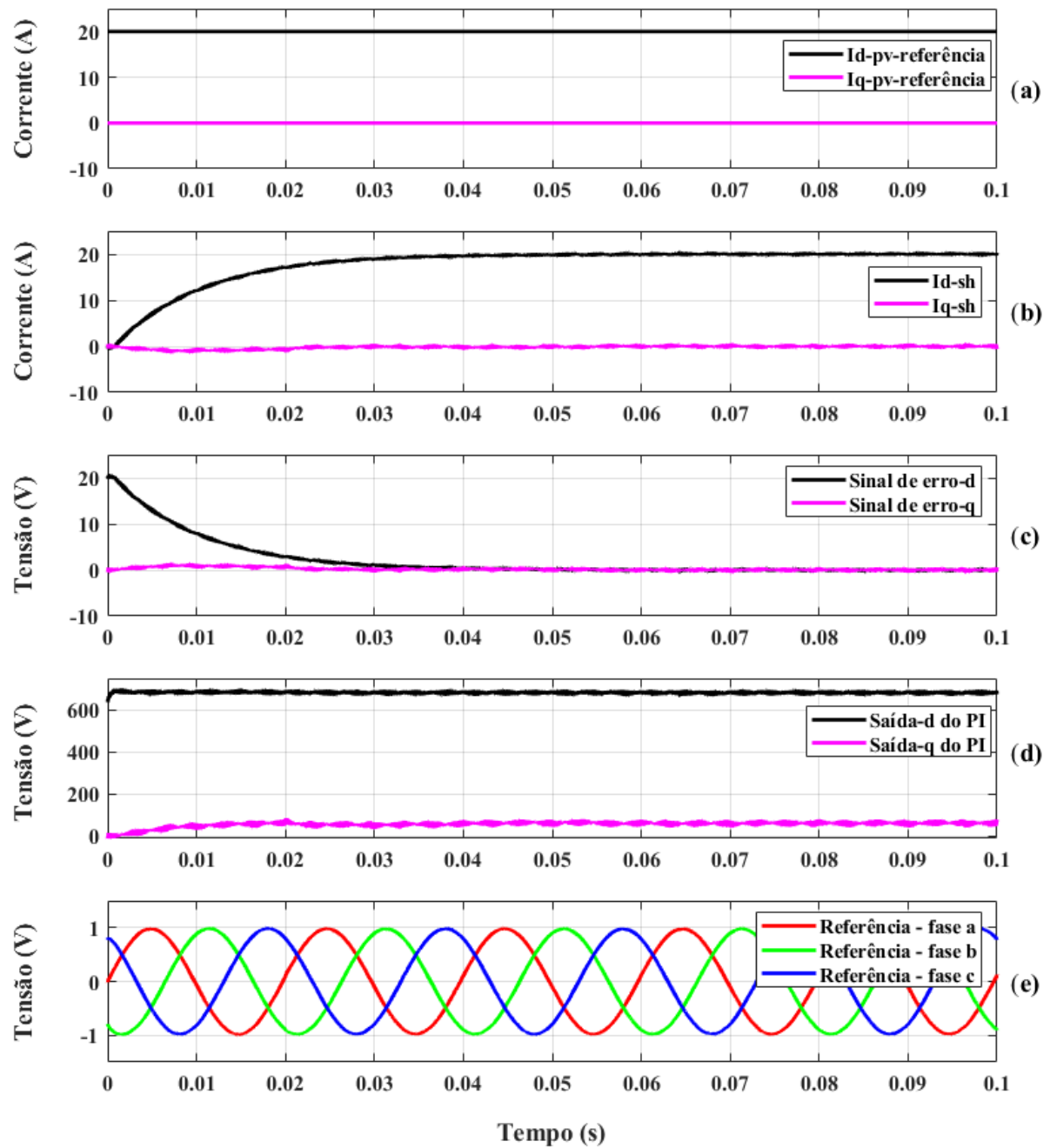
(a) Tensão no PCC; (b) Corrente injetada na rede



Fonte: próprio autor.

Figura 20. Resultados de simulação: controle do PV – modo normal.

(a) I_{dq} de referência; (b) I_{dq} medidas; (c) Sinal de erro; (d) Saída do PI; (e) Saída do controle



Fonte: próprio autor.

Na Figura 20 são mostrados os principais sinais do sistema de controle do PV, durante sua operação em modo normal. Notou-se que, devido à natureza da corrente injetada ser equilibrada, após a transformação para o sistema de referência síncrono seus valores I_{dq-sh} são constantes.

A partir dos resultados apresentados é possível observar a ação do controlador no processamento do sinal de erro, reduzindo-o a aproximadamente zero em cerca de 30 ms. Assim, observa-se na saída do controlador PI sinais constantes em dq, com níveis de cerca de 700 e 65 V, respectivamente.

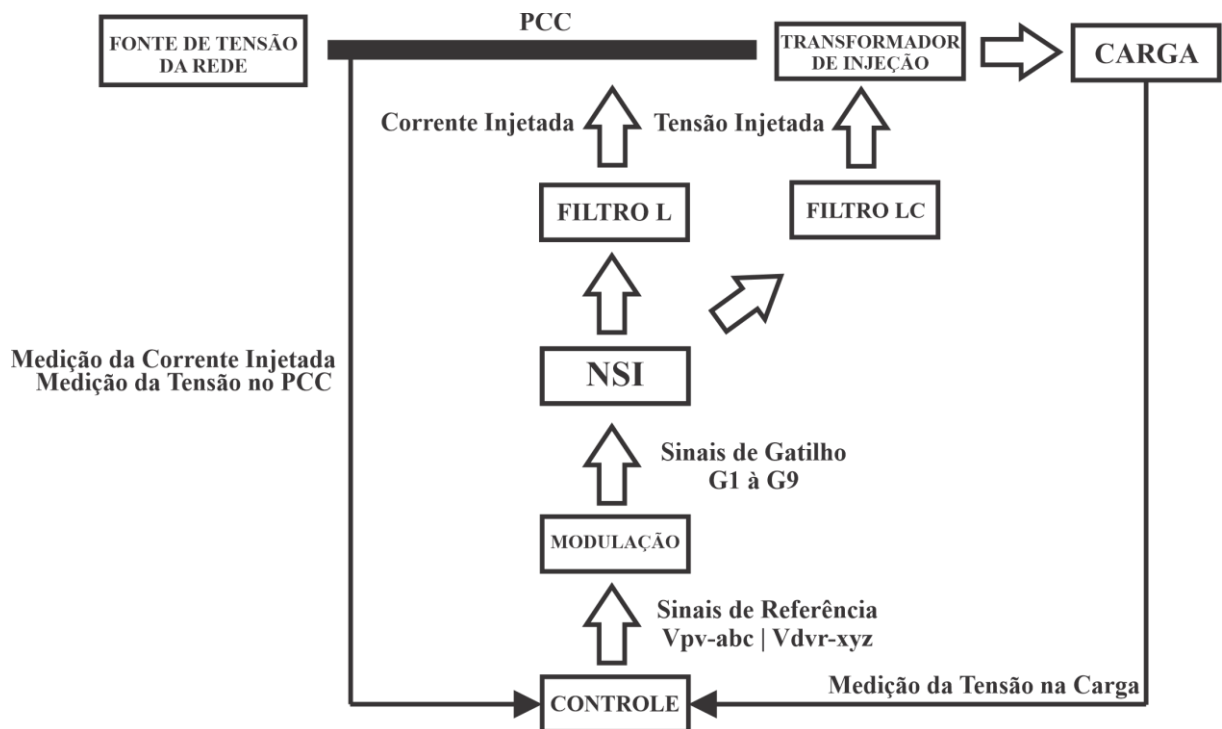
Por fim, após a saída do controlador PI passar pelo bloco responsável pela transformada inversa, os sinais retornam ao sistema de referência estacionário, sendo estes, os sinais de referência senoidais que serão utilizados como entrada do esquema de modulação. A amplitude dos sinais senoidais resultantes variou de -1 a 1, o que é coerente, tendo em vista que durante a operação em modo normal toda a energia gerada pelo PV deve ser convertida em potência ativa injetada na rede.

4.3.2. Sistema de Controle do DVR

Para simular o sistema de controle do DVR, utilizou-se uma rede com tensão nominal de 340 V de pico, que é submetida no tempo 0,5 segundo a um afundamento simétrico de 50%.

Um diagrama funcional do sistema simulado é apresentado na Figura 21.

Figura 21. Esquemático simplificado de simulação.



Fonte: próprio autor.

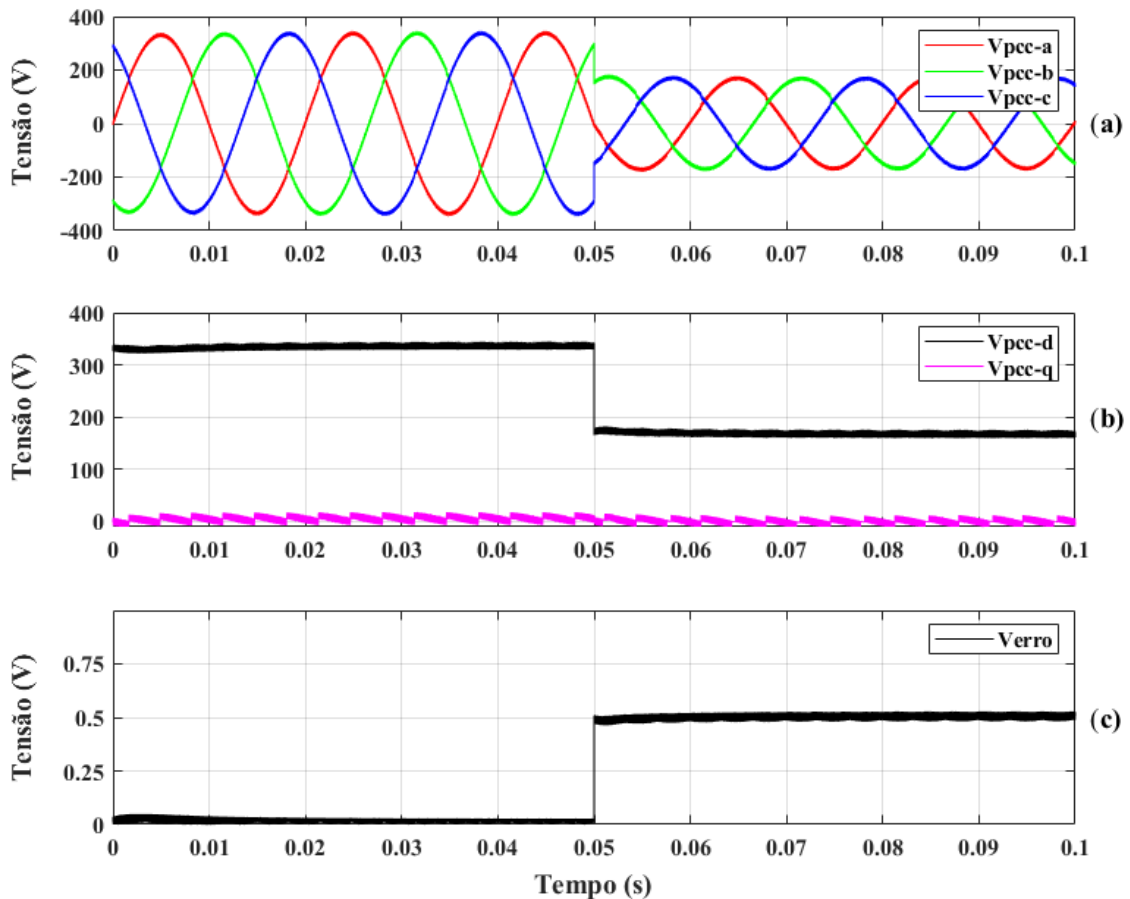
Na Figura 22 são apresentados os resultados obtidos para a tensão no PCC e sua transformada para o sistema de referência síncrono (dq), além do sinal V_{erro} (responsável pela detecção do afundamento).

Nota-se que enquanto a rede está operando em condições nominais, a componente da tensão no eixo-d assume o valor constante de aproximadamente 340 V. Como foi utilizada a estratégia de deixar o eixo-d alinhado com a sequência positiva da tensão no PCC, a componente do eixo-q (V_{pcc-q}) tornou-se nula. Até o instante 0,5 segundo o sinal Verro (dado pela equação 10) permaneceu conforme esperado próximo de zero.

Após a ocorrência do afundamento, a componente V_{pcc-d} caiu pela metade, tendo em vista que esta é a proporção do afundamento aplicado. Como o afundamento ao qual a rede foi submetida é simétrico, a componente V_{pcc-d} continuou constante. Já o sinal de erro, assumiu o valor de aproximadamente 0,5 V, o que significa que o afundamento foi detectado e que nesse instante o PLL passou a sincronizar a tensão do PCC com a tensão a ser injetada na rede.

Figura 22. Resultado de simulação: controle do DVR.

(a) Tensão no PCC; (b) Tensão no PCC em dq; (c) Sinal Verro – Equação (10)



Fonte: próprio autor.

A Figura 23 apresenta os resultados observados para a tensão de referência na carga, tensão no PCC e tensão de referência para o DVR, todas no sistema de referência síncrono.

De acordo com o esquemático de controle apresentado na Figura 17, a tensão de referência para o DVR é dada por:

$$V_{dvr-dq}^* = V_{L-dq}^* - V_{PCC-dq} \quad (11)$$

onde:

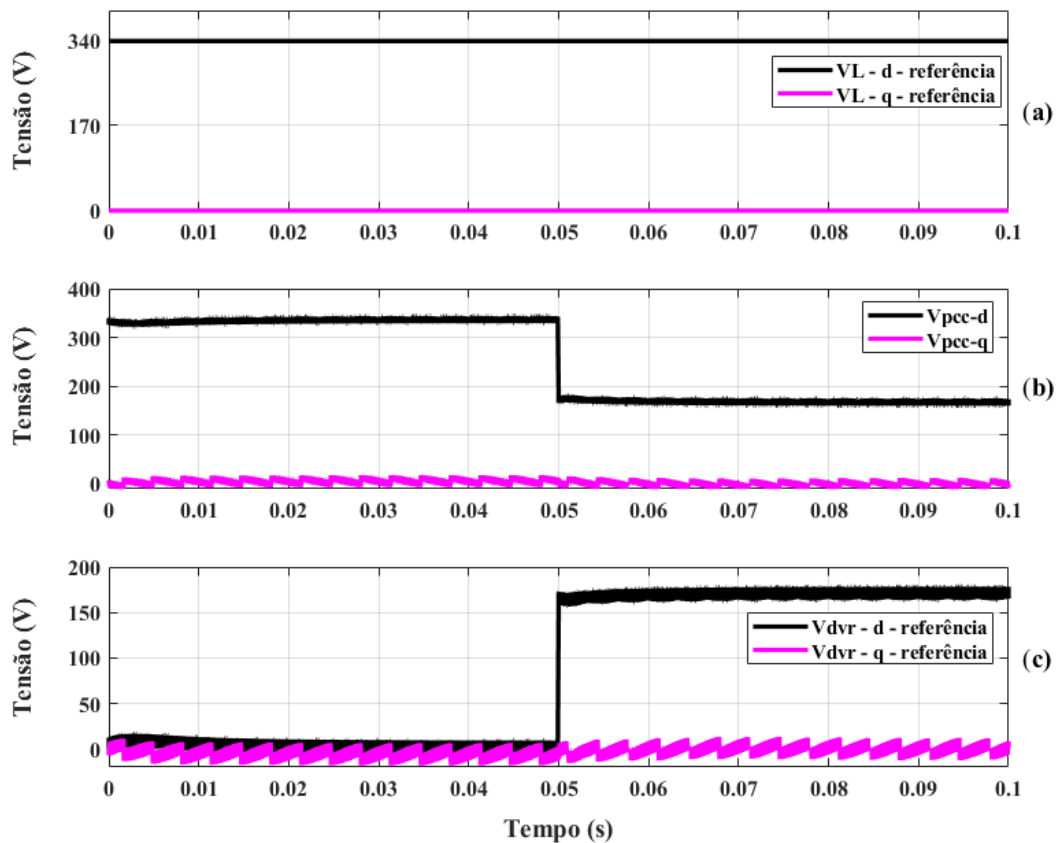
V_{dvr-dq}^* é a tensão de referência para a tensão a ser injetada pelo DVR;

V_{L-dq}^* é a tensão de referência para a carga;

V_{PCC-dq} é a tensão medida no PCC.

No resultado apresentado na Figura 23 é importante notar que antes da ocorrência do afundamento a tensão de referência para o DVR é aproximadamente nula. A partir da ocorrência do afundamento esta referência assumiu cerca de 170 V.

Figura 23. Resultado de simulação: sinais de controle DVR



Fonte: próprio autor.

A Figura 24 apresenta os resultados obtidos para a tensão medida na carga, tensão no PCC e tensão do DVR, todas no sistema de referência síncrono.

De acordo com a estratégia de controle utilizada, a tensão do DVR é dada por:

$$V_{dvr-dq} = V_{L-dq} - V_{PCC-dq} \quad (12)$$

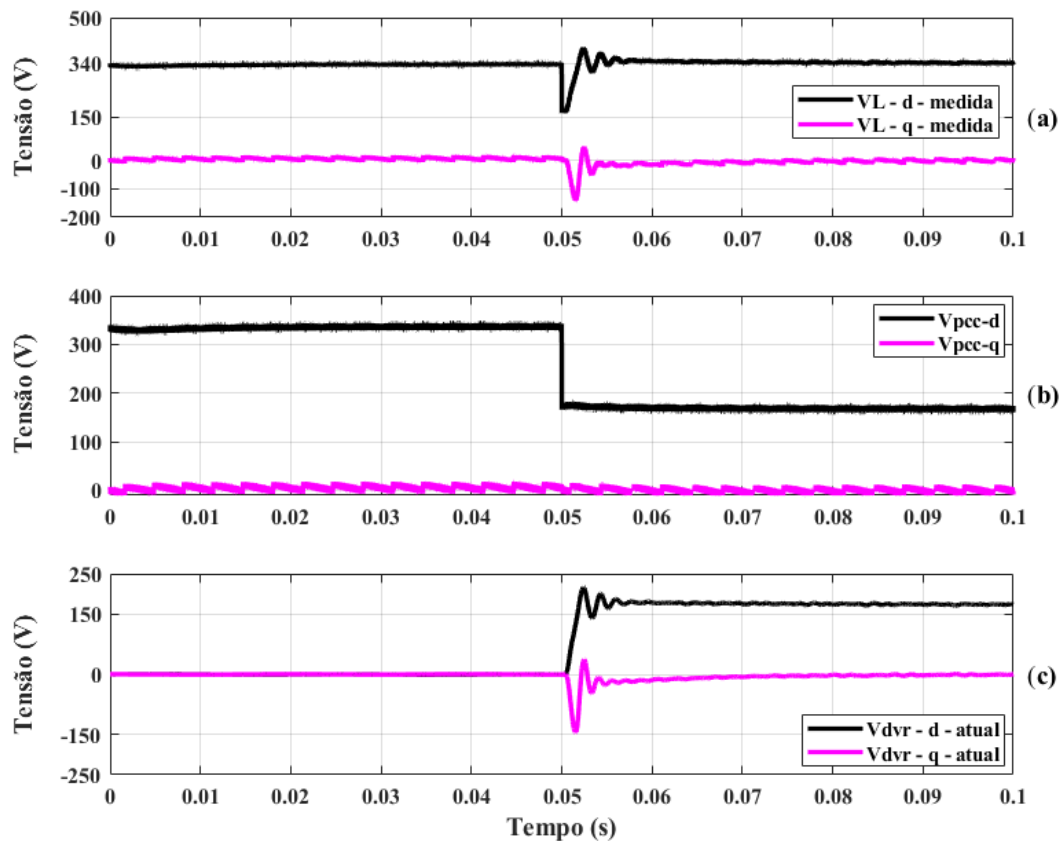
onde:

V_{dvr-dq} é a tensão atual do DVR;

V_{L-dq} é a tensão de medida na carga.

A partir do resultado apresentado na Figura 24, conclui-se que a carga experimentou tensão nominal mesmo após a ocorrência do afundamento de tensão no PCC. O transitório observado entre a ocorrência do evento e a entrada em regime permanente durou 5 ms. Mais uma vez, devido a escolha adequada de alinhamento do eixo d com a sequência positiva da tensão do PCC, as componentes q foram nulas.

Figura 24. Resultado de simulação: sinais de controle DVR

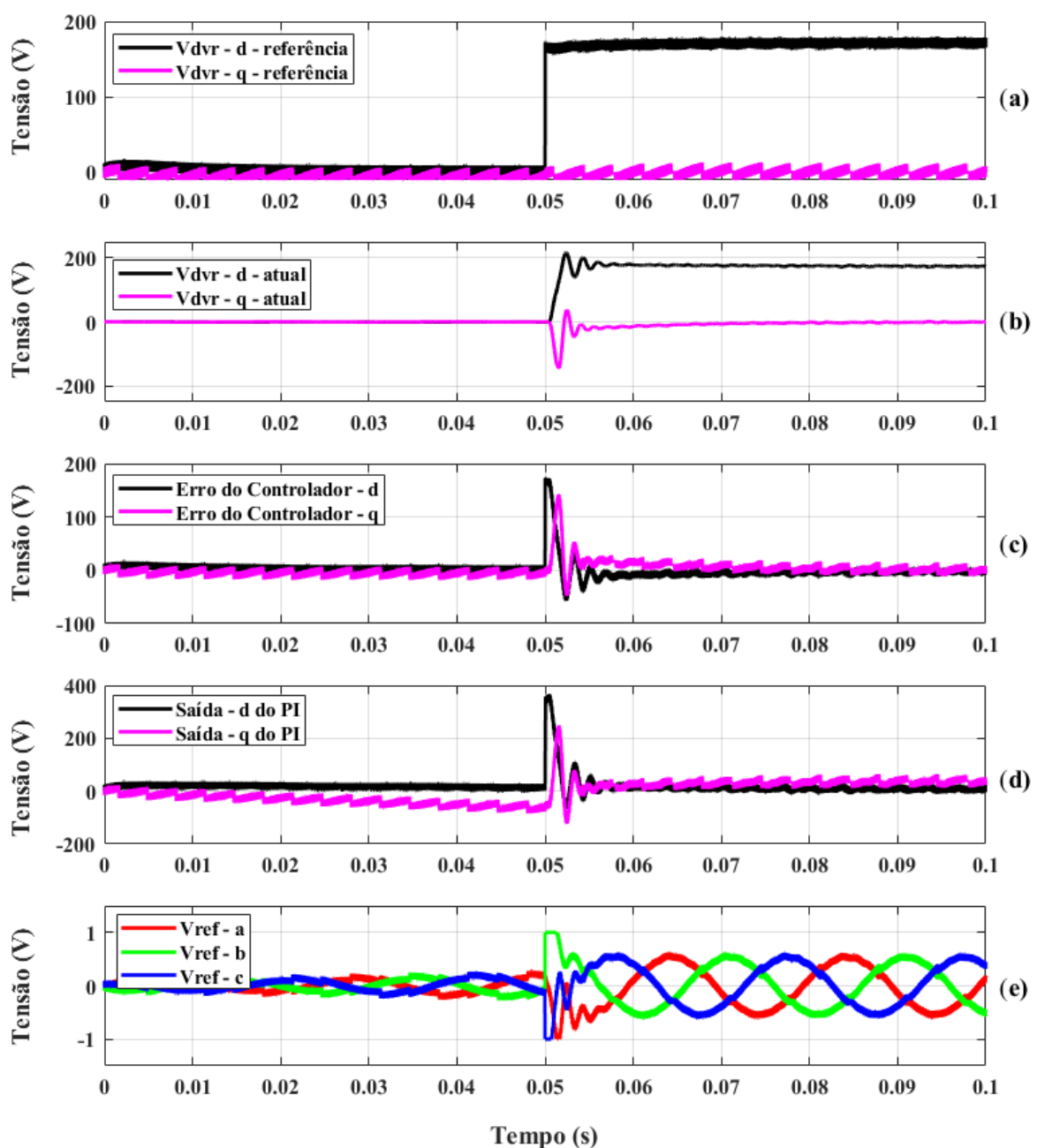


Fonte: próprio autor.

A Figura 25 contém os resultados obtidos para o sinal de entrada do controlador PI e para os sinais de referência senoidais de saída do sistema de controle.

De acordo com o esquema de controle mostrado na Figura 18, pode-se definir o sinal de entrada do controlador PI (sinal de erro) como sendo a diferença entre a tensão de referência para o DVR e a tensão atual do mesmo. Esse erro é processado pelo controlador PI e a sua saída é adicionado um sinal para compensação de perdas, findando com o retorno ao sistema de referência estacionário e a entrega dos sinais de referência senoidais para a modulação.

Figura 25. Resultado de simulação: saída do controle do DVR.



Fonte: próprio autor.

Da Figura 25, extrai-se que o controlador PI está atuando na minimização do sinal de erro, tendendo a zero em regime permanente. Por fim, observa-se que antes da ocorrência do afundamento o sistema de controle do DVR entrega sinais senoidais com amplitudes muito próximas a zero, e que, após um transitório que durou 5 ms, o sistema passou a entregar para o esquema de modulação sinais de referência senoidais com cerca de 0,5 V de amplitude, ou seja, proporcionais a magnitude do afundamento imposto a tensão do PCC.

4.4. CAPACIDADE DE CORREÇÃO DE FALTAS ASSIMÉTRICAS

Nesta seção é feita uma análise do comportamento do sistema de controle do DVR quando da ocorrência de uma falta assimétrica no PCC. A intenção é demonstrar que o sistema de controle apresentado para o DVR, não foi concebido para funcionar diante deste tipo de distúrbio. Isso será evidenciado através de simulações realizadas em Simulink/MATLAB.

Uma vez explicitada a inaptidão para correção de faltas assimétricas por parte do sistema de controle do DVR, será apresentada uma abordagem alternativa para suprir o sistema com esta capacidade.

4.4.1. Simulação – Sistema de Controle do DVR

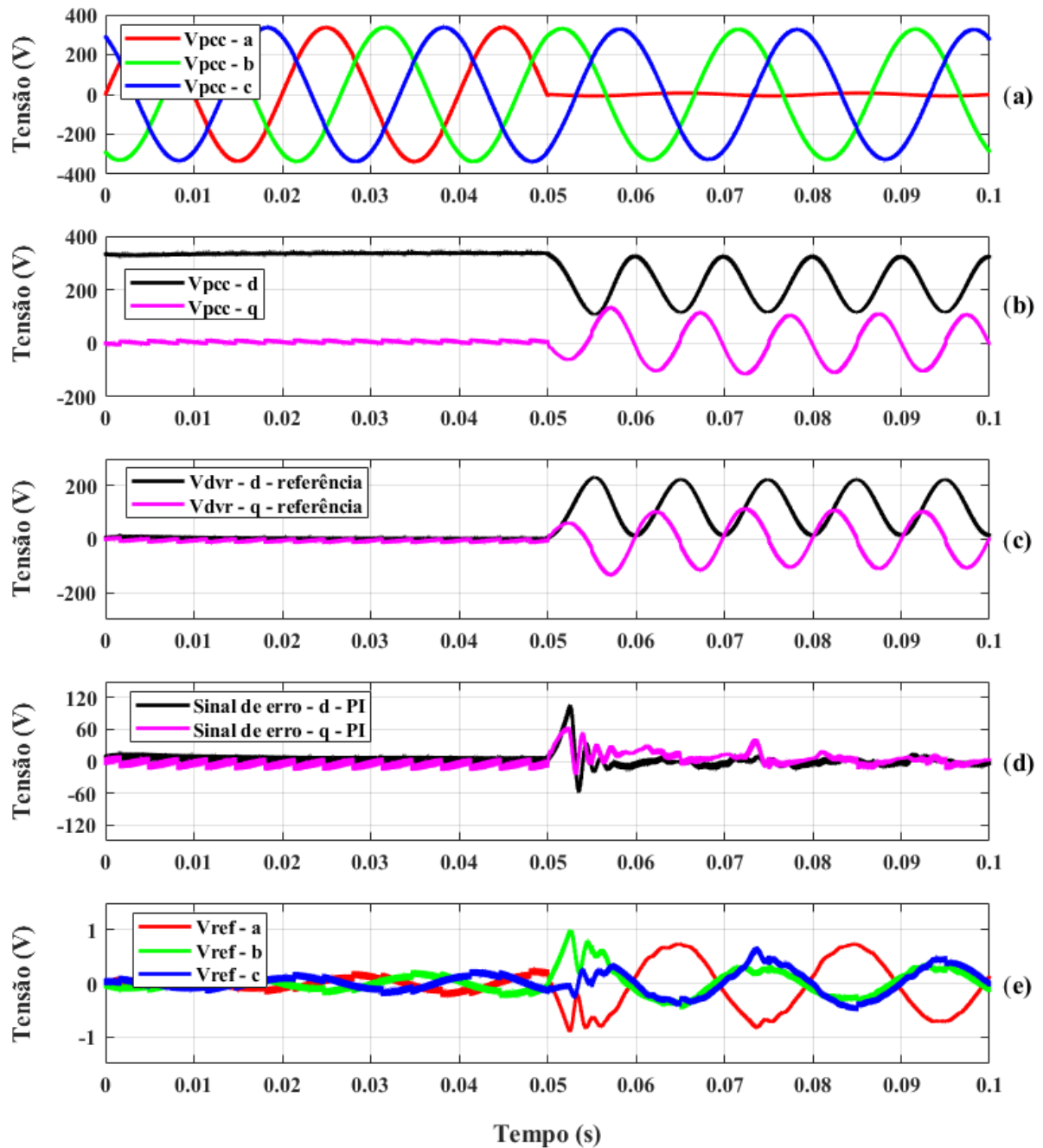
As simulações executadas aqui, seguem os mesmos moldes do que foi apresentado na subseção 4.3.2. No instante 0,5 segundo é imposta uma falta assimétrica monofásica ao PCC. Esta falta possui as seguintes características: fase A = terra e fases B-C, intactas.

Os resultados obtidos para a tensão no PCC e sua transformada para o sistema de referência síncrono (dq), além da tensão de referência para o DVR, erro de entrada do controlador PI e sinais senoidais de referência gerados, são apresentados na Figura 26 (a)-(e).

Na Figura 26, pode-se observar que, diferentemente de quando a rede opera em modo normal ou, por exemplo, durante um afundamento simétrico, as componentes dq da tensão no PCC não são constantes diante a presença de uma falta assimétrica no PCC. O motivo disso, é a própria definição da transformação para o sistema de referência síncrono.

Pode-se afirmar que a natureza oscilatória da tensão do PCC, quando transformada para o sistema de referência síncrono, tem um impacto negativo fundamental na incapacidade da correção de uma falta assimétrica nesse sistema.

Figura 26. Resultado de simulação: controle do DVR - Assimetria.



Fonte: próprio autor.

Note que, uma consequência direta da ausência de componentes constantes para V_{pcc-dq} , foi a oscilação observada dos sinais de referência para as tensões a serem injetadas pelo DVR. Além disso, o sinal de erro (entrada do controlador PI) assumiu natureza oscilatória e não tendeu a erro nulo em regime permanente.

Por fim, observou-se ainda, que a principal consequência da não existência de sinais constantes para V_{pcc-dq} é a não entrega de sinais senoidais de referência adequados para o esquema de modulação. Note que, era esperado que a senoide de referência para a fase A, assumisse o valor de 1, enquanto, as referências para B e C deveriam ser nulas, tendo em vista que é necessário executar compensação de tensão apenas na fase que sofre a falta.

O sistema produziu para a fase A uma referência de apenas aproximadamente 0,8 V, o que é insuficiente para restaurá-la. O mais grave é que, além de produzir tensões de referência para fases que não necessitam de correção, o sistema gerou sinais senoidais de referência para as fases B e C em fase entre si.

Outro ponto importante a notar, é que as senoides de referência nas estão mais em fase com as tensões presentes no PCC. O responsável por esta sincronização é o PLL, porém, ao ser submetido a tensão assimétrica presente no PCC, o mesmo não foi capaz de realizar a sincronização entre as tensões de referência a serem injetadas pelo DVR e a tensão da rede.

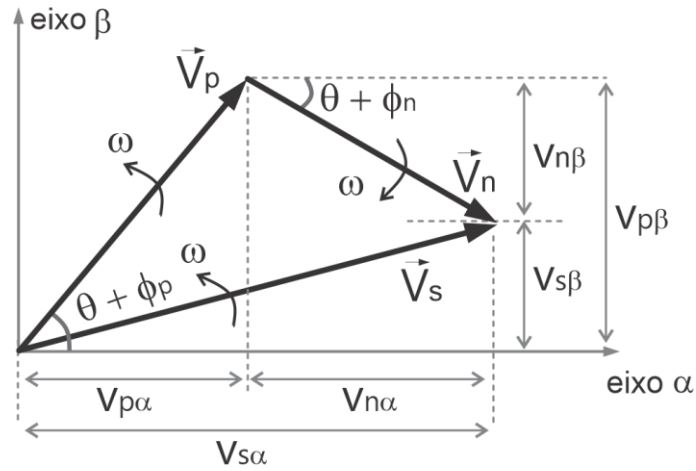
As observações apontadas até aqui são suficientes para concluir que o sistema de controle apresentado para o DVR, não possui a capacidade de correção de faltas assimétricas. Sendo o principal motivo desta limitação, a premissa de manipular apenas sinais constantes no sistema de referência síncrono.

4.4.2. Decomposição Instantânea em Componentes de Sequência

Para munir o sistema com a capacidade de correção de faltas assimétricas, neste trabalho será utilizada a técnica de decomposição instantânea em componentes de sequência (DCS) detalhada em [1].

Uma vez coletadas amostras da tensão do PCC $v_{S_a}, v_{S_b}, v_{S_c}$, elas são convertidas através da transformação $\alpha\beta 0$ para $v_{S_\alpha}, v_{S_\beta}, v_{S_0}$ [38]:

$$\begin{bmatrix} v_{S_0} \\ v_{S_\alpha} \\ v_{S_\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{S_a} \\ v_{S_b} \\ v_{S_c} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Figura 27. Vetores $\mathbf{v}_p$ e $\mathbf{v}_n$.

Fonte: adaptada de [1].

Quando as tensões da rede são equilibradas, o vetor $v_{s\alpha} + jv_{s\beta}$ tem magnitude constante e gira com velocidade angular também constante. Para o caso quando a tensão no PCC for desequilibrada (falta assimétrica, por exemplo), o vetor pode ser escrito como sendo a soma do vetor de sequência positiva $\mathbf{v}_p$ com um vetor de sequência negativa $\mathbf{v}_n$, ambos girando na mesma velocidade ω [1]. A Figura 27 ilustra esta situação.

Observado a disposição dos vetores $\mathbf{v}_p$ e $\mathbf{v}_n$ na Figura 27, pode-se escrever:

$$v_{s\alpha} = v_p \cos(\theta + \phi_p) + v_n \cos(\theta + \phi_n) \quad (14)$$

$$v_{s\beta} = v_p \sin(\theta + \phi_p) - v_n \sin(\theta + \phi_n) \quad (15)$$

onde ϕ_p e ϕ_n são os ângulos de fase iniciais de $\mathbf{v}_p$ e $\mathbf{v}_n$ com $\theta = \omega t$. Ao expandir senos e cossenos nas expressões (14) e (15), obtêm-se:

$$v_{s\alpha} = (v_{p\alpha 0} + v_{n\alpha 0}) \cos(\omega t) + (-v_{p\beta 0} + v_{n\beta 0}) \sin(\omega t) \quad (16)$$

$$v_{s\beta} = (v_{p\beta 0} - v_{n\beta 0}) \cos(\omega t) + (v_{p\alpha 0} - v_{n\alpha 0}) \sin(\omega t) \quad (17)$$

onde:

$$v_{p\alpha 0} = v_p \cos(\phi_p), v_{p\beta 0} = v_p \sin(\phi_p), v_{n\alpha 0} = v_n \cos(\phi_n) \text{ e } v_{n\beta 0} = v_n \sin(\phi_n).$$

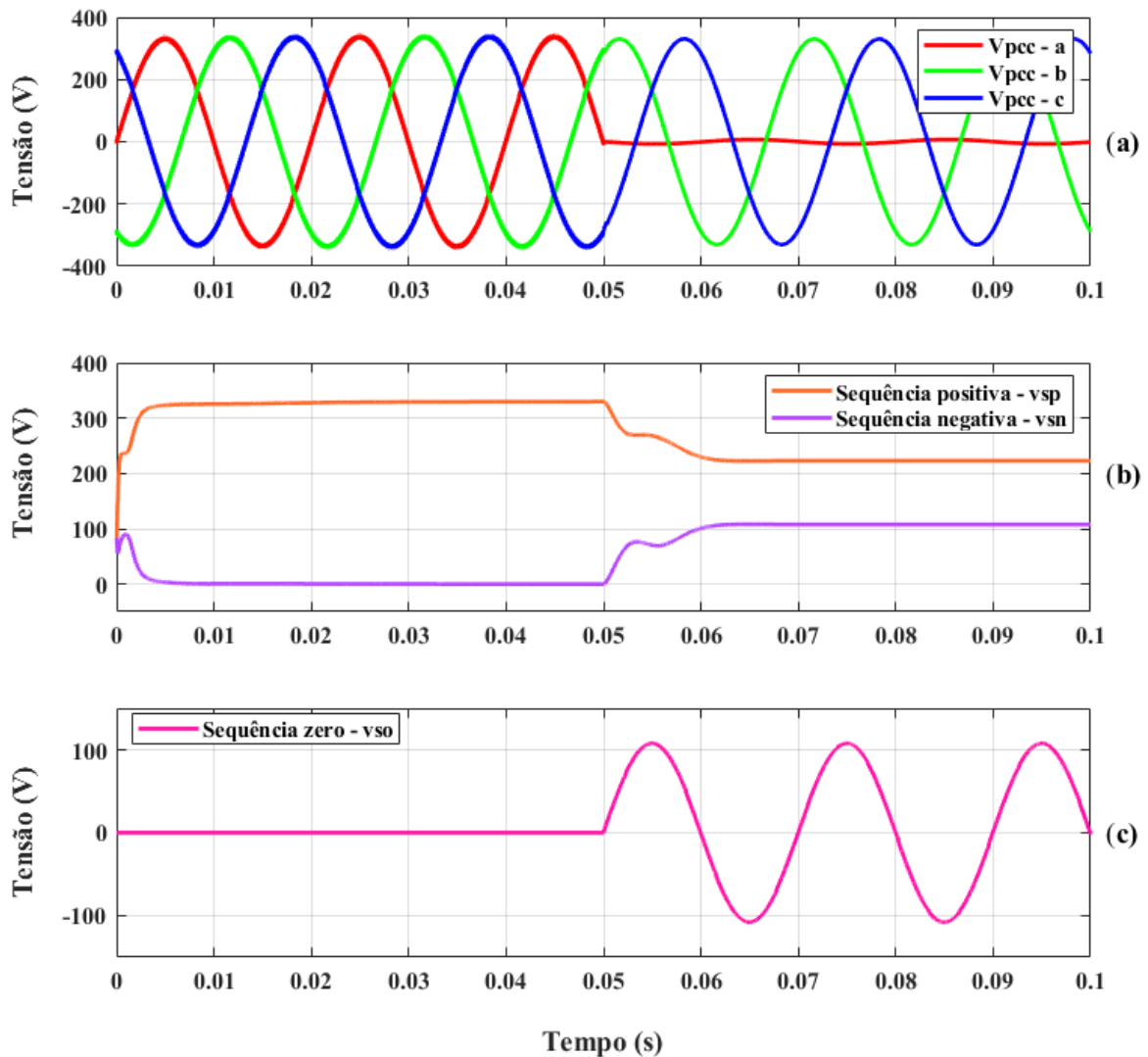
As equações (16) e (17) podem ser manipuladas de forma a resultar em uma única expressão, resultando em:

$$(vs_{\alpha} + jvs_{\beta}) = (v_{p\alpha 0} + jv_{p\beta 0})e^{j\omega t} + (v_{n\alpha 0} - jv_{n\beta 0})e^{-j\omega t} \quad (18)$$

Para efetuar a solução das equações (16) e (17) é utilizado neste trabalho o método de estimação por mínimos quadrados recursivos ponderado. O algoritmo completo deste método é descrito em detalhes em [41].

Foi desenvolvido um *script* em MATLAB para implementação desse método. Na Figura 28, são apresentados os resultados obtidos para uma decomposição em componentes de sequência das tensões do PCC durante uma falta assimétrica.

Figura 28. Resultado de simulação: decomposição em componentes de sequência.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 28, observou-se que antes da ocorrência da falta, a sequência positiva foi de aproximadamente 340 V (valor de pico rede) e 0 V para a sequência negativa. Após a ocorrência da falta, a estimação continua atuando, mas, dessa vez surge a presença de componentes de sequência negativa e zero, sendo a sequência negativa constante. O transitório pós-falta durou cerca de 10 ms até a estimação atingir o regime permanente.

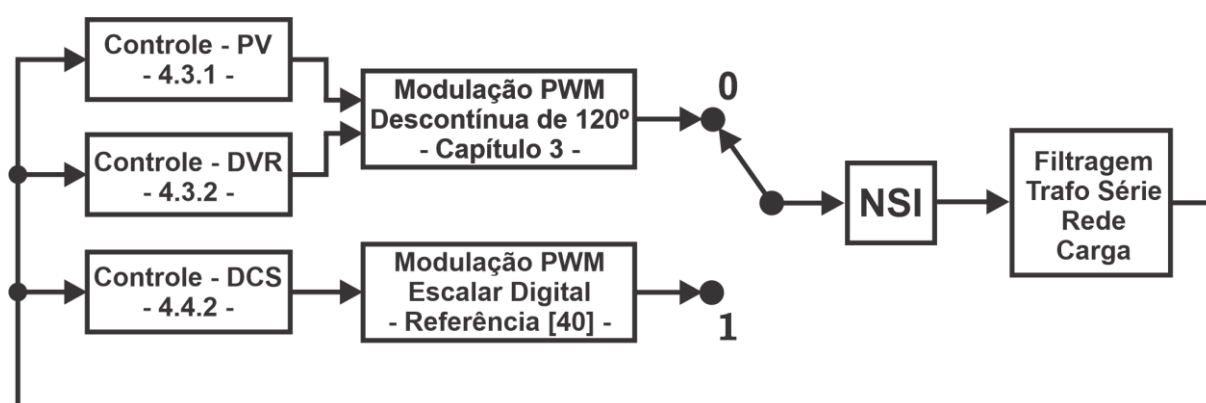
A proposta para munir o sistema PV-DVR com a capacidade de correção de faltas assimétricas, consiste em utilizar separadamente as componentes positiva e negativa estimadas durante a ocorrência do distúrbio para realização do controle.

Basicamente, a metodologia utilizada é comparar cada componente de sequência com valores de referência pré-estabelecidos. O resultado dessa comparação é então transformado de volta para o sistema de referência estacionário, sendo estes, os sinais de referência para o esquema de modulação.

Neste trabalho, durante a ocorrência de uma falta assimétrica no PCC, esta metodologia será acionada. Além disso, a técnica de modulação utilizada conjuntamente será uma PWM escalar digital. Esta estratégia de modulação é descrita detalhadamente em [42].

A Figura 29 mostra como o sistema de controle completo discutido até aqui interage com os demais componentes do sistema. A lógica de chaveamento entre os subsistemas de controle é alterada de zero para um quando ocorre uma falta assimétrica no PCC.

Figura 29. Diagrama funcional do sistema de controle completo.



Fonte: próprio autor.

4.5. CONCLUSÕES

Neste capítulo, foram apresentados os esquemas de controle que serão utilizados para a inserção de potência ativa na rede e compensação de tensão. Suas principais características e princípios de funcionamento foram discutidos.

Conforme explicitado no texto, a representação de uma planta fotovoltaica por uma fonte de tensão constante ideal possibilitou a simplificação do esquema de controle para injeção de corrente na rede.

Durante a discussão do esquema de controle utilizado para a função de DVR, o artifício utilizado para a detecção de faltas/afundamentos foi detalhado e interpretado de maneira simplista, mas, coerente e bem fundamentada.

Foram apresentados resultados de simulação para ambos os sistemas de controle. Para o sistema de controle de inserção de potência foi considerado o modo normal, enquanto que, para o controle do DVR considerou-se sua operação durante um afundamento de tensão no PCC. Além disso, foi possível analisar em detalhes a criação dos sinais de referência senoidais que são utilizados como entrada do esquema de modulação apresentado no Capítulo 3.

Foi realizada uma discussão a respeito da capacidade de compensação de tensão durante a ocorrência de faltas assimétricas do PCC. Durante a mesma, concluiu-se que o sistema de controle para o DVR possui a limitação de apenas tratar variáveis constantes no sistema de referência síncrono.

Por fim, foi apresentada a alternativa de um sistema de controle que utiliza o método de decomposição em componentes de sequência. Este método é utilizado apenas quando da ocorrência de faltas assimétricas na rede.

Logo, conclui-se que todos os resultados apresentados corroboraram com os conceitos discutidos, possibilitando uma correlação direta com equações, esquemáticos e principais conceitos apresentados ao longo do texto.

5. SIMULAÇÕES EM TEMPO REAL

Neste capítulo são discutidos os principais conceitos relacionados a simulações em tempo real. O objetivo do conteúdo apresentado aqui é a compreensão do método de validação que será utilizado neste trabalho. É neste capítulo também, que é apresentado o equipamento simulador em tempo real que será utilizado na obtenção dos resultados apresentados e devidamente discutidos no capítulo seguinte.

5.1. CONCEITOS

Durante simulações em tempo discreto, o tempo avança em etapas de mesma duração. Isto é chamado de simulação em passo fixo [43]. Vale salientar que existem outras técnicas de solução que utilizam passos de tempo variáveis. Essas técnicas são usadas para solução de sistemas de dinâmica de alta frequência e não-lineares, porém, são inadequados para simulações em tempo real [44]. Logo, neste trabalho todas as simulações em tempo real que forem apresentadas utilizam passo de tempo fixo.

Durante uma simulação em tempo discreto, a quantidade de tempo necessária para calcular todas as equações que representam um sistema durante um passo de tempo, pode ser menor ou maior do que a duração do passo de tempo da simulação. Essas duas situações são referidas como simulações *offline* [44].

Em uma simulação em tempo real, a precisão dos cálculos não depende apenas de uma boa representação da dinâmica do sistema, mas também do tempo utilizado para produzir os resultados. O tempo necessário para calcular todas as operações do sistema deve ser menor do que o passo de tempo definido. Caso o simulador termine as operações antes do passo determinado o tempo ocioso até o próximo passo é perdido, enquanto que nas simulações *offline* o tempo ocioso é aproveitado para calcular as equações do próximo passo de tempo. Se as operações não forem concluídas dentro do intervalo de tempo fixado, a simulação em tempo real é considerada inadequada, esta situação é conhecida como *overrun* [44].

Logo, uma simulação em tempo real exitosa deve ser capaz de solucionar toda a representação do sistema simulado dentro do passo de tempo fixo pré-determinado, sem a presença de *overruns*.

A obrigatoriedade da utilização de passos fixos em simulações em tempo real pode ser uma limitação significativa ao simular sistemas não lineares. A ocorrência de eventos não

lineares em uma simulação em tempo real, como a comutação de um transistor, pode causar instabilidade numérica. Para simular com precisão dispositivos eletrônicos de potência com altas frequências de chaveamento são requeridos passos de tempo muito pequenos para solucionar toda as equações do sistema [45]. Fabricantes de simuladores em tempo real vem propondo soluções para estes problemas, sendo as mais conhecidas a técnica de compensação em tempo discreto e algoritmos de interpolação, além de taxas de amostragem cada vez mais elevadas [46], [47].

5.2. TIPOS DE SIMULAÇÃO

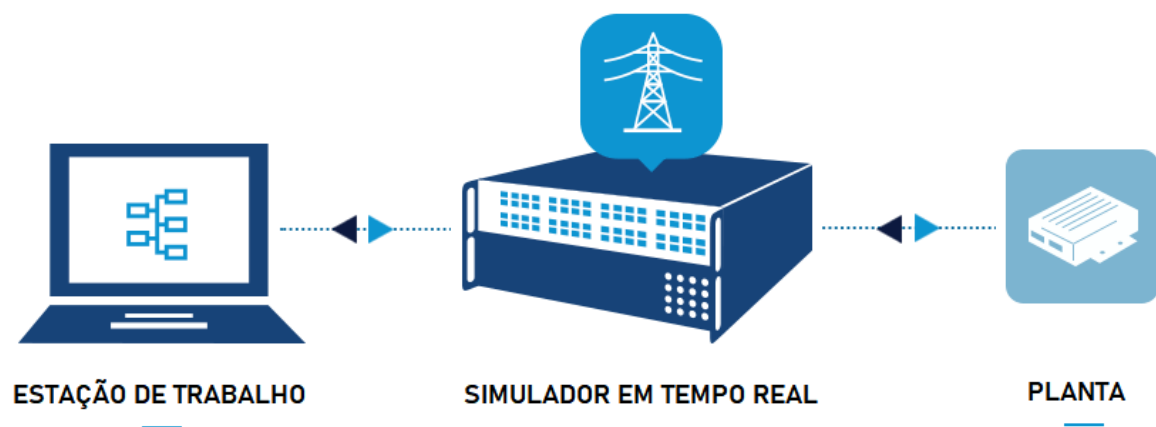
5.2.1. *Hardware-in-the-Loop (HIL)*

O teste de sistemas de controle tem sido em geral realizado diretamente no equipamento físico em campo, ou em bancadas de teste em laboratório. Apesar da fidelidade destes testes, essas práticas podem ter custos elevados ou serem inseguras [48].

Nas simulações do tipo HIL, a planta física é substituída por um modelo em computador precisamente equivalente, embarcada em um simulador de tempo real que possua entradas e saídas responsáveis por fazer a interface com outros equipamentos [48].

O processo de simulação HIL está ilustrado na Figura 30.

Figura 30. Processo de simulação HIL.



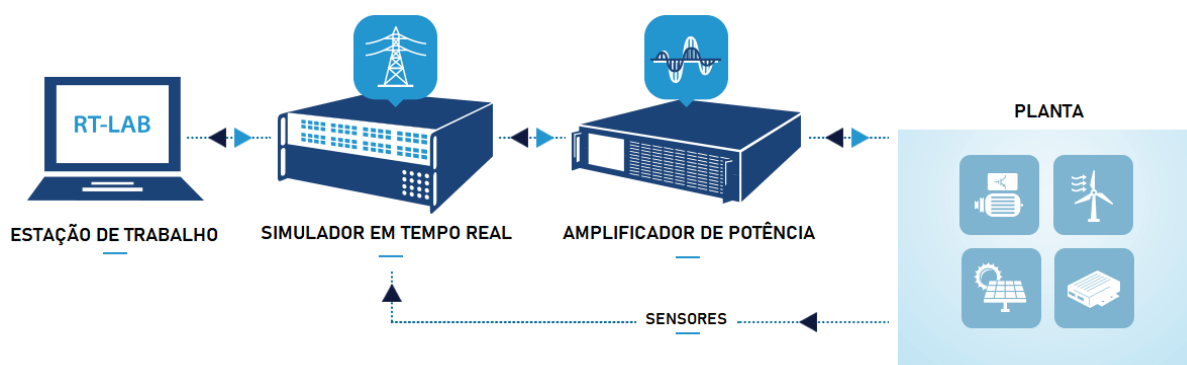
Fonte: adaptada de [48].

5.2.2. *Power Hardware-in-the-Loop (PHIL)*

A simulação do tipo PHIL representa uma extensão da HIL, em que o simulador de tempo real é capaz de trocar não apenas sinais de baixa tensão, mas também a energia necessária pelos dispositivos submetidos ao teste. Para tanto, são inseridos amplificadores de potência entre o simulador e os dispositivos [49]. Esse arranjo é mostrado na Figura 31.

Este tipo de simulação permite a simulação de fluxos de potência mais elevados entre simulador e dispositivos conectados. Essa capacidade permite a realização de testes com alta fidelidade e flexibilidade [49].

Figura 31. Processo de simulação PHIL.



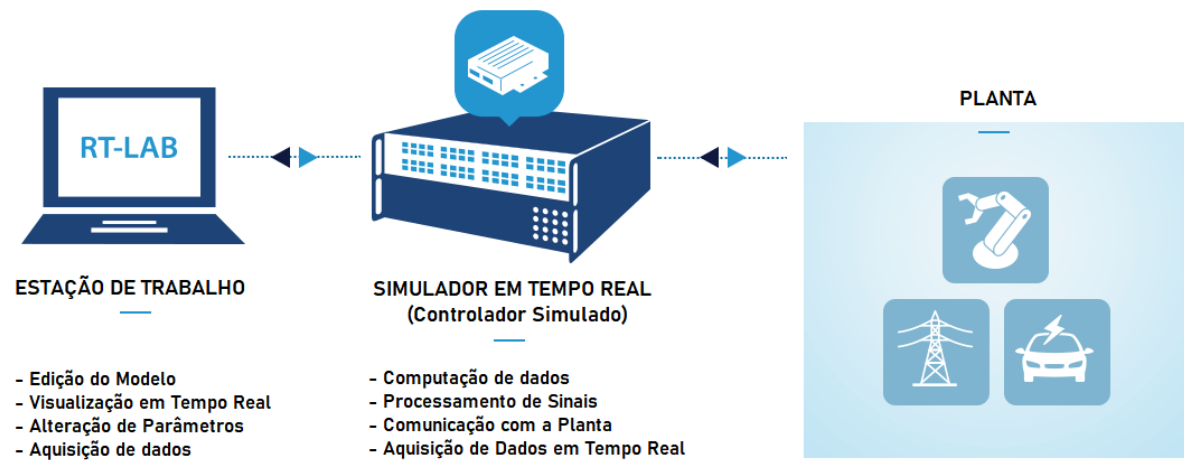
Fonte: adaptada de [49].

5.2.3. *Rapid Control Prototyping (RCP)*

No método RCP os modelos matemáticos criados na maioria das vezes em Simulink/MATLAB são carregados em um simulador em tempo real. Antes de serem utilizados em uma aplicação, as funcionalidades podem ser testadas em ambiente representativo. Este tipo de simulação é bastante aplicado em pesquisa e desenvolvimento, tendo em vista que as simulações podem ser realizadas desde as etapas iniciais de um projeto, sem a necessidade de integrações físicas complexas [50]. A Figura 32 ilustra esse tipo de simulação.

Este método de simulação é mais comumente utilizado para implementação de controladores. Nele o controlador é embarcado em um simulador em tempo real conectado a planta. A principal vantagem são ajustes no controle com apenas alguns cliques de *mouse*.

Figura 32. Processo de simulação RCP.

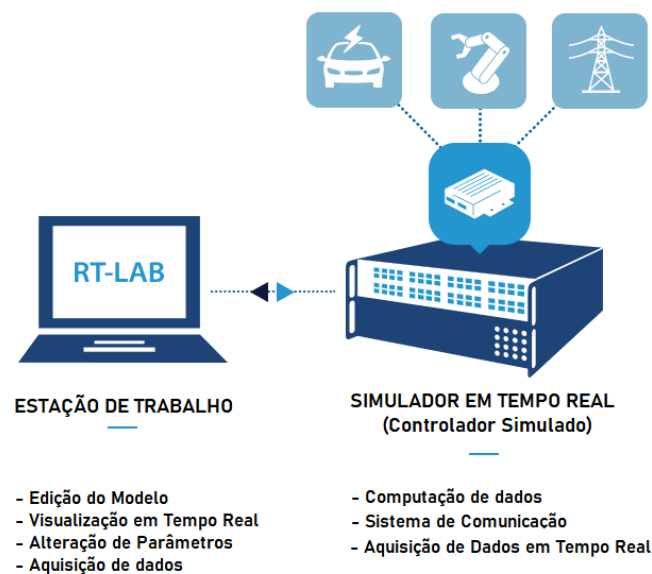


Fonte: adaptada de [50].

5.2.4. *Software-in-the-Loop* (SIL)

Este tipo de simulação é utilizado no processo de desenvolvimento de *software*. Nela, o usuário pode realizar a integração entre o código fonte criado e um modelo da planta ao qual ele será embarcado. A principal vantagem é a detecção de erros no sistema antes de iniciar a prototipagem do *hardware* [51]. O processo de utilização deste tipo de simulação está representado na Figura 33.

Figura 33. Processo de simulação SIL.



Fonte: adaptada de [51].

5.3. SIMULADOR EM TEMPO REAL – OP5700

O Laboratório de Otimização de Sistemas de Energia da UFPB (LOSE) dispõe de um simulador em tempo real da marca OPAL-RT Technologies de modelo OP5700. Este simulador é utilizado neste trabalho para validação do sistema PV-DVR discutido ao longo do texto. Neste ponto, a intenção é de apresentar o equipamento utilizado. Todos os resultados obtidos nesse trabalho ainda serão apresentados e discutidos no Capítulo 6.

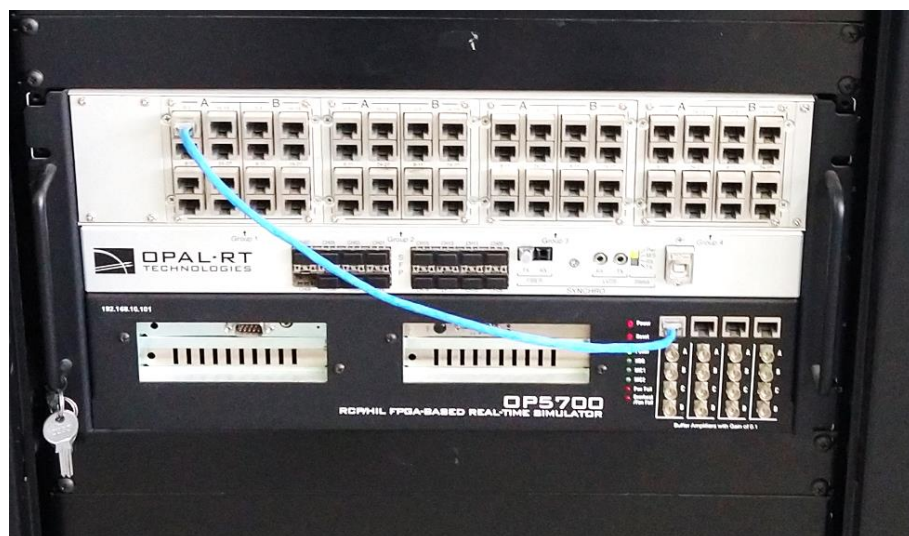
O OP5700 é um simulador de tempo real que possui um FPGA (*Field Programmable Gate Array*) reconfigurável, sistema para condicionamento de até 256 entradas/saídas e 16 portas SFP (*Small Form Pluggable*) de fibra ótica. Projetado para ser usado como *desktop* ou em rack padrão de 19” [52]. Na Tabela 8 estão mostrados os principais recursos do OP5700, enquanto a Figura 34 apresenta uma foto em visão frontal do equipamento.

Tabela 8. Recursos do OP5700.

Item	Quantidade	Descrição
Sistema Operacional	1	Em tempo real baseado em Linux
CPU	2	Intel Xeon E5-2667 @3.2 GHz – 8 núcleos
Placa Mãe	1	X10DRL-I-O
Total de Núcleos	16	----
Memória	4	8 GB

Fonte: próprio autor.

Figura 34. Foto do simulador em tempo real OP5700.



Fonte: próprio autor.

5.4. MODELO DE SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL – OP5700

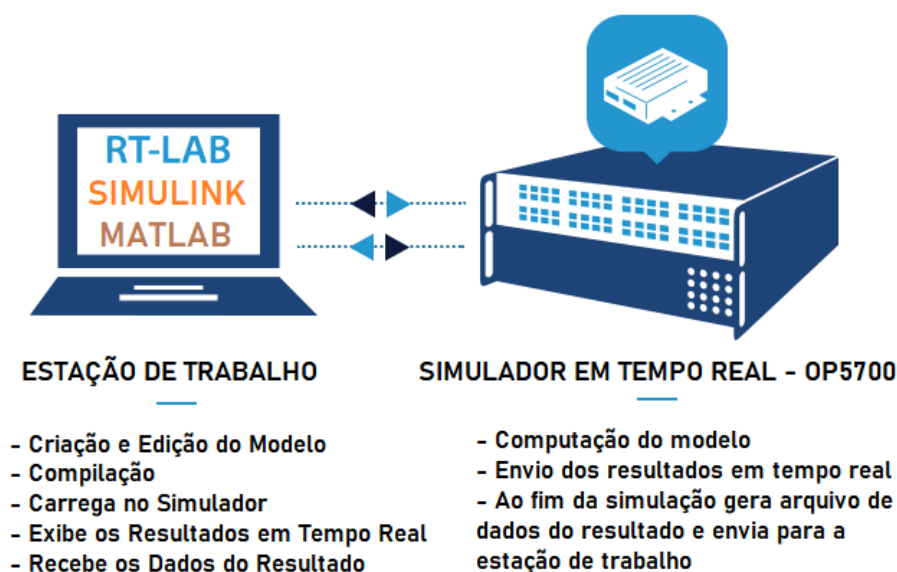
Para realizar a simulação em tempo real utilizando o OP5700 é necessário que o *software* RT-LAB (também da OPAL-RT Technologies) esteja disponível na estação de trabalho a qual o simulador esteja interligado. Este *software* tem a função de realizar a compilação do modelo criado pelo usuário e efetuar o carregamento do mesmo no simulador.

Neste trabalho, todos os modelos criados foram concebidos em ambiente Simulink/MATLAB. Isso é uma vantagem, tendo em vista que o RT-LAB possui a funcionalidade de importar modelos construídos em Simulink, bastando antes, realizar as devidas adaptações. As adaptações obrigatórias a serem feitas em um modelo Simulink, para que este, seja elegível a ser compilado pelo RT-LAB, e posteriormente, carregado no simulador em tempo real são descritas no Apêndice D.

5.5. METODOLOGIA ADOTADA

Neste trabalho, a simulação em tempo real será utilizada para validação do sistema de inserção de potência na rede e DVR integrados via NSI. A metodologia para execução das simulações em tempo real apresentadas neste texto, está ilustrada na Figura 35.

Figura 35. Metodologia de simulação em tempo real.



A metodologia utilizada consiste na construção de modelos em ambiente Simulink/MATLAB que representam todas as funcionalidades e especificidades discutidas nos Capítulos 2, 3 e 4. Em seguida, os modelos são compilados na estação de trabalho e carregados no OP5700. Daí, o simulador em tempo real passa a executar o modelo. Podendo exibir os resultados em tempo real, salvar após o término da simulação (na estação de trabalho) um arquivo de dados contendo todos os resultados obtidos na simulação, ou, ambas as opções.

Neste trabalho, a opção escolhida para a visualização dos resultados obtidos na simulação em tempo real foi a colheita do arquivo de dados (no fim da simulação) contendo os resultados de todas as variáveis a serem observadas. Estes dados, são posteriormente utilizados para realizar todas as análises de comportamento do sistema, bem como, para confecção de gráficos e obtenção de conclusões pertinentes.

5.6. CONCLUSÕES

Neste Capítulo, foram introduzidos conceitos básicos a respeito das simulações em tempo real e suas principais características. Foram apresentados os principais tipos de simulação em tempo real e suas particularidades no sistema OPAL-RT.

O simulador em tempo real que é utilizado para a validação dos modelos construídos neste trabalho foi apresentado, tendo também, suas principais especificações explicitadas. Além disso, foi comentado como é feita a interação entre o modelo construído e o simulador em tempo real. As adaptações necessárias aos modelos construídos em ambiente Simulink/MATLAB que tornam viáveis sua execução em tempo real, foram disponibilizadas no Apêndice D.

O Capítulo findou com o detalhamento da metodologia de simulação em tempo real utilizado neste trabalho. No próximo Capítulo, os conceitos, o simulador e a metodologia apresentados aqui, serão utilizados para a obtenção de todos os resultados obtidos via simulação em tempo real com o simulador OP5700.

6. RESULTADOS

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados de simulação obtidos para a configuração que integra via um NSI os sistemas para inserção de potência na rede e DVR. Para tanto, foi construída uma plataforma de simulação em ambiente Simulink/MATLAB.

A plataforma construída também foi utilizada (com as devidas adaptações) para realização de simulações em tempo real utilizando o simulador OP5700. Sendo assim, serão apresentados aqui primeiramente resultados obtidos no Simulink, seguidos dos resultados obtidos nas simulações em tempo real. A camada mais externa da plataforma desenvolvida em Simulink/MATLAB é mostrada no Apêndice E.

Inicialmente, os limites aceitáveis para as variações de tensão que podem ser experimentadas pela carga são definidos. Em seguida, os parâmetros utilizados nas simulações são detalhados, assim como, um esquemático do sistema simulado completo é apresentado. Os cenários simulados que serão discutidos ao longo deste capítulo são:

- a) Modo Normal
- b) Modo Falta – Simétrica
- c) Modo Afundamento – Simétrico e Assimétrico
- d) Transições entre modos de operação
- e) Faltas Assimétricas

As variáveis que foram observadas durante as simulações de cada cenário abordado e que são apresentadas neste capítulo são: a tensão no PCC, tensão injetada da rede, tensão na carga e corrente injetada na rede.

Neste ponto, vale lembrar que o sistema apresentado neste trabalho, utiliza como fonte de geração da potência ativa a ser injetada na rede uma planta fotovoltaica, porém, por simplificação e sem prejuízo de confiabilidade, ela foi representada por uma fonte de tensão constante em todos os cenários simulados.

Definições sobre os modos de operação, técnica de modulação utilizada, bem como, detalhes dos sistemas de controle e do simulador em tempo real, foram discutidos ao longo do texto nos Capítulos 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

6.2. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO E ESQUEMÁTICO

A fim de definir os limites aceitáveis de magnitude e duração das variações de tensão as quais a carga pode ser exposta, utilizou-se a curva ITI (CBEMA) [53], [54]. Alguns dos limites extraídos desta, são mostrados na Tabela 9. Esta curva está disponível para consulta no Apêndice F.

Os parâmetros utilizados nas simulações em Simulink e em tempo real são mostrados na Tabela 10. Já o esquemático completo do sistema simulado é apresentado na Figura 36.

Tabela 9. Condições de contorno para a carga.

Percentual da Tensão Nominal (RMS ou Pico)	Duração Admissível (Segundos)
Menores que 70 %	Até 20,0 ms
140 %	Até 3,00 ms
150 %	Até 2,50 ms
200 %	Até 1,00 ms

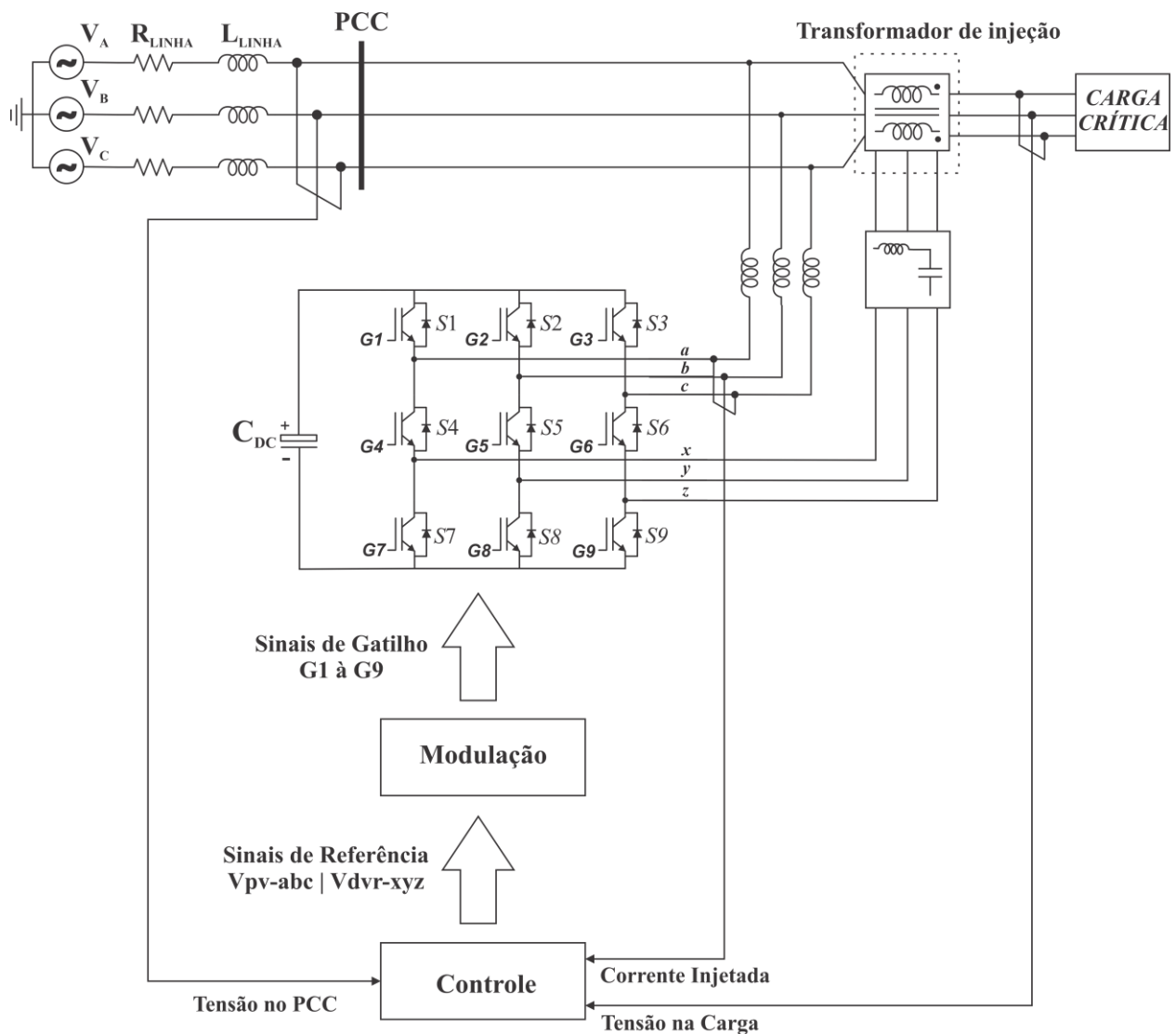
Fonte: próprio autor.

Tabela 10. Parâmetros de simulação

Parâmetro	Valor
Tensão de linha da rede	415 V (rms)
Amplitude da tensão de fase da rede	338,85 V
Frequência da rede	50 Hz
Impedância da Rede	$0,5 + j0,05 \Omega$
Potência nominal da carga	10 kVA
Fator de potência nominal da carga	0,8 em atraso
Indutância dos filtros	5 mH
Capacitância dos filtros	50 μ F
Transformador série	10 kVA / 1:1
Tensão do barramento c.c.	700 V
Capacitância do barramento c.c	3000 μ F
Frequência da portadora	20 kHz
Constante proporcional - PV	32
Constante integral - PV	100
Constante proporcional - DVR	2
Constante integral - DVR	100
<i>Solver</i>	Ode3 (Bogacki-Shampine)
Passo fixo	35 μ s

Fonte: próprio autor.

Figura 36. Esquemático do sistema simulado.



Fonte: próprio autor.

6.3. RESULTADOS – SIMULINK/MATLAB

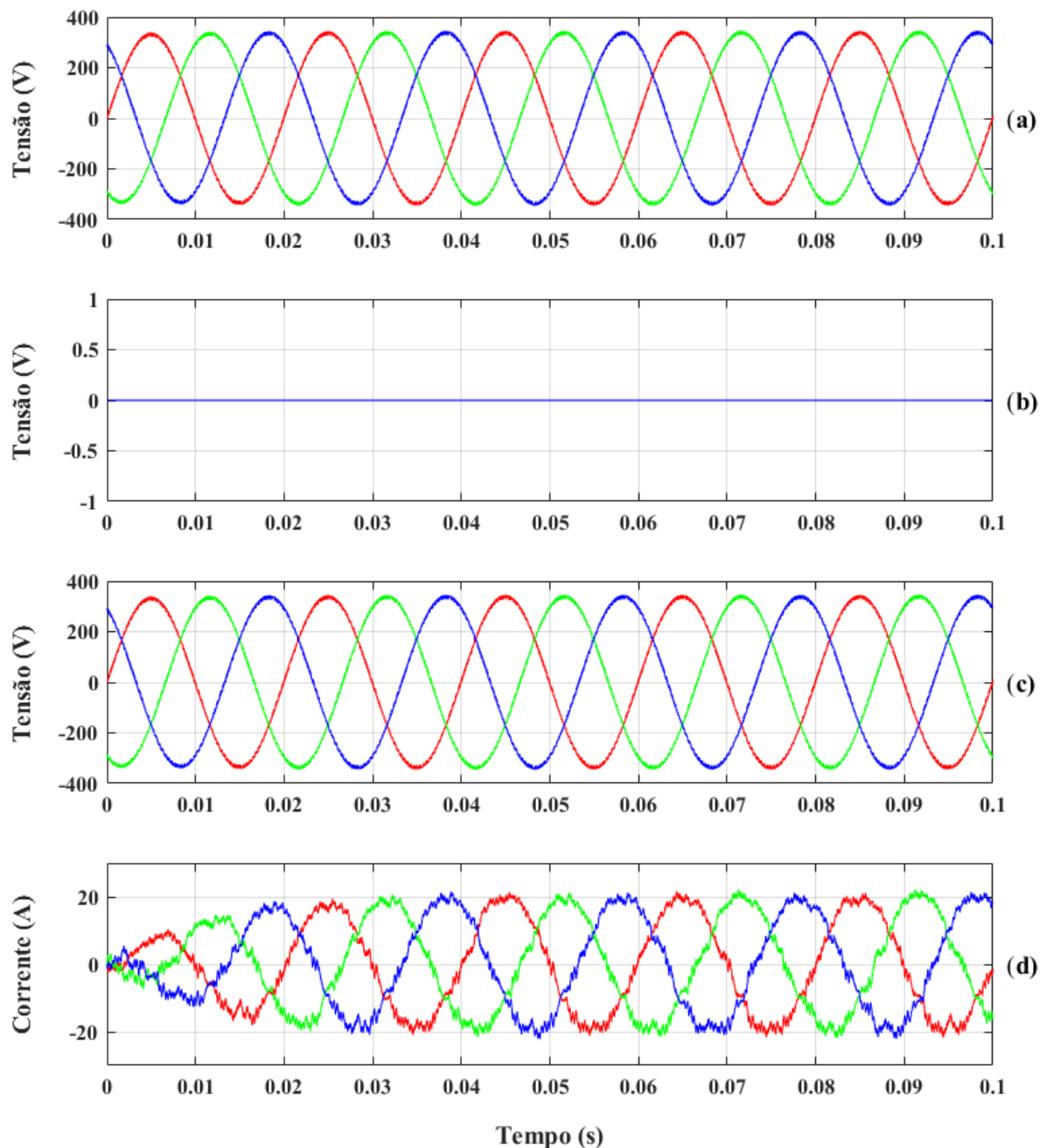
6.3.1. Modo 1 – Normal

Durante o modo normal, a rede opera em condições nominais (tensão no PCC de 1 p.u.). O controle para injeção de corrente na rede foi configurado com uma corrente de referência de 20 A de pico. A Figura 37 (a)-(d) mostra os resultados obtidos para estas condições.

Conforme esperado para este modo de operação, o DVR permaneceu inativo (não houve injeção de tensão). A corrente injetada teve um tempo de acomodação de 30 ms (partindo de condições iniciais nulas), equivalente a 1,5 ciclo da fundamental. O valor assumido em regime permanente para a corrente injetada foi de aproximadamente 20 A. A carga experimentou tensão nominal durante todo o tempo de simulação.

Figura 37. Resultado de simulação: Simulink – modo normal.

(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

6.3.2. Modo 2 – Falta Simétrica

Na simulação realizada, uma falta simétrica ocorre em 0,05 s. A Figura 38 (a)-(d) mostra os resultados obtidos para este modo de operação.

Após a detecção da falta, ocorreu um transitório com duração de 8 ms. Onde foi registrado para a tensão na carga um pico de tensão com aproximadamente 25% de aumento em relação à tensão nominal., com uma duração de 0,7 ms. O tempo o qual a carga permaneceu em sobretensão ficou dentro dos padrões estabelecidos em [51].

Vencido o transitório, a tensão injetada na rede assumiu em regime permanente o valor de 234,9 Vrms. Enquanto a carga experimentou uma tensão de 234,1 Vrms. Conforme esperado, após a detecção da falta, a injeção de corrente começou a diminuir tendendo a nulidade em regime permanente.

6.3.3. Modo 3 – Afundamento Simétrico e Assimétrico

Para simulação do modo 3 foram observados dois cenários. O primeiro consiste em um afundamento simétrico com magnitude de 50% em relação a tensão nominal do PCC. Enquanto no segundo, são impostos nas fases A, B e C, afundamentos de magnitude 40, 70 e 70%, respectivamente. Os eventos foram programados para ocorrerem no tempo 0,05 segundo. Os resultados obtidos para estes dois casos são apresentados nas Figuras 39 e 40.

Pela Figura 39, notou-se que após a detecção do afundamento simétrico, o sistema enfrentou um transitório que durou cerca de 20 ms. Durante este transitório, foi registrada uma tensão de pico máxima na carga 61,65% acima da tensão nominal. A carga ficou submetida a esta sobretensão durante 0,5 ms. Logo, a sobretensão experimentada tem duração abaixo do especificado pela curva CBEMA [51].

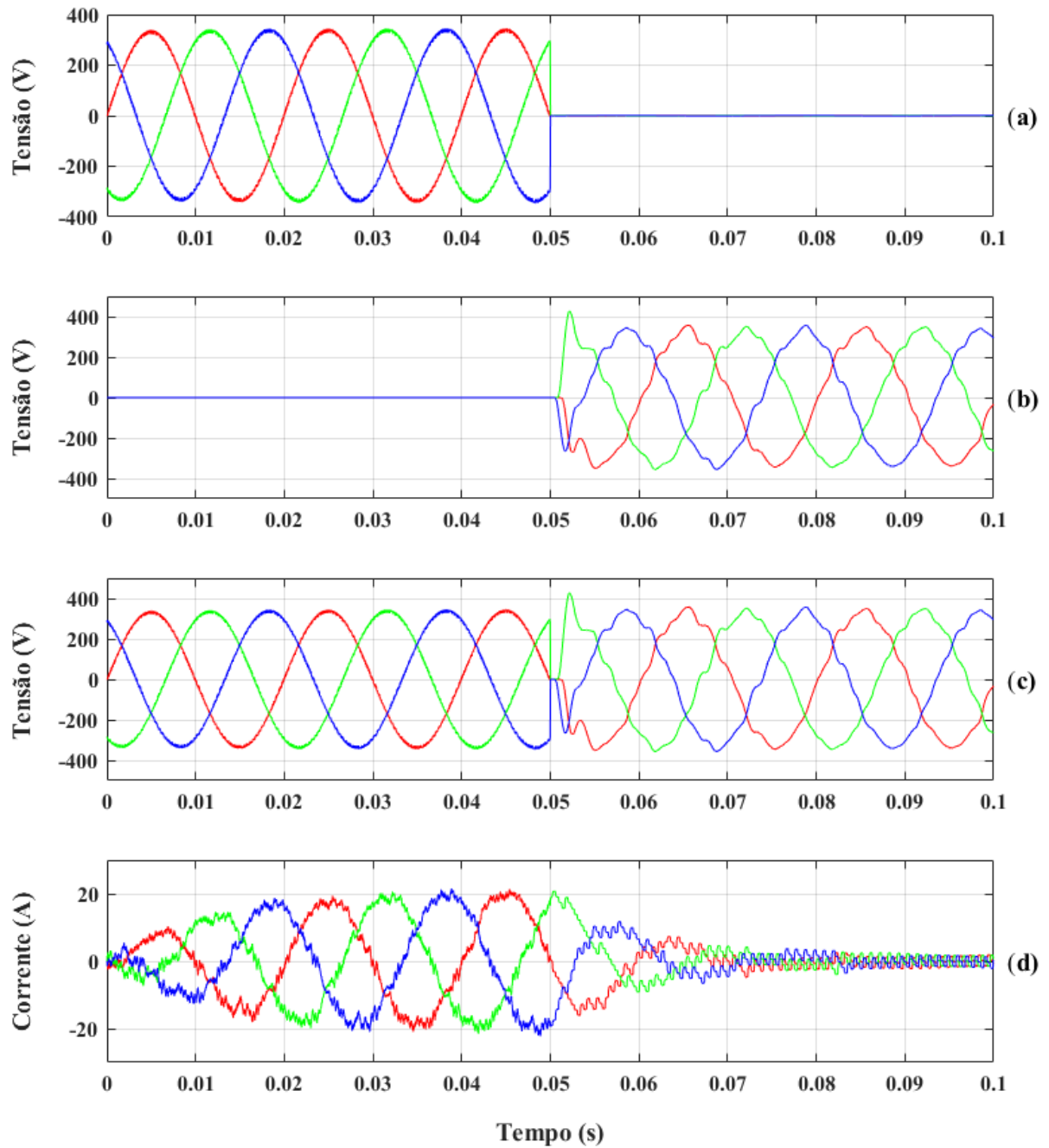
Em regime permanente a carga experimentou tensão nominal, enquanto a corrente injetada, passado o transitório, assumiu um valor de pico de 11,57 A.

Da Figura 40, extrai-se que após o evento de afundamento assimétrico o sistema passou por um transitório de cerca de 20 ms. Nesse período, a carga foi submetida a uma sobretensão com pico de 410 V, o que representa 21,01% acima da tensão nominal. A carga ficou exposta a este pico de tensão por cerca de 0,4 ms, o que não fere as recomendações de [51].

Já em regime permanente, a carga experimentou tensão nominal. Enquanto a corrente injetada na rede, foi reduzida proporcionalmente aos percentuais de afundamento imposto a cada fase.

Figura 38. Resultado de simulação: Simulink – modo falta.

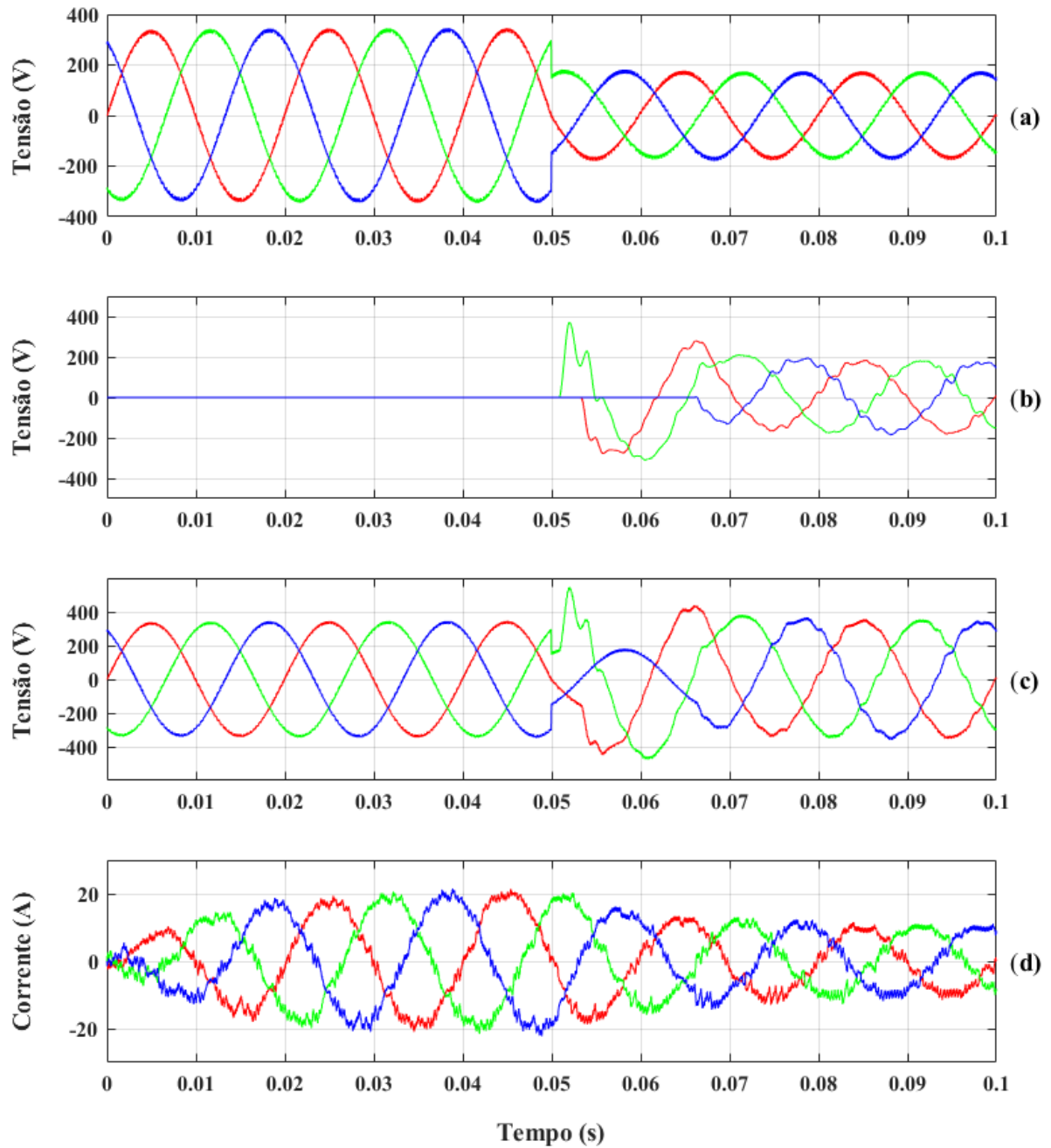
(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

Figura 39. Resultado de simulação: Simulink – modo afundamento – simétrico.

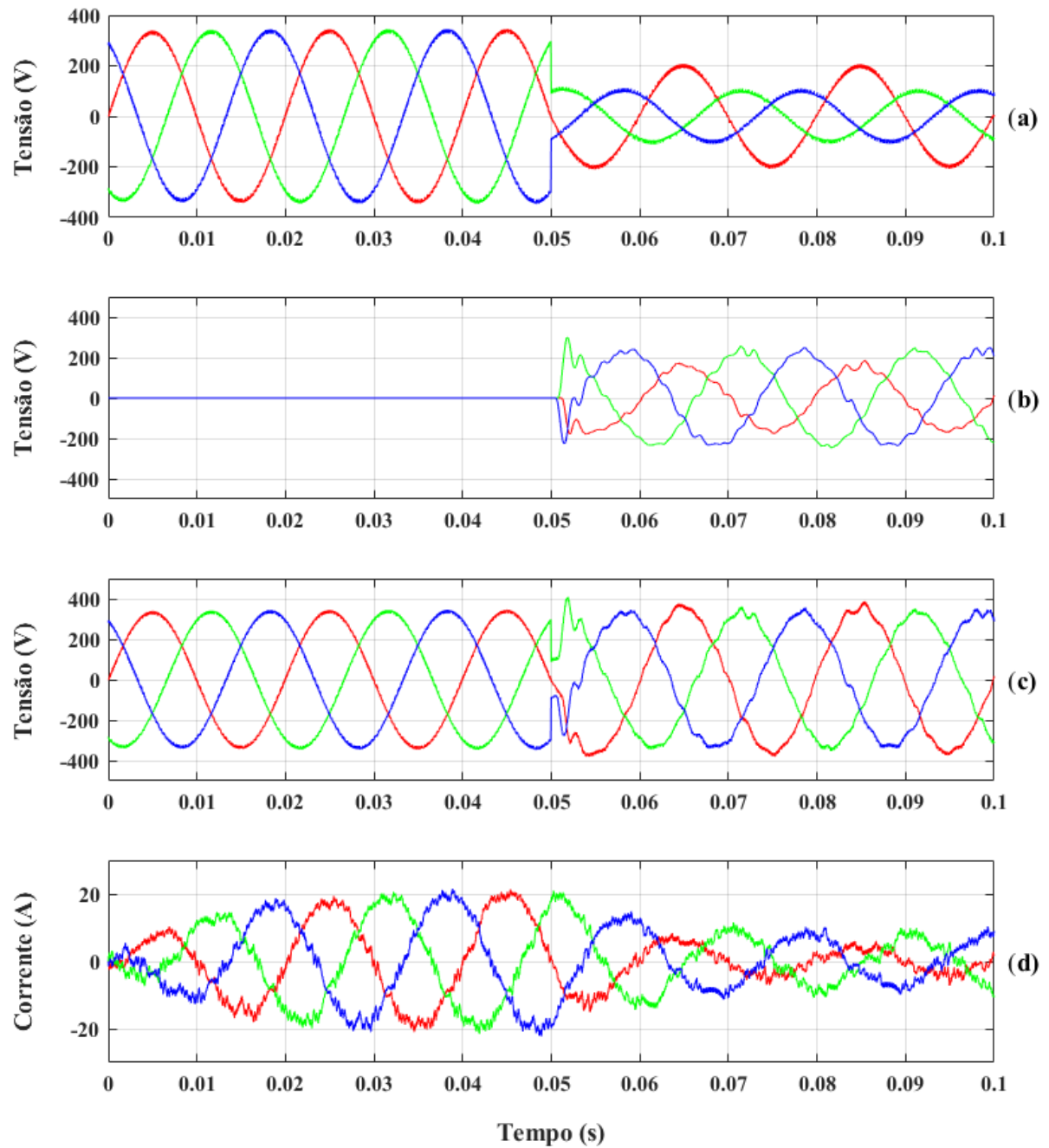
(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

Figura 40. Resultado de simulação: Simulink – modo afundamento – assimétrico.

(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

6.3.4. Transição entre Modos de Operação

Visando observar o comportamento do sistema diante de situações de transição entre os modos de operação, foi realizada uma simulação onde a tensão no PCC assume três estados diferentes, sendo eles, nominal, afundamento simétrico e falta simétrica, respectivamente. Os distúrbios foram programados para ocorrer a cada 50 milissegundos. A magnitude do afundamento simétrico aplicado foi de 50%. Os resultados obtidos para estes cenários são mostrados na Figura 41.

Após a ocorrência do afundamento simétrico, o sistema enfrenta um transitório com duração de 20 ms. Nesse transitório, a carga foi exposta a um pico de tensão de 547,7 V, o que representa um aumento de 61,66% da tensão nominal. O tempo o qual a carga ficou submetida a esta sobretensão foi de 0,47 ms, o que está abaixo da faixa de tempo especificada para classificação do evento. Findado o transitório, a carga experimentou tensão nominal, enquanto corrente injetada na rede, apresentou em regime permanente valor de pico de 11 A.

No instante 0,1 segundo, ocorreu a falta simétrica programada. Este evento, gerou a aparição de um novo transitório. Este, durou cerca de 10 ms, com tensão de pico máxima observada na carga de 400 V (18% acima da tensão nominal). Passado o novo transitório, a carga voltou a experimentar tensão nominal, enquanto a corrente injetada tendeu a zero.

6.3.5. Falta Assimétrica

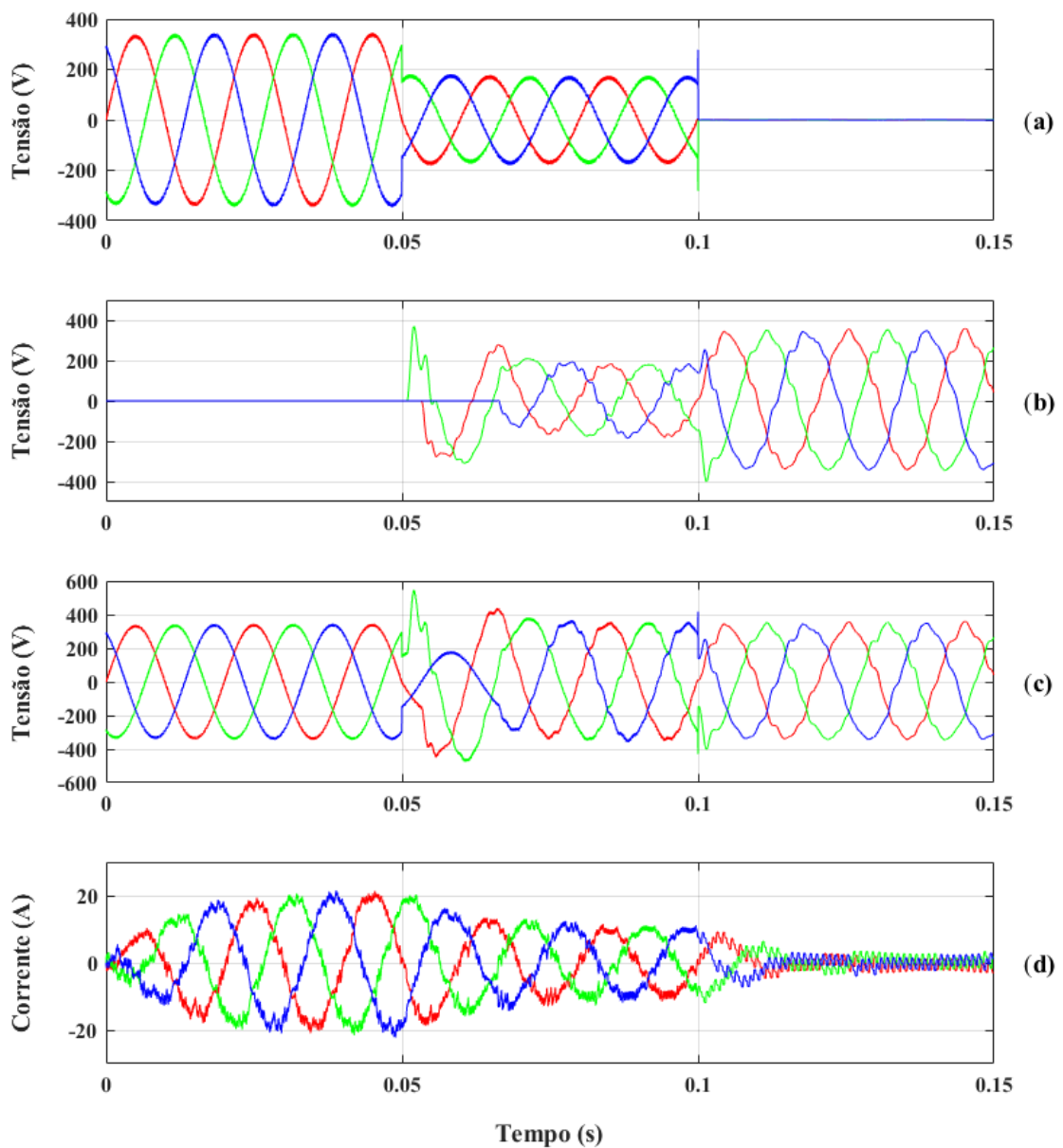
Para verificar a capacidade de correção de faltas assimétricas, o sistema foi submetido a dois tipos de falta. A primeira foi uma falta monofásica, onde a fase A vai a terra, enquanto as fases B e C, permanecem intactas. O segundo cenário, consiste em uma falta bifásica, onde as fases A e B vão a terra, ficando a fase C intacta. Cada evento foi programado para ocorrer no instante 0,05 segundo. Os resultados obtidos para ambos os cenários são mostrados nas Figuras 42 e 43.

Após a ocorrência da falta monofásica, mostrada na Figura 42, o sistema passa por um transitório que durou 10 ms. Durante este, não foi apresentada ultrapassagem percentual (também conhecida como sobresinal ou *overshoot*) na tensão da carga. O sistema de controle foi capaz de gerar uma tensão a ser injetada apenas para a fase que sofreu o distúrbio, restaurando a tensão da carga. Em regime permanente, a fase A apresentou 228,5 Vrms, o que representa um erro em regime permanente de 4%. A injeção de corrente na rede foi cessada após a ocorrência da falta, o que é coerente dentro do conceito de ilhamento.

No segundo cenário, apresentado na Figura 43, após a ocorrência da falta bifásica o sistema apresentou um transitório com duração de 10 ms. Durante o mesmo, não houve o aparecimento de sobretensões na carga. Passado o transitório, o sistema passou a injetar tensão de compensação nas duas fases que sofreram o distúrbio de tensão, passando a restaurar a tensão da carga. Em regime permanente, as fases restauradas apresentaram valor de 224,6 V, o que implica em um erro em regime permanente de aproximadamente 6%.

Figura 41. Resultado de simulação: Simulink – transição entre modos de operação.

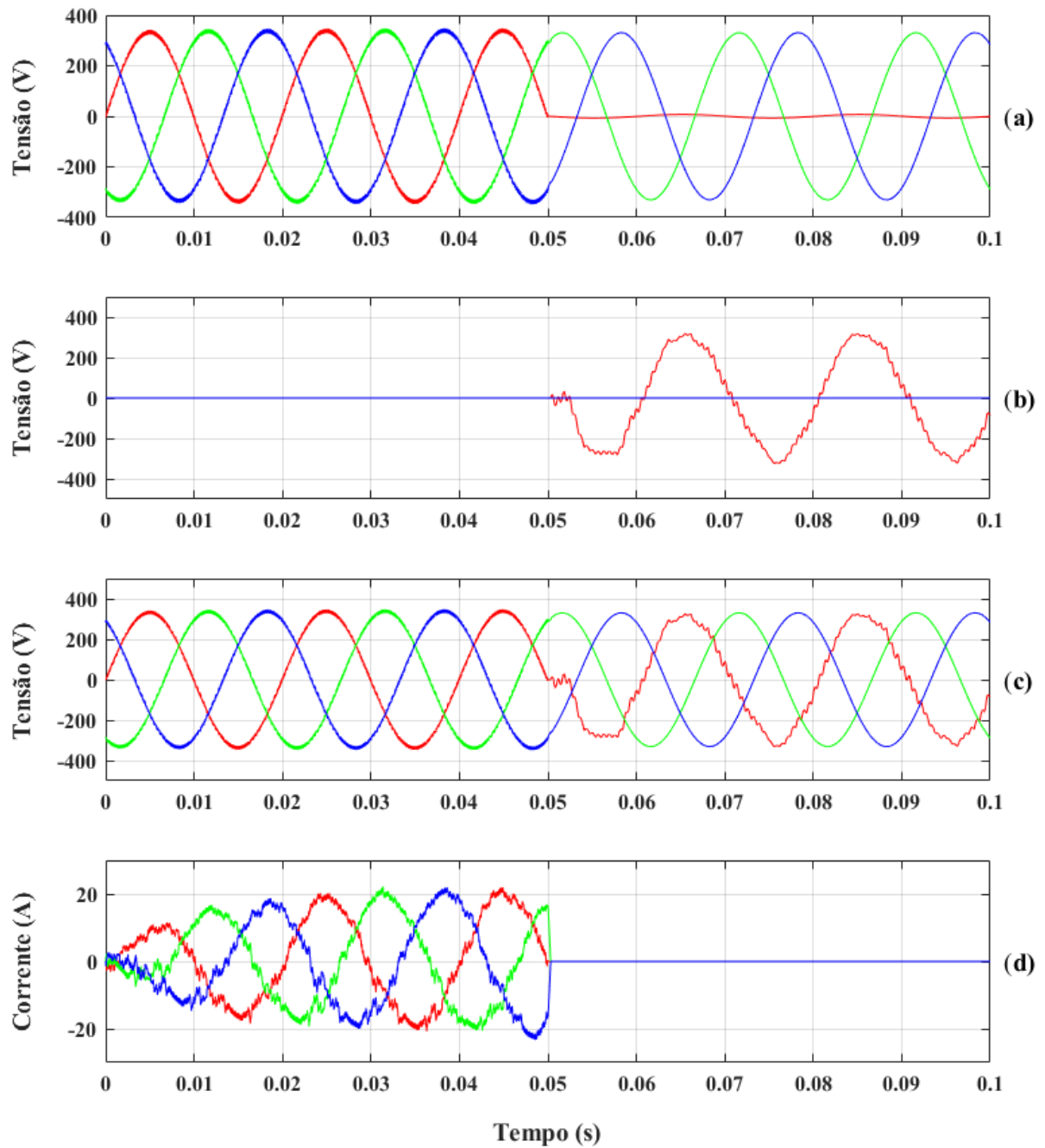
(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

Figura 42. Resultado de simulação: Simulink – falta assimétrica monofásica.

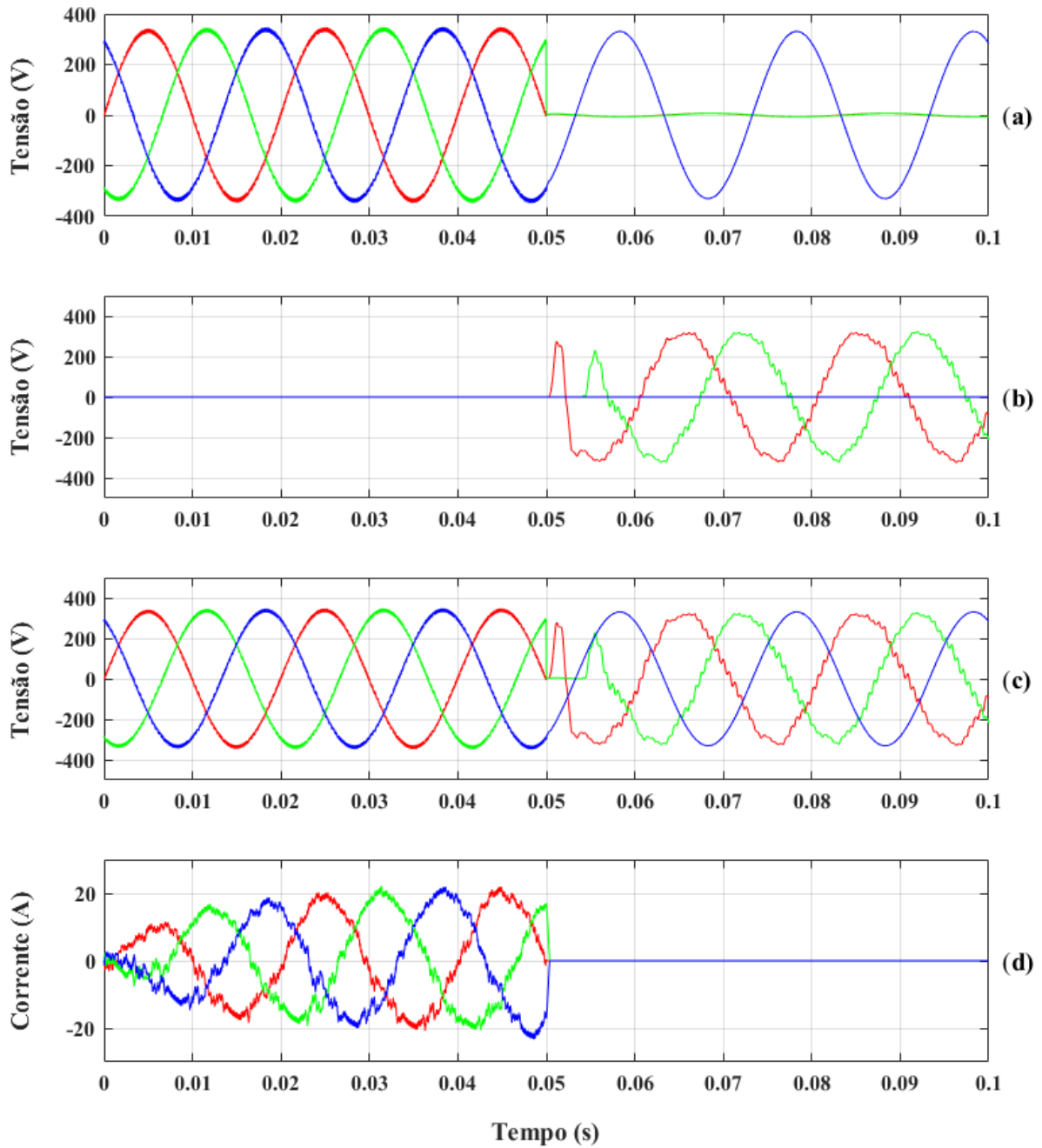
(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

Figura 43. Resultado de simulação: Simulink – falta assimétrica bifásica.

(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

O passo de cálculo utilizado em todas as simulações apresentadas neste trabalho, teve sua escolha motivada por este ser o menor valor que não gerou *overruns* nas simulações em tempo real. No entanto, foram realizadas também simulações em ambiente Simulink/MATLAB com um passo de cálculo de 1 microssegundo para os mesmos cenários discutidos neste capítulo. Os resultados obtidos são apresentados no Apêndice G.

6.4. RESULTADOS – SIMULADOR EM TEMPO REAL – OP5700

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos utilizando o simulador em tempo real OP5700. Todos os cenários abordados na seção anterior (resultados no Simulink), são reproduzidos aqui com o uso de simulações em tempo real.

6.4.1. Modo 1 – Normal

Os resultados obtidos em tempo real para o modo de operação normal são mostrados na Figura 44.

Observou-se que a corrente injetada na rede apresentou um tempo de acomodação de 30 ms (ou 1,5 ciclo da fundamental). Em regime permanente, a corrente de pico injetada foi de 21,7 A, que corresponde a um erro de regime permanente de 8,5%. Conforme esperado, não houve injeção de tensão de compensação, tendo em vista que a tensão no PCC é nominal. A carga experimentou tensão nominal durante toda a simulação.

6.4.2. Modo 2 – Falta Simétrica

A Figura 45 mostra os resultados obtidos quando uma falta simétrica é imposta no PCC.

Uma vez detectada a falta, passa a ocorrer um transitório com duração de 10 ms. Durante o mesmo, foi registrada uma tensão de pico na carga de aproximadamente 425 V, o que representa um aumento de 25,44% da tensão nominal. A carga ficou submetida a esta sobretensão por cerca de aproximadamente 0,5 ms, sendo este tempo, dentro dos padrões [51].

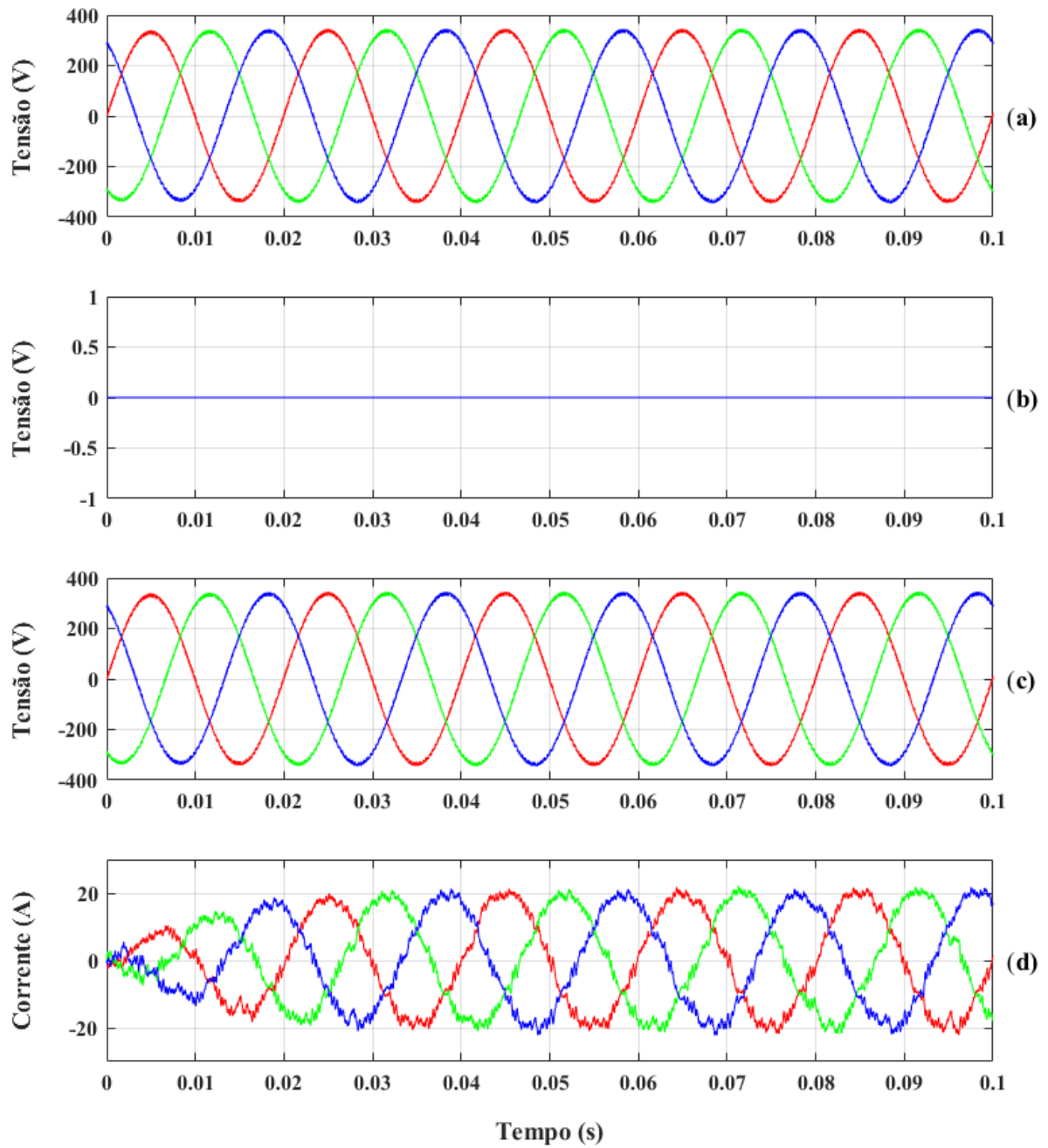
Após a extinção do transitório, o sistema passou a injetar tensões com aproximadamente 236 Vrms. Enquanto a carga experimentou uma tensão de 235 Vrms. Já a corrente injetada na rede teve sua amplitude diminuída ao logo do tempo, tendendo a zero em regime permanente.

6.4.3. Modo 3 – Afundamento Simétrico e Assimétrico

Os resultados obtidos para cenários de afundamento simétrico e assimétrico são apresentados nas Figuras 46 e 47, respectivamente. As magnitudes dos distúrbios programados são de 50% para o afundamento simétrico e de 40, 70 e 70%, para as fases A, B e C, respectivamente, durante o afundamento assimétrico.

Figura 44. Resultado de simulação: OP5700 – modo normal.

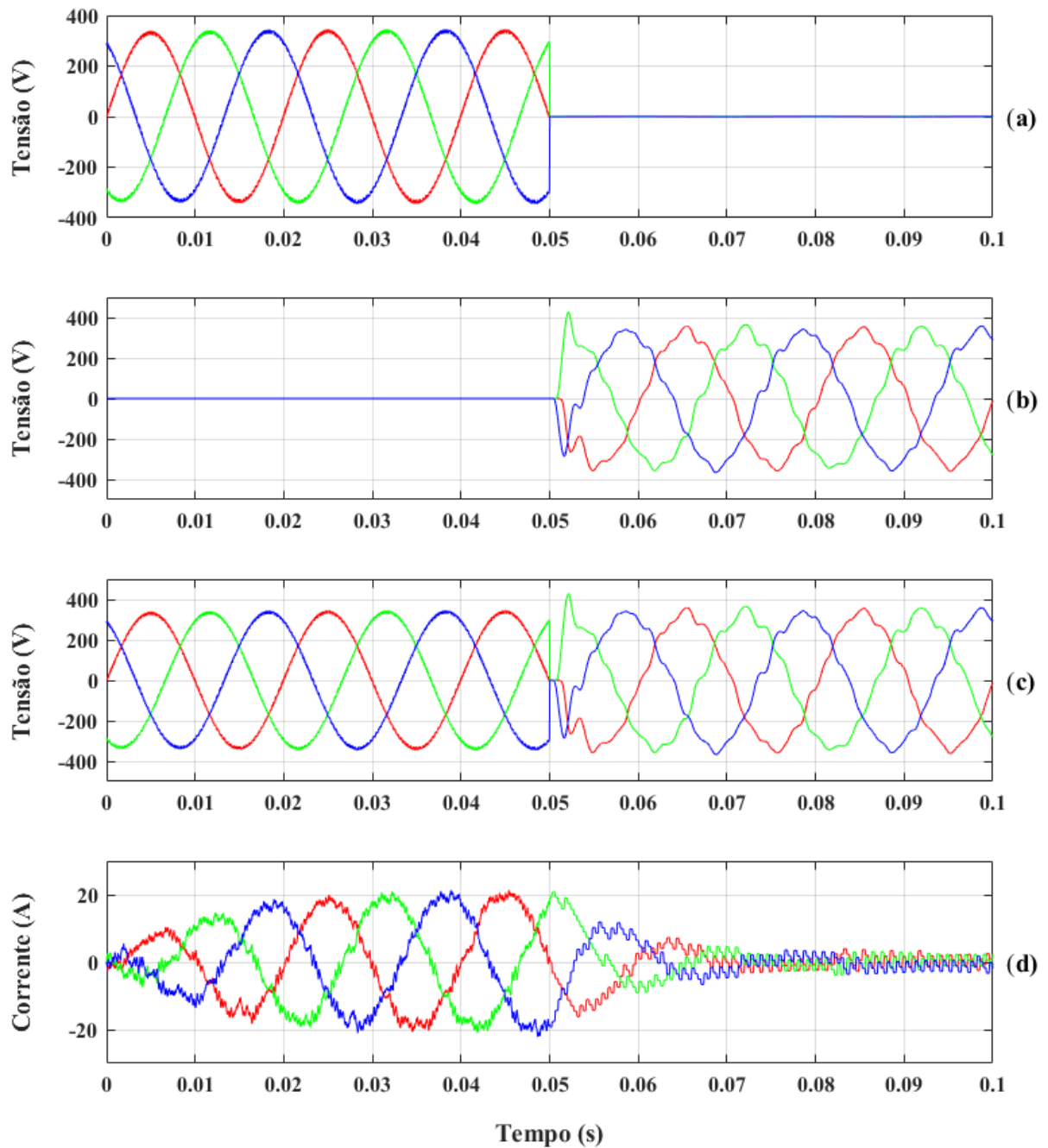
(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

Figura 45. Resultado de simulação: OP5700 – modo falta.

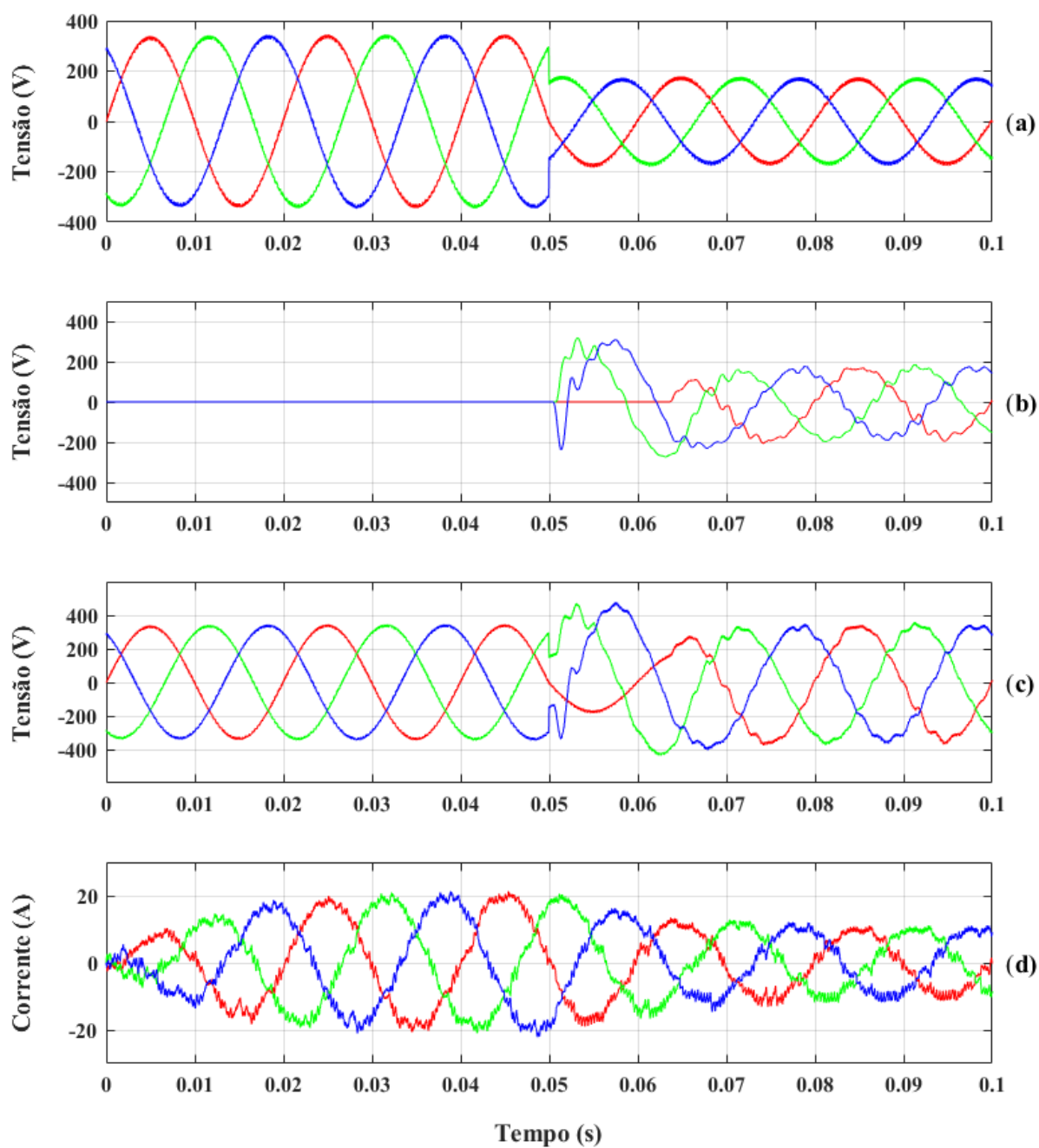
(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

Figura 46. Resultado de simulação: OP5700 – modo afundamento – simétrico.

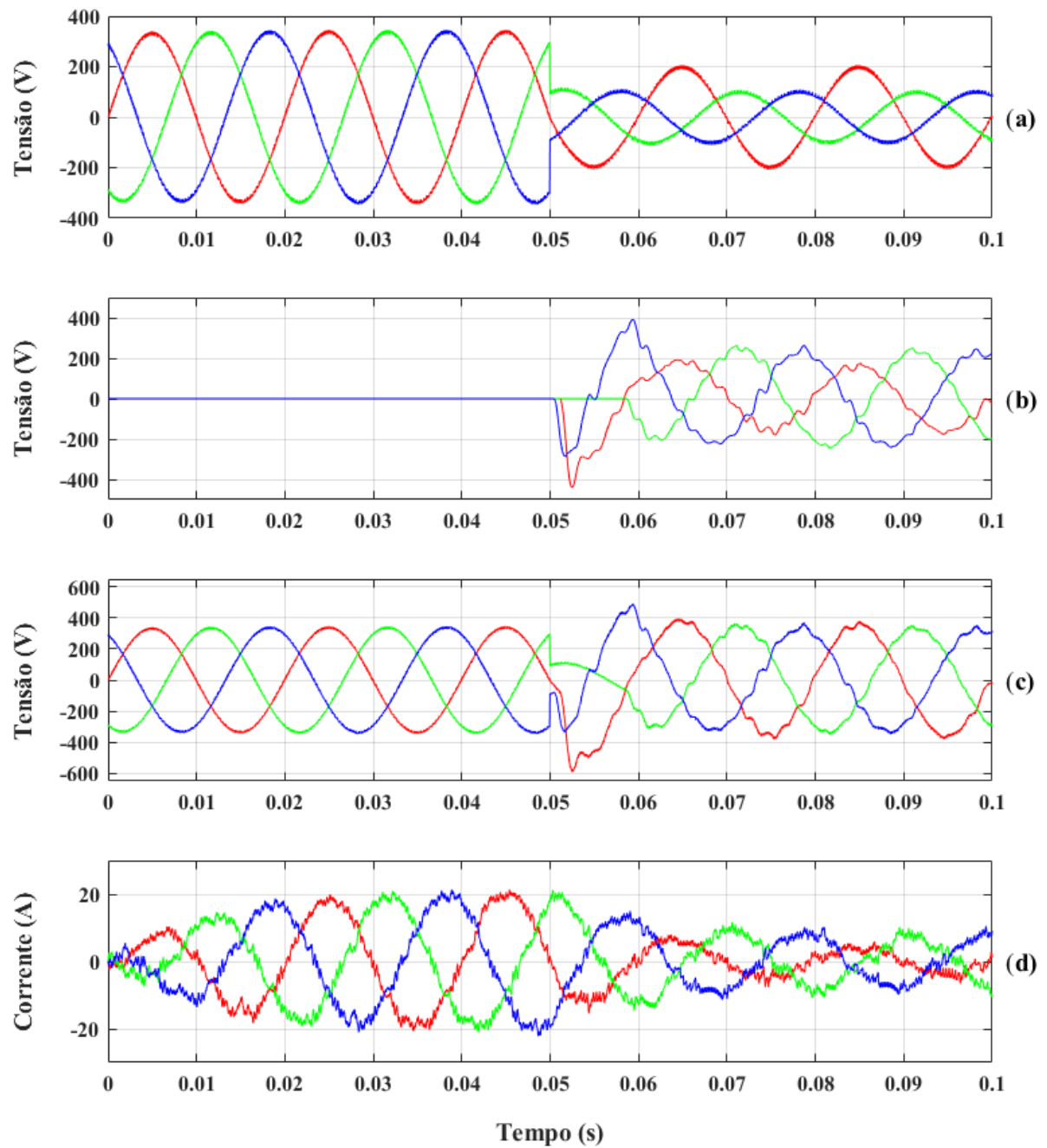
(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

Figura 47. Resultado de simulação: OP5700 – modo afundamento – assimétrico.

(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

Da Figura 46, notou-se que após a detecção do afundamento simétrico, o sistema enfrentou um transitório que durou cerca de 20 ms. Durante este transitório, foi registrada uma tensão de pico máxima na carga de 425 V, o que representa um aumento de 25,44% em relação a tensão nominal. A carga ficou submetida a esta sobretensão durante 0,8 ms.

Em regime permanente, a carga experimentou tensão nominal, enquanto a corrente injetada, passado o transitório, assumiu um valor de pico de 11,2 A.

Da Figura 47, extrai-se que após o evento de afundamento assimétrico o sistema passou por um transitório de cerca de 20 ms. Nesse período, a carga foi submetida a uma sobretensão com pico de 600 V, o que representa 77,09% acima da tensão nominal. A carga ficou exposta a este pico de tensão por cerca de 0,4 ms, o que não fere as recomendações de [51].

Em regime permanente, a carga experimentou tensão nominal. A corrente injetada na rede foi reduzida proporcionalmente aos percentuais de afundamento imposto a cada fase.

6.4.4. Transição entre Modos de Operação

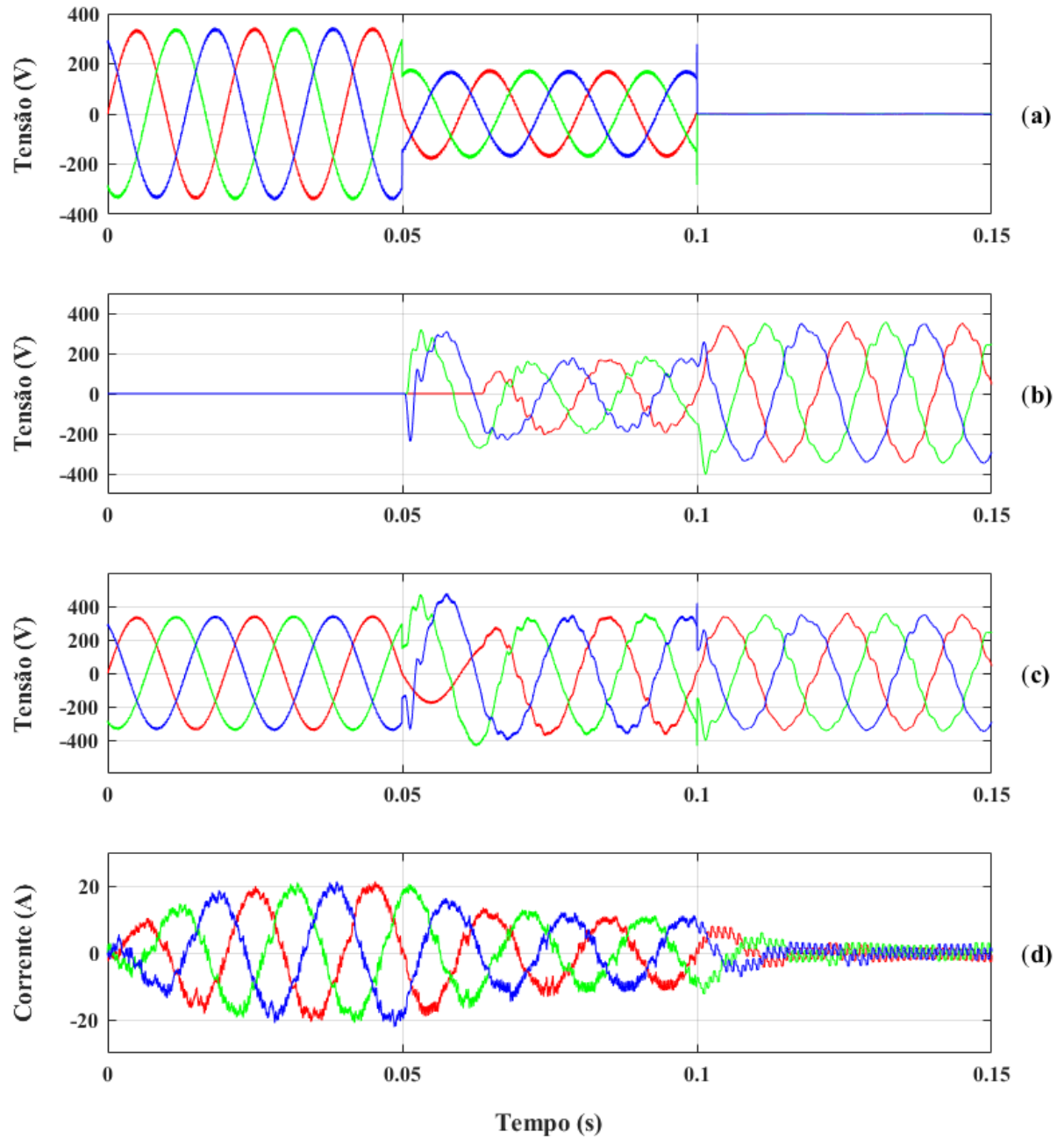
Visando observar o comportamento do sistema diante de situações de transição entre os modos de operação em tempo real, foi realizada uma simulação onde a tensão no PCC assume três estados diferentes, sendo eles, nominal, afundamento simétrico e falta simétrica, respectivamente. Os distúrbios foram programados para ocorrer a cada 50 milissegundos. A magnitude do afundamento simétrico aplicado foi de 50%. Os resultados obtidos para estes cenários são mostrados na Figura 48.

Ao detectar a ocorrência do afundamento simétrico, o sistema passou por um transitório com duração de 20 ms. Nesse transitório, a carga foi exposta a um pico de tensão de 430 V, o que representa 27% acima da tensão nominal. O tempo o qual a carga ficou submetida a esta sobretensão foi de 0,7 ms, o que não representa uma condição inadequada. Ao fim do período do transitório, a carga experimentou tensão nominal. A corrente injetada na rede apresentou em regime permanente valor de pico de 9,98 A.

Após a ocorrência da falta simétrica programada surgiu um novo transitório. Este, durou cerca de 10 ms, com tensão de pico máxima observada na carga de 400 V. A carga foi submetida a esta sobretensão por 0,3 ms. Ao término do novo transitório, a carga voltou a experimentar tensão nominal, enquanto a corrente injetada tendeu a zero.

Figura 48. Resultado de simulação: OP5700 – transição entre modos de operação.

(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



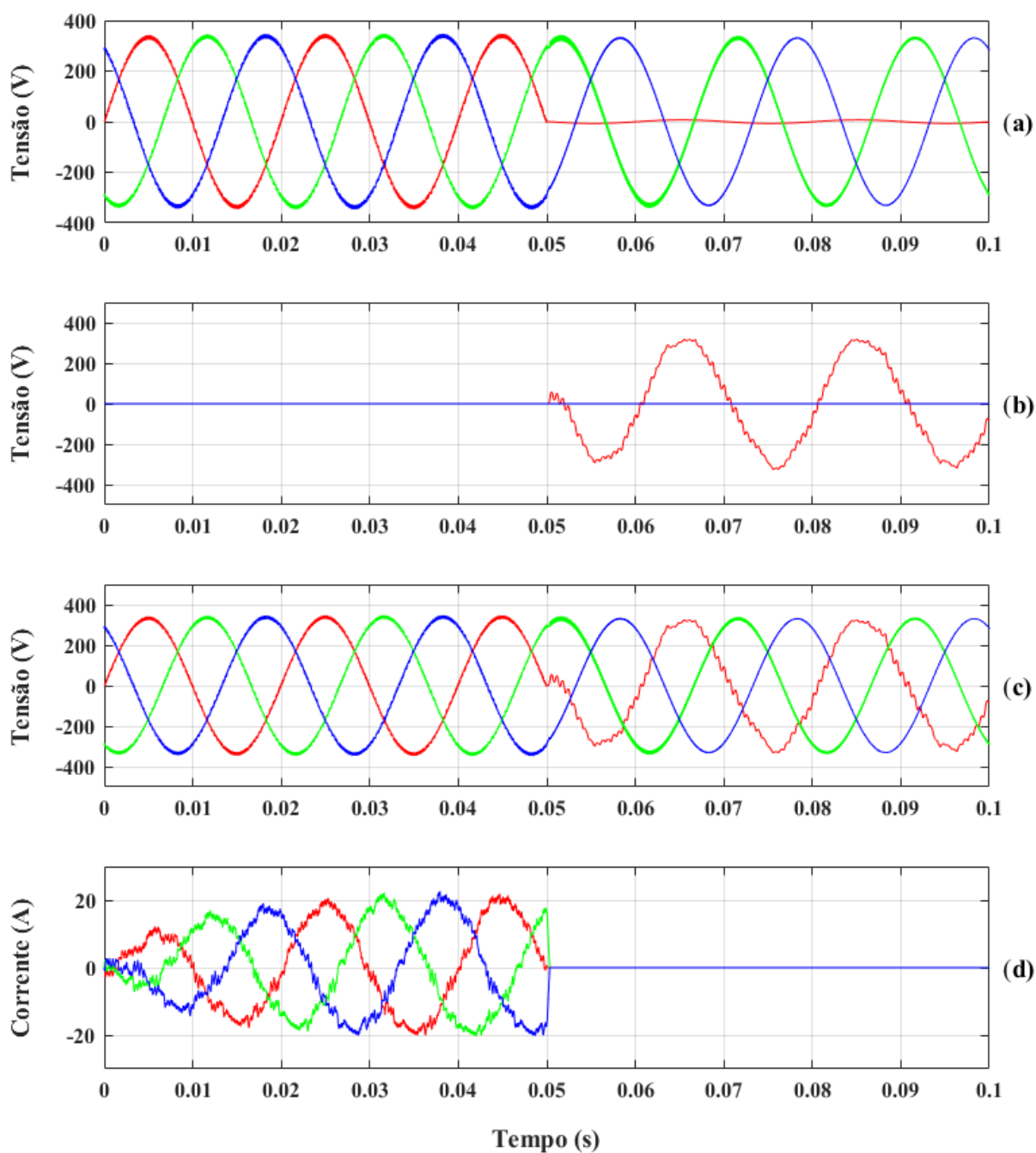
Fonte: próprio autor.

6.4.5. Falta Assimétrica

Os resultados obtidos para quando o PCC sofre faltas assimétricas são apresentados nas Figuras 49 e 50.

Figura 49. Resultado de simulação: OP5700 – falta assimétrica – monofásica.

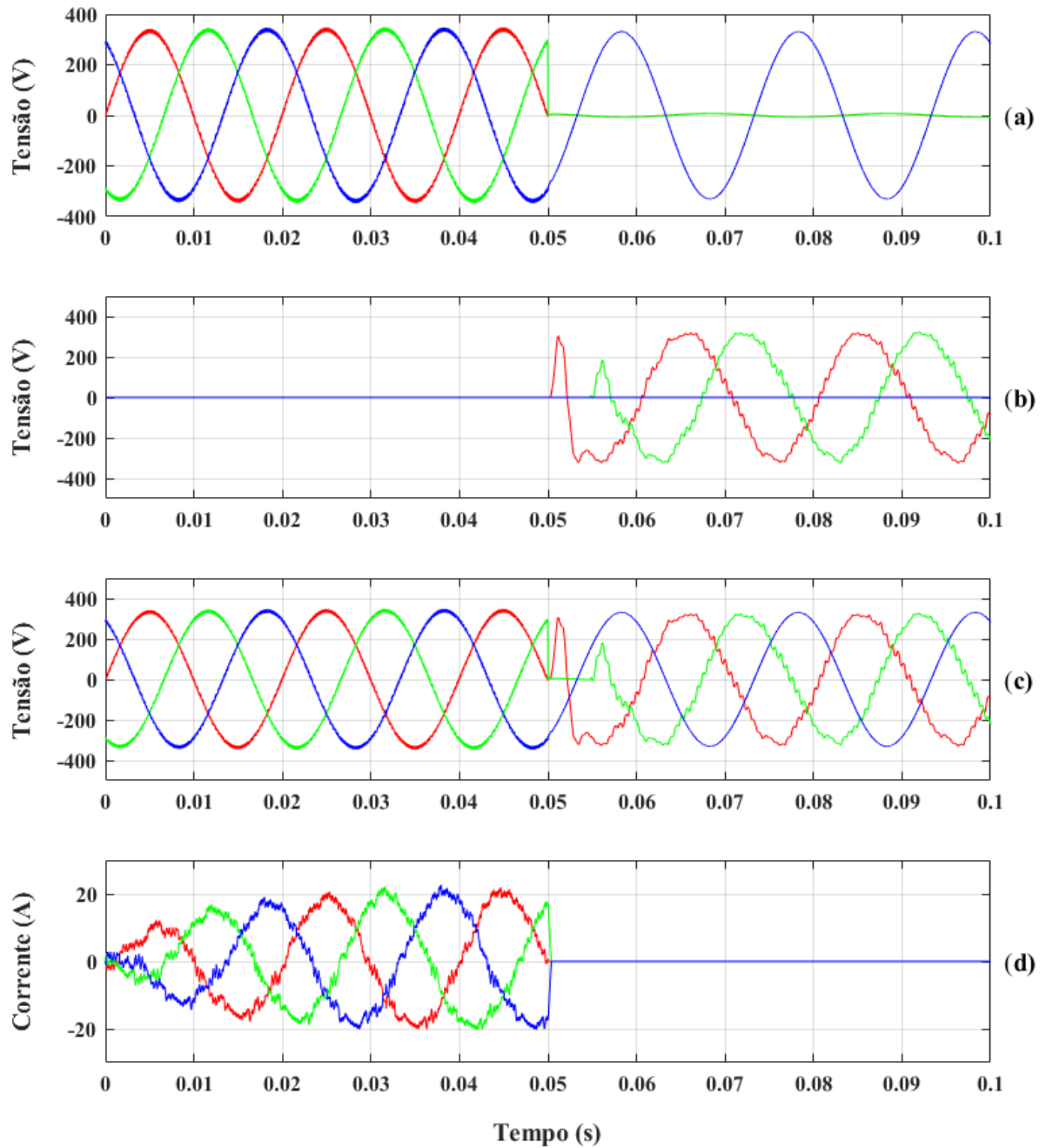
(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

Figura 50. Resultado de simulação: OP5700 – falta assimétrica – bifásica.

(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

Após a ocorrência da falta monofásica, mostrada na Figura 49, o sistema passa por um transitório que durou 10 ms. Durante este, não foi registrada ultrapassagem percentual na tensão da carga. Em regime permanente, a fase A apresentou 230 Vrms, o que representa um erro em regime permanente de 3,76%. Conforme esperado, não houve injeção de corrente na rede após a ocorrência da falta.

Da Figura 50, nota-se que após a ocorrência da falta bifásica o sistema apresentou um transitório com duração de 10 ms. Mais uma vez, não houve a presença de sobretensões na carga. Extinto o transitório, o sistema passou a injetar tensão de compensação nas duas fases que sofreram o distúrbio de tensão, passando a restaurar a tensão da carga. Em regime permanente, as fases restauradas apresentaram valor de 229,8 V, o que implica em um erro em regime permanente de aproximadamente 3,84%.

6.5. RESUMO DOS RESULTADOS

A Distorção Harmônica Total (THD - *Total Harmonic Distortion*) é um importante parâmetro para análise do desempenho do sistema, assim como, os valores eficazes das tensões e corrente observadas. Sendo assim, os valores RMS e a THD das grandezas monitoradas em cada cenário durante as simulações em ambiente Simulink e em tempo real, foram agrupados nas Tabelas 11 e 12, respectivamente.

Nessas tabelas V_{PCC} , V_{inj} e V_{carga} são as tensões no PCC, tensões de compensação injetadas e tensões na carga, respectivamente. Enquanto que, I_{sh} é a corrente injetada na rede.

Tabela 11. Resumo dos resultados de simulação – Simulink.

Grandeza	Valor							
	Modo Normal		Modo Falta		Modo Afundamento		Falta Assimétrica	
	RMS	% THD	RMS	% THD	RMS	% THD	RMS	% THD
V_{PCC}	231,7 V	2,14	0,4 V	0,035	118,1 V	2,15	5,3 V	2,25
V_{inj}	0 V	----	230,5 V	2,17	124,4 V	2,24	228,2 V	2,31
V_{carga}	231,7 V	2,14	231,0 V	2,17	236,3 V	2,20	228,5 V	2,30
I_{sh}	15,27 A	2,33	≈ 0 A	----	7,37 A	2,85	≈ 0 A	----

Fonte: próprio autor.

Tabela 12. Resumo dos resultados de simulação – Tempo Real – OP5700.

Grandeza	Valor							
	Modo Normal		Modo Falta		Modo Afundamento		Falta Assimétrica	
	RMS	% THD	RMS	% THD	RMS	% THD	RMS	% THD
V_{PCC}	231,9 V	2,12	0,5 V	0,039	119,1 V	2,17	4,2 V	2,15
V_{inj}	0 V	----	235,8	2,09	117,9 V	2,23	229,9 V	2,27
V_{carga}	231,9	2,12	235,1	2,09	236,8 V	2,18	229,8 V	2,25
I_{sh}	15,34 A	2,28	≈ 0 A	----	7,91 A	2,93	≈ 0 A	----

Fonte: próprio autor.

6.6. CONCLUSÕES

Neste capítulo, foram apresentados os resultados de simulação obtidos para os sistemas para inserção de potência na rede e compensação de tensão integrados via NSI. Primeiramente, em ambiente Simulink foram simulados os modos de funcionamento normal, falta e afundamento, seguidos das transições entre os modos de operação e comportamento do sistema diante de faltas assimétricas. A segunda bateria de resultados apresentados, reproduziu todos os cenários abordados nas simulações em Simulink, sendo que estes foram extraídos de simulações em tempo real utilizando o OP5700.

As grandezas observadas foram quantificadas e relacionadas com os princípios de operação de cada modo de funcionamento do sistema. Todos os transitórios registrados durante as simulações, tiveram suas durações medidas. Além disso, quando da presença de sobretensões na carga, observou-se que em nenhum cenário analisado houve descumprimento dos limites definidos como aceitáveis em [51].

Os resultados apresentados ao longo deste capítulo, corroboraram com toda fundamentação construída ao longo deste trabalho. Desde as diretrizes de operação, passando pela técnica de modulação, sistemas de controle, capacidade de correção de faltas assimétricas até a validação de todos estes componentes via simulações em tempo real.

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a aplicação de um NSI como elemento integrador de um sistema para inserção de potência ativa na rede com um sistema para compensação de tensão. A utilização de um VSI trifásico para inserção de potência na rede, acompanhada do uso de um segundo para efetuar compensações de tensão, implica no uso de doze chaves para executar essas duas funcionalidades. A utilização de um NSI permite reduzir o número necessário de chaves para nove. Esta escolha, além de desonerar o custo do sistema, é acompanhada da redução do volume e peso do mesmo. Esta é a principal justificativa da sua utilização neste trabalho.

O propósito principal deste trabalho foi inserir ao sistema a capacidade de correção de faltas assimétricas. Este foi atingido utilizando-se a inserção de bloco de controle adicional. Bloco este, que utiliza uma metodologia baseada na decomposição instantânea em componentes de sequência. O acionamento desse componente do sistema de controle ocorre quando surgem faltas assimétricas no PCC. Neste trabalho, o chaveamento para entrada em ação deste método foi feito de forma manual. A validação dessa abordagem foi realizada via simulações em Simulink e em tempo real.

No capítulo 2 foram definidas todas as diretrizes de funcionamento de cada modo de operação do sistema, sendo o principal parâmetro para definição de localização operacional, o estado de integridade da tensão da rede.

No Capítulo 3, a técnica de modulação descontínua de 120° foi detalhada. A intenção foi tornar o processo de obtenção dos sinais de gatilho para o NSI mais intuitiva. Para isso, resultados parciais de simulação ilustraram todo o processo, desde a entrada dos sinais de referência senoidais, até a observação das tensões de polo geradas nas saídas do NSI.

No Capítulo 4, os sistemas de controle tiveram seu princípio de funcionamento descrito. Assim como no Capítulo 3, o objetivo foi além de apresentar o sistema em si, torná-lo o mais intuitivo possível. Seguindo esta premissa, foram feitas correlações entre diagramas de blocos, equações e resultados parciais de simulação.

Ainda no Capítulo 4, foi discutida a capacidade de compensação de tensão do sistema quando o PCC sofre uma falta assimétrica. Através da análise dos sinais de controle, concluiu-se que o sistema não seria capaz de efetuar compensações de tensão para a carga diante desse tipo de distúrbio. Para munir o sistema com esta capacidade, foi apresentado o método de

controle via decomposição instantânea em componentes de sequência. Posteriormente, o método foi implementado e validado em ambiente Simulink e no simulador em tempo real.

A fim de discutir os principais conceitos e tipos de simulação em tempo real, além da necessidade de apresentar o equipamento e metodologia de simulação em tempo real utilizada neste trabalho, foi concebido o Capítulo 5.

Por fim, no Capítulo 6, foram apresentados todos os resultados de simulação obtidos em Simulink e em tempo real. Foram abordados os modos de operação normal, falta e afundamento. Além disso, foram verificados o comportamento do sistema diante da necessidade de transição entre os modos de operação e durante a ocorrência de faltas assimétricas ocorridas no PCC.

Ao comparar os resultados obtidos em Simulink e em tempo real, a maior diferença percentual encontrada (tomando como referência o Simulink) foi menor do que 1%. O que mostra que o modelo construído é fidedigno.

A escolha do tamanho do passo fixo das simulações foi de 35 μ s, tendo sido motivada por este ser o menor valor possível que não gerou *overruns* no simulador em tempo real. No OP5700 o menor passo fixo disponível quando se utilizam as CPUs é de 20 μ s, porém, este valor resultou em mais de 1000 *overruns*, o que comprometeria a confiabilidade dos resultados obtidos.

Considerando os resultados em tempo real, observou-se que durante o modo normal, o tempo de acomodação registrado para a corrente injetada na rede foi de 30 ms, com um erro em regime permanente de 8,5 %. Quando submetido a uma falta simétrica, o sistema passou por um transitório de 10 ms, onde a carga foi exposta a uma sobretensão de 25,6% em relação a sua tensão nominal.

Ao impor em tempo real um afundamento com 50% de magnitude na tensão no PCC, um transitório de 20 ms surgiu, deixando a carga submetida a um pico de tensão 25,5% acima da tensão nominal.

O pior resultado de desempenho durante os transitórios foi observado durante o afundamento assimétrico, onde a carga foi exposta a sobretensões da ordem de 77%. Porém, a maior duração registrada para os eventos transitórios foi de 0,8 ms, o que significa que de acordo as recomendações de [51], em nenhum momento, em todos os cenários abordados neste trabalho, a integridade da carga foi posta em risco.

Por fim, o bloco adicional de controle inserido foi validado via simulação em tempo real durante a aplicação de faltas assimétricas monofásicas e bifásicas no PCC. Seu desempenho foi

o melhor entre todos os cenários abordados neste trabalho. Os transitórios observados tiveram duração de 10 ms e não houve em ambos os casos a presença de *overshoots*.

7.2. TRABALHOS FUTUROS

A seguir são listados possíveis trabalhos futuros:

1. Projeto de planta fotovoltaica para injeção de potência ativa na rede acompanhado do estudo da influência de diferentes algoritmos de MPPT e condições de sombreamento;
2. Configuração do simulador em tempo real para utilização do seu FPGA interno ao invés de suas CPUs;
3. Implementação de método para transição automática para o controle via decomposição instantânea em componentes de sequência quando surgirem faltas assimétricas no PCC;
4. Aplicação de diferentes técnicas de modulação seguida de análise comparativa;
5. Análise comparativa entre a utilização de sistemas isolados (inserção de potência e restauração de tensão) utilizando inversores de seis chaves e o sistema integrado via inversor de nove chaves.

7.3. PUBLICAÇÕES DO AUTOR

Durante o período de realização do curso de mestrado o autor publicou os seguintes artigos:

1. LUNARDI, ANGELO; CONDE D, ELIOMAR R.; **DE ASSIS, JEFFERSON**; FERNANDES, DARLAN A.; SGUAREZI FILHO, ALFEU J., “Model Predictive Control with Modulator Applied to Grid Inverter under Voltage Distorted”, *Energies*, v. 14, p. 4953, 2021.

2. LINO, FERNANDO; **ASSIS, JEFFERSON**; FERNANDES, DARLAN A.; JACOMINI, ROGERIO; COSTA, FABIANO F.; SGUAREZI FILHO, ALFEU J., “One-Cycle Fourier Finite Position Set PLL”, *Energies*, v. 14, p. 1824, 2021.
3. **DE ASSIS, JEFFERSON R. P.**; FERNANDES, DARLAN A.; COSTA, FABIANO F.; RIBEIRO, P. C.; DE ALMEIDA, ROGERIO G., “Asymmetric Voltage Sag Compensation Capability of Dual Voltage Source Inverter”, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2020, Detroit. p. 2494.

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] X. Zhang, Z. Yan. “Energy Quality: A Definition,” *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, vol. 7, pp. 430 – 440, Oct 2020.
- [3] J. V. Milanovic, Y. Zhang. “Modeling of FACTS Devices for Voltage Sag Mitigation Studies in Large Power Systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, pp. 3044 – 3052, Sep 2010.
- [4] Empresa de Pesquisa Energética. Projeção da Demanda de Energia Elétrica para os Próximos 10 Anos (2013-2022). Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- [5] ANEEL. [S.l], 2012. Resolução Normativa 482/2012.
- [6] ANEEL. [S.l], 2021. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica.
- [7] 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 - APEC’01. Anaheim-CA, 2001. v.2*, p. 1267-1273.
- [8] Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES), CEPEL – CRESESB. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- [9] R. Zilles et al. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. São Paulo: Editora de textos, 2012.

- [10] 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.
- [11] T. Kominami, Y. Fujimoto. A novel nine-switch inverter for independent control of two three-phase loads. In *Proc. IEEE-Ind. Applicat. Soc. (IAS)*, pp. 2346-2350, 2007.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] N. Jarutus and Y. Kumsuwan, “A carrier-based phase-shift space vector modulation strategy for a nine-switch inverter,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 5, pp. 3425–3441, May 2017
- [17] X. Li, L. Qu, B. Zhang, G. Zhang, and A. H. Liao. “A Simplified Modulation Strategy of Nine-Switch Inverter to Cut Off Half of Switching Modes,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 7254 – 7261, Dec. 2017.
- [18] 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.

- [19] S. M. Dehghan, A. Amiri, M. Mohamadian, and M. A. E. Andersen, "Modular space-vector pulse-width modulation for nine-switch converters," *IET Power Electron.*, vol. 6, no. 3, pp. 457–467, Mar. 2013.
- [20] F. Bradaschia, L. R. Limongi, M. C. Cavalcanti, and F. A. S. Neves, "A generalized scalar pulse-width modulation for nine-switch inverters: An approach for non-sinusoidal modulating waveforms," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 121, pp. 302–312, Apr. 2015.
- [21] F. C. de Andrade, F. Bradaschia, L. R. Limongi, and M. C. Cavalcanti, "A generalized scalar pulse-width modulation for nine-switch inverters with maximum amplitude constant frequency operation mode," in *Proc. IEEE 24th Int. Symp. Ind. Electron.*, Jun. 2015, pp. 160 –165.
- [22] 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.
- [23] F. C. de Andrade, F. Bradaschia, L. R. Limongi, and M. C. Cavalcanti, "A Reduced Switching Loss Technique Based on Generalized Scalar PWM for Nine-Switch Inverters," in *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 65, no. 1, pp. 38-48, Jan. 2018.
- [24] S. M. Dabour, A. S. Abdel-Khalik, S. Ahmed, and A. Massoud. "An Optimal PWM Technique for Dual-Output Nine-Switch Boost Inverters With Minimum Passive Component Count," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no 1, pp. 1065 – 1079, Jan. 2021.
- [25] C. N. Jibhakate, M. A. Chaudhari, and M. M. Renge. "Reactive Power Compensation Using Induction Motor Driven by Nine Switch AC-DC-AC Converter," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1312 – 1320, Dec. 2017.
- [26] P. R. U. Guazzelli, A. G. de Castro, S. T. C. A. dos Santos, C. M. R. de Oliveira, W. C. A. Pereira, J. R. B. A. Monteiro, and M. L. de Aguiar. "Dual Predictive Current Control of Grid Connected Nine-Switch Converter Applied to Induction Generator," *13th IEEE International Conference on Industry Applications*, pp. 1038 – 1044, 2018.

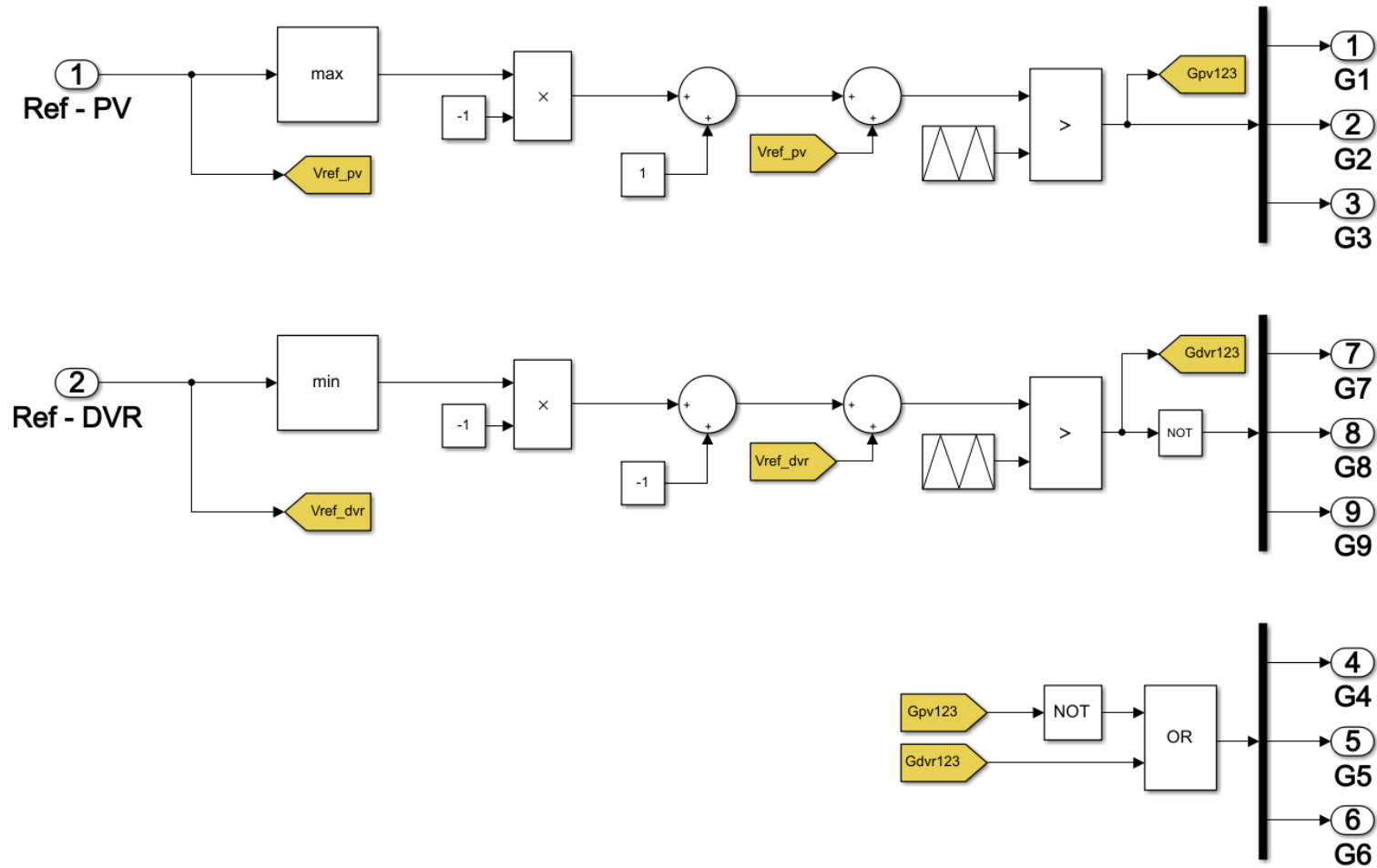
- [27] O. Gulbudak, and M. Gokdag. “Asymmetrical Multi-Step Direct Model Predictive Control of Nine-Switch Inverter for Dual-Output Mode Operation,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 164720 – 164733, Nov. 2019.
- [28] R. Wang, C. Li, C. Liu, C. Lu, and W. Wang. “Control Strategy for Four-Leg Nine-Switch Inverter Under Unbalanced Loads,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 50377 – 50389, Feb. 2020.
- [29] M. K. Pinjala, and R. Bhimasingu. “Improving the DC-Link Utilization of Nine-Switch Boost Inverter Suitable for Six-Phase Induction Motor,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 3, pp. 1177 – 1187, Sep. 2020.
- [30] P. R. U. Guazzelli, A. G. de Castro, S. T. C. A. dos Santos, C. M. R. de Oliveira, W. C. A. Pereira, J. R. B. A. Monteiro, and M. L. de Aguiar. “Decoupled Predictive Current Control with Duty Cycle Optimization of a Grid-Tied Nine-Switch Converter Applied to an Induction Generator,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, DOI:10.1109/TPEL.2021.3115049 , Sep. 2021.
- [31] 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.
- [32] A. Haw, R. J. Kerkman and T. A. Lipo, “A High Performance Generalized Discontinuous PWM Algorithm,” *IEEE Trans. On Industry Applications*, vol. 34, no. 5, pp. 1059-1071, September/October 1998.
- [33] J. Holtz, “Pulse-width modulation for Electronic Power Conversion,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 8, pp. 1194-1214, August 1994.
- [34] H. Van Der Broeck, H. Skudelny and G. Stankc, “Analysis and Realization of a Pulse Width Modulator Based on Voltage Space Vectors,” *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. IA-24, No. 1, pp. 142-150, January 1988.
- [35] Vladimir Blasko, “Analysis of a Hybrid PWM Based on Modified Space Vector and Triangle Comparison Methods,” *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 33, No. 3, pp. 756-764, May/June 1997.

- [36] C. B. Jacobina, A. M. Lima, E. Da Silva, "Digital Scalar Pulse Width Modulation: A Simple Approach to introduce Non-Sinusoidal Modulating Waveform," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 16. No. 3, pp. 351-359, May 2001.
- [37] K. Zhou and D. Wang, "Relationship between Space Vector Modulation and three-phase Carrier-Based PWM: A Comprehensive Analysis," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 186-196, February 2002.
- [38] T. Esumi, J. W. Kimball, P. T. Krein, P. L. Chapman, and P. Midya, "Dynamic maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 5, pp. 1282–1291, Sep. 2006.
- [39] IEEE P1547 Standard for Distributed Resources Interconnected With Electric Power Systems, IEEE Standard P1547, Sep. 2002.
- [40] Krause, P. C.; Wasynczuk, O.; Sudhoff, S. D. *Analysis of Electric Machinery*. New York: IEEE Press, 1995.
- [41] Fernandes, D. A.; Naidu, S. R.; Coura, C. A. E. "Instantaneous sequence components resolution of 3-phase variables and its application to dynamic voltage restorer". *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2008.
- [42] D. A. Fernandes, F. F. Costa and E. C. Santos. "Digital-Scalar PWM Approaches Applied to Four-Leg Voltage-Source Inverters". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 5, pp. 2022-2030, May 2013.
- [43] H. W. Dommel, "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single-and Multiphase Networks," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-88, pp. 388-399, Apr. 1969.
- [44] J. J. Sanchez-Gasca, R. D'Aquila, W. W. Price, and J. J. Paserba, "Variable time step, implicit integration for extendedterm power system dynamic simulation," in *Proceedings of the Power Industry Computer Application Conference 1995*, Salt Lake City, UT, USA, 7-12 May 1995, pp.183-189.

- [45] A. Kaddouri, B. Khodabakhchian, L., A. Dessaint, R. Champagne, and L. Snider, "A new generation of simulation tools for electric drives and power electronics," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS '99)*, 1999, vol. 1, pp. 348-354.
- [46] Y. Shu, H. Li, and Q. Wu, "Expansion application of dSPACE for HILS," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008.*, 2008, pp. 2231-2235.
- [47] C. A. Rabbath, M. Abdoune, and J. Belanger, "Effective real-time simulations of event-based systems," in *2000. Winter Simulation Conference Proceedings*, vol. 1, Orlando, 2000, pp. 232-238.
- [48] OPAL-RT Technologies. Hardware in the loop, 2021. Disponível em:
<<https://www.opal-rt.com/hardware-in-the-loop/>>. Acesso em: 5 de nov. de 2021.
- [49] OPAL-RT Technologies. Power Hardware in the loop, 2021. Disponível em:
<<https://www.opal-rt.com/power-hardware-in-the-loop/>>. Acesso em: 5 de nov. de 2021.
- [50] OPAL-RT Technologies. Rapid Control Prototyping, 2021. Disponível em:
<<https://www.opal-rt.com/rapid-control-prototyping/>>. Acesso em: 5 de nov. de 2021.
- [51] OPAL-RT Technologies. Software in the loop, 2021. Disponível em:
<<https://www.opal-rt.com/software-in-the-loop/>>. Acesso em: 5 de nov. de 2021.
- [52] OPAL-RT Technologies. [S.l], 2016. Manual do Simulador em Tempo Real OP5700.
- [53] IEEE Recommended Practice for the Design and Application of Power Electronics in Electrical Power Systems. Mar 2017.
- [54] IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment. 2006.

APÊNDICE A – MODELO SIMULINK - ESQUEMA DE MODULAÇÃO

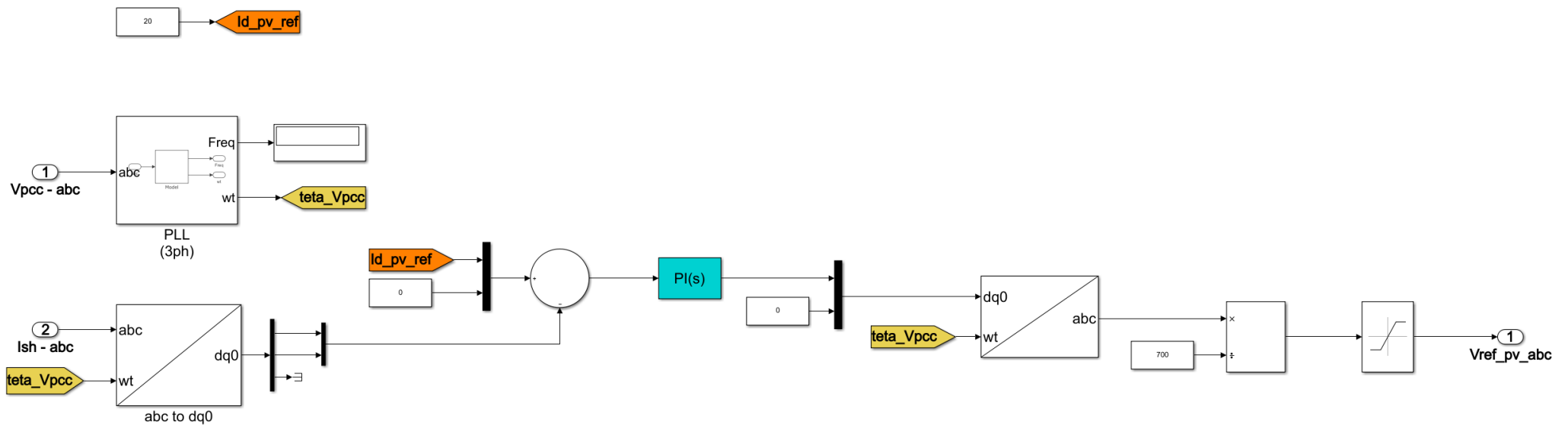
Figura 51. Apêndice A: Esquema de modulação - Simulink.



Fonte: próprio autor.

APÊNDICE B – MODELO SIMULINK - CONTROLE DO PV

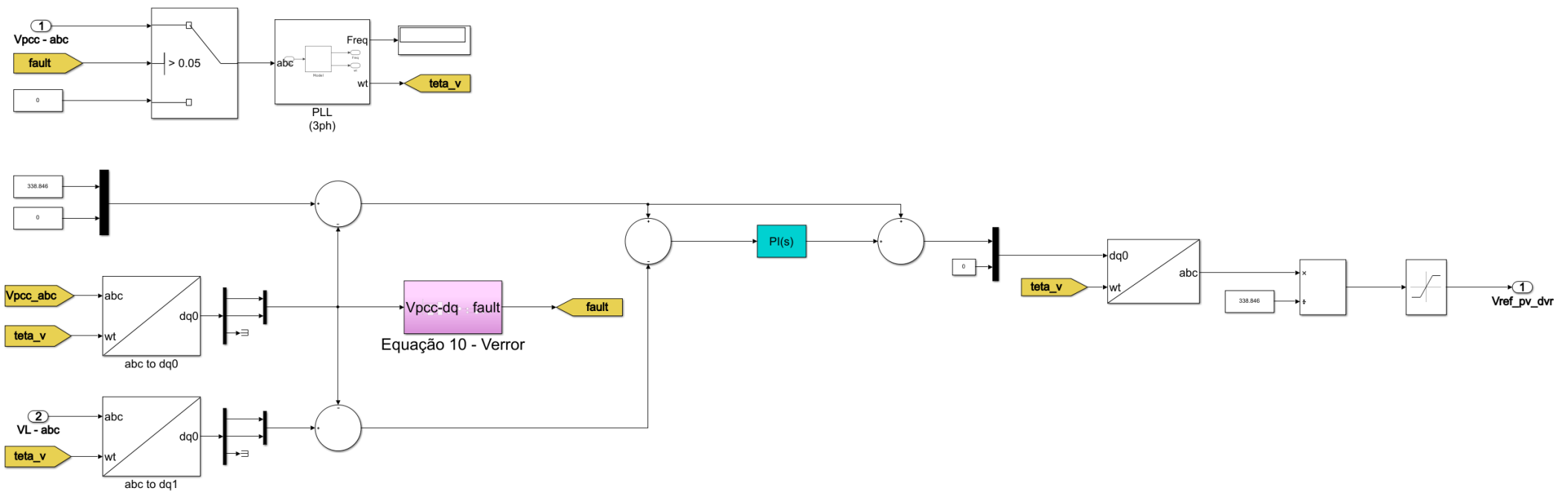
Figura 52. Apêndice B: Controle do PV - Simulink.



Fonte: próprio autor.

APÊNDICE C – MODELO SIMULINK - CONTROLE DO DVR

Figura 53. Apêndice C: Controle do DVR - Simulink.



Fonte: próprio autor.

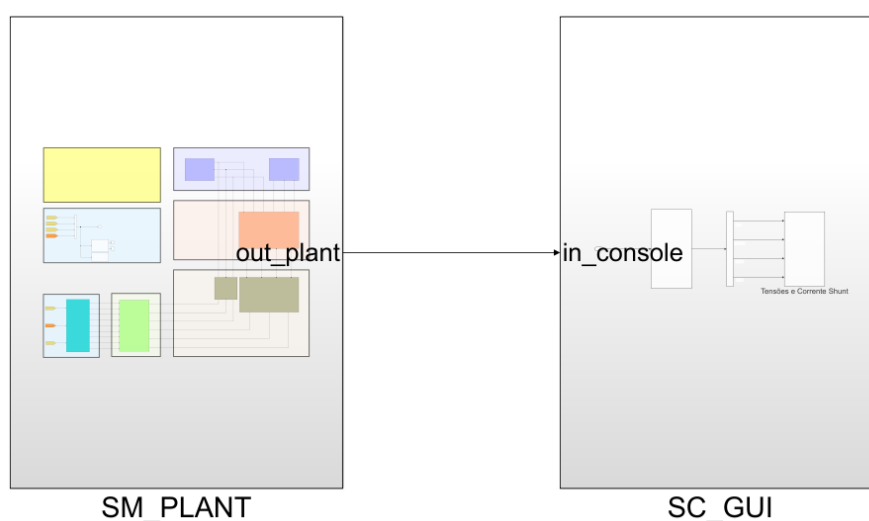
APÊNDICE D – MODELO SIMULINK - TEMPO REAL

Modelos de sistemas construídos em Simulink/MATLAB, podem ser adaptados para se tornarem aptos a serem compilados no RT-LAB. As adaptações obrigatórias que devem ser efetuadas no modelo Simulink/MATLAB são as seguintes:

- 1) A camada mais externa no modelo deve conter apenas subsistemas
- 2) Os subsistemas criados devem ser renomeados seguindo este padrão:
 - a) SM_NOME1 – o prefixo SM (*Subsystem Master*) é usado para subsistemas dedicados a computação
 - b) SC_NOME2 – o prefixo SC (*Subsystem Console*) é usado para subsistemas dedicadas a apresentação dos resultados
 - c) SS_NOME3 – o prefixo SS (*Subsystem Slave*) é usado para subsistemas dedicados a computação
- 3) Inserir *OpComm Blocks* em todas as entradas de subsistemas
- 4) O *Solver* da simulação deve ser configurado para: *Fixed-step solver*
- 5) O modelo deve ser salvo no formato mdl

Uma vez executadas as etapas descritas acima, o modelo está pronto para ser compilado via RT-LAB e em seguida carregado no simulador em tempo real. A Figura 54 mostra o modelo utilizado neste trabalho com as adaptações citadas aqui.

Figura 54. Apêndice D: Modelo Simulink para tempo real.



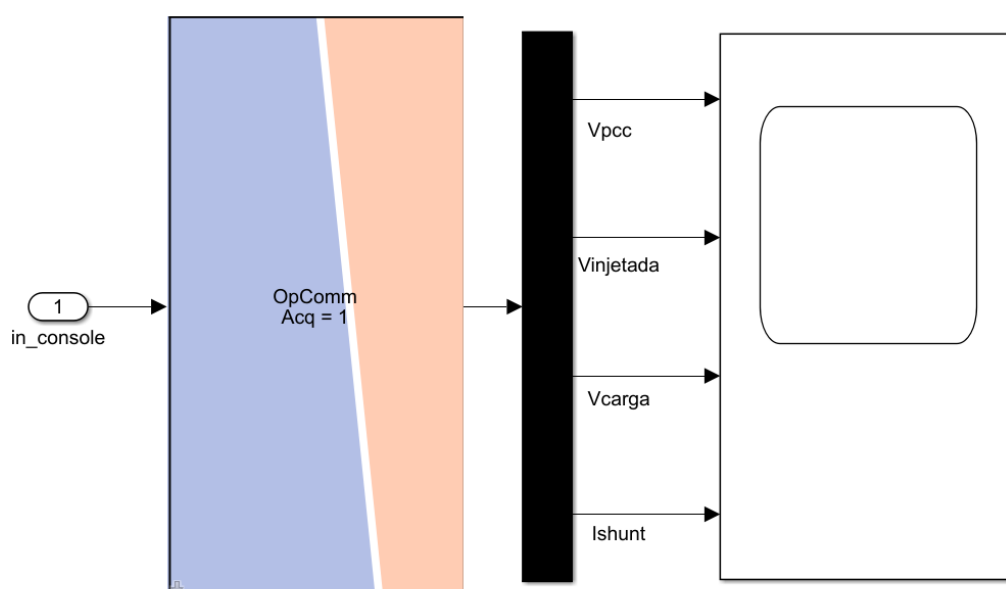
Fonte: próprio autor.

No subsistema SM_PLANT, estão contidos todos os elementos constituintes do sistema de inserção de potência da rede e compensação de tensão. Ou seja, durante a realização da simulação em tempo real, é este subsistema que será dedicado a computação dos resultados.

O posicionamento correto do *OpComm Block* é fundamental para que a adaptação seja feita de maneira correta. É este bloco que será responsável por fazer a comunicação entre os subsistemas existentes. A Figura 55 mostra a disposição desse bloco no modelo que foi apresentado na Figura 54.

Note que, seguindo as diretrizes apresentadas, o subsistema SC_GUI contém em sua entrada um *OpComm Block*. Além disso, como a natureza desse subsistema é de apresentação de resultados (interface gráfica), o mesmo contém apenas um *scope*.

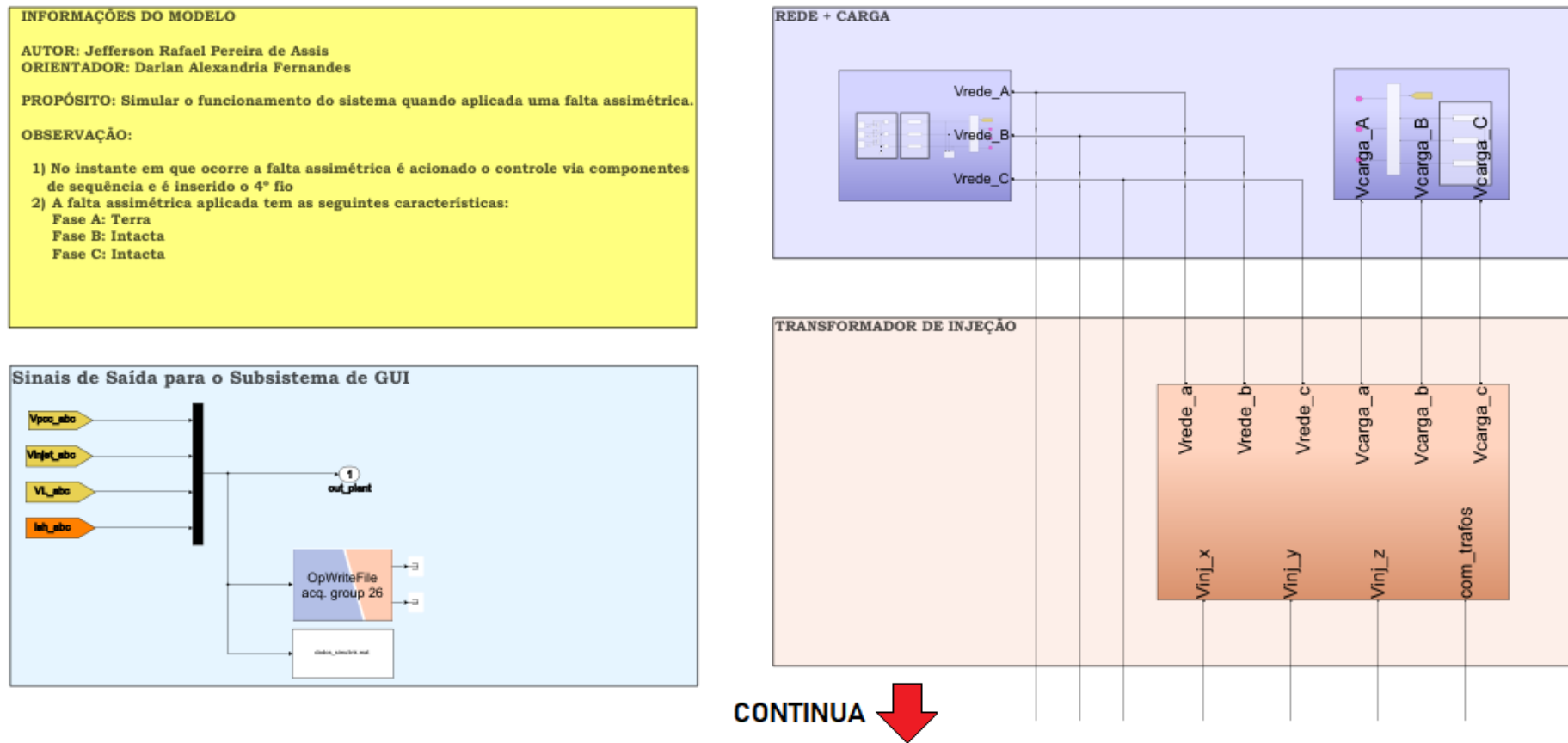
Figura 55. Apêndice D: Localização do *OpComm Block*.



Fonte: próprio autor.

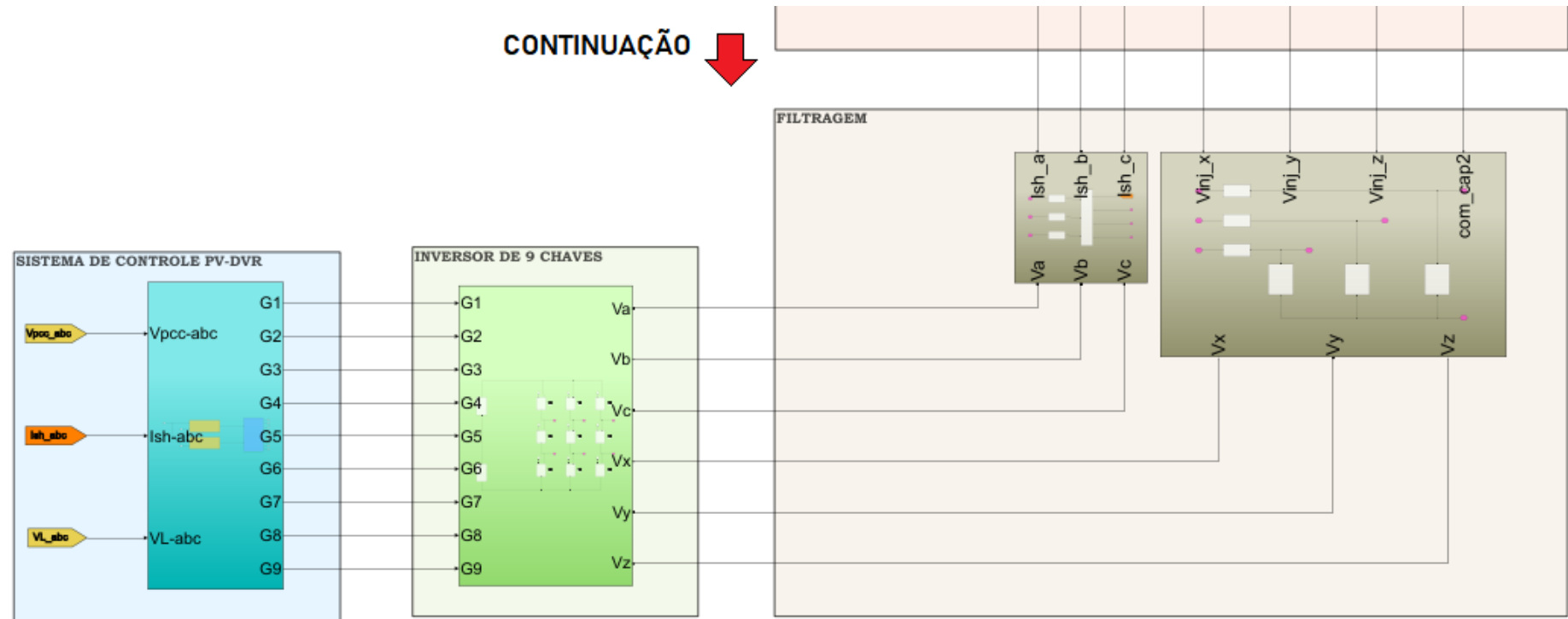
APÊNDICE E – PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO

Figura 56. Apêndice E: Plataforma de Simulação - Parte 1.



Fonte: próprio autor.

Figura 57. Apêndice E: Plataforma de simulação - Parte 2.

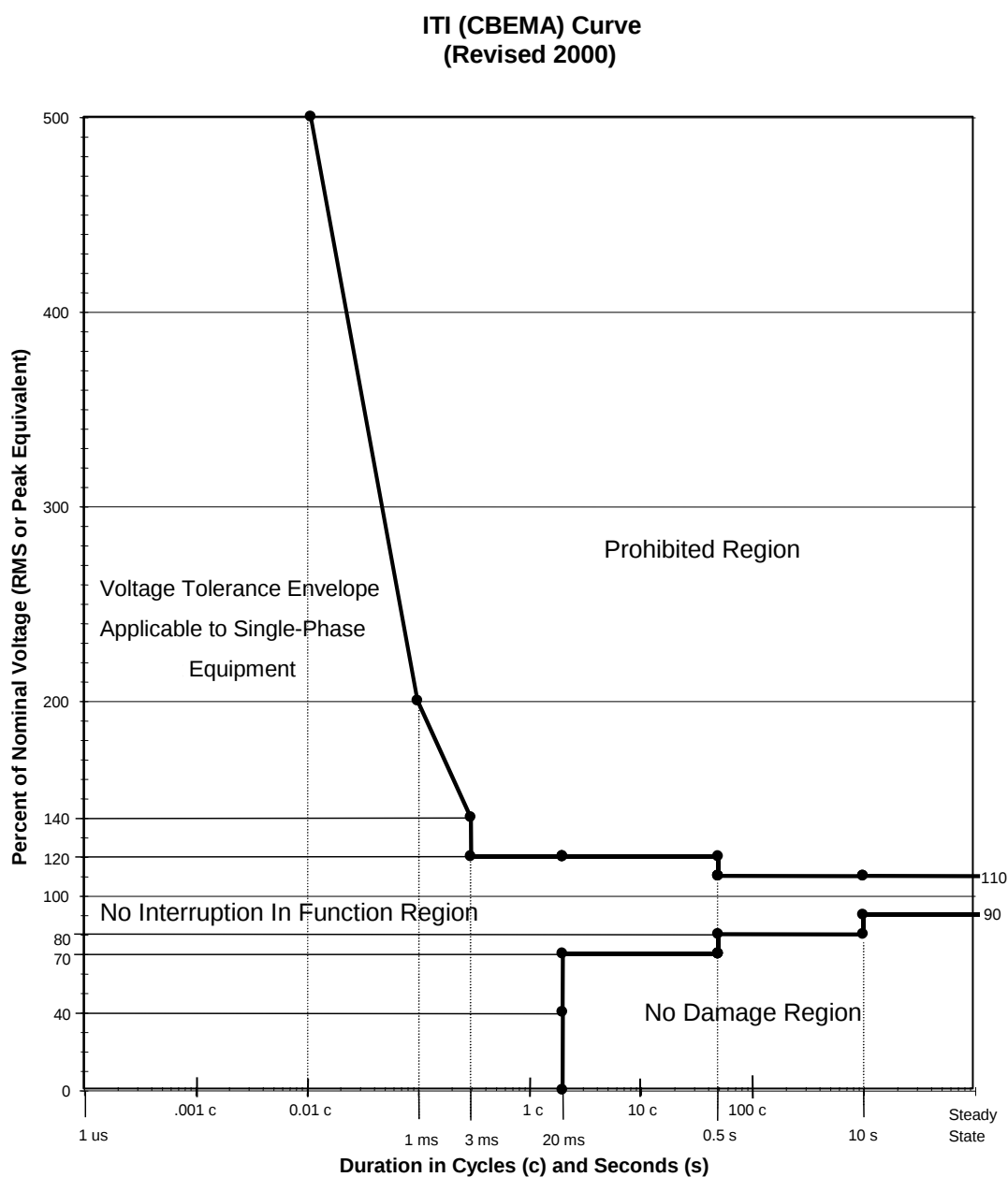


Fonte: próprio autor.

APÊNDICE F – CURVA ITI (CBEMA)

Uma das curvas mais clássicas utilizadas para definir a suportabilidade de distúrbios de tensão de uma carga é a chamada curva ITI – CBEMA (*Information Technology Institute Council; CBEMA – Computer and Business Equipment Manufactures Association*). Originalmente criada para utilização em computadores, passou a ser um padrão utilizado quando existe a necessidade de suprimento de cargas sensíveis em geral [53], [54].

Figura 58. Apêndice F: Curva ITI (CBEMA).

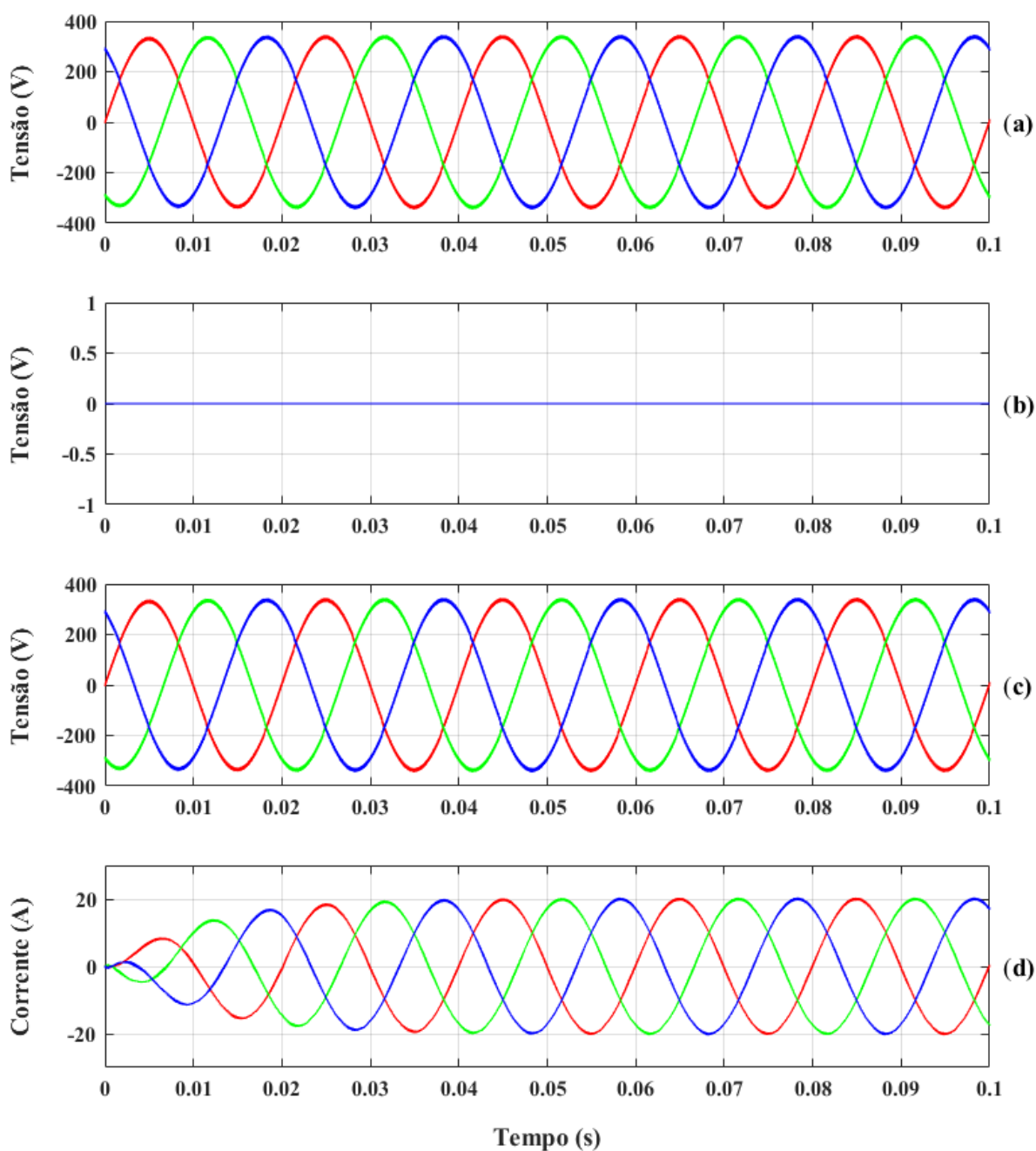


Fonte: [54].

APÊNDICE G – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO EM AMBIENTE SIMULINK COM PASSO DE CÁLCULO DE 1 μ s

Figura 59. Apêndice G: Resultado de simulação – modo normal.

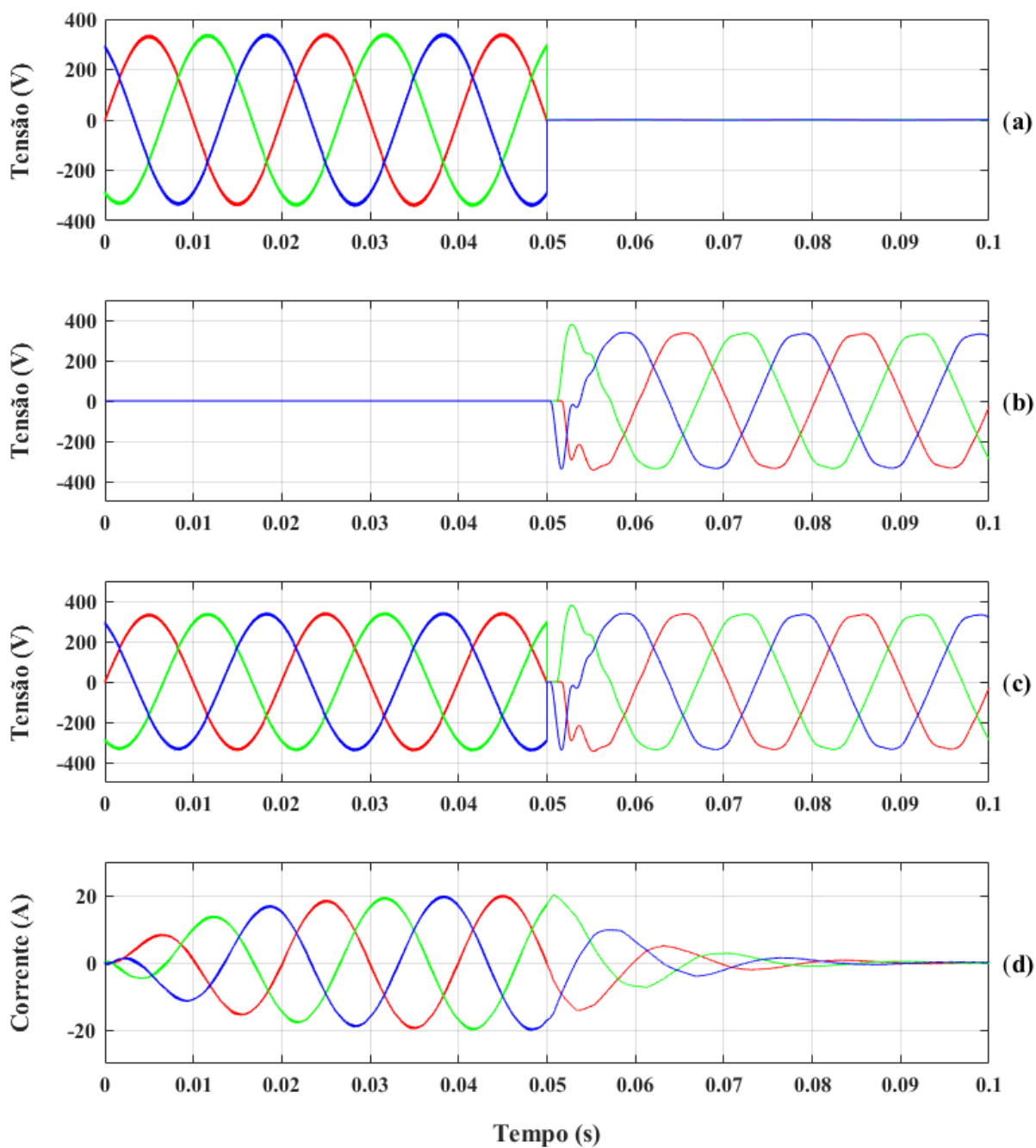
(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

Figura 60. Apêndice G: Resultado de simulação – modo falta.

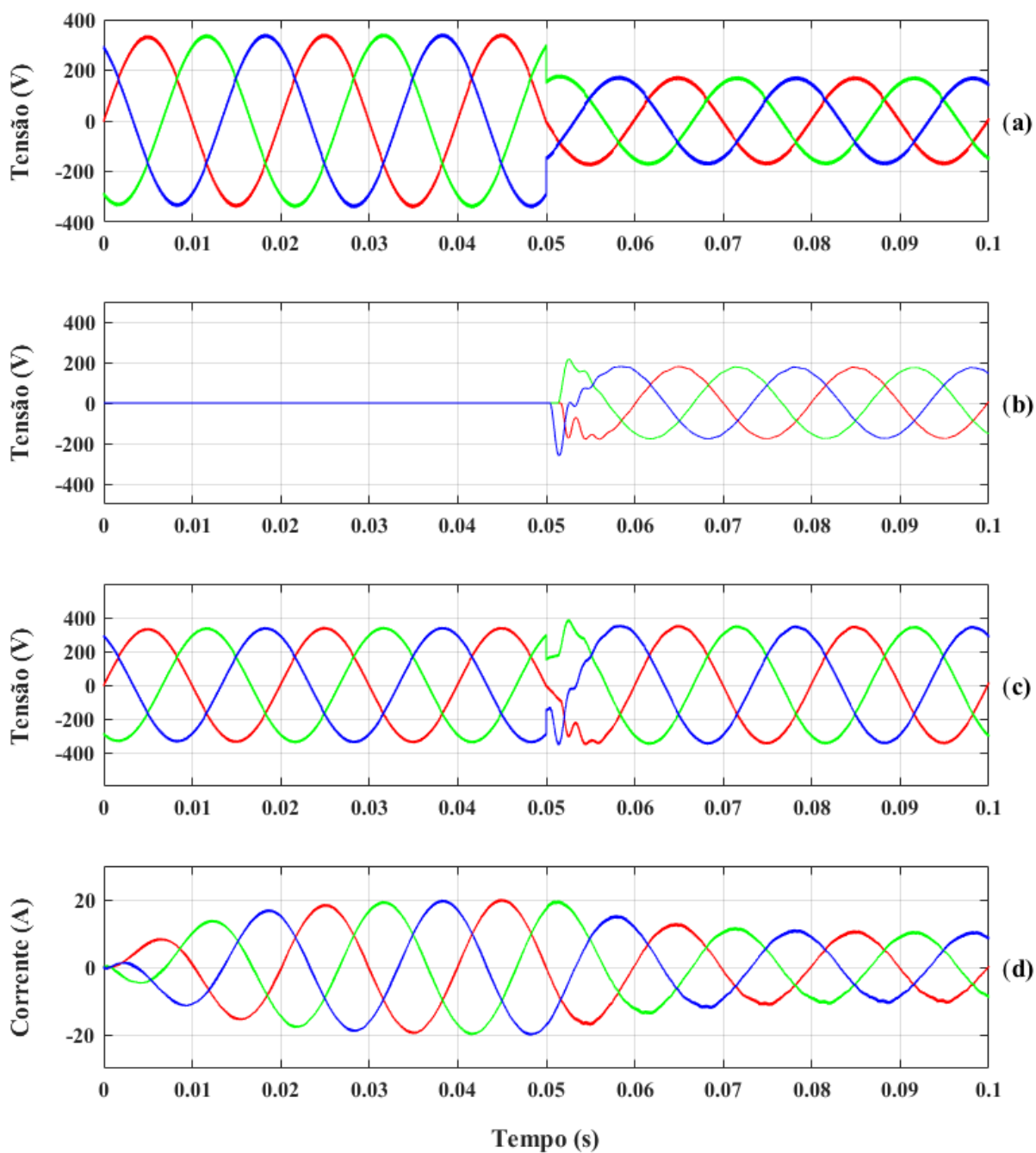
(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

Figura 61. Apêndice G: Resultado de simulação – afundamento simétrico.

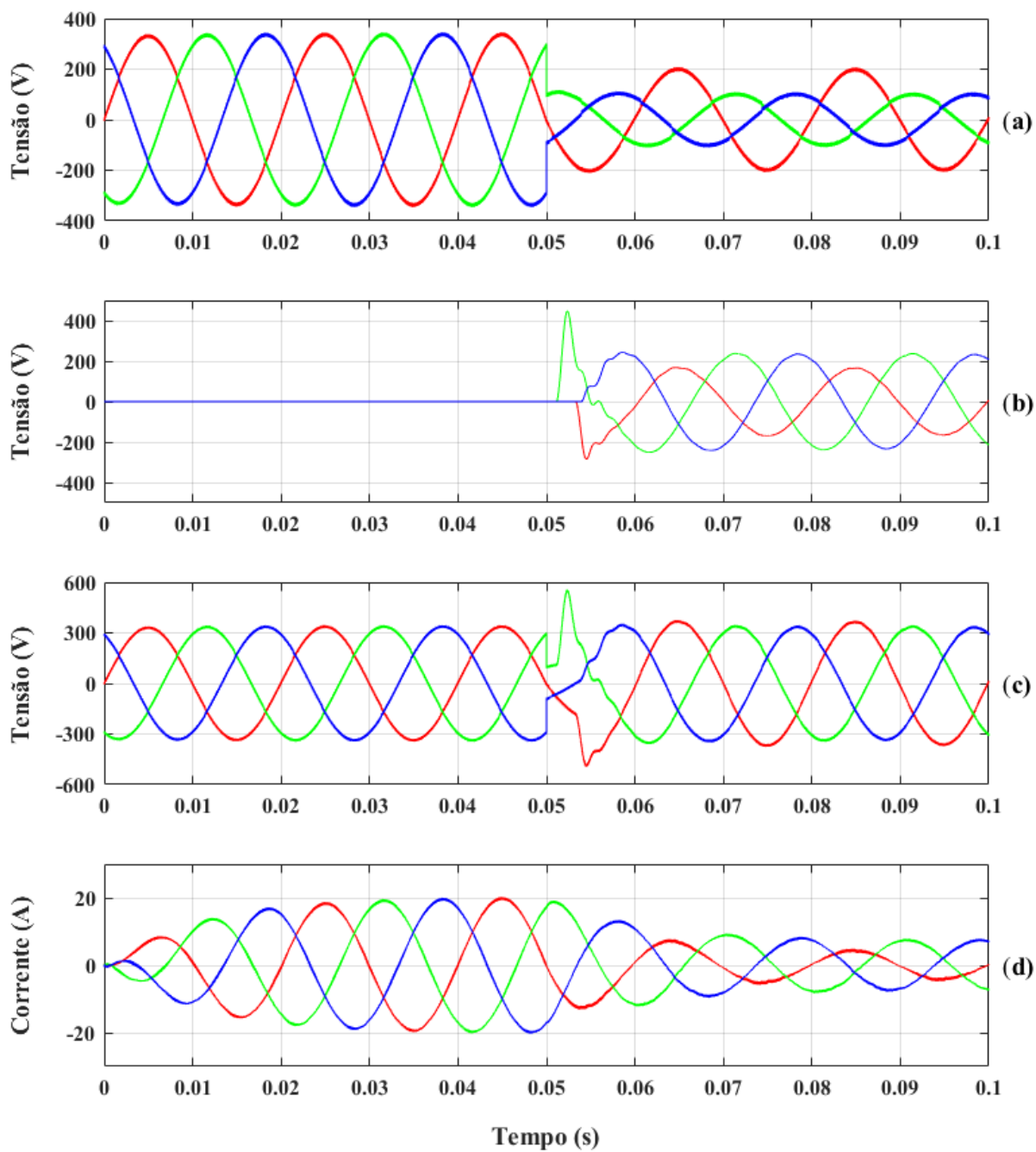
(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

Figura 62. Apêndice G: Resultado de simulação – afundamento assimétrico.

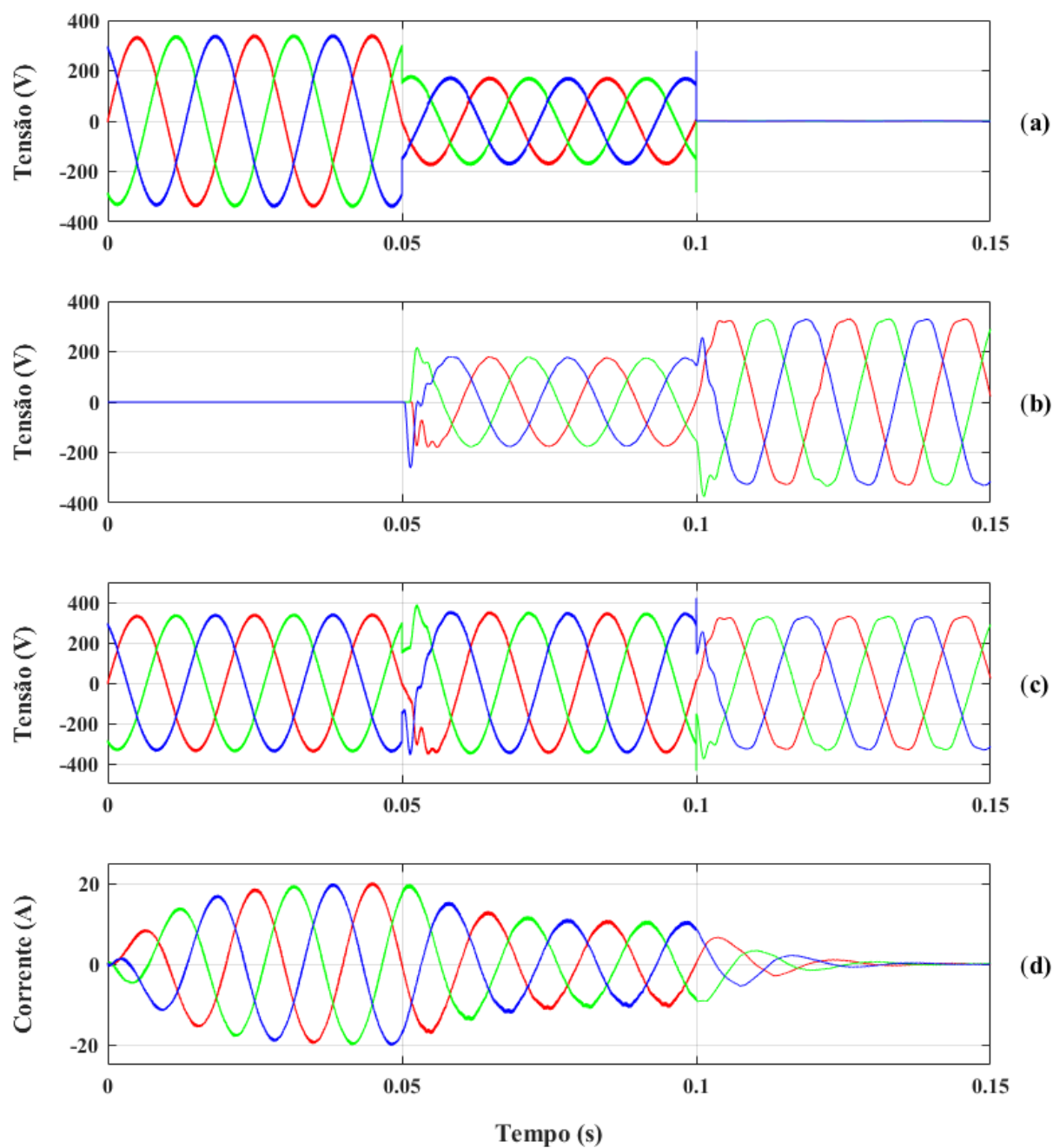
(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

Figura 63. Apêndice G: Resultado de simulação – transição entre modos de operação.

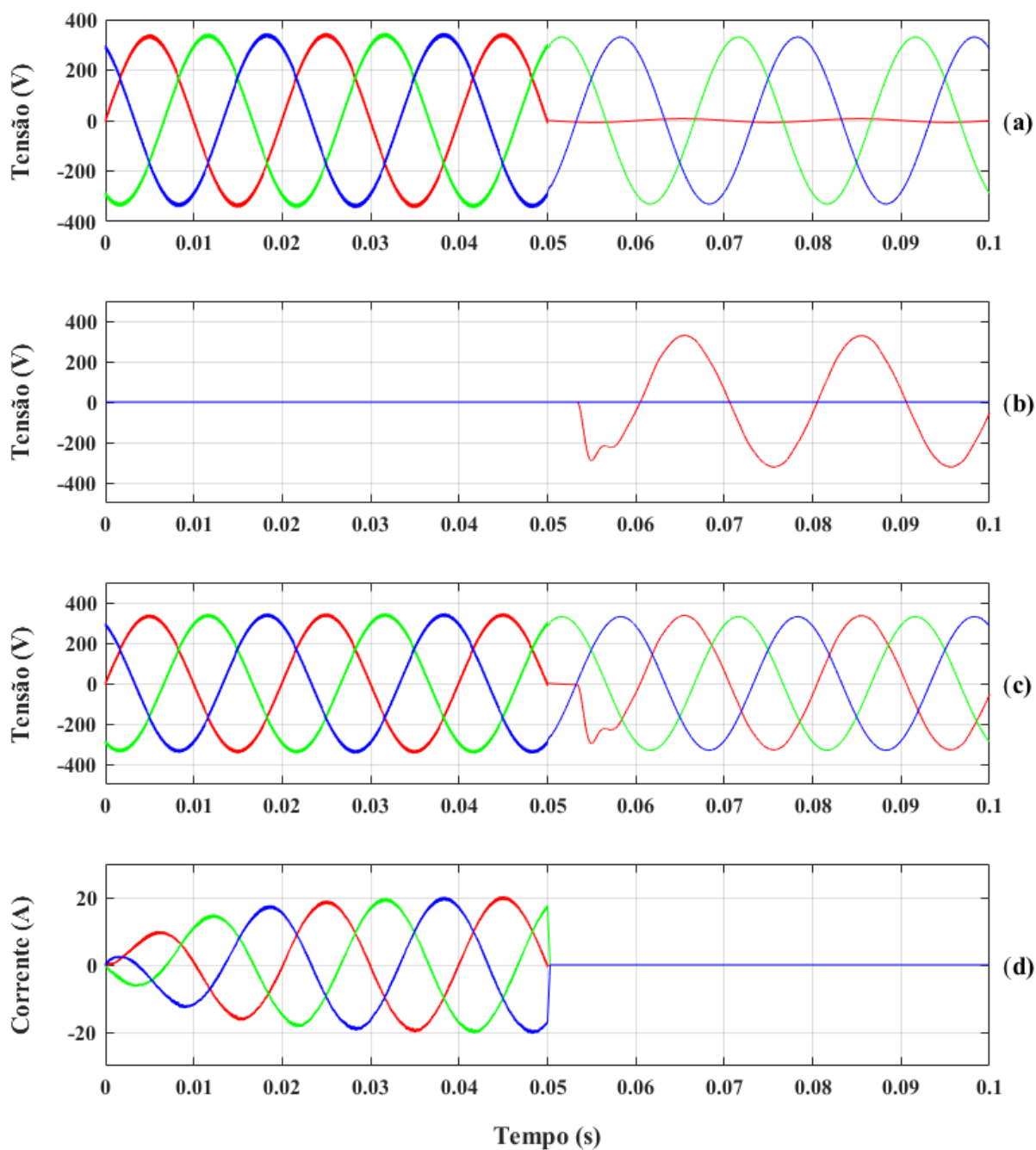
(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

Figura 64. Apêndice G: Resultado de simulação – falta assimétrica monofásica.

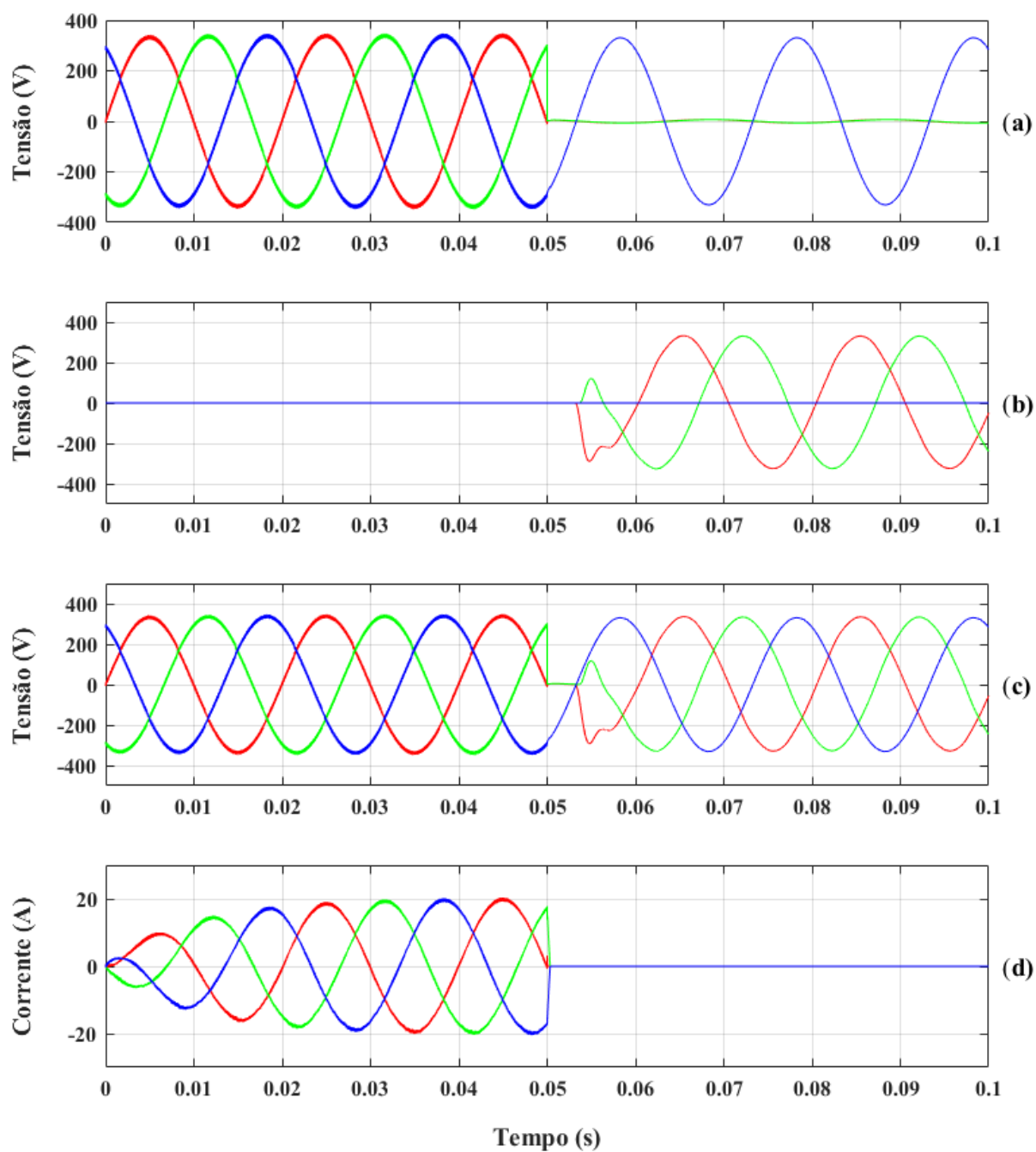
(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.

Figura 65. Apêndice G: Resultado de simulação – falta assimétrica bifásica.

(a) Tensão no PCC; (b) Tensão injetada; (c) Tensão na carga; (d) Corrente injetada



Fonte: próprio autor.