



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

HERICK TALLES QUEIROZ LEMOS

UM MÉTODO PARA ANÁLISE DE FALTAS EM SISTEMAS DE ENERGIA COM
GERADORES DISTRIBUÍDOS CONECTADOS À REDE POR MEIO DE
CONVERSORES DE FREQUÊNCIA COMPLETOS

MOSSORÓ
2019

HERICK TALLES QUEIROZ LEMOS

UM MÉTODO PARA ANÁLISE DE FALTAS EM SISTEMAS DE ENERGIA COM
GERADORES DISTRIBUÍDOS CONECTADOS À REDE POR MEIO DE
CONVERSORES DE FREQUÊNCIA COMPLETOS

Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Sistemas Elétricos

Orientador: Prof. Dr. Adriano Aron Freitas de Moura

MOSSORÓ
2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

LL557 Lemos, Herick Talles Queiroz Lemos.
m Um método para análise de faltas em sistemas de energia com geradores distribuídos conectados à rede por meio de conversores de frequência completos / Herick Talles Queiroz Lemos. - 2019.
135 f. : il.

Orientador: Adriano Aron Freitas de Moura
Moura.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, 2019.

1. Curtos-circuitos. 2. Geração distribuída. 3. Conversor de frequências completo. I. Moura, Adriano Aron Freitas de Moura, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

HERICK TALLES QUEIROZ LEMOS

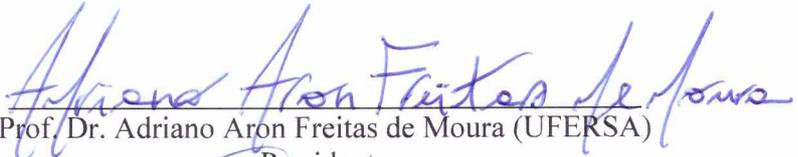
UM MÉTODO PARA ANÁLISE DE FALTAS EM SISTEMAS DE ENERGIA COM
GERADORES DISTRIBUÍDOS CONECTADOS À REDE POR MEIO DE
CONVERSORES DE FREQUÊNCIA COMPLETOS

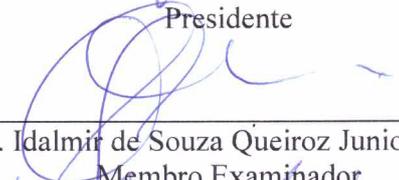
Dissertação apresentada ao Mestrado em
Engenharia Elétrica do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica.

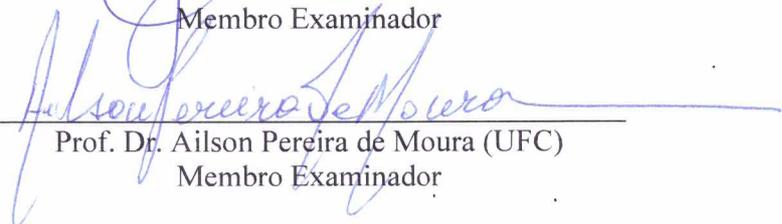
Linha de Pesquisa: Sistemas Elétricos

Defendida em: 25 / 02 / 2019.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Adriano Aron Freitas de Moura (UFERSA)
Presidente


Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Junior (UFERSA)
Membro Examinador


Prof. Dr. Ailson Pereira de Moura (UFC)
Membro Examinador

Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade (UFERSA)
Membro Examinador

Prof. Dr. Marinaldo Pinheiro de Sousa Neto (IFRN)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Vandy Nunes, pelo inventivo e apoio incondicional prestados durante minha trajetória acadêmica.

Agradeço a minha esposa, Mayara Cristina, pelo companheirismo, paciência e compreensão constantes durante o período do Mestrado.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Adriano Aron, pela orientação, paciência e estímulos dados.

Agradeço ao Prof. Dr. Humberto Dionísio pela amizade e valiosos conselhos concedidos.

Agradeço à banca pela disponibilidade e importantes contribuições fornecidas para melhoria deste trabalho.

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

O estudo dos sistemas elétricos sob condições de falta fornece informações fundamentais para o dimensionamento e configuração da proteção. Tais estudos, tradicionalmente, são realizados em estado permanente e baseados, principalmente, no comportamento físico dos geradores síncronos diretamente conectados à rede. Por outro lado, com a introdução das modernas unidades de geração distribuída acopladas à rede via conversores de frequência completos – CFSs, verificou-se a necessidade de revisão dos métodos tradicionais, visto que, ao contrário dos geradores síncronos, as correntes de contribuição dos conversores dependem, apenas, de sua estratégia de controle e dos procedimentos de rede exigidos pelo operador do sistema, notadamente os requisitos de suportabilidade à distúrbios decorrentes de faltas na rede elétrica ou *Fault Ride Through* - FRT. Neste contexto, este trabalho apresenta uma técnica para análise de faltas *shunt* no domínio fasorial em sistemas de potência com geração distribuída acoplada à rede via CFCs que requer dados de fácil acesso aos engenheiros de planejamento e permite a avaliação da contribuição dos geradores para diferentes estratégias de controle de pré-falta e de FRT. Na abordagem proposta, o conversor é modelado como uma fonte de corrente controlada por tensão que injeta apenas correntes de sequência positiva com magnitudes e ângulos de fase dependentes da estratégia de controle de pré-falta, das especificações máximas do conversor e dos requisitos de FRT. Os algoritmos propostos para representação dos modos de controle pré-falta: Fator de Potência Constante – FPC, Tensão Constante – VC e Potência Reativa Constante – QC; e um algoritmo para representação do modo de suporte de tensão à rede exigido no código de rede do Operador Nacional do Sistema – ONS. O modelo de fonte de corrente do conversor é posteriormente convertido em um equivalente de impedância e incluído em um método clássico de análise de faltas baseado na matriz de impedâncias de barra do sistema. A metodologia proposta foi demonstrada por meio de estudos de caso e, posteriormente, validada com auxílio do *software* comercial Análise de Faltas Simultâneas – ANAFAS. Para todas as faltas avaliadas os algoritmos propostos apresentaram excelente desempenho na estimação da corrente de contribuição dos conversores em regime permanente, podendo ser implementados em qualquer programa de análise de sistemas de potência comercial.

Palavras-chave: Curtos-circuitos. Geração distribuída. Conversor de frequências completo.

ABSTRACT

The study of electrical systems under fault conditions provides fundamental information for the design and configuration of the network protection. These studies are traditionally performed in the phasor domain and based on the physical behavior of the synchronous generators directly connected to the network. However, the increase of full-scale converter-based (FSC – based) distributed generators connections to the grid has created the need for new short-circuit analysis methods, since, unlike the synchronous generators, the converter current contribution depends only on its pre-fault control strategy and the applied Fault Ride Through – FRT requirements. In this work, an improved fault analysis method is proposed to assess the current contribution of FSC-based distributed generators to different pre-fault control strategies and FRT requirements using accessible data to planning engineers. In the proposed method the converter was modeled as a voltage controlled current source that injects only positive sequence currents with magnitude and phase angles dependent on the pre-fault control strategy, maximum converter specifications, and FRT requirements. In this work were developed algorithms for modeling the pre-fault control strategies Constant Power Factor - FPC, Constant Voltage – VC and Constant Reactive Power – QC, and an algorithm for grid voltage support requirement of the Brazilian grid code. The converter current source model is subsequently converted to an impedance equivalent and included in a classical fault analysis method based on the bus impedance matrix. The proposed algorithms were demonstrated in study cases and later validated by comparing the obtained results with the professional software Simultaneous Fault Analysis - ANAFAS. For all evaluated faults, the proposed algorithms presented an excellent performance in the estimation of the steady-state current contribution from converters, which shows that they can be implemented in any commercial software of power system analysis.

Keywords: Short-circuits. Distributed generation. Full scale converters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes básicos de um CFC genérico.....	30
Figura 2 – Principais componentes de um CFC do tipo CSC.	31
Figura 3 – Principais componentes de um CFC do tipo VSC.....	31
Figura 4 – Modos de controle aplicáveis às turbinas tipo IV.....	32
Figura 5 – Perfil LVRT de alguns códigos de rede internacionais.....	34
Figura 6 - Requisito de LVRT estabelecido no código de rede nacional.....	35
Figura 7 – Injeção de corrente reativa no código de rede alemão.....	36
Figura 8 – Requisito para suporte de tensão à rede do ONS.....	37
Figura 9 - Sistema de potência com n barras operando sob condições de pré-falta.....	39
Figura 10 – Aplicação de defeito shunt na q-ésima barra do sistema.	40
Figura 11 – Representação alternativa do defeito shunt na barra q.....	40
Figura 12 - Determinação da corrente de falta a partir das condições de pré-falta.....	41
Figura 13 - Circuito em estrela para representação de faltas shunt na barra q.....	45
Figura 14 – Principais componentes de uma UGDCF.	52
Figura 15 - Representação da UGDCF durante o curto-circuito.....	54
Figura 16 – Modelo fasorial do controle FPC.....	55
Figura 17 - Característica do módulo de I_{st}^* no controle FPC.	56
Figura 18 - Sistema exemplo de duas barras.....	57
Figura 19 – Resultados obtidos em pu para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,07$ pu. .	58
Figura 20 – Resultados obtidos em pu para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,8$ pu. .	58
Figura 21 - Modelo fasorial proposto para o controle QC.	59
Figura 22 - Algoritmo para determinação da corrente de contribuição no controle QC.....	60
Figura 23 – Resultados obtidos em pu para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,07$ pu.	61
Figura 24 – Resultados obtidos em pu para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,3$ pu. .	62
Figura 25 – Modelo fasorial proposto para o controle VC.....	63
Figura 26 – Algoritmo proposto para o controle VC.	64
Figura 27 – Resultados obtidos em pu para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,07$ pu.	66
Figura 28 – Resultados obtidos em pu para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,8$ pu. .	66

Figura 29 – Curva de operação do conversor no modo FRT para turbinas eólicas.....	68
Figura 30 – Modelo fasorial proposto para o controle FRT.....	69
Figura 31 – Algoritmo para determinação de I_{s+}^* no controle FRT com suporte de tensão....	70
Figura 32 – Resultados obtidos em pu para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,07$ pu.	71
Figura 33 – Resultados obtidos em pu para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,3$ pu.	71
Figura 34 – Equivalentes de impedância do conversor.....	72
Figura 35 – Algoritmo proposto para análise de faltas em sistemas de potência com UGDCFs.	74
Figura 36 – Sistema de 17 barra utilizado no estudo de caso.....	77
Figura 37 – Tela de configuração do conversor do gerador eólico tipo IV.....	79
Figura 38 – Modelagem adotada pelo ANAFAS para o conversor.....	80
Figura 39 – Resposta em pu do controle FPC para uma falta FFF na barra 6.....	82
Figura 40 – Resposta em pu do controle FRT para uma falta trifásica na barra 6.	84
Figura 41 – Resposta em pu do controle FPC para uma falta FFF-T na barra 6.....	86
Figura 42 – Resposta em pu do controle FRT para uma falta FFF-T na barra 6.....	87
Figura 43 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 6.....	88
Figura 44 – Resposta em pu do controle FRT para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 6.....	90
Figura 45 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 6.....	92
Figura 46 – Resposta em pu do controle FRT para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 6.....	94
Figura 47 – Resposta em pu do controle FPC para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 6.	95
Figura 48 – Resposta do controle FRT para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 6.	97
Figura 49 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FFF na barra 5.....	99
Figura 50 – Resposta em pu do controle FFT para a falta FFF na barra 5.....	101
Figura 51 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FFF-T na barra 5.....	102
Figura 52 – Resposta em pu do controle FRT para a falta FFF-T na barra 5.....	104
Figura 53 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 5.....	105

Figura 54 – Resposta em pu do controle FRT para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 5.....	107
Figura 55 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 5.....	109
Figura 56 – Resposta em pu do controle FRT para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 5.....	111
Figura 57 – Resposta em pu do controle FPC para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 5.....	112
Figura 58 – Resposta em pu do controle FRT para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 5.....	114
Figura 59 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FFF na barra 9.....	116
Figura 60 - Resposta em pu do controle FRT para a falta FFF na barra 9.....	118
Figura 61 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FFF-T na barra 9.....	119
Figura 62 – Resposta em pu do controle FRT para a falta FFF-T na barra 9.....	121
Figura 63 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 9.....	122
Figura 64 – Resposta em pu do controle FRT para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 9.....	124
Figura 65 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 9.....	125
Figura 66 – Resposta em pu do controle FRT para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 9.....	127
Figura 67 – Resposta em pu do controle FPC para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 9.....	128
Figura 68 – Resposta em pu do controle FRT para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 9.....	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados das linhas do sistema de 17 barras na base de 100 MVA.....	78
Tabela 2 – Dados dos transformadores do sistema de 17 barras.	78
Tabela 3 – Especificações máximas e dados de pré-faltas dos conversores.....	78
Tabela 4 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.	83
Tabela 5 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 6 utilizando-se o ANAFAS.	83
Tabela 6 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.	85
Tabela 7 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.	86
Tabela 8 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 6 utilizando-se o ANAFAS.	86
Tabela 9 – Resultados obtidos para a falta FFF-T na barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.	88
Tabela 10 – Resultados obtidos para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.	89
Tabela 11 – Resultados obtidos para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 6 utilizando-se o ANAFAS.	90
Tabela 12 – Resultados obtidos para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.	91
Tabela 13 – Resultados obtidos para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.	93
Tabela 14 – Resultados obtidos para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.	93
Tabela 15 – Resultados obtidos para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.	95
Tabela 16 – Resultados obtidos para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.	96
Tabela 17 – Resultados obtidos para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 6 utilizando-se o ANAFAS.	97
Tabela 18 – Resultados obtidos para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.	98

Tabela 19 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.	100
Tabela 20 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 5 utilizando-se o ANAFAS.	100
Tabela 21 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.	102
Tabela 22 – Resultados obtidos para a falta FFF-T na barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.	103
Tabela 23 – Resultados obtidos para a falta FFF-T na barra 5 utilizando-se o ANAFAS. ...	103
Tabela 24 – Resultados obtidos para a falta FFF-T na barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.	104
Tabela 25 – Resultados obtidos para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.	106
Tabela 26 – Resultados obtidos para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 5 utilizando-se o ANAFAS.	106
Tabela 27 – Resultados obtidos para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.	108
Tabela 28 – Resultados obtidos para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.	109
Tabela 29 – Resultados obtidos para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 5 utilizando-se o ANAFAS.	110
Tabela 30 – Resultados obtidos para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.	111
Tabela 31 – Resultados obtidos para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.	113
Tabela 32 – Resultados obtidos para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 5 utilizando-se o ANAFAS.	113
Tabela 33 – Resultados obtidos para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.	114
Tabela 34 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.	117
Tabela 35 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 9 utilizando-se o ANAFAS.	117
Tabela 36 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.	118

Tabela 37 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.	120
Tabela 38 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 9 utilizando-se o ANAFAS.	120
Tabela 39 – Resultados obtidos para a falta FFF-T na barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.	120
Tabela 40 – Resultados obtidos para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.	123
Tabela 41 – Resultados obtidos para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 9 utilizando-se o ANAFAS.	123
Tabela 42 – Resultados obtidos para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.	125
Tabela 43 – Resultados obtidos para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.	126
Tabela 44 – Resultados obtidos para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 9 utilizando-se o ANAFAS.	126
Tabela 45 – Resultados obtidos para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.	128
Tabela 46 – Resultados obtidos para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.	129
Tabela 47 – Resultados obtidos para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 9 utilizando-se o ANAFAS.	129
Tabela 48 – Resultados obtidos para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.	131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAFAS	–	Análise de Falhas Simultâneas
CA	–	Corrente alternada
CC	–	Corrente contínua
CEPEL	–	Centro de Pesquisas em Energia Elétrica
CFC	–	Conversor de frequências completo
CHP	–	Combined Heat and Power
CNPq	–	Conselho Nacional de Científico e Tecnológico
CSC	–	Current source converter
FF	–	Falta fase-fase ou bifásica
FFF	–	Falta trifásica
FFF-T	–	Falta trifásica envolvendo a terra
FF-T	–	Falta fase-fase envolvendo a terra
FPC	–	Fator de potência constante
FRT	–	Fault Ride Through
FSC	–	Full-scale converter
F-T	–	Falta fase à terra
GSC	–	Grid side converter
ICV	–	Inverter current vector
IGBT	–	Insulated gate bipolar transistor
IGCT	–	Insulated gate commutated thyristor
IMI	–	Inverter matrix impedance
LVRT	–	Low voltage ride through
MANA	–	Modified augmented nodal analysis
MPPT	–	Maximum power point tracking
ONS	–	Operador Nacional do Sistema
PCC	–	Point of common coupling
PWM	–	Pulse width modulation
QC	–	Potência reativa constante
SCR	–	Silicon controlled rectifier
UGDCF	–	Unidade de geração distribuída conectada à rede por meio de CFC
UGP	–	Unidade de geração de potência
VC	–	Tensão constante

VSC – Voltage source converter

LISTA DE SÍMBOLOS

I_r	–	Corrente reativa
I_n	–	Corrente nominal do conversor
I_a	–	Corrente ativa
ΔI_{s+}^r	–	Corrente reativa adicional de sequência positiva
ΔI_{s-}^r	–	Corrente reativa adicional de sequência negativa
ΔV_{s+}	–	Variação na tensão de fase de sequência positiva
ΔV_{s-}	–	Variação na tensão de fase de sequência negativa
V_{s+}	–	Tensão de fase de sequência positiva
V_{s-}	–	Tensão de fase de sequência negativa
V_n	–	Tensão nominal do conversor
$V_{1\text{min}}$	–	Valor médio da tensão da rede em um intervalo de 1 minuto
K	–	Inclinação da reta
$I_{s+}^{r,0}$	–	Corrente reativa de sequência positiva pré-distúrbio
I_{s+}^r	–	Corrente reativa de sequência positiva pós-distúrbio
X_d''	–	Reatância subtransitória de eixo direto
$[I_q^0]$	–	Vetor (3×1) de correntes injetadas de pré-falta na barra q
$[V_q^0]$	–	Vetor (3×1) de tensões de pré-falta na barra q
$[V^0]$	–	Vetor $(3n \times 1)$ de tensões de pré-falta nas barras
$[V_q]$	–	Vetor (3×1) de tensões pós-falta na barra q
$[I^0]$	–	Vetor $(3n \times 1)$ de correntes injetadas de pré-falta nas barras
$[Z_{BAR}]$	–	Matriz $(3n \times 3n)$ de impedâncias de barra
$[\Delta V]$	–	Vetor $(3n \times 1)$ de variações de tensões nas barras
$[\Delta V_q]$	–	Vetor (3×1) de variações de tensão na barra q

- $[\Delta I]$ – Vetor ($3n \times 1$) de variações das correntes injetadas nas barras
- $[\Delta I_q]$ – Vetor (3×1) de variações de correntes injetadas na barra q
- $[Z_f]$ – Matriz (3×3) de impedâncias de falta
- $[I_q^f]$ – Vetor (3×1) de correntes de falta na barra q
- $[Z_{qq}]$ – Matriz (3×3) correspondente ao elemento (q, q) da matriz $[Z_{BAR}]$
- $[I_{ik}^f]$ – Vetor (3×1) de correntes de falta entre as barras i e k
- $[I_{q,s}^0]$ – Vetor (3×1) de correntes injetadas de sequência na barra q pré-distúrbio
- $[V_{q,s}^0]$ – Vetor (3×1) de tensões de sequência na barra q pré-distúrbio
- $[V_s^0]$ – Vetor ($3n \times 1$) de tensões de sequência nas barras pré-distúrbio
- $[V_{q,s}]$ – Vetor (3×1) de tensões de sequência na barra q pós-distúrbio
- $V_{q,s,0}^0$ – Tensão de sequência zero pré-distúrbio na barra q
- $V_{q,s,+}^0$ – Tensão de sequência positiva pré-distúrbio na barra q
- $V_{q,s,-}^0$ – Tensão de sequência negativa pré-distúrbio na barra q
- $[I_s^0]$ – Vetor ($3n \times 1$) de correntes injetadas de sequência nas barras pré-distúrbio
- $I_{q,s,0}^0$ – Corrente de sequência zero pré-distúrbio na barra q
- $I_{q,s,+}^0$ – Corrente de sequência positiva pré-distúrbio na barra q
- $I_{q,s,-}^0$ – Corrente de sequência negativa pré-distúrbio na barra q
- $[Z_{BAR}^s]$ – Matriz ($3n \times 3n$) de impedâncias de sequência de barra
- $[Z_{qq}^s]$ – Matriz (3×3) correspondente ao elemento (q, q) da matriz de impedâncias de sequência de barra
- Z_{qq}^{s0} – Impedância de sequência zero do elemento (q, q) da matriz de impedâncias de sequência de barra
- Z_{qq}^{s+} – Impedância de sequência positiva do elemento (q, q) da matriz de impedâncias de sequência de barra

- Z_{qq}^{s-} – Impedância de sequência negativa do elemento (q, q) da matriz de impedâncias de sequência de barra
- $[\Delta V_s]$ – Vetor $(3n \times 1)$ de variações nas tensões de sequência nas barras
- $[\Delta V_{q,s}]$ – Vetor (3×1) de variações nas tensões de sequência da barra q
- $[\Delta I_s]$ – Vetor $(3n \times 1)$ de variações nas correntes injetadas de sequência nas barras
- $[\Delta I_{q,s}]$ – Vetor (3×1) de variações nas correntes injetadas de sequência na barra q
- $[Z_f^s]$ – Matriz (3×3) de impedâncias de falta em componentes de sequência
- $[I_{q,s}^f]$ – Vetor (3×1) de correntes de falta de sequência na barra q
- Z_{in} – Impedância de falta entre a i -ésima fase e o nó n
- Z_{ng} – Impedância de falta entre o nó n e a terra
- V_q^i – Tensão de fase da i -ésima fase da barra q
- $I_q^{i,f}$ – Corrente de falta na i -ésima fase da barra q
- α – Operador de rotação da transformada de Fortescue
- $[Y_f^s]$ – Matriz (3×3) de admitâncias de falta em componentes de sequência
- Y_{in} – Admitância de falta entre a i -ésima fase e o nó n
- Y_{ng} – Admitância de falta entre o nó n e a terra
- $[U]$ – Matriz identidade (3×3)
- I_{s+}^* – Corrente de sequência positiva determinada pela estratégia controle do conversor
- P_0 – Potência ativa injetada de pré-falta
- FP_0 – Fator de potência de pré-falta
- $I_{m\acute{a}x}$ – Corrente máxima de saída do conversor
- $V_{m\acute{i}n}$ – Tensão de fase mínima para permanência da conexão com a rede
- $V_{m\acute{a}x}$ – Tensão de fase máxima para permanência da conexão com a rede
- $V_{I_{m\acute{a}x}}$ – Módulo de V_{s+} que resulta em $|I_{s+}^*| = I_{m\acute{a}x}$ na Equação (50)

Q_0	–	Potência reativa injetada de pré-falta
Q	–	Potência reativa injetada na iteração $(i-1)$
P	–	Potência ativa injetada na iteração $(i-1)$
ΔQ	–	Variação da potência reativa injetada entre as iterações i e $(i-1)$
ΔP	–	Variação da potência ativa injetada entre as iterações i e $(i-1)$
K_Q	–	Fator de injeção de potência reativa
K_P	–	Fator de injeção de potência ativa
K_V	–	Fator de variação e tensão
ε	–	Tolerância
P_{INJ}	–	Flag definida pela Equação (56)
$\Delta I_{s+}^{r,*}$	–	Corrente reativa adicional de sequência positiva
$\Delta I_{s+}^{a,*}$	–	Corrente ativa adicional de sequência positiva
$I_{s+}^{r,0}$	–	Corrente reativa injetada na iteração $(i-1)$
$I_{s+}^{a,0}$	–	Corrente ativa injetada na iteração $(i-1)$
I_{s+}^0	–	Corrente injetada de sequência positiva na iteração $(i-1)$
V_{in}^{for}	–	Limite inferior do intervalo de tensão cuja corrente reativa fornecida é dependente de V_{s+}
V_{su}^{for}	–	Limite superior do intervalo de tensão cuja corrente reativa fornecida é dependente de V_{s+}
V_{in}^{con}	–	Limite inferior do intervalo de tensão cuja corrente reativa consumida é dependente de V_{s+}
V_{su}^{con}	–	Limite superior do intervalo de tensão cuja corrente reativa consumida é dependente de V_{s+}
$[Z_{con,k}^s]$	–	Matriz (3×3) do equivalente de impedância do conversor k
Ω_{con}	–	Conjunto de m conversores

- $[\epsilon_I]$ – Vetor $(n \times 1)$ de desvios no módulo de I_{s+}^* entre as iterações i e $(i-1)$
- $[\epsilon_\theta]$ – Vetor $(n \times 1)$ de desvios no ângulo de I_{s+}^* entre as iterações i e $(i-1)$
- R_1 – Resistência de sequência positiva
- R_0 – Resistência se sequência zero
- X_1 – Reatância de sequência positiva
- X_0 – Reatância de sequência zero

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Revisão bibliográfica	24
1.2	Objetivos	27
1.3	Estrutura do texto	27
2	CONEXÃO ELETRÔNICA DE GERADORES DISTRIBUÍDOS À REDE	29
2.1	Conversores de frequência completos: generalidades	29
2.2	Requisitos de FRT	33
2.2.1	Requisitos de LVRT	33
2.2.2	Requisitos de suporte de tensão à rede elétrica	35
2.2.3	Requisitos para tomada de carga	37
3	CÁLCULO DE CURTOS-CIRCUITOS UTILIZANDO A MATRIZ DE IMPEDÂNCIAS DE BARRA	38
3.1	Princípios básicos e hipóteses simplificadoras	38
3.2	Análise matricial de faltas no domínio das componentes simétricas	43
3.3	Representação matricial das faltas <i>shunt</i>	44
3.3.1	Falta trifásica (FFF)	47
3.3.2	Falta trifásica envolvendo a terra (FFF-T)	48
3.3.3	Falta bifásica (FF).....	48
3.3.4	Falta bifásica envolvendo a terra (FF-T)	49
3.3.5	Falta fase à terra (F-T)	50
4	TÉCNICA PROPOSTA PARA ANÁLISE DE FALTAS	52
4.1	Modelagem dos conversores de frequências	52
4.1.1	Modelagem do controle FPC	55
4.1.2	Modelagem do controle QC	59
4.1.3	Modelagem do controle VC	62
4.1.4	Modelagem do controle FRT.....	67
4.1.5	Equivalente de impedância.....	72
4.2	Algoritmo de execução da técnica	74
5	VALIDAÇÃO DA TÉCNICA PROPOSTA	77
5.1	Estudo de caso	77
5.1.1	Descrição do estudo.....	77
5.2	Resultados e discussão	81
5.2.1	Faltas na barra 6.....	81
5.2.2	Faltas na barra 5.....	98

5.2.3	Faltas na barra 9.....	115
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	132
7	REFERÊNCIAS	134

1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de distúrbios em um sistema elétrico de potência representa sérios riscos à segurança e normalidade de seu estado operativo. Tais perturbações provocam alterações nas grandezas elétricas e, muitas vezes, violações das restrições operacionais, havendo-se a necessidade de ações corretivas para sanar ou mitigar as consequências desses distúrbios (SATO; FREITAS, 2017).

As perturbações mais comuns e também as mais severas são os curtos-circuitos ou faltas *shunt*, que possuem origem associada a falhas na isolação de equipamentos, sobretensões causadas por descargas atmosféricas ou chaveamentos, adversidades climáticas e a outras causas mecânicas. Por frequência de ocorrência, o tipo mais comum de falta *shunt* é a falta fase à terra com 70% das ocorrências, seguida pelas faltas fase-fase, fase-fase à terra e trifásica, as quais correspondem a 15%, 10% e 5% das ocorrências respectivamente (ANDERSON, 1995).

Quando da ocorrência desses defeitos em sistemas de potências baseados em máquinas síncronas, a magnitude da corrente de falta resultante depende da tensão interna das máquinas e das impedâncias entre essas máquinas e o ponto de falta. Essa corrente é geralmente muito maior que as corrente de operação do sistema e, se não interrompida, pode causar danos térmicos e mecânicos irreparáveis aos equipamentos.

Neste contexto, a análise de faltas constitui uma parte importante do estudo dos sistemas de potências, pois as informações ganhas com essa análise permitem, entre outros assuntos, a determinação: da capacidade de interrupção de disjuntores e fusíveis; dos ajustes dos relés de proteção e suas coordenações com demais dispositivos de proteção; da capacidade de suportabilidade térmica e mecânica dos equipamentos; e da malha de aterramento.

Por outro lado, a crescente integração de fontes de geração distribuída à rede através de conversores de frequência completos trouxe consigo a necessidade de revisão dos métodos tradicionais de cálculo de curtos-circuitos em estado permanente, uma vez que a corrente de contribuição dos conversores não depende das características elétricas do gerador, mas sim da estratégia de controle aplicada ao conversor e dos requisitos de FRT exigidos pelos procedimentos de rede do operador do sistema.

Num primeiro momento, as técnicas de modelagem no domínio do tempo — amplamente empregadas em *softwares* de transitórios eletromagnéticos, tais como o DIgSILENT PowerFactory e EMTP-RV — despontaram como uma alternativa promissora ao uso dos métodos tradicionais, pois tornaram possível modelar em detalhes as estratégias de

controle do conversor e, dessa forma, estimar com precisão sua corrente de contribuição para faltas na rede (GÖKSU et al., 2012).

Em contrapartida, a modelagem empregada neste tipo de abordagem é bastante complexa e exige dados dos conversores não acessíveis (geralmente por segredo industrial) aos engenheiros de planejamento e distribuição (KAMARA, 2013). Além disso, a aplicação dessa abordagem para análise de grandes sistemas de potência requer grande esforço na implementação e simulação computacional, quando comparada à modelagem em estado permanente.

Em virtude do exposto, certo empenho tem sido aplicado pela comunidade científica na busca por modelos capazes de representar no domínio fasorial o comportamento dos conversores de frequência sob condições de curto-circuito na rede elétrica, a fim de avaliar o impacto de suas contribuições para a corrente de falta. A modelagem e análise de faltas *shunt* em sistema de energia com geradores distribuídos conectados à rede por meio de CFCs é o objeto de estudo desse trabalho.

1.1 Revisão bibliográfica

Com o aumento na integração de geradores distribuídos à rede via conversores de frequência completos e atualização dos requisitos de FRT em muitos países, vários estudos têm sido conduzidos com o objetivo de desenvolver novos métodos capazes de representar o comportamento controlado da corrente de contribuição dos conversores para faltas na rede, bem como avaliar o real impacto dessa contribuição no planejamento e operação dos sistemas elétricos de potência.

Em (IOV et al., 2008) é investigado a corrente de contribuição de turbinas eólicas do tipo IV para faltas trifásicas e proposto um algoritmo para o *software* DIgSILENT PowerFactory no qual os conversores são representados por equivalentes de impedância que injetam a corrente nominal da turbina, I_n , fixada em 1 pu. No modelo, a componente reativa da corrente de contribuição, I_r , é ajustada com base nos requisitos de FRT do código de rede Alemão da E.On Netz, enquanto que a componente ativa, I_a , é determinada pela Equação (1).

$$I_a = \sqrt{I_n^2 - I_r^2} \quad (1)$$

Em (NELSON; MA, 2011) são apresentadas as características das turbinas eólicas tipo IV da Siemens e discutido o comportamento dos conversores sob condições de falta. No estudo realizado foi constatado que a contribuição do conversor obedece a dois regimes: um transiente

inicial com duração típica de meio ciclo e corrente de pico de até 2,5 pu; e, após esse período, uma resposta característica da lógica FRT implementada que limita a corrente de contribuição a valores entre 1,1 e 1,2 pu. Além disso, foi verificado que o conversor contribui unicamente com correntes de sequência positiva mesmo para faltas assimétricas.

Em (WALLING; GURSOY; ENGLISH, 2012) é descrito o comportamento das turbinas eólicas tipo III e IV e fornecido recomendações para representação desses geradores na análise de curtos-circuitos. No trabalho é relatado que, ao contrário dos geradores síncronos, as turbinas III e IV não podem ser representadas como fontes de tensão atrás de uma reatância pois a corrente de contribuição dessas unidades é definida pela estratégia de controle dos conversores ao invés das características físicas dos geradores. O trabalho também sugere que a corrente de contribuição da turbina tipo IV consiste de um transiente inicial de 2 a 3 pu, seguido de uma injeção controlada de aproximadamente 1,5 pu definida pela lógica FRT programada. Por fim os autores propõem uma abordagem fasorial baseada na utilização de tabelas de dados de injeção de corrente ativa e reativa em função da tensão terminal da máquina para um certo instante após a falta. Segundo eles, as tabelas de dados, que seriam fornecidas pelos fabricantes das turbinas, poderiam ser utilizadas para estimar a contribuição das turbinas e incluí-las numa representação em fonte de corrente ou fonte de tensão em programas de análise curto-circuito.

Em (CHEN et al., 2012) é proposto um método para estimativa da corrente de contribuição de CFCs para faltas simétricas. No método os conversores são modelados como equivalentes de impedância ajustados iterativamente para fornecer a corrente reativa definida pelo código de rede da Dinamarca para turbinas eólicas. Neste caso, a componente ativa também foi ajustada conforme a Equação (1). No estudo de caso realizado pelos autores foi constatado que o método proposto fornece resultados mais conservadores em relação à corrente de curto-circuito e melhor suporte de tensão à rede quando comparado ao método da superposição implementado no DIgSILENT PowerFactory e o método proposto na IEC60909.

Em (FISCHER; MENDONÇA, 2012) é apresentada uma metodologia para representação das turbinas eólicas tipo IV da ENERCON em estudos de curto-circuito. No trabalho os autores afirmam com base em dados experimentais que os conversores contribuem apenas com correntes de sequência positiva para faltas simétricas e assimétricas. Com base nessas características, os autores propõem que o conversor seja modelado como uma fonte de tensão atrás de uma impedância ajustada iterativamente para produzir a corrente máxima de saída do conversor com ângulo de fase de 90° , que, segundo eles, corresponde ao pior cenário. A metodologia proposta foi demonstrada analiticamente com um sistema de 4 barras e implementada no *software* PSS[®]E.

Em (GÖKSU et al., 2012) também é proposto um método iterativo no qual os CFCs são representados como equivalentes de impedância. No entanto, os autores sugerem que, além da componente de sequência positiva, a contribuição de sequência negativa também deve ser considerada para o caso de faltas assimétricas como uma perspectiva para requisitos de rede futuros. No trabalho, a metodologia proposta foi demonstrada e comparada com simulações no domínio do tempo considerando uma injeção fixa de 0,2 pu de corrente reativa de sequência negativa e o código de rede da VND/EON da Alemanha como referência para obtenção da componente reativa da contribuição de sequência positiva. A componente ativa da contribuição de sequência positiva foi desprezada.

Em (MOURA et al., 2015) é proposto um método iterativo para análise de faltas *shunt* em sistemas de distribuição com geração fotovoltaica baseado na matriz IMI (do inglês *inverter matrix impedance*) e no vetor ICV (do inglês *impedance-current vector*). No trabalho é assumido que conversor atua como uma fonte de potência constante que contribui apenas com correntes de sequência positiva em função do algoritmo de rastreamento do ponto de máxima empregado nos inversores projetados para sistemas fotovoltaicos. Por meio de estudos de caso, o método proposto foi demonstrado e validado com auxílio do *software* comercial Análise de Faltas Simultâneas – ANAFAS, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas em Energia Elétrica – CEPTEL.

Em (KARAAGAC et al., 2015) são propostos algoritmos para simulação de turbinas tipo IV sob condições de faltas simétricas na rede. No trabalho os conversores são modelados como fontes de corrente controladas segundo as estratégias de controle de reativo, também conhecida como controle de reativos constante ou controle QC, e FRT do código de rede da E.ON Netz da Alemanha. No método, o modelo dos conversores e a rede são analisadas utilizando a técnica MANA (do inglês *Modified Augmentde Nodal Analysis*), que requer a utilização de algoritmos de fatoração LU devido ao grau de esparsidade do sistema de equações resultante da técnica. Por meio de estudos de caso os algoritmos propostos foram demonstrados e os resultados numéricos comparados com o *software* comercial EMTP-RV.

Os estudos mais recentes apresentados anteriormente constituem importantes contribuições para análise de faltas no domínio fasorial em sistemas de potência com geradores distribuídos conectados à rede por meio de CFCs. No entanto, muito trabalho ainda pode ser feito acerca desse assunto em adição aos métodos existentes, como: introdução de novos modos de controle de pré-falta para estimativa da contribuição durante o período que antecede a detecção da falta pelo conversor ou na banda morta do modo de controle FRT; generalização

da técnica para de análise de sistemas com topologia radial ou malhada; e inclusão de múltiplos geradores distribuídos com possibilidade de análise de faltas *shunt* e série.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor uma técnica para análise de faltas *shunt* no domínio fasorial em sistemas elétricos de potência com geração distribuída acoplada à rede via conversores de frequência completos que requer dados de fácil acesso aos engenheiros de planejamento e permite a avaliação da contribuição dos geradores para as estratégias de controle de pré-falta FPC, QC e VC, e para os requisitos de FRT do código de rede nacional.

Para alcançar o objetivo geral, foram formulados os seguintes objetivos específicos:

- Compreender e descrever o comportamento dos CFCs sob condições de falta através de extensiva pesquisa bibliográfica;
- Desenvolver modelos e algoritmos para simulação do comportamento dos conversores para as estratégias de controle de pré-falta FPC, QC e VC;
- Desenvolver algoritmos para implementação dos requisitos de FRT do código de rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS;
- Converter os modelos desenvolvidos para os conversores em equivalentes de impedância e incluí-los em um método geral de análise faltas baseado na matriz de impedâncias de barra;
- Validar o método geral proposto por meio de estudos de caso e comparação dos resultados obtidos com o *software* comercial ANAFAS.

1.3 Estrutura do texto

O texto está organizado da seguinte maneira.

O Capítulo 1 discute a importância da análise de faltas em sistemas de potência e introduz a necessidade de revisão dos métodos tradicionais de cálculo de curtos-circuitos em estado permanente para correta avaliação da corrente de contribuição de geradores distribuídos conectados à rede por meio de CFCs. Também apresenta o estado da arte sobre o tema de pesquisa e descreve os objetivos do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma breve discussão acerca das características gerais dos CFCs e dos principais requisitos de FRT aplicáveis exigidos no âmbito nacional e internacional.

O Capítulo 3 apresenta um método geral para análise de faltas *shunt* em componentes simétricas baseado na matriz de impedâncias de barra.

O Capítulo 4 apresenta a modelagem adotada para representação do conversor e descreve os algoritmos propostos para estimativa da corrente de contribuição dos geradores para diferentes estratégias de controle de pré-falta e FRT. No capítulo também é demonstrado a metodologia proposta para inclusão do conversor no método de análise de faltas apresentado no Capítulo 3.

O Capítulo 5 apresenta um estudo de caso com um sistema trifásico de 17 barras sob diferentes condições de falta e uma comparação e discussão dos resultados obtidos com a utilização dos algoritmos propostos e o *software* Análise de Faltas Simultâneas – ANAFAS.

O Capítulo 6 é destinado às considerações finais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 CONEXÃO ELETRÔNICA DE GERADORES DISTRIBUÍDOS À REDE

Com o crescente esforço mundial em descarbonizar a produção de energia elétrica, uma grande variedade de tipos de plantas de geração tem sido conectada às redes elétricas de distribuição e transmissão. São exemplos as bem estabelecidas tecnologias de produção de calor e eletricidade combinada (CHP), as turbinas eólicas e os sistemas fotovoltaicos. Além dessas, existem muitas tecnologias novas, tais como: células a combustível, usinas heliotérmicas, micro CHPs, *flywheels* e baterias de fluxo, que estão em diferentes níveis de demonstração de sua viabilidade econômica (JENKINS; EKANAYAKE; STRBAC, 2010).

Para integração dessas fontes de geração à rede podem ser utilizadas diferentes tecnologias de interface a depender da natureza da energia produzida. Os tipos mais comuns são a conexão direta de geradores e os conversores eletrônicos de potência. O principal objetivo das tecnologias de interface é condicionar a energia produzida aos requisitos de rede.

Nos últimos anos, a utilização de conversores de frequência completos tem ganhado grande destaque em meio as fontes de geração renováveis em função da flexibilidade proporcionada por esses dispositivos no controle de potências ativa e reativa, as quais são parâmetros chave para o controle da frequência e tensão da rede; e maximização da extração de energia da fonte a partir do uso de algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência (em inglês, *Maximum Power Point Tracking* – MPPT).

Neste capítulo é apresentado uma breve discussão acerca das características gerais dos CFCs e dos principais requisitos de FRT aplicáveis exigidos no âmbito nacional e internacional.

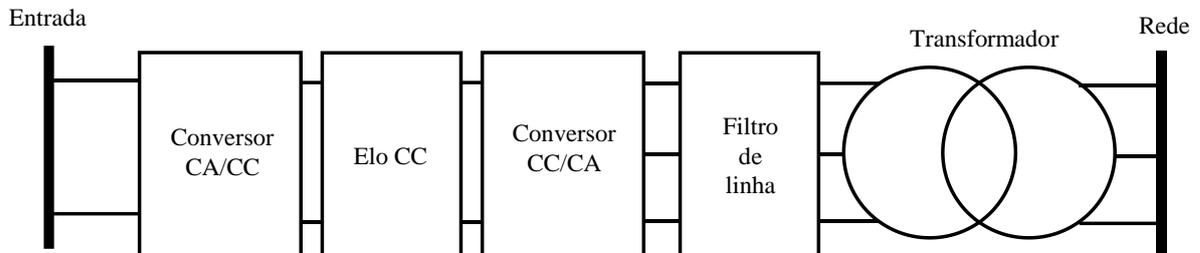
2.1 Conversores de frequência completos: generalidades

Muitos geradores distribuídos de energia renovável usam CFCs como interface de conexão com a rede. Nestas unidades, os principais objetivos dos CFCs são condicionar a energia fornecida pelo gerador para atender aos requisitos da rede e melhorar o aproveitamento da fonte de energia (BOLLEN, 2011).

Construtivamente os CFCs utilizados em fontes com geração CA são constituídos de três blocos fundamentais: um conversor CA/CC (retificador de onda completa), um elo de corrente contínua, que serve como circuito de armazenamento de energia, e um conversor CC/CA (inversor). No caso de fontes com geração CC, o bloco do conversor CA/CC é substituído por um conversor CC/CC (*buck-boost*). Opcionalmente, também podem ser adicionados um filtro de linha a fim de mitigar os efeitos prejudiciais do CFC na rede no ponto

de acoplamento comum (em inglês *Point of Common Coupling – PCC*), e um transformador para fornecer isolamento galvânico (JENKINS; EKANAYAKE; STRBAC, 2010). A Figura 1 ilustra a conexão desses componentes em um CFC genérico.

Figura 1 – Componentes básicos de um CFC genérico.



Fonte: Autoria própria (2019).

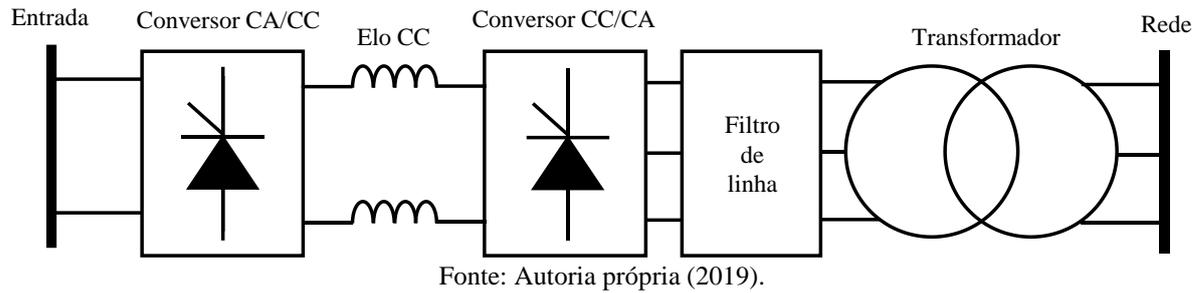
A depender da configuração do conversor CC/CA, o CFC pode ser classificado como do tipo fonte de tensão (em inglês *Voltage Source Converter – VSC*) ou fonte de corrente (em inglês *Current Source Converter – CSC*).

A configuração em fonte de corrente utilizada nos conversores SCRs (*Silicon Cotrolled Rectifier*), GCTs (do inglês *Gate-Commutated Thyristors*) ou SGCTs (do inglês *Symmetric Gate-Commutated Thyristors*) comutados por PWM (do inglês *Pulse Width Modulation*) para sintetizar o sinal de corrente de saída na frequência desejada. Também podem ser utilizados transformadores de entrada associados com filtros de linha para redução do elevado conteúdo harmônico produzido por essa topologia (VANDERMEULEN; MAURIN, 2014).

Outra característica importante dessa configuração é a utilização de indutores como dispositivos de armazenamento de energia no elo CC. Os indutores auxiliam na regulação do *ripple* e contribuem para manutenção da corrente no elo constante. Esse comportamento confere ao CSC uma resposta transitória lenta, visto que o indutor limita a taxa de crescimento da corrente de saída, mantendo-a independente da carga (VANDERMEULEN; MAURIN, 2014).

A configuração CSC é preferida em aplicações de grande potência e onde existam geradores síncronos para fornecer uma tensão de comutação no elo de corrente contínua (JENKINS; EKANAYAKE; STRBAC, 2010). A Figura 2 apresenta os principais componentes utilizados nessa configuração.

Figura 2 – Principais componentes de um CFC do tipo CSC.

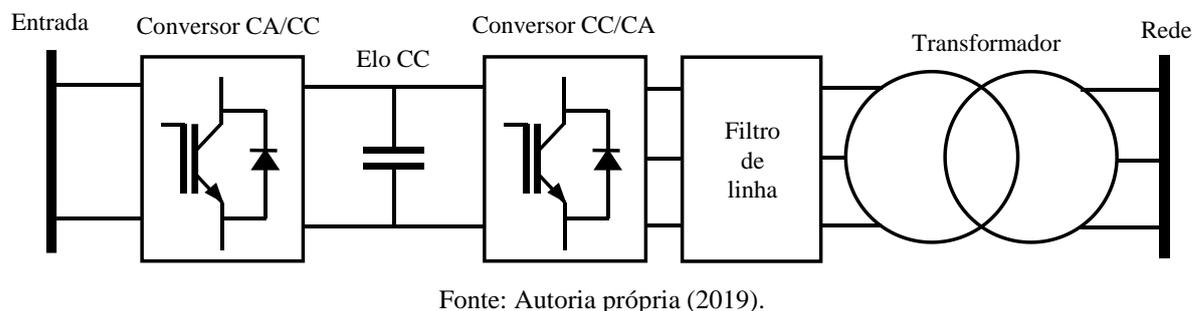


Já a configuração em fonte de tensão utiliza, geralmente, diodos no conversor CA/CC e IGBTs (do inglês *Insulated Gate Bipolar Transistor*) ou IGCTs (do inglês *Insulated Gate Commutated Thyristor*) comutados por PWM no conversor CC/CA para sintetizar a tensão de saída na frequência desejada (VANDERMEULEN; MAURIN, 2014).

Diferentemente dos CSCs, os VSCs utilizam banco de capacitores como dispositivos de armazenamento de energia e regulação de tensão no elo CC. Com auxílio do banco a entrada do conversor CC/CA é mantida constante, o que possibilita a síntese de uma tensão de saída independente da carga. Outra característica do VSC é sua rápida resposta transitória e elevada corrente contribuição para curtos-circuitos na rede, a qual é obtida em função da descarga do banco de capacitores.

O esquema VSC tem sido a escolha preferida para geração distribuída e interface de turbinas eólicas de potência moderada (JENKINS; EKANAYAKE; STRBAC, 2010). A Figura 3 apresenta os principais componentes utilizados nessa configuração.

Figura 3 – Principais componentes de um CFC do tipo VSC.



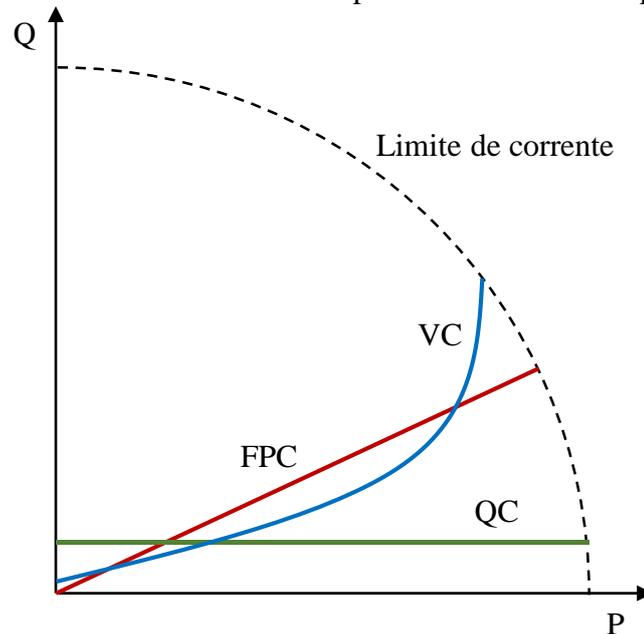
Nos últimos anos, a utilização dos CFCs teve um papel importante na integração à rede de várias fontes de energia renováveis. Em sistemas fotovoltaicos, por exemplo, o CFC é utilizado para converter a potência CC gerada pelos módulos fotovoltaicos em potência CA ao

passo que maximiza o aproveitamento da energia disponível por meio de um conversor CC/CC e algoritmos de busca do ponto de máxima potência.

Em turbinas eólicas de velocidade variável, também conhecidas como turbinas tipo IV, o gerador elétrico, que pode ser do tipo síncrono (com rotor enrolado ou com ímãs permanentes) ou de indução, é conectado à rede por meio de um CFC que processa toda a potência fornecida pelo gerador e opera de maneira independente da frequência da tensão gerada.

A utilização do CFC confere à turbina tipo IV a possibilidade de operação em uma ampla faixa de velocidades de vento e dispensa o uso da caixa de engrenagens. Além disso, o desacoplamento do gerador da rede torna possível a implementação de funções de controle avançadas, tais como requisitos de FRT (do inglês *Fault Ride Through*), controle independente e instantâneo das potências ativa e reativa e participação ativa na regulação da tensão e frequência da rede. A Figura 4 ilustra a relação entre as potências ativa e reativa para diferentes estratégias de controle que podem ser implementadas nas turbinas tipo IV por meio do CFC.

Figura 4 – Modos de controle aplicáveis às turbinas tipo IV.



Fonte: Adaptado de (MULJADI et al., 2010).

Na Figura 4, a linha tracejada representa o limite de corrente do conversor que deve ser respeitado devido ao uso dos dispositivos de chaveamento eletrônico, isto é, IGBTs, CGTs entre outros. Ainda nessa figura, as linhas nas cores vermelho, azul e verde representam, respectivamente, a relação entre as potências ativa e reativa nos modos de controle: Fator de Potência Constante – FPC, Tensão Constante – VC e Potência Reativa Constante – QC.

No modo de controle FPC, a corrente do conversor é controlada de modo a manter o fator de potência constante em um valor especificado durante toda a faixa de operação do conversor. Já no modo de controle VC, o conversor injeta prioritariamente correntes reativas a fim de ajustar a tensão terminal da UGDCF para um valor de referência. Por outro lado, no modo de controle QC, a UGDCF fornece ou consome uma quantidade pré-determinada de potência reativa de maneira independente da tensão terminal e da potência ativa disponível.

A seguir serão discutidos os principais requisitos de rede aplicáveis aos CFCs quando da ocorrência de distúrbios na rede.

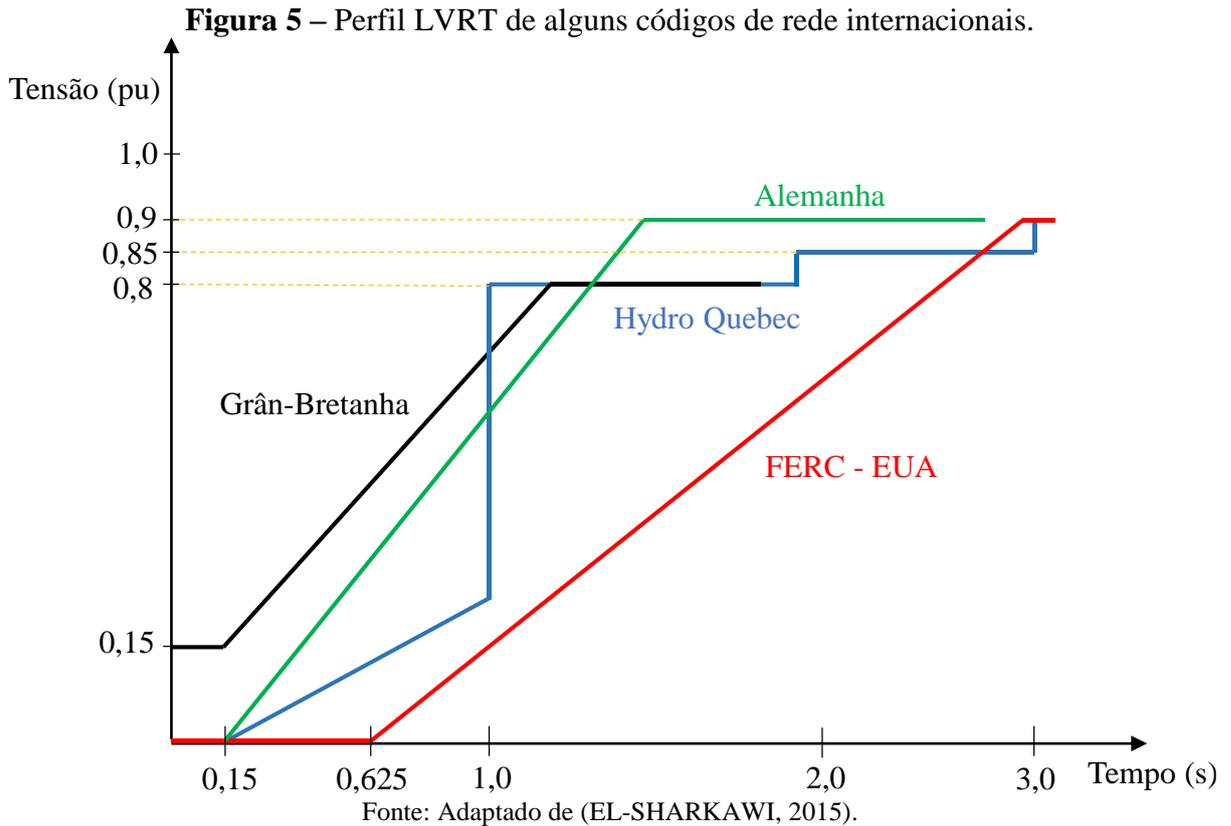
2.2 Requisitos de FRT

O crescente aumento do número de conexões de unidades de geração distribuída à rede tem motivado investigações acerca do impacto dessas unidades na qualidade da energia, proteção e estabilidade do sistema de potência. Em muitos países, incluindo o Brasil, o crescimento na capacidade instalada dessas unidades acarretou em importantes atualizações nos procedimentos de rede dos operadores dos sistemas de transmissão.

No tocante a distúrbios na rede, é comum a exigência de requisitos específicos para permanência da conexão durante variações temporárias na tensão, restabelecimento da injeção de potência ativa (retomada de carga) e suporte de tensão à rede. A seguir serão discutidos os principais requisitos exigidos para conexão de CFCs durante distúrbios na rede.

2.2.1 Requisitos de LVRT

O requisito de LVRT (do inglês *Low Voltage Ride Through*) define a permanência da conexão do conversor na rede quando da ocorrência de variações temporárias na tensão decorrentes de rejeição de carga e defeitos simétricos ou assimétricos a partir de uma curva que relaciona a tensão terminal da unidade com o tempo de duração da variação de tensão. A Figura 5 apresenta o perfil LVRT de alguns códigos de rede internacionais.

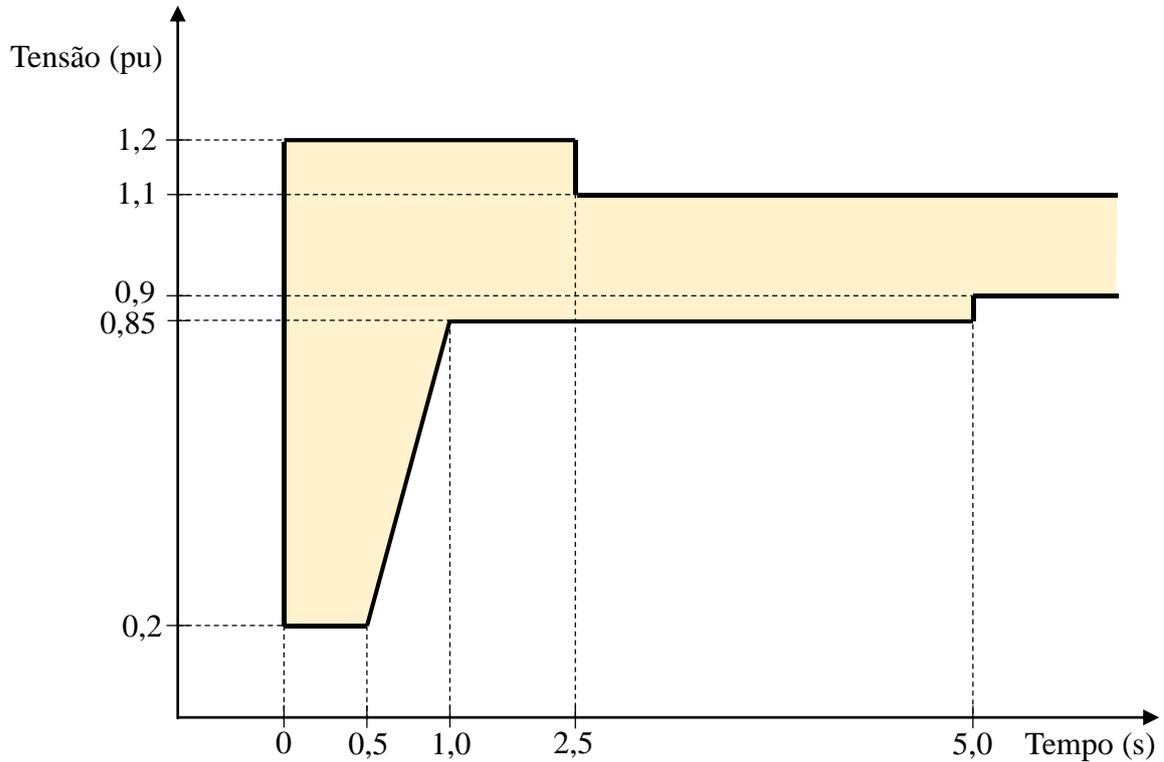


Durante a ocorrência de distúrbios na rede, caso a tensão terminal do conversor permaneça acima da curva LVRT, a conexão da unidade deverá ser mantida. Por outro lado, quando a tensão terminal se encontrar abaixo da curva durante o distúrbio, o conversor deve ser desconectado da rede. Esse requisito previne a ocorrência de instabilidades no sistema tais como colapsos de tensão em função do déficit de potência injetada na rede criado pela desconexão dos geradores por subtensão.

No âmbito nacional, o Operador Nacional do Sistema – ONS também estabelece requisitos LVRT por meio do Submódulo 3.6 – Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão, revisão 2016.12, o qual apresenta os requisitos de suportabilidade a subtensões e sobretensões dinâmicas na Rede Básica.

Nesse documento é estabelecido que, na ocorrência de variações temporárias de tensão decorrentes de distúrbios na Rede Básica em uma ou mais fases no ponto de conexão de centrais geradoras eólicas ou fotovoltaicas às instalações sob responsabilidade de transmissora ou de distribuidora, a central geradora deve continuar operando se a tensão nos terminais dos aerogeradores ou inversores permanecer dentro da região indicada na Figura 6.

Figura 6 - Requisito de LVRT estabelecido no código de rede nacional.



Fonte: Adaptado de (ONS, 2016).

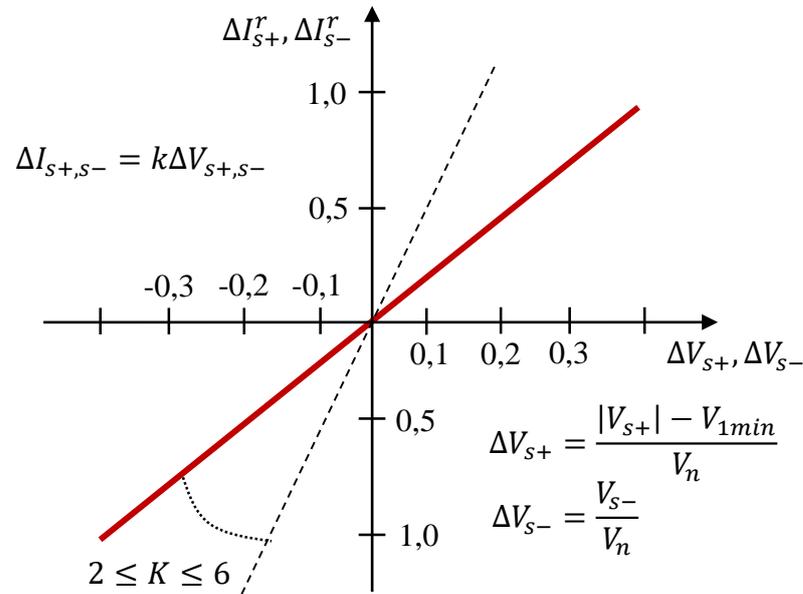
A característica da Figura 6 deve ser atendida para quaisquer tipos de distúrbio, sejam eles provocados por rejeição de carga ou defeitos simétricos ou assimétricos, devendo ser atendida pela tensão da fase que sofrer maior variação.

2.2.2 Requisitos de suporte de tensão à rede elétrica

Outro requisito de FRT exigido em muitos códigos de rede, especialmente em sistemas com grande penetração de geradores eólicos, é a injeção de corrente reativa adicional a fim de fornecer suporte de tensão à rede elétrica durante distúrbios. Os parâmetros que definem a quantidade de corrente reativa e as tensões de ativação ou desativação desse modo de controle variam entre os códigos de rede de cada país.

No código de rede alemão, por exemplo, é requerido a injeção prioritária de correntes reativas de sequência positiva e negativa em até 30 ms após a detecção da falta pelo conversor. As quantidades de corrente reativa a serem injetadas são definidas pela curva apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Injeção de corrente reativa no código de rede alemão.



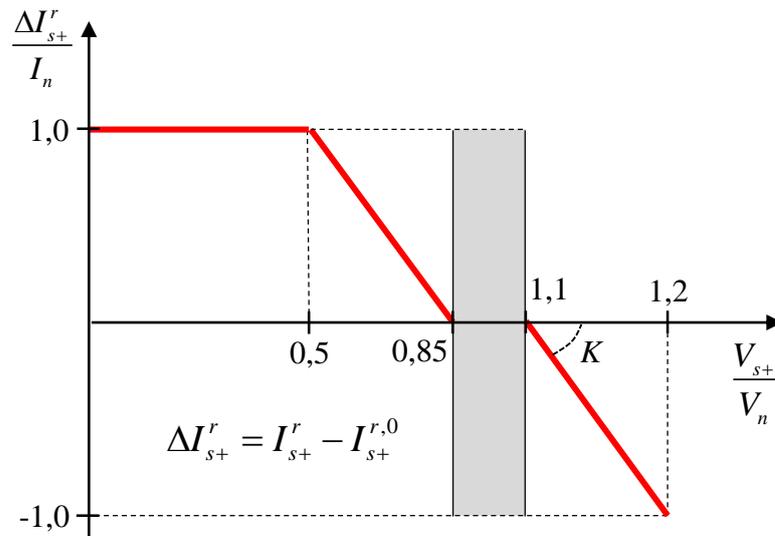
Fonte: Adaptado de (VDE, 2017).

Na Figura 7:

- ΔI_{s+}^r é a corrente reativa adicional de sequência positiva a ser injetada;
- ΔI_{s-}^r é a corrente reativa adicional de sequência negativa a ser injetada;
- ΔV_{s+} é a variação na tensão de fase de sequência positiva;
- ΔV_{s-} é a variação na tensão de fase sequência negativa;
- V_{s+} é a tensão de fase de sequência positiva;
- V_{s-} é a tensão de fase de sequência negativa;
- V_n é a tensão nominal do conversor;
- K é a inclinação da reta;
- V_{1min} é o valor médio da tensão da rede em um intervalo de 1 minuto.

No âmbito nacional, o ONS também estabelece no Submódulo 3.6 que, na ocorrência de variações transitórias de tensão, além de cumprir os requisitos de conexão da Figura 6, os aerogeradores também deverão ser capazes de dar suporte de tensão à rede elétrica através da injeção de corrente reativa adicional, para tensões de sequência positiva inferiores a 85%, e consumo de corrente reativa adicional para tensões superiores a 110% da tensão nominal, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Requisito para suporte de tensão à rede do ONS.



Fonte: Adaptado de (ONS, 2016).

Na Figura 8:

- I_n é a corrente nominal do conversor;
- I_{s+}^r é a corrente reativa de sequência positiva pós-distúrbio;
- $I_{s+}^{r,0}$ é a corrente reativa de sequência positiva pré-distúrbio;

É requerido ainda no código de rede nacional que o suprimento de corrente reativa adicional seja iniciado em até 30 ms após a detecção falta. Além disso, é estabelecido que cabe ao ONS a responsabilidade de instruir a ativação deste recurso e de definir o valor da constante K a ser utilizado em função das características do sistema onde a central geradora será inserida.

2.2.3 Requisitos para tomada de carga

Muitos códigos de rede também incluem requisitos que garantam o rápido restabelecimento das potências ativas e reativas injetadas aos níveis de pré-falta após a eliminação do defeito (TSILI; PAPHATHANASSIOU, 2009). No código de rede alemão, por exemplo, é exigido que a corrente ativa de pré-falta seja restabelecida em até no máximo 1 s após a eliminação do defeito.

No código de rede nacional, por outro lado, é exigido apenas que a central geradora eólica ou fotovoltaica seja dotada de recursos que permitam ajustar a retomada de carga segundo ajustes definidos pelo próprio ONS.

3 CÁLCULO DE CURTOS-CIRCUITOS UTILIZANDO A MATRIZ DE IMPEDÂNCIAS DE BARRA

Os curtos-circuitos são defeitos infrequentes nos sistemas de potências com origem associada a falhas na isolação de equipamentos, a sobretensões causadas por descargas atmosféricas ou chaveamentos, a adversidades climáticas e a outras causas mecânicas.

Quando da ocorrência desses defeitos em sistemas de potências baseados em máquinas síncronas, a magnitude da corrente de falta resultante depende da tensão interna das máquinas síncronas e das impedâncias entre essas máquinas e o ponto de falta. Essa corrente é geralmente muito maior que as corrente de operação do sistema e, se não interrompida, pode causar danos térmicos e mecânicos irreparáveis aos equipamentos.

Neste contexto, a análise de faltas constitui uma parte importante do estudo dos sistemas de potências, pois as informações ganhas com essa análise permitem, entre outros assuntos, a determinação: da capacidade de interrupção de disjuntores e fusíveis; dos ajustes dos relés de proteção e suas coordenações com demais dispositivos de proteção; da capacidade de suportabilidade térmica e mecânica dos equipamentos; e da malha de aterramento.

Neste capítulo, um método de análise de faltas em componentes simétricas baseado na matriz de impedâncias de barra é apresentado e discutido. Inicialmente, será apresentado os princípios básicos e hipóteses simplificadoras do método e, em seguida, será demonstrado a formulação da matricial de faltas e sua aplicação para análise geral de faltas *shunt*.

3.1 Princípios básicos e hipóteses simplificadoras

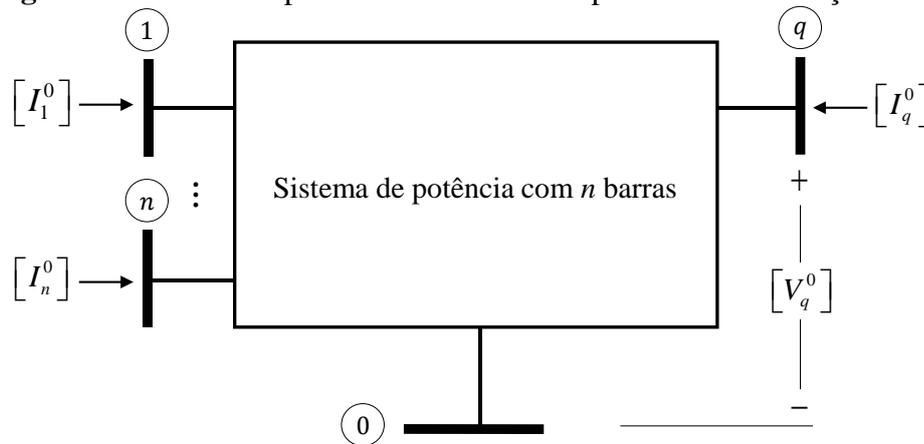
Na formulação do método apresentado a seguir serão adotadas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- As máquinas síncronas são representadas por fontes de tensão constantes atrás de suas reatâncias subtransitórias de eixo direto, X_d'' , e operam à vazio no instante de pré-falta;
- Os transformadores operam no tape nominal e são desprezados os ramos de magnetização e desfasamentos angulares;
- As linhas de transmissão são representadas por suas impedâncias série equivalentes e as admitâncias *shunt* são desprezadas;
- A impedâncias de todas as cargas não rotativas são desprezadas;

- A rede de sequência negativa é considerada idêntica à rede de sequência positiva;
- O sistema opera inicialmente com tensões e correntes simétricas.

Com as ponderações descritas, considere o sistema de potência trifásico com n barras apresentado na Figura 9, onde $[I_q^0]$ e $[V_q^0]$ representam os vetores de correntes injetadas e tensões de pré-falta na q -ésima barra do sistema respectivamente.

Figura 9 - Sistema de potência com n barras operando sob condições de pré-falta.



Fonte: Autoria própria (2019).

Na condição de pré-falta, as tensões e correntes injetadas nas barras relacionam-se por:

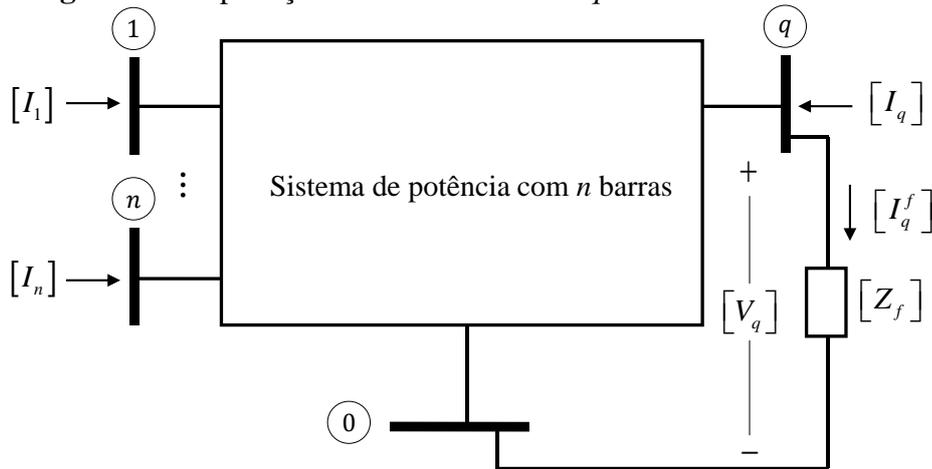
$$[V^0] = [Z_{BAR}] [I^0] \quad (2)$$

Onde:

- $[V^0]$ – é o vetor de tensões nas barras de pré-falta;
- $[I^0]$ – é o vetor de correntes injetadas nas barras de pré-falta;
- $[Z_{BAR}]$ – é matriz de impedâncias de barra do sistema.

Quando uma falta *shunt* é aplicada na q -ésima barra do sistema da Figura 9, as mudanças estruturais provocadas na rede alteram o estado das tensões e correntes injetadas nas barras nas quantidades $[\Delta V]$ e $[\Delta I]$ respectivamente. A Figura 10 ilustra a ocorrência de um defeito *shunt* através de uma impedância de falta $[Z_f]$ e as grandezas de pós-faltas do sistema.

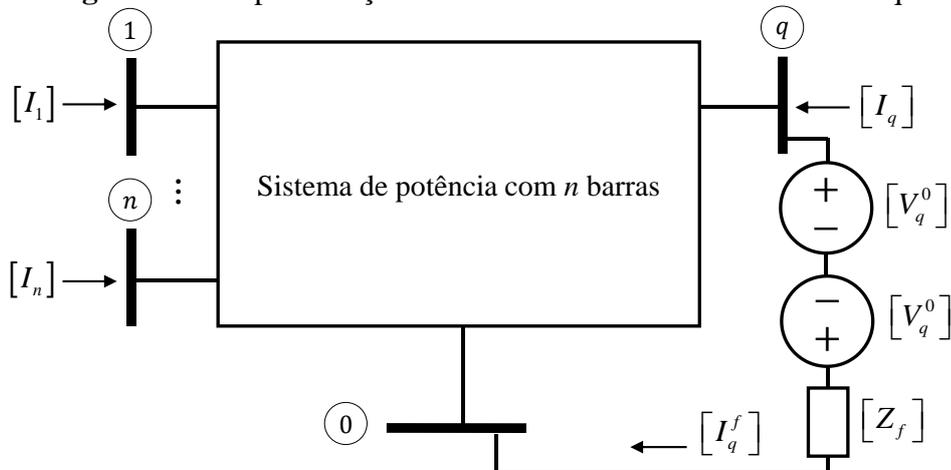
Figura 10 – Aplicação de defeito *shunt* na q -ésima barra do sistema.



Fonte: Autoria própria (2019).

O defeito *shunt* do circuito da Figura 10 pode ainda ser representado por duas fontes de tensão opostas com fasores iguais à tensão de pré-falta da barra q , conforme apresentado na Figura 11.

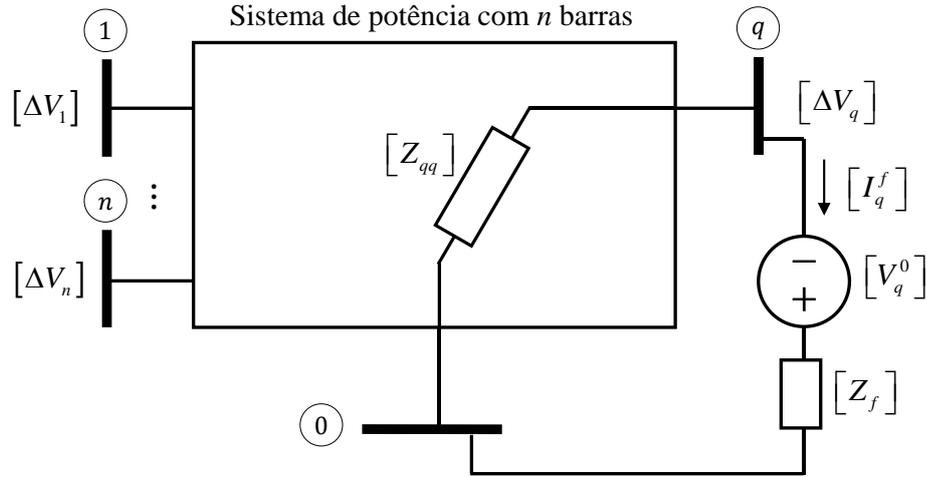
Figura 11 – Representação alternativa do defeito shunt na barra q .



Fonte: Autoria própria (2019).

Aplicando-se o Teorema do Superposição ao circuito da Figura 11 dois novos circuitos podem ser obtidos. No primeiro, a fonte de tensão com polaridade oposta é curto-circuitada, resultando em um circuito semelhante ao apresentado na Figura 9 e que pode ser descrito pela Equação (2). No segundo, todas as fontes de tensão do sistema são curto-circuitadas, exceto a fonte com polaridade oposta, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Determinação da corrente de falta a partir das condições de pré-falta.



Fonte: Autoria própria (2019).

Visto que $[V_q^0]$ é única fonte de tensão no circuito da Figura 12, a corrente de falta $[I_q^f]$ é definida unicamente por:

$$[I_q^f] = \left([Z_{qq}] + [Z_f] \right)^{-1} [V_q^0] \quad (3)$$

Onde $[Z_{qq}]$ é o elemento (q, q) da matriz de impedâncias de barra e corresponde à impedância equivalente de Thévenin tomada entre a barra q e a barra de referência.

Além disso, conforme ilustrado na Figura 12, a única fonte de injeção de corrente passível de introduzir mudanças nas tensões das barras do sistema é $-[I_q^f]$, logo:

$$\begin{bmatrix} [\Delta V_1] \\ \vdots \\ [\Delta V_q] \\ \vdots \\ [\Delta V_n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{11}] & \cdots & [Z_{1q}] & \cdots & [Z_{1n}] \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [Z_{q1}] & \cdots & [Z_{qq}] & \cdots & [Z_{qn}] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [Z_{n1}] & \cdots & [Z_{nq}] & \cdots & [Z_{nn}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [0] \\ \vdots \\ [-I_q^f] \\ \vdots \\ [0] \end{bmatrix} \quad (4)$$

Ou, de forma compacta:

$$[\Delta V] = [Z_{BAR}] [\Delta I] \quad (5)$$

Onde:

$$[\Delta V] = \begin{bmatrix} [0] \\ \vdots \\ -[I_q^f] \\ \vdots \\ [0] \end{bmatrix} \quad (6)$$

Portanto, pela equação de superposição, o vetor de tensões de pós-falta, $[V]$, é dado por:

$$[V] = [V^0] + [\Delta V] \quad (7)$$

Conhecendo as tensões de pós-falta nas barras, pode-se determinar as correntes de contribuição para a falta em todas as linhas do sistema. Para uma linha conectada entre as barras i e k através de uma impedância $[Z_{ik}]$, a contribuição para a corrente de falta, assumindo o sentido positivo $i \rightarrow k$, é dada por:

$$[I_{ik}^f] = [Z_{ik}]^{-1} ([V_i] - [V_k]) \quad (8)$$

Como demonstrado, a determinação da corrente de defeito requer apenas o conhecimento das tensões de pré-falta e da matriz de impedâncias de barra que representa o sistema, ambas de fácil obtenção. O estado inicial do sistema pode ser estimado a partir do estudo de fluxo de potências, enquanto a matriz de impedâncias de barra pode ser obtida a partir da inversão da matriz de admitâncias de barra ou a partir de algoritmos de montagem direta.

Acrescenta-se ainda que o método descrito é genérico e independe do domínio escolhido para modelagem dos componentes do sistema. Todavia, a escolha pelo domínio das componentes simétricas fornece grande simplicidade na modelagem dos componentes do sistema e análise de faltas assimétricas em sistemas trifásicos mediante o desacoplamento do sistema em três redes de sequência equilibradas e independentes entre si. Posto isso, será utilizado a modelagem no domínio das componentes simétricas neste trabalho.

A seguir o método geral de análise de faltas apresentado nesta seção será reformulado para o domínio das componentes simétricas e, posteriormente, será demonstrado a formulação matricial adotada para representação de faltas *shunt* neste domínio.

3.2 Análise matricial de faltas no domínio das componentes simétricas

Para estabelecer uma notação, as tensões e correntes de pré-falta no domínio das componentes de seqüências serão denotadas utilizando-se o subscrito s , isto é:

$$[V_s^0] = \begin{bmatrix} [V_{1,s}^0] \\ \vdots \\ [V_{q,s}^0] \\ \vdots \\ [V_{n,s}^0] \end{bmatrix}; \quad [I_s^0] = \begin{bmatrix} [I_{1,s}^0] \\ \vdots \\ [I_{q,s}^0] \\ \vdots \\ [I_{n,s}^0] \end{bmatrix}$$

Onde, para a q -ésima barra, as tensão e correntes de pré-falta serão respectivamente:

$$[V_{q,s}^0] = \begin{bmatrix} V_{q,s0}^0 \\ V_{q,s+}^0 \\ V_{q,s-}^0 \end{bmatrix}; \quad [I_{q,s}^0] = \begin{bmatrix} I_{q,s0}^0 \\ I_{q,s+}^0 \\ I_{q,s-}^0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Na Equação (9), os subscritos $s+$, $s-$ e $s0$ representam, respectivamente, as componentes de seqüência positiva, negativa e zero. Para referências às correntes de pós-falta na barra defeituosa o sobescrito 0 será substituído por f .

A matriz de impedâncias de barra será denotada por:

$$[Z_{BAR}^s] = \begin{bmatrix} [Z_{11}^s] & \cdots & [Z_{1q}^s] & \cdots & [Z_{1n}^s] \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [Z_{q1}^s] & \cdots & [Z_{qq}^s] & \cdots & [Z_{qn}^s] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [Z_{n1}^s] & \cdots & [Z_{nq}^s] & \cdots & [Z_{nn}^s] \end{bmatrix} \quad (10)$$

Onde os elementos da diagonal principal e fora da diagonal principal serão representados respectivamente por:

$$[Z_{ii}^s] = \begin{bmatrix} Z_{ii}^{s0} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{ii}^{s+} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{ii}^{s-} \end{bmatrix}; \quad [Z_{ik}^s] = \begin{bmatrix} Z_{ik}^{s0} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{ik}^{s+} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{ik}^{s-} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Os elementos nulos na Equação (11) constituem o caso particular em que impedâncias mútuas entre as redes de seqüência são nulas, ou seja, não há acoplamento entre as redes de seqüência zero, positiva e negativa. Esta condição é verificada sempre que, no domínio das componentes de fase, as impedâncias próprias de determinado elemento do sistema são iguais

e suas impedâncias mútuas são nulas ou iguais. São exemplos de componentes do sistema que satisfazem essa condição:

- Linhas de transmissão cujas distância médias geométricas entre condutores são iguais;
- Linhas de transmissão transpostas;
- Bancos trifásicos de transformadores monofásicos;
- Máquinas rotativas em geral.

Por outro lado, linhas de distribuição e transformadores trifásicos são exemplos de componentes do sistema que não atendem à condição supracitada, uma vez que suas impedâncias mútuas não são iguais. Nestes casos, é comum negligenciar esses termos ou substituí-los por valores médios, prática que não acarreta em prejuízos à precisão da análise de faltas.

Estabelecida a notação e as considerações para montagem de $[Z_{BAR}^s]$, as Equações (3), (5), (6), (7) e (8) podem ser reescritas para análise de faltas em componentes simétricas respectivamente por:

$$[I_{q,s}^f] = \left([Z_{qq}^s] + [Z_f^s] \right)^{-1} [V_{q,s}^0] \quad (12)$$

$$[\Delta V_s] = [Z_{BAR}^s] [\Delta I_s] \quad (13)$$

$$[\Delta I_s] = \begin{bmatrix} [0] \\ \vdots \\ -[I_{q,s}^f] \\ \vdots \\ [0] \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$[V_s] = [V_s^0] + [\Delta V_s] \quad (15)$$

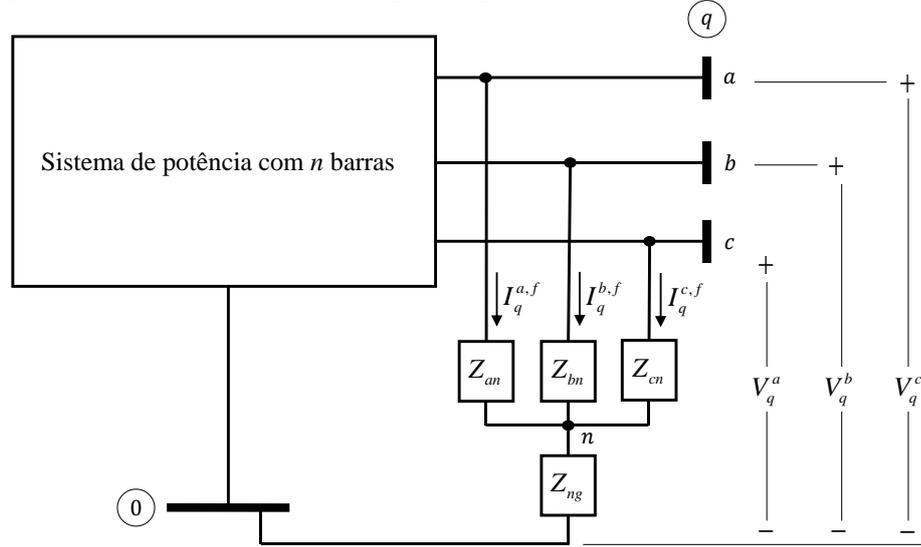
$$[I_{ik,s}^f] = [Z_{ik}^s]^{-1} \left([V_{i,s}] - [V_{k,s}] \right) \quad (16)$$

Na Equação (12), $[Z_f^s]$ representa a matriz de impedâncias de falta, cuja metodologia de montagem será demonstrada na seção a seguir.

3.3 Representação matricial das faltas shunt

Para representação de faltas *shunt* no domínio das componentes de fase, pode-se utilizar um conjunto de impedâncias ligadas em estrela e aterradas através de uma impedância Z_{ng} , conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Circuito em estrela para representação de faltas *shunt* na barra q .



Fonte: Autoria própria (2019).

Por análise de malhas, verifica-se que as tensões e correntes de pós-falta relacionam-se por:

$$\begin{bmatrix} V_q^a \\ V_q^b \\ V_q^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{an} + Z_{ng} & Z_{ng} & Z_{ng} \\ Z_{ng} & Z_{bn} + Z_{ng} & Z_{ng} \\ Z_{ng} & Z_{ng} & Z_{cn} + Z_{ng} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_q^{af} \\ I_q^{bf} \\ I_q^{cf} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Onde:

- V_q^i – é a tensão de pós-falta na i -ésima fase da barra q ;
- $I_q^{i,f}$ – é a corrente de pós-falta na i -ésima fase da barra q ;
- Z_{in} – é a impedância de falta entre i -ésima fase da barra q e o ponto n ;
- Z_{ng} – é a impedância de falta entre o ponto n e a barra de referência.

Na forma compacta, a Equação (17) pode ser reescrita como:

$$[V_q] = [Z_f][I_q^f] \quad (18)$$

Onde $[Z_f]$ é a matriz de impedâncias de falta dada por:

$$[Z_f] = \begin{bmatrix} Z_{an} + Z_{ng} & Z_{ng} & Z_{ng} \\ Z_{ng} & Z_{bn} + Z_{ng} & Z_{ng} \\ Z_{ng} & Z_{ng} & Z_{cn} + Z_{ng} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Por meio da Equação (19) qualquer tipo de falta *shunt* pode ser representada no domínio das componentes de fase. Para uma falta fase à terra, por exemplo, deve-se utilizar $Z_{an} = Z_f$, $Z_{bn} = \infty$, $Z_{cn} = \infty$ e $Z_{ng} = 0$.

No domínio das componentes de sequência, $[Z_f^s]$ é dada por:

$$[Z_f^s] = [T]^{-1} [Z_f] [T] \quad (20)$$

Onde $[T]$ é a matriz de transformação de Fortescue, definida por:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Na Equação (21), α é o operador unitário de rotação que gira os fasores em transformação em 120 graus no sentido anti-horário, isto é, $\alpha = 1 \angle 120^\circ$.

Expandindo-se a Equação (20), obtém-se:

$$[Z_f^s] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_{an} + Z_{bn} + Z_{cn} + 9Z_{ng} & Z_{an} + \alpha^2 Z_{bn} + \alpha Z_{cn} & Z_{an} + \alpha Z_{bn} + \alpha^2 Z_{cn} \\ Z_{an} + \alpha Z_{bn} + \alpha^2 Z_{cn} & Z_{an} + Z_{bn} + Z_{cn} & Z_{an} + \alpha^2 Z_{bn} + \alpha Z_{cn} \\ Z_{an} + \alpha^2 Z_{bn} + \alpha Z_{cn} & Z_{an} + \alpha Z_{bn} + \alpha^2 Z_{cn} & Z_{an} + Z_{bn} + Z_{cn} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Como ilustrado para o caso da falta fase à terra, algumas impedâncias devem ser infinitas para determinados tipos de falta. Em simulações computacionais no sistema por unidade, os valores infinitos podem ser representados por valores $\gg 1$, como da ordem de 10^{12} por exemplo. Uma alternativa a essa abordagem é utilizar a inversa de $[Z_f^s]$ para obter a seguinte matriz de admitâncias de falta:

$$[Y_f^s] = \frac{1}{3(Y_I + Y_{ng})} \begin{bmatrix} Y_{ng} Y_I & Y_{ng} Y_{III} & Y_{ng} Y_V \\ Y_{ng} Y_V & Y_{ng} Y_I + 3Y_{II} & Y_{ng} Y_{III} - 3Y_{IV} \\ Y_{ng} Y_{III} & Y_{ng} Y_V - 3Y_{VI} & Y_{ng} Y_I + 3Y_{II} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Onde:

$$Y_I = Y_{an} + Y_{bn} + Y_{cn} \quad (24)$$

$$Y_{II} = Y_{an} Y_{bn} + Y_{bn} Y_{cn} + Y_{an} Y_{cn} \quad (25)$$

$$Y_{III} = Y_{an} + \alpha^2 Y_{bn} + \alpha Y_{cn} \quad (26)$$

$$Y_{IV} = Y_{bn}Y_{cn} + \alpha Y_{an}Y_{bn} + \alpha^2 Y_{an}Y_{cn} \quad (27)$$

$$Y_V = Y_{an} + \alpha Y_{bn} + \alpha^2 Y_{cn} \quad (28)$$

$$Y_{VI} = Y_{bn}Y_{cn} + \alpha^2 Y_{an}Y_{bn} + \alpha Y_{an}Y_{cn} \quad (29)$$

$$Y_{ng} = \frac{1}{Z_{ng}}; \quad Y_{an} = \frac{1}{Z_{an}}; \quad Y_{bn} = \frac{1}{Z_{bn}}; \quad Y_{cn} = \frac{1}{Z_{cn}} \quad (30)$$

A utilização de $[Y_f^s]$ permite que valores infinitos possam ser representados diretamente como zeros. Em contrapartida, é necessário a dedução de uma nova equação para o cálculo das correntes de falta em função de $[Y_f^s]$ e $[V_{q,s}^0]$.

Por meio da Figura 13, verifica-se que $[Y_f^s]$ relaciona-se com $[I_{q,s}^f]$ por:

$$[I_{q,s}^f] = [Y_f^s][V_{q,s}] \quad (31)$$

A substituição da Equação (31) na Equação (15) fornece para a barra q :

$$[V_{q,s}] = [V_{q,s}^0] - [Z_{qq}^s][Y_f^s][V_{q,s}] \quad (32)$$

Solucionando-se a Equação (32) para $[V_{q,s}]$, obtém-se:

$$[V_{q,s}] = ([U] + [Z_{qq}^s][Y_f^s])^{-1} [V_q^0] \quad (33)$$

Onde $[U]$ é a matriz identidade.

Por fim, a substituição da Equação (33) na Equação (31) resulta na relação desejada para $[I_{q,s}^f]$:

$$[I_{q,s}^f] = [Y_f^s]([U] + [Z_{qq}^s][Y_f^s])^{-1} [V_q^0] \quad (34)$$

A seguir será demonstrado a representação matricial dos principais tipos de faltas *shunt* e as equações finais simplificadas para o cálculo de $[I_{q,s}^f]$. Também serão propostas representações numéricas para análise de faltas numa abordagem matricial generalizada.

3.3.1 Falta trifásica (FFF)

Uma falta trifásica através de uma impedância Z por fase pode ser representada fazendo-se $Z_{an} = Z_{bn} = Z_{cn} = Z$ e $Z_{ng} = \infty$ em $[Z_f^s]$, resultando em:

$$\left[Z_f^s \right] = \begin{bmatrix} Z + 3a & 0 & 0 \\ 0 & Z & 0 \\ 0 & 0 & Z \end{bmatrix}_{a \rightarrow \infty} \quad (35)$$

Pela substituição da Equação (35) na Equação (12), obtém-se:

$$\left[I_{q,s}^f \right] = \begin{bmatrix} I_{q,s0}^f \\ I_{q,s+}^f \\ I_{q,s-}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{qq}^{s0} + Z + 3a & 0 & 0 \\ 0 & Z_{qq}^{s+} + Z & 0 \\ 0 & 0 & Z_{qq}^{s-} + Z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ V_{q,s+}^0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_{q,s+}^0}{Z_{qq}^{s+} + Z} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Uma vez que:

$$\lim_{a \rightarrow \infty} \frac{1}{Z_{qq}^{s0} + Z + 3a} = 0 \quad (37)$$

O valor infinito de Z_{ng} também pode ser representado numericamente numa abordagem geral fazendo-se $Z_{ng} \gg 1$, como da ordem de 10^{12} por exemplo.

3.3.2 Falta trifásica envolvendo a terra (FFF-T)

Uma falta trifásica envolvendo a terra através de uma impedância Z pode ser representada fazendo-se $Z_{an} = Z_{bn} = Z_{cn} = Z$ e $Z_{ng} = 0$ em $\left[Z_f^s \right]$, resultando em:

$$\left[Z_f^s \right] = \begin{bmatrix} Z & 0 & 0 \\ 0 & Z & 0 \\ 0 & 0 & Z \end{bmatrix} \quad (38)$$

Pela substituição da Equação (38) na Equação (12), obtém-se:

$$\left[I_{q,s}^f \right] = \begin{bmatrix} I_{q,s0}^f \\ I_{q,s+}^f \\ I_{q,s-}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{qq}^{s0} + Z & 0 & 0 \\ 0 & Z_{qq}^{s+} + Z & 0 \\ 0 & 0 & Z_{qq}^{s-} + Z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ V_{q,s+}^0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_{q,s+}^0}{Z_{qq}^{s+} + Z} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (39)$$

A comparação da Equação (39) com a Equação (39) demonstra que a corrente de falta para os defeitos trifásico e trifásico envolvendo a terra são iguais para o mesmo valor de Z .

3.3.3 Falta bifásica (FF)

Uma falta bifásica entre as fases b e c por meio de uma impedância de falta $Z/2$ por fase pode ser representada fazendo-se $Y_{an} = 0$, $Y_{bn} = Y_{cn} = 2/Z$ e $Y_{ng} = 0$ em $[Y_f^s]$, resultando em:

$$[Y_f^s] = \frac{1}{Z} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & -1 \\ 0 & -1 & +1 \end{bmatrix} \quad (40)$$

Pela substituição da Equação (40) na Equação (34), obtém-se:

$$[I_{q,s}^f] = \frac{1}{Z} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & -1 \\ 0 & -1 & +1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{qq}^{s0} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{qq}^{s+} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{qq}^{s-} \end{bmatrix} \frac{1}{Z} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & -1 \\ 0 & -1 & +1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ V_{q,s+}^0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[I_{q,s}^f] = \begin{bmatrix} I_{q,s0}^f \\ I_{q,s+}^f \\ I_{q,s-}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_{q,s+}^0}{Z_{qq}^{s+} + Z_{qq}^{s-} + Z} \\ -\frac{V_{q,s+}^0}{Z_{qq}^{s+} + Z_{qq}^{s-} + Z} \end{bmatrix} \quad (41)$$

Para o caso de faltas francas, ou seja, com $Z = 0$, a representação numérica para uma abordagem geral pode ser feita fazendo-se $Z \ll 1$, como da ordem de 10^{-12} por exemplo.

3.3.4 Falta bifásica envolvendo a terra (FF-T)

Uma falta bifásica entre as fases b e c por meio de uma impedância de falta Z por fase e impedância de terra Z_g pode ser representada fazendo-se $Y_{an} = 0$, $Y_{bn} = Y_{cn} = 1/Z$ e $Y_{ng} = 1/Z_g$ em $[Y_f^s]$, resultando em:

$$[Y_f^s] = \frac{1}{3Z(Z + 2Z_g)} \begin{bmatrix} 2Z & -Z & -Z \\ -Z & 2Z + 3Z_g & -(Z + 3Z_g) \\ -Z & -(Z + 3Z_g) & 2Z + 3Z_g \end{bmatrix} \quad (42)$$

Pela substituição da Equação (42) na Equação (34), obtém-se:

$$\begin{bmatrix} I_{q,s}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{q,s0}^f \\ I_{q,s+}^f \\ I_{q,s-}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(Z_{qq}^{s-} + Z)V_{q,s+}^0}{H} \\ \frac{(3Z_g + Z_{qq}^{s-} + Z_{qq}^{s0} + 2Z)V_{q,s+}^0}{H} \\ -\frac{(3Z_g + Z_{qq}^{s0} + Z)V_{q,s+}^0}{H} \end{bmatrix} \quad (43)$$

Onde $H = 3Z_g(Z_{qq}^{s-} + Z_{qq}^{s+} + 2Z) + Z_{qq}^{s-}(Z_{qq}^{s+} + Z_{qq}^{s0} + 2Z) + Z_{qq}^{s+}(Z_{qq}^{s0} + 2Z) + Z(2Z_{qq}^{s0} + 3Z)$.

Caso a falta seja com $Z_{ng} = 0$, $[Y_f^s]$ é simplificada para:

$$[Y_f^s] = \frac{1}{Z} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \quad (44)$$

E resulta, pela Equação (34), em:

$$\begin{bmatrix} I_{q,s}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{q,s0}^f \\ I_{q,s+}^f \\ I_{q,s-}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(3Z_{qq}^{s-} + Z)V_{q,s+}^0}{H'} \\ \frac{(3Z_{qq}^{s-} + 3Z_{qq}^{s0} + 2Z)V_{q,s+}^0}{H'} \\ -\frac{(3Z_{qq}^{s0} + Z)V_{q,s+}^0}{H'} \end{bmatrix} \quad (45)$$

Onde $H' = Z_{qq}^{s-}(3Z_{qq}^{s+} + 3Z_{qq}^{s0} + 2Z) + Z_{qq}^{s+}(3Z_{qq}^{s0} + 2Z) + Z(2Z_{qq}^{s0} + Z)$.

Caso a falta seja franca, ou seja, com $Z_{ng} = Z = 0$, $[I_{q,s}^f]$ é simplificada para:

$$\begin{bmatrix} I_{q,s}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{q,s0}^f \\ I_{q,s+}^f \\ I_{q,s-}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{Z_{qq}^{s-}V_{q,s+}^0}{Z_{qq}^{s-}(Z_{qq}^{s+} + Z_{qq}^{s0}) + Z_{qq}^{s0}Z_{qq}^{s+}} \\ \frac{(Z_{qq}^{s-} + Z_{qq}^{s0})V_{q,s+}^0}{Z_{qq}^{s-}(Z_{qq}^{s+} + Z_{qq}^{s0}) + Z_{qq}^{s0}Z_{qq}^{s+}} \\ -\frac{Z_{qq}^{s0}V_{q,s+}^0}{Z_{qq}^{s-}(Z_{qq}^{s+} + Z_{qq}^{s0}) + Z_{qq}^{s0}Z_{qq}^{s+}} \end{bmatrix} \quad (46)$$

Os valores iguais a zero de Z_{ng} e Z também podem ser representados numericamente para uma abordagem geral fazendo-se $Z_{ng} = Z \ll 1$, como da ordem de 10^{-12} por exemplo.

3.3.5 Falta fase à terra (F-T)

Uma falta à terra envolvendo a fase a por meio de uma impedância de falta Z_g pode ser representada fazendo-se $Y_{an} = 1/Z$, $Y_{bn} = Y_{cn} = 0$ e $Y_{ng} = 0$ em $[Y_f^s]$, resultando em:

$$[Y_f^s] = \frac{1}{Z} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (47)$$

Pela substituição da Equação (47) na Equação (34), obtém-se:

$$[I_{q,s}^f] = \frac{1}{Z} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{qq}^{s0} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{qq}^{s+} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{qq}^{s-} \end{bmatrix} \frac{1}{Z} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ V_{q,s+}^0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[I_{q,s}^f] = \begin{bmatrix} I_{q,s0}^f \\ I_{q,s+}^f \\ I_{q,s-}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_{q,s+}^0}{Z_{qq}^{s+} + Z_{qq}^{s-} + Z_{qq}^{s0} + 3Z} \\ \frac{V_{q,s+}^0}{Z_{qq}^{s+} + Z_{qq}^{s-} + Z_{qq}^{s0} + 3Z} \\ \frac{V_{q,s+}^0}{Z_{qq}^{s+} + Z_{qq}^{s-} + Z_{qq}^{s0} + 3Z} \end{bmatrix} \quad (48)$$

Para o caso de faltas francas, ou seja, com $Z_{an} = 0$, a representação numérica para uma abordagem geral pode ser feita fazendo-se $Z \ll 1$, como da ordem de 10^{-12} por exemplo.

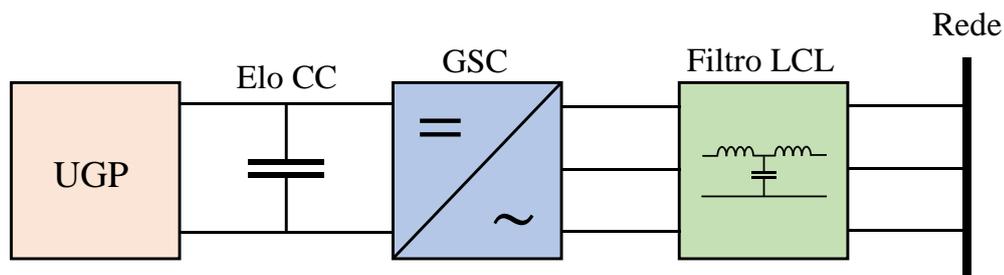
4 TÉCNICA PROPOSTA PARA ANÁLISE DE FALTAS

Neste capítulo, será apresentado a técnica proposta para estimativa da corrente de contribuição de unidades de geração distribuída acopladas à rede através de conversores de frequência. Inicialmente será descrita a modelagem utilizada para representação do comportamento controlado da corrente de contribuição do conversor para diferentes estratégias de controle e, em seguida, será apresentado o algoritmo proposto para análise de faltas *shunt* baseado na matriz de impedâncias de barra.

4.1 Modelagem dos conversores de frequências

A Figura 14 apresenta os principais componentes de uma UGDCF típica. A unidade de geração de potência (UGP) da UGDCF produz a potência CC entregue ao elo CC por meio de fontes como células a combustível, turbinas eólicas ou geradores fotovoltaicos. Conforme discutido no Capítulo 2, a conversão de potência na UGP pode ser feita por meio de um conversor CC/CC (*buck-boost*) ou um conversor CA/CC (retificador de onda completa) a depender da fonte de geração. Nesta unidade, o principal objetivo do sistema controle é maximizar a extração de potência da fonte (ABDALRAHMAN; ZEKRY; ALSHAZLY, 2012).

Figura 14 – Principais componentes de uma UGDCF.



Fonte: Autoria própria (2019).

A tensão CC do elo é aplicada ao conversor CC/CA do lado do lado da rede ou, em inglês, *Grid Side Converter - GSC*, a qual é encarregado do controle das potências ativa e reativa de saída e sincronização com a rede. À saída do GSC é acoplado um filtro LCL ou L para redução do conteúdo harmônico.

O elo CC confere ao GSC a capacidade de controlar as potências de saída de maneira independente da potência de entrada na UGP (IEEE, 2015). Em outras palavras, a saída elétrica do UGDCF é completamente definida pelo *hardware* e *firmware* empregado no GSC.

Sob condições de falta, a corrente de contribuição da UGDCF é dependente da estratégia de controle aplicada ao GSC antes da falta e dos requisitos de FRT exigidos pelo operador do sistema. Ao contrário dos geradores síncronos cuja corrente de contribuição pode ultrapassar 10 pu (PLET et al., 2010) e possui comportamento descrito a partir de três períodos de tempo bem definidos — denominados subtransitório, transitório e permanente —, as UGDCFs são limitadas a correntes de pico de até 3 pu (WALLING; GURSOY; ENGLISH, 2012) descritas por apenas dois períodos: os instantes que precedem a detecção da falta, e o período subsequente à detecção da falta (IEEE, 2015).

A falta é detectada pelo sistema de controle do GSC em 1 a 2 ciclos (IEEE, 2015). Durante esse período, ou seja, entre a ocorrência do defeito e sua identificação pelo conversor, a corrente de saída da unidade é definida pela estratégia de controle de regime permanente adotada pelo GSC. Em turbinas eólicas tipo IV é comum o uso dos modos de controle VC, FPC e QC. Já em UGDCFs baseadas em geradores fotovoltaicos é comum a injeção constante da potência ativa disponibilizada pelo MPPT. A manutenção da estratégia de controle de pré-falta antes da detecção da falta pelo conversor é possível em função do capacitor presente no elo CC manter a entrada CC do GSC aproximadamente constante durante curtos transientes (BARAN; EL-MARKABY, 2005).

Após a detecção da falta, os requisitos de FRT implementados no conversor são aplicados. Neste período, é exigido em muitos códigos de rede, incluindo o brasileiro, que a UGDCF permaneça conectada ao PCC e forneça suporte à tensão de sequência positiva mediante a injeção de quantidades pré-determinadas de correntes reativas de sequência positiva. Durante o suporte à tensão, a injeção de corrente reativa de sequência positiva é prioritária à injeção de correntes ativas de sequência positiva. Desse modo, a corrente ativa pode variar entre zero e seu valor nominal, levando-se em conta a limitação de corrente da unidade (NEUMANN; ERLICH, 2012).

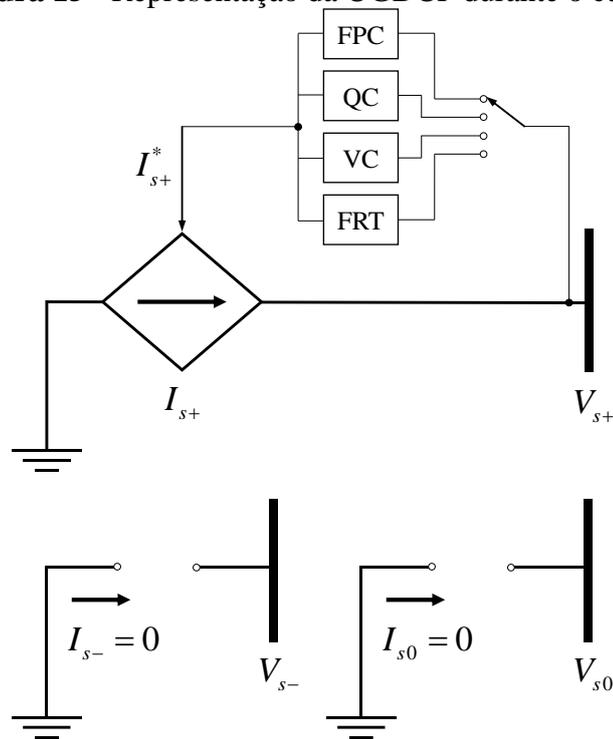
Na Alemanha e Espanha também é previsto em seus códigos de rede a injeção de correntes de sequência negativa durante faltas assimétricas (GÖKSU et al., 2012). No código de rede nacional, também há essa previsão, no entanto, não é proposto nenhum requisito específico para definição do nível de injeção. Na falta de requisitos específicos para injeção de correntes de sequência negativa, o conversor mantém a supressão total dessa componente mesmo para faltas assimétricas (NEUMANN; ERLICH, 2012).

Para o caso de faltas envolvendo a terra, a injeção de correntes de sequência zero também é suprimida pelo GSC (NELSON; MA, 2011). Além disso, as UGDCFs geralmente

são interligadas à rede por meio de transformadores elevadores com conexão delta-estrela, os quais isolam o GSC da rede de sequência zero (GÖKSU et al., 2012), (SANDT et al., 2009).

Com base no comportamento descrito anteriormente, o CFC foi modelado neste trabalho como uma fonte de corrente controlada por tensão que injeta apenas correntes de sequência positiva com magnitudes e ângulos dependentes da estratégia de controle de pré-falta, do modo FRT programado e das especificações máximas do conversor. A Figura 15 ilustra a representação adotada para cada rede de sequência.

Figura 15 - Representação da UGDCF durante o curto-circuito.



Fonte: Autoria própria (2019).

Onde:

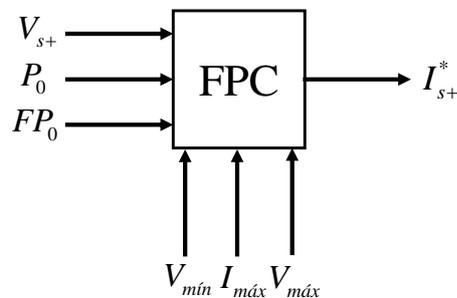
- V_{s+}, V_{s-} e V_{s0} são as tensões terminais de fase do conversor de sequência positiva, negativa e zero respectivamente;
- I_{s+}, I_{s-} e I_{s0} são as correntes de contribuição do conversor de sequência positiva, negativa e zero respectivamente;
- I_{s+}^* – é a corrente de contribuição de sequência positiva desejada pela estratégia de controle do conversor.

A seguir será descrito a metodologia utilizada para estimação da corrente de contribuição de sequência positiva desejada para cada uma das estratégias de controle abordadas neste trabalho.

4.1.1 Modelagem do controle FPC

No modo de controle FPC, a corrente de contribuição da UGDCF deve ser tal que o fator de potência permaneça constante durante toda a faixa de operação do conversor. Para atender a esse critério, propõe-se o modelo apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Modelo fasorial do controle FPC.



Fonte: Autoria própria (2019).

Onde:

- P_0 – é a potência ativa por fase de pré-falta injetada pelo conversor;
- FP_0 – é o fator de potência de pré-falta;
- $I_{máx}$ – é máxima corrente de saída do conversor;
- $V_{mín}$ – é a tensão de fase mínima para permanência em operação;
- $V_{máx}$ – é a tensão de fase máxima para permanência em operação.

No modelo, a corrente de contribuição desejada é definida diretamente por:

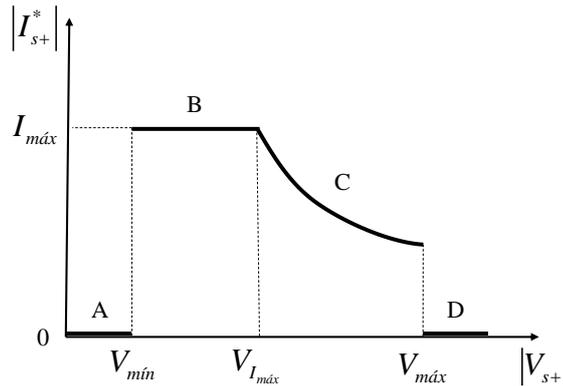
$$I_{s+}^* = \begin{cases} \frac{P_0}{|V_{s+}| FP_0} e^{j(|V_{s+}| - \arccos(FP_0))}; & V_{máx} < |V_{s+}| \leq V_{máx} \\ I_{máx} e^{j(|V_{s+}| - \arccos(FP_0))}; & V_{mín} \leq |V_{s+}| \leq V_{I_{máx}} \\ 0; & |V_{s+}| > V_{máx} \\ 0; & |V_{s+}| < V_{mín} \end{cases} \quad (49)$$

Na Equação (49), $V_{I_{máx}}$ é o módulo de V_{s+} que produz $|I_{s+}^*| = I_{máx}$, ou seja:

$$V_{I_{m\acute{a}x}} = \frac{P_0}{I_{m\acute{a}x} FP_0} \quad (50)$$

A Figura 17 ilustra a característica da magnitude de I_{s+}^* no modelo proposto para o controle FPC.

Figura 17 - Característica do módulo de I_{s+}^* no controle FPC.

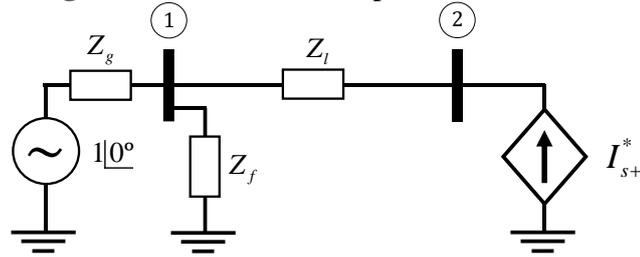


Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 17, os segmentos A e D representam os intervalos de variação de $|V_{s+}|$ em que a UGDCF se encontra fora de seus limites operacionais e, por isso, não contribui para o curto-circuito. No segmento C, a unidade mantém a injeção de potências ativa e reativa constantes e, por conseguinte, o fator de potência constante. Já no segmento B as potências injetadas são reduzidas para atender à limitação imposta à corrente de saída. Neste intervalo a magnitude da corrente de contribuição é fixa em $I_{m\acute{a}x}$ e o ângulo de fase é definido de modo a atender o critério do fator de potência constante.

A fim de ilustrar o desempenho do modelo proposto para o controle FPC, realizou-se um estudo de caso com o sistema de duas barras apresentado na Figura 18. No estudo avaliou-se a resposta do conversor para faltas trifásicas por meio de uma impedância de falta Z_f . Os valores de Z_f foram escolhidos especificamente para obter respostas com as características dos segmentos B e C da Figura 17.

Na Figura 18, as impedâncias Z_g e Z_l valem, respectivamente, $0,05+j0,25$ pu e $0,18+j1,3$ pu nas bases de 230 kV e 100 MVA. Na barra 2 desse sistema, está conectada uma UGDCF que opera no pré-falta com $P_0 = 0,046$ pu e $FP_0 = 0,92$ indutivo, e possui $I_{m\acute{a}x} = 0,15$ pu, $V_{m\acute{a}x} = 1,2$ pu, $V_{m\acute{i}n} = 0,2$ pu e $V_{I_{m\acute{a}x}} = 0,3333$ pu.

Figura 18 - Sistema exemplo de duas barras.

Fonte: Autoria própria (2019).

A não-linearidade do conversor exige um processo iterativo para solução do circuito da Figura 18. A cada iteração desse processo, as tensões de pós-falta nas barras e a corrente de curto-circuito, I_{CC} , são dadas respectivamente por:

$$V_1 = \left(\frac{1}{Z_g} + \frac{1}{Z_f} \right)^{-1} \left(\frac{1}{Z_g} + I_{s+}^* \right) \quad (51)$$

$$V_2 = V_1 + Z_l I_{s+}^* \quad (52)$$

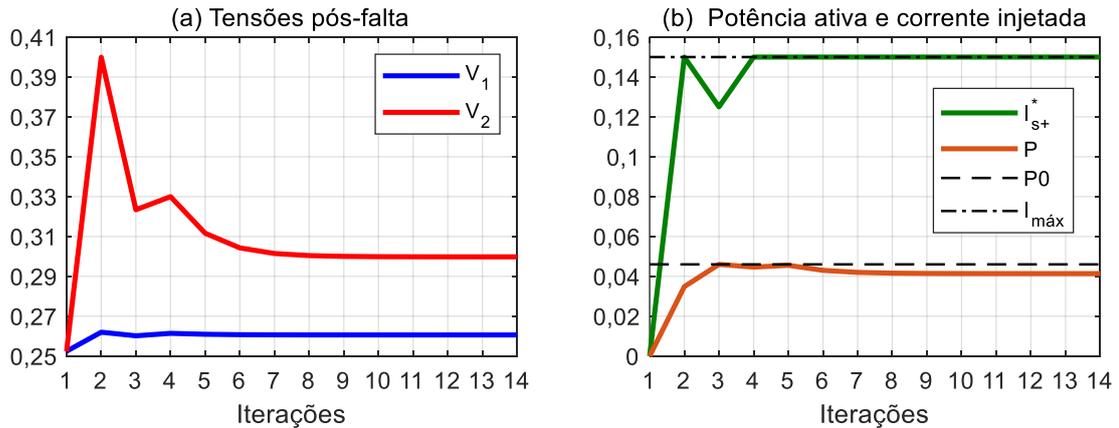
$$I_{CC} = Z_f^{-1} V_1 \quad (53)$$

Para inicialização de I_{s+}^* , pode-se utilizar seu valor de pré-falta obtido através de um estudo de fluxo de potências, ou pode-se considerar que a injeção de corrente inicial é nula, ou seja, $I_{s+}^* = 0$, opção utilizada nesse trabalho. Como critério de convergência, utilizou-se uma tolerância, ε , de 1×10^{-5} para o desvio do módulo e ângulo de I_{s+}^* entre as iterações (i) e ($i-1$).

A Figura 19 apresenta os resultados obtidos para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,07$ pu. Para esse caso, o processo iterativo alcançou convergência em 14 iterações e resultou numa corrente de curto-circuito de $3,7228 \angle -63,2097^\circ$ pu.

Na Figura 19(a) verifica-se que na primeira iteração as tensões nas barras são iguais, visto que $I_{s+}^* = 0$. Nota-se ainda que, à medida que o inversor inicia a injeção de potência, há uma elevação nas tensões das barra 1 e 2, as quais convergem para $0,2606 \angle -63,2097^\circ$ pu e $0,2998 \angle -22,8325^\circ$ pu respectivamente.

Figura 19 – Resultados obtidos em pu para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,07$ pu.

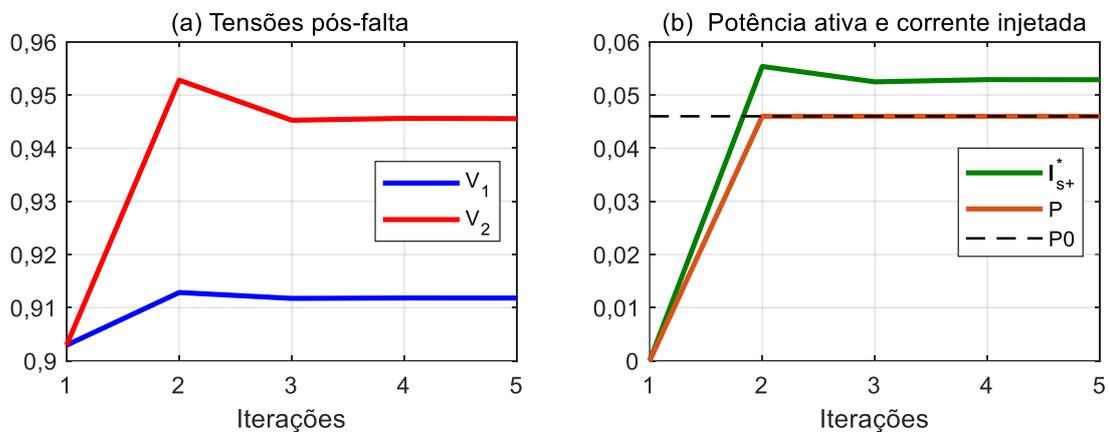


Fonte: Autoria própria (2019).

Já na Figura 19(b), verifica-se que a impedância de falta utilizada é baixa o suficiente para provocar a saturação de corrente de saída do conversor, ou seja, I_{s+}^* é mantido em $I_{máx}$ com o ângulo de fase que garante a manutenção do fator de potência constante. Nessa figura nota-se ainda que o conversor foi incapaz de manter a injeção de potência ativa constante no valor de pré-falta, uma vez que a tensão de pós-falta na barra 2 é inferior a $V_{I_{máx}}$.

Como um segundo caso, a Figura 20 apresenta os resultados obtidos para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,8$ pu. Para esse caso, o processo iterativo alcançou convergência em 5 iterações e resultou numa corrente de curto-circuito de $1,1398 \angle -15,8631^\circ$ pu.

Figura 20 – Resultados obtidos em pu para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,8$ pu.



Fonte: Autoria própria (2019).

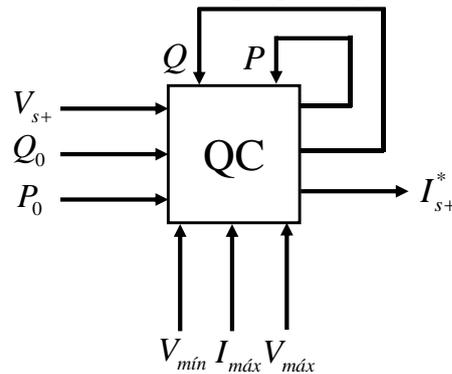
Pela Figura 20(a) verifica-se que, como no primeiro caso, a injeção de potência pelo conversor resulta numa elevação nas tensões das barra 1 e 2, as quais convergem para

0,9118∠-15,8631° pu e 0,9456∠-12,1209° pu respectivamente. Já na Figura 20(b), nota-se que a impedância de falta é suficientemente alta para que I_{s+}^* seja inferior a $I_{máx}$ e o conversor opere no intervalo de tensão que permite a injeção das potências pré-falta.

4.1.2 Modelagem do controle QC

No modo de controle QC a UGDCF fornece ou consome uma quantidade pré-determinada de potência reativa de maneira independente da tensão terminal e da potência ativa gerada na UGP. Para representação desse comportamento, propõe-se o modelo apresentado na Figura 21.

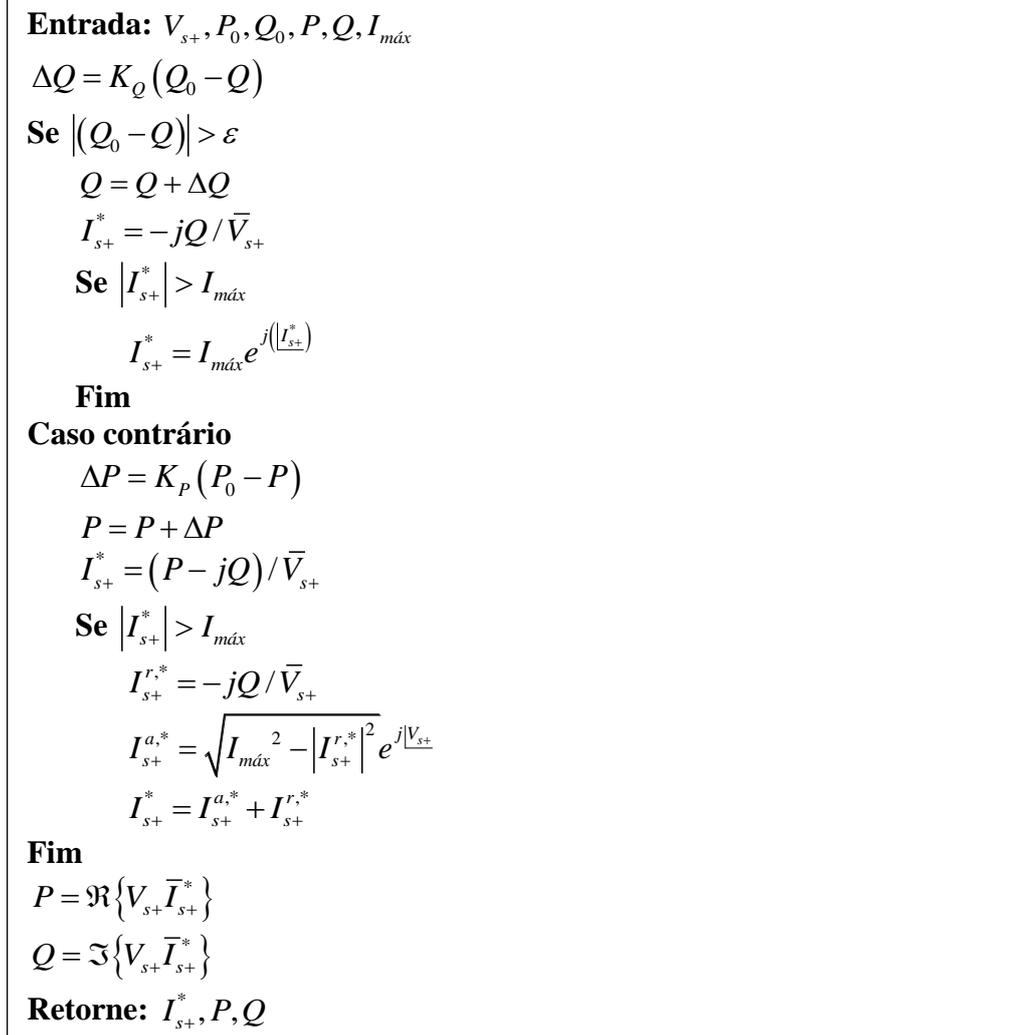
Figura 21 - Modelo fasorial proposto para o controle QC.



Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 21, Q_0 é a potência reativa por fase de pré-falta injetada pelo conversor e P e Q são, respectivamente, as potências ativa e reativas injetadas pelo conversor na iteração $(i-1)$. Na faixa de operação do conversor, ou seja, quando $V_{min} \leq |V_{s+}| \leq V_{máx}$, a corrente de contribuição do inversor é definida de acordo com o algoritmo iterativo apresentado na Figura 22.

No algoritmo proposto, I_{s+}^* é ajustada inicialmente de modo a manter a injeção de potência reativa constante, ou seja, $Q = Q_0$. Caso a magnitude de I_{s+}^* exceda $I_{máx}$, o módulo de I_{s+}^* é fixado em $I_{máx}$ e o ângulo de fase é preservado. Caso o conversor seja capaz de manter a injeção de Q_0 com $I_{s+}^* < I_{máx}$, o algoritmo buscará restaurar a injeção de P_0 respeitando-se a restrição imposta à corrente de saída. Na determinação das quantidades ΔQ e ΔP , K_Q e K_P são constantes reais.

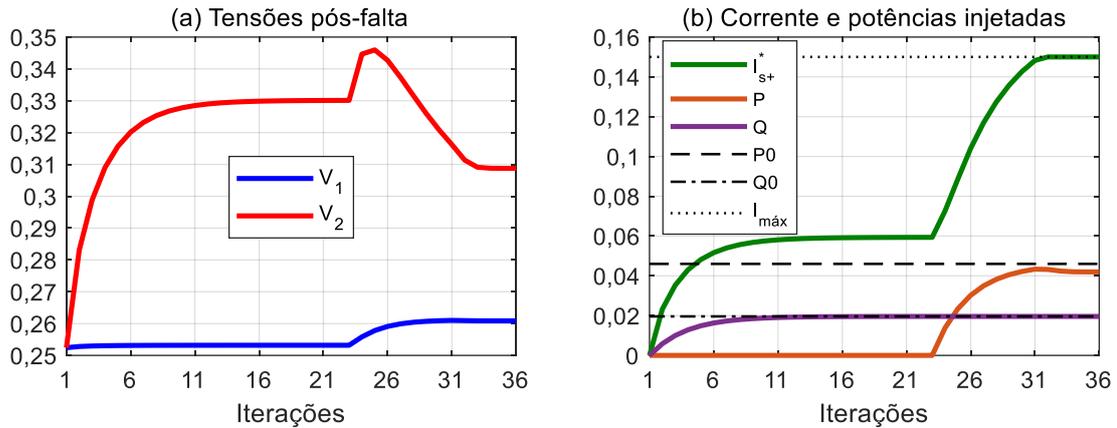
Figura 22 - Algoritmo para determinação da corrente de contribuição no controle QC.

Fonte: Autoria própria (2019).

A fim de ilustrar o desempenho do algoritmo proposto, realizou-se um estudo de caso com o sistema da Figura 18. No estudo de caso, considerou-se para primeira iteração do algoritmo injeção de potência nula, ou seja, $P = Q = 0$, além disso, utilizou-se $K_P = K_Q = 0,3$. Como critério de convergência, utilizou-se uma tolerância de 1×10^{-5} para o desvio do módulo e ângulo de I_{s+}^* entre as iterações (i) e ($i-1$).

A Figura 23 apresenta os resultados obtidos para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,07$ pu. Para esse caso, o processo iterativo alcançou convergência em 36 iterações e resultou numa corrente de curto-circuito de $3,7265 \angle -63,3092^\circ$ pu.

Figura 23 – Resultados obtidos em pu para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,07$ pu.



Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 23(a) verifica-se que a injeção de potência reativa nas primeiras iterações eleva a tensão da barra 2 enquanto a tensão da barra 1 permanece aproximadamente constante. Na iteração 23, quando o controle alcança a potência reativa de referência, Q_0 , é dado início a injeção de potência ativa, conforme ilustrado na Figura 23(b).

A injeção de corrente ativa aumenta o ângulo de I_{s+}^* , que por consequência eleva a tensão sobre Z_f , aumentando V_1 . Em contrapartida, a mudança no ângulo também aumenta defasagem angular entre V_1 e a queda de tensão em Z_l para um ângulo superior à 90° , o que reduz a tensão na barra 2, conforme a Equação (52) e ilustrado na Figura 23(a).

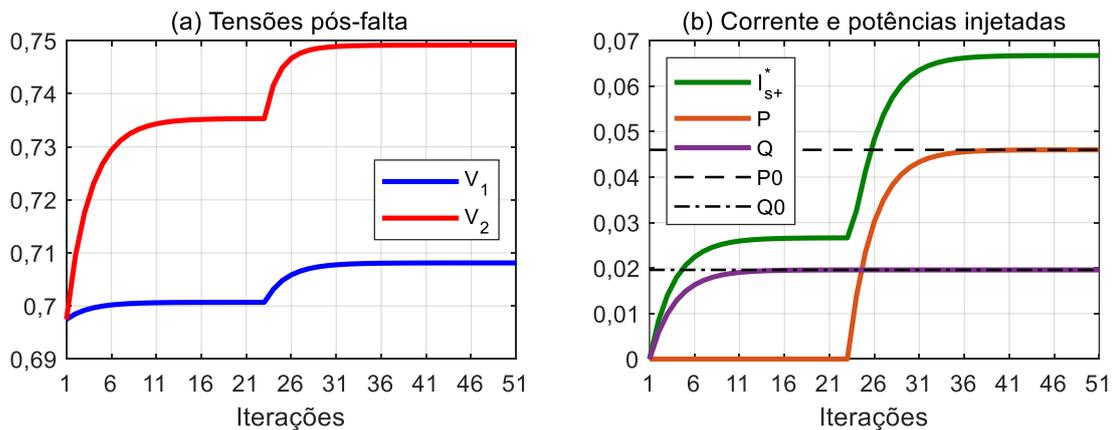
Nota-se ainda na Figura 23(b) que o controle foi incapaz de reestabelecer a injeção da potência ativa de pré-falta em função da restrição imposta à corrente de saída. Ao final do processo iterativo, verificou-se a injeção de 0,0242 pu de potência ativa e as tensões de $0,2609 \angle -63,3092^\circ$ pu e $0,2998 \angle -22,8325^\circ$ pu nas barra 1 e 2 respectivamente.

Analisou-se também a resposta do conversor para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,3$ pu. A Figura 24 apresenta os resultados obtidos. Para esse caso, o processo iterativo alcançou convergência em 51 iterações e resultou numa corrente de curto-circuito de $2,3604 \angle -35,1077^\circ$ pu.

Pela Figura 24(a) verifica-se que, como no primeiro caso, a injeção de corrente reativa resulta numa elevação considerável na tensão da barra 2, a qual converge para $0,7492 \angle -29,0187^\circ$ pu. Na iteração 24 o conversor alcança a potência reativa de referência e inicia a injeção de potência ativa, conforme ilustrado na Figura 24(b). Neste caso, a injeção de corrente ativa também é mais efetiva para elevação da tensão da barra 1, a qual converge para

0,7081|-35,1077° pu. Além disso, verifica-se que, ao contrário do primeiro caso, a injeção de corrente ativa também contribui para elevação da tensão da barra 2, pois a defasagem angular entre V_1 e a queda de tensão em Z_l é inferior à 90° .

Figura 24 – Resultados obtidos em pu para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,3$ pu.



Fonte: Autoria própria (2019).

Nota-se ainda pela Figura 24(b) que a tensão na barra 2 foi suficientemente alta para que o conversor pudesse manter a injeção de Q_0 e P_0 sem exceder o limite imposto à corrente de saída.

4.1.3 Modelagem do controle VC

No modo de controle VC, o GSC aumenta prioritariamente a injeção de corrente reativa para fornecer suporte à tensão terminal da unidade (KARAAGAC et al., 2015). Nesse modo, a variação da corrente reativa injetada na rede, $\Delta I_{s+}^{r,*}$, é função do desvio da tensão terminal, ΔV_{s+} , em relação a um valor de referência, V_{s+}^* , ou seja:

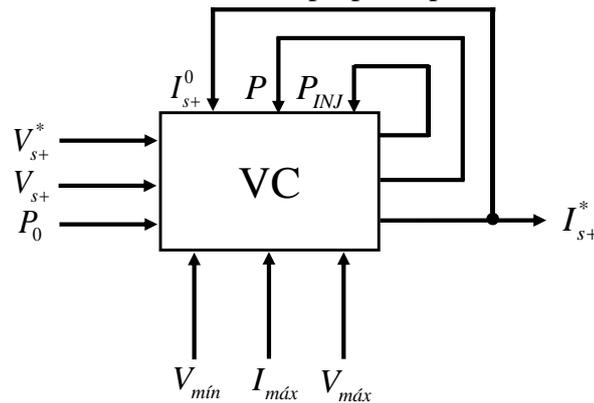
$$\Delta I_{s+}^{r,*} = f(\Delta V_{s+}) \quad (54)$$

Onde:

$$\Delta V_{s+} = V_{s+}^* - |V_{s+}| \quad (55)$$

Quando $|V_{s+}|$ alcança o valor de referência, uma quantidade $\Delta I_{s+}^{a,*}$ de corrente ativa passa a ser injetada pelo conversor em função da potência. Para representação desse comportamento, propõe-se o modelo apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Modelo fasorial proposto para o controle VC.



Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 25:

- P – é a potência ativa por fase injetada pelo conversor na iteração $(i-1)$;
- I_{s+}^0 – é a corrente injetada pelo conversor na iteração $(i-1)$;
- P_{INJ} – é uma *flag* definida por:

$$P_{INJ} = \begin{cases} 1, & |\Delta V_{s+}| \leq \varepsilon \\ 0, & |\Delta V_{s+}| > \varepsilon \end{cases} \quad (56)$$

Onde ε é a tolerância utilizada. A *flag* P_{INJ} foi definida para auxiliar o controle da injeção de corrente ativa. Sua utilização será detalhada posteriormente.

No modelo proposto, as quantidades $\Delta I_{s+}^{a,*}$ e $\Delta I_{s+}^{r,*}$ são determinadas respectivamente por:

$$\Delta I_{s+}^{a,*} = K_p (P_0 - P) \quad (57)$$

$$\Delta I_{s+}^{r,*} = K_V \Delta V_{s+} \quad (58)$$

Onde K_p e K_V são constantes reais.

Diferentemente dos modelos propostos para os controles FPC e QC, não foi atribuído limite para injeção de potência reativa, visto que a principal restrição operacional dos conversores baseia-se nos efeitos térmicos da corrente de saída, a qual será restrita à $I_{máx}$ no modelo.

A seguir é apresentado na Figura 26 o algoritmo proposto para o modelo do controle VC na faixa de operação do conversor.

Figura 26 – Algoritmo proposto para o controle VC.

Entrada: $V_{s+}, V_{s+}^*, P_0, I_{s+}^0, I_{máx}, P_{INJ}$

$$I_{s+}^{a,0} = |I_{s+}^0| \text{sen} \left(|V_{s+}| - |I_{s+}^0| \right) e^{j|V_{s+}|}$$

$$I_{s+}^{r,0} = |I_{s+}^0| \cos \left(|V_{s+}| - |I_{s+}^0| \right) e^{j(|V_{s+}| - 90^\circ)}$$

$$\Delta V_{s+} = V_{s+}^* - |V_{s+}|$$

Se $|\Delta V_{s+}| > \varepsilon$ e $P_{INJ} = 0$

$$I_{s+}^{a,*} = 0$$

$$\Delta I_{s+}^{r,*} = K_V \Delta V_{s+}$$

$$I_{s+}^{r,*} = \left(|I_{s+}^{r,0}| + \Delta I_{s+}^{r,*} \right) e^{j(|V_{s+}| - 90^\circ)}$$

$$I_{s+}^* = I_{s+}^{a,*} + I_{s+}^{r,*}$$

Se $|I_{s+}^*| > I_{máx}$

$$I_{s+}^* = I_{máx} e^{j(|V_{s+}| - 90^\circ)}$$

Fim

Fim

Se $|\Delta V_{s+}| \leq \varepsilon$ e $P_{INJ} = 0$

$$P_{INJ} = 1$$

$$\Delta I_{s+}^{a,*} = K_P (P_0 - P)$$

$$I_{s+}^{a,*} = \left(|I_{s+}^{a,0}| + \Delta I_{s+}^{a,*} \right) e^{j|V_{s+}|}$$

$$I_{s+}^* = I_{s+}^{a,*} + I_{s+}^{r,0}$$

Se $|I_{s+}^*| > I_{máx}$

$$I_{s+}^* = I_{s+}^0$$

Fim

Fim

Se $|\Delta V_{s+}| > \varepsilon$ e $P_{INJ} = 1$

$$\Delta I_{s+}^{r,*} = K_V \Delta V_{s+}$$

$$I_{s+}^{r,*} = \left(|I_{s+}^{r,0}| + \Delta I_{s+}^{r,*} \right) e^{j(|V_{s+}| - 90^\circ)}$$

$$I_{s+}^* = I_{s+}^{a,0} + I_{s+}^{r,*}$$

Se $|I_{s+}^*| > I_{máx}$

$$I_{s+}^{a,*} = \sqrt{I_{máx}^2 - |I_{s+}^{r,*}|^2} e^{j|V_{s+}|}$$

$$I_{s+}^* = I_{s+}^{a,*} + I_{s+}^{r,*}$$

Fim

Fim

Se $|\Delta V_{s+}| \leq \varepsilon$ e $P_{INJ} = 1$

Se $|(P_0 - P)| > \varepsilon$

$$\Delta I_{s+}^{a,*} = K_P (P_0 - P)$$

$$\begin{aligned}
I_{s+}^{a,*} &= \left(|I_{s+}^{a,0}| + \Delta I_{s+}^{a,*} \right) e^{j|V_{s+}|} \\
I_{s+}^* &= I_{s+}^{a,*} + I_{s+}^{r,0} \\
\text{Se } |I_{s+}| &> I_{m\acute{a}x} \\
I_{s+}^* &= I_{s+}^0 \\
\text{Fim} \\
\text{Fim} \\
P &= \Re \{ V_{s+} \bar{I}_{s+} \} \\
\text{Retorne: } &I_{s+}^*, P, P_{INJ}
\end{aligned}$$

Fonte: Autoria pr3pria (2019).

No algoritmo apresentado na Figura 26, s3o utilizadas quatro estruturas condicionais para abranger todas as poss3veis combina33es dos valores de ΔV_{s+} e P_{INJ} . O primeiro condicional representa os instantes iniciais da falta, no qual 3 dado prioridade a inje33o de correntes reativas para fornecer suporte 3 tens3o terminal e a inje33o de corrente ativa 3 nula. O segundo condicional representa o instante no qual a tens3o terminal do conversor alcan3a seu valor de refer3ncia e 3 dado in3cio a inje33o de corrente ativa. O terceiro condicional 3 utilizado para ajustar a tens3o terminal quando a inje33o de corrente ativa provocar um desvio em V_{s+} superior 3 toler3ncia. E o quarto condicional 3 utilizado para ajustar a inje33o de corrente ativa at3 que a diferen3a entre a pot3ncia ativa injetada, P e P_0 seja inferior ou igual 3 toler3ncia utilizada.

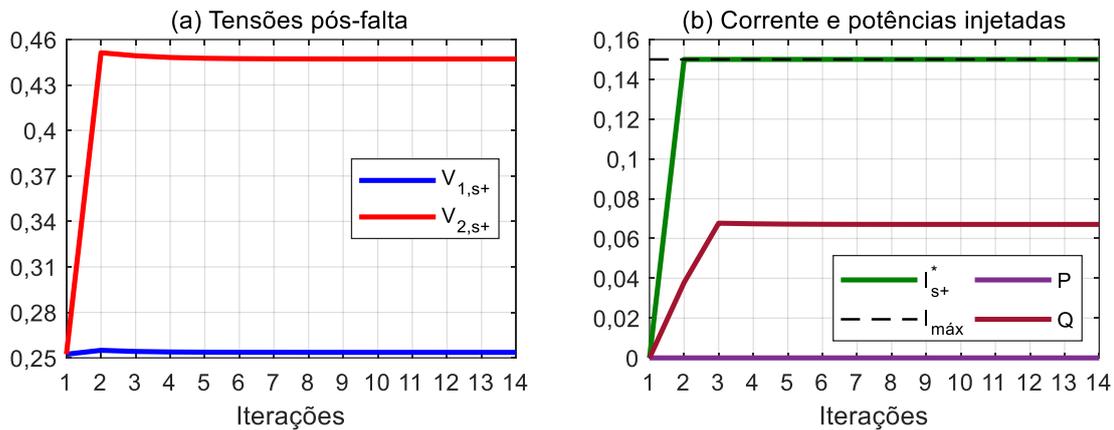
A fim de ilustrar o desempenho do algoritmo proposto, realizou-se um estudo de caso com o sistema da Figura 18. No estudo de caso, considerou-se para primeira itera33o do algoritmo inje33o de pot3ncia nula, ou seja, $P = Q = 0$, al3m disso, utilizou-se $K_a = K_r = 0,5$. Como crit3rio de converg3ncia, utilizou-se uma toler3ncia de 1×10^{-5} para o desvio do m3dulo e 3ngulo de I_{s+}^* entre as itera33es (i) e ($i-1$).

A Figura 27 apresenta os resultados obtidos para uma falta trif3sica na barra 1 com $Z_f = 0,07$ pu. Para esse caso, o processo iterativo alcan3ou converg3ncia em 14 itera33es e resultou numa corrente de curto-circuito de $3,6232 \angle -66,5281^\circ$ pu.

Pela an3lise da Figura 27(a), verifica-se que a imped3ncia de falta foi suficientemente baixa para impossibilitar a manuten33o da tens3o terminal. Al3m disso, a Figura 27(b) demonstra que a corrente de sa3da 3 restrita 3 $I_{m\acute{a}x}$ j3 na segunda itera33o do algoritmo e que,

como a tensão de referência não foi alcançada, a injeção de potência ativa é nula. Para esse caso as tensões nas barras convergiram para $0,2536 \angle -66,5281^\circ$ pu e $0,4472 \angle -72,6390^\circ$ pu respectivamente.

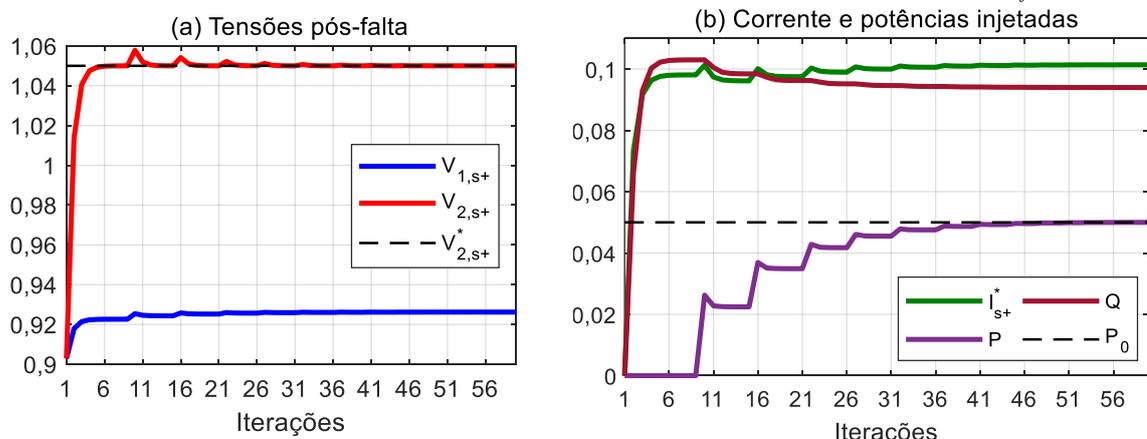
Figura 27 – Resultados obtidos em pu para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,07$ pu.



Fonte: Autoria própria (2019).

Como um segundo caso, também foi analisada a resposta do conversor para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,8$ pu. Para esse caso, o processo iterativo alcançou convergência em 60 iterações e resultou numa corrente de curto-circuito de $1,1578 \angle -16,3082^\circ$ pu. A Figura 28 apresenta os resultados obtidos para as tensões pós-falta, a corrente de contribuição e as potências injetadas.

Figura 28 – Resultados obtidos em pu para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,8$ pu.



Fonte: Autoria própria (2019).

No segundo caso, verifica-se pela Figura 28(a) que o conversor foi capaz de ajustar a tensão terminal ao valor de referência para precisão utilizada. Após a convergência do

algoritmo, as tensões pós-falta nas barras 1 e 2 resultaram em $0,9262|-16,3082^\circ$ pu e $1,050|-13,4746^\circ$ pu respectivamente. Além disso, nota-se na Figura 28(b) que o conversor alcança a tensão de referência na iteração 9, instante que inicia a injeção de potência ativa.

Pela Figura 28(a), verifica-se ainda que a injeção $\Delta I_{s+}^{a,*}$ produz *spikes* na tensão terminal do conversor os quais são amortecidos nas iterações posteriores mediante o ajuste da corrente reativa. Durante o período de ajuste da corrente reativa, a potência ativa permanece constante, produzindo platôs na curva de P , conforme ilustrado na Figura 28(b). Ainda nessa figura, verifica-se que a potência ativa de pré-falta pôde ser reestabelecida sem que o limite imposto à corrente de saída fosse superado.

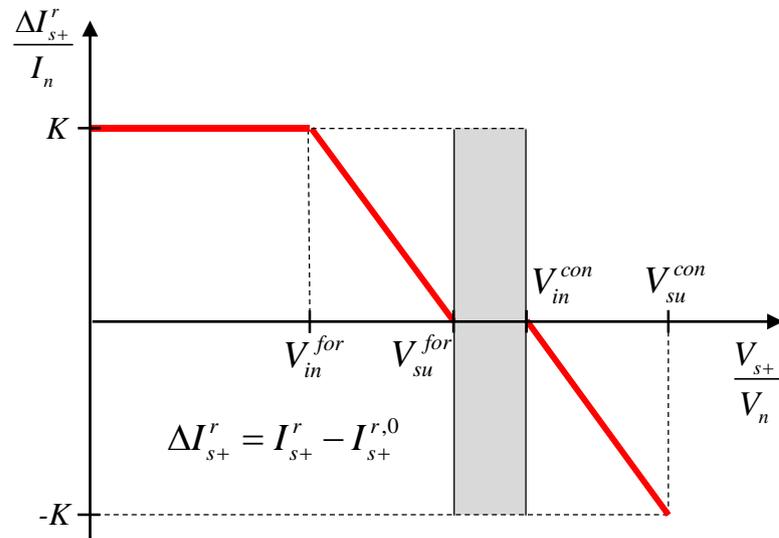
4.1.4 Modelagem do controle FRT

No modo de controle FRT, o conversor é programado para permanecer conectado à rede durante variações temporárias na tensão decorrentes de rejeição de carga e defeitos simétricos ou assimétricos. Além disso, a depender do tipo de geração, é requerido dos conversores a injeção de corrente reativa adicional a fim de fornecer suporte de tensão à rede elétrica. Os parâmetros que definem a quantidade de corrente reativa e as tensões de ativação ou desativação desse modo de controle variam entre os códigos de rede de cada país. Neste trabalho, a modelagem desse controle será baseada nos requisitos de injeção corrente reativa do código de rede do ONS discutidos na Seção 2.2.

Conforme discutido na Seção 2.2 o único critério aplicável às UGDCFs as quais a UGP é constituída de geradores fotovoltaicos é a permanência da conexão com a rede segundo a Figura 6. Para esse caso, o conversor pode ser representado a partir do modelo proposto para o controle FPC utilizando-se fator de potência de pré-falta unitário e as tensões mínimas e máximas que definem sua faixa de operação de acordo o período considerado para o estudo na Figura 6.

Por outro lado, para UGDCFs as quais a UGP é constituída de geradores eólicos também é requerido o suporte de tensão à rede elétrica conforme a Figura 8. Para esse caso, a variação na corrente reativa, $\Delta I_{s+}^{r,*}$, será definida a partir da parametrização da Figura 8 com base nas variáveis definidas na Figura 29.

Figura 29 – Curva de operação do conversor no modo FRT para turbinas eólicas.



Fonte: Autoria própria (2019).

Onde:

- V_{in}^{for} é o limite inferior do intervalo de tensão cuja corrente reativa fornecida é dependente de V_{s+} ;
- V_{su}^{for} é o limite superior do intervalo de tensão cuja corrente reativa fornecida é dependente de V_{s+} ;
- V_{in}^{con} é o limite inferior do intervalo de tensão cuja corrente reativa consumida é dependente de V_{s+} ;
- V_{su}^{con} é o limite superior do intervalo de tensão cuja corrente reativa consumida é dependente de V_{s+} .

A partir da Figura 29, pode-se descrever $\Delta I_{s+}^{r,*}$ por:

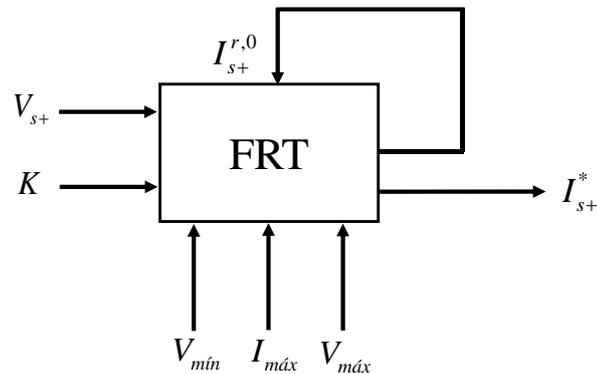
$$\Delta I_{s+}^{r,*} = \begin{cases} \frac{V_{su}^{for} - V_{s+}}{V_{su}^{for} - V_{in}^{for}} KI_n; & \forall V_{in}^{for} \leq V_{s+} \leq V_{su}^{for} \\ KI_n; & \forall V_{s+} < V_{in}^{for} \\ \frac{V_{s+} - V_{in}^{con}}{V_{in}^{con} - V_{su}^{con}} KI_n; & \forall V_{in}^{con} \leq V_{s+} \leq V_{su}^{con} \end{cases} \quad (59)$$

Pela Figura 29, verifica-se ainda que no intervalo $V_{su}^{for} < V_{s+} < V_{in}^{con}$ não há injeção de corrente reativa adicional. Nesse intervalo de tensão geralmente é empregado um algoritmo de

retomada de carga segundo critérios do operador do sistema. Alternativamente, para pode-se modelar o conversor a partir das estratégias de controle de pré-falta já vistas.

Para representação do controle FRT com suporte de tensão à rede propõem-se o modelo apresentado na Figura 30.

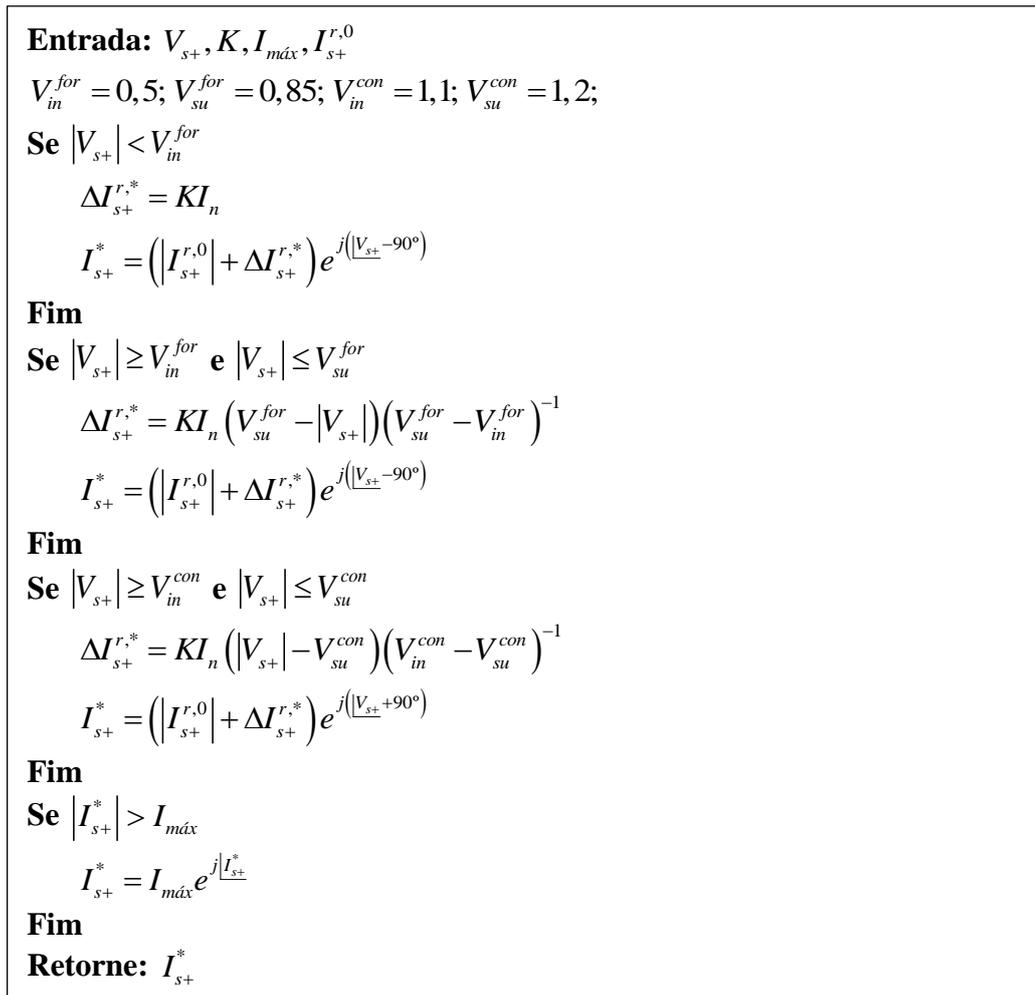
Figura 30 – Modelo fasorial proposto para o controle FRT.



Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 30, $I_{s+}^{r,0}$ é a corrente reativa injetada na iteração $(i-1)$ e as tensões $V_{máx}$ e $V_{mín}$ são ajustadas de acordo com o período considerado para o estudo na Figura 6. Na faixa de operação do conversor definida pela Figura 6, a corrente de contribuição do conversor é estimada a partir do algoritmo apresentado na Figura 32.

Figura 31 – Algoritmo para determinação de I_{s+}^* no controle FRT com suporte de tensão.

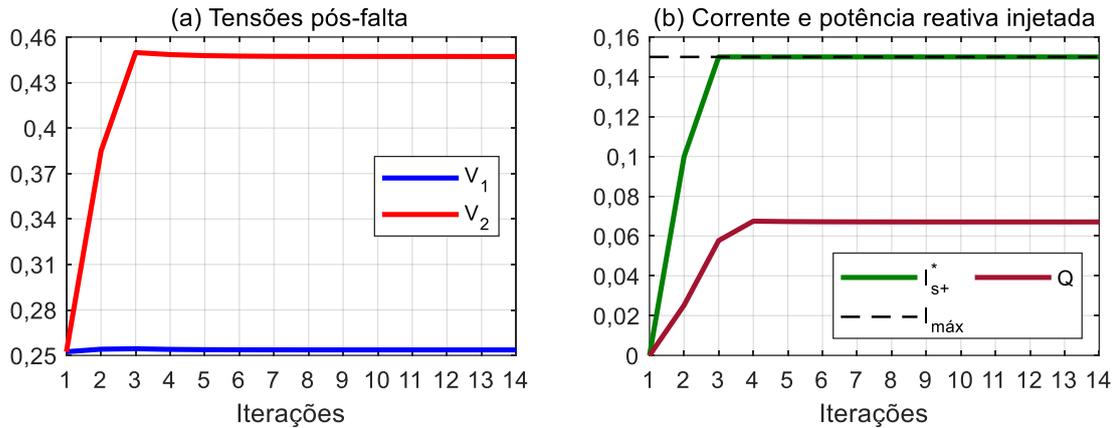


Fonte: Autoria pr3pria (2019).

A fim de ilustrar o desempenho do algoritmo proposto, realizou-se um estudo de caso com o sistema da Figura 18. No estudo, considerou-se nula a injeção de corrente reativa de pré-falta, ou seja, $I_{s+}^{r,0} = 0$ pu, e utilizou-se $K = 2$ e $I_n = 0,05$ pu. Além disso, as tensões $V_{m\acute{a}x}$ e $V_{m\acute{i}n}$ foram mantidas em 0,2 pu e 1,2 pu respectivamente e, como crit3rio de converg3ncia, utilizou-se uma tolerância de 1×10^{-5} para o desvio do m3dulo e 3ngulo de I_{s+}^* entre as iterações (i) e ($i-1$).

Avaliou-se inicialmente o desempenho do algoritmo para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,07$ pu. Para esse caso, o processo iterativo alcançou converg3ncia em 14 iterações e resultou numa corrente de curto-circuito de $3,6232 \angle -66,5281^\circ$ pu mesmo valor verificado para o controle VC para essa falta. Na Figura 32 s3o apresentados os resultados obtidos para as tens3es pós-falta, corrente de contribuição e pot3ncia reativa injetada.

Figura 32 – Resultados obtidos em pu para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,07$ pu.

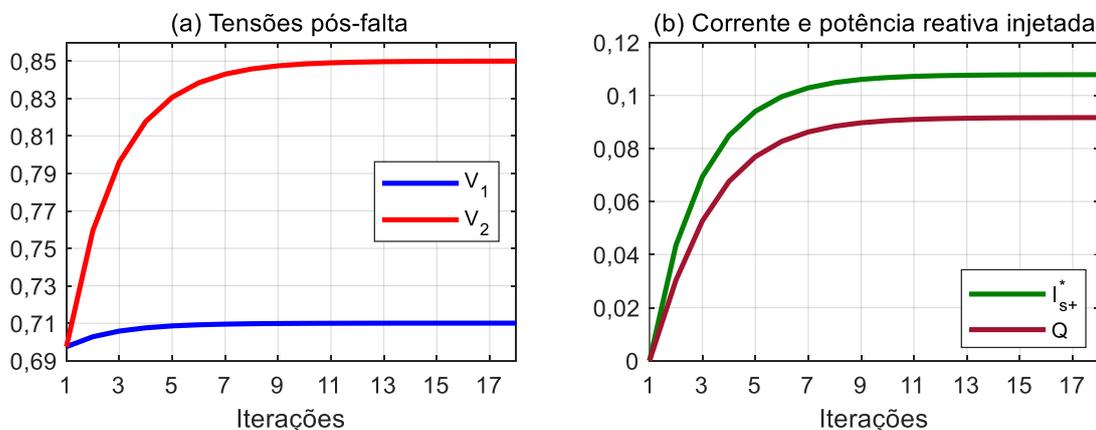


Fonte: Autoria própria (2019).

Pela análise da Figura 32(a) verifica-se que a impedância de falta foi suficientemente baixa para impossibilitar a restauração da tensão terminal do conversor. Neste caso, como ilustrado na Figura 27(b), a corrente de saída é restrita à $I_{m\acute{a}x}$ já na terceira iteração do algoritmo, limitando a potência reativa fornecida à rede a 0,0671 pu. Ao final do processo iterativo verificou-se, respectivamente, os valores de $0,2536 \angle -66,5281^\circ$ pu e $0,4472 \angle -72,6390^\circ$ pu para as tensões nas barras do sistema.

Avaliou-se ainda a resposta do conversor para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,3$ pu. Neste caso, o processo iterativo alcançou convergência em 18 iterações e resultou numa corrente de curto-circuito de $2,3669 \angle -36,7158^\circ$ pu. Na Figura 33 são apresentados os resultados obtidos para as tensões pós-falta, corrente de contribuição e potência reativa injetada.

Figura 33 – Resultados obtidos em pu para uma falta trifásica na barra 1 com $Z_f = 0,3$ pu.



Fonte: Autoria própria (2019).

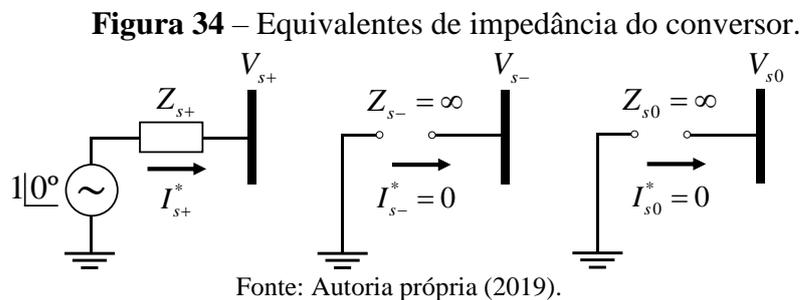
No segundo caso, verifica-se pela Figura 33(a) que o conversor foi capaz de elevar a tensão terminal ao limite superior do intervalo de fornecimento de reativos, V_{su}^{for} . Quando nesse valor de tensão, a corrente reativa adicional vai a zero, conforme a Equação (59), fazendo com que V_{s+} mantenha-se constante e o algoritmo alcance a convergência. Neste caso, ao final do processo iterativo verificou-se as tensões pós-falta de $0,7101\angle -36,7158^\circ$ pu e $0,850\angle -38,2821^\circ$ pu nas barras 1 e 2 respectivamente.

Nota-se também na Figura 33(b) a proporcionalidade entre a corrente de saída, puramente reativa, e a potência reativa injetada. Além disso, verifica-se também que não houve saturação da corrente de saída em função da alta impedância de falta utilizada. Ao final do processo iterativo verificou-se os valores de $0,1078\angle -128,2817^\circ$ pu e $0,0916$ pu para I_{s+}^* e Q respectivamente.

A seguir será descrito a metodologia adotada para inclusão dos modelos propostos para as diferentes estratégias de controle do conversor na técnica de análise de faltas baseado na matriz de impedâncias de barra apresentado no Capítulo 3.

4.1.5 Equivalente de impedância

Para análise de faltas em grandes sistemas de potência através da matriz de impedâncias de barra, faz-se necessário a conversão do modelo do conversor de fonte de corrente controlada para um equivalente de impedância. Para isso, propõem-se os circuitos de sequência apresentados na Figura 34.



Uma vez que o conversor contribui apenas com correntes sequência positiva, as impedâncias de sequência negativa e zero são infinitas, ou seja, $Z_{s-} = Z_{s0} = \infty$. Por outro lado, a impedância de sequência positiva é determinada a cada iteração por:

$$Z_{s+} = \frac{1|0^\circ - V_{s+}}{I_{s+}^*} \quad (60)$$

Onde I_{s+}^* é a corrente de contribuição determinada pela estratégia de controle do conversor.

A representação matricial do equivalente de impedância de uma UGDCF conectada na k -ésima barra de um sistema de n barras é feita por:

$$\left[Z_{con,k}^s \right] = \left[\begin{array}{ccc} a & 0 & 0 \\ 0 & Z_{s+} & 0 \\ 0 & 0 & a \end{array} \right]_{a \rightarrow \infty} \quad (61)$$

Para inclusão ou modificação do equivalente do conversor na matriz $\left[Z_{BAR}^s \right]$, utiliza-se a seguinte equação derivada da redução de Kron:

$$\left[Z_{BAR}^s \right] = \left[Z_{BAR}^{s,0} \right] - \left[Z_{col} \right] \left(\left[Z_b \right]^{-1} \left[Z_{col} \right]^T \right) \quad (62)$$

Onde $\left[Z_{BAR}^{s,0} \right]$ é a matriz de impedâncias de barra de sequência obtida desprezando-se as UGDCFs, $\left[Z_{col} \right]^T$ é a transposta de $\left[Z_{col} \right]$ e:

$$\left[Z_{col} \right] = \left[\begin{array}{c} \left[Z_{k1}^{s,0} \right] \\ \vdots \\ \left[Z_{kk}^{s,0} \right] \\ \vdots \\ \left[Z_{kn}^{s,0} \right] \end{array} \right] \quad (63)$$

$$\left[Z_b \right] = \left[Z_{kk}^{s,0} \right] + \left[Z_{con,k}^s \right] \quad (64)$$

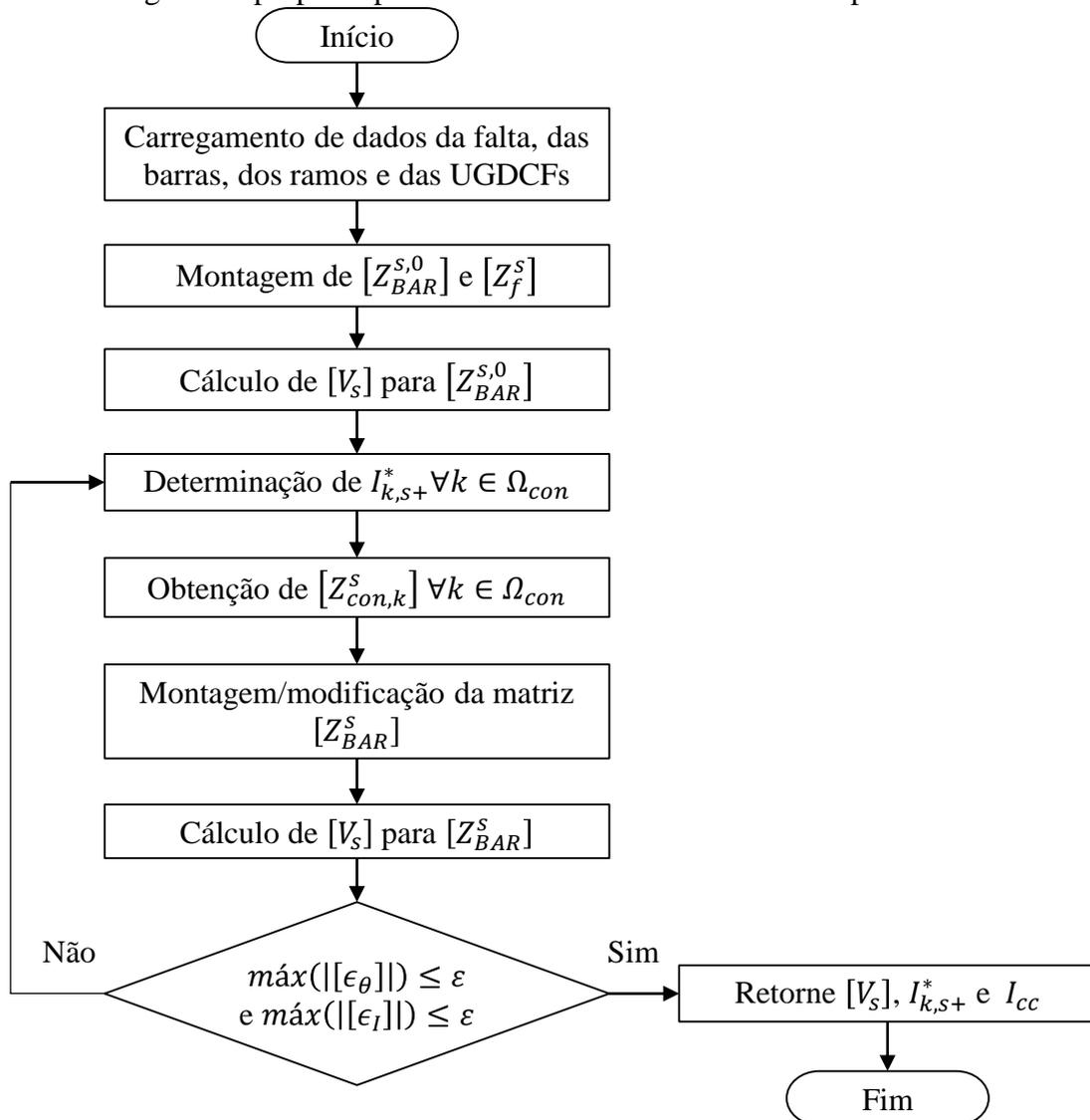
Para a inclusão de um conjunto Ω_{con} de m equivalentes, a matriz $\left[Z_{BAR}^s \right]$ deve ser modificada m vezes. Na inclusão do primeiro equivalente, ou seja, para $k=1$, utiliza-se as Equações (62) a (64) inalteradas. Para inclusão dos demais equivalentes, ou seja, para $k \neq 1$, a matriz $\left[Z_{BAR}^{s,0} \right]$ é substituída pela matriz $\left[Z_{BAR}^s \right]$ obtida com a inclusão do equivalente do conversor ($k-1$).

A seguir será apresentado o algoritmo proposto para análise faltas *shunt* utilizando-se a matriz de impedâncias de barra e os modelos desenvolvidos para as estratégias de controle do conversor.

4.2 Algoritmo de execução da técnica

Na Figura 35, é apresentado o fluxograma do algoritmo proposto para análise de faltas em sistemas de potência com UGDCFs. O algoritmo tem início com o carregamento dos dados da falta e dos ramos, barras e UGDCFs. No último, além das especificações máximas, também são fornecidas os parâmetros e dados de pré-falta necessários para os algoritmos propostos para as estratégias de controle do conversor.

Figura 35 – Algoritmo proposto para análise de faltas em sistemas de potência com UGDCFs.



Fonte: Autoria própria (2019).

Após a etapa de carregamento dos dados é realizada a montagem da matriz de impedâncias de barra inicial, $[Z_{BAR}^{s,0}]$, e da matriz de impedâncias de falta, $[Z_f^s]$. Na montagem

de $[Z_f]$, foram utilizados os valores 1×10^{-12} e 1×10^{12} , respectivamente, para representação de impedâncias iguais a zero e infinitas.

Na etapa seguinte é realizado o cálculo das tensões pós-falta para $[Z_{BAR}^{s,0}]$ por meio da Equação (15). Nessa equação, o algoritmo utiliza para as tensões pré-falta, $[V_{s,0}]$, os valores especificados nos dados de barra, os quais podem ser obtidos a partir do estudo do fluxo de potências ou simplesmente fixados em 1 pu na rede sequência positiva.

De posse das tensões pós-falta, o algoritmo inicia o processo iterativo de ajuste da corrente de contribuição do conjunto de UGDCFs, denotado por Ω_{con} no fluxograma, de acordo com a estratégia de controle utilizada em cada unidade. Durante o ajuste de $I_{k,s+}^*$, caso a tensão de fase de quaisquer fases caia abaixo de $V_{mín}$ ou supere $V_{máx}$ por 5 iterações consecutivas, o conversor é desconectado.

Na sequência o algoritmo determina o equivalente de impedância dos conversores e prossegue para a modificação da matriz de impedâncias de barra conforme o procedimento descrito na Seção 4.1.5.

Após a inclusão dos equivalentes na matriz $[Z_{BAR}^s]$, as tensões pós-falta são recalculadas e o critério de convergência é avaliado. Nesse, utilizou-se como condição de convergência as seguintes inequações:

$$[\epsilon_I]^{(j)} = \begin{bmatrix} |I_{1,s+}^*| \\ \vdots \\ |I_{k,s+}^*| \\ \vdots \\ |I_{m,s+}^*| \end{bmatrix}^{(j)} - \begin{bmatrix} |I_{1,s+}| \\ \vdots \\ |I_{k,s+}| \\ \vdots \\ |I_{m,s+}| \end{bmatrix}^{(j)} \leq \mathcal{E} \quad (65)$$

$$[\epsilon_\theta]^{(j)} = \begin{bmatrix} |I_{1,s+}^*| \\ \vdots \\ |I_{k,s+}^*| \\ \vdots \\ |I_{m,s+}^*| \end{bmatrix}^{(j)} - \begin{bmatrix} |I_{1,s+}| \\ \vdots \\ |I_{k,s+}| \\ \vdots \\ |I_{m,s+}| \end{bmatrix}^{(j)} \leq \mathcal{E} \quad (66)$$

Onde, para a j -ésima iteração:

$$I_{k,s+}^{(j)} = \frac{1|0^{\circ} - V_{k,s+}^{(j)}}{Z_{k,s+}^{(j)}} \quad (67)$$

Caso a condição de convergência seja atendida, o algoritmo retorna as tensões pós-falta, as correntes de contribuição e a corrente de curto-circuito total no ponto de defeito. Caso contrário, o algoritmo retorna à etapa de ajuste da corrente de contribuição.

5 VALIDAÇÃO DA TÉCNICA PROPOSTA

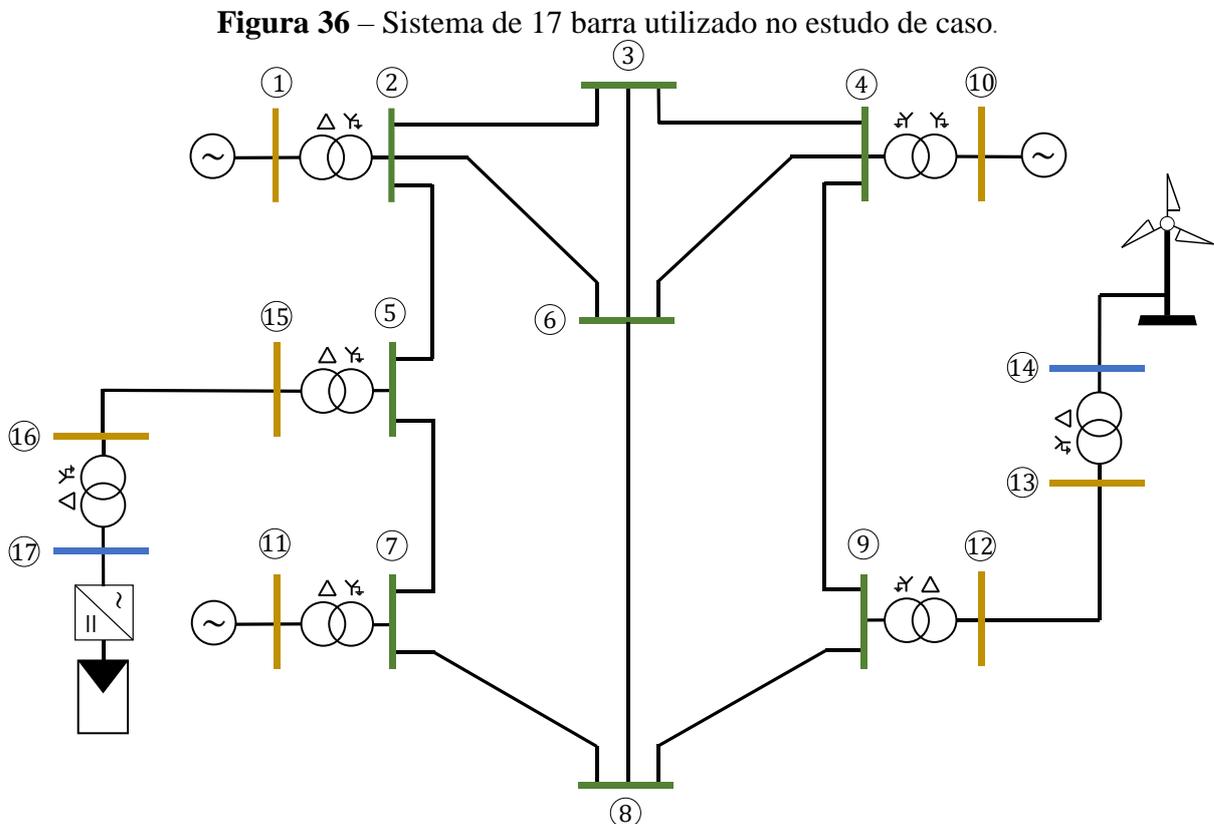
Neste capítulo será apresentado um estudo de caso com um sistema trifásico de 17 barras sob diferentes condições de falta, no qual serão comparados os resultados obtidos com a utilização dos algoritmos propostos e o *software* ANAFAS.

5.1 Estudo de caso

Nesta seção é detalhado a metodologia conduzida no estudo de caso e apresentado os dados das UGDCFs conectadas ao sistema de 17 barras utilizado.

5.1.1 Descrição do estudo

Para validação do algoritmo proposto para análise de faltas em sistemas de potência com UGDCFs utilizou-se o sistema trifásico de 17 barras apresentado na Figura 36, cuja topologia foi adaptada de (SAADAT, 2010).



Fonte: Autoria própria (2019).

O sistema de potência opera com barras em 230 kV, 34,5 kV e 0,6 kV, representadas, respectivamente, pelas cores verde, amarelo e azul no diagrama da Figura 36. Os dados das linhas e dos transformadores estão apresentados nas Tabelas 1 e 2 respectivamente.

Tabela 1 – Dados das linhas do sistema de 17 barras na base de 100 MVA.

Barras	R_1 (%)	X_1 (%)	R_0 (%)	X_0 (%)
2 – 3	0	30	0	60
2 – 5	0	15	0	30
2 – 6	0	45	0	90
3 – 4	0	40	0	80
3 – 6	0	40	0	80
4 – 6	0	60	0	100
4 – 9	0	70	0	110
5 – 7	0	43	0	80
6 – 8	0	48	0	95
8 – 9	0	48	0	90
7 – 8	0	35	0	70
12 – 13	0	10	0	30
15 – 16	0	10	0	30

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 2 – Dados dos transformadores do sistema de 17 barras.

Barra BT	Barra AT	X_1 (%)	X_0 (%)	Tensão primária (kV)	Tensão secundária (kV)	Potência nominal (MVA)
1	2	10	10	34,5	230	100
10	4	10	10	34,5	230	100
11	7	10	10	34,5	230	100
12	9	10	10	34,5	230	100
15	5	10	10	34,5	230	100
14	13	7	7	0,6	34,5	5
17	16	7	7	0,6	34,5	5

Fonte: Autoria própria (2019).

Nas barras 16 e 14 do sistema estão conectadas por meio de transformadores elevadores um gerador fotovoltaico e uma turbina eólica tipo IV respectivamente. Na Tabela 3 são apresentados as especificações máximas e os dados de pré-falta dos conversores.

Tabela 3 – Especificações máximas e dados de pré-faltas dos conversores.

Tipo de geração	P_0 (MW)	FP_0	Tensão nominal (kV)	$I_{máx}$ (A)	I_n (A)	$V_{mín}$ (pu)	$V_{máx}$ (pu)
Eólica	2,5	1,0	0,6	4812	2406	0,2	1,2
Fotovoltaica	1,5	1,0	0,6	2886	1443	0,2	1,2

Fonte: Autoria própria (2019).

Para validação dos algoritmos propostos, utilizou-se o *software* comercial ANAFAS versão 7.2.3. Na versão utilizada do ANAFAS é fornecida apenas um bloco para simulação de turbinas eólicas tipo IV. Nesse, são assumidas as seguintes características para o modelo do conversor (CEPEL, 2017):

- Possui controle que busca manter constante durante a falha a potência elétrica ativa de saída, assim como um valor de fator de potência especificado;
- Contribui apenas com corrente de sequência positiva, mesmo para faltas desequilibradas;
- Possui limite máximo de corrente de contribuição;
- Se desconecta caso a tensão caia abaixo de limites pré-determinadas.

Com base nas características descritas, o conversor é modelado pelo *software* como uma fonte de corrente de sequência positiva que requer para simulação os dados solicitados na tela de configuração apresentada na Figura 37. A depender dos dados fornecidos pelo usuário, o ANAFAS pode modelar o comportamento da corrente de contribuição de quatro formas diferentes. A Figura 38 ilustra os quatro casos considerados pelo *software*.

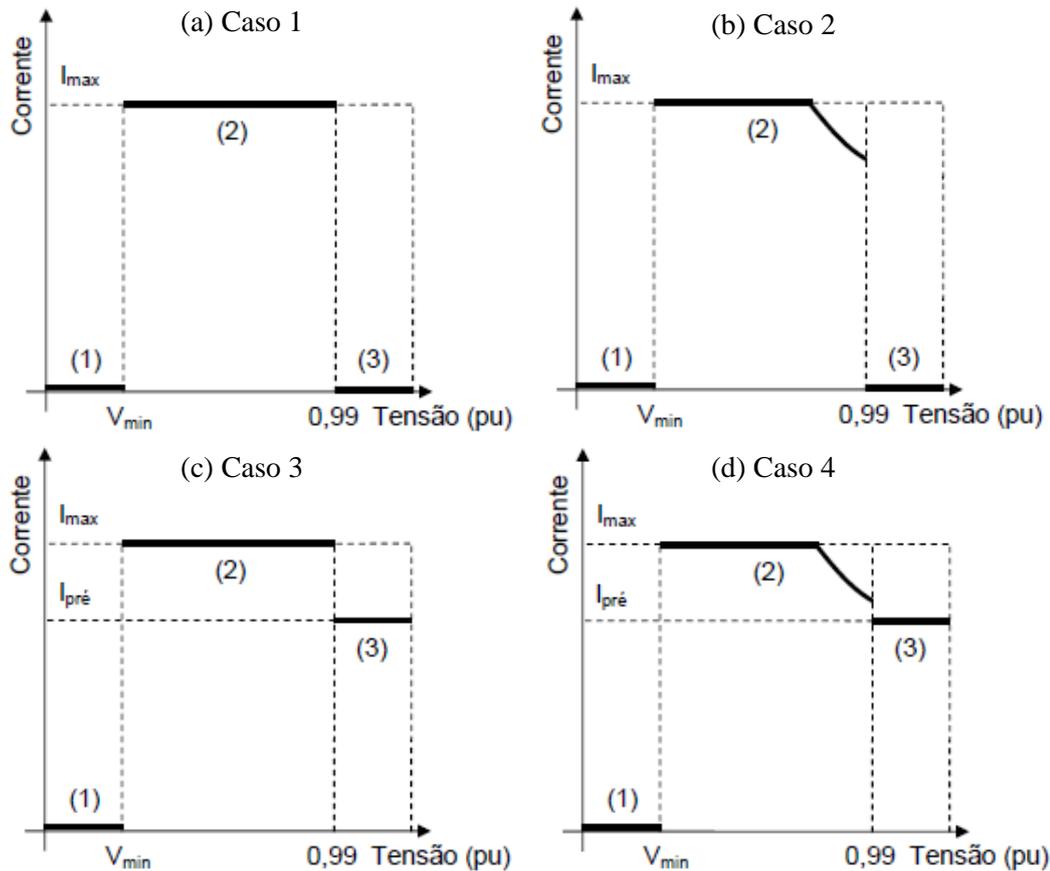
Figura 37 – Tela de configuração do conversor do gerador eólico tipo IV.

The screenshot shows a configuration window titled "Dados de Gerador Eólico Full Converter". The window is divided into several sections for parameter input:

- Identificação:** Includes dropdown menus for "Barra" (set to 1), "Grupo" (set to 1), and "Nome" (set to b1). There is also an "Área" dropdown and a checked "Ligado" checkbox.
- Operational Parameters:** Includes input fields for "Corrente Máxima de Seq. Positiva (Imáx Arms)", "Tensão Mínima para Injetar (Vmin pu)", "Tensão Máxima para Injetar (Vmax pu)", "Fator de Potência de Operação (FP_pré)", "Potência Ativa Pré-Falta (Pinic MW)", and "Fator de Potência de Curto (FP_CC)".
- Units:** Includes input fields for "Número de Unidades" and "Número de Unidades em Operação".
- Breaker:** Includes an input field for "Capacidade de Interrupção do Disjuntor (kA)".
- Actions:** At the bottom, there are four buttons: "Inserir" (with a checkmark icon), "Alterar" (with a hand icon), "Remover" (with an X icon), and "Cancelar" (with a trash icon).

Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 38 – Modelagem adotada pelo ANAFAS para o conversor.



Fonte: Adaptado de (CEPEL, 2017).

O primeiro caso, Figura 38(a), corresponde ao modelo em que o fator de potência e a potência ativa de pré-falta são desconhecidos ou desprezados. Na falta desses dados, a contribuição do conversor é máxima quando as tensões pós-falta nas três fases superam V_{\min} com pelo menos uma delas abaixo de 0,99 pu, e nula para qualquer valor de tensão fora desse intervalo.

O segundo caso, Figura 38(b), corresponde ao modelo em que apenas o fator de potência de pré-falta é desconhecido ou desprezado. Neste caso, o conversor busca manter constante a injeção da potência ativa de pré-falta com o fator de potência de curto-circuito especificado quando as tensões pós-falta nas três fases superam V_{\min} com pelo menos uma delas abaixo de 0,99 pu. Fora desse intervalo a corrente de contribuição é nula.

Já o terceiro e quarto caso, Figura 38(c) e Figura 38(d) respectivamente, correspondem aos casos 1 e 2 acrescidos do carregamento de pré-falta. Nesses casos, quando a tensão de pós-falta é superior a 0,99 pu e inferior a V_{\max} , o conversor mantém a injeção da corrente de pré-falta.

Em todos os casos verifica-se que, quando não nula, a corrente de contribuição do conversor é controlada de modo a satisfazer o fator de potência de curto-circuito especificado. Esse comportamento é similar ao obtido no controle FPC. Outro detalhe importante da abordagem do ANAFAS é a possibilidade de simular o requisito de suportabilidade a subtensões e sobretensões dinâmicas, definido pela Figura 6, por meio do ajuste dos valores de $V_{mín}$ e $V_{máx}$ para o instante desejado.

De posse dessas informações, foram simuladas no estudo de caso o total de 30 faltas e comparado os resultados obtidos com o ANAFAS e a técnica proposto utilizando-se os modos de controle FPC e FRT. Foram avaliadas as faltas FFF, FFF-T, FF, FF-T e F-T nas barras 5, 6 e 9 do sistema de 17 barras da Figura 36.

Na estimação da corrente de contribuição no modo de controle FRT utilizou-se $V_{in}^{for} = 0,5$ pu, $V_{su}^{for} = 0,85$ pu, $V_{in}^{con} = 1,1$ pu, $V_{su}^{con} = 1,2$ pu e $K = 2$. Além disso, utilizou-se para $V_{mín}$ e $V_{máx}$ os valores de 0,2 pu e 1,2 pu respectivamente.

Para simulação do conversor do gerador fotovoltaico na técnica proposto neste trabalho, utilizou-se o algoritmo desenvolvido para o modo de controle FPC com fator de potência unitário. No ANAFAS, esse gerador foi modelado a partir do bloco do gerador eólico tipo IV com fator de potência de curto-circuito unitário. Em todas as faltas avaliadas o carregamento pré-falta foi desprezado e o fator de potência de curto-circuito foi ajustado como sendo igual ao FP_0 fornecido na Tabela 3. Além disso, para ambos os conversores da Tabela 3, o parâmetro $V_{máx}$ do modelo do controle FPC corresponde a 0,5 pu conforme a Equação (50).

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para as faltas analisadas utilizando-se o ANAFAS e os algoritmos propostos para os modos de controle FPC e FRT.

5.2 Resultados e discussão

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos no estudo de caso conduzido com o sistema de 17 barras da Figura 36. Para cada tipo de falta analisado foi realizado uma comparação dos resultados obtidos utilizando-se o ANAFAS e os algoritmos propostos com os modos de controle FPC e FRT.

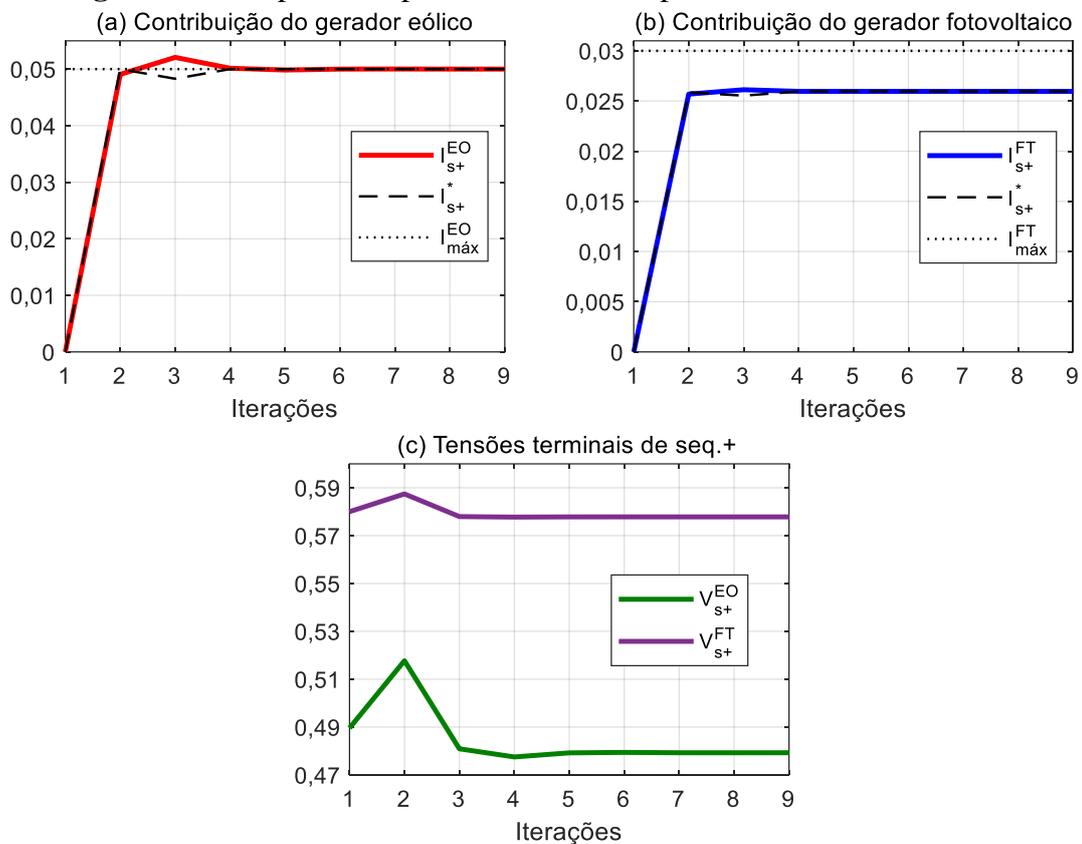
5.2.1 Faltas na barra 6

Esta seção apresenta os resultados obtidos para as faltas FFF, FFF-T, FF, FF-T e F-T na barra 6 do sistema de 17 barras da Figura 36.

5.2.1.1 Falta trifásica

A Figura 39 apresenta a resposta dos conversores no controle FPC para uma falta FFF na barra 6 do sistema de 17 barras da Figura 36

Figura 39 – Resposta em pu do controle FPC para uma falta FFF na barra 6.



Fonte: Autoria própria (2019).

Conforme a Figura 39, o processo iterativo alcançou convergência em 9 iterações para o modo de controle FPC. Pela Figura 39(a), verifica-se que o conversor do gerador eólico contribui com a corrente I_{s+}^{EO} de 0,050|11,8436° pu para uma tensão terminal, V_{s+}^{EO} na Figura 39(c), de 0,4793|11,8433° pu. Por outro lado, nota-se pela Figura 39(b) que o conversor do gerador fotovoltaico contribui com uma corrente I_{s+}^{FT} de 0,026|4,7598° pu para uma tensão terminal, V_{s+}^{FT} na Figura 39(c), de 0,5778|4,7598° pu. No caso do gerador eólico, nota-se ainda que I_{s+}^{EO} é limitada à corrente máxima de saída dessa unidade, $I_{máx}^{EO}$, em função de $V_{s+}^{EO} < V_{imáx}$.

No modo de controle FPC, constatou-se ainda ao fim do processo iterativo que os conversores dos geradores eólico e fotovoltaico injetam, respectivamente, as potências ativas de 0,0240 pu e 0,0150 pu com fator de potência unitário. Conforme a Tabela 3, verifica-se que apenas o conversor do gerador fotovoltaico foi capaz de manter constante a injeção de P_0 . No caso do gerador eólico a saturação de I_{s+}^{EO} impossibilitou a manutenção de P_0 para a baixa a tensão terminal de pós-falta.

Para efeito comparativo, as Tabelas 4 e 5 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos em componentes de fase utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC e o *software* comercial ANAFAS. Pela análise da Tabela 4, verifica-se que a falta FFF resultou numa corrente de curto-circuito de 4,0653 pu. Além disso, verifica-se que as tensões de fase de pós-falta nas barras de instalação dos geradores encontram-se na faixa de operação dos conversores, ou seja, são superiores a V_{min} e inferiores a V_{max} , razão pela qual nenhuma das unidades foi desligada. Ademais o comparativo das Tabelas 4 e 5 demonstra que os resultados obtidos com o algoritmo proposto para o controle FPC são iguais aos fornecidos pelo ANAFAS considerando-se o mesmo número de casas decimais.

Tabela 4 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	4,0653 $-89,4949^\circ$	4,0653 $150,5052^\circ$	4,0653 $30,5052^\circ$
I_{EO}	0,050 $11,8436^\circ$	0,050 $-108,1564^\circ$	0,050 $131,8436^\circ$
I_{FT}	0,0260 $4,7598^\circ$	0,0260 $-115,2402^\circ$	0,0260 $124,7598^\circ$
V_{EO}	0,4793 $11,8434^\circ$	0,4793 $-108,1564^\circ$	0,4793 $131,8436^\circ$
V_{FT}	0,5778 $4,7598^\circ$	0,5778 $-115,2402^\circ$	0,5778 $124,7598^\circ$

Fonte: Autoria própria (2019).

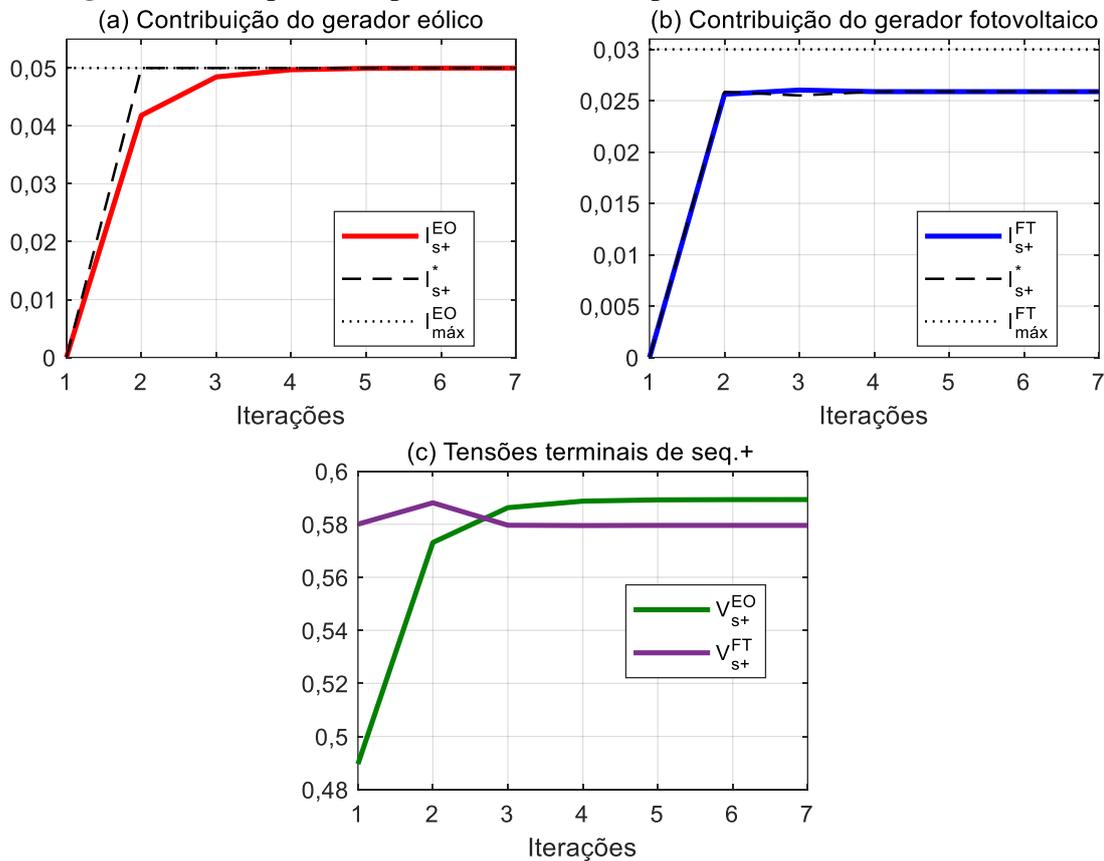
Tabela 5 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 6 utilizando-se o ANAFAS.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	4,065 $-89,5^\circ$	4,065 $150,5^\circ$	4,065 $30,5^\circ$
I_{EO}	0,05 $11,8^\circ$	0,05 $-108,2^\circ$	0,05 $131,8^\circ$
I_{FT}	0,026 $4,8^\circ$	0,026 $-115,2^\circ$	0,026 $124,8^\circ$
V_{EO}	0,479 $11,8^\circ$	0,479 $-108,2^\circ$	0,479 $131,8^\circ$
V_{FT}	0,578 $4,8^\circ$	0,578 $-115,2^\circ$	0,578 $124,8^\circ$

Fonte: (CEPEL, 2018).

Avaliou-se ainda para a falta FFF a resposta dos conversores utilizando-se o modo de controle RFT. A Figura 40 apresenta os resultados obtidos nessas condições.

Figura 40 – Resposta em pu do controle FRT para uma falta trifásica na barra 6.



Fonte: Autoria própria (2019).

Conforme a Figura 40, o processo iterativo alcançou convergência em 7 iterações para o modo de controle FRT. Neste caso, verifica-se nas Figuras 40(a) e 40(b) as contribuições de $0,0500|-89,9147^\circ$ pu e $0,0259|4,5955^\circ$ pu para I_{s+}^{EO} e I_{s+}^{FT} respectivamente. Além disso, verifica-se pela Figura 40(c) que a injeção de corrente reativa adicional pelo conversor do gerador eólico resultou nas tensões de $0,5893|0,0855^\circ$ pu e $0,5796|4,5955^\circ$ pu para V_{s+}^{EO} e V_{s+}^{FT} respectivamente, as quais correspondem a uma elevação percentual de aproximadamente 23% para V_{s+}^{EO} e 0,31% para V_{s+}^{FT} em relação às tensões obtidas com o modo de controle FPC.

No modo de controle FRT, constatou-se ainda ao fim do processo iterativo as injeções de 0,0295 pu de potência reativa pelo conversor do gerador eólico e de 0,0150 pu de potência ativa pelo conversor do gerador fotovoltaico. Neste caso, também se verifica que o conversor do gerador fotovoltaico foi capaz de manter constante a injeção de P_0 mesmo para a baixa a tensão terminal de pós-falta.

Ainda para o modo de controle FRT, a Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para a falta FFF na barra 6 em componentes de fase. Por essa tabela, verifica-se que a falta resultou numa corrente de curto-circuito de 4,0960 pu, que é cerca de 0,75% superior à corrente de curto obtida para o controle FPC. Além disso, verifica-se que as tensões de fase de pós-falta nas barras de instalação das UGDCFs encontram-se na faixa de operação dos conversores, razão pela qual nenhuma das unidades foi desligada.

Tabela 6 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.

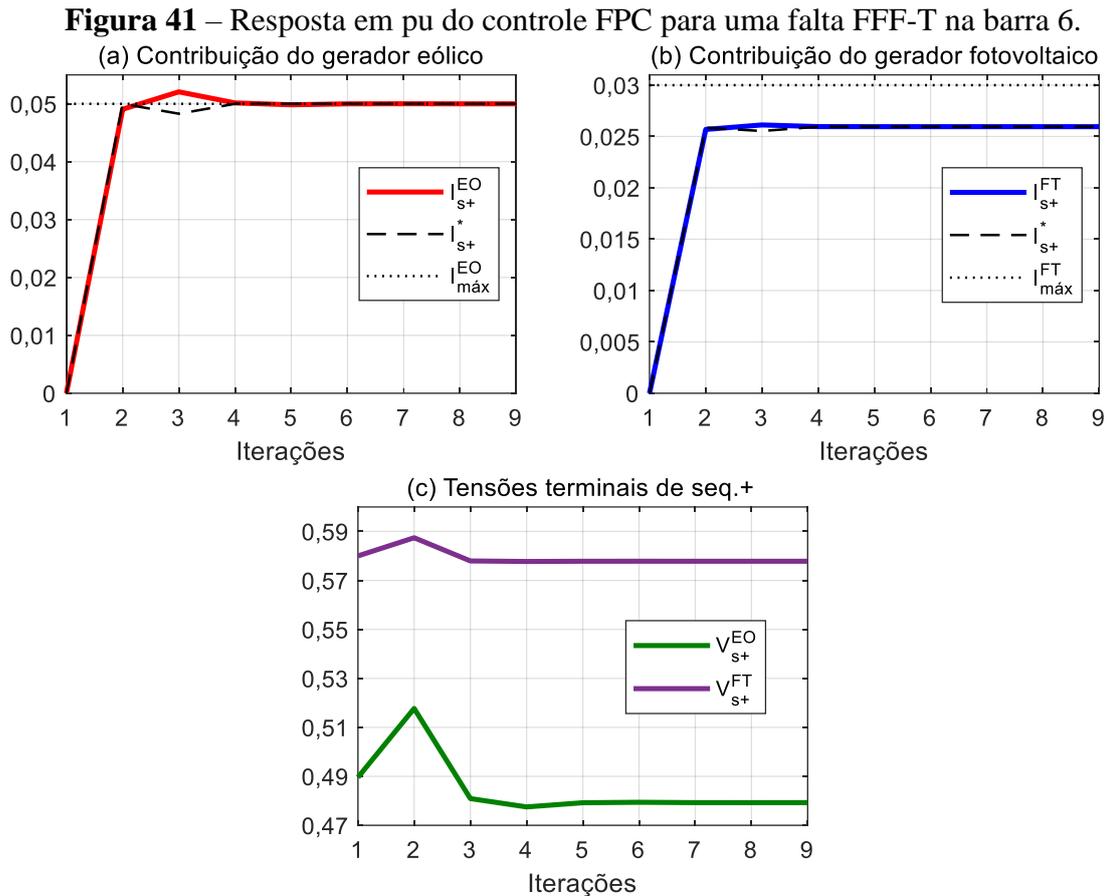
Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	4,0960 $-89,8479^\circ$	4,0960 $150,1521^\circ$	4,0960 $30,1521^\circ$
I_{EO}	0,0500 $-89,9147^\circ$	0,0500 $150,0853^\circ$	0,0500 $30,0853^\circ$
I_{FT}	0,0259 $4,5955^\circ$	0,0259 $-115,4045^\circ$	0,0259 $124,5955^\circ$
V_{EO}	0,5893 $0,0855^\circ$	0,5893 $-119,9145^\circ$	0,5893 $120,0855^\circ$
V_{FT}	0,5796 $4,5955^\circ$	0,5796 $-115,4045^\circ$	0,5796 $124,5955^\circ$

Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.1.2 Falta trifásica envolvendo a terra

A Figura 41 apresenta a resposta dos conversores no controle FPC para uma falta FFF-T na barra 6 do sistema de 17 barras da Figura 36. Neste caso, o processo iterativo também alcançou convergência em 9 iterações e resultou em contribuições, tensões terminais de pós-falta e injeções de potência iguais às obtidas para a falta FFF nessa barra, visto que $Z = 0$.

Para efeito comparativo, as Tabelas 7 e 8 também apresentam os resultados obtidos em componentes de fase utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC e o *software* comercial ANAFAS. A análise comparativa dessas tabelas demonstra que os resultados obtidos com o algoritmo são iguais aos fornecidos pelo ANAFAS considerando-se o mesmo número de casas decimais. Além disso, fica evidente que os resultados em componente de fase também coincidem com os resultados obtidos nesse domínio para a falta FFF.



Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 7 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	4,0653 $-89,4949^\circ$	4,0653 $150,5052^\circ$	4,0653 $30,5052^\circ$
I_{EO}	0,0500 $11,8436^\circ$	0,0500 $-108,1564^\circ$	0,0500 $131,8436^\circ$
I_{FT}	0,0260 $4,7598^\circ$	0,0260 $-115,2402^\circ$	0,0260 $124,7598^\circ$
V_{EO}	0,4793 $11,8434^\circ$	0,4793 $-108,1564^\circ$	0,4793 $131,8436^\circ$
V_{FT}	0,5778 $4,7598^\circ$	0,5778 $-115,2402^\circ$	0,5778 $124,7598^\circ$

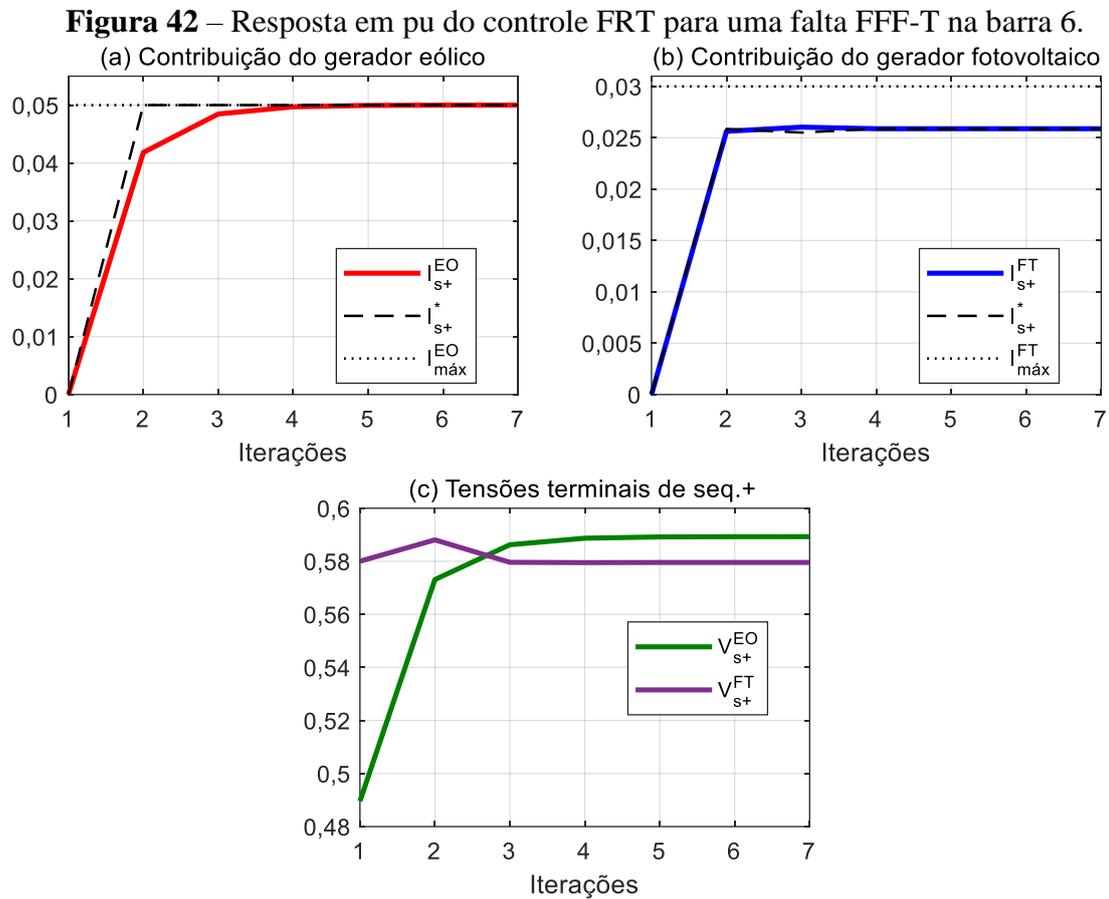
Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 8 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 6 utilizando-se o ANAFAS.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	4,065 $-89,5^\circ$	4,065 $150,5^\circ$	4,065 $30,5^\circ$
I_{EO}	0,05 $11,8^\circ$	0,05 $-108,2^\circ$	0,05 $131,8^\circ$
I_{FT}	0,026 $4,8^\circ$	0,026 $-115,2^\circ$	0,026 $124,8^\circ$
V_{EO}	0,479 $11,8^\circ$	0,479 $-108,2^\circ$	0,479 $131,8^\circ$
V_{FT}	0,578 $4,8^\circ$	0,578 $-115,2^\circ$	0,578 $124,8^\circ$

Fonte: (CEPEL, 2018).

Avaliou-se ainda para a falta FFF-T a resposta dos conversores utilizando-se o modo de controle RFT. A Figura 42 apresenta os resultados obtidos nessas condições.



No modo de controle FRT também foram verificados resultados semelhantes aos obtidos para a falta FFF, tanto no domínio das componentes de sequência quanto no domínio das componentes de fase. A Tabela 9 resume os resultados obtidos em componentes de fase para a falta FFF-T.

Tabela 9 – Resultados obtidos para a falta FFF-T na barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.

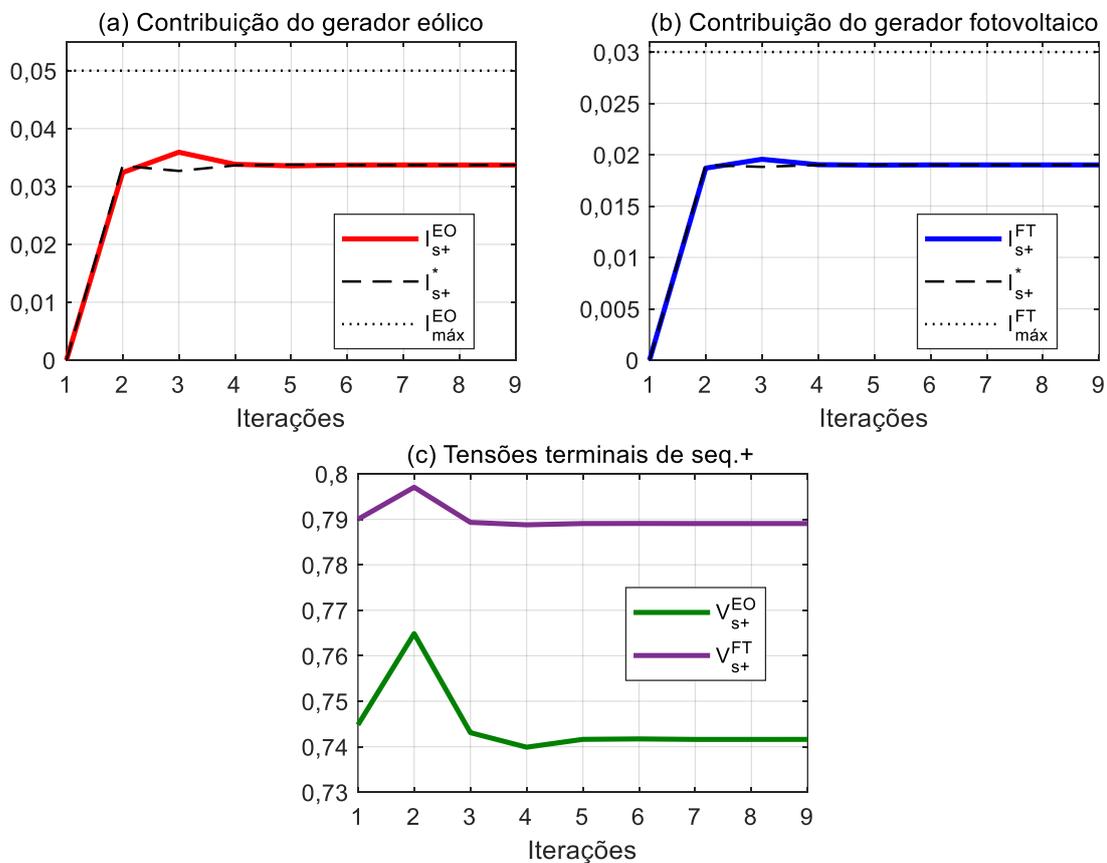
Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	4,0960 -89,8479°	4,0960 150,1521°	4,0960 30,1521°
I_{EO}	0,0500 -89,9147°	0,0500 150,0853°	0,0500 30,0853°
I_{FT}	0,0259 4,5955°	0,0259 -115,4045°	0,0259 124,5955°
V_{EO}	0,5893 0,0855°	0,5893 -119,9145°	0,5893 120,0855°
V_{FT}	0,5796 4,5955°	0,5796 -115,4045°	0,5796 124,5955°

Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.1.3 Falta bifásica

A Figura 43 apresenta a resposta dos conversores no controle FPC para uma falta FF envolvendo as fases a e b da barra 6 do sistema de 17 barras da Figura 36.

Figura 43 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 6.



Na Figura 43 verifica-se que o processo iterativo alcançou convergência em 9 iterações para o modo de controle FPC e resultou nas contribuições de $0,0337|5,3444^\circ$ pu e $0,0190|2,6457^\circ$ pu para I_{s+}^{EO} e I_{s+}^{FT} respectivamente, conforme as Figuras 43(a) e 43(b). Além disso, constata-se na Figura 43(c) as tensões de pós-falta de $0,7416|5,3444^\circ$ pu e $0,7891|2,6457^\circ$ pu para V_{s+}^{EO} e V_{s+}^{FT} respectivamente. Nesta falta, como as tensões de pós-faltas são superiores a $V_{lm\acute{a}x}$, ambos os conversores injetam correntes de sequência positiva inferiores às correntes máximas de saída dessas unidades.

No modo de controle FPC constatou-se ainda ao fim do processo iterativo que os conversores foram capazes de manter constante a injeção da potência ativa pré-falta, ou seja, $0,0250$ pu para o gerador eólico e $0,0150$ pu para o gerador fotovoltaicos, ambas com fator de potência unitário.

Para efeito comparativo, as Tabelas 10 e 11 apresentam os resultados obtidos em componentes de fase utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC e o *software* comercial ANAFAS. Pela análise da Tabela 10 verifica-se que a falta FF resultou numa corrente de curto-circuito de $3,5242$ pu. Além disso, verifica-se que as tensões de fase de pós-falta nas barras de instalação das UGDCFs encontram-se na faixa de operação dos conversores, razão pela qual nenhuma das unidades foi desligada. Ademais, o comparativo das Tabelas 10 e 11 demonstra que os resultados obtidos com o algoritmo proposto para o controle FPC são iguais aos fornecidos pelo ANAFAS considerando-se o mesmo número de casas decimais.

Tabela 10 – Resultados obtidos para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	$3,5242 -59,6465^\circ$	$3,5242 120,3535^\circ$	$0,0000 120,3535^\circ$
I_{EO}	$0,0337 5,3444^\circ$	$0,0337 -11,6556^\circ$	$0,0337 125,3444^\circ$
I_{FT}	$0,0190 2,6457^\circ$	$0,0190 -117,3543^\circ$	$0,0190 122,6457^\circ$
V_{EO}	$0,6310 -13,9977^\circ$	$0,6746 -94,6164^\circ$	$0,9960 124,0677^\circ$
V_{FT}	$0,6998 -12,0415^\circ$	$0,7160 -102,3122^\circ$	$0,9988 122,1642^\circ$

Fonte: Autoria própria (2019).

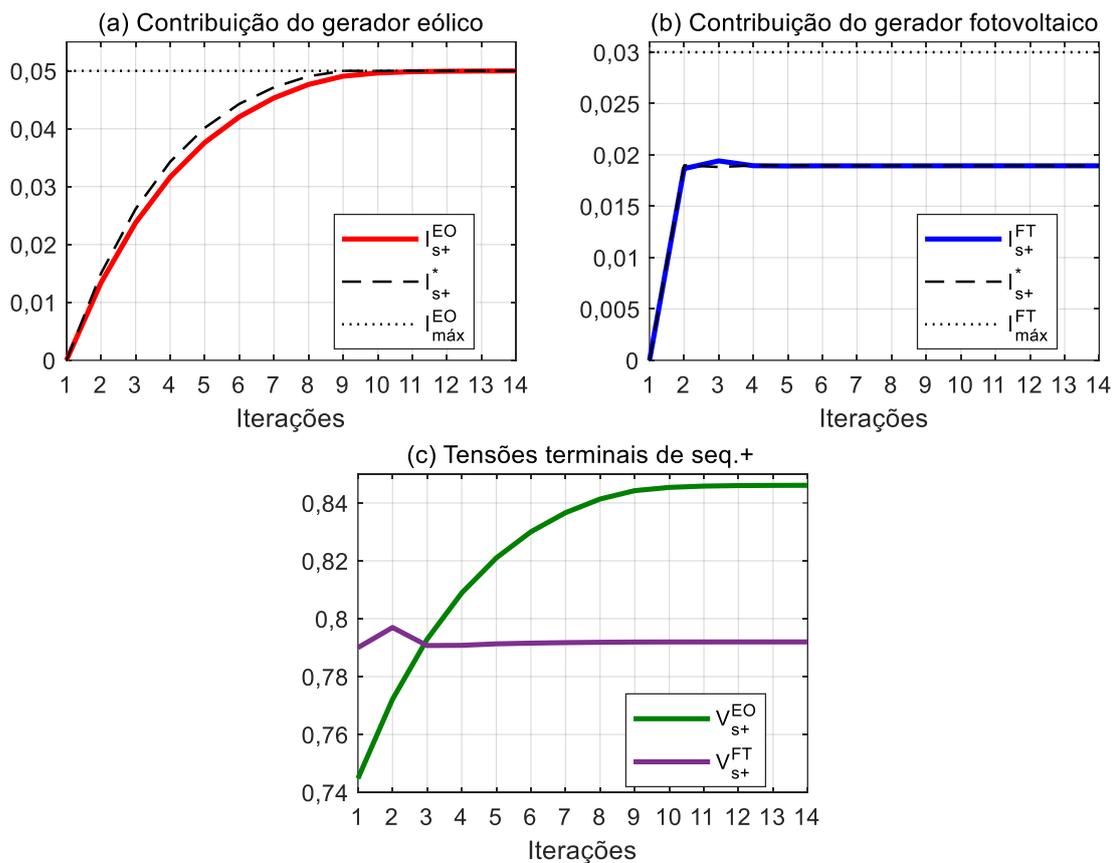
Tabela 11 – Resultados obtidos para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 6 utilizando-se o ANAFAS.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	3,524 -59,6°	3,524 120,4°	0,000 120,4°
I_{EO}	0,034 5,3°	0,034 -11,7°	0,034 125,3°
I_{FT}	0,019 2,6°	0,019 -117,3°	0,019 122,6°
V_{EO}	0,631 -14,0°	0,675 -94,6°	0,996 124,1°
V_{FT}	0,700 -12,0°	0,716 -102,3°	0,700 122,2°

Fonte: (CEPEL, 2018).

Avaliou-se ainda para a falta FF a resposta dos conversores utilizando-se o modo de controle RFT. A Figura 44 apresenta os resultados obtidos nessas condições.

Figura 44 – Resposta em pu do controle FRT para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 6.



Fonte: Autoria pr3pria (2019).

Conforme a Figura 44, o processo iterativo alcançou convergência em 14 iterações para o modo de controle FRT. Neste caso, verifica-se nas Figuras 44(a) e 44(b) as contribuições de

0,0500|-89,9206° pu e 0,0189|2,4944° pu para I_{s+}^{EO} e I_{s+}^{FT} respectivamente. Além disso, verifica-se pela Figura 44(c) que a injeção de corrente reativa adicional pelo conversor do gerador eólico resultou nas tensões de 0,8461|0,0795° pu e 0,7920|2,4944° pu para V_{s+}^{EO} e V_{s+}^{FT} respectivamente, as quais correspondem a uma elevação percentual de aproximadamente 14,09% para V_{s+}^{EO} e 0,37% para V_{s+}^{FT} em relação às tensões obtidas com o modo de controle FPC.

No modo de controle FRT constatou-se ainda ao fim do processo iterativo as injeções de 0,0423 pu de potência reativa pelo conversor do gerador eólico e de 0,0150 pu de potência ativa pelo conversor do gerador fotovoltaico. Neste caso, também se verifica que o conversor do gerador fotovoltaico foi capaz de manter constante a injeção de P_0 mesmo para a baixa a tensão terminal de pós-falta.

Ainda para o modo de controle FRT, a Tabela 12 apresenta os resultados obtidos para a falta FF na barra 6 em componentes de fase. Por essa tabela verifica-se que a falta resultou numa corrente de curto-circuito de 3,5476 pu, que é cerca de 0,66 % superior à corrente de curto obtida para o controle FPC. Além disso, verifica-se que as tensões de fase de pós-falta nas barras de instalação das UGDCFs encontram-se na faixa de operação dos conversores, razão pela qual nenhuma das unidades foi desligada.

Tabela 12 – Resultados obtidos para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.

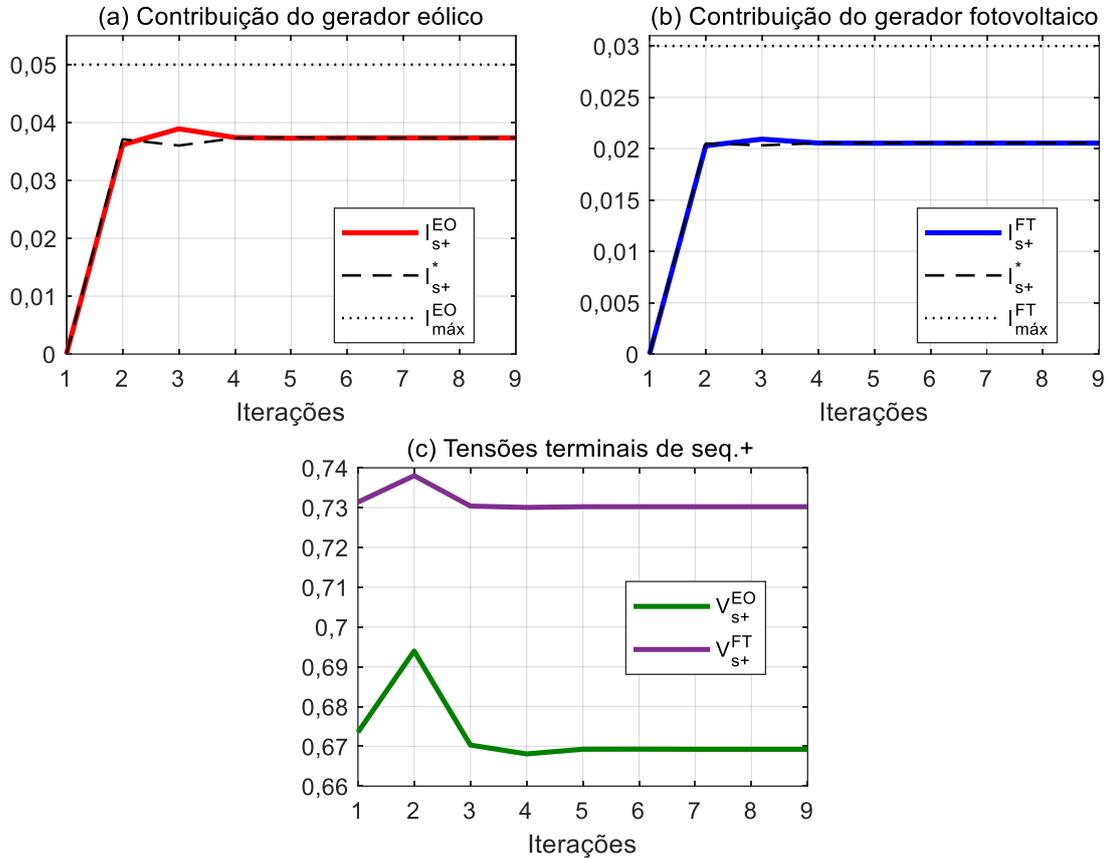
Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	3,5476 -59,8884°	3,5476 120,1116°	0,0000 120,1116°
I_{EO}	0,0500 -89,9206°	0,0500 150,0794°	0,0500 30,0794°
I_{FT}	0,0189 2,4944°	0,0189 -117,5056°	0,0189 122,4944°
V_{EO}	0,7515 -17,1383°	0,7512 -102,7075°	1,1029 120,0870°
V_{FT}	0,7019 -12,2329°	0,7189 -102,4094°	1,0031 121,9927°

Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.1.4 Falta bifásica envolvendo a terra

A Figura 45 apresenta a resposta dos conversores no controle FPC para uma falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 6 do sistema de 17 barras da Figura 36.

Figura 45 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 6.



Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 45 verifica-se que o processo iterativo alcançou convergência em 9 iterações para o modo de controle FPC e resultou nas contribuições de $0,0334|6,5096^\circ$ pu e $0,0205|3,0612^\circ$ pu para I_{s+}^{EO} e I_{s+}^{FT} respectivamente conforme as Figuras 45(a) e 45(b). Além disso, constata-se na Figura 45(c) as tensões de pós-falta de $0,6693|6,5096^\circ$ pu e $0,7302|3,0612^\circ$ pu para V_{s+}^{EO} e V_{s+}^{EO} respectivamente. Nesta falta, como as tensões de pós-faltas são superiores a $V_{Imáx}$, ambos os conversores injetam correntes de sequência positiva inferiores às correntes máximas de saída dessas unidades.

No modo de controle FPC constatou-se ainda ao fim do processo iterativo que os conversores dos geradores eólico e fotovoltaico também foram capazes de manter constante a injeção da potência ativa pré-falta com fator de potência unitário para a falta FF-T.

Para efeito comparativo, as Tabelas 13 e 14 apresentam os resultados obtidos em componentes de fase utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC e o *software* comercial ANAFAS. Pela análise da Tabela 13 verifica-se que a falta FF-T resultou numa corrente de curto-circuito de 3,9141 pu. Além disso, verifica-se que as tensões de fase de pós-falta nas barras de instalação das UGDCFs encontram-se na faixa de operação dos conversores, razão pela qual nenhuma das unidades foi desligada. Ademais, o comparativo das Tabelas 13 e 14 demonstra que os resultados obtidos com o algoritmo proposto para o controle FPC são iguais aos fornecidos pelo ANAFAS considerando-se o mesmo número de casas decimais.

Tabela 13 – Resultados obtidos para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	3,9141 $-85,4218^\circ$	3,9141 $146,1980^\circ$	0,0000 $120,3881^\circ$
I_{EO}	0,0374 $6,5096^\circ$	0,0374 $-113,4904^\circ$	0,0374 $126,5096^\circ$
I_{FT}	0,0205 $3,0612^\circ$	0,0205 $-116,9388^\circ$	0,0205 $123,0612^\circ$
V_{EO}	0,5802 $-8,3188^\circ$	0,6181 $-97,7109^\circ$	0,8523 $125,1916^\circ$
V_{FT}	0,6609 $-8,0460^\circ$	0,6743 $-105,4434^\circ$	0,8816 $122,6026^\circ$

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 14 – Resultados obtidos para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.

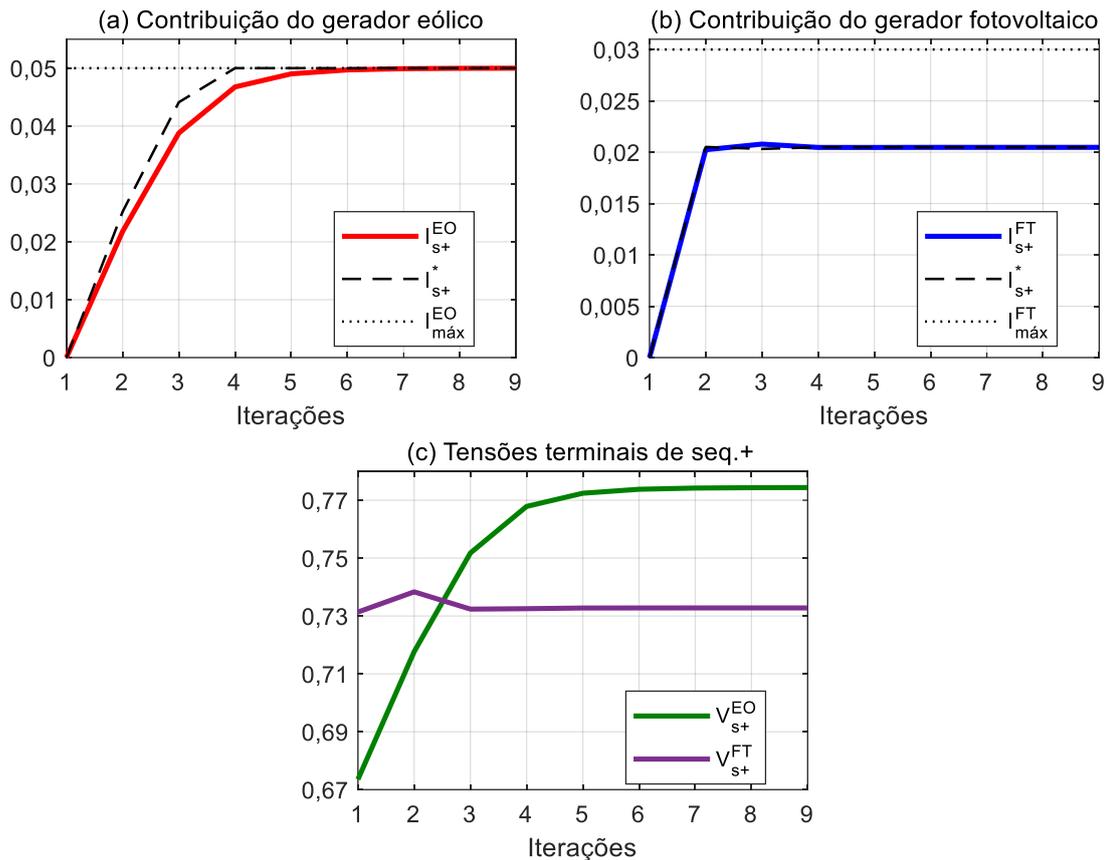
Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	3,914 $-85,4^\circ$	3,914 $146,2^\circ$	0,000 $120,4^\circ$
I_{EO}	0,037 $6,5^\circ$	0,037 $-113,5^\circ$	0,037 $126,5^\circ$
I_{FT}	0,020 $3,1^\circ$	0,020 $-117,0^\circ$	0,020 $123,1^\circ$
V_{EO}	0,580 $-8,3^\circ$	0,618 $-97,7^\circ$	0,852 $125,2^\circ$
V_{FT}	0,661 $-8,0^\circ$	0,674 $-105,4^\circ$	0,882 $122,6^\circ$

Fonte: (CEPEL, 2018).

Avaliou-se ainda para a falta FF-T a resposta dos conversores utilizando-se o modo de controle RFT, cujos resultados estão apresentados na Figura 46. Nesta figura, constata-se que o processo iterativo alcançou convergência em 9 iterações e resultou, conforme as Figuras 46(a) e 46(b), nas contribuições de $0,0500|{-89,9179^\circ}$ pu e $0,0205|{2,9033^\circ}$ pu para I_{s+}^{EO} e I_{s+}^{FT} respectivamente. Além disso, verifica-se pela Figura 46(c) que a injeção de corrente reativa adicional pelo conversor do gerador eólico resultou nas tensões de $0,7744|{0,0822^\circ}$ pu e

0,7328|2,9033° pu para V_{s+}^{EO} e V_{s+}^{FT} respectivamente, as quais correspondem a uma elevação percentual de aproximadamente 15,70% para V_{s+}^{EO} e 0,35% para V_{s+}^{FT} em relação às tensões obtidas com o modo de controle FPC.

Figura 46 – Resposta em pu do controle FRT para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 6.



Fonte: Autoria própria (2019).

No modo de controle FRT constatou-se ainda ao fim do processo iterativo as injeções de 0,0387 pu de potência reativa pelo conversor do gerador eólico e de 0,0150 pu de potência ativa pelo conversor do gerador fotovoltaico. Neste caso, também se verifica que o conversor do gerador fotovoltaico foi capaz de manter constante a injeção de P_0 mesmo para a baixa a tensão terminal de pós-falta.

Ainda para o modo de controle FRT, a Tabela 15 apresenta os resultados obtidos para a falta FF-T na barra 6 em componentes de fase. Por essa tabela verifica-se que a falta resultou numa corrente de curto-circuito de 3,9407 pu, que é cerca de 0,68 % superior à corrente de curto obtida para o controle FPC. Além disso, verifica-se que as tensões de fase de pós-falta nas

barras de instalação dos conversores encontram-se na faixa de operação dos conversores, razão pela qual nenhuma das unidades foi desligada.

Tabela 15 – Resultados obtidos para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.

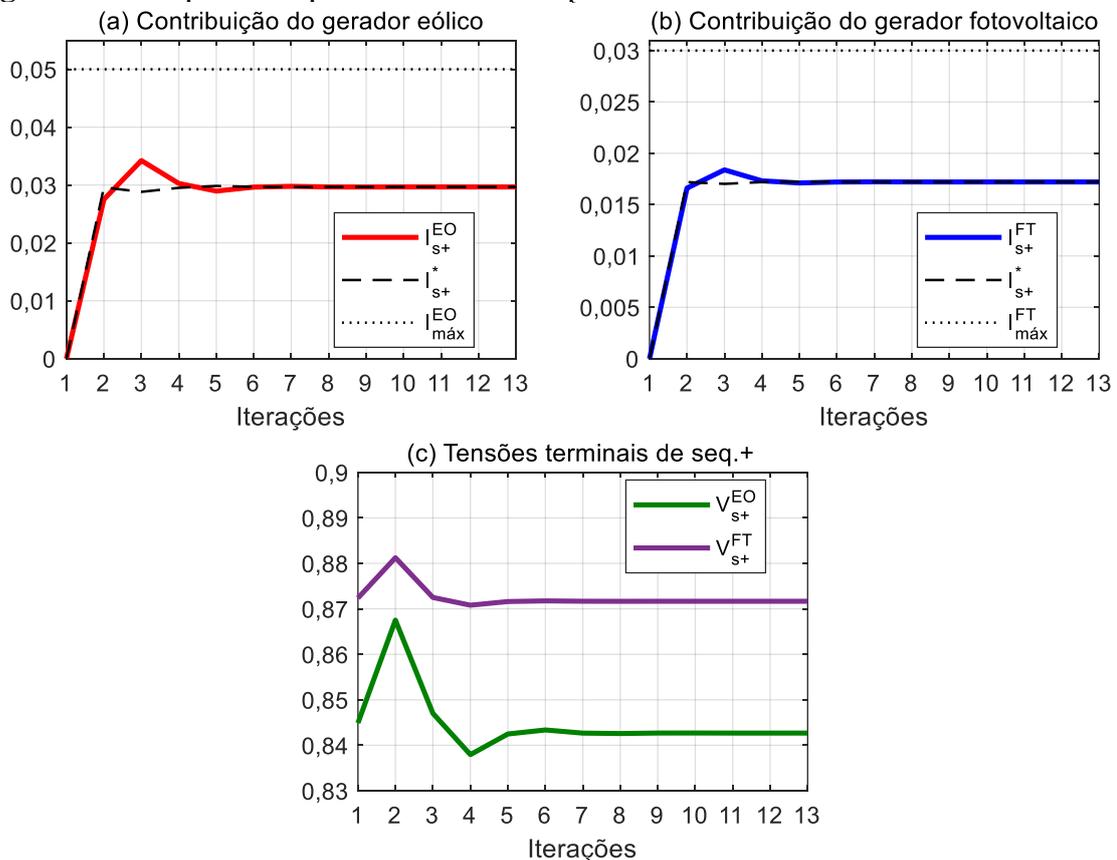
Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	3,9407 -85,6893°	3,9407 145,9305°	0,0000 120,1207°
I_{EO}	0,0500 -89,9179°	0,0500 150,0821°	0,0500 30,0821°
I_{FT}	0,0205 2,9033°	0,0205 -117,0967°	0,0205 122,9033°
V_{EO}	0,7005 -13,1490°	0,7003 -106,6924°	0,9595 120,0896°
V_{FT}	0,6628 -8,2343°	0,6768 -105,5543°	0,8849 122,4246°

Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.1.5 Falta fase à terra

A Figura 47 apresenta a resposta dos conversores no controle FPC para uma falta F-T envolvendo a fase a da barra 6 do sistema de 17 barras da Figura 36.

Figura 47 – Resposta em pu do controle FPC para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 6.



Na Figura 47, verifica-se que o processo iterativo alcançou convergência em 13 iterações para o modo de controle FPC e resultou nas contribuições de $0,0297|4,1830^\circ$ pu e $0,0172|2,1954^\circ$ pu para I_{s+}^{EO} e I_{s+}^{FT} respectivamente, conforme as Figuras 47(a) e 47(b). Além disso, constata-se na Figura 47(c) as tensões de pós-falta de $0,8427|4,1830^\circ$ pu e $0,8717|2,1954^\circ$ pu para V_{s+}^{EO} e V_{s+}^{FT} respectivamente. Nesta falta, como as tensões de pós-faltas são superiores a $V_{lm\acute{a}x}$, ambos os conversores injetam correntes de sequência positiva inferiores às correntes máximas de saída dessas unidades.

No modo de controle FPC constatou-se ainda ao fim do processo iterativo que os conversores dos geradores eólico e fotovoltaico também foram capazes de manter constante a injeção da potência ativa pré-falta com fator de potência unitário.

Para efeito comparativo, as Tabelas 16 e 17 apresentam os resultados obtidos em componentes de fase utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC e o *software* comercial ANAFAS. Pela análise da Tabela 16, verifica-se que a falta F-T resultou numa corrente de curto-circuito de 3,7105 pu. Além disso, verifica-se que as tensões de fase de pós-falta nas barras de instalação das UGDCFs encontram-se na faixa de operação dos conversores, razão pela qual nenhuma das unidades foi desligada. Ademais, o comparativo das Tabelas 16 e 17 demonstra que os resultados obtidos com o algoritmo proposto para o controle FPC são iguais aos fornecidos pelo ANAFAS considerando-se o mesmo número de casas decimais.

Tabela 16 – Resultados obtidos para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	$3,7105 -89,6858^\circ$	$0,0000 -123,8758^\circ$	$0,0000 124,1830^\circ$
I_{EO}	$0,0297 4,1830^\circ$	$0,0297 -115,8170^\circ$	$0,0297 124,1830^\circ$
I_{FT}	$0,0172 2,1954^\circ$	$0,0172 -117,8046^\circ$	$0,0172 122,1954^\circ$
V_{EO}	$0,6881 5,0542^\circ$	$0,9380 -107,9276^\circ$	$0,9216 115,4948^\circ$
V_{FT}	$0,7442 2,5179^\circ$	$0,9453 -111,2233^\circ$	$0,9386 115,3094^\circ$

Fonte: Autoria própria (2019).

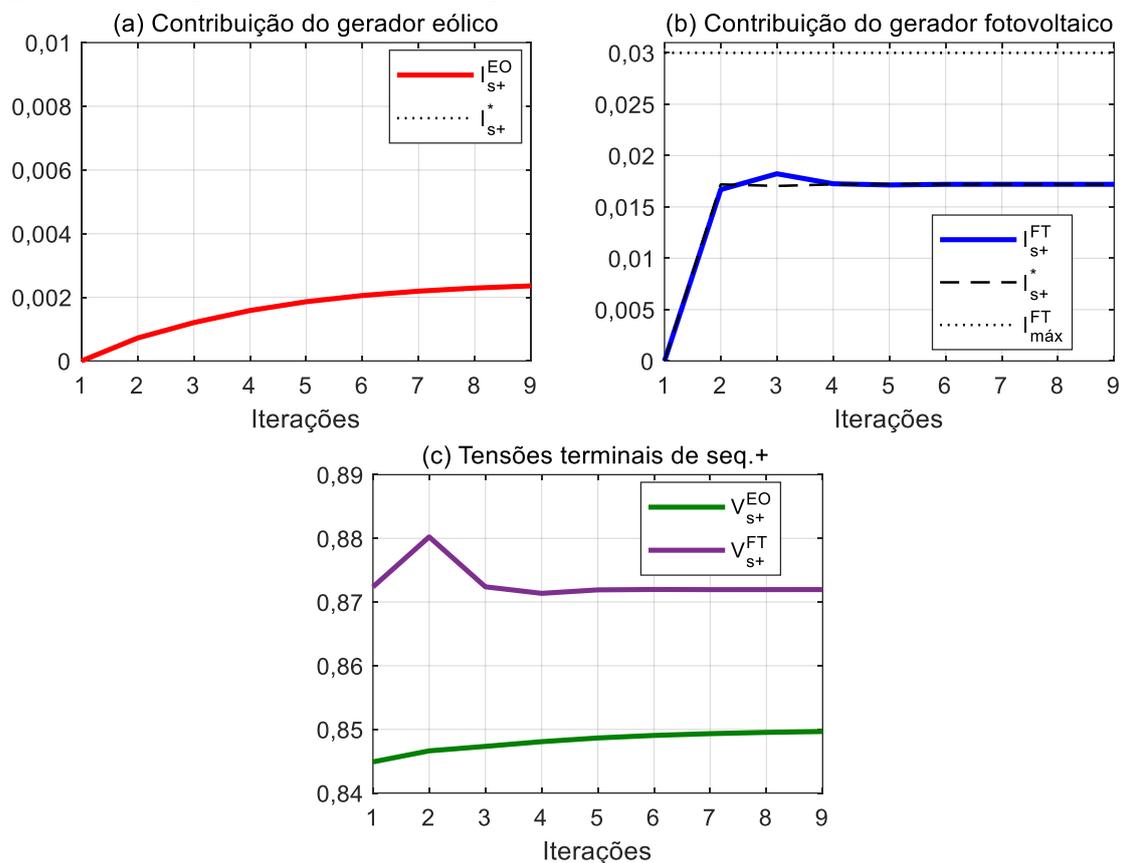
Tabela 17 – Resultados obtidos para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 6 utilizando-se o ANAFAS.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	3,711 -89,7°	0,000 -123,9°	0,000 124,2°
I_{EO}	0,030 4,2°	0,030 -115,8°	0,030 124,2°
I_{FT}	0,017 2,2°	0,017 -117,8°	0,017 122,2°
V_{EO}	0,688 5,1°	0,938 -108,0°	0,922 115,5°
V_{FT}	0,744 2,5°	0,945 -111,2°	0,939 115,3°

Fonte: (CEPEL, 2018).

Avaliou-se ainda para a falta F-T a resposta dos conversores utilizando-se o modo de controle RFT, cujos resultados estão apresentados na Figura 48.

Figura 48 – Resposta do controle FRT para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 6.



Fonte: Autoria própria (2019).

Por meio da Figura 48, constata-se que o processo iterativo alcançou convergência em 9 iterações e resultou, conforme as Figuras 48(a) e 48(b), nas contribuições de $0,0024|-89,9242^\circ$ pu e $0,0172|2,0676^\circ$ pu para I_{s+}^{EO} e I_{s+}^{FT} respectivamente. Além disso, verifica-se pela Figura 48(c) que a injeção de corrente reativa adicional pelo conversor do

gerador eólico resultou nas tensões de $0,8497|0,0758^\circ$ pu e $0,8720|2,0676^\circ$ pu para V_{s+}^{EO} e V_{s+}^{FT} respectivamente, as quais correspondem a uma elevação percentual de aproximadamente 0,83% para V_{s+}^{EO} e 0,03% para V_{s+}^{FT} em relação às tensões obtidas com o modo de controle FPC. Neste caso, a elevação na tensão V_{s+}^{EO} foi especialmente baixa devido à falta F-T resultar em tensões de pós-falta próximas do limite V_{su}^{for} do controle FRT, onde a corrente reativa adicional a ser injetada tende a zero.

No modo de controle FRT constatou-se ainda ao fim do processo iterativo as injeções de 0,0020 pu de potência reativa pelo conversor do gerador eólico e de 0,0150 pu de potência ativa pelo conversor do gerador fotovoltaico. Neste caso, também se verifica que o conversor do gerador fotovoltaico foi capaz de manter constante a injeção de P_0 com fator de potência unitário para a falta F-T.

Ainda para o modo de controle FRT, a Tabela 18 apresenta os resultados obtidos para a falta F-T na barra 6 em componentes de fase. Por essa tabela verifica-se que a falta resultou numa corrente de curto-circuito de 3,7125 pu que é cerca de 0,05 % superior à corrente de curto obtida para o controle FPC. Além disso, verifica-se que as tensões de fase de pós-falta nas barras de instalação dos conversores encontram-se na faixa de operação dos conversores, razão pela qual nenhuma das unidades foi desligada.

Tabela 18 – Resultados obtidos para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 6 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	$3,7125 -89,8984^\circ$	$0,0000 -124,0885^\circ$	$0,0000 124,2917^\circ$
I_{EO}	$0,0024 -89,9242^\circ$	$0,0024 150,0758^\circ$	$0,0024 30,0758^\circ$
I_{FT}	$0,0172 2,0676^\circ$	$0,0172 -117,9324^\circ$	$0,0172 122,0676^\circ$
V_{EO}	$0,6945 0,0700^\circ$	$0,9369 -111,6768^\circ$	$0,9370 111,8337^\circ$
V_{FT}	$0,7444 2,4047^\circ$	$0,9458 -111,3569^\circ$	$0,9387 115,1736^\circ$

Fonte: Autoria própria (2019).

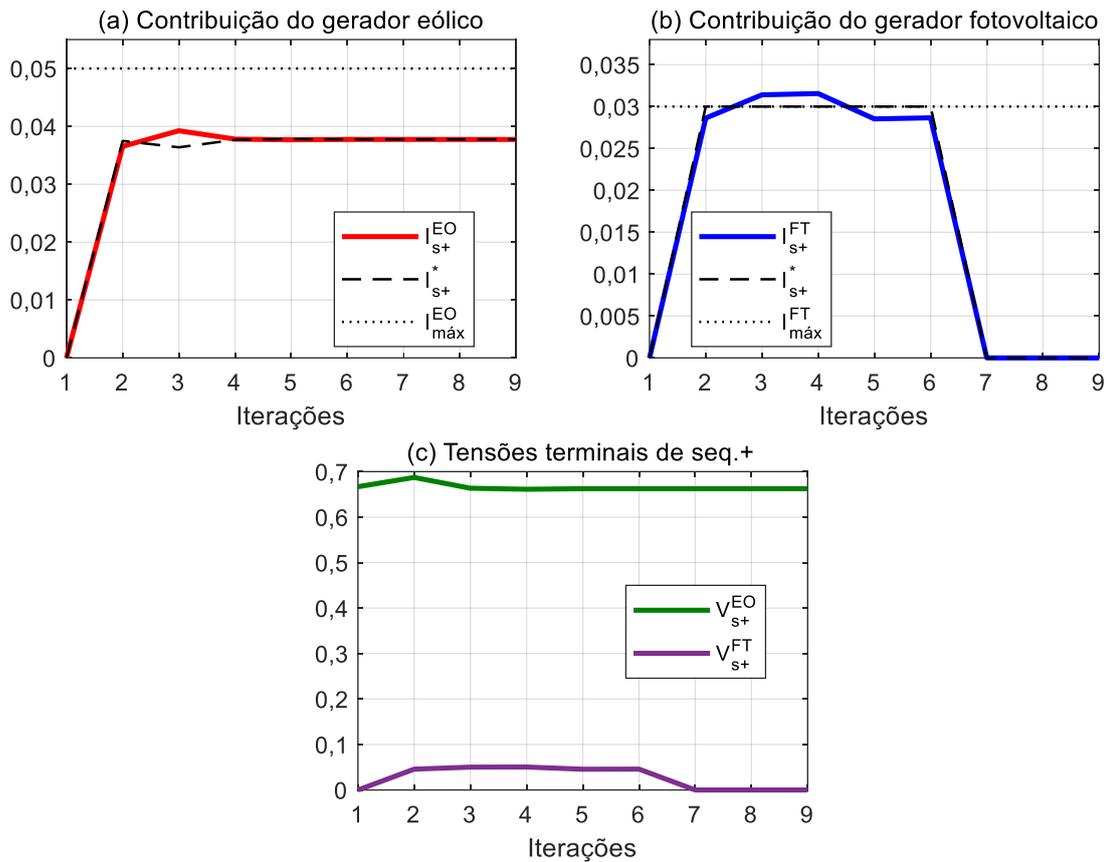
5.2.2 Faltas na barra 5

Esta seção apresenta os resultados obtidos para as faltas FFF, FFF-T, FF, FF-T e F-T na barras 5 do sistema de 17 barras da Figura 36.

5.2.2.1 Falta trifásica

A Figura 49 apresenta a resposta dos conversores no controle FPC para uma falta FFF na barra 5 do sistema de 17 barras da Figura 36

Figura 49 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FFF na barra 5.



Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 49 verifica-se que o processo iterativo alcançou convergência em 9 iterações para o modo de controle FPC e resultou nas contribuições de $0,0377 \angle 6,6043^\circ$ pu para I_{s+}^{EO} e 0 pu para I_{s+}^{FT} , conforme as Figuras 49(a) e 49(b) respectivamente. Além disso, constata-se na Figura 49(c) as tensões de pós-falta de $0,6642 \angle 6,6043^\circ$ pu e $0,0000 \angle 89,9960^\circ$ pu para V_{s+}^{EO} e V_{s+}^{FT} respectivamente. Neste caso, verificou-se que apenas o conversor do gerador eólico foi capaz de permanecer conectado à rede e manter constante o fornecimento de P_0 com fator de potência unitário sem exceder a corrente máxima de saída dessa unidade. Por outro lado, a proximidade do gerador fotovoltaico ao ponto de falta resultou na desconexão do conversor por subtensão.

As Tabelas 19 e 20 apresentam os resultados obtidos em componentes de fase utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC e o *software* comercial ANAFAS. Pela análise da Tabela 19 verifica-se que a falta FFF resultou numa corrente de curto-circuito de 4,1124 pu. Além disso, verifica-se que apenas as tensões de fase de pós-falta na barra de instalação gerador eólico encontram-se na faixa de operação dos conversores. No caso do gerador fotovoltaico, as tensões de fase foram inferiores a V_{min} , razão pela qual essa unidade foi desconectada. Ademais o comparativo das tabelas demonstra que os resultados obtidos com o algoritmo proposto para o controle FPC são iguais aos fornecidos pelo ANAFAS considerando-se o mesmo número de casas decimais.

Tabela 19 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	4,1124 -89,8259°	4,1124 150,1741°	4,1124 30,1741°
I_{EO}	0,03774 6,6043°	0,03774 -113,3957°	0,03774 126,6043°
I_{FT}	0,0000 0,0000°	0,0000 0,0000°	0,0000 0,0000°
V_{EO}	0,6624 6,6044°	0,6624 -113,3957°	0,6624 126,6044°
V_{FT}	0,0000 89,9960°	0,0000 -30,0040°	0,0000 -150,0040°

Fonte: A autoria própria (2019).

Tabela 20 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 5 utilizando-se o ANAFAS.

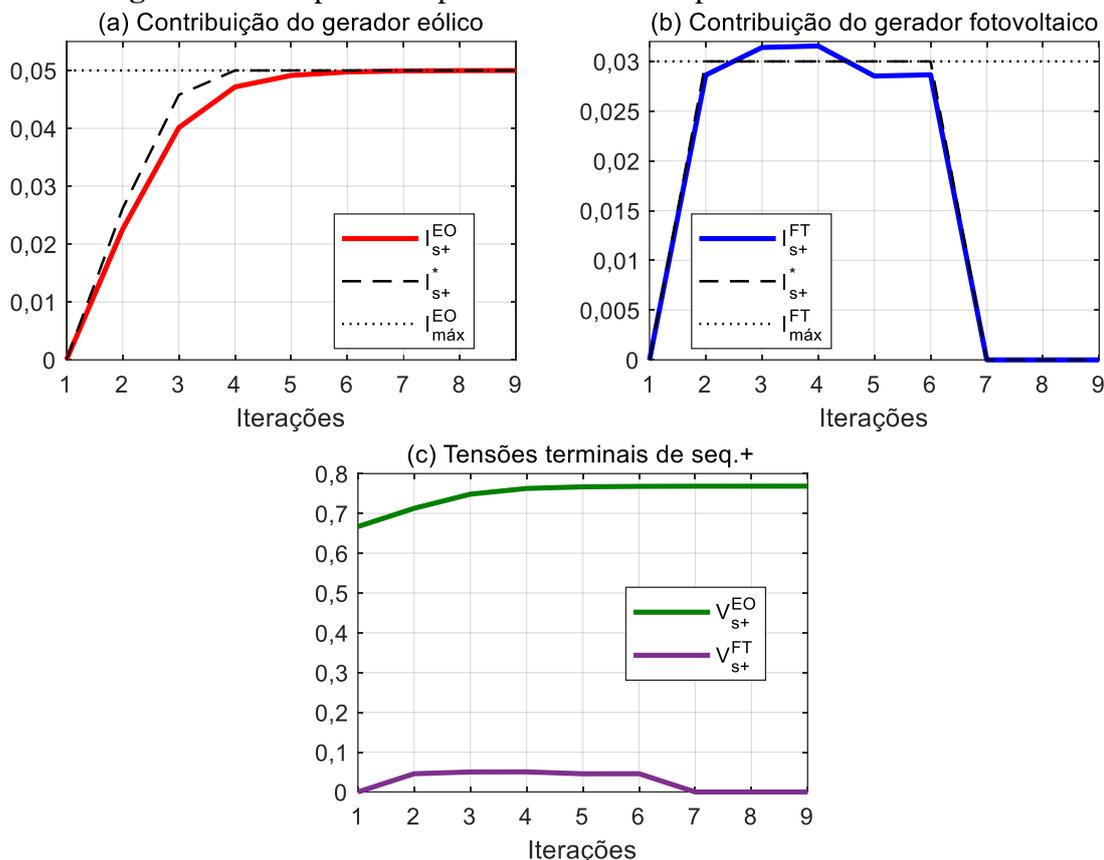
Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	4,112 -89,8°	4,112 150,2°	4,112 30,2°
I_{EO}	0,037 6,6°	0,037 -113,4°	0,037 126,6°
I_{FT}	0,000 0,0°	0,000 0,0°	0,000 0,0°
V_{EO}	0,662 6,6°	0,662 -113,4°	0,662 126,6°
V_{FT}	0,000 90,0°	0,000 -30,0°	0,000 -150,0°

Fonte: (CEPEL, 2018).

Avaliou-se ainda para a falta FFF a resposta dos conversores utilizando-se o modo de controle RFT, cujos resultados estão apresentados na Figura 50. Nessa, verifica-se que o processo iterativo alcançou convergência em 9 iterações e resultou, conforme as Figuras 50(a) e 50(b), nas contribuições de $0,0500|-90,0000^\circ$ pu e 0 pu para I_{s+}^{EO} e I_{s+}^{FT} respectivamente. Além disso, verifica-se pela Figura 50(c) que a injeção de corrente reativa adicional pelo conversor do gerador eólico resultou na tensão de $0,7684|0,0000^\circ$ pu para V_{s+}^{EO} , a qual

corresponde a uma elevação percentual de aproximadamente 15,69% para V_{s+}^{EO} em relação à tensão obtida com o modo de controle FPC. Neste caso, não houve elevação na tensão V_{s+}^{FT} em função do conversor do gerador fotovoltaico estar desconectado da rede.

Figura 50 – Resposta em pu do controle FFT para a falta FFF na barra 5.



Fonte: Autoria própria (2019).

No modo de controle FRT constatou-se ainda ao fim do processo iterativo as injeções de 0,0384 pu de potência reativa pelo conversor do gerador eólico e de 0 pu de potência ativa pelo conversor do gerador fotovoltaico.

Ainda para o modo de controle FRT, a Tabela 21 apresenta os resultados obtidos para a falta FFF na barra 5 em componentes de fase. Por essa tabela verifica-se que a falta resultou numa corrente de curto-circuito de 4,1293 pu, que é cerca de 0,41 % superior à corrente de curto obtida para o controle FPC. Além disso, também se verifica que apenas as tensões de fase de pós-falta na barra de instalação do gerador eólico encontram-se na faixa de operação dos conversores, razão pela qual essa unidade não foi desconectada.

Tabela 21 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.

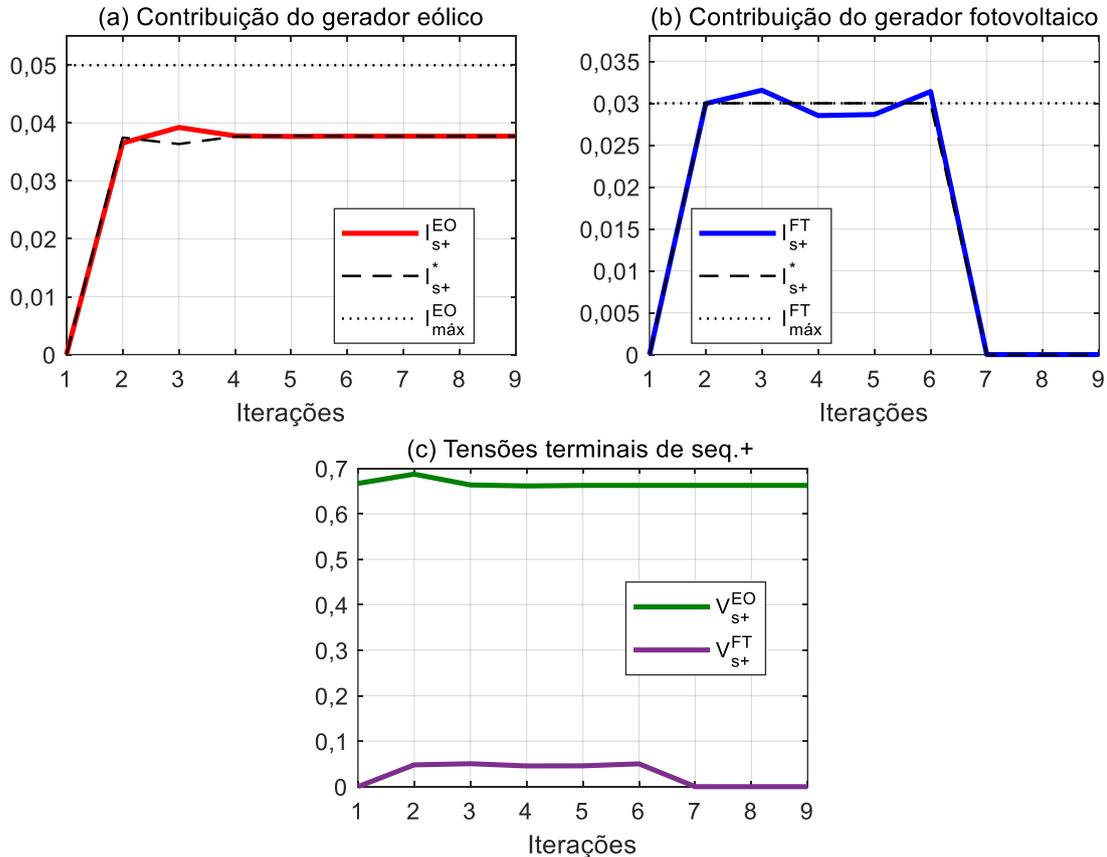
Grandezas (<i>pu</i>)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	4,1293 -90,0000°	4,1293 150,0000°	4,1293 30,0000°
I_{EO}	0,0500 -90,0000°	0,0500 150,0000°	0,0500 30,0000°
I_{FT}	0,0000 0,0000°	0,0000 0,0000°	0,0000 0,0000°
V_{EO}	0,7684 0,0000°	0,7684 -120,0000°	0,7684 120,0000°
V_{FT}	0,0000 89,9960°	0,0000 -30,0040°	0,0000 -150,0040°

Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.2.2 Falta trifásica envolvendo a terra

A Figura 51 apresenta a resposta dos conversores no controle FPC para uma falta FFF-T na barra 5 do sistema de 17 barras da Figura 36.

Figura 51 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FFF-T na barra 5.



Neste caso, o processo iterativo também alcançou convergência em 9 iterações e resultou em contribuições, tensões terminais de pós-falta e injeções de potência iguais às obtidas para a falta FFF nessa barra, visto que $Z = 0$.

Para efeito comparativo, as Tabelas 22 e 23 apresentam os resultados obtidos em componentes de fase utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC e o *software* comercial ANAFAS. A análise comparativa dessas tabelas demonstra que os resultados obtidos com o algoritmo são iguais aos fornecidos pelo ANAFAS considerando-se o mesmo número de casas decimais. Além disso, fica evidente que os resultados em componente de fase também coincidem com os resultados obtidos nesse domínio para a falta FFF.

Tabela 22 – Resultados obtidos para a falta FFF-T na barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.

Grandezas (<i>pu</i>)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	4,1124 -89,8259°	4,1124 150,1741°	4,1124 30,1741°
I_{EO}	0,03774 6,6043°	0,03774 -113,3957°	0,03774 126,6043°
I_{FT}	0,0000 0,0000°	0,0000 0,0000°	0,0000 0,0000°
V_{EO}	0,6624 6,6044°	0,6624 -113,3957°	0,6624 126,6044°
V_{FT}	0,0000 89,9960°	0,0000 -30,0040°	0,0000 -150,0040°

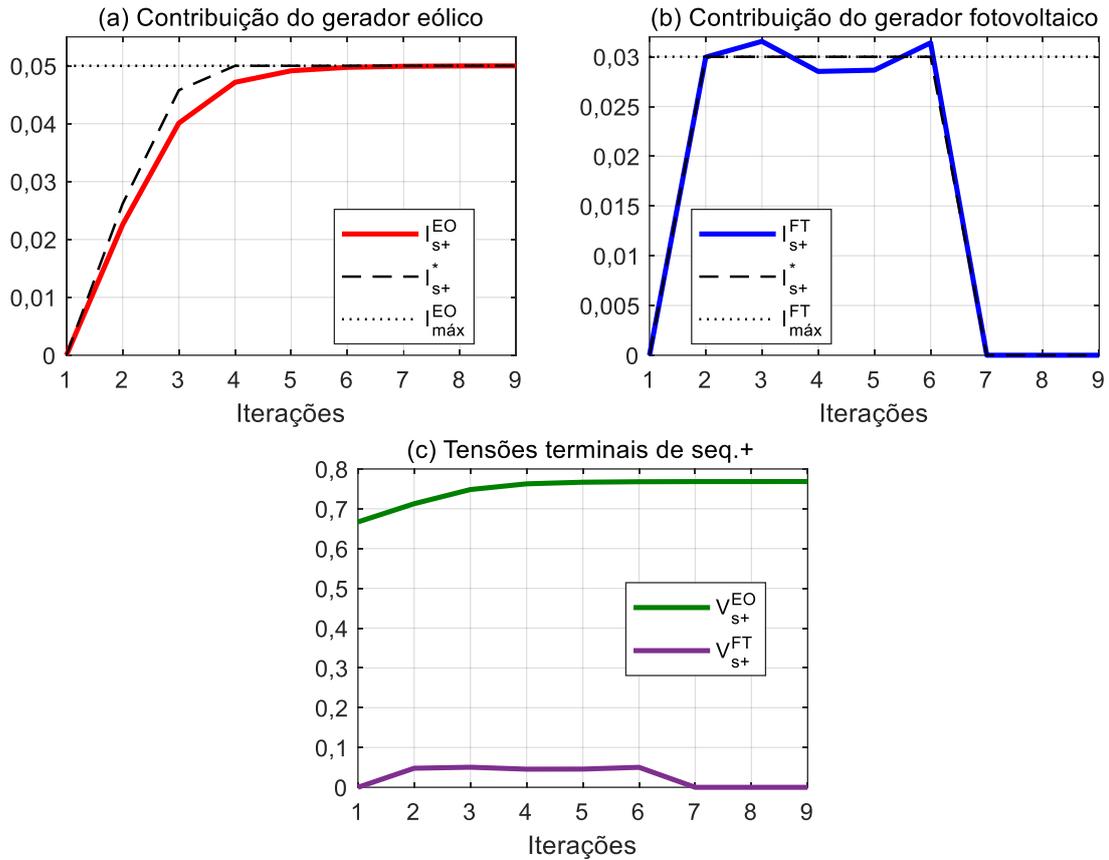
Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 23 – Resultados obtidos para a falta FFF-T na barra 5 utilizando-se o ANAFAS.

Grandezas (<i>pu</i>)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	4,112 -89,8°	4,112 150,2°	4,112 30,2°
I_{EO}	0,037 6,6°	0,037 -113,4°	0,037 126,6°
I_{FT}	0,000 0,0°	0,000 0,0°	0,000 0,0°
V_{EO}	0,662 6,6°	0,662 -113,4°	0,662 126,6°
V_{FT}	0,000 90,0°	0,000 -30,0°	0,000 -150,0°

Fonte: (CEPEL, 2018).

Avaliou-se ainda para a falta FFF-T a resposta dos conversores utilizando-se o modo de controle RFT. A Figura 52 apresenta os resultados obtidos nessas condições.

Figura 52 – Resposta em pu do controle FRT para a falta FFF-T na barra 5.

No modo de controle FRT também foram verificados resultados semelhantes aos obtidos para a falta FFF, tanto no domínio das componentes de sequência quanto no domínio das componentes de fase. A Tabela 24 resume os resultados obtidos em componentes de fase para a falta FFF-T.

Tabela 24 – Resultados obtidos para a falta FFF-T na barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.

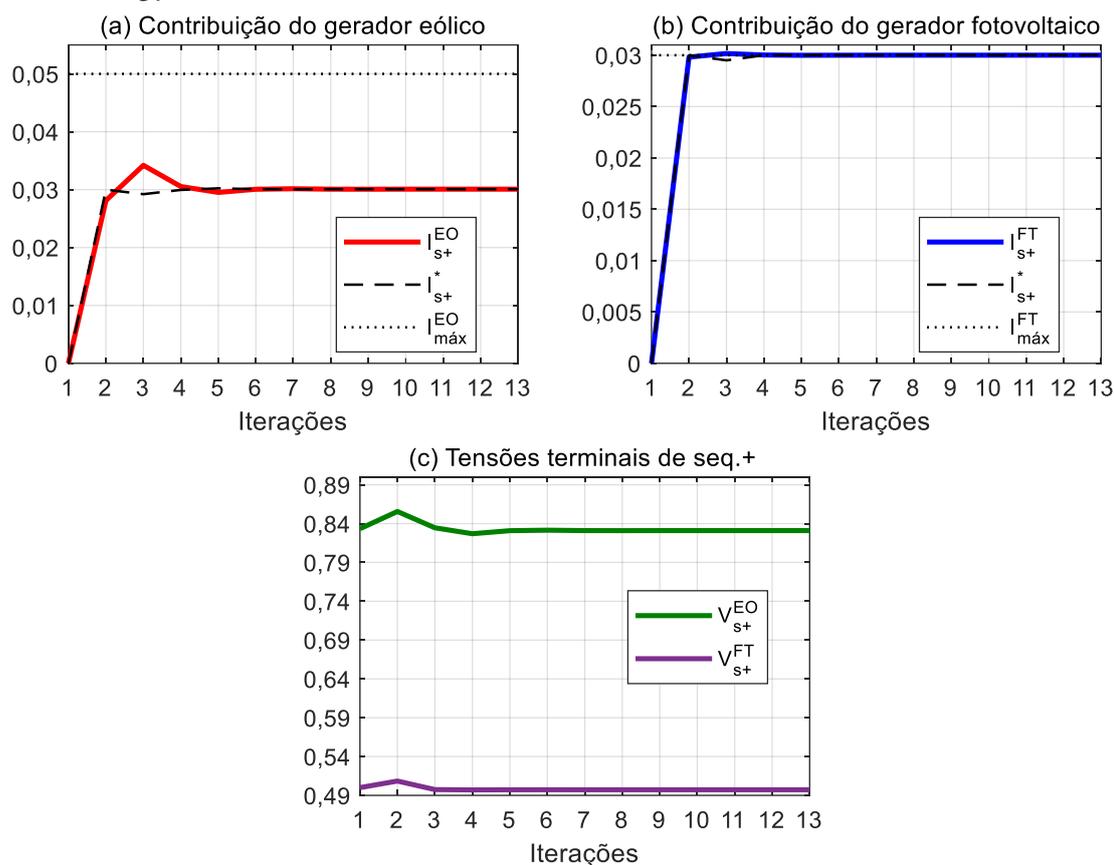
Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	4,1293 -90,0000°	4,1293 150,0000°	4,1293 30,0000°
I_{EO}	0,0500 -90,0000°	0,0500 150,0000°	0,0500 30,0000°
I_{FT}	0,0000 0,0000°	0,0000 0,0000°	0,0000 0,0000°
V_{EO}	0,7684 0,0000°	0,7684 -120,0000°	0,7684 120,0000°
V_{FT}	0,0000 89,9960°	0,0000 -30,0040°	0,0000 -150,0040°

Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.2.3 Falta bifásica

A Figura 53 apresenta a resposta dos conversores no controle FPC para uma falta FF envolvendo as fases a e b da barra 5 do sistema de 17 barras da Figura 36.

Figura 53 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 5.



Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 53 verifica-se que o processo iterativo alcançou convergência em 13 iterações para o modo de controle FPC e resultou nas contribuições de $0,0301\angle 4,3183^\circ$ pu e $0,0300\angle 6,0693^\circ$ pu para I_{s+}^{EO} e I_{s+}^{FT} respectivamente conforme as Figuras 53(a) e 53(b). Além disso, constata-se na Figura 53(c) as tensões de pós-falta de $0,8310\angle 4,3183^\circ$ pu e $0,4972\angle 6,0693^\circ$ pu para V_{s+}^{EO} e V_{s+}^{FT} respectivamente. Nesta falta, nota-se que apenas I_{s+}^{FT} satura na corrente máxima dessa unidade em função de V_{s+}^{FT} ser inferior a $V_{Im\acute{a}x}$.

No modo de controle FPC constatou-se ainda ao fim do processo iterativo que apenas o conversor de gerador eólico foi capaz de manter a injeção de P_0 com fator de potência unitário.

No caso do gerador fotovoltaico, a saturação de I_{s+}^{FT} impossibilitou a manutenção de P_0 para a baixa a tensão terminal de pós-falta.

Para efeito comparativo, as Tabelas 25 e 26 apresentam os resultados obtidos em componentes de fase utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC e o *software* comercial ANAFAS. Pela análise da Tabela 25 verifica-se que a falta FF resultou numa corrente de curto-circuito de 3,5584 pu. Além disso, verifica-se que as tensões de fase de pós-falta nas barras de instalação dos conversores encontram-se na faixa de operação dos conversores, razão pela qual nenhuma das unidades foi desligada.

Tabela 25 – Resultados obtidos para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	3,5584 -59,4447°	3,5584 120,5553°	0,0000 120,5554°
I_{EO}	0,0301 4,3183°	0,0301 -115,6817°	0,0301 124,3183°
I_{FT}	0,0300 6,0693°	0,0300 -113,9307°	0,0300 126,0693°
V_{EO}	0,7514 -6,2932°	0,7720 -104,5320°	0,9972 123,6907°
V_{FT}	0,4563 -56,9457°	0,5393 -56,4812°	0,9956 123,3059°

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 26 – Resultados obtidos para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 5 utilizando-se o ANAFAS.

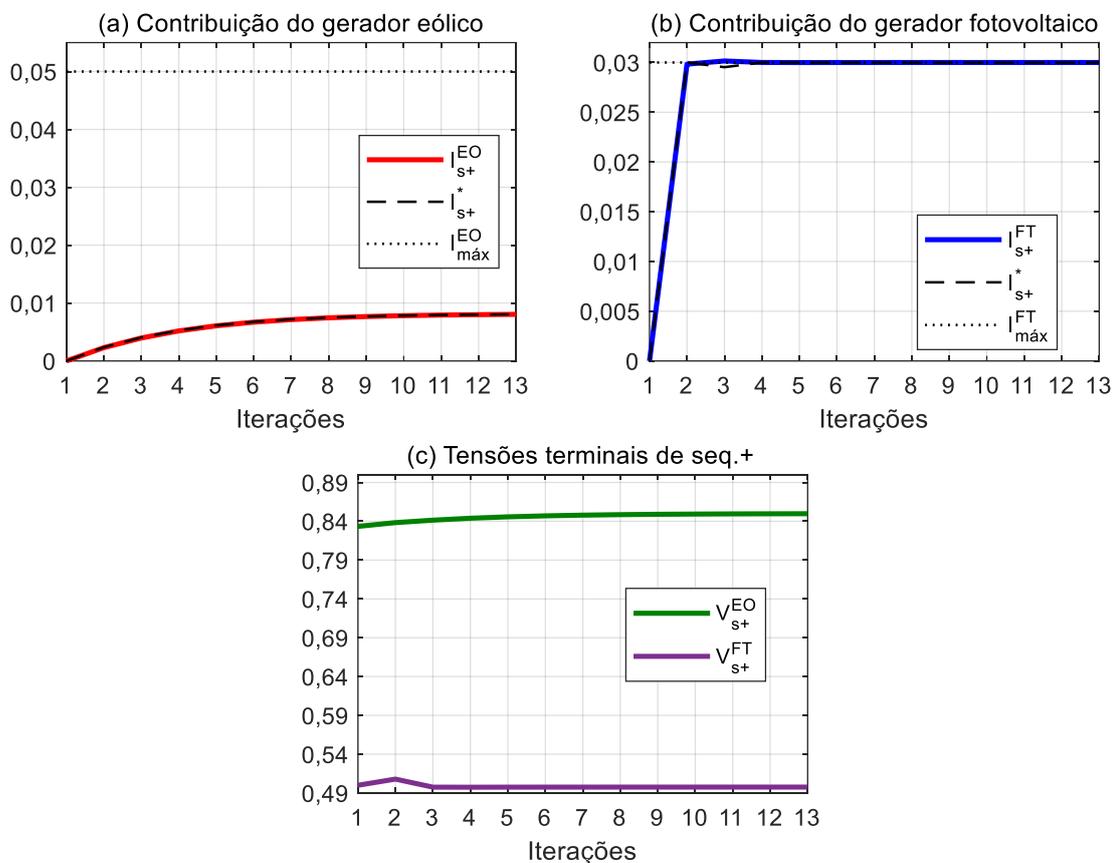
Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	3,558 -59,4°	3,558 120,6°	0,000 120,6°
I_{EO}	0,030 4,3°	0,030 -115,7°	0,030 124,3°
I_{FT}	0,030 6,1°	0,030 -114,0°	0,030 126,1°
V_{EO}	0,751 -6,3°	0,772 -104,5°	0,997 123,7°
V_{FT}	0,456 -57,0°	0,539 -56,5°	0,996 123,3°

Fonte: (CEPEL, 2018).

Pelo comparativo das Tabelas 25 e 26 observa-se também que os resultados obtidos com o algoritmo proposto para o controle FPC são iguais aos fornecidos pelo ANAFAS considerando-se o mesmo número de casas decimais.

Avaliou-se ainda para a falta FF a resposta dos conversores utilizando-se o modo de controle RFT. A Figura 54 apresenta os resultados obtidos nessas condições.

Figura 54 – Resposta em pu do controle FRT para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 5.



Pela Figura 54, observa-se que o processo iterativo alcançou convergência em 13 iterações para o modo de controle FRT e resultou, conforme as Figuras 54(a) e 54(b), nas contribuições de $0,0081|-89,9169^\circ$ pu e $0,0300|5,9251^\circ$ pu para I_{s+}^{EO} e I_{s+}^{FT} respectivamente. Além disso, verifica-se pela Figura 54(c) que a injeção de corrente reativa adicional pelo conversor do gerador eólico resultou nas tensões de $0,8497|0,0831^\circ$ pu e $0,4977|5,9251^\circ$ pu para V_{s+}^{EO} e V_{s+}^{FT} respectivamente, as quais correspondem a uma elevação percentual de aproximadamente 2,26% para V_{s+}^{EO} e 0,10% para V_{s+}^{FT} em relação às tensões obtidas com o modo de controle FPC.

Neste caso, também observa-se uma baixa elevação na tensão V_{s+}^{EO} em função da falta FF resultar em tensões pós-falta próximas do limite V_{su}^{for} do controle FRT, onde a corrente reativa adicional a ser injetada tende a zero.

No modo de controle FRT constatou-se ainda ao fim do processo iterativo as injeções de 0,0068 pu de potência reativa pelo conversor do gerador eólico e de 0,0149 pu de potência

ativa pelo conversor do gerador fotovoltaico. Neste caso, também se verifica que o conversor do gerador fotovoltaico foi incapaz de manter constante a injeção de P_0 .

Ainda para o modo de controle FRT, a Tabela 27 apresenta os resultados obtidos para a falta FF na barra 5 em componentes de fase. Por essa tabela verifica-se que a falta resultou numa corrente de curto-circuito de 3,5614 pu, que é cerca de 0,08 % superior à corrente de curto obtida para o controle FPC. Além disso, também se verifica que as tensões de fase de pós-falta nas barras de instalação dos conversores encontram-se na faixa de operação dos conversores, razão pela qual nenhuma das unidades foi desligada.

Tabela 27 – Resultados obtidos para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.

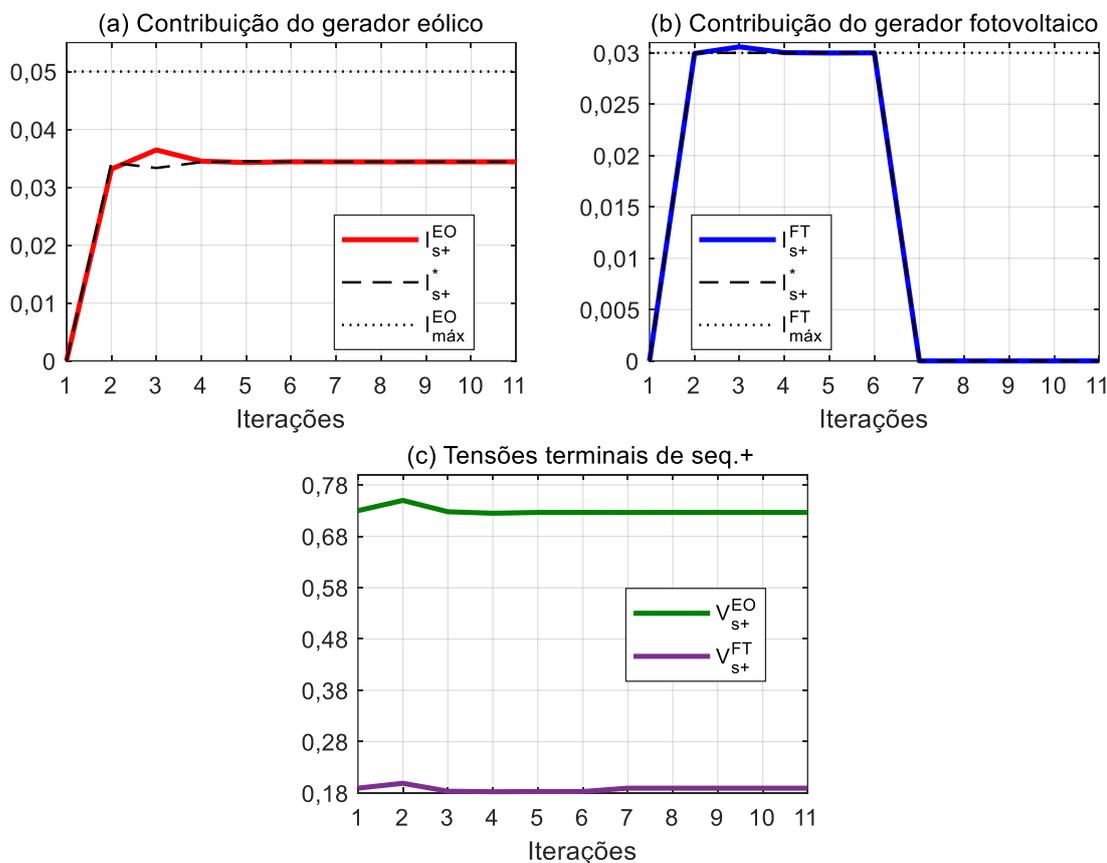
Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	3,5614 $-59,5842^\circ$	3,5614 $120,4158^\circ$	0,0000 $120,4158^\circ$
I_{EO}	0,0081 $-89,9169^\circ$	0,0081 $150,0831^\circ$	0,0081 $30,0831^\circ$
I_{FT}	0,0300 $5,9251^\circ$	0,0300 $-114,0749^\circ$	0,0300 $125,9251^\circ$
V_{EO}	0,7809 $-10,5989^\circ$	0,7790 $-109,2820^\circ$	1,0163 $120,1376^\circ$
V_{FT}	0,4567 $-56,0871^\circ$	0,5398 $-56,6234^\circ$	0,9965 $123,1641^\circ$

Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.2.4 Falta bifásica envolvendo a terra

A Figura 55 apresenta a resposta dos conversores no controle FPC para uma falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 5 do sistema de 17 barras. Na Figura, verifica-se que o processo iterativo alcançou convergência em 11 iterações para o modo de controle FPC e resultou nas contribuições de 0,0344| $5,5105^\circ$ pu e 0 pu para I_{s+}^{EO} e I_{s+}^{FT} respectivamente, conforme as Figuras 55(a) e 55(b). Além disso, constata-se na Figura 55(c) as tensões de pós-falta de 0,7266| $5,5103^\circ$ pu e 0,1894| $0,1590^\circ$ pu para V_{s+}^{EO} e V_{s+}^{FT} respectivamente. Neste caso, verificou-se que apenas o conversor do gerador eólico foi capaz de permanecer conectado à rede e manter constante o fornecimento de P_0 com fator de potência unitário sem exceder a corrente máxima de saída dessa unidade. Por outro lado, a proximidade do gerador fotovoltaico ao ponto de falta resultou na desconexão do conversor por subtensão.

Figura 55 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 5.



Para efeito comparativo, as Tabelas 28 e 29 apresentam os resultados obtidos em componentes de fase utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC e o *software* comercial ANAFAS.

Tabela 28 – Resultados obtidos para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	5,2295 $-106,9276^\circ$	5,2295 $167,2456^\circ$	0,0000 $120,1590^\circ$
I_{EO}	0,0344 $5,5105^\circ$	0,0344 $-114,4896^\circ$	0,0344 $125,5105^\circ$
I_{FT}	0,0000 $0,0000^\circ$	0,0000 $0,0000^\circ$	0,0000 $0,0000^\circ$
V_{EO}	0,6920 $1,2440^\circ$	0,7026 $-109,8065^\circ$	0,7895 $125,0831^\circ$
V_{FT}	0,1894 $-59,8410^\circ$	0,1894 $-59,8410^\circ$	0,3789 $120,1590^\circ$

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 29 – Resultados obtidos para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 5 utilizando-se o ANAFAS.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	5,230 $-107,0^\circ$	5,230 $167,2^\circ$	0,000 $120,2^\circ$
I_{EO}	0,034 $5,5^\circ$	0,034 $-114,5^\circ$	0,034 $125,5^\circ$
I_{FT}	0,000 $0,0^\circ$	0,000 $0,0^\circ$	0,000 $0,0^\circ$
V_{EO}	0,692 $1,2^\circ$	0,703 $-109,8^\circ$	0,790 $125,1^\circ$
V_{FT}	0,189 $-59,8^\circ$	0,189 $-59,8^\circ$	0,379 $120,2^\circ$

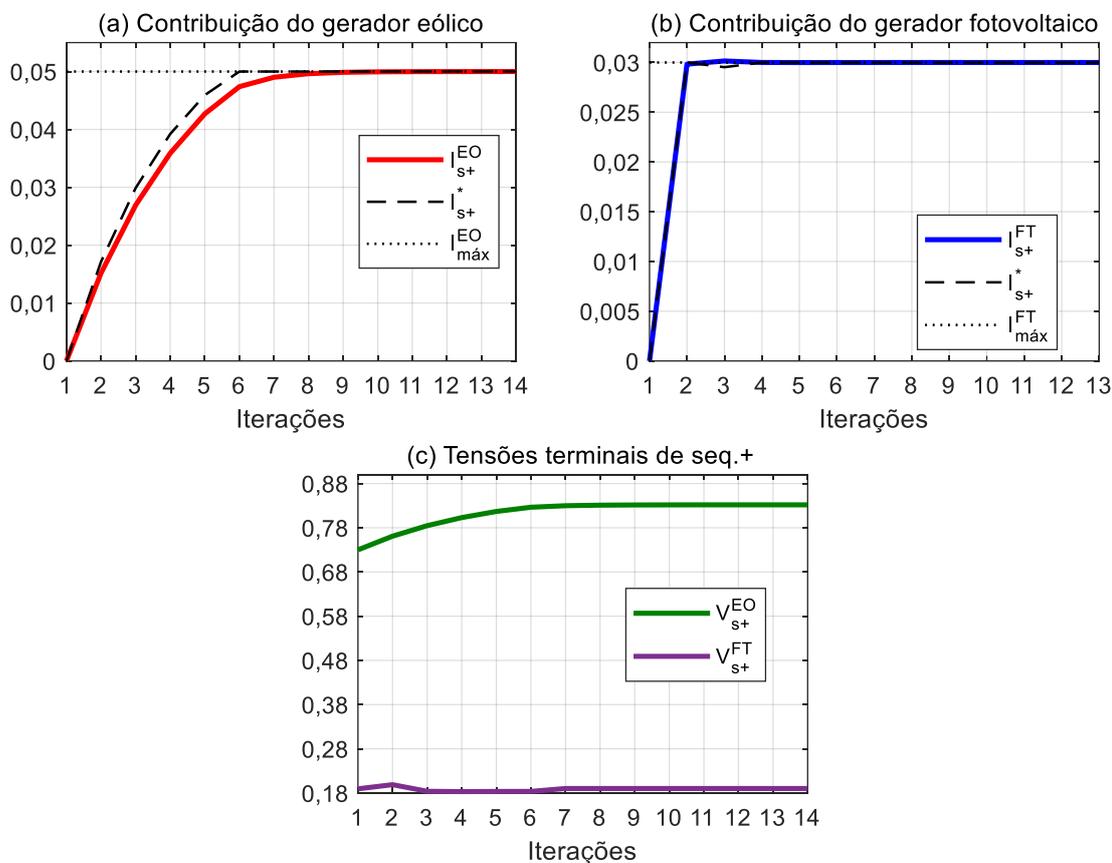
Fonte: (CEPEL, 2018).

Pela análise da Tabela 28 verifica-se que a falta FF-T resultou numa corrente de curto-circuito de 5,2295 pu. Além disso, verifica-se que apenas as tensões de fase de pós-falta na barra de instalação gerador eólico encontram-se na faixa de operação dos conversores. No caso do gerador fotovoltaico, as tensões nas fases a e b foram inferiores a V_{min} , razão pela qual essa unidade foi desconectada. Ademais o comparativo das Tabelas 27 e 28 demonstra que os resultados obtidos com o algoritmo proposto para o controle FPC são iguais aos fornecidos pelo ANAFAS considerando-se o mesmo número de casas decimais.

Avaliou-se ainda para a falta FF-T a resposta dos conversores utilizando-se o modo de controle RFT. Conforme apresentado na Figura 56, o processo iterativo alcançou convergência neste caso em 14 iterações e resultou, conforme as Figuras 56(a) e 56(b), nas contribuições de 0,0500| $-89,9999^\circ$ pu e 0 pu para I_{s+}^{EO} e I_{s+}^{FT} respectivamente. Além disso, verifica-se pela Figura 56(c) que a injeção de corrente reativa adicional pelo conversor do gerador eólico resultou na tensão de 0,8318| $0,0001^\circ$ pu para V_{s+}^{EO} e 0,1903| $0,0000^\circ$ pu para V_{s+}^{FT} , as quais correspondem a uma elevação percentual de aproximadamente 14,49% para V_{s+}^{EO} e 0,48% para V_{s+}^{FT} em relação às tensões obtidas com o modo de controle FPC. Neste caso, observa-se que elevação na tensão V_{s+}^{FT} foi insuficiente para evitar a desconexão do conversor do gerador fotovoltaico por subtensão.

No modo de controle FRT constatou-se ainda ao fim do processo iterativo as injeções de 0,0416 pu de potência reativa pelo conversor do gerador eólico e de 0 pu de potência ativa pelo conversor do gerador fotovoltaico.

Figura 56 – Resposta em pu do controle FRT para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 5.



Ainda para o modo de controle FRT, a Tabela 30 apresenta os resultados obtidos para a falta FF-T na barra 5 em componentes de fase. Por essa tabela verifica-se que a falta resultou numa corrente de curto-circuito de 5,2521 pu, que é cerca de 0,43 % superior à corrente de curto obtida para o controle FPC. Além disso, também se verifica que apenas as tensões de fase de pós-falta na barra de instalação do gerador eólico encontram-se na faixa de operação dos conversores, razão pela qual essa unidade não foi desconectada.

Tabela 30 – Resultados obtidos para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.

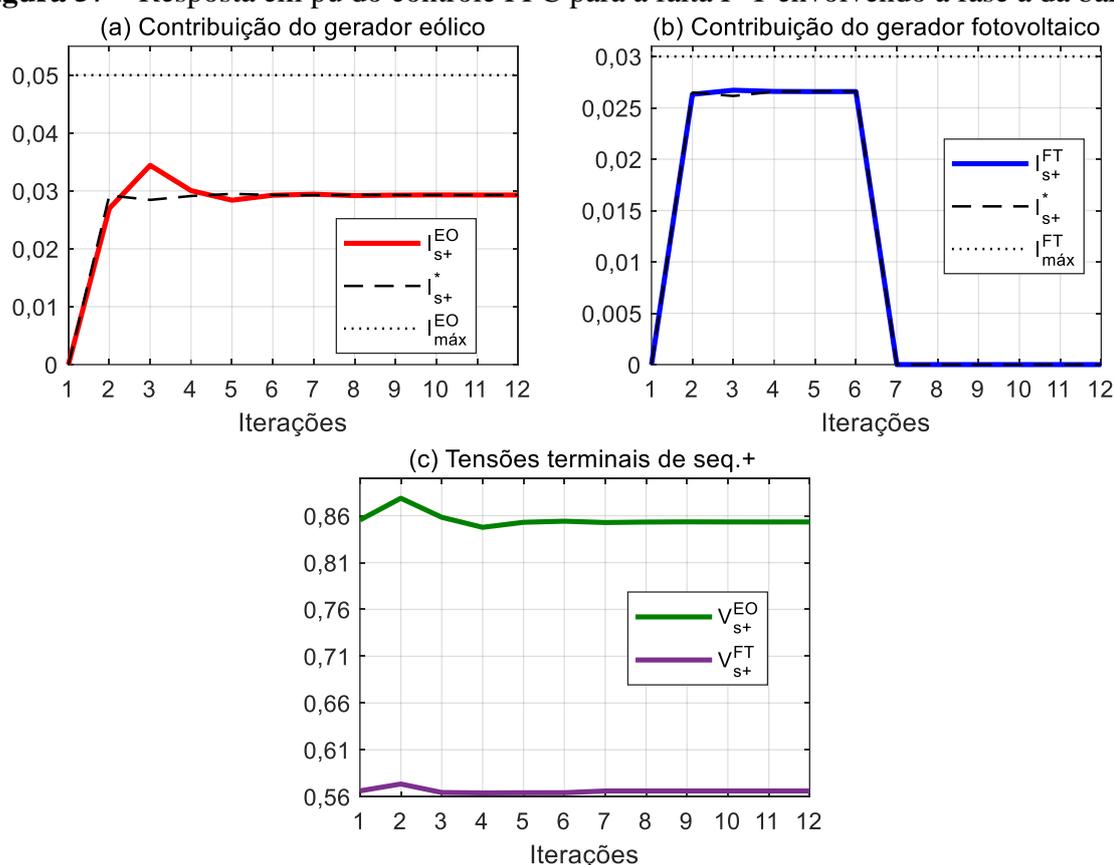
Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	5,2521 $-107,0866^\circ$	5,2521 $167,0866^\circ$	0,0000 $120,0001^\circ$
I_{EO}	0,0500 $-90,0000^\circ$	0,0500 $150,0001^\circ$	0,0500 $30,0001^\circ$
I_{FT}	0,0000 $0,0000^\circ$	0,0000 $0,0000^\circ$	0,0000 $0,0000^\circ$
V_{EO}	0,8020 $-3,9248^\circ$	0,8020 $-116,0750^\circ$	0,8952 $120,0000^\circ$
V_{FT}	0,1913 $-60,0000^\circ$	0,1913 $-60,0000^\circ$	0,3805 $120,0000^\circ$

Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.2.5 Falta fase à terra

A Figura 57 apresenta a resposta dos conversores no controle FPC para uma falta F-T envolvendo a fase a da barra 5 do sistema de 17 barras da Figura 36.

Figura 57 – Resposta em pu do controle FPC para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 5.



Na Figura 57 verifica-se que o processo iterativo alcançou convergência em 12 iterações para o modo de controle FPC e resultou nas contribuições de $0,0293 \angle 4,0208^\circ$ pu e 0 pu para I_{s+}^{EO} e I_{s+}^{FT} respectivamente, conforme as Figuras 57(a) e 57(b). Além disso, constata-se na Figura 57(c) as tensões de pós-falta de $0,8534 \angle 4,0201^\circ$ pu e $0,5661 \angle 0,1356^\circ$ pu para V_{s+}^{EO} e V_{s+}^{FT} respectivamente. Neste caso, verificou-se que apenas o conversor do gerador eólico foi capaz de permanecer conectado à rede e manter constante o fornecimento de P_0 com fator de potência unitário sem exceder a corrente máxima de saída dessa unidade, enquanto que o gerador fotovoltaico foi desconectado da rede por subtensão.

As Tabelas 31 e 32 apresentam os resultados obtidos em componentes de fase utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC e o *software* comercial ANAFAS. Pela

análise da Tabela 30 verifica-se que a falta F-T resultou numa corrente de curto-circuito de 5,3515 pu. Além disso, verifica-se que apenas as tensões de fase de pós-falta na barra de instalação gerador eólico encontram-se na faixa de operação dos conversores. No caso do gerador fotovoltaico, a tensão na fase a é inferior a V_{min} , razão pela qual essa unidade foi desconectada. Ademais o comparativo das tabelas demonstra que os resultados obtidos com o algoritmo proposto para o controle FPC são iguais aos fornecidos pelo ANAFAS considerando-se o mesmo número de casas decimais.

Tabela 31 – Resultados obtidos para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	5,3515 $-89,8643^\circ$	0,0000 $-102,7778^\circ$	0,0000 $103,0491^\circ$
I_{EO}	0,0293 $4,0208^\circ$	0,0293 $-115,9792^\circ$	0,0293 $124,0208^\circ$
I_{FT}	0,0000 $0,0000^\circ$	0,0000 $0,0000^\circ$	0,0000 $0,0000^\circ$
V_{EO}	0,7093 $4,8110^\circ$	0,9416 $-108,6601^\circ$	0,9261 $115,9660^\circ$
V_{FT}	0,1324 $0,1355^\circ$	0,8684 $-94,2347^\circ$	0,8684 $94,5060^\circ$

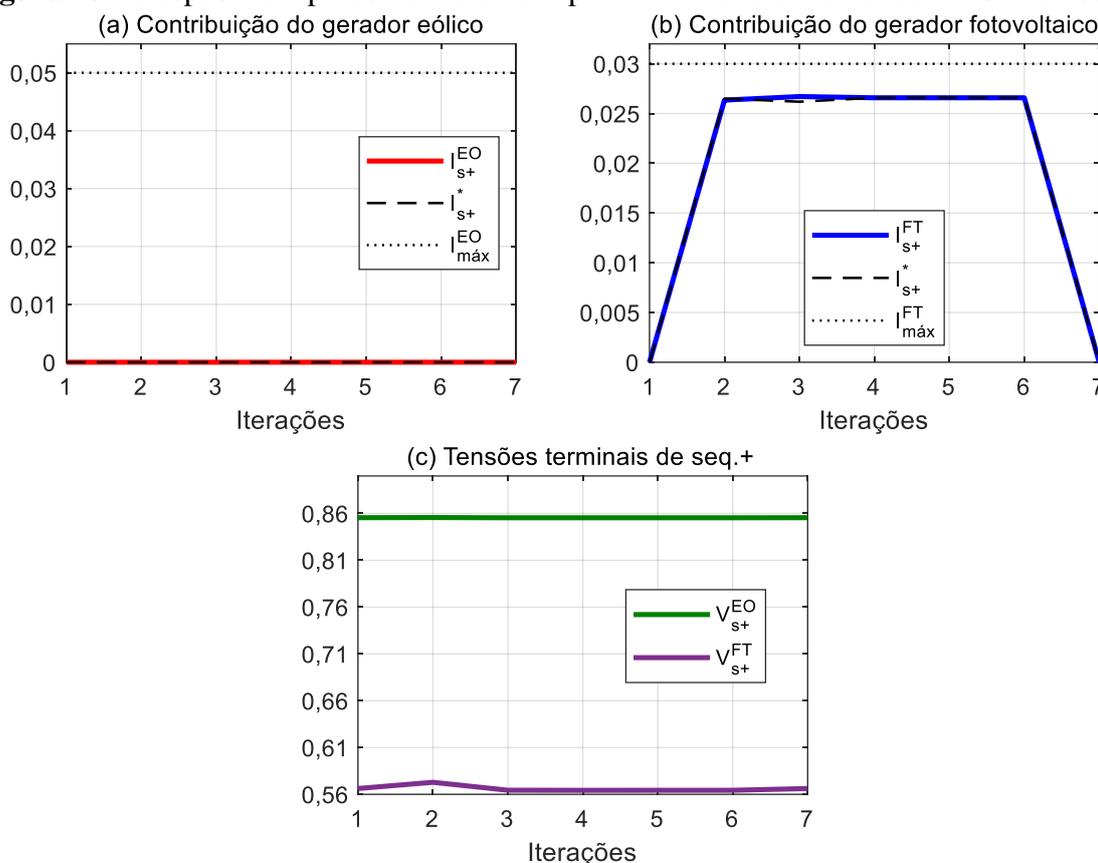
Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 32 – Resultados obtidos para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 5 utilizando-se o ANAFAS.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	5,352 $-89,9^\circ$	0,000 $-102,8^\circ$	0,000 $103,0^\circ$
I_{EO}	0,029 $4,0^\circ$	0,029 $-116,0^\circ$	0,029 $124,0^\circ$
I_{FT}	0,000 $0,000^\circ$	0,000 $0,000^\circ$	0,000 $0,000^\circ$
V_{EO}	0,709 $4,8^\circ$	0,942 $-108,7^\circ$	0,926 $116,0^\circ$
V_{FT}	0,132 $0,1^\circ$	0,868 $-94,2^\circ$	0,868 $94,5^\circ$

Fonte: (CEPEL, 2018).

Avaliou-se ainda para a falta F-T a resposta dos conversores utilizando-se o modo de controle RFT. Conforme apresentado na Figura 58, o processo iterativo alcançou convergência em apenas 7 iterações e resultou, conforme as Figuras 58(a) e 58(b), em contribuições iguais a zero para ambos os conversores. Além disso, verifica-se pela Figura 58(c) as tensões pós-falta de 0,8555| $0,0000^\circ$ pu para V_{s+}^{EO} e de 0,5662| $0,0000^\circ$ pu para V_{s+}^{FT} . Neste caso, observa-se que a tensão pós-falta resultante para V_{s+}^{EO} encontra-se na banda morta do controle FRT, ou seja, no intervalo de tensão no qual não há injeção de corrente reativa adicional; ao passo que o conversor do gerador fotovoltaico foi desconectado por subtensão.

Figura 58 – Resposta em pu do controle FRT para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 5.

No modo de controle FRT constatou-se ainda ao fim do processo iterativo que não há injeção de potência pelos conversores tendo em vista que ambos não contribuem para o curto-circuito. A Tabela 33 apresenta os resultados obtidos para a falta F-T na barra 5 em componentes de fase. Por essa tabela, verifica-se que a falta resultou numa corrente de curto-circuito de 5,3524 pu, que é cerca de 0,02 % superior à corrente de curto obtida para o controle FPC. Além disso, também se verifica que a tensão na fase a da barra de conexão do gerador fotovoltaico é inferior a V_{min} , razão pela qual essa unidade foi desconectada.

Tabela 33 – Resultados obtidos para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 5 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	5,3524 $-90,0000^\circ$	0,0000 $-102,9134^\circ$	0,0000 $102,9134^\circ$
I_{EO}	0,0000 $0,0000^\circ$	0,0000 $0,0000^\circ$	0,0000 $0,0000^\circ$
I_{FT}	0,0000 $0,0000^\circ$	0,0000 $0,0000^\circ$	0,0000 $0,0000^\circ$
V_{EO}	0,7109 $0,0000^\circ$	0,9361 $-112,3161^\circ$	0,9361 $112,3161^\circ$
V_{FT}	0,1324 $0,0002^\circ$	0,8686 $-94,3704^\circ$	0,8686 $94,3704^\circ$

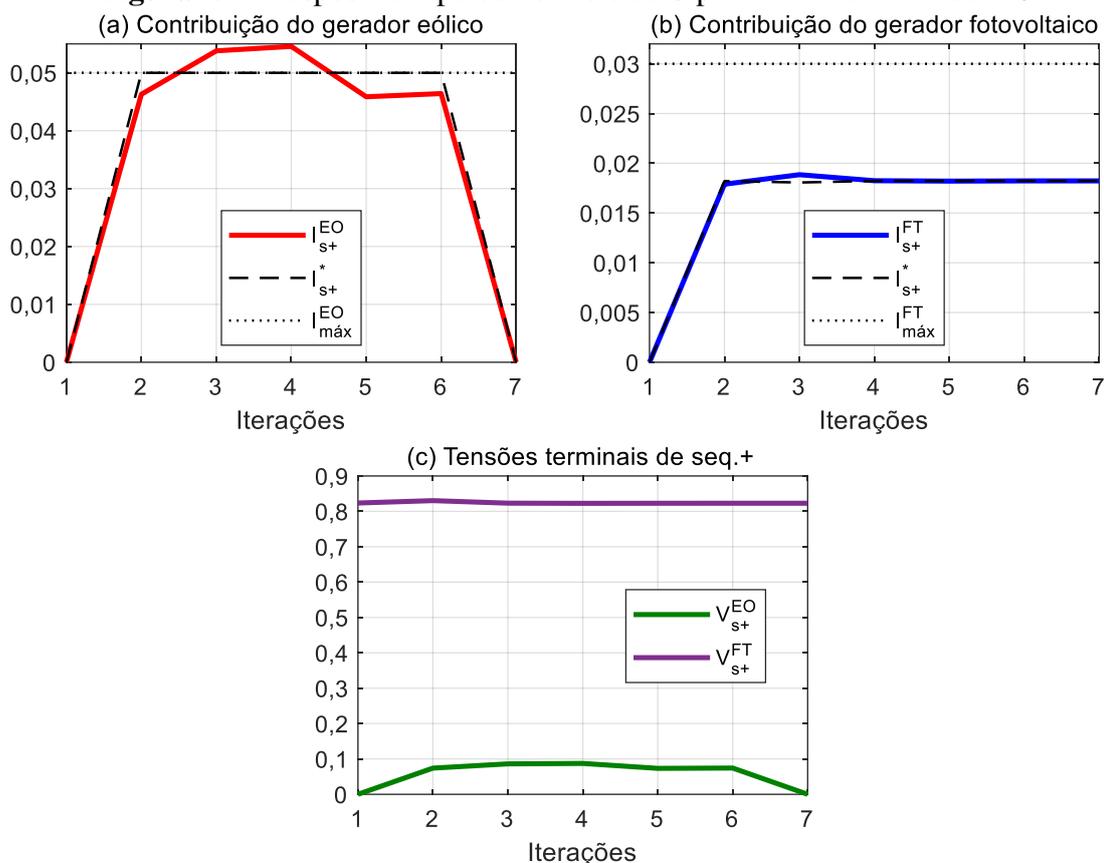
Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.3 Faltas na barra 9

Esta seção apresenta os resultados obtidos para as faltas FFF, FFF-T, FF, FF-T e F-T na barra 9 do sistema de 17 barras da Figura 36.

5.2.3.1 Falta trifásica

A Figura 59 apresenta a resposta dos conversores no controle FPC para uma falta FFF na barra 9 do sistema de 17 barras. Nessa figura, verifica-se que o processo iterativo alcançou convergência em 7 iterações e resultou nas contribuições de 0 pu para I_{s+}^{EO} e $0,0182|2,3200^\circ$ pu para I_{s+}^{FT} , conforme as Figuras 59 (a) e 59(b) respectivamente. Além disso, constata-se na Figura 59(c) as tensões de pós-falta de $0,0000|89,9960^\circ$ pu e $0,8229|2,3201^\circ$ pu para V_{s+}^{EO} e V_{s+}^{FT} respectivamente. Neste caso, verificou-se que apenas o conversor do gerador fotovoltaico foi capaz de permanecer conectado à rede e manter constante o fornecimento de P_0 com fator de potência unitário sem exceder a corrente máxima de saída dessa unidade. Por outro lado, a proximidade do gerador eólico ao ponto de falta resultou na desconexão do conversor por subtensão.

Figura 59 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FFF na barra 9.

Fonte: Autoria própria (2019).

As Tabelas 34 e 35 apresentam os resultados obtidos em componentes de fase utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC e o *software* comercial ANAFAS. Pela análise da Tabela 34 verifica-se que a falta FFF resultou numa corrente de curto-circuito de 2,1781 pu. Além disso, verifica-se que apenas as tensões de fase de pós-falta na barra de instalação gerador fotovoltaico encontram-se na faixa de operação dos conversores. No caso do gerador eólico, as tensões de fase foram inferiores a $V_{mín}$, razão pela qual essa unidade foi desconectada. Ademais, o comparativo das tabelas demonstra que os resultados obtidos com o algoritmo proposto para o controle FPC são iguais aos fornecidos pelo ANAFAS considerando-se o mesmo número de casas decimais.

Tabela 34 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	2,1781 -89,9155°	2,1781 150,0846°	2,1781 30,0846°
I_{EO}	0,0000 0,0000°	0,0000 0,0000°	0,0000 0,0000°
I_{FT}	0,0182 2,3200°	0,0182 -117,6800°	0,0182 122,3200°
V_{EO}	0,0000 89,9960°	0,0000 -30,0040°	0,0000 -150,0040°
V_{FT}	0,8229 2,3201°	0,8229 -117,6799°	0,8229 122,3201°

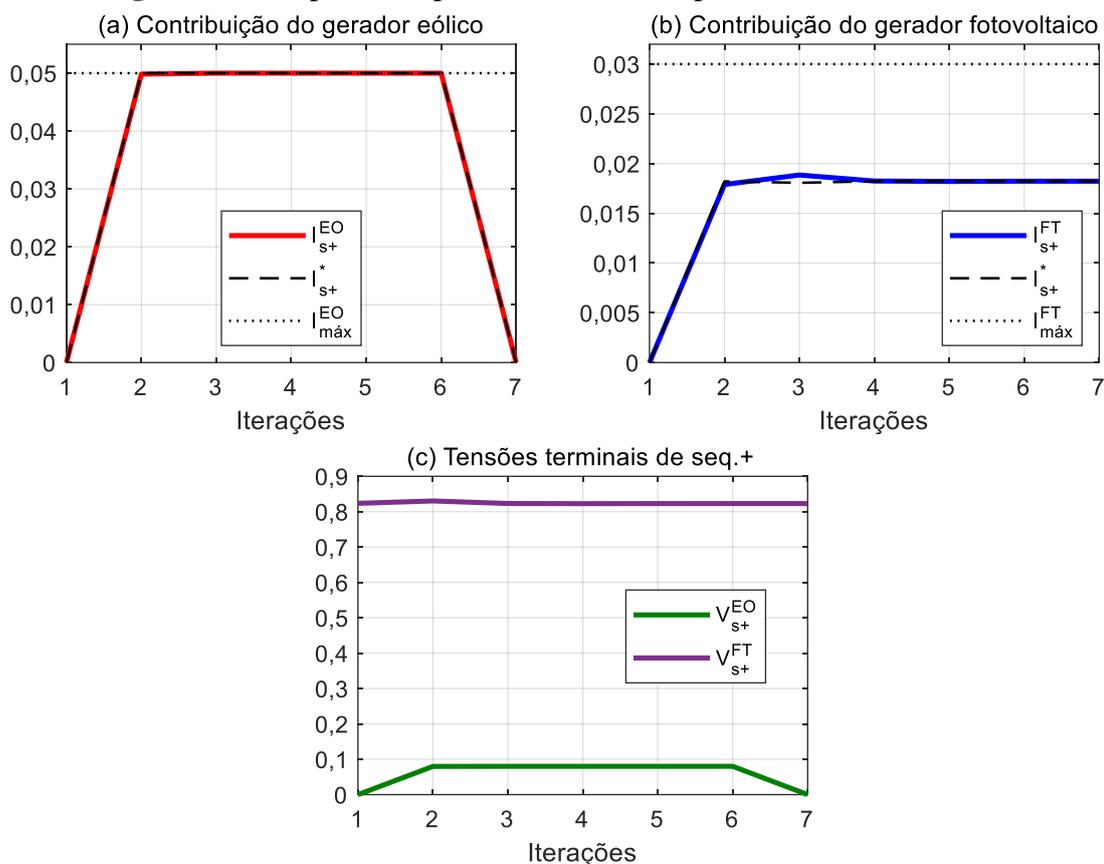
Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 35 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 9 utilizando-se o ANAFAS.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	2,178 -90,0°	2,178 150,1°	2,178 30,1°
I_{EO}	0,000 0,000°	0,000 0,000°	0,000 0,000°
I_{FT}	0,018 2,3°	0,018 -117,7°	0,018 122,3°
V_{EO}	0,000 90,0°	0,000 -30,0°	0,000 -150,0°
V_{FT}	0,823 2,3°	0,823 -117,7°	0,823 122,3°

Fonte: (CEPEL, 2018).

Avaliou-se ainda para a falta FFF a resposta dos conversores utilizando-se o modo de controle RFT, cujos resultados estão apresentados na Figura 60. Nessa figura, verifica-se que o processo iterativo também alcançou convergência em 7 iterações e resultou, conforme as Figuras 60(a) e 60(b), nas contribuições de 0 pu e 0,0182|2,3200° pu para I_{s+}^{EO} e I_{s+}^{FT} respectivamente. Verifica-se ainda pela Figura 60(c) as tensões pós-falta de 0 pu para V_{s+}^{EO} e 0,8229|2,3201° pu para V_{s+}^{FT} . Neste caso, observa-se que, mesmo no modo FRT, as tensões terminais na barra do gerador eólico foram suficientemente baixas para provocar a desconexão do gerador por subtensão. Além disso, com o gerador eólico desconectado, observou-se injeções de potência iguais às obtidas para o controle FPC, ou seja, P_0 com fator de potência unitário pelo conversor do gerador fotovoltaico e 0 pu de potência ativa pelo conversor do gerador eólico.

Figura 60 - Resposta em pu do controle FRT para a falta FFF na barra 9.

Ainda para o modo de controle FRT, a Tabela 36 apresenta os resultados obtidos para a falta FFF na barra 9 em componentes de fase. Por essa tabela, verificam-se resultados similares aos obtidos para o modo de controle FPC, tendo em vista que o conversor do gerador eólico foi novamente desconectado por subtensão.

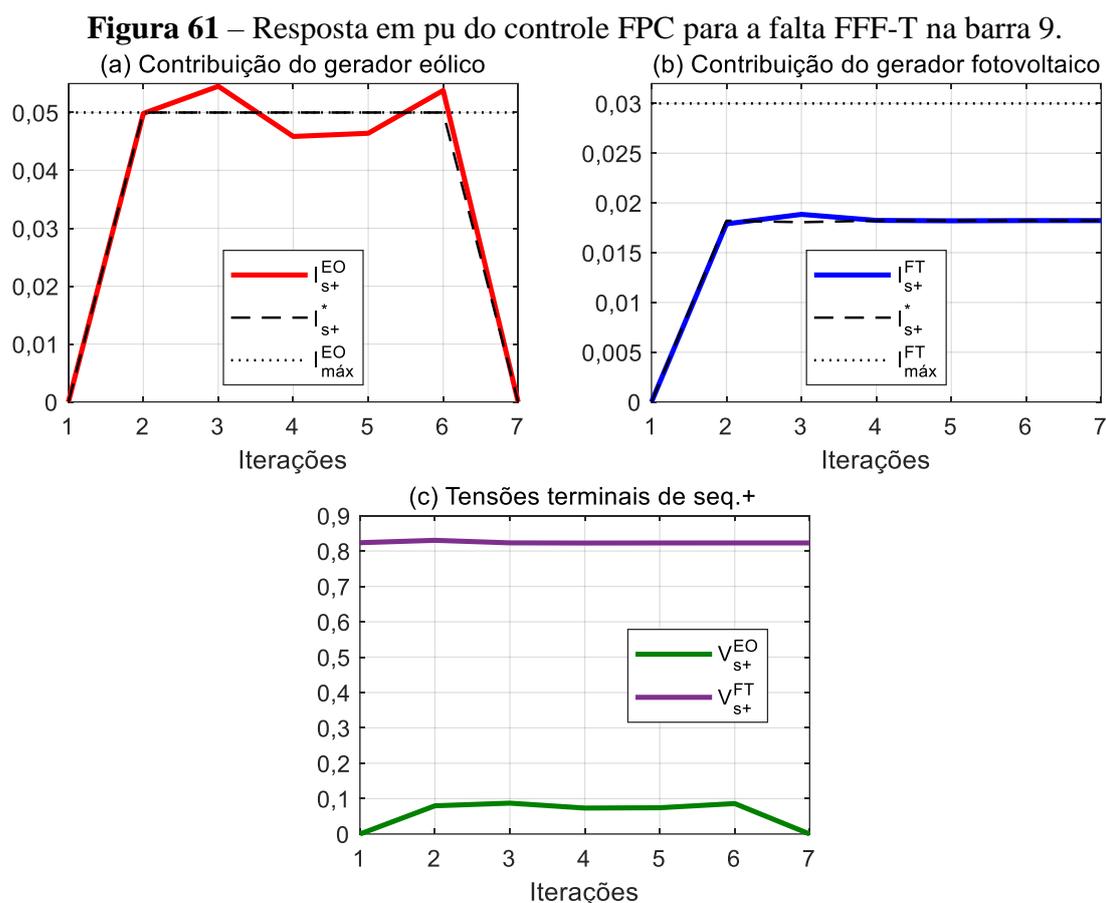
Tabela 36 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	2,1781 -89,9155°	2,1781 150,0846°	2,1781 30,0846°
I_{EO}	0,0000 0,0000°	0,0000 0,0000°	0,0000 0,0000°
I_{FT}	0,0182 2,3200°	0,0182 -117,6800°	0,0182 122,3200°
V_{EO}	0,0000 89,9960°	0,0000 -30,0040°	0,0000 -150,0040°
V_{FT}	0,8229 2,3201°	0,8229 -117,6799°	0,8229 122,3201°

Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.3.2 Falta trifásica envolvendo a terra

A Figura 61 apresenta a resposta dos conversores no controle FPC para uma falta FFF-T na barra 9 do sistema de 17 barras da Figura 36. Neste caso, o processo iterativo também alcançou convergência em 7 iterações e resultou em contribuições, tensões terminais de pós-falta e injeções de potência iguais às obtidas para a falta FFF nessa barra, visto que $Z = 0$.



Fonte: Autoria própria (2019).

Para efeito comparativo, as Tabelas 36 e 37 apresentam os resultados obtidos em componentes de fase utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC e o *software* comercial ANAFAS. A análise comparativa dessas tabelas demonstra que os resultados obtidos com o algoritmo são iguais aos fornecidos pelo ANAFAS considerando-se o mesmo número de casas decimais. Além disso, fica evidente que os resultados em componente de fase também coincidem com os resultados obtidos nesse domínio para a falta FFF.

Tabela 37 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	2,1781 $-89,9155^\circ$	2,1781 $150,0846^\circ$	2,1781 $30,0846^\circ$
I_{EO}	0,0000 $0,0000^\circ$	0,0000 $0,0000^\circ$	0,0000 $0,0000^\circ$
I_{FT}	0,0182 $2,3200^\circ$	0,0182 $-117,6800^\circ$	0,0182 $122,3200^\circ$
V_{EO}	0,0000 $89,9960^\circ$	0,0000 $-30,0040^\circ$	0,0000 $-150,0040^\circ$
V_{FT}	0,8229 $2,3201^\circ$	0,8229 $-117,6799^\circ$	0,8229 $122,3201^\circ$

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 38 – Resultados obtidos para a falta FFF na barra 9 utilizando-se o ANAFAS.

I_{CC}	2,178 $-90,0^\circ$	2,178 $150,1^\circ$	2,178 $30,1^\circ$
I_{EO}	0,000 $0,000^\circ$	0,000 $0,000^\circ$	0,000 $0,000^\circ$
I_{FT}	0,018 $2,3^\circ$	0,018 $-117,7^\circ$	0,018 $122,3^\circ$
V_{EO}	0,000 $90,0^\circ$	0,000 $-30,0^\circ$	0,000 $-150,0^\circ$
V_{FT}	0,823 $2,3^\circ$	0,823 $-117,7^\circ$	0,823 $122,3^\circ$
I_{CC}	2,178 $-90,0^\circ$	2,178 $150,1^\circ$	2,178 $30,1^\circ$

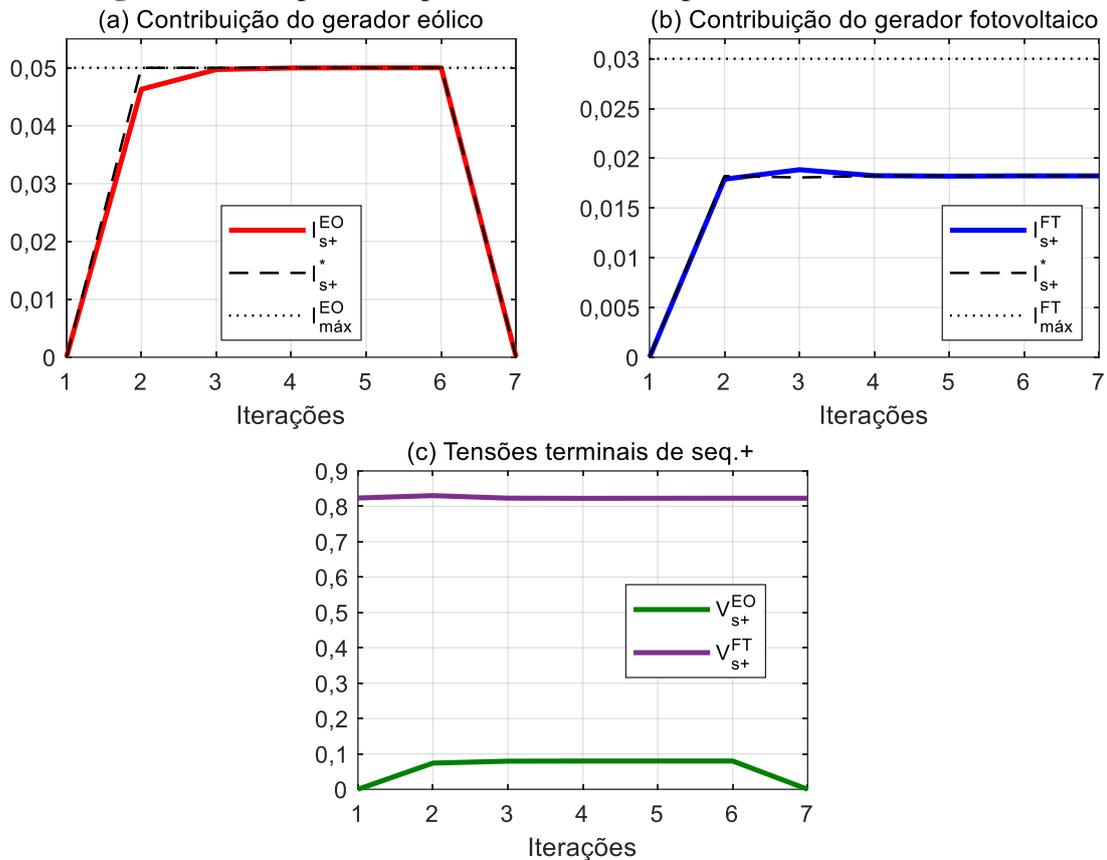
Fonte: (CEPEL, 2018).

Avaliou-se ainda para a falta FFF-T a resposta dos conversores utilizando-se o modo de controle RFT. A Tabela 39 resume os resultados obtidos em componentes de fase e a Figura 62 apresenta a resposta dos conversores. Neste caso, também foram verificados resultados semelhantes aos obtidos para a falta FFF, tanto no domínio das componentes de sequência quanto no domínio das componentes de fase.

Tabela 39 – Resultados obtidos para a falta FFF-T na barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	2,1781 $-89,9155^\circ$	2,1781 $150,0846^\circ$	2,1781 $30,0846^\circ$
I_{EO}	0,0000 $0,0000^\circ$	0,0000 $0,0000^\circ$	0,0000 $0,0000^\circ$
I_{FT}	0,0182 $2,3200^\circ$	0,0182 $-117,6800^\circ$	0,0182 $122,3200^\circ$
V_{EO}	0,0000 $89,9960^\circ$	0,0000 $-30,0040^\circ$	0,0000 $-150,0040^\circ$
V_{FT}	0,8229 $2,3201^\circ$	0,8229 $-117,6799^\circ$	0,8229 $122,3201^\circ$

Fonte: Autoria própria (2019).

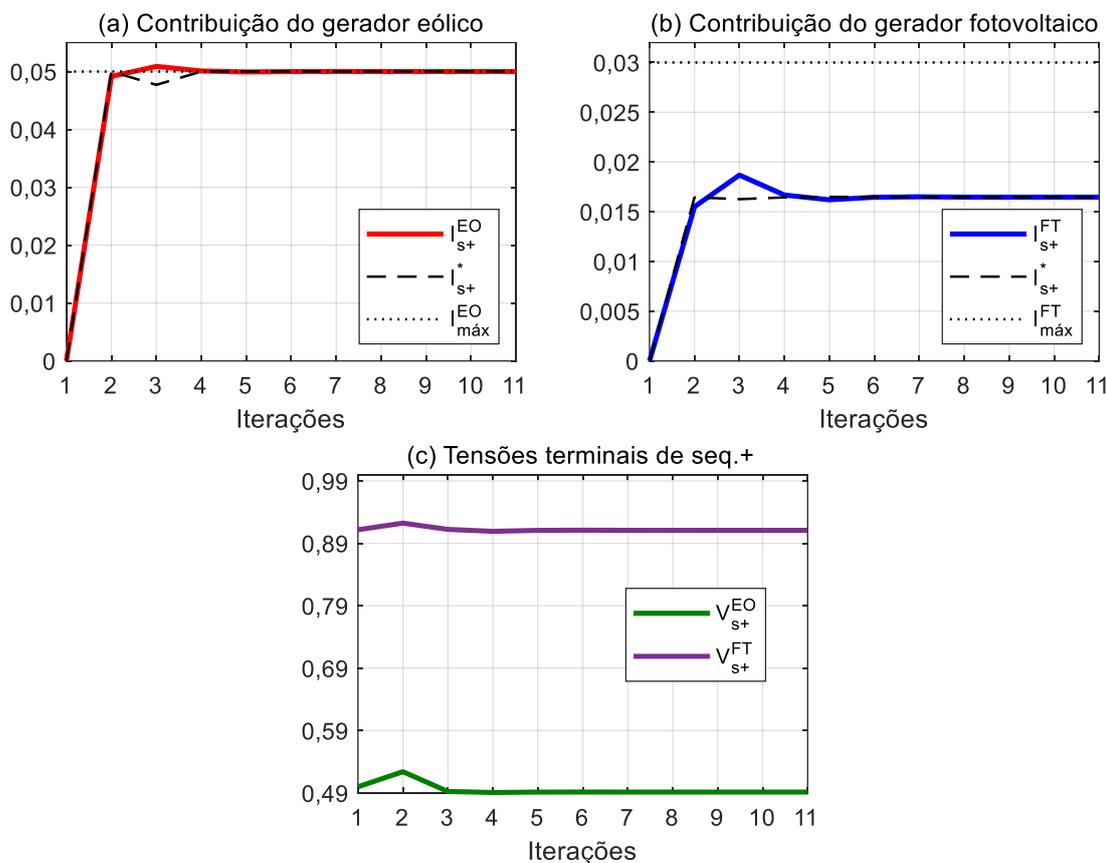
Figura 62 – Resposta em pu do controle FRT para a falta FFF-T na barra 9.

Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.3.3 Falta bifásica

A Figura 63 apresenta a resposta dos conversores no controle FPC para uma falta FF envolvendo as fases a e b da barra 9 do sistema de 17 barras. Nessa figura, verifica-se que o processo iterativo alcançou convergência em 11 iterações e resultou nas contribuições de $0,0500|10,6188^\circ$ pu e $0,0165|2,0262^\circ$ pu para I_{s+}^{EO} e I_{s+}^{FT} respectivamente, conforme as Figuras 63(a) e 63(b). Além disso, constata-se na Figura 63(c) as tensões de pós-falta de $0,4915|10,6188^\circ$ pu e $0,9109|2,0262^\circ$ pu para V_{s+}^{EO} e V_{s+}^{FT} respectivamente. Nesta falta, nota-se que apenas I_{s+}^{EO} satura na corrente máxima em função de V_{s+}^{EO} ser inferior a $V_{Imáx}$.

Figura 63 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 9.



Fonte: Autoria própria (2019).

No modo de controle FPC constatou-se ainda ao fim do processo iterativo que apenas o conversor de gerador fotovoltaico foi capaz de manter a injeção de P_0 com fator de potência unitário. No caso do gerador eólico a saturação de I_{s+}^{EO} possibilitou a injeção de apenas 0,0246 pu de potência ativa.

As Tabelas 40 e 41 apresentam os resultados obtidos em componentes de fase utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC e o *software* comercial ANAFAS. Pela análise da Tabela 40 verifica-se que a falta FF resultou numa corrente de curto-circuito de 1,8789 pu. Além disso, verifica-se que as tensões de fase de pós-falta nas barras de instalação dos conversores encontram-se na faixa de operação dos conversores, razão pela qual nenhuma das unidades foi desligada.

Tabela 40 – Resultados obtidos para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	1,8789 -58,6253°	1,8789 121,3747°	0,0000 121,3747°
I_{EO}	0,0500 10,6188°	0,0500 -109,3812°	0,0500 130,6188°
I_{FT}	0,0165 2,0262°	0,0165 -117,9738°	0,0165 122,0262°
V_{EO}	0,4242 -54,7926°	0,5622 -53,4609°	0,9863 125,9665°
V_{FT}	0,8694 -2,9622°	0,8712 -112,9298°	0,9988 121,9689°

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 41 – Resultados obtidos para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 9 utilizando-se o ANAFAS.

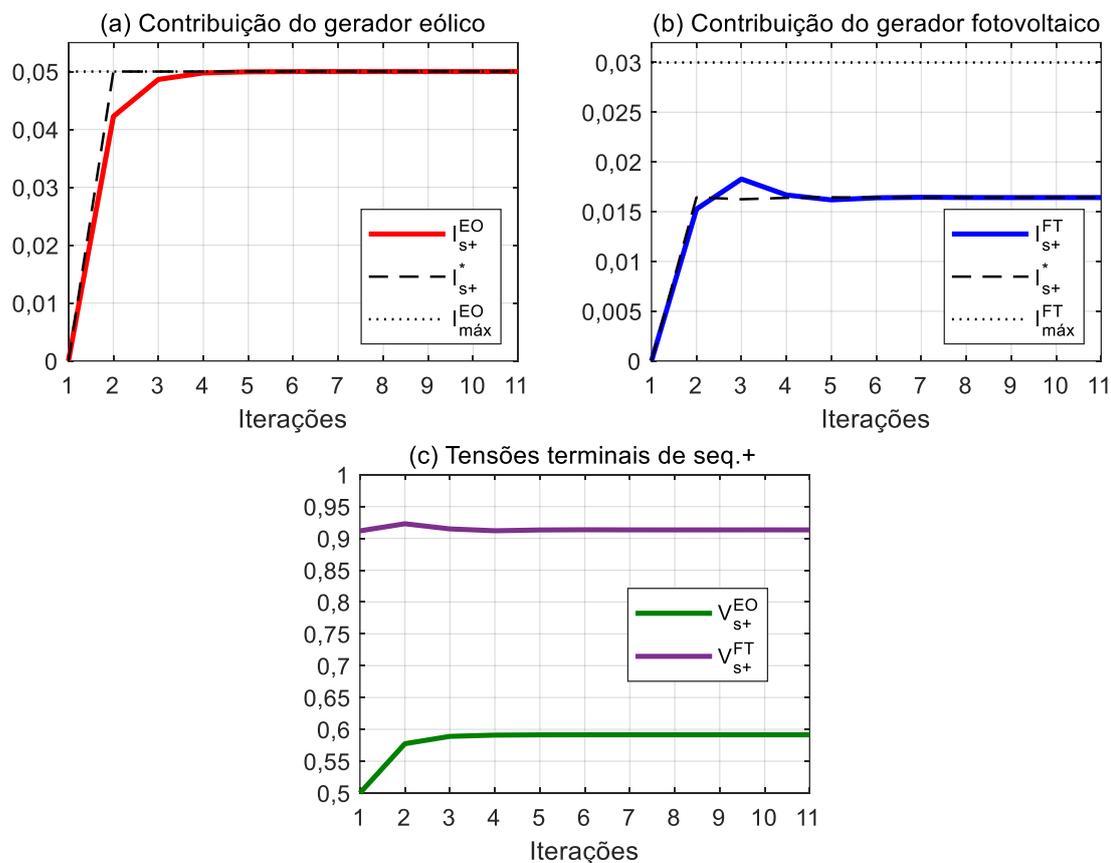
Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	1,879 -58,6°	1,879 121,4°	0,000 121,4°
I_{EO}	0,050 10,6°	0,050 -109,4°	0,050 130,6°
I_{FT}	0,017 2,0°	0,017 -118,0°	0,017 122,0°
V_{EO}	0,424 -54,8°	0,562 -53,5°	0,986 126,0°
V_{FT}	0,869 -3,0°	0,871 -113,0°	0,999 122,0°

Fonte: (CEPEL, 2018).

Pelo comparativo das Tabelas 40 e 41 observa-se também que os resultados obtidos com o algoritmo proposto para o controle FPC são iguais aos fornecidos pelo ANAFAS considerando-se o mesmo número de casas decimais.

Avaliou-se ainda para a falta FF a resposta dos conversores utilizando-se o modo de controle RFT, cujos resultados estão apresentados na Figura 64. Por essa figura, observa-se que o processo iterativo também alcançou convergência em 11 iterações e resultou, conforme as Figuras 64(a) e 64(b), nas contribuições de 0,0500|-89,9238° pu e 0,0164|1,8912° pu para I_{s+}^{EO} e I_{s+}^{FT} respectivamente. Além disso, verifica-se pela Figura 64(c) que a injeção de corrente reativa adicional pelo conversor do gerador eólico resultou nas tensões de 0,5915|0,0762° pu e 0,9133|1,8913° pu para V_{s+}^{EO} e V_{s+}^{FT} respectivamente, as quais correspondem a uma elevação percentual de aproximadamente 20,35% para V_{s+}^{EO} e 0,26% para V_{s+}^{FT} em relação às tensões obtidas com o modo de controle FPC.

Figura 64 – Resposta em pu do controle FRT para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 9.



Fonte: Autoria própria (2019).

No modo de controle FRT constatou-se ainda ao fim do processo iterativo as injeções de 0,0296 pu de potência reativa pelo conversor do gerador eólico e 0,0150 pu de potência ativa pelo gerador fotovoltaico. A Tabela 42 apresenta os resultados obtidos em componentes de fase.

Pela Tabela 42 verifica-se que a falta resultou numa corrente de curto-circuito de 1,9296 pu, que é cerca de 2,70 % superior à corrente de curto obtida para o controle FPC. Além disso, também se verifica que as tensões de fase de pós-falta nas barras de instalação das UGDCFs encontram-se na faixa de operação dos conversores, razão pela qual nenhuma das unidades foi desligada.

Tabela 42 – Resultados obtidos para a falta FF envolvendo as fases a e b da barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.

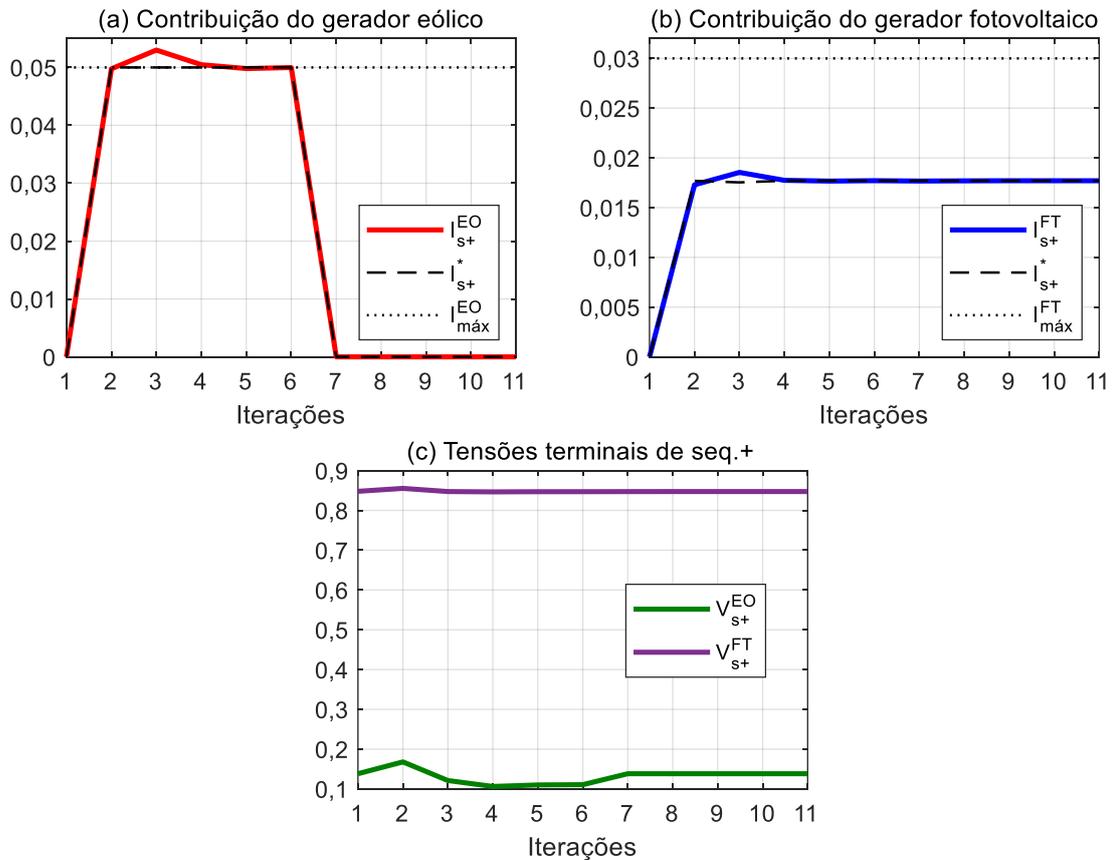
Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	1,9296 -59,9238°	1,9296 120,0762°	0,0000 120,0762°
I_{EO}	0,0500 -89,9238°	0,0500 150,0762°	0,0500 30,0762°
I_{FT}	0,0164 1,8912°	0,0164 -118,1088°	0,0164 121,8912°
V_{EO}	0,5558 -52,7630°	0,5558 -67,0846°	1,1029 120,0762°
V_{FT}	0,8691 -3,1710°	0,8743 -112,8885°	1,0035 121,7281°

Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.3.4 Falta bifásica envolvendo a terra

A Figura 65 apresenta a resposta dos conversores no controle FPC para uma falta FF-T na barra 9 do sistema de 17 barras da Figura 36.

Figura 65 – Resposta em pu do controle FPC para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 9.



Fonte: Autoria própria (2019).

Verifica-se na Figura 65 que o processo iterativo alcançou convergência em 11 iterações e resultou nas contribuições de 0 pu para I_{s+}^{EO} e $0,0177|2,1906^\circ$ pu para I_{s+}^{FT} , conforme as Figuras 65(a) e 65(b) respectivamente. Além disso, constata-se na Figura 65(c) as tensões de pós-falta de $0,1382|0,0822^\circ$ pu e $0,8473|2,1906^\circ$ pu para V_{s+}^{EO} e V_{s+}^{FT} respectivamente. Neste caso, verifica-se que apenas o conversor do gerador fotovoltaico foi capaz de permanecer conectado à rede e manter constante o fornecimento de P_0 com fator de potência unitário sem exceder a corrente máxima de saída dessa unidade. Por outro lado, a proximidade do gerador eólico ao ponto de falta resultou na desconexão do conversor por subtensão.

Para efeito comparativo, as Tabelas 43 e 44 apresentam os resultados obtidos em componentes de fase utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC e o *software* comercial ANAFAS.

Tabela 43 – Resultados obtidos para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	3,0241 $-111,3287^\circ$	3,0241 $171,4929^\circ$	0,0000 $120,0822^\circ$
I_{EO}	0,0000 $0,0000^\circ$	0,0000 $0,0000^\circ$	0,0000 $0,0000^\circ$
I_{FT}	0,0177 $2,1906^\circ$	0,0177 $-117,8094^\circ$	0,0177 $122,1906^\circ$
V_{EO}	0,1382 $-59,9180^\circ$	0,1382 $-59,9178^\circ$	0,2765 $120,0821^\circ$
V_{FT}	0,8346 $0,7720^\circ$	0,8362 $-116,3321^\circ$	0,8717 $122,1316^\circ$

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 44 – Resultados obtidos para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 9 utilizando-se o ANAFAS.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	3,024 $-111,3^\circ$	3,024 $171,5^\circ$	0,000 $120,1^\circ$
I_{EO}	0,000 $0,0^\circ$	0,000 $0,0^\circ$	0,000 $0,0^\circ$
I_{FT}	0,018 $2,2^\circ$	0,018 $-117,8^\circ$	0,018 $122,2^\circ$
V_{EO}	0,138 $-59,9^\circ$	0,138 $-59,9^\circ$	0,277 $120,1^\circ$
V_{FT}	0,835 $0,8^\circ$	0,836 $-116,3^\circ$	0,872 $122,1^\circ$

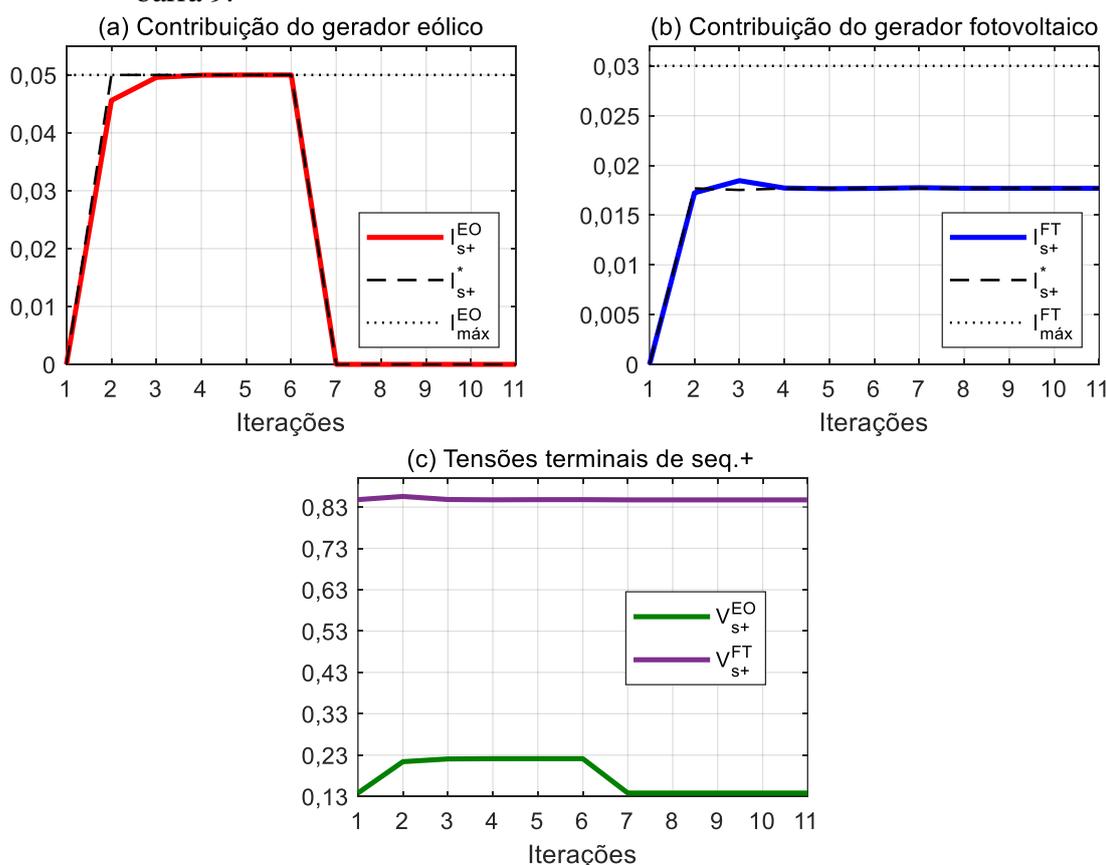
Fonte: (CEPEL, 2018).

Pela análise da Tabela 43 verifica-se que a falta FF-T resultou numa corrente de curto-circuito de 3,0241 pu. Além disso, verifica-se que apenas as tensões de fase de pós-falta na barra de instalação gerador fotovoltaico encontram-se na faixa de operação dos conversores. No caso do gerador eólico, as tensões nas fases a e b são inferiores a V_{min} , razão pela qual essa

unidade foi desconectada. Ademais o comparativo das Tabelas 43 e 44 demonstra que os resultados obtidos com o algoritmo proposto para o controle FPC são iguais aos fornecidos pelo ANAFAS considerando-se o mesmo número de casas decimais.

Avaliou-se ainda para a falta FF-T a resposta dos conversores utilizando-se o modo de controle RFT. A Figura 66 apresenta os resultados obtidos nessas condições.

Figura 66 – Resposta em pu do controle FRT para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 9.



Fonte: Autoria própria (2019).

Verifica-se na Figura 66 que o processo iterativo também alcançou convergência em 11 iterações e resultou, conforme as Figuras 66(a) e 66(b), nas contribuições de 0 pu e 0,0177|2,1906° pu para I_{s+}^{EO} e I_{s+}^{FT} respectivamente. Além disso, verifica-se pela Figura 66(c) as tensões pós-falta de 0,1382|0,0822° pu para V_{s+}^{EO} e 0,8473|2,1906° pu para V_{s+}^{FT} . Neste caso, constata-se que, mesmo no modo FRT, o conversor do gerador eólico foi incapaz de permanecer conectado à rede e foi desconectado por subtensão. Com o conversor do gerador eólico desconectado, observou-se resultados similares aos obtidos com o modo FPC para as contribuições, tensões pós-falta e injeções de potência. A Tabela 45 apresenta os resultados obtidos para a falta FF-T na barra 9 em componentes de fase.

Tabela 45 – Resultados obtidos para a falta FF-T envolvendo as fases a e b da barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.

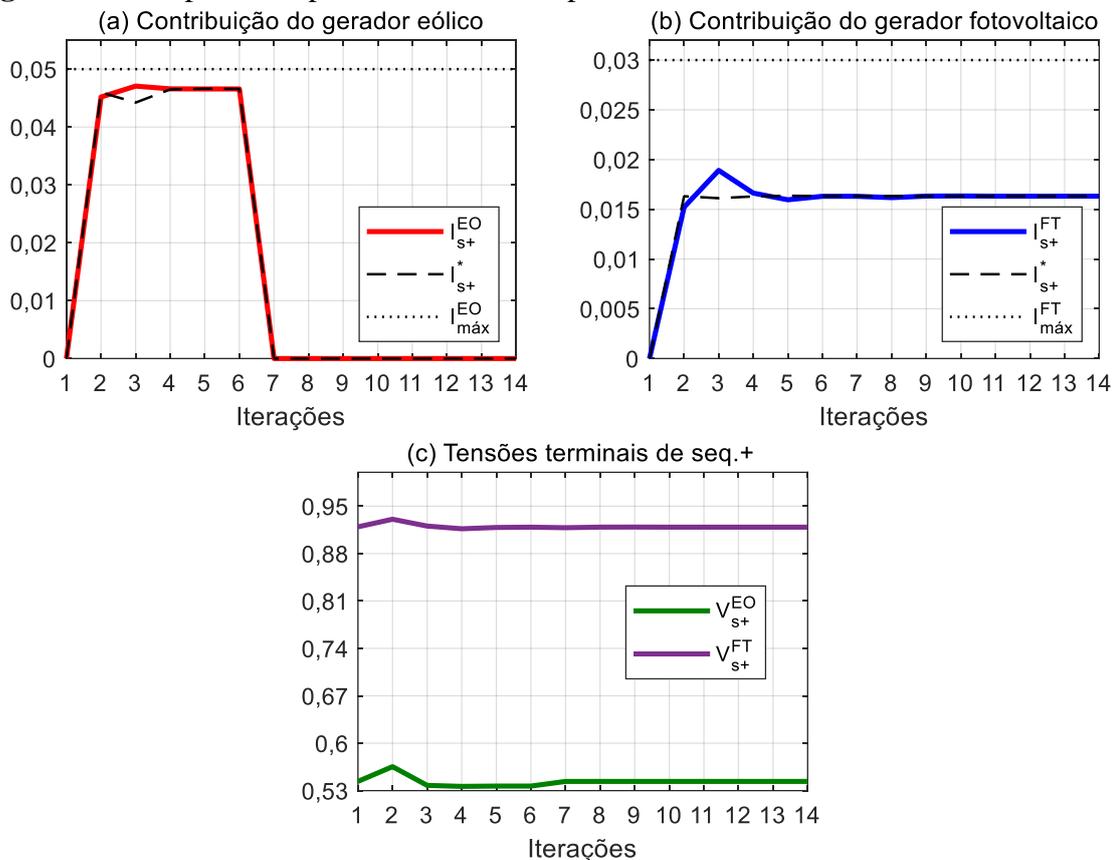
Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	3,0241 $-111,3287^\circ$	3,0241 $171,4929^\circ$	0,0000 $120,0822^\circ$
I_{EO}	0,0000 $0,0000^\circ$	0,0000 $0,0000^\circ$	0,0000 $0,0000^\circ$
I_{FT}	0,0177 $2,1906^\circ$	0,0177 $-117,8094^\circ$	0,0177 $122,1906^\circ$
V_{EO}	0,1382 $-59,9180^\circ$	0,1382 $-59,9178^\circ$	0,2765 $120,0821^\circ$
V_{FT}	0,8346 $0,7720^\circ$	0,8362 $-116,3321^\circ$	0,8717 $122,1316^\circ$

Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.3.5 Falta fase à terra

A Figura 67 apresenta a resposta dos conversores no controle FPC para uma falta F-T envolvendo a fase a da barra 9 do sistema de 17 barras da Figura 36.

Figura 67 – Resposta em pu do controle FPC para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 9.



Verifica-se na Figura 67 que o processo iterativo alcançou convergência em 14 iterações e resultou nas contribuições de 0 pu e $0,0163|1,8684^\circ$ pu para I_{s+}^{EO} e I_{s+}^{FT} respectivamente, conforme as Figuras 67(a) e 67(b). Além disso, constata-se na Figura 67(c) as tensões de pós-falta de $0,5436|0,0757^\circ$ pu e $0,9190|1,8684^\circ$ pu para V_{s+}^{EO} e V_{s+}^{FT} respectivamente. Neste caso, verificou-se que apenas o conversor do gerador fotovoltaico foi capaz de permanecer conectado à rede e manter constante o fornecimento de P_0 com fator de potência unitário sem exceder a corrente máxima de saída dessa unidade, enquanto que o gerador eólico foi desconectado da rede por subtensão.

Já Tabelas 46 e 47 apresentam os resultados obtidos em componentes de fase utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC e o *software* comercial ANAFAS. Pela análise da Tabela 46, verifica-se que a falta F-T resultou numa corrente de curto-circuito de 2,9822 pu. Além disso, verifica-se que apenas as tensões de fase de pós-falta na barra de instalação gerador fotovoltaico encontram-se na faixa de operação dos conversores. No caso do gerador eólico, a tensão na fase a é inferior a V_{min} , razão pela qual essa unidade foi desconectada. Ademais o comparativo das tabelas demonstra que os resultados obtidos com o algoritmo proposto para o controle FPC são iguais aos fornecidos pelo ANAFAS considerando-se o mesmo número de casas decimais.

Tabela 46 – Resultados obtidos para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FPC.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	$2,9822 -89,9243^\circ$	$0,0000 -98,5135^\circ$	$0,0000 98,6649^\circ$
I_{EO}	$0,0000 0,0000^\circ$	$0,0000 0,0000^\circ$	$0,0000 0,0000^\circ$
I_{FT}	$0,0163 1,8684^\circ$	$0,0163 -118,1316^\circ$	$0,0163 121,8684^\circ$
V_{EO}	$0,0872 0,0758^\circ$	$0,8671 -92,8065^\circ$	$0,8671 92,9580^\circ$
V_{FT}	$0,8385 2,0406^\circ$	$0,9638 -114,0592^\circ$	$0,9597 117,6276^\circ$

Fonte: A autoria própria (2019).

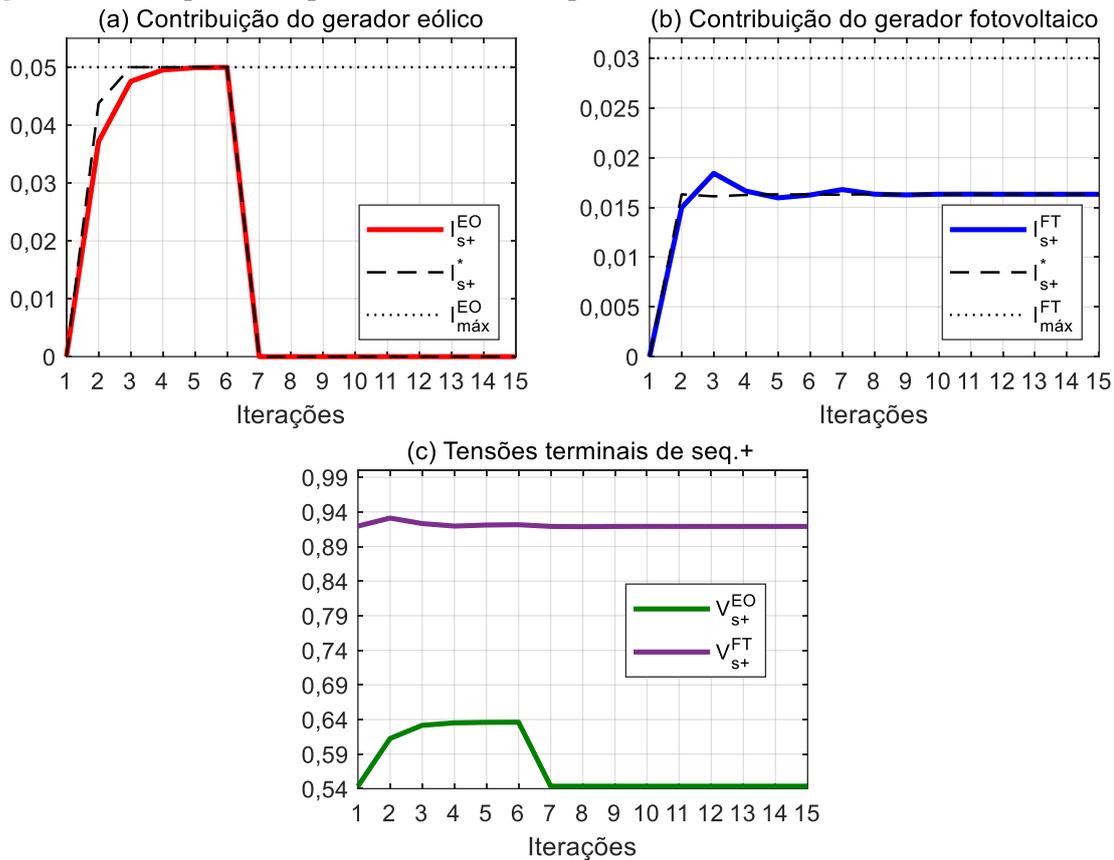
Tabela 47 – Resultados obtidos para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 9 utilizando-se o ANAFAS.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	$2,982 -89,9^\circ$	$0,000 -98,5^\circ$	$0,000 98,7^\circ$
I_{EO}	$0,000 0,0^\circ$	$0,000 0,0^\circ$	$0,000 0,0^\circ$
I_{FT}	$0,016 1,9^\circ$	$0,016 -118,1^\circ$	$0,016 121,9^\circ$
V_{EO}	$0,087 0,1^\circ$	$0,867 -92,8^\circ$	$0,867 93,0^\circ$

V_{FT}	0,839 2,0°	0,964 -114,1°	0,960 117,6°
Fonte: (CEPEL, 2018)			

Avaliou-se ainda para a falta F-T a resposta dos conversores utilizando-se o modo de controle RFT. A Figura 68 apresenta os resultados obtidos nesse caso.

Figura 68 – Resposta em pu do controle FRT para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 9.



Conforme a Figura 68, o processo iterativo alcançou convergência em 15 iterações e resultou, conforme as Figuras 68(a) e 68(b), nas contribuições de 0 pu para o conversor do gerador eólico e 0,0163 pu para o conversor do gerador fotovoltaico. Além disso, verifica-se pela Figura 68(c) as tensões pós-falta de 0,5436|0,0757° pu para V_{s+}^{EO} e de 0,9190|1,8684° pu para V_{s+}^{FT} . Neste caso, também verificou-se que apenas o conversor do gerador fotovoltaico foi capaz de permanecer conectado à rede e manter constante o fornecimento de P_0 com fator de potência unitário, enquanto que o gerador eólico foi desconectado da rede por subtensão, mesmo no controle FRT. Com o conversor do gerador eólico desconectado, observou-se resultados similares aos obtidos com o modo FPC para as contribuições, tensões pós-falta e

injeções de potência. A Tabela 48 apresenta os resultados obtidos para a falta FF-T na barra 9 em componentes de fase.

Tabela 48 – Resultados obtidos para a falta F-T envolvendo a fase a da barra 9 utilizando-se o algoritmo proposto para o controle FRT.

Grandezas (pu)	Fase A	Fase B	Fase C
I_{CC}	2,982 -89,9°	0,000 -98,5°	0,000 98,7°
I_{EO}	0,000 0,0°	0,000 0,0°	0,000 0,0°
I_{FT}	0,016 1,9°	0,016 -118,1°	0,016 121,9°
V_{EO}	0,087 0,1°	0,867 -92,8°	0,867 93,0°
V_{FT}	0,839 2,0°	0,964 -114,1°	0,960 117,6°

Fonte: Autoria própria (2019).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente integração de fontes de geração distribuída à rede através de conversores de frequência completos trouxe consigo a necessidade de revisão dos métodos tradicionais de cálculo de curtos-circuitos em estado permanente, uma vez que a corrente de contribuição dos conversores não depende das características elétricas do gerador, mas sim da estratégia de controle aplicada ao conversor e dos requisitos de FRT exigidos pelos procedimentos de rede do operador do sistema.

Neste trabalho foi proposto uma técnica para análise de faltas *shunt* no domínio fasorial em sistemas de potência com geração distribuída acoplada à rede via CFCs que requer dados de fácil acesso aos engenheiros de planejamento e permite a avaliação da contribuição dos conversores para as estratégias de controle de pré-falta FPC, QC e VC, bem como para os requisitos de FRT do ONS.

Na abordagem proposta, o conversor é modelado como uma fonte de corrente controlada por tensão que injeta apenas correntes de sequência positiva com magnitudes e ângulos de fase definidas pelos algoritmos desenvolvidos para as estratégias de controle estudadas. Posteriormente o modelo em fonte de corrente do conversor é convertido em um equivalente de impedância e incluído em um método clássico de análise de faltas baseado na matriz de impedâncias de barra.

Os algoritmos desenvolvidos para as estratégias de controle abordadas foram demonstrados por meio de estudos de caso com um sistema de 2 barras, dos quais pôde-se atestar eficácia dos algoritmos na representação da resposta esperada para o conversor. Além disso, foi realizado ainda um estudo de caso com um sistema de 17 barras contendo duas UGDCFs: um uma turbina eólica tipo IV e um gerador fotovoltaico. Nesse estudo, foram avaliadas as faltas FFF, FFF-T, FF, FF-T e F-T nas barras 5, 6 e 9 do sistema de 17 barras e comparado os resultados obtidos utilizando-se os algoritmos propostos para os modos de controle FPC e RFT com os resultados produzidos pelo *software* comercial ANAFAS.

Nas faltas avaliadas com o algoritmo proposto para o modo FPC foram observados resultados iguais aos fornecidos pelo ANAFAS considerando o mesmo número de casas decimais. Para esse modo de controle, o algoritmo proposto alcançou convergência em até 14 iterações e, assim como o ANAFAS, forneceu contribuições iguais a zero para o gerador fotovoltaico e a turbina eólica nas faltas FFF, FFF-T, FF-T e F-T nas barras 5 e 9 respectivamente, devido à tensão em uma ou mais fases de suas respectivas barras de instalação se encontrarem fora da faixa de operação dos conversores.

Já para as faltas avaliadas com o modo de controle FRT, o qual não é incluso na versão utilizada do ANAFAS, pôde-se observar o efeito positivo da injeção de corrente reativa pelo conversor do gerador eólico na recuperação de sua tensão terminal de sequência positiva. Pela comparação entre as tensões pós-falta obtidas com os modos de controle FRT e FPC, constatou-se um aumento médio de 14,5% e máximo de 23 % para as faltas FFF e FFF-T na barra 6 (PCC do eólico). Na barra de instalação do gerador fotovoltaico, por outro lado, a elevação percentual observada foi inferior a 1% em todas as faltas.

Na corrente de curto-circuito (ponto de falta), o comparativo revelou um aumento médio de apenas 0,69% e máximo de 2,7% para a falta FF na barra 9 (PCC do eólico), demonstrando que o modo FRT não possui impacto significativo na corrente de falta nos casos analisados. No modo FRT também foi verificado o desligamento do gerador fotovoltaico e da turbina eólica por subtensão nas faltas FFF, FFF-T, FF-T e F-T nas barras 5 e 9 respectivamente. No caso da falta F-T na barra 5, também foi observado uma contribuição igual a zero para o eólico em função da tensão pós-falta de sequência positiva se encontrar na banda morta do controle FRT, ou seja, entre 0,85 pu e 1,1 pu.

Por fim, conclui-se que os modelos propostos para as estratégias de controle FPC, VC, QC e FRT apresentaram excelente desempenho na estimação da corrente de contribuição dos conversores em regime permanente. Além disso, com as modificações propostas para inclusão dos equivalentes de impedância dos conversores na matriz de impedâncias, é possível a realização de estudos de curto-circuito em sistemas de potência com topologia radial ou malhada e múltiplas UGDCFs. Como perspectivas para trabalhos futuros, pode-se ainda: generalizar a matriz de impedâncias de falta de modo a permitir a aplicação de faltas série; realizar um estudo comparando-se os resultados obtidos pelos algoritmos propostos com modelos detalhados no domínio do tempo; e implementar algoritmos para retomada de carga na banda morta da estratégia de controle FRT.

7 REFERÊNCIAS

- ABDALRAHMAN, A.; ZEKRY, A.; ALSHAZLY, A. Simulation and Implementation of Grid-connected Inverters. **International Journal of Computer Applications**, v. 60, n. 4, p. 41–49, 18 dez. 2012.
- ANDERSON, P. M. **Analysis of faulted power systems**. IEEE Press, 1995.
- BARAN, M. E.; EL-MARKABY, I. Fault analysis on distribution feeders with distributed generators. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 4, p. 1757–1764, nov. 2005.
- BOLLEN, M. H. **Integration of Distributed Generation in the Power System**. John Wiley & Sons, 2011.
- CEPEL. **Análise de Falhas Simultâneas - ANAFAS versão 7.2.0: Manual do Usuário**, dez. 2017.
- CEPEL. **ANAFAS - Análise de Falhas Simultâneas**. Eletrobras - Centro de Pesquisas em Energia Elétrica, 2018.
- CHEN, S. et al. **Short-circuit calculations considering converter-controlled generation components**. In: 2012 IEEE ENERGYTECH. Maio 2012.
- EL-SHARKAWI, M. A. **Wind Energy: An Introduction**. CRC Press, 2015.
- FISCHER, M.; MENDONÇA, Â. **Representation of variable speed full conversion Wind Energy Converters for steady state short-circuit calculations**. In: PES T D 2012. Maio 2012.
- GÖKSU, Ö. et al. **An iterative approach for symmetrical and asymmetrical Short-circuit calculations with converter-based connected renewable energy sources. Application to wind power**. In: 2012 IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING. Jul. 2012.
- IEEE, J. W. G. **Fault current contributions from wind plants**. In: 2015 68TH ANNUAL CONFERENCE FOR PROTECTIVE RELAY ENGINEERS. Mar. 2015.
- IOV, F. et al. **Fault current contribution from VSC-based wind turbines to the grid**. Proceedings of The Second International Symposium on Electrical and Electronics Engineering, ISEEE08. In: 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRIC AND ELECTRONICS ENGINEERING. Galati, Romênia: 12 set. 2008. Disponível em: <http://vbn.aau.dk/files/16384800/Fault_current_contribution_from_VSC-based_windturbines_to_the_grid.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2019
- JENKINS, N.; EKANAYAKE, J. B.; STRBAC, G. **Distributed generation**. London Institution of Engineering and Technology, 2010.
- KAMARA, W. **Representation of Type 4 wind turbine generator for steady state short-circuit calculations**. Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas: Engenharia Elétrica). Canada: Universidade de Montreal, 2013.

KARAAGAC, U. et al. **Phasor domain modeling of type-IV wind turbine generator for protection studies**. In: 2015 IEEE POWER ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING. Jul. 2015.

MOURA, A. P. et al. IMICV fault analysis method with multiple PV grid-connected inverters for distribution systems. **Electric Power Systems Research**, v. 119, p. 119–125, 1 fev. 2015.

MULJADI, E. et al. **Short circuit current contribution for different wind turbine generator types**. In: IEEE PES GENERAL MEETING. jul. 2010.

NELSON, R. J.; MA, H. **Short-circuit contributions of full-converter wind turbines**. In: 2011 IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING. Jul. 2011.

NEUMANN, T.; ERLICH, I. Short Circuit Current Contribution of a Photovoltaic Power Plant. **IFAC Proceedings Volumes**, 8th Power Plant and Power System Control Symposium. v. 45, n. 21, p. 343–348, 1 jan. 2012.

ONS. **Submódulo 3.6: Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão**, Revisão 2016.12, 16 dez. 2016. Disponível em: <www.ons.org.br>.

SAADAT, H. **Power System Analysis**. 3. ed. EUA: PSA Publishing, 2010.

SANDT, R. VAN DE et al. **Neutral earthing in off-shore wind farm grids**. In: 2009 IEEE BUCHAREST POWERTECH. Jun. 2009.

SATO, F.; FREITAS, W. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia: Fundamentos e prática**. Elsevier Brasil, 2017.

TSILI, M.; PAPATHANASSIOU, S. A review of grid code technical requirements for wind farms. **IET Renewable Power Generation**, v. 3, n. 3, p. 308–332, set. 2009.

VANDERMEULEN, A.; MAURIN, J. **Current source inverter vs. voltage source inverter topology**, 2014. Disponível em: <<http://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/medium-voltage-power-distribution-control-systems/motor-control/literature/other-docs/sc9000-csi-vs-vsi-topology-white-paper-wp020001en.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

VDE. **Technical requirements for the connection and operation of customer installations to the high voltage network**. Abr. 2017. Acesso em: 14 jan. 2019.

WALLING, R. A.; GURSOY, E.; ENGLISH, B. **Current contributions from Type 3 and Type 4 wind turbine generators during faults**. In: PES T D 2012. Maio 2012.